

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA DE LINGOTES DO AÇO AISI H13 ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA¹

Eduardo Netto de Souza²
Roberto Tibúrcio Canito Frota Júnior³
Celso Antonio Barbosa³

Resumo

Durante uma operação de conformação mecânica, os mecanismos de endurecimento, ou aumento da resistência mecânica, crescem de modo a exigir maiores esforços da prensa hidráulica. Por outro lado, mecanismos de amaciamento interagem de forma a concorrer com os de endurecimento, diminuindo assim as solicitações mecânicas até o final do processamento. Os parâmetros de processamento tais como a temperatura, taxa de deformação e a deformação efetiva têm papel fundamental na estrutura final do forjado, pois podem promover a recristalização dinâmica e possível precipitação de novas fases. Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento termomecânico do processo de forjamento em matriz aberta do aço AISI H13 através de análises dos parâmetros de forjamento em lingotes de grandes dimensões em uma prensa hidráulica de 50 MN. Para as análises, utilizou-se de ferramentas computacionais, tais como simulações numéricas por elementos finitos e termodinâmica computacional. Os resultados mostram a influência dos mecanismos de amaciamento do material durante o processamento. Também, os fenômenos implementados na simulação, mostraram boa concordância com o processo real, sendo assim, fundamentais para estabelecer os limites dos parâmetros de processo para melhorar a produtividade sem comprometer a qualidade do produto resultante.

Palavras-chave: Curva de escoamento; Forjamento; Simulação numérica; Grandes lingotes.

ANALYSIS OF PARAMETERS IN OPEN DIE FORGING PROCESS OF AISI H13 STEEL

Abstract

During the forging process, the hardening mechanisms of material increase of efforts in the hydraulic press system. On the other hand, softening mechanisms interact to compete with the hardening of material reducing mechanical stress until the final of process. This work aims to study the thermomechanical behavior of open die forging process of AISI H13 through the analysis of the parameters of large forging ingots in a hydraulic press 50 MN. For the analysis, the computational tools such as numerical simulations were used. The results show the influence of the softening mechanisms of the material during the process, also the implemented phenomena in the software results are in good agreement with the actual process, enabling to carry out the better simulation of the large ingots. The analysis is the key for establishing the limits of the process parameters thus increasing the productivity and product quality.

Key words: Flow stress; Forging; Numerical simulation; Large ingots.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, membro da ABM, Pesquisador da Villares Metals SA, Sumaré, SP, Brasil,

³ Engenheiro Metalurgista, membro da ABM, Diretor de Tecnologia e P&D da Villares Metals SA, Sumaré, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Visando uma maior produtividade na produção de peças forjadas procura-se sempre empregar lingotes de maiores dimensões. No entanto, as restrições no desenvolvimento de um projeto para implementação de lingotes maiores na produção de blocos recai na capacidade da prensa e no atendimento dos requisitos de qualidade do produto final. Em relação à capacidade ou carga máxima da prensa, a força aplicada restringe-se ao grau de encruamento ou de resistência do lingote, à medida que se vai deformando. Além de dar forma à peça, o objetivo do processo é quebrar a estrutura bruta de solidificação através do trabalho mecânico da deformação aplicada, eliminar defeitos internos como rechupes, porosidades e segregações, que normalmente estão localizados na região final do processo de solidificação.^(1,2) A análise da viabilidade do processo e a melhor decisão no seu roteiramento podem ser feitas através de uso de ferramentas computacionais de simulação de processo, evitando desta forma, tentativas e erros. No caso de simulação numérica de forjamento, a implementação de corretas propriedades dos materiais, que refletem os fenômenos físico-metalúrgicos que ocorrem durante o processamento, é de suma importância na simulação do processo. Dados obtidos através de ensaios físicos com materiais dentro das faixas de composição química e estrutura condizente com a realidade devem ser implementados no *software* de forma a trazer maior confiabilidade e realidade à simulação.⁽³⁾ Dessa forma, dados obtidos através de ensaios de torção têm sido os mais apropriados. Lima,⁽⁴⁾ em seu trabalho de obtenção de curvas de escoamento em aços ferramenta AISI D2, coloca as vantagens do ensaio de torção. Dentre as vantagens, os ensaios de torção podem reproduzir os esforços criados no processo em função da influência de parâmetros como temperatura, grau de deformação, velocidade de deformação e tempo de processamento. Os resultados destas simulações físicas traduzem o processamento termomecânico industrial que envolve a aplicação de tensões e temperatura para deformar o metal em uma determinada geometria, mostrando o comportamento dos mecanismos microestruturais de amaciamento sobre os de endurecimento durante o processamento.

Os aços especiais de alta liga, com altos teores de elementos de liga (tipicamente acima de 7%), apresentam uma metalurgia mais complexa, devido à grande quantidade de soluto que é rejeitado durante o processo de solidificação, levando estes materiais a terem maiores níveis de microsegregação. Esta última, por sua vez, depende das condições de solidificação e de processamento que minimizem este efeito. Nos aços ferramenta, por exemplo, estruturas com isotropia máxima podem ser obtidas através de processos especiais de fabricação como no processo ISOMAX[®],⁽⁵⁾ onde se aplica a tecnologia de refusão por eletroescória (ESR). Obviamente, a capacidade de se obter peças com composição química mais homogênea e microestrutura mais uniforme depende do processo de fabricação empregado e, no caso do processamento através de lingotamento convencional, a microsegregação é o principal limitador do processo. Entre os aços ferramenta, o aço AISI H13 é considerado um dos que tem melhor forjabilidade, devido aos menores teores de carbono e elementos de liga em relação às séries D e M, de modo que apresenta uma metalurgia menos complexa.⁽⁶⁾ Apesar disso, a sua produção requer que os parâmetros de processamento sejam estipulados para que o processo atenda os limites que garantam qualidade e produtividade. Os parâmetros relativos à temperatura no processamento mecânico tornam-se mais complexos em função da geração de energia interna de calor devido ao trabalho de

deformação. Quando um material é conformado, a maior parte da energia de deformação é gerada em forma de calor adiabático.⁽⁷⁾ O aumento da temperatura, dependendo da situação, deverá ser considerado na deformação a quente e no roteamento do processo, pois esta variável atua sobre os mecanismos de amaciamento e endurecimento e influencia na difusão. As ferramentas computacionais, tais como a simulação numérica dos processos de forjamento, com as curvas de escoamento e módulo de geração de calor adiabático acoplado, juntamente com as ferramentas de termodinâmica computacional, tornam-se fundamentais para a compreensão dos fenômenos físicos metalúrgicos durante o processo de forjamento.

2 ASPECTOS METALÚRGICOS

Durante o forjamento, a prensa aumenta sua força em função da reação oferecida pelo forjado em que os mecanismos de resistência vencem os mecanismos de amaciamento. Os mecanismos de amaciamento atuam em função das variáveis temperatura, velocidade da prensa e a deformação imposta, as quais têm um papel fundamental nesta competição, ativando e acelerando processos de amaciamento dependentes da difusão atômica. Durante o recalque, o encruamento é responsável pelo aumento na resistência da liga, causado pelos fenômenos de aumento de densidade de discordâncias ou precipitação de novas fases. Os mecanismos de amaciamento mostram a recuperação e a recristalização, sendo a recuperação responsável pelo rearranjo das linhas de discordância e, a recristalização responsável pela formação de novos grãos e seu crescimento⁸. No caso do forjamento de aços ferramenta, há um mecanismo de endurecimento ou resistência a quente proporcional ao seu encruamento devido à elevação da densidade de linhas de discordância⁽⁸⁾ e ao volume de carbonetos precipitados. Para melhor forjabilidade atua-se em uma faixa de temperatura onde as tensões para deformação do material são menores, ficando limitadas a 100 MPa e altas temperaturas, como no caso do aço AISI H13.

A Figura 1 mostra as curvas de escoamento para o aço AISI H13 para diversas temperaturas e taxas de deformações realizadas por Imbert, Ryan e McQueen⁽⁹⁾ em seus estudos sobre o efeito dos elementos de liga em diversos tipos de aço. Através das curvas, observa-se a presença de um regime de recristalização dinâmica a altas temperaturas com deformações acima de 2 mm/mm. Observa-se também, que as tensões atingem o pico com deformações de aproximadamente 0,5 mm/mm. Nota-se também o mecanismo de recuperação dinâmica atuando com as baixas deformações já na ordem de 0,1 mm/mm a 0,5 mm/mm dependendo da temperatura de trabalho. Num material altamente segregado, com alta fração de soluto e de precipitados, normalmente advindo de composições com alto teor de elementos de liga e de processos de solidificação lenta, os mecanismos de recristalização dinâmica são dificultados, adicionalmente, os materiais ficam sujeitos ao fenômeno de liquação, devendo-se limitar a temperatura máxima de aquecimento devido à queda da temperatura solidus local. Em função desses fenômenos, o lingote tem suas dimensões limitadas, caso contrário pode haver acúmulo de soluto, obrigando um descarte maior da cabeça quente, comprometendo o rendimento do processo. Os carbonetos não dissolvidos, devido às temperaturas mais baixas em que o processo de conformação mecânica é realizado, dificultam a ocorrência dos processos de amaciamento (recuperação e recristalização). Dessa forma, considerando a questão de ativação dos mecanismos de amaciamento versus

liquação, pode-se observar que a conformação de aços ferramenta apresenta uma faixa estreita de temperatura de trabalho. Tratando-se da influência da variável temperatura durante o processo de conformação mecânica, outro fenômeno que se torna importante dentro do processo de conformação mecânica é a geração de calor adiabático. A tensão aplicada, com uma determinada taxa de deformação, aumenta a geração de calor por unidade de volume de deformação. Dessa forma, deve-se considerar o fenômeno de geração de calor adiabático no projeto de sequenciamento do processo de forjamento, pois pode contribuir tanto positivamente no mecanismo de amaciamento, como também negativamente com o aumento de temperatura nas regiões com temperatura solidus local mais baixa, ocasionando assim, o fenômeno da liquação de compostos com menor ponto de fusão. Para modelagem numérica, pesquisadores desenvolveram equações de correção para o balanço térmico.^(7,10) Atualmente, *softwares* de simulação numérica apresentam módulos para trabalhar com o efeito do calor adiabático durante o processo de transferência de calor conjugado com conformação mecânica. Segundo Kobayashi, Oh e Altan⁽¹⁰⁾ a parcela geração de calor, adicionada na equação de balanço térmico, é o produto da tensão e da taxa de deformação em um elemento de malha, ajustado por uma constante de eficiência. A constante de eficiência representa a fração de energia mecânica transformada em calor e, usualmente, assume-se como 0,9. A energia mecânica consumida durante a deformação é transformada principalmente em calor.

Com base no que foi exposto, este trabalho propõe analisar o comportamento termomecânico do processo de forjamento em matriz aberta do aço AISI H13 através da análise dos parâmetros de forjamento em uma prensa hidráulica de 50 MN, visando a correta implementação das condições de forjamento em um lingote de 18 t.

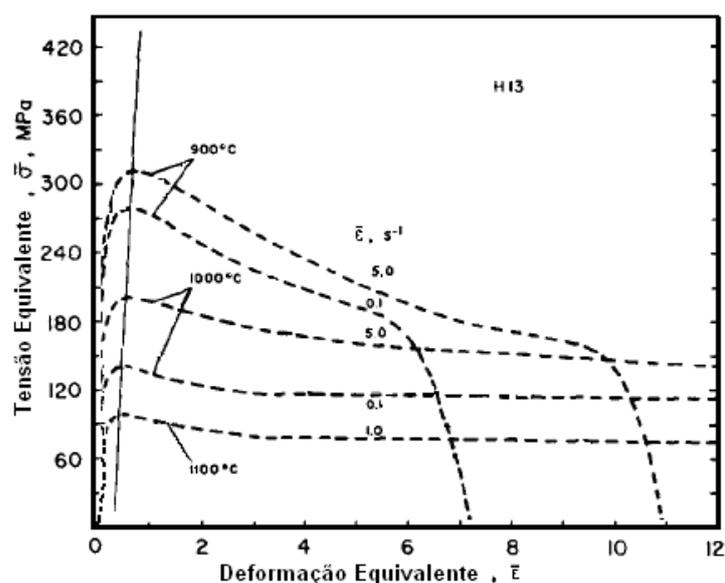


Figura 1. Curvas de escoamento para o aço AISI H13.⁽⁹⁾

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para simulação do aço AISI H13 para grandes dimensões analisou-se, primeiramente, o comportamento da conformação mecânica do recalque de um lingote de 18 t produzido na Villares Metals S.A. Os dados do processo como a

temperatura, perfil de força da prensa e o perfil de velocidade do recalque foram adquiridos por meio de sistema de aquisição de dados do processamento do material. As curvas de escoamento do material, que foram implementadas no software de elementos finitos, foram obtidas na literatura⁽⁹⁾ através de ensaios de torção, sendo que foram necessários ajustes nessas curvas visando a validação do processo no que tange a carga aplicada pela prensa. Na simulação numérica, o módulo do calor adiabático foi ativado com 90% da energia transformada em calor, conforme padrão usado por Kobayashi, Oh e Altan.⁽¹⁰⁾ As propriedades dos materiais usadas nas simulações numéricas estão dispostas na Tabela 1. Diante da questão de geração de calor e, conseqüentemente, do aumento da temperatura, a análise do mapa térmico do lingote conformado se fez necessária para análise da possibilidade de liquação das estruturas de solidificação. Para análise de possível ocorrência de liquações em função da temperatura em áreas microsegregadas, fez-se a simulação de formação de fases por termodinâmica computacional com base na composição química típica do AISI H13 da Tabela 2.

Tabela 1. Propriedades térmicas do AISI H13

Propriedades	AISI H13
Condutividade térmica	24,2~24,7 W/m°C
Capacidade térmica	2,8~7,4 N/mm ² °C
Emissividade	0,7

Tabela 2. Composição química do aço AISI H13

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,40	1,00	0,35	5,20	1,50	0,90

Usando-se o perfil de velocidade e força da prensa, foram realizadas simulações de recalque em lingote de 18 t com temperatura inicial de 1.260°C. Os dados de curvas de escoamento foram obtidos por ensaio de torção da literatura.⁽⁹⁾ Com base nas variáveis resultantes, analisaram-se os parâmetros limitantes do processamento.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As variáveis do processo de forjamento como força e velocidade de conformação do lingote de AISI H13 de 18 t, foram obtidos através do sistema de aquisição de dados da prensa (Figura 2). A máxima velocidade no processo é atingida nos instantes iniciais aos 5 s com 40 mm/s, mantendo-se neste nível por 3 s com crescimento de carga aplicada. A partir dos 8 s a velocidade começa a cair com uma força aplicada de 47 MN. A carga máxima atuante ocorre a 13 s mantendo-se em regime estacionário com queda contínua de velocidade. A prensa hidráulica apresenta um sistema de segurança que, ao atingir a carga de 50 MN, válvulas limitadoras de pressão redirecionam o fluxo de óleo hidráulico do pistão para o tanque. Ou seja, durante a conformação mecânica, a prensa, ao atingir a carga máxima estipulada, manter-se-á neste nível, de modo que o fluxo de óleo no pistão será restringido com base na resistência mecânica oferecida pelos mecanismos de endurecimento do próprio lingote, que se traduz em queda da velocidade do pistão. Observando-se o comportamento da força atuante no processo de recalque do lingote, nota-se que nos instantes iniciais com a elevação da velocidade, a força cresce em uma determinada taxa e, posteriormente a taxa decresce quando a força atinge 30 MN ao

mesmo tempo em que a velocidade torna-se máxima e constante até 8 s. Neste instante, predomina no lingote uma maior quantidade de mecanismos de amaciamento do que de endurecimento. A partir deste instante há uma descontinuidade no perfil de velocidade com uma queda abrupta, podendo ser uma resposta a descontinuidades do sistema hidráulico da prensa ou mesmo resposta aos mecanismos de transformações estruturais do próprio lingote. Mas o fato preponderante, é que a força tende a crescer juntamente com a queda da velocidade e, a partir dos 8 s a resistência do forjado começa a aumentar. A partir dos 13 s, mesmo com uma carga constante devido ao mecanismo de segurança, a velocidade é decrescente atingindo patamares de 5 mm/s no final do recalque. O comportamento da velocidade da prensa é reflexo dos efeitos dos mecanismos de endurecimento e amaciamento da estrutura do forjado como um todo.

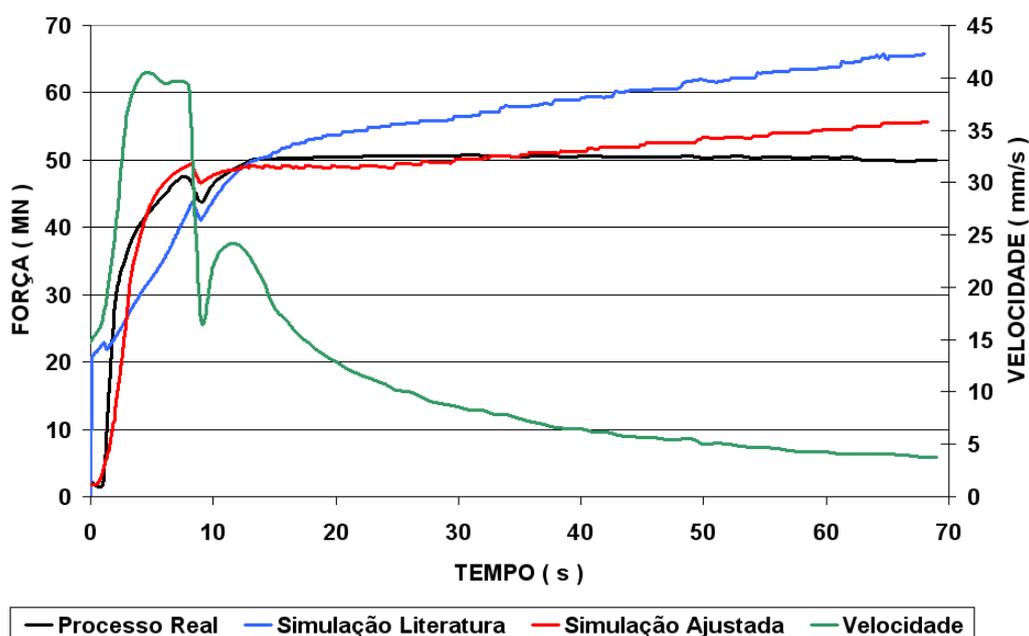


Figura 2. Perfis de força e velocidade da prensa de 50 MN obtidos por sistema de aquisição de dados durante o recalque de um lingote de 18 t do AISI H13.

Realizando-se a simulação numérica com dados da literatura, observa-se que as forças extrapolam 50 MN, atingindo 65 MN no final do processo. Dessa forma, observa-se que as tensões obtidas pelo ensaio de torção da literatura (Figura 1) estão em patamares mais elevados que a realidade do processo, necessitando de ajustes para melhor concordância do processo real com o simulado. Ainda no gráfico da Figura 2, o perfil de força com as curvas de escoamento ajustadas apresenta uma boa concordância com o processo real, superando o limite de 50 MN no final do processo. Os ajustes no perfil de força foram realizados para baixas taxas de deformação onde os dados estavam extrapolados. Os dados mais corretos são realizados através de interpolação algorítmica dentro de limites externos bem definidos, caso contrário, os dados calculados podem incorrer em erros.⁽³⁾ Dentro desta análise, observa-se que há necessidade da determinação de curvas de escoamento para baixas taxas de deformação através de ensaios de torção. Utilizando-se taxas de deformação e temperaturas adequadas a aplicações específicas, visando simular o verdadeiro comportamento do material, pode-se reduzir e até evitar erros inerentes a extrapolações com dados duvidosos adquiridos na literatura.

No presente trabalho, com os dados ajustados, procederam-se às simulações, onde a Figura 3 mostra o mapa das taxas de deformações efetivas nos elementos de malhas no momento de máxima velocidade da ferramenta de recalque (8 s). Desconsiderando o contato das bordas do material com o ferramental, nota-se que a região central apresenta maior movimento de material (ponto P1) com uma taxa de deformação efetiva máxima de aproximadamente $0,06 \text{ s}^{-1}$ e, uma mínima de $0,012 \text{ s}^{-1}$. Para melhor fidedignidade da simulação numérica, neste caso, haveria necessidade de realização de ensaios de torção com limite extremo de $0,01 \text{ s}^{-1}$ na temperatura de 1.260°C para melhor representar os cálculos de interpolação logarítmica.

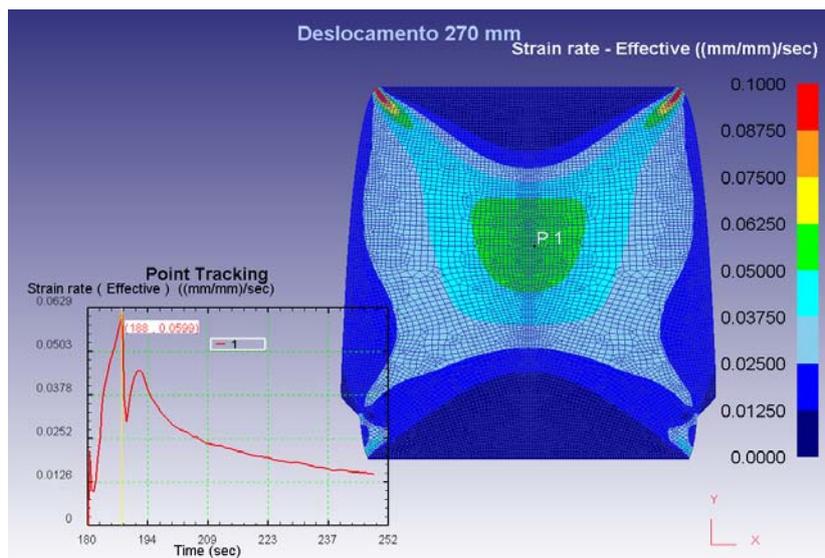


Figura 3. Mapa da taxa de deformação efetiva do processo de recalque a 8 s do processamento. Ponto P1 corresponde à maior taxa de deformação num deslocamento de 270 mm da matriz.

A curva de escoamento obtida por extrapolação está na Figura 4. Para uma deformação de 0,06 mm/mm e temperatura de 1.260°C , o mecanismo de recuperação dinâmica começa com uma tensão de aproximadamente 30 MPa. Para uma deformação de 0,29 mm/mm, correspondente ao ponto P1 da Figura 3, tem-se o começo da recristalização ultrapassando a deformação com tensão de pico.

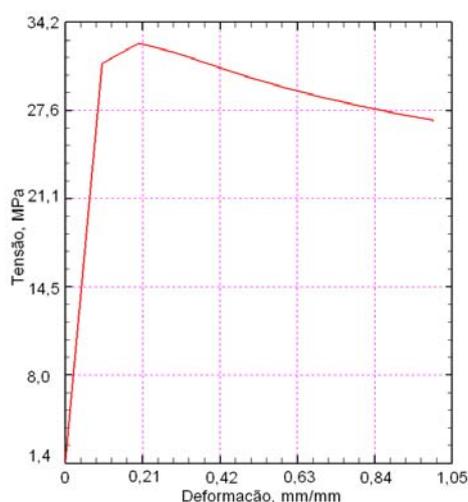


Figura 4. Curva de escoamento obtida por extrapolação de dados. Temperatura = 1.260°C . Taxa de deformação = $0,06 \text{ s}^{-1}$.

Com relação ainda ao perfil de força da prensa, caso não houvesse um sistema limitador da carga máxima, poder-se-ia entender que, uma força mantendo-se constante durante um recalque, haveria um mecanismo de endurecimento e amaciamento concorrentes durante o processo, tal qual ocorre numa interpretação de resultado de uma curva de escoamento obtida por um ensaio físico, desde que houvesse uma taxa de deformação constante. Porém, um processo em que a carga se comporta de forma crescente, também não significa que não haja zonas de mecanismo de amaciamento no lingote. A análise tem que ser feita localmente, pois existem diferenças nos comportamentos estruturais dentro de um lingote durante o processo de recalque. Existem locais com baixa deformação efetiva, como os cones de zona de fluxo restringido devido ao atrito entre o lingote e a ferramenta, assim como locais onde a deformação efetiva é maior, como é o caso do centro do lingote. A Figura 5 mostra o mapa de deformação efetiva do lingote de 18 t, mostrando diferentes graus de deformação na peça. Para melhorar a forjabilidade do material, pode-se aumentar a temperatura de forjamento, o que também melhora o processo de homogeneização das zonas microsegregadas. Além da temperatura inicial do forjamento, tem-se o aumento da temperatura durante o processamento ocasionado pelas transformações da energia mecânica em calor ou, o chamado calor adiabático.

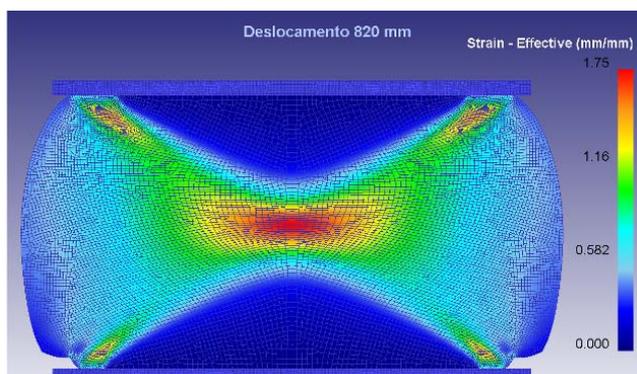


Figura 5. Mapa de deformação efetiva do lingote 18 t do AISI H13 obtido por simulação numérica de recalque na prensa de 50 MN.

A Figura 6 mostra o mapa térmico feito por elementos finitos, após o recalque do AISI H13 partindo-se de uma temperatura de 1.260°C. Observa-se um aumento da temperatura do material de 5°C. Este aumento não é tão significativo, se comparado com processos que tenham tensões ou taxas de deformação mais elevadas, como é o caso de um processo de laminação. No entanto, esta elevação de temperatura pode se tornar crítica em função dos limites estabelecidos de temperatura máxima admissível.

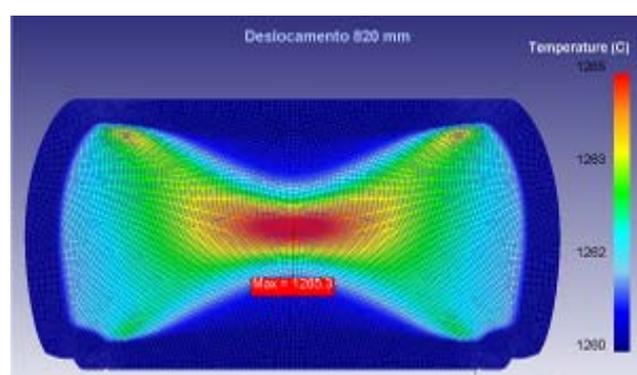


Figura 6. Mapa térmico de um lingote conformado de 18 t do aço AISI H13.

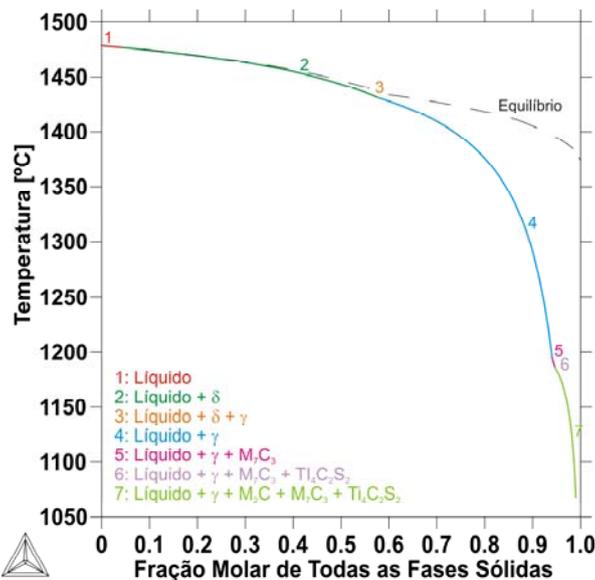


Figura 7. Diagrama de fases em equilíbrio termodinâmico do AISI H13 do Thermo-Calc.

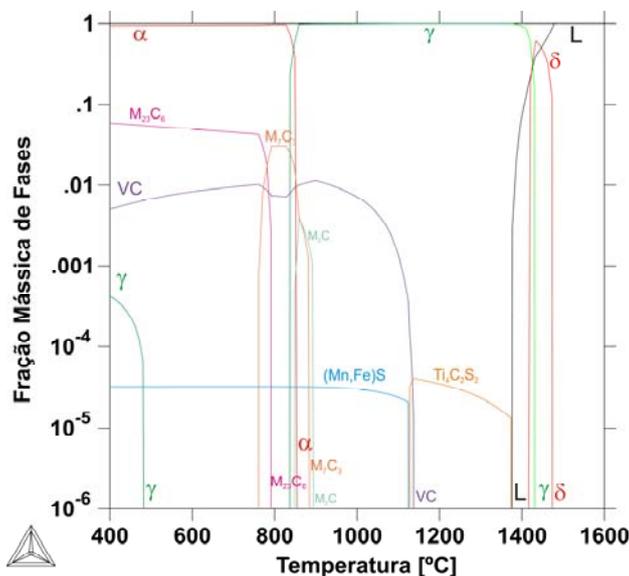


Figura 8. Fração sólida do AISI H13 com elementos residuais com modelo de solidificação de Scheil.

Para avaliar o efeito da temperatura na microestrutura, simulou-se a formação de fases durante o resfriamento do aço AISI H13 através da termodinâmica computacional (Thermo-Calc[®]) com base na composição química da Tabela 2. A Figura 7 mostra as fases presentes e a formação dos carbonetos a uma temperatura de aproximadamente 900°C, responsáveis pelo aumento adicional do mecanismo de endurecimento, gerando assim um acréscimo da tensão de pico (Figura 1) para esta temperatura. Dessa forma, para se ter uma boa trabalhabilidade no material, a temperatura para o processamento do lingote deverá ficar acima desta temperatura. A Figura 8 mostra uma simulação com rejeição de soluto completa no líquido e sem difusão no retorno, mostrando um caso extremo de segregação local no material. Neste caso, observa-se a queda da temperatura solidus do material que em condições de equilíbrio, ou seja, com difusão de retorno do soluto, apresenta uma temperatura solidus de 1.380°C, contra uma temperatura solidus local abaixo de 1.250°C fora de equilíbrio termodinâmico, cujas condições de rejeição de soluto levam a uma composição eutética do material. Como se pode observar, uma temperatura de 1.260°C de enformamento para o processo de recalque apresentaria

um alto risco de liquação de material em sítios microsegregados ou, em condições em que o descarte da cabeça quente esteja subestimado.

Elementos residuais tais como fósforo, enxofre, níquel, titânio, nióbio, alumínio, cobre podem formar compostos intermetálicos que prejudicam a plasticidade do material. Alguns compostos se difundem na austenita ou podem formar carbonetos primários (Figura 7) com frações abaixo de 0,1%. Observando-se o diagrama da Figura 8, os elementos rejeitados que tendem a formar uma composição eutética abaixam o ponto de fusão local, podendo liquar o material e aglomerar em zonas interdendríticas. A Figura 9 apresenta uma microestrutura do aço AISI H13 após o forjamento na região onde ocorre uma formação eutética de carbonetos de titânio e vanádio, composto formado nas áreas interdendríticas mais segregadas. Este tipo de problema é contornado trabalhando-se com um descarte maior da cabeça quente, reduzindo-se a temperatura de enformamento ou usando-se um tempo maior de homogeneização para difusão dos compostos microsegregados.



Figura 9. Microestrutura bruta de forjamento de um AISI H13, apresentando uma formação eutética. Aumento: 1.000 X.

A Figura 10 mostra o mapa térmico do lingote recalcado a partir da temperatura de 1.260°C, mostrando que as variáveis de redução de temperatura para o ambiente e, adicionalmente, geração de calor adiabático mantêm a temperatura em uma faixa ótima de trabalhabilidade, isto é, acima de 900°C. Temperaturas abaixo de 900°C aparecem na interface com as ferramentas de recalque, onde se tem tensões acima de 45 MPa (Figura 11).

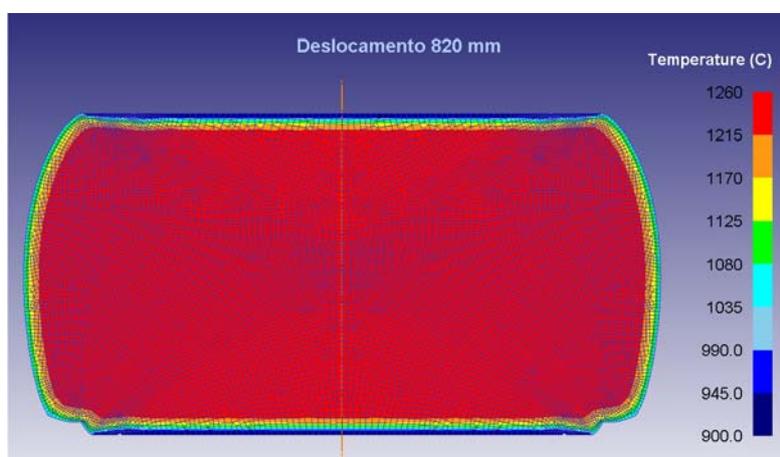


Figura 10. Mapa de temperatura no final do recalque do lingote de 18 t do aço AISI H13.

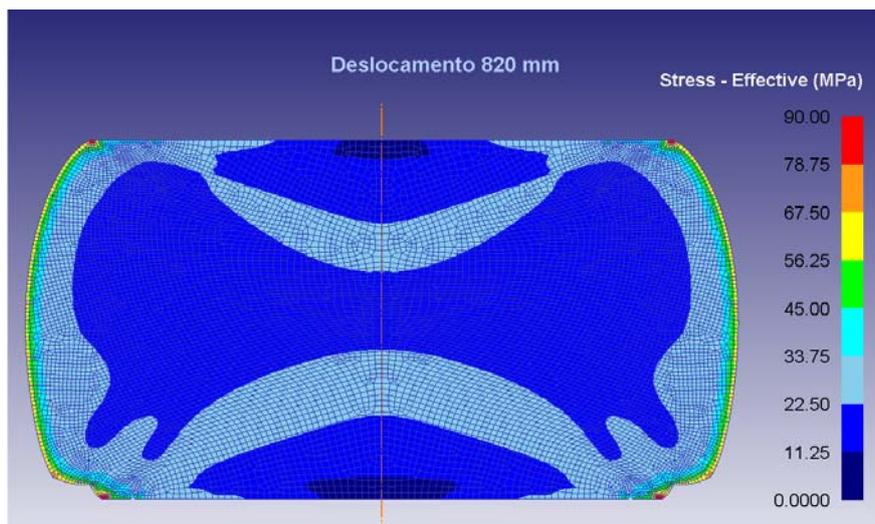


Figura 11. Mapa de tensão efetiva no final do recalque do lingote 18 t do aço AISI H13.

5 CONCLUSÃO

Para realização da simulação do forjamento de um lingote de 18 t do aço AISI H13 foi necessário ajustar a curva de escoamento para baixas taxas de deformação para melhor refletir os mecanismos de amaciamento e endurecimento do material para altas temperaturas (1.260°C). Perfis corretos das curvas de escoamento são imprescindíveis para validar a simulação do processo do AISI H13 em que os resultados mostraram existência de mecanismos de amaciamento do material na região central. A obtenção das curvas de escoamento através de ensaios de torção a quente é necessária para a melhor concordância da simulação numérica durante o processamento. Também, o uso de módulos de geração de calor adiabático é importante no processamento, pois atua na variável temperatura de modo preponderante na ativação dos mecanismos estruturais do processo termomecânico. O uso da termodinâmica computacional é uma ferramenta importantíssima no dimensionamento das variáveis de processo para estabelecer os limites dos parâmetros visando melhor produtividade sem afetar a qualidade do produto.

REFERÊNCIAS

- 1 CHAABAN, M. The Effect of die shape on the closure of internal cavities within the forged billet during drawing. Congress de la Forge Grosse, Paris, p.501-519, 1975.
- 2 SHAH, K. N., KIEFER, B. V., GAVIGAN, J. J. Finite element simulation of internal void closure in open-die press forging. Advanced Manufacturing Process, v.1, n.3-4, p. 501-516, 1986.
- 3 JARRETA, D.D.; SOUZA, E.N.; BALANCIN, O.; BARBOSA, C. A. Análise crítica da base de dados de softwares de simulação numérica para conformação a quente da liga VAT[®] 718, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.5, n.1, p.28-34, 2008.
- 4 LIMA, R.F.M. Estudo da Trabalhabilidade a Quente do Aço AISI D2 por Ensaio de Torção. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- 5 MESQUITA, R.A.; BARBOSA, C.A. Novos aços para trabalho a quente. Matérias Técnicas. Disponível em:
<http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/991_PTBT_HTML.htm> Acesso em: 05 fev. 2012.

- 6 SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais, ed. Edgard Blücher, 2^a ed., São Paulo, 2006.
- 7 BRAGA, H.C.; BARBOSA, R.A.N.M. Simulação do acréscimo de temperatura devido ao calor gerado nos processos de conformação a quente, In: Congresso Anual da ABM, 47, 1992, Belo Horizonte. São Paulo: ABM, 1992. p. 441-151.
- 8 PADILHA A.F.; SICILIANO Jr. F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. 3^a ed. revisada e ampliada - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 9 IMBERT, C.; RYAN, N.D.; McQUEEN, H.J. Hot workability of three grades of tool steels. Metallurgical Transactions A, v.15A, p.1855-1864, 1984.
- 10 KOBAYASHI, S.; OH, S.; ALTAN, T. Metal Forming and the Finite-Element Method, Oxford University Press, inc., New York, 1989.