

Utilização de Dados sobre Materiais em Simulações Computacionais de Conformação Mecânica

Alisson Duarte da Silva ⁽¹⁾
Maria Teresa Paulino Aguilar ⁽²⁾
Pedro Henrique Rodrigues Pereira ⁽³⁾
Paulo Roberto Cetlin ⁽⁴⁾

RESUMO

A conformação mecânica dos metais é um processo de fabricação muito antigo, e que somente recebeu análises mais adequadas em torno da metade do século 20, envolvendo muitas simplificações. No final deste mesmo século, a simulação computacional da conformação mecânica permitiu um grande avanço nestas análises, incluindo o exame de aspectos até então não abordados, exceto através de análises empíricas. O uso da simulação computacional exige o fornecimento de dados sobre o processo e, em especial, informações sobre o comportamento mecânico do material sendo processado. O presente artigo discute as variáveis a serem consideradas para descrever este comportamento mecânico e as dificuldades envolvidas na obtenção destes dados.

Palavras-chave – simulação, elementos finitos, dados do material, tensão, deformação, temperatura.

ABSTRACT

Metal forming is an old manufacturing process which was first adequately analyzed around mid-20th century, involving, however, many simplifications. By the end of the same century, the computational analysis of metal forming was developed and allowed a great advance in the analyses of the process, including aspects hitherto not approached, except through empirical methods. These simulations demand a set of data describing each processing situation, especially concerning the mechanical behavior of the material. The present paper discusses the variables that must be considered for this material behavior and the difficulties in obtaining the necessary data

Key words — simulation, finite elements, material data, stress, strain, temperature.

1. INTRODUÇÃO

A conformação mecânica é um processo de fabricação de objetos metálicos onde a forma do material é alterada pela deformação plástica (permanente) do material, obtida pela aplicação de esforços. Existe uma variedade enorme de processos deste tipo (forjamento, laminação, trefilação, extrusão, conformação de chapas, etc.), e a Figura 1 ilustra um caso simples de forjamento: o recalçamento de um tarugo cilíndrico. A conformação mecânica exige matrizes de alta resistência para o contato com o material, e que podem ter variadas formas de acordo com a necessidade geométrica a ser obtida. Modernamente, os esforços são aplicados por prensas mecânicas ou hidráulicas, ou por máquinas especializadas tais como laminadores, máquinas de trefilar ou de extrudar, recalçadoras a frio, etc.

⁽¹⁾ Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, alissonds@ufmg.br

⁽²⁾ Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, teresa@ufmg.br

⁽³⁾ Doutorando, University of Southampton, UK, pedrohrpereira@gmail.com

⁽⁴⁾ Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, pcetlin@demec.ufmg.br

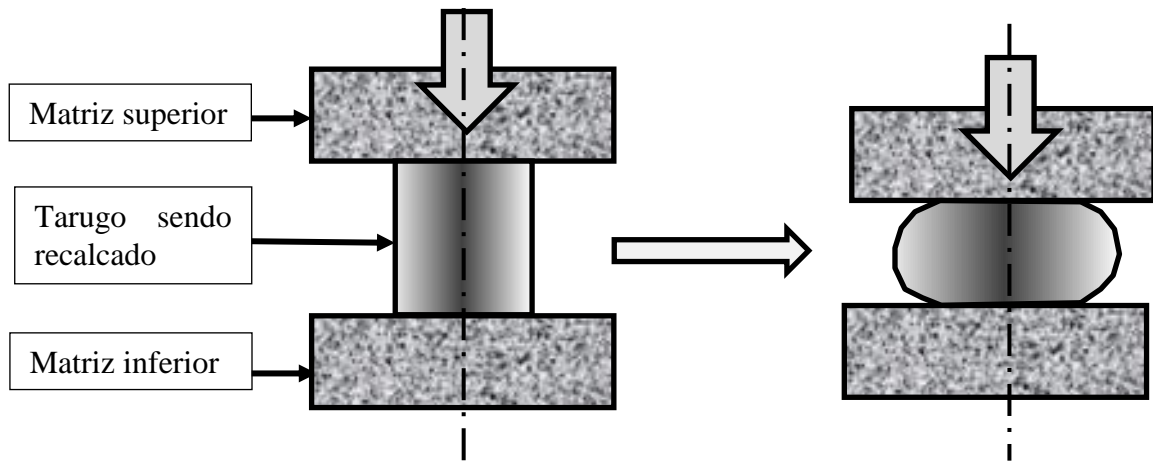


Figura 1: Exemplo de processo de conformação mecânica: o recalcamento de um tarugo cilíndrico.

Muitos aspectos devem ser considerados no desenvolvimento de um estudo completo da conformação mecânica. Na Figura 2 apresenta-se o conjunto de variáveis envolvido no processo; é importante notar que a figura não aborda aspectos econômicos.

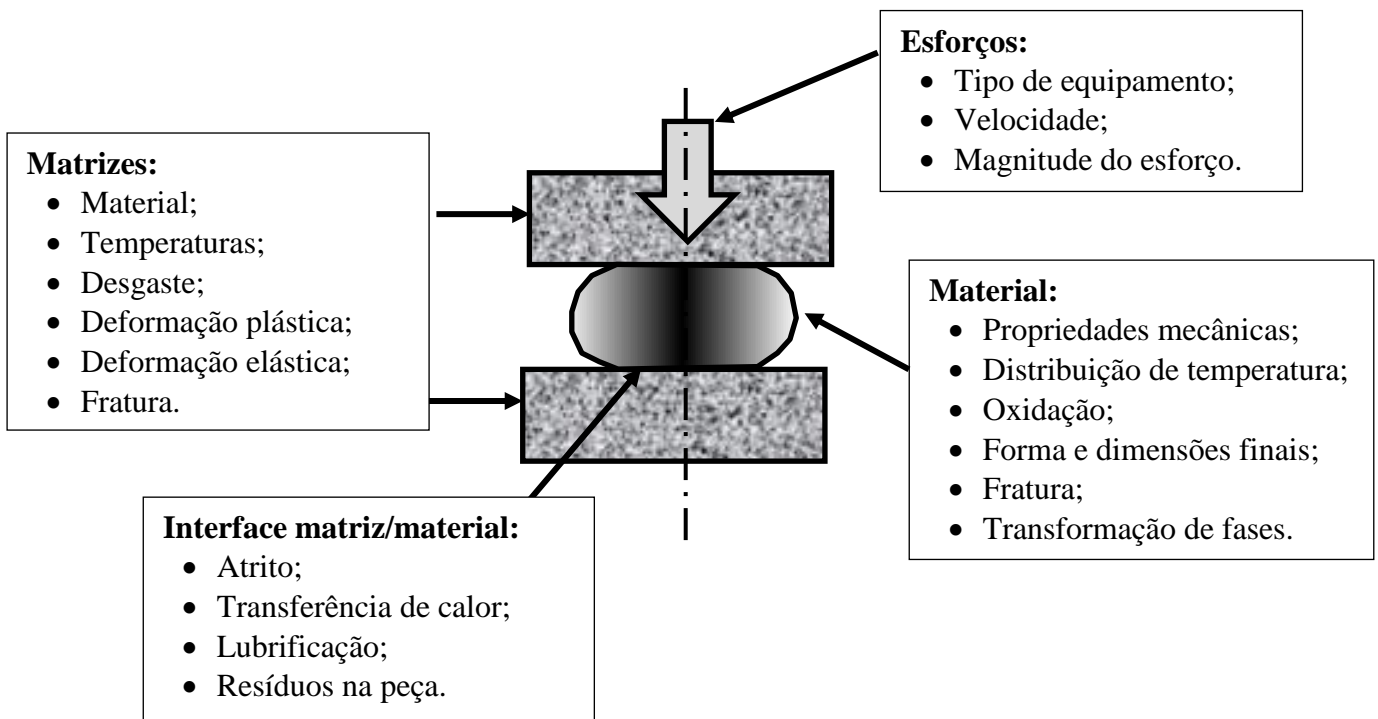


Figura 2: Conjunto de aspectos de interesse em uma operação de conformação mecânica.

Apesar da conformação mecânica ser um processo muito antigo (praticada inicialmente por ferreiros, há cerca de 1000 anos atrás), a maior parte dos aspectos descritos na Figura 2 tem sido estudada de forma basicamente empírica; até as duas décadas finais do século 20 houve um bom desenvolvimento na análise dos esforços necessários para a consecução das operações, a partir de simplificações na maneira como o material se deforma. No entanto, foi a partir do final do século 20 que a conformação mecânica passou a ser analisada de forma mais detalhada e adequada, através de simulações computacionais, especialmente empregando o método dos elementos finitos. Tais simulações envolvem uma série de hipóteses e suposições, que afetam os resultados finais obtidos nas análises.

O objetivo do presente trabalho é discutir essas hipóteses com relação às propriedades mecânicas do material, considerando os efeitos do grau de deformação plástica, a temperatura, a velocidade de deformação e o caminho de deformação (“strain path”).

2. A MODELAGEM COMPUTACIONAL DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A modelagem computacional da conformação mecânica parte da discretização do material a ser processado em pontos distribuídos no espaço. Estes pontos são denominados “nós” e são exibidos de forma interligada entre si, formando os chamados “elementos” de uma malha. As Figuras 3(a) e 3(b) ilustram a substituição do material por malhas, para o tarugo cilíndrico mostrado nas Figuras 1 e 2, empregando duas densidades de nós na malha. É também possível a adoção de malhas de diferentes densidades em diferentes regiões de uma peça, como ilustrado na Figura 3(c) para a etapa intermediária no forjamento de uma peça.

Um ponto importante da simulação computacional é a escolha do número de nós (e assim do número de elementos) a ser empregado. Quanto maior for este número, mais a discretização se aproxima da realidade e mais exatos serão os resultados da simulação; por outro lado, o esforço computacional cresce exponencialmente, exigindo tempos mais longos de simulação e computadores cada vez mais poderosos.

Os processos de conformação mecânica são simulados através de uma série de etapas (denominados “steps”) que podem ser especificados por meio do deslocamento das matrizes para cada step. Uma recomendação comum nos programas comerciais de simulação é que cada step corresponda a um deslocamento relativo entre as matrizes de aproximadamente 1/3 do tamanho do menor elemento na discretização. No caso mostrado nas Figuras 3(a) e 3(b) acima, os steps a serem adotados seriam de $\approx 3,33$ mm e $\approx 0,83$ mm, respectivamente, correspondendo a cerca de 1/3 de altura dos elementos da malha (10 mm e 2,50 mm nas figuras 3(a) e 3(b) respectivamente). Se a velocidade de deslocamento da matriz é especificada, o “step” pode ser dado em termos de tempo de cada step.

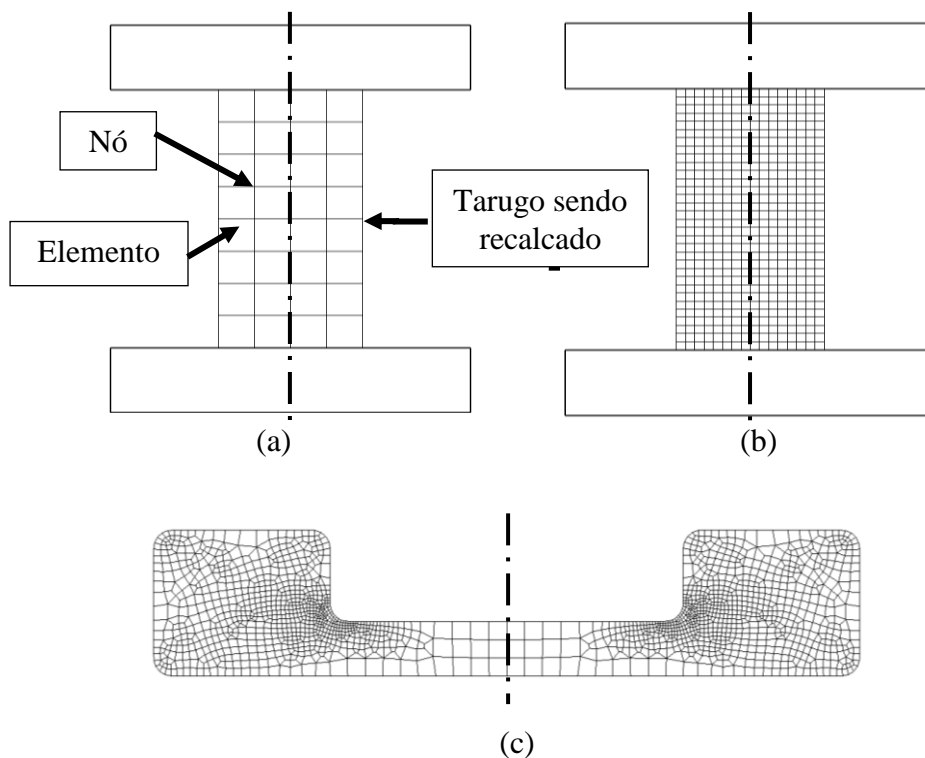


Figura 3: Substituição virtual do tarugo cilíndrico (altura 80 mm, diâmetro 40 mm) a ser recalçado, por nós e elementos de uma malha: (a) discretização com poucos nós (malha “grosseira” - 45 nós e 32 elementos), (b) discretização com muitos nós (malha “refinada” - 561 nós e 512 elementos) e (c) discretização de peça em etapa intermediária de forjamento com densidade de elementos variável para diferentes regiões da peça.

Na simulação computacional, cada etapa de deslocamento (step) das matrizes impõe movimentos aos nós do material; avalia-se então a energia dispendida nestes movimentos, e a minimização da energia fornece os movimentos “reais” dos nós. A partir desta situação, o programa pode fornecer a distribuição de deformações, tensões, deslocamentos, etc. da peça, possibilitando a avaliação da forma final obtida. A Figura 4 mostra a forma final da malha do cilindro ilustrado na Figura 3(b), e a distribuição de deformação obtida.

Vários parâmetros são ainda necessários para a simulação, tais como o atrito entre o material e a matriz, as propriedades mecânicas e térmicas do material, etc..

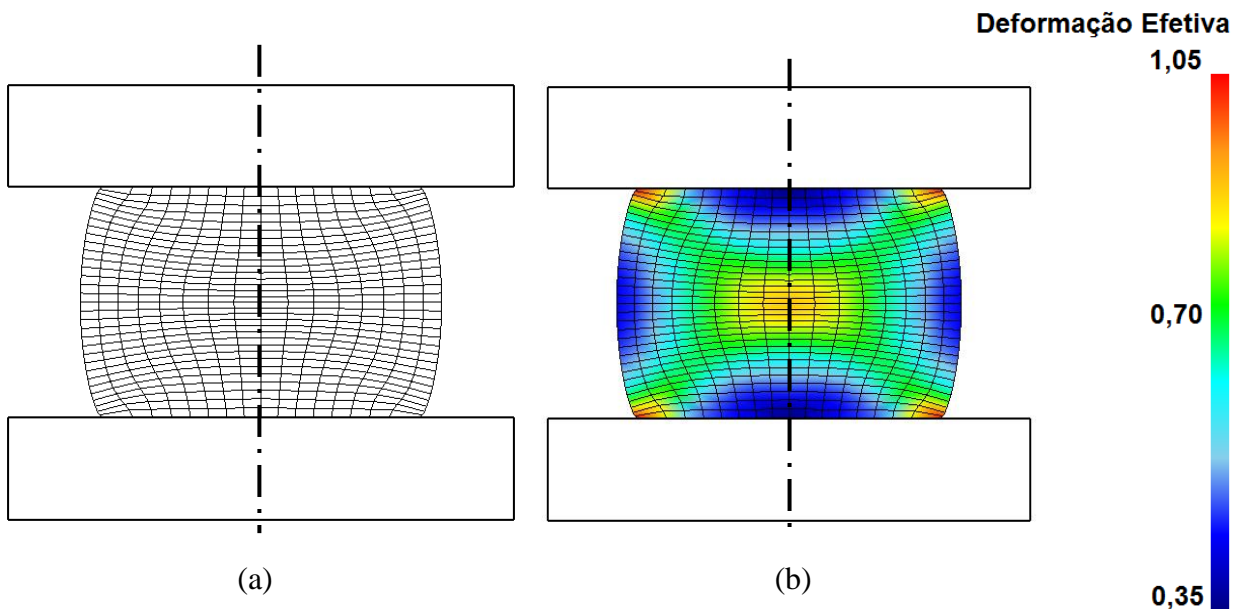


Figura 4: Dados obtidos no recalque desde a altura inicial de 80 mm até a altura final de 45 mm do cilindro mostrado na Figura 3(b), através da simulação computacional: (a) distorção da malha e (b) distribuição de deformação.

3. TENSÃO E DEFORMAÇÃO EFETIVAS

Dentre os aspectos mais importantes de uma simulação numérica da conformação mecânica figura a descrição do comportamento mecânico do material, que é fornecida através de curvas de “tensão efetiva (σ_e) vs deformação efetiva (ϵ_e)” para cada temperatura e velocidade de deformação do material. Discute-se, nos parágrafos seguintes, o significado dessas duas grandezas.

As curvas $\sigma_e \times \epsilon_e$ são obtidas em ensaios de tração do material, realizados nas temperaturas e velocidades de deformação desejadas. A Figura 5 ilustra um exemplo de tais curvas, para dois tipos de aços inoxidáveis, à temperatura ambiente e velocidade de deformação baixa.

É importante observar que as tensões e deformações efetivas são verdadeiras (ou seja, não as convencionais). A Tabela 1 fornece uma equivalência entre as deformações verdadeiras e as convencionais, que são dadas por $(\Delta l/l_0) \times 100$ (%), onde “ Δl ” é o aumento de comprimento de um corpo de prova com comprimento inicial “ l_0 ”.

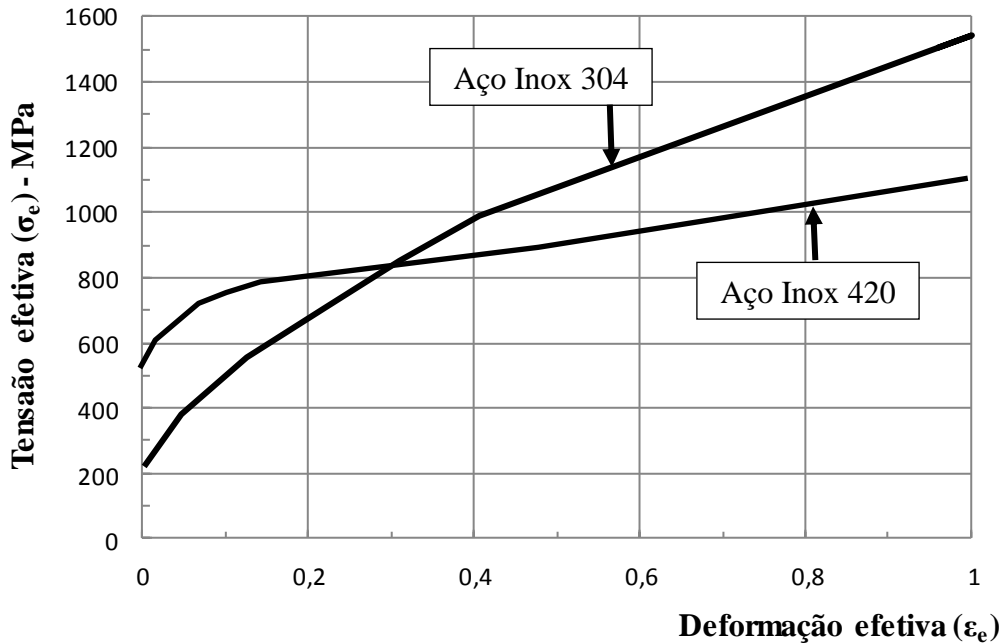


Figura 5: Curvas $\sigma_e \times \epsilon_e$ para dois aços inoxidáveis, à temperatura ambiente e velocidade de deformação baixa [Corrêa, E.C.S.; Aguilar, M.T.P.; Cetlin, P.R., Metallurgical and Materials Transactions A, v. 34A, p.589-601, March 2003].

Tabela 1: Relação entre deformações efetivas verdadeiras (ϵ_e) e convencionais ($(\Delta l/l_0) \times 100 \%$).

Deformação efetiva verdadeira (ϵ_e)	Deformação efetiva convencional ($\Delta l/l_0$) x 100 %
0,1	10,5
0,2	22,1
0,5	64,8
1,0	171,8
1,5	348,2
2,0	638,9
3,0	1908,5
4,0	5359,8
5,0	14741,3

Uma grande vantagem do emprego das deformações verdadeiras é que elas permitem somar deformações em etapas sucessivas de deformação, o que não acontece, no caso de deformações convencionais.

As deformações em processos de conformação mecânica podem ser muito altas, e comumente os dados experimentais das curvas tensão-deformação não estão disponíveis para tais níveis de deformação; nestes casos, os programas de simulação realizam extrapolações dos dados de acordo com critérios internos do programa. No caso da Figura 5, por exemplo, os dados estão disponíveis somente para deformações verdadeiras de até 1,0. Acima desta deformação, os dados são obtidos por extrapolação. Muito cuidado deve ser tomado com relação à maneira como essas extrapolações são realizadas, pois podem conduzir a grandes erros nos resultados obtidos.

Um aspecto importante a discutir é que, na conformação mecânica, os estados de tensão e de deformação são normalmente diferentes daqueles observados na tração, onde a situação é a

mostrada na Figura 6. No embutimento de chapas, por exemplo, os estados de tensão e de deformação são diferentes daqueles observados na tração, como ilustrado na Figura 7.

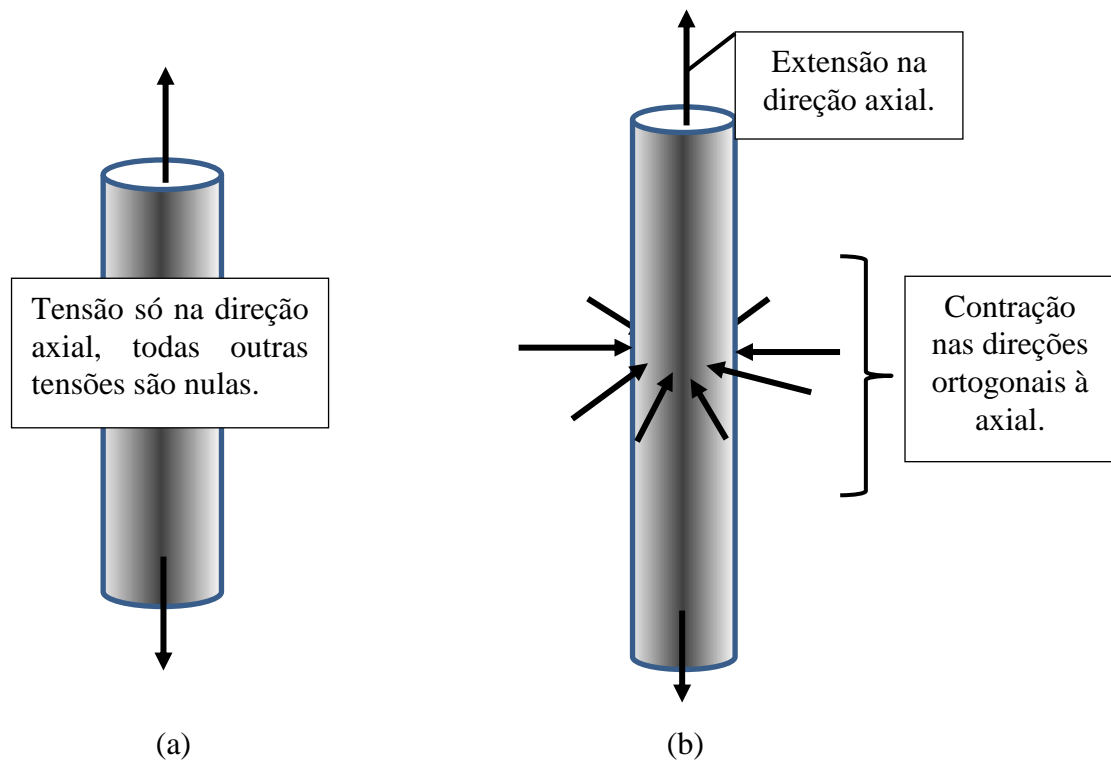


Figura 6: Tensões (a) e deformações (b) no ensaio de tração de metais.

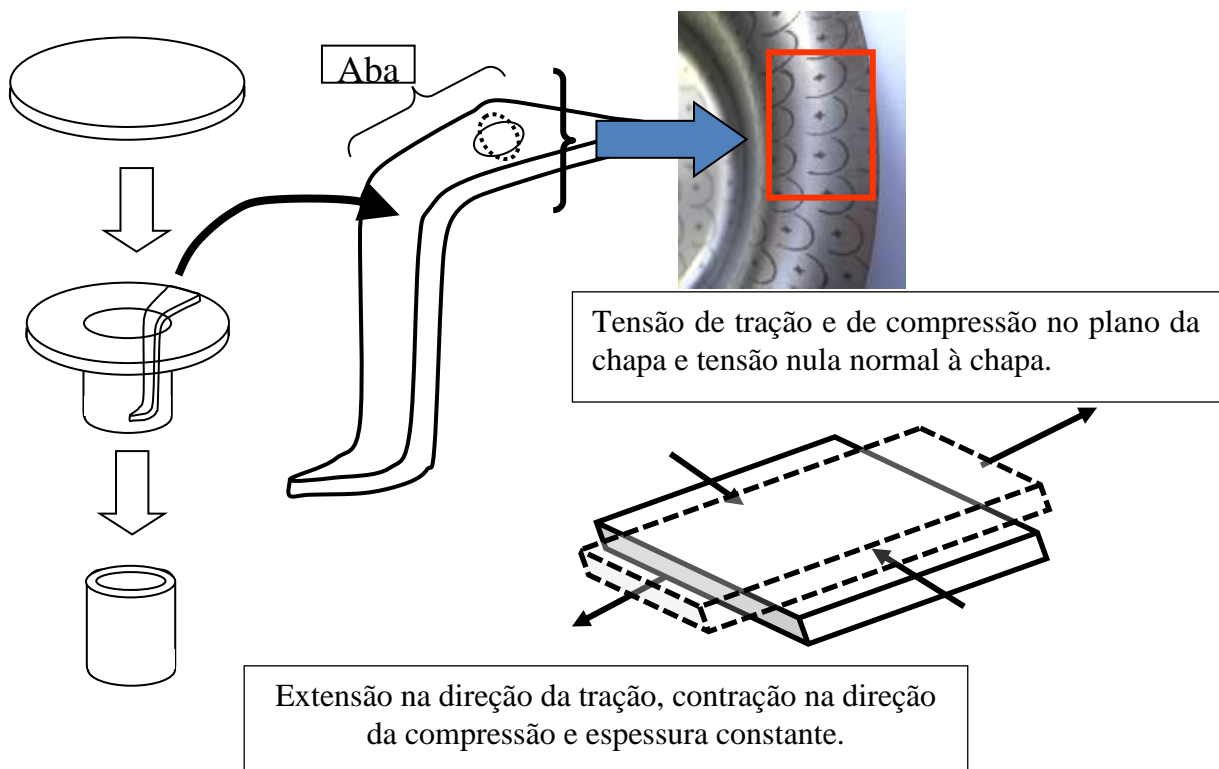


Figura 7: Tensões e deformações durante o embutimento de chapas.

Coloca-se assim o seguinte problema: como empregar os dados das curvas $\sigma_e \times \varepsilon_e$ obtidas por tração, para situações onde as tensões e deformações ocorrem de forma diferente daquela da tração? Para resolver essa situação, os programas de simulação computacional empregam teorias da plasticidade (por exemplo, a teoria de von Mises) para transformar qualquer estado de tensões e de deformações (no embutimento, laminação, recalçamento etc.) para tensões e deformações “efetivas” numa tração. Dessa forma, o comportamento mecânico geral de um material poderia ser descrito por meio do seu comportamento sob tração, ou seja, através da curva $\sigma_e \times \varepsilon_e$.

4. A SUPOSIÇÃO DE INDEPENDÊNCIA DO CAMINHO DE DEFORMAÇÃO

A utilização das teorias da plasticidade (tal como a de von Mises) para transformar qualquer estado de tensões ou de deformações em uma situação de tração pura pressupõe que os dados de tensão efetiva x deformação efetiva ($\sigma_e \times \varepsilon_e$) obtidos por tração podem ser usados para qualquer situação de deformação (forjamento, laminação, torção etc.).

Infelizmente essa suposição é somente aproximada, pois os materiais comportam-se de forma um pouco diferente quando submetidos a diferentes situações de tensão e deformação. A Figura 8 ilustra a situação onde, para dois materiais (aço baixo carbono e latão), a curva $\sigma_e \times \varepsilon_e$ foi obtida por ensaios de tração ou de torção. Caso as teorias de plasticidade fossem corretas, a curva $\sigma_e \times \varepsilon_e$ para estes materiais deveria ser idêntica para qualquer tipo de ensaio (e coincidentes com a curva determinada por tração), o que não se observa na figura. As curvas obtidas por torção estão um pouco abaixo daquelas originadas através do ensaio de tração. No caso as diferenças não são grandes, mas podem conduzir a erros nos resultados das simulações computacionais.

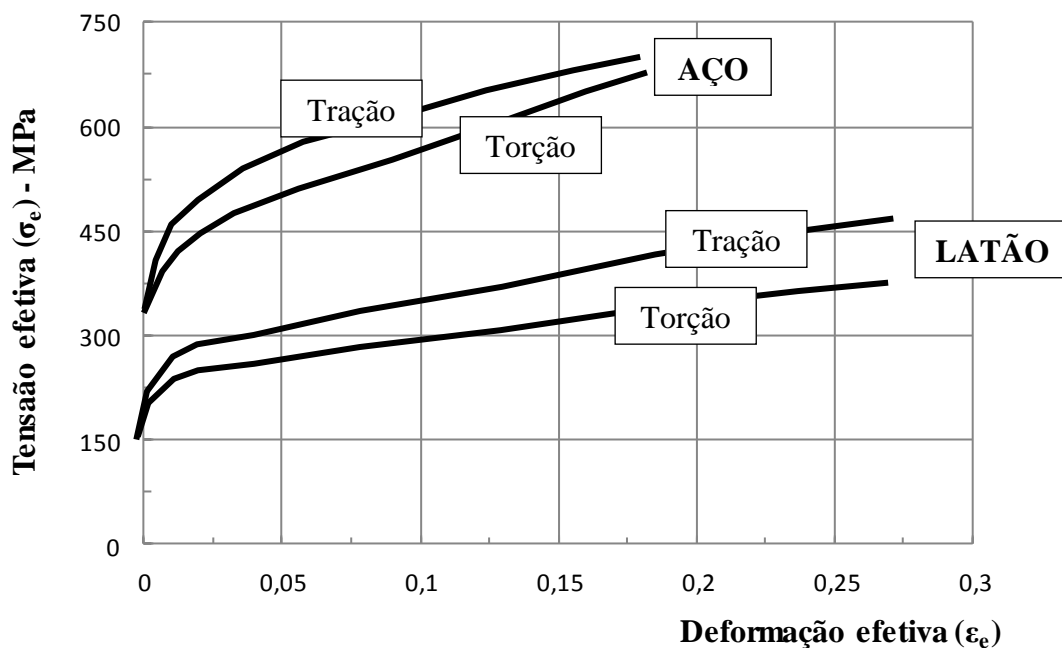


Figura 8: Curvas Tensão x Deformação efetivas ($\sigma_e \times \varepsilon_e$) para um aço baixo carbono e para o latão, obtidas através de ensaios de tração ou de torção [Corrêa, E.C.S.; Aguilar, M.T.P.; Cetlin, P.R., Journal of Materials Processing Technology, v. 124, n. 3, p.384-388, 2002].

Outra dificuldade particularmente grave ocorre quando se tem esforços cíclicos de sentidos opostos, tais como tração/compressão/tração ou torção cíclica em sentidos opostos. Nestes casos, a utilização das teorias da plasticidade usuais conduz a erros grandes no levantamento das curvas tensão x deformação efetivas ($\sigma_e \times \varepsilon_e$). A Figura 9 ilustra a situação para curvas $\sigma_e \times \varepsilon_e$ obtidas para um aço com baixo teor de carbono, à temperatura ambiente, por tração, torção e por torção cíclica

com deformação efetiva (ϵ_e) de 0,3 em cada ciclo de torção. Observa-se que a torção cíclica conduz a curva $\sigma_e \times \epsilon_e$ muito mais baixa do que a torção ou tração simples. Infelizmente os programas de simulação computacional de processos de conformação mecânica não levam estes fatos em consideração, o que pode levar a erros grosseiros nos resultados obtidos.

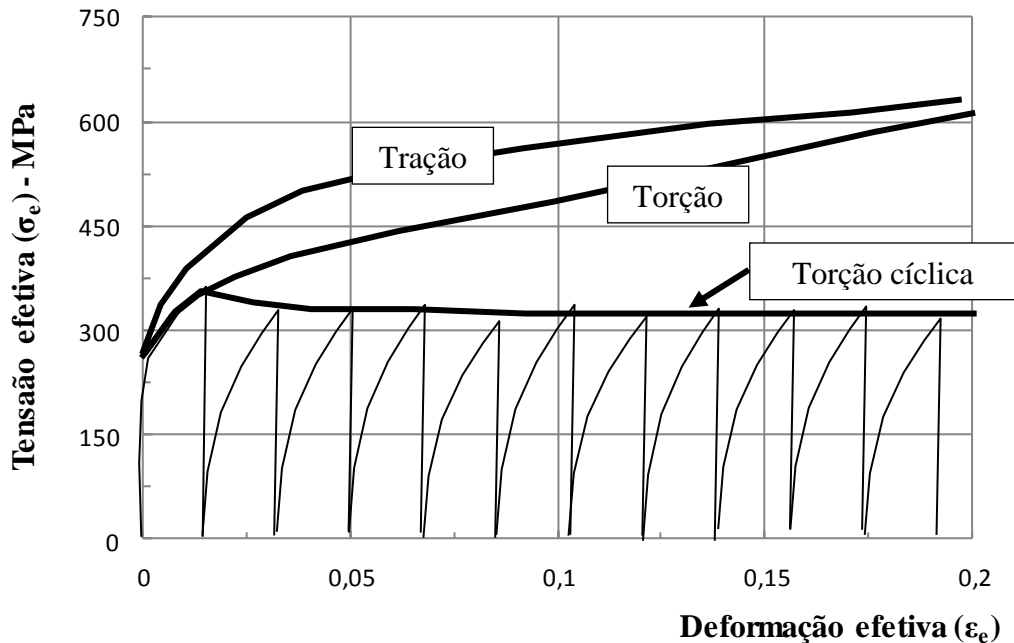


Figura 9: Curvas Tensão x Deformação efetivas ($\sigma_e \times \epsilon_e$) para um aço baixo carbono, obtidas através de ensaios de tração, torção e de torção cíclica com amplitude de torção de $\epsilon_e = 0,015$ [Corrêa, E.C.S.; Aguilar, M.T.P.; Silva, E. M. P.; Cetlin, P.R., Journal of Materials Processing Technology, v. 142, p.282-288, 2003].

No caso mostrado na Figura 9, diz-se que a curva ($\sigma_e \times \epsilon_e$) depende do caminho de deformação (“strain path”) adotado no processamento. A Figura 10 ilustra mais um caso da influência deste caminho de deformação; O material (aço com baixo teor de Carbono) foi testado de três formas: só por tração, só por torção cíclica e por tração após alguma torção cíclica.

A comparação das curvas de tração e de tração após torção cíclica (curva tracejada na figura) mostra que as mesmas são completamente diferentes, dependendo do caminho de deformação adotado. Infelizmente, os programas de simulação computacional atuais não são capazes de considerar os fenômenos associados ao caminho de deformação, e, em situações industriais onde ocorre variação apreciável neste caminho de deformação, as simulações conduzem a grandes erros. Exemplos disso são o desempenho após trefilação e a estampagem reversa, onde ocorrem pronunciadas deformações cíclicas semelhantes às descritas nas Figuras 9 e 10.

5. O EFEITO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO

A velocidade com a qual um material é deformado tem influência sobre suas curvas de tensão efetiva vs deformação efetiva ($\sigma_e \times \epsilon_e$), especialmente na deformação a quente. A velocidade de deformação é dada em deformação verdadeira por unidade de tempo, como por exemplo, $0,1/s$, ou $0,1s^{-1}$. Isso significa que, para cada segundo durante o qual o material é deformado, há uma deformação verdadeira efetiva (ϵ_e) de 0,1 (ou seja, de 10,5%, de acordo com a tabela 1). Os ensaios de tração são normalmente realizados a velocidades baixas, usualmente na faixa de $0,001 s^{-1}$ a $0,1 s^{-1}$. Máquinas de tração especiais podem fazer ensaios até cerca 1 a $10 s^{-1}$.

Do ponto de vista industrial, podem ser empregadas velocidades de deformação muito altas, visando aumentar a produtividade do equipamento. O passe final na laminação de fio-máquina, por

exemplo, chega a uma velocidade de deformação de 100.000 s^{-1} ! Forjamentos em prensas atingem velocidade de deformação de 10 s^{-1} , e o forjamento com martelos atingem 1000 s^{-1} . A realização de ensaios de tração nessas velocidades de deformação é inviável, e os ensaios realizados comumente adotam a compressão e equipamentos muito especializados e caros.

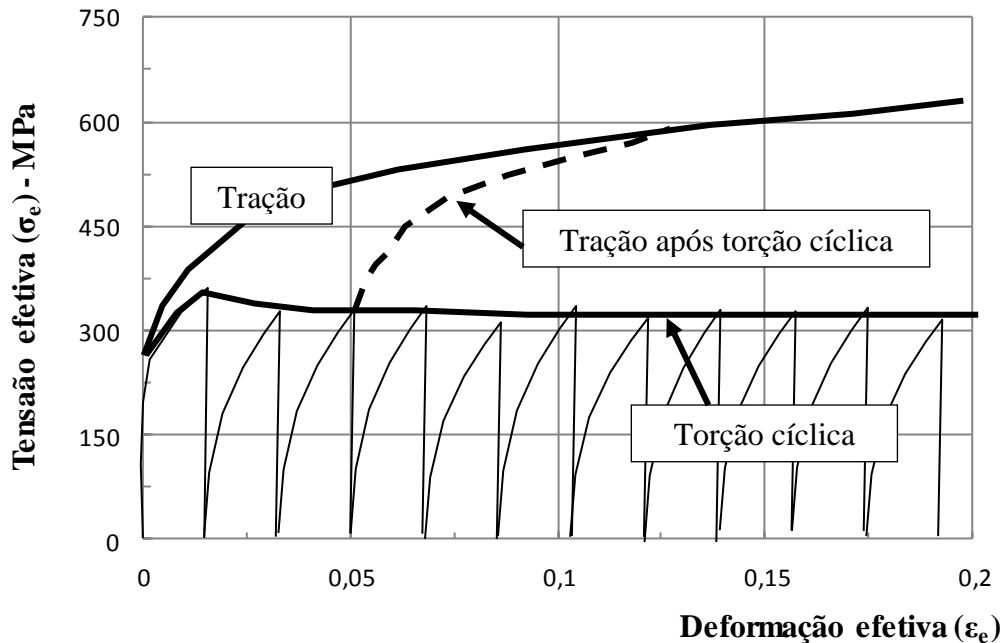


Figura 10: Curvas Tensão x Deformação efetivas ($\sigma_e \times \epsilon_e$) para um aço baixo carbono, obtidas através de ensaios de tração, torção cíclica com amplitude de $\epsilon_e = 0,015$, e tração após torção cíclica [Corrêa, E.C.S.; Aguilar, M.T.P.; Silva, E. M. P.; Cetlin, P.R., Journal of Materials Processing Technology, v. 142, p.282-288, 2003].

A Figura 11 ilustra resultados recentes para curvas $\sigma_e \times \epsilon_e$ de uma superliga à base de Níquel, em ensaios de tração realizados a 920 °C e diversas velocidades de deformação. Quanto mais rápida é a deformação, maior a mecânica do material que, por outro lado, diminui com o aumento da deformação (amaciamento por deformação).

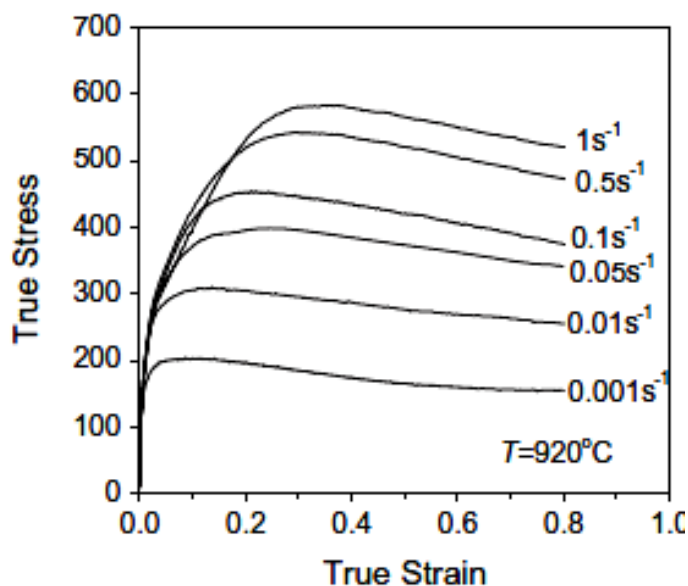


Figura 11: Curvas Tensão x Deformação efetivas ($\sigma_e \times \epsilon_e$) para uma superliga à base de Níquel, obtidas através de ensaios de tração a 920 °C e diversas velocidades de deformação [Y. C. Lin et alii, Materials & Design, vol 74, 2015, pp. 108 a 118].

Os programas de simulação computacional de conformação mecânica exigem que se forneçam dados das curvas $\sigma_e \times \varepsilon_e$ de cada material sendo processado, na temperatura de processamento, e para diversas velocidades de deformação. Em muitos casos os bancos de dados disponíveis nestes programas não cobrem todos os materiais de interesse. Uma dificuldade ainda maior é que, devido à dificuldade na realização de ensaios a alta velocidade de deformação, os dados existentes comumente cobrem faixas restritas de velocidade de deformação, raramente para velocidades acima de 10 s^{-1} . Da mesma forma que no caso de altas deformações efetivas, estes programas, quando necessário, realizam extrapolações dos dados existentes para velocidades de deformação acima daquelas para as quais se dispõem de dados experimentais. Tais extrapolações podem conduzir a erros muito grosseiros nos resultados obtidos nas simulações.

Durante a conformação mecânica, a deformação e a velocidade de deformação em um dado ponto da peça variam ao longo do processo. A Figura 12 ilustra três momentos do forjamento de uma peça, com a formação de rebarba, à temperatura ambiente. O último momento mostrado demonstra a ocorrência da remalha realizada automaticamente pelo programa de simulação. Destacam-se ainda dois pontos “A” e “B” da peça, para os quais considerou-se a variação da deformação efetiva e da velocidade de deformação efetiva ao longo do forjamento, que estão localizadas na Figura 13. Para o ponto A, à medida que a deformação aumenta, a velocidade de deformação varia, atingindo valores muito altos (25 s^{-1}) no final do forjamento. Já para o ponto B (no centro da peça), a velocidade de deformação atinge somente cerca de 5 s^{-1} . Para a simulação deste forjamento, é necessário fornecer um conjunto de curvas tensão-deformação efetivas ($\sigma_e \times \varepsilon_e$) cobrindo deformações efetivas (ε_e) de até 1,2 e velocidades de deformação até 25 s^{-1} . Para cada instante da simulação, o programa identifica a deformação efetiva e a velocidade de deformação efetiva para cada nó da malha, e atribui a este ponto a tensão efetiva indicada pelas curvas $\sigma_e \times \varepsilon_e$ fornecidas.

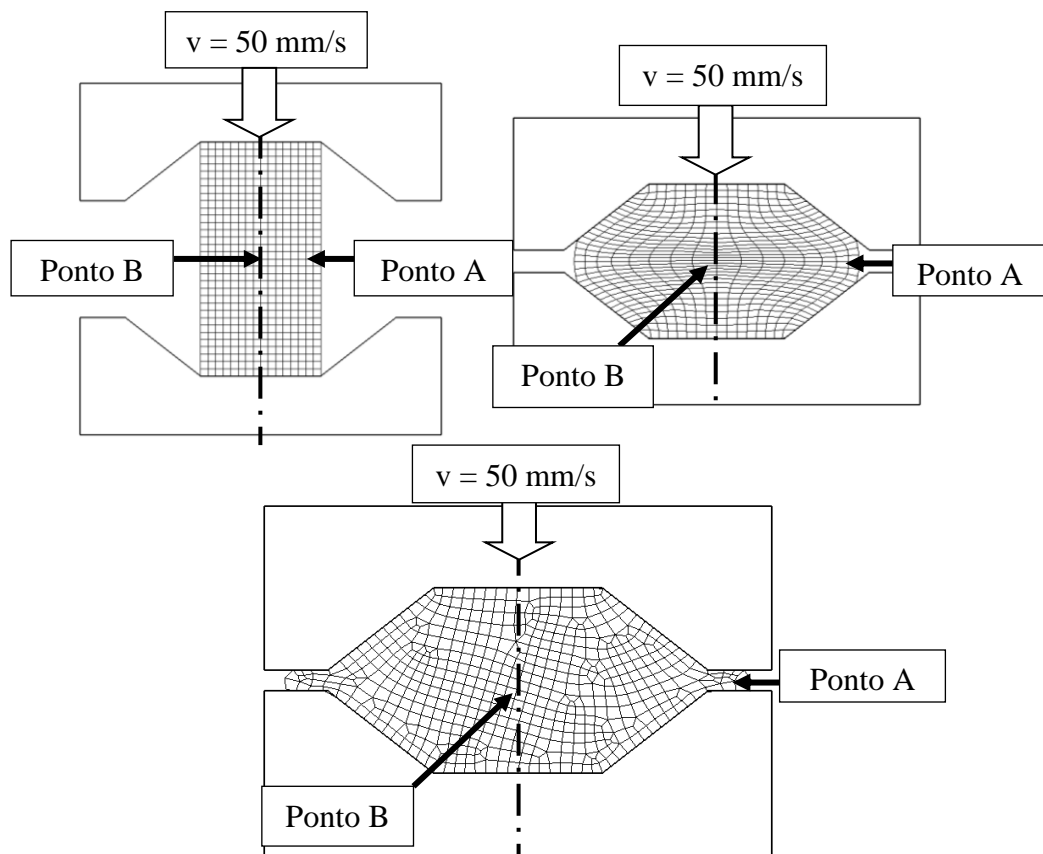


Figura 12: Forjamento de uma peça a uma velocidade de deslocamento do cabeçote superior de 50 mm/s.

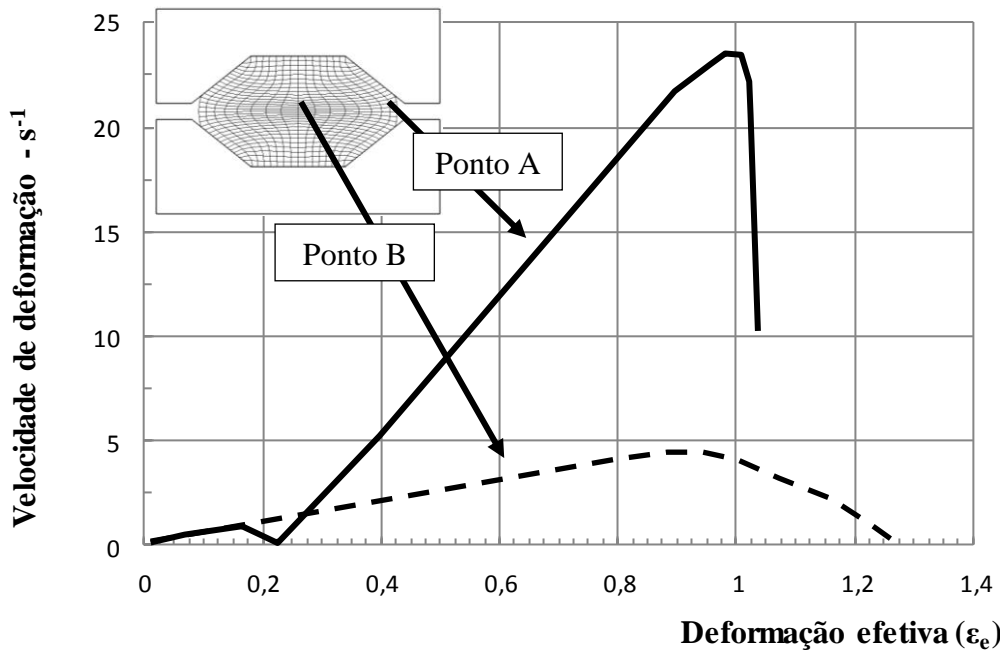


Figura 13: Variação da velocidade de deformação efetiva com a variação da deformação efetiva, para os pontos “A” e “B” mostrados na figura 12.

6. O EFEITO DA TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO

De forma análoga àquela descrita anteriormente para a velocidade de deformação, a temperatura também afeta muito a resistência mecânica dos materiais. A Figura 14 mostra resultados experimentais para as curvas de tensão vs. deformação efetivas ($\sigma_e \times \epsilon_e$) para uma superliga à base de Níquel. Observa-se uma queda pronunciada na resistência mecânica do material com o aumento da temperatura do material, com conseqüente queda na força total para forjar.

Um dos problemas que as simulações computacionais do forjamento levam em conta é a heterogeneidade de temperatura na peça que está sendo processada. Inicialmente, há um resfriamento da peça aquecida durante seu transporte desde o forno até a prensa. Tal resfriamento pode levar a uma heterogeneidade de temperatura na peça, como ilustrado na Figura 15 para o caso de um tarugo de alumínio.

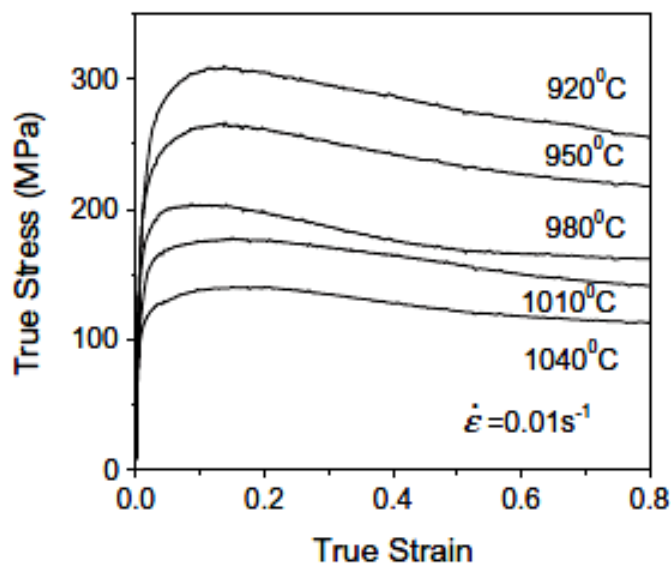


Figura 14: Curvas tensão x deformação efetivas ($\sigma_e \times \epsilon_e$) para uma superliga à base de Ni, obtidas através de ensaios de tração a velocidade de deformação de 0,01 s⁻¹ e diversas temperaturas [Y. C. Lin et alii, Materials & Design, vol 74, 2015, pp. 108 a 118].

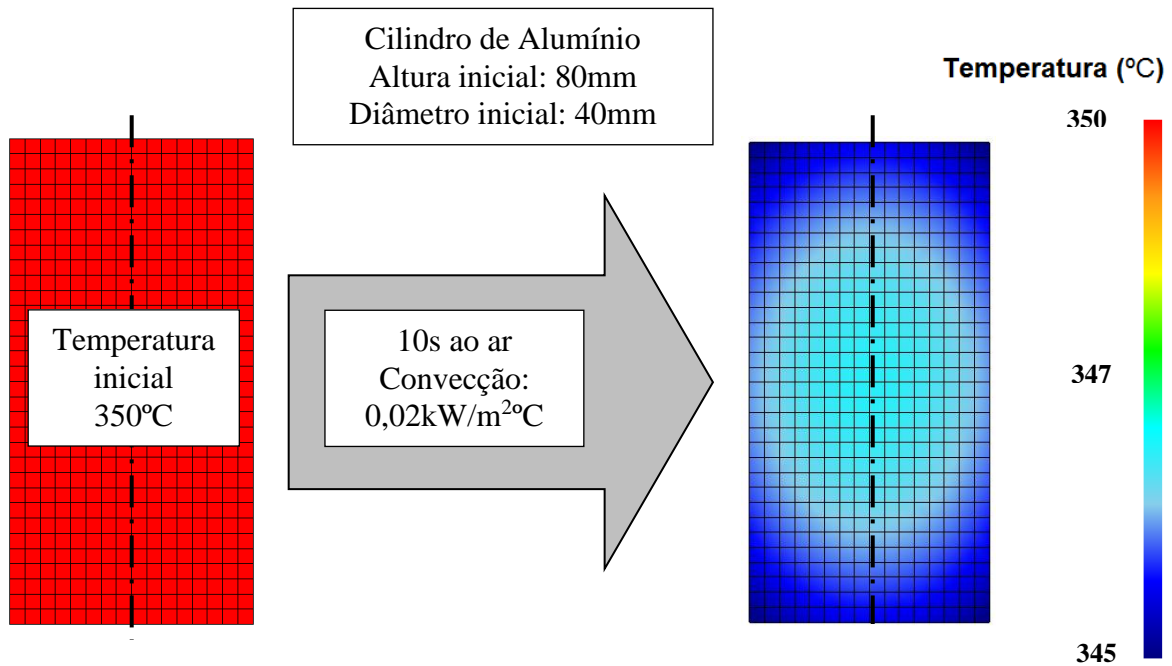


Figura 15: Distribuição de temperaturas em um tarugo de alumínio inicialmente aquecido homogeneamente até 350°C e resfriado ao ar por 10s. ($0,02\text{kW/m}^2\text{°C}$).

Durante o forjamento, além da perda térmica para a atmosfera, ainda ocorre o aquecimento do material devido à própria deformação e o resfriamento pelo contato com a matriz. A Figura 16 mostra o resultado de uma simulação do forjamento do tarugo ilustrado na Figura 15, onde se desprezou o resfriamento pelo contato com a matriz, e registrou-se somente o aquecimento causado pela deformação do material. Observa-se que na região da rebarba, ocorreu um aquecimento pronunciado, causado pela intensa deformação plástica na região.

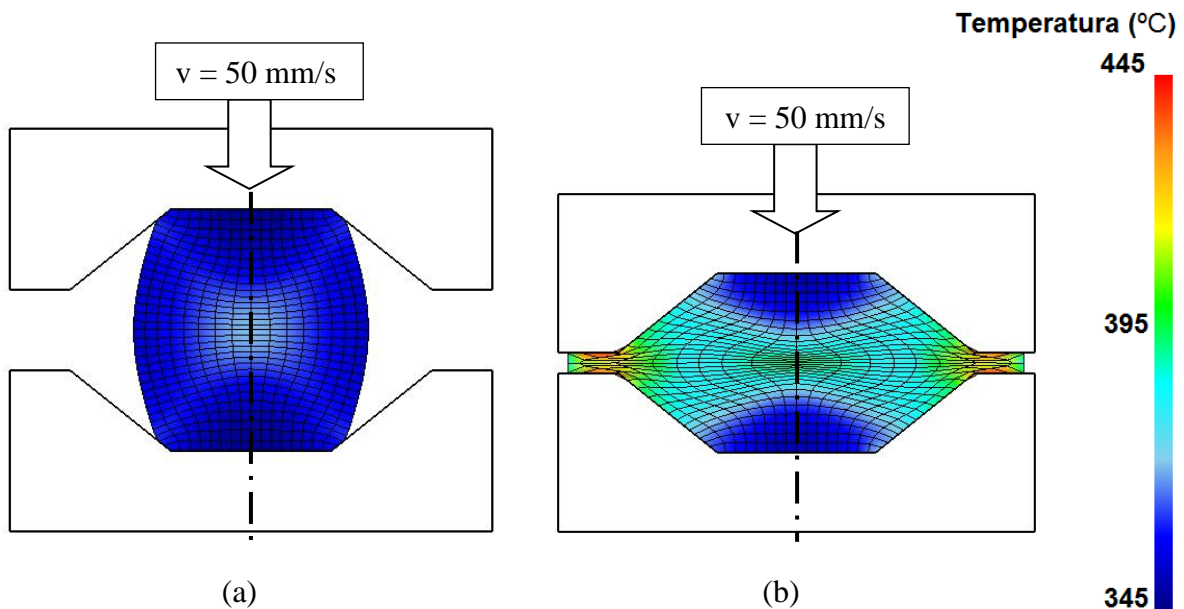


Figura 16: Distribuição de temperaturas em um tarugo de alumínio aquecido homogeneamente até 350°C e resfriado ao ar por 10s, sem troca de calor entre o material e as matrizes: (a) forjado até 20 mm de deslocamento da matriz superior e (b) forjado até o final do curso da prensa.

A Figura 17 ilustra a variação da deformação efetiva e da temperatura para a região da rebarba e no centro da peça. Enquanto a região central do material aquece-se de forma aproximadamente contínua, a região da rebarba sofre um grande aquecimento somente ao final do forjamento.

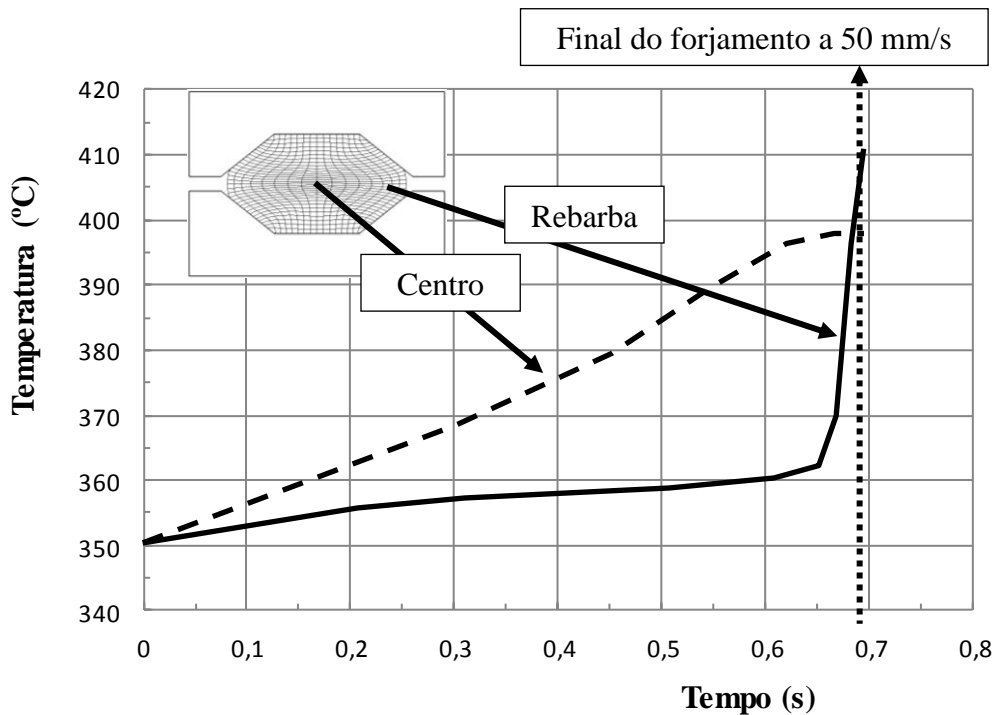


Figura 17: Variação da temperatura em dois pontos de uma peça sendo forjada, ao longo do percurso de forjamento da prensa, sem efeito de resfriamento do material pelas matrizes.

Finalmente, há que se considerar que ocorre resfriamento do material pelas matrizes. A Figura 18 ilustra o mesmo forjamento mostrado na Figura 16, mas agora levando em conta (i) o resfriamento do tarugo, na atmosfera, entre o forno de aquecimento e a prensa, (ii) o aquecimento causado pela deformação, mas sem resfriamento pelo contato com as matrizes e (iii) o resfriamento pelo contato com as matrizes, que foram tomadas inicialmente à temperatura ambiente. A Figura 19 mostra a evolução da temperatura ao longo do forjamento para quatro pontos da peça. Observa-se que na região de contato do material com a matriz ocorre resfriamento do material, que, por outro lado, sofre um aquecimento contínuo no centro da peça.

7. O EFEITO DA DEFORMAÇÃO, VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO

Considerando o exposto anteriormente, conclui-se que a tensão efetiva, para cada ponto de uma peça sendo processada, depende do nível de deformação naquele ponto, da velocidade de deformação e da temperatura. Além disso, há uma interação entre esses três aspectos, uma vez que a deformação provoca aquecimento, e a velocidade de deformação afeta a transferência de calor dentro do próprio material e do material para as matrizes; quanto mais rápida esta velocidade, menos transferência de calor ocorre para as matrizes, devido ao menor tempo de contato entre o material e a matriz.

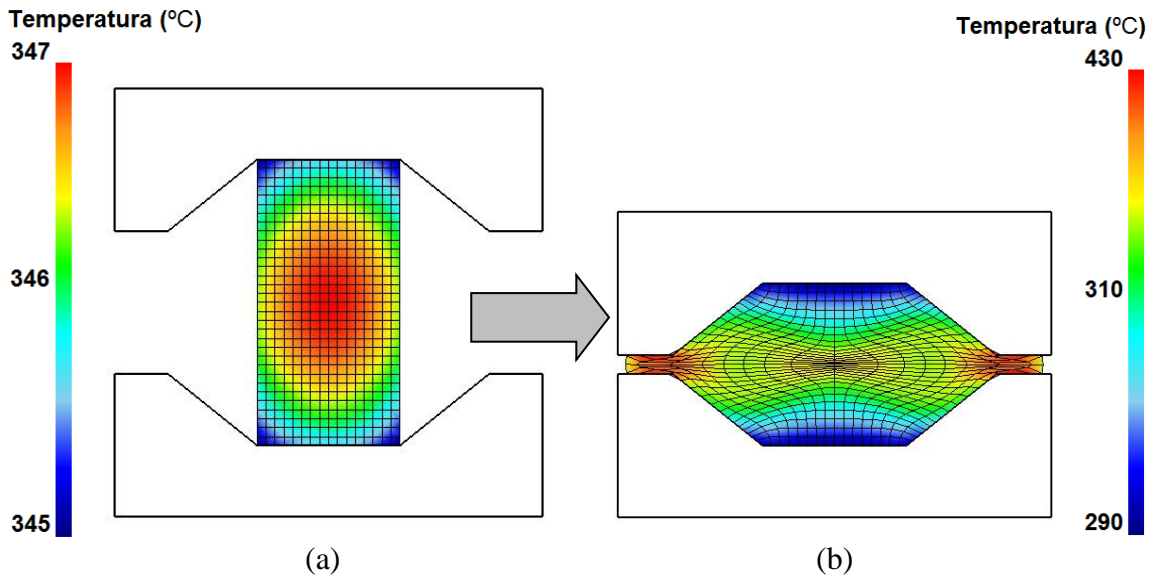


Figura 18: Distribuição de temperaturas em um tarugo de alumínio, considerando: o resfriamento inicial do tarugo ao ar, o aquecimento causado pela deformação e o resfriamento pelas matrizes, que inicialmente encontravam-se à temperatura ambiente; (a) início do forjamento e (b) final do forjamento.

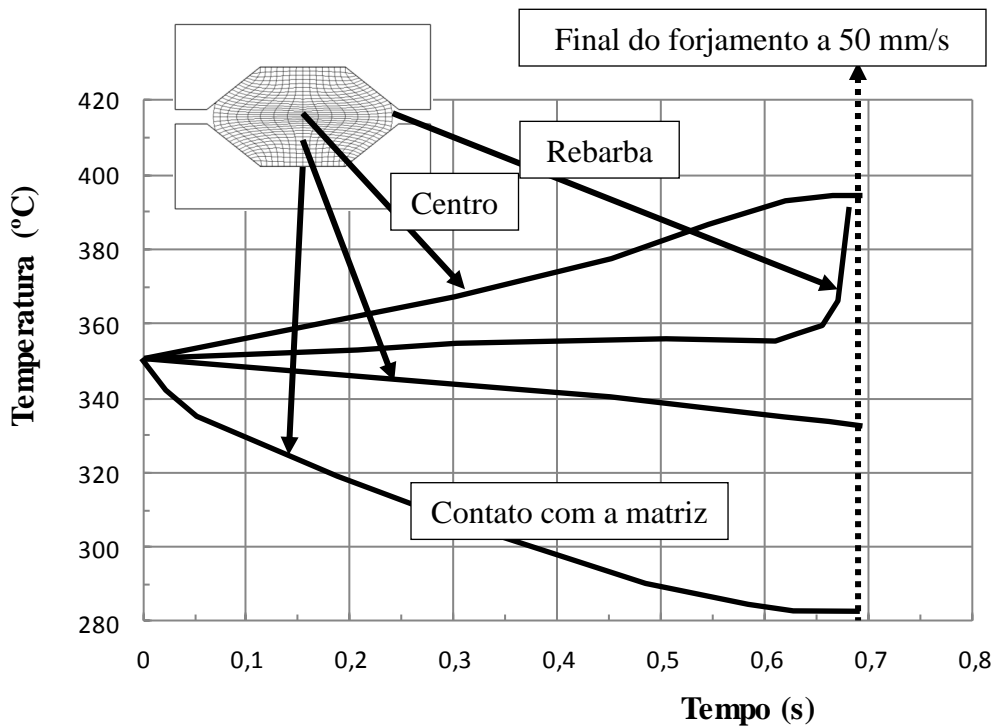


Figura 19: Variação da temperatura em quatro pontos de uma peça sendo forjada, ao longo do percurso de forjamento da prensa, incluindo o resfriamento inicial do tarugo ao ar, o aquecimento provocado pela deformação e o resfriamento causado pelo contato com as matrizes.

Desta forma, para que uma simulação computacional de um processo de conformação possa ser realizada, é necessário que se disponha de um conjunto de dados que permitam o cálculo da tensão efetiva (σ_e) do material para diferentes níveis de deformações efetivas (ϵ_e), velocidades de deformação ($\dot{\epsilon}_e^*$) e temperaturas (T). É também importante que os dados disponíveis cubram as faixas de deformação efetiva (ϵ_e), velocidades de deformação ($\dot{\epsilon}_e^*$) e temperaturas (T) observadas durante o processamento, ou que se conheçam as extrapolações realizadas pelo programa computacional quando se tornarem necessários dados fora das faixas para as quais se dispõem de

dados experimentais.

Os dados para as tensões efetivas (σ_e) são introduzidas nos programas de simulação da conformação mecânica de duas formas: ou através de tabelas, onde, para cada conjunto de valores da deformação efetiva (ϵ_e), velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}_e$) e temperatura (T) se fornece o valor da tensão efetiva (σ_e), ou por meio de equações que interligam essas variáveis ($\sigma_e = f(\epsilon_e, \dot{\epsilon}_e, T)$). No primeiro caso, o próprio programa de simulação obtém σ_e através de interpolações entre os valores fornecidos, para conjuntos de ϵ_e , $\dot{\epsilon}_e$ e T não diretamente disponíveis na tabela. No segundo caso, utiliza-se a equação fornecida para se obter σ_e .

Outro aspecto importante a ser considerado é que as composições químicas, microestruturas e tratamentos térmicos iniciais do material sendo processado podem diferir daqueles empregados na determinação dos dados armazenados nas bibliotecas de programas computacionais. Desta forma, pode ser interessante realizar alguns ensaios no material empregado, para alguns valores de deformação, velocidades de deformação e temperaturas, de forma a se poder validar os dados na biblioteca do programa computacional sendo utilizado.

Finalmente, é digno de nota que, face às incertezas e dificuldades acima descritas, já se encontram no mercado bancos de dados sobre materiais que podem ser acoplados aos programas computacionais de simulação computacional da conformação. Tais bancos são obtidos por empresas especializadas na área, e frequentemente os dados disponíveis são mais detalhados e possivelmente mais exatos que aqueles contidos nas bibliotecas dos programas computacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio continuado, ao longo das últimas décadas, da CAPES, CNPq, FAPEMIG, PPGEM/PROEX - UFMG (Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG) e PPGMEC/PROF-UFMG (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFMG), às atividades desenvolvidas na área de fabricação por conformação mecânica.