

INTERACÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DA MÁQUINA-FERRAMENTA E A OPERAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NA SIMULÇÃO NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

Bárbara Perry Pereira Alves Gouveia Almeida

IST, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, e-mail: bgouveia@ist.utl.pt.

Jorge Manuel da Conceição Rodrigues

IST, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, e-mail: jrodrigues@ist.utl.pt.

Paulo António Firme Martins

IST, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, e-mail: pmartins@ist.utl.pt.

***Resumo.** O desenvolvimento continuado da simulação numérica, em especial a baseada no método dos elementos finitos, tem permitido analisar detalhadamente os processos de fabrico ainda durante os estágios de concepção e projecto. Contudo, grande parte dos programas de elementos finitos actualmente disponíveis para a simulação não atendem às características das máquinas-ferramenta, sendo esta lacuna superada, por exemplo, com a introdução de perfis de velocidades para as ferramentas. A consequência desta limitação é que a extrapolação das previsões numéricas para o ambiente industrial depende, na maioria dos casos, da experiência do utilizador sobre o processo de fabrico e sobre o próprio equipamento. Neste trabalho apresentam-se os requisitos necessários à implementação das variáveis que caracterizam a máquina-ferramenta em programas de elementos finitos dedicados ao estudo de operações de deformação plástica na massa. Consideram-se os tipos de máquinas-ferramenta mais usados nestas operações tecnológicas e apresenta-se um exemplo numérico com a finalidade de ilustrar a aplicabilidade da solução proposta.*

***Palavras-chave:** Máquinas-ferramenta, deformação plástica na massa, simulação numérica.*

1. INTRODUÇÃO

Os últimos anos têm-se caracterizado por um interesse crescente em tornar a modelação numérica mais acessível aos utilizadores não especialistas. É patente que os avanços de natureza industrial se têm ficado a dever à maior fiabilidade da simulação numérica na modelação de grandes deformações plásticas, na análise termo-mecânica acoplada com distribuição de temperatura nas ferramentas, ou, mais recentemente, na aplicação de modelos de dano⁽¹⁾ avaliando a capacidade de deformação dos materiais. Todavia, constata-se que pouca atenção tem sido dedicada ao estudo da influência das características das máquinas ferramentas usadas no processo produtivo. A generalidade das simulações numéricas são realizadas considerando as velocidades das matrizes constantes, não fazendo intervir na modelação qualquer informação sobre a cinemática, a força ou a energia disponível na máquina ferramenta. Tanto quanto é do conhecimento dos autores, o primeiro trabalho que introduz na modelação o comportamento cinemático de uma prensa mecânica, fazendo variar a velocidade da matriz em função do tempo de contacto com a peça, deve-se a Rebelo e Kobayashi⁽²⁾. O primeiro trabalho de natureza teórico-experimental que sistematiza este tipo de análise foi apresentado por Yoon

e co-autores⁽³⁾, no qual desenvolvem um estudo sobre o processo de forjamento multi-golpe realizado num martelo de queda por gravidade, usando um código de elementos finitos rígido-plástico. Actualmente, existem diversos programas comerciais de elementos finitos, como sejam o DEFORM, o Q-FORM ou o EESY-2-FORM, onde se pode seleccionar o tipo de máquina ferramenta, no entanto, a informação de índole técnica que é disponibilizada é muito escassa.

Este trabalho apresenta uma descrição dos princípios básicos de funcionamento das máquinas ferramentas mais usadas nos processos de conformação, complementada com a metodologia seguida na sua inclusão no programa de elementos finitos I-Form2. O trabalho termina com a aplicação da solução proposta a um exemplo numérico, consistindo na compressão uniaxial entre pratos planos sem atrito de um bilete de geometria cilíndrica, realizada com diferentes tipos de máquinas ferramenta.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Máquinas ferramenta

De entre todas as classificações possíveis para as máquinas ferramenta, aquela que talvez seja a mais abrangente é a que é feita em função do tipo de regulação de controlo da máquina ferramenta, ou seja, com controlo de força, de deslocamento ou de energia^(4,5). Os martelos de queda são máquinas ferramenta com controlo de energia (Figura 1). Nos martelos de queda com dispositivo de aceleração o peso do carro móvel é artificialmente ampliado através da aplicação de uma pressão, p , no cilindro de actuação do carro, aumentando, desse modo, a energia disponível para o golpe, em comparação com um martelo de queda por gravidade com a mesma massa do carro móvel. A energia total, W_T , disponível para cada golpe será, neste caso, dada por,

$$W_T = (m g + p A) H \quad (1)$$

em que m é a massa do carro móvel (considerando a ferramenta), g a aceleração da gravidade, H é a altura da queda, A é a área da secção do pistão onde a pressão do meio pressurizado é aplicada.

Uma vez que a energia cinética fornecida no golpe é igual à energia total do carro móvel,

$$W_T = \frac{1}{2} m v^2 = (m g + p A) H \quad (2)$$

Então, velocidade de impacto da matriz na pré forma vem dada por,

$$v^0 = \sqrt{2H \left(g + \frac{pA}{m} \right)} \quad (3)$$

em que o índice '0' indica o tempo de contacto acumulado; $t = 0$ refere-se ao instante de impacto.

Convém acrescentar que durante cada golpe do martelo de queda nem toda a energia disponível no carro móvel é transformável em energia de deformação, parte dessa energia é dissipada por atrito no sistema de guiamento, sob a forma de vibração e ruído e ainda pela deformação elástica da estrutura e das matrizes. Nestas condições, é habitual definir a eficiência do martelo de queda, $\eta = W_U^0 / W_T$, através da relação entre a energia efectivamente usada na deformação plástica da peça, W_U^0 , e a energia total disponível no martelo, W_T .

À semelhança dos martelos de queda também as prensas de fuso são máquinas com controlo de energia (Figura 2). Este tipo de máquina ferramenta pode-se classificar ainda em diferentes categorias, função do sistema usado para acelerar o volante de inércia e o sistema de fuso. A Figura 2 mostra uma prensa de fuso comum, onde os discos motores, rodando continuamente, são movidos axialmente para que um dos dois discos active o movimento por atrito; um para o curso

descendente e o outro para o curso ascendente.

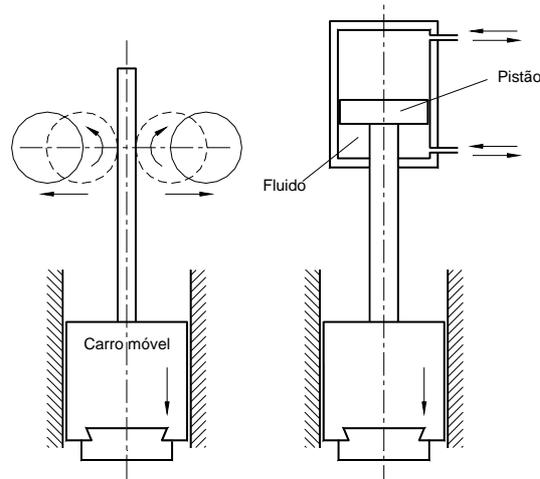


Figura 1. Princípio de operação de dois tipos de martelos de queda; martelo de queda por gravidade (esquerda) e martelo de queda com agente acelerador (direita).

Admitindo que não existe escorregamento, a velocidade circunferencial do volante de inércia, v_c , pode ser obtida a partir da velocidade angular dos discos motores, ω , e da posição radial instantânea do volante de inércia, r_i , por,

$$v_c = \omega r_i = \frac{d\theta}{dt} R \quad \text{com} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi}{f} \frac{dr}{dt} \quad (4)$$

em que θ é o ângulo de rotação do volante de inércia e f o passo do fuso, que após substituição fornece uma expressão para calcular a velocidade de descida do carro móvel, cujo valor para o instante do impacto com a pré forma ($t = 0$), será dado por,

$$v^0 = \frac{f}{2\pi R} v_c = \frac{f}{\sqrt{2}\pi} \sqrt{\frac{W_T}{I}} \quad \text{com} \quad W_T = \frac{1}{2} I \omega_F^2 \quad (5)$$

em que I é o momento de inércia do volante de inércia e W_T a energia total disponibilizada pelo volante de inércia para cada golpe, sendo ω_F a velocidade angular do volante de inércia. À semelhança do que foi referido para os martelos de queda, também nas prensas de fuso haverá necessidade de se definir a eficiência do golpe.

As prensas mecânicas são um outro tipo de máquinas ferramenta muito utilizadas nos processos de conformação (Figura 3). Estas prensas pelas suas características são máquinas com controlo em deslocamento. Em termos gerais pode-se dizer que nas prensas mecânicas o movimento alternativo da corrediça é obtido a partir de um sistema biela manivela que transforma o movimento de rotação induzido pelo volante de inércia, no movimento linear da corrediça. A cinemática pode ser analisada na Figura 3, obtendo-se as seguintes expressões para descrever respectivamente a velocidades circular da manivela, v_{CK} , a velocidade linear da biela, v_{CR} , e a velocidade vertical da corrediça, v ,

$$v_{CK} = \omega_F R \quad v_{CR} = v_{CK} \sin(\alpha + \beta) \quad v = \omega_F R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad (6)$$

Para o curso da prensa, a velocidade máxima da corredeira atinge-se a meia distância entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI), enquanto que as menores velocidades surgem nos pontos de inversão do movimento vertical da corredeira, ou seja, no PMI e no PMS.

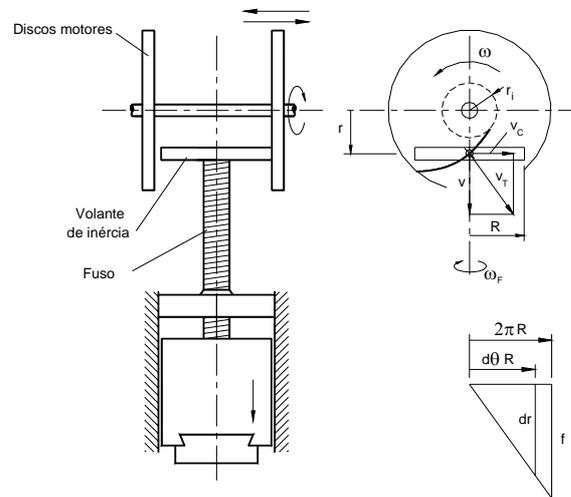


Figura 2. Representação esquemática de uma prensa de fuso com accionamento por discos de atrito.

De um modo geral, pode-se afirmar que as velocidades médias de trabalho destas prensas são bem inferiores às dos martelos de queda ou das prensas de fuso, levando a que o golpe da matriz na pré forma se assemelhe mais a uma compressão contínua do que propriamente a um impacto. Fica assim justificado as menores dimensões das ferramentas, bem como a maior longevidade das matrizes nas prensas mecânicas, quando comparadas com as usadas nos martelos de queda ou nas prensas de fuso. Acrescente-se ainda que a força máxima disponibilizada pela prensa surge no PMI, resultante do alinhamento da manivela com a biela e a corredeira. A partir da Figura 3 tira-se a relação entre a posição da corredeira, h , em função da posição angular da manivela, α ,

$$h = R (1 - \cos \alpha) + L (1 - \cos \beta) \tag{7}$$

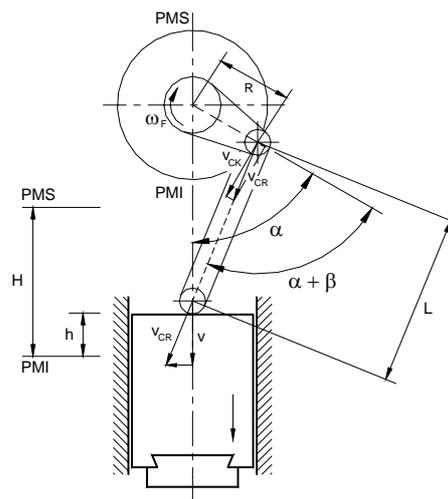


Figura 3. Representação esquemática de uma prensa mecânica accionada por um sistema biela manivela simples.

Partindo da hipótese que o ângulo β é pequeno, a Equação (7) simplifica-se para,

$$h = R (1 - \cos \alpha) + \frac{1}{2} \frac{R^2}{L} \sin^2 \alpha \quad (8)$$

Expressão que permite relacionar o ângulo de posição angular da manivela, α , com a posição da corredeira, h , em particular no início do contacto entre a matriz e a pré forma. Como se sabe, nestas prensas a energia necessária ao processo encontra-se acumulada no volante de inércia que roda continuamente a uma velocidade nominal. Durante a fase de entrega de energia a rotação do volante inércia baixa para um valor inferior ao nominal, perdendo-se parte dessa energia nos sistemas de transmissão, assim como na deformação elástica das ferramentas e da estrutura da máquina ferramenta. À semelhança dos anteriores casos analisados, também para as prensas mecânicas será necessário ter em consideração a eficiência do golpe, η . As prensas hidráulicas são máquinas com controlo de força que operam com base em cilindros hidráulicos. Uma das principais características destas prensas é a de poderem dispor da sua força nominal em qualquer posição do curso, uma vez que a força disponível só depende da pressão existente na câmara do cilindro.

Também a velocidade de actuação do carro móvel pode ser controlada durante o curso, bastando, para tal, variar o caudal de alimentação do cilindro. Deste modo, as velocidades de trabalho nas prensas hidráulicas são baixas, levando a que o tempo de contacto entre as matrizes e as pré formas seja elevado. Em face destas características são máquinas ferramenta usadas geralmente em operações de extrusão ou de forjamento de precisão.

2.2 Formulação de elementos finitos

Para simular a dependência da força de conformação com as características energéticas e cinemáticas de cada máquina ferramenta usou-se o programa de elementos finitos I-Form2 que tem vindo a ser desenvolvido no Instituto Superior Técnico. O código de elementos finitos baseia-se na formulação do escoamento usando o método da função de penalidade, cuja forma variacional fraca, expressa em termos da variação arbitrária de velocidades, escreve-se do seguinte modo

$$\delta \Pi = \int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (9)$$

em que V é o volume de controlo limitado pelas superfícies S_U e S_F , onde as velocidades e as tensões são prescritas, respectivamente, e K é uma constante positiva de valor elevado penalizando a componente volumétrica da velocidade de deformação, $\dot{\epsilon}_v$, para assegurar a incompressibilidade. Detalhes sobre a formulação podem ser encontrados em Alves e co-autores^(6,7).

2.3 Interação entre as variáveis das máquinas ferramenta e a formulação de elementos finitos

Nas máquinas ferramenta com controlo de energia, a energia disponível para a deformação plástica da peça, W_U^0 , é determinada a partir da energia cinética do movimento do carro móvel no instante inicial. Tanto para os martelos de queda, como para as prensas de fuso, as equações que permitem calcular a velocidade no instante do impacto, v^0 , já foram apresentadas na secção 2.1. Uma vez que as operações de conformação são na sua generalidade cinematicamente transientes, a evolução do movimento é efectuada através de uma descrição Lagrangiana actualizada, na qual a configuração para o instante t é adoptada como referência para se determinar a configuração deformada do instante $t + \Delta t$,

$$x(t + \Delta t) = x(t) + u^t \Delta t \quad (10)$$

em que Δt é um incremento de tempo suficientemente pequeno para assegurar que a velocidade da

máquina ferramenta, v^t , e a conseqüente distribuição de velocidades na peça, u^t , possam ser tratadas como constantes. Sendo a energia remanescente, W_U^t , calculada a partir da diferença entre a energia disponível no início da operação, W_U^0 , e a consumida por deformação plástica e pelas perdas características da máquina até esse instante, W_{PF}^t , dada por,

$$W_U^t = W_U^0 - W_{PF}^t \quad (11)$$

A velocidade da máquina ferramenta, v^t , para um tempo de contacto arbitrário t no caso de um martelo de queda e de uma prensa de fuso será calculada a partir de W_U^t , respectivamente, por,

$$v^t = \sqrt{\frac{2}{m} W_U^t} \quad v^t = \frac{f}{\sqrt{2} \pi} \sqrt{\frac{W_U^t}{I}} \quad (12)$$

Então, para cada golpe a deformação da peça será calculada até que a energia disponível no carro móvel da máquina ferramenta seja esgotada. No caso de não se ter alcançado a geometria desejada para a peça, haverá que dar início a um novo golpe e assim sucessivamente até que a deformação seja a pretendida. Analogamente para as prensas mecânicas a velocidade correspondente ao instante arbitrário t , determina-se a partir da cinemática do sistema biela manivela apresentado anteriormente. As variáveis que descrevem o sistema biela manivela (ver Figura 3) obtém-se igualmente aplicando um tratamento explícito,

$$v^t = \omega^t R \frac{\text{sen}(\alpha^t + \beta^t)}{\cos \beta^t} \quad (13)$$

$$\omega^t = \sqrt{2 \frac{W_U^{t-\Delta t}}{I}} \quad ; \quad \alpha^t = \alpha^{t-\Delta t} \omega^t \Delta t \quad ; \quad \beta^t = \text{sen}^{-1} \left(\frac{R \text{sen} \alpha^t}{L} \right)$$

A modelação numérica considera ainda a perda progressiva de rotação do volante de inércia por golpe, contemplando a possibilidade de paragem da máquina ferramenta sempre que a energia disponível no volante de inércia não seja suficiente para a deformação. No que se refere às prensas hidráulicas a interacção entre variáveis é mais simples, consistindo basicamente em verificar se em cada golpe a força necessária ao processo é inferior à força nominal da prensa. Convém ainda referir que nas operações multi-golpe, efectuadas com martelos de queda ou com prensas de fuso, as variáveis históricas (extensão, temperatura) são tratadas de modo análogo ao das operações de regeneração de malha, ou seja, são preservadas entre golpes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O exemplo numérico seleccionado para mostrar a aplicabilidade da solução proposta, consistiu na compressão uniaxial a frio de um bilete de geometria cilíndrica, entre pratos planos sem atrito. A Figura 4 apresenta a geometria inicial e final do bilete, bem como a malha de elementos finitos usada no decurso das várias simulações numéricas efectuadas. O material usado nesta análise foi o alumínio Al 1100, com a curva de escoamento dada por: $\bar{\sigma} = 119.28 \bar{\epsilon}^{0.297}$ (MPa)⁽⁴⁾.

A energia necessária para realizar esta operação de conformação a frio determina-se através de,

$$W = V \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_{50\%}} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = 44902 \quad (\text{J}) \quad (14)$$

em que V é o volume do bilette e o integral representa a área delimitada pela curva tensão extensão verdadeira do material, no intervalo das extensões consideradas.

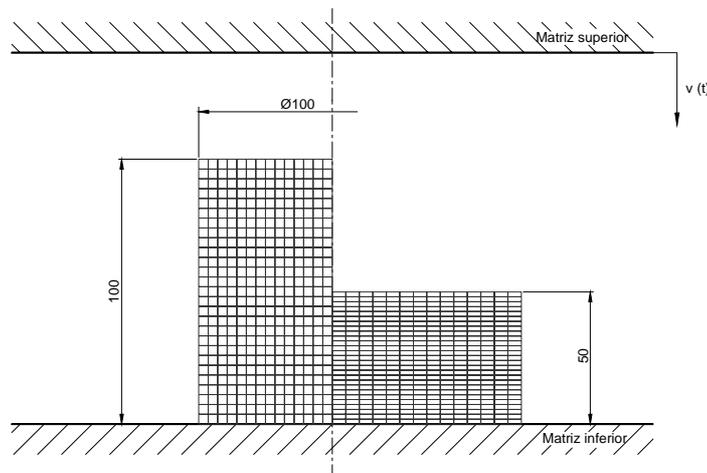


Figura 4. Bilette cilíndrico, malha de elementos finitos usada nas simulações numéricas, onde a velocidade da matriz superior são função da máquina ferramenta usada (Tabela 1).

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, a evolução da força, da energia de deformação e da velocidade da matriz superior em função do tempo da operação, obtidos a partir da interacção entre as variáveis que caracterizam as diferentes máquinas ferramenta (listadas na Tabela 1) e a simulação numérica da operação de compressão.

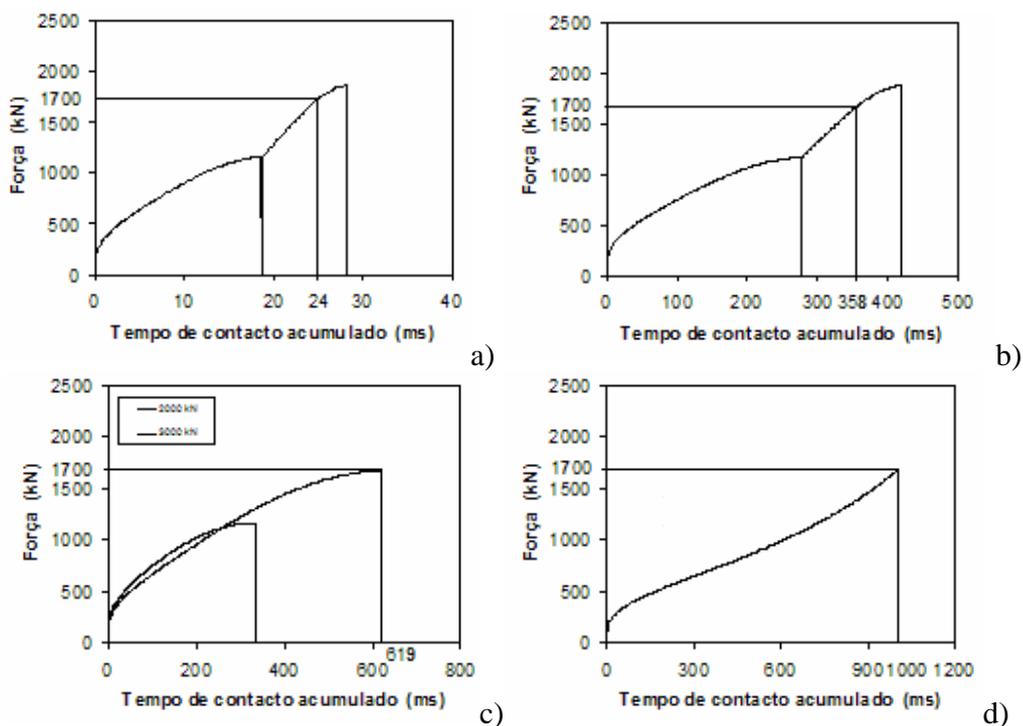


Figura 5. Força de deformação em função do tempo de contacto acumulado (simulação numérica). a) Martelo de queda por gravidade, b) prensa de fuso, c) pressas mecânicas e d) prensa hidráulica.

Para todos os casos analisados a força máxima de deformação, correspondente à redução em altura de 50%, atinge um valor aproximado de 1700 kN (Figura 5), valor concordante com o determinado analiticamente. Contudo, as respectivas taxas de crescimento dependem do tipo de máquina ferramenta

usada. Relativamente ao tempo de contacto da matriz com a pré forma durante a operação, verifica-se que o tempo mais curto está associado ao martelo (24 ms), enquanto que o mais longo surge para a operação efectuada com a prensa hidráulica (1000 ms). Os tempos de contacto obtidos com a prensa de fuso e a prensa hidráulica de 3000 kN são intermédios e totalizaram 358 ms e 619 ms, respectivamente. Constata-se, assim, que o tempo de contacto para a prensa de fuso é cerca de 15 vezes superior ao do martelo de queda, subindo esta relação para 42 vezes quando se considera a prensa hidráulica.

Tabela 1. Características principais das máquinas ferramenta utilizadas na simulação numérica.

Tipo de Máquina	Força Nominal (kN)	Massa do carro móvel (kg)	Curso (mm)	Energia útil disponível por golpe (J)
Martelo de queda	-	5 000	-	25 730
Prensa de fuso	6 000	-	-	25 730
Prensa mecânica	2 000	-	130	25 730
Prensa mecânica	3 000	-	130	65 260
Prensa hidráulica	2 000	-	-	-

É interessante verificar que a prensa mecânica de 2000 kN não é capaz de completar a operação de compressão, embora a força máxima necessária à operação de deformação plástica seja inferior à força nominal da prensa. Acontece, porém, que a energia disponível no volante de inércia esgota-se após um tempo de contacto com a peça de 334 ms, para uma deformação do bilete de 36.3 mm. Este resultado é revelador do modo como o acoplamento das características da máquina ferramenta na simulação numérica é fundamental para seleccionar correctamente os equipamentos.

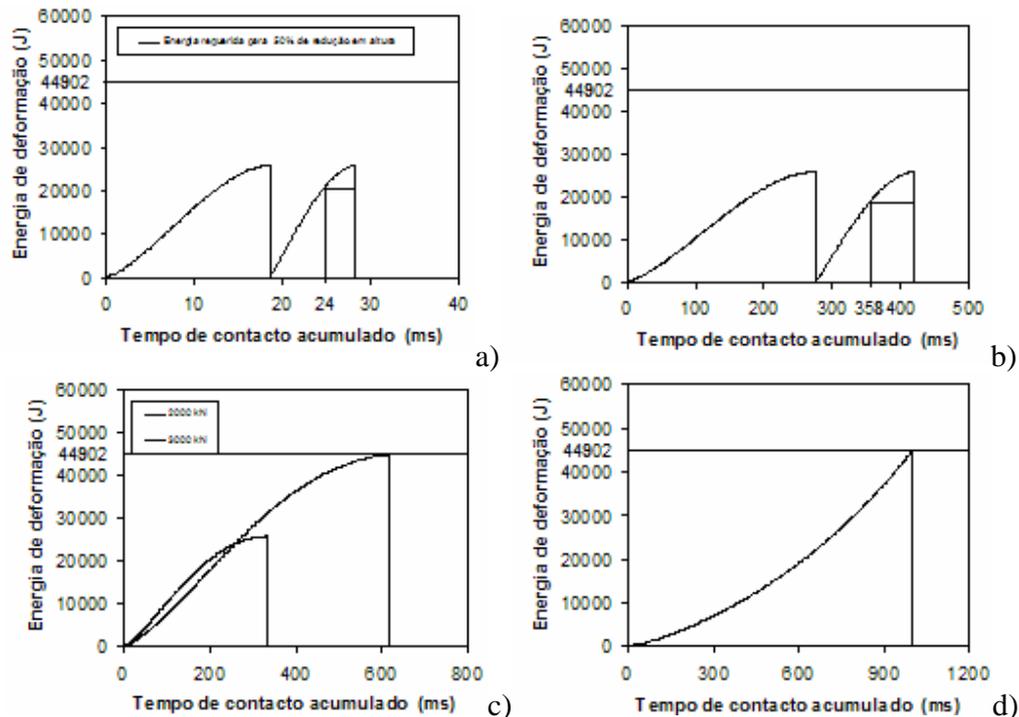


Figura 6. Energia de deformação em função do tempo de contacto acumulado (simulação numérica). a) Martelo de queda por gravidade, b) prensa de fuso, c) prensas mecânicas e d) prensa hidráulica.

Por outro lado, quando a operação de deformação plástica é conduzida com o martelo de queda ou com a prensa de fuso são necessários dois golpes para completar a operação, com a força da operação a subir até que a totalidade da energia disponível seja consumida. Através da Figura 6 verifica-se que tanto para o martelo de queda, como para a prensa de fuso vai haver no segundo golpe um excesso de

energia disponível na altura de fecho das matrizes. Esta energia remanescente que atinge cerca de 6500 J em ambos os casos irá ser transmitida à ferramenta, à estrutura e às fundações da máquina. Consultando a Figura 7, tira-se que as velocidades instantâneas de fecho das matrizes são bem diferentes consoante o tipo de máquina ferramenta usada, enquanto que no caso das prensas mecânicas e hidráulica essa velocidade é nula, no caso do martelo de queda e da prensa de fuso a velocidades atingem valores de 1.6 m/s e de 0.11 m/s, respectivamente. A desaceleração até à paragem da matriz superior é, portanto, muito mais violenta no martelo de queda do que na prensa de fuso, ou na prensa mecânica ou hidráulica. Este são motivos que explicam não só a menor qualidade dimensional das peças produzidas com martelos de queda, como ainda o maior ruído e vibração associada a este tipo de equipamentos.

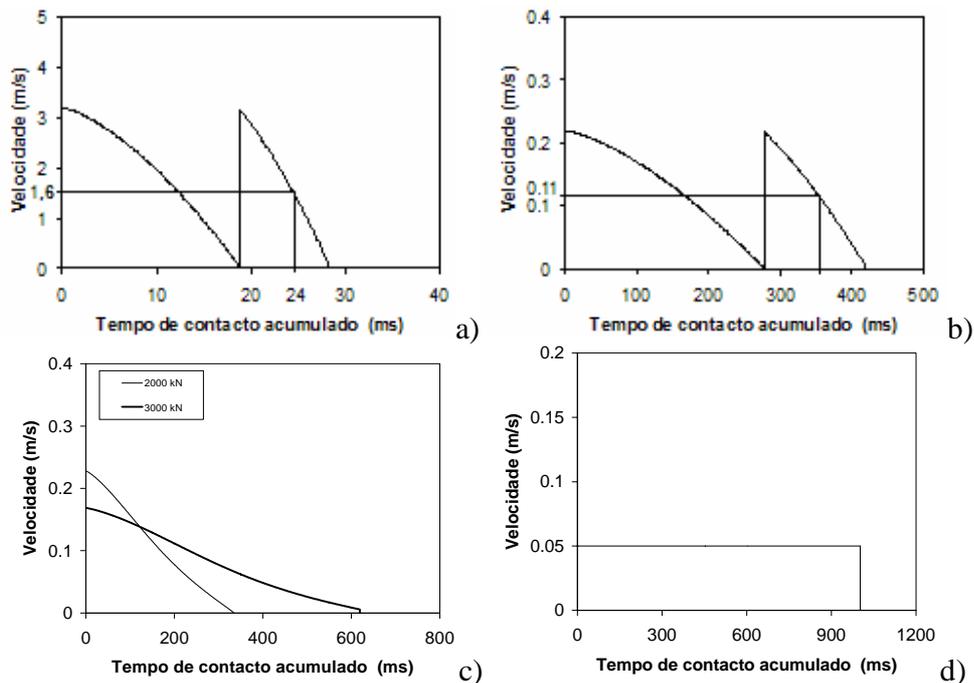


Figura 7. Velocidade da matriz superior versus tempo de contacto acumulado (simulação numérica). a) Martelo de queda por gravidade, b) prensa de fuso, c) prensas mecânicas e d) prensa hidráulica.

A Figura 7 revela de facto importantes diferenças de natureza cinemática. No caso do martelo de queda a velocidade no início da operação é muito elevada, diminuindo rapidamente à medida que a energia se vai dissipando, acentuando-se esta tendência para o 2º golpe. Pode-se, portanto, dizer que o 1º golpe se processa com maior suavidade que o 2º. No caso das prensas mecânicas constata-se que a velocidade decresce progressivamente com o curso, significando que o controlo dimensional e a qualidade das peças produzidas é melhorado e justificando a maior adequabilidade destes equipamentos para operações de acabamento. No caso das prensas hidráulicas estes argumentos são reforçados pelo melhor controlo de deslocamento e de velocidade. Por fim refira-se que através da simulação numérica acoplada com o tipo de máquina é ainda possível determinar correctamente o tempo de contacto das ferramentas com as peças, fundamental no estudo dos fenómenos de transferência de calor entre as peças e as matrizes, na selecção dos dispositivos de lubrificação mais adequados e também na estimativa do número de golpes por minuto, ou melhor, da taxa de produção do processo de fabrico.

4. CONCLUSÕES

Através da inclusão das características das máquinas ferramenta mais usadas em processos de conformação num código de elementos finitos foi possível avaliar a importância que o tipo de

máquina desempenha na evolução das principais variáveis processuais. Para tal, descreveram-se as características cinemáticas e energéticas de diferentes máquinas ferramenta e apresentou-se uma metodologia de modelação numérica destinada à integração daquelas variáveis em programas de elementos finitos. A importância da solução proposta foi evidenciada através da aplicação a um exemplo numérico, cuja discussão revelou que as melhorias da modelação destes processos tecnológicos por elementos finitos tem que passar necessariamente por se considerar as características dos equipamentos usados na produção.

5. REFERÊNCIAS

1. MARTINS, P. A. F., Rigid plastic/viscoplastic finite element modelling of forming processes, Ph.D Course MM98.64, Institut for Procesteknik - DTU, Denmark, 1998.
2. REBELO N. and KOBAYASHI S., A coupled analysis of viscoplastic deformation and heat transfer – Part I, Int. J. Mech. Sci., 22, 699, 1980.
3. YOO Y. H., YANG D. Y. and CHUNG D. T., Numerical simulation of multi-blow forging processes using the explicit time integration finite element method, Engng. Comp., 14, 901, 1996.
4. ALTAN T., OH S. and GEGEL H., Metal forming: fundamentals and applications, ASM, 1983.
5. RODRIGUES, J. M. C. e MARTINS, P. A. F., Tecnologia Mecânica Tecnologia da Deformação Plástica, Vol. II – Aplicações Industriais, Cap. 25, Escolar Editora, 2005.
6. RODRIGUES J. M. C. and MARTINS P. A. F., Coupled thermo-mechanical analysis of metal-forming processes through a combined finite element-boundary element approach, Int. J. Numer. Meth. Engng., 42, 631, 1998.
7. ALVES M. L., RODRIGUES J. M. C. and MARTINS P. A. F., Simulation of three-dimensional bulk forming processes by finite element flow formulation, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 11, p 803-821, 2003.

INTERACTION BETWEEN PROCESS AND MACHINE VARIABLES DURING FINITE ELEMENT MODELLING OF METAL FORMING PROCESSES

Bárbara Perry Pereira Alves Gouveia Almeida

IST, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, e-mail: bgouveia@ist.utl.pt.

Jorge Manuel da Conceição Rodrigues

IST, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, e-mail: jrodrigues@ist.utl.pt.

Paulo António Firme Martins

IST, DEM, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, e-mail: pmartins@ist.utl.pt.

***Abstract.** Project and design of industrial metal forming processes requires a sound knowledge of the interaction between the principal machine and process variables. The advent of numerical methods such as the finite-element method has made it possible to analyse the relative success of a metal forming process during the development stage. However, the numerical analyses are predominantly being performed with a constant die velocity. In some cases users are allowed to define velocity profiles but the majority of the available computer programs usually requests no input data related with the machine variables. Thus, extrapolation of finite element output data into the industrial environment is in the majority of the cases very dependent on the knowledge of the user regarding forming processes and equipment. This paper is an effort to provide the basic features for implementing forming machine variables into finite element computer programs to be applied in the analysis of metal forming processes. The most widely used types of forming machines are considered and a numerical example is given to illustrate the feasibility of the proposed approach.*

Keywords. Forming machines, metal forming, numerical simulation.