

## O USO DA MODELAGEM FÍSICA NO ENSINO DO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE DE PEÇAS METÁLICAS

**Sérgio Tonini Button**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, 13083-970, Campinas, SP, Brasil. E-mail: [sergio1@fem.unicamp.br](mailto:sergio1@fem.unicamp.br)

### Resumo

O ensino de conformação mecânica tem grande importância nos cursos de graduação em Engenharia Mecânica pois aborda processos amplamente empregados na indústria de manufatura, como o forjamento a quente. Uma grande dificuldade no ensino desse processo é a dificuldade de fabricar-se as matrizes necessárias para um dado forjado, bem como a elevada capacidade da prensa necessária, além dos problemas causados pelo manuseio do material aquecido. A simulação numérica não fornece por si só uma resposta definitiva sobre o processo analisado devido às incertezas relacionadas com o comportamento plástico dos materiais metálicos nas condições de processamento e também ao comportamento tribológico das interfaces material-ferramentas. A simulação física possibilita a validação dos resultados numéricos sendo normalmente empregada para esse fim. A simulação física em laboratório exige recursos relativamente menores em equipamentos e ferramentas e permitem avaliar o escoamento do material durante o processo prevendo-se o surgimento de defeitos.

**Palavras-chave:** Ensino, conformação, forjamento, modelagem

### 1. INTRODUÇÃO

O ensino de conformação plástica dos metais no curso de graduação em Engenharia Mecânica reveste-se de grande importância pois aborda processos amplamente empregados na indústria de manufatura na qual respondem por etapas intermediárias ou finais de fabricação da grande maioria dos bens produzidos, como componentes para automóveis, para máquinas-ferramentas, para equipamentos e instalações industriais, ferramentas manuais e instrumentos cirúrgicos, elementos de fixação, recipientes, entre outros.

Uma das dificuldades em transmitir-se conceitos e informações sobre a conformação plástica refere-se à grande variedade de processos existentes associada a uma grande diversidade de materiais trabalhados e de produtos fabricados, que envolvem conhecimentos específicos fortemente relacionados à experiência adquirida industrialmente nas áreas de planejamento de processos e de produção.

Lange (1985) apresenta no capítulo 2 uma classificação dos processos de conformação de acordo com o estado de tensão predominante em cada um deles. Numa primeira divisão, definem-se cinco grupos: por compressão, por tração, combinados por tração e compressão, por flexão e por cisalhamento.

A partir desses cinco grupos principais são definidos dezessete sub-grupos relacionados aos processos em suas denominações primárias. Como exemplo, tem-se no grupo de tensões

predominantemente compressivas: a laminação, o forjamento com matriz aberta, o forjamento em matriz fechada, a indentação e a extrusão.

Cada um desses dezessete sub-grupos é novamente dividido para conter as variações de cada processo. A princípio, Lange diferencia essas variações pelo aspecto geométrico do processo, que normalmente está associado à geometria do produto.

Reunidas todas as variações dos processos, atinge-se algo em torno de setenta processos distintos, somente considerando aspectos geométricos. Outros fatores como materiais conformados, dimensões dos produtos ou temperaturas de trabalho poderiam ser considerados nessa ou em outras classificações, aumentando o número de processos e evidenciando ainda mais a complexidade verificada nessa área da manufatura de peças metálicas.

O processo de forjamento por exemplo, apresenta diversas variações de acordo com a temperatura (quente, morno, frio ou isotérmico), livre ou em matriz fechada (com ou sem rebarba), em prensa ou martelo, e processos compostos como o *swaging* e o *cross-rolling*.

Em outra referência importante na área de conformação plástica, Altan & Gegel (1983) apresentam uma outra classificação em que a primeira divisão refere-se à matéria-prima trabalhada, distinguindo os processos que trabalham com volumes, como a extrusão, o forjamento, a laminação e a trefilação, daqueles que envolvem superfícies (principalmente chapas e folhas) como a estampagem, o dobramento e o corte.

Os processos de conformação são tão específicos e apresentam tantas particularidades que é comum encontrar-se livros e manuais escritos especialmente para um determinado processo como em Laue & Stenger (1981) para a extrusão contínua de perfis, Billigmann & Feldmann (1979) para a extrusão a frio e Metals Handbook (1989) para o forjamento.

Assim, no ensino desses processos deve-se aliar os conhecimentos teóricos sobre aspectos metalúrgicos e mecânicos com informações práticas relacionadas com a dinâmica dos processos, os equipamentos empregados e detalhes práticos que garantem a viabilidade dos processos e a qualidade dos produtos conformados.

## **2. O ENSINO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA NA UNICAMP**

Os processos por conformação plástica são apresentados no curso de graduação em Engenharia Mecânica na disciplina teórica Conformação Mecânica que tem em sua ementa tópicos sobre classificação e descrição dos processos, metalurgia mecânica (encruamento, recozimento, conformabilidade, textura e anisotropia) e mecânica da conformação (teoria da plasticidade, tribologia e métodos de cálculo de tensões e deformações).

A bibliografia básica consiste em livros-textos como Bresciani *et al.* (1997), Dieter (1981) e Schey (1987). Para complementar a teoria vista nas aulas expositivas, os alunos realizam semestralmente uma visita técnica a uma indústria de grande porte no setor de conformação plástica, freqüentemente do setor das forjarias.

Além de avaliados sobre a teoria apresentada nas aulas expositivas, os alunos apresentam um projeto relacionado ao processo de fabricação de uma peça metálica. Atualmente, todo o acompanhamento das etapas do projeto para o forjamento inclui roteiros de projeto e exemplos de aplicação [Button (1998)].

Como afirmado na introdução deste texto, a grande diversidade dos processos de conformação faz com que somente a apresentação de conceitos teóricos não seja suficiente para o aprendizado e a preparação do estudante de Engenharia Mecânica para as atividades industriais que ele irá defrontar em sua profissão. Há necessidade de envolvê-lo com a prática do processo, de modo que ele perceba algumas particularidades dos equipamentos, ferramentas e materiais normalmente empregados e comprove os conceitos teóricos.

Assim, a teoria dos processos de conformação é complementada no curso da UNICAMP com aulas práticas numa segunda disciplina: Laboratório de Processos de Fabricação que também envolve experiências sobre usinagem, fundição, soldagem e metrologia.

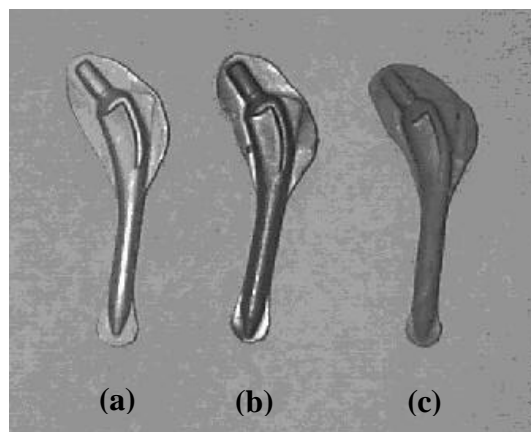
### 3. A SIMULAÇÃO FÍSICA COMO FERRAMENTA ÚTIL PARA O PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE FORJAMENTO

Segundo Johnson (1992) o ensino prático da conformação plástica tem outro aspecto extremamente importante quando se observa o grande desenvolvimento ocorrido nos últimos anos no campo da simulação numérica dos processos, destacando-se o método dos elementos finitos. De acordo com Johnson a crescente sofisticação dos métodos e programas disponíveis deve ser acompanhada por um aprendizado prático consistente que permita ao engenheiro atuar positivamente seja fornecendo dados adequados para o pré-processamento (condições iniciais de temperatura, velocidade e atrito e propriedades do material a conformar, entre outros), seja analisando os resultados obtidos em termos de distribuições de deformações, tensões e temperaturas no produto e nas ferramentas que permitam avaliar possíveis problemas durante o processo como por exemplo defeitos nas peças conformadas.

A simulação numérica não fornece por si só uma resposta definitiva sobre o processo analisado devido às incertezas relacionadas com o comportamento plástico dos materiais metálicos nas condições de processamento e também ao comportamento das interfaces material-ferramentas no que se refere ao atrito/lubrificação. A simulação física possibilita a validação dos resultados da simulação numérica e normalmente é encontrada nos diversos trabalhos que tratam da análise de processos como os apresentados por Altan & Ahmetoglu (1996) e Fujikawa (2000), Yoshimura & Tanaka (2000) e Vazquez & Altan (2000).

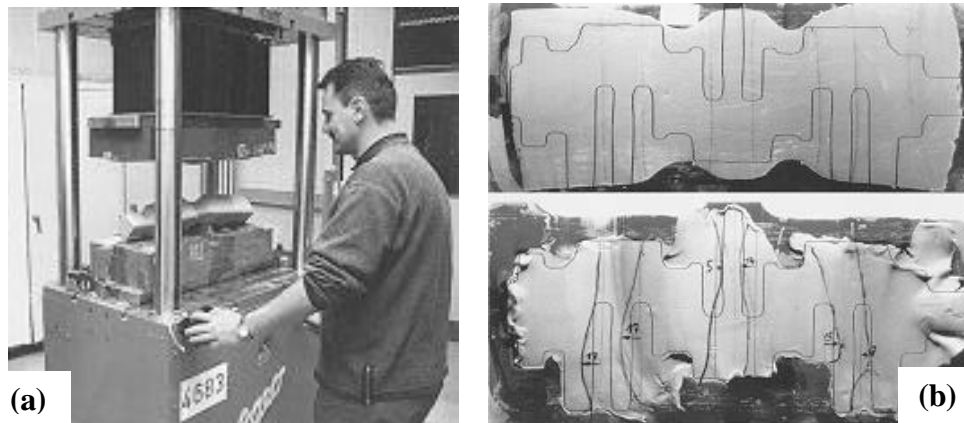
A simulação física em laboratório empregando materiais de modelamento exigem recursos relativamente menores no investimento em equipamentos e ferramentas, como apresentado por Pertence & Cetlin (1998) e permitem avaliar principalmente o escoamento do material durante o processo prevendo-se o surgimento de defeitos.

Isso é possível pela capacidade de materiais de baixo custo e facilmente acessíveis como a massa de modelar (plasticina) deformar-se e apresentar modo de escoamento semelhante ao de ligas metálicas forjadas a quente, o que permite avaliar-se a capacidade desses materiais preencherem adequadamente as matrizes e fornecer produtos dentro das especificações em ambiente industrial. A figura 1 extraída de Button (1999) apresenta a similaridade do comportamento de materiais de simulação (plasticina e chumbo) forjados à temperatura ambiente e do alumínio comercialmente puro forjado a 400 °C a partir de uma mesma geometria de pré-forma.



**Figura 1.** Forjados a partir de tarugos de alumínio (a), chumbo (b) e plasticina (c).

O uso da simulação física tem-se mostrado de grande importância industrial como pode ser observado na figura 2 extraída de Haats (1999), que apresenta a simulação do forjamento a quente de um girabrequim em aço pelo forjamento à temperatura ambiente de massa de modelar empregando matrizes fabricadas em resina plástica (a), que permite observar falhas no preenchimento dessas matrizes (b) e favorece a definição de uma pré-forma adequada de forma rápida e com custos reduzidos.



**Figura 2.** (a) simulação física do forjamento a quente de girabrequins, (b) aspecto do escoamento da massa de modelar nas matrizes de forjamento.

#### 4. AS EXPERIÊNCIAS DE CONFORMAÇÃO NO LABORATÓRIO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

A seguir descrevem-se os ensaios de forjamento desenvolvidos pelos alunos de graduação na disciplina de Laboratório de Processos de Fabricação, especificamente na área de Conformação Mecânica.

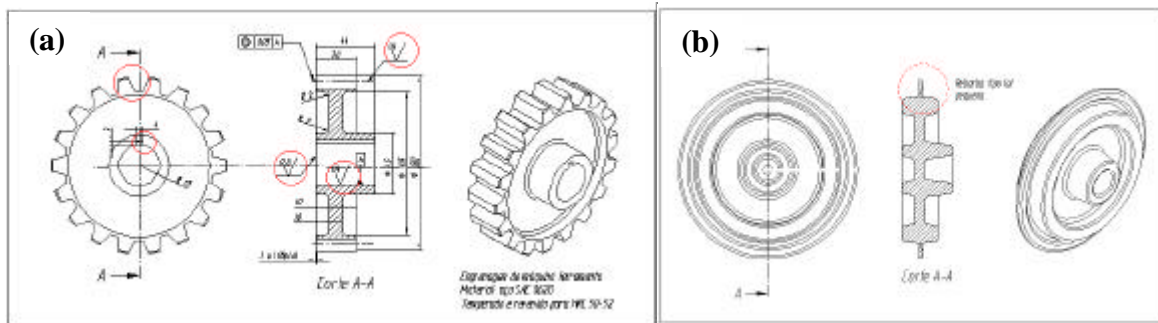
##### 4.1 Os ensaios de forjamento

**Objetivos.** A partir do desenho de uma peça pronta, os alunos devem projetar e dimensionar o forjado bem como as matrizes de forjamento e fabricá-las em resina epoxi a partir de um modelo do forjado feito em parafina, madeira ou nylon. Empregando essas matrizes, são realizados os ensaios de forjamento que têm por objetivo estudar a influência da pré-forma no modo de escoamento do material, na qualidade do produto forjado e em alguns casos, na redução da quantidade de material na bacia de rebarba. Esses ensaios também permitem avaliar a utilidade de materiais de modelamento, como a plasticina, na simulação de processos de conformação.

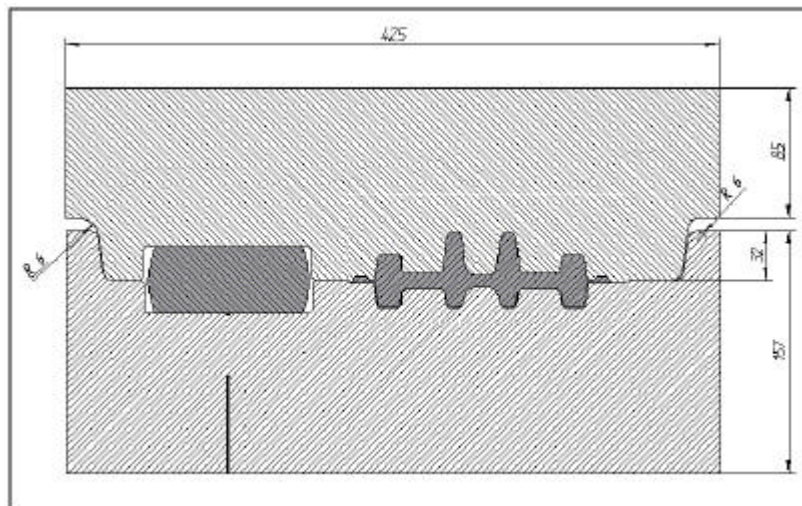
**Descrição do procedimento para os ensaios.** São formados grupos de cinco alunos que recebem um desenho de uma peça de uso em sistemas mecânicos (engrenagens, bielas, garfos de acionamento, volantes) com suas dimensões finais como por exemplo uma engrenagem cilíndrica de dentes retos (Figura 3.a), bem como os materiais necessários para a fabricação dos modelos e das matrizes (massa de modelar, resina epoxi, filme de PVC e espátula).

Empregando critérios normalmente utilizados na indústria de forjamento a frio e a quente, procede-se o dimensionamento do forjado (Figura 3.b) e das matrizes de forjamento (Figura 4), que têm sua forma e dimensões definidas, além do sistema de localização e alinhamento.

A primeira avaliação dos alunos consiste na análise dos desenhos dos projetos do forjado e das matrizes e na correção dos erros verificados.



**Figura 3.** (a) exemplo de peça pronta empregada para os ensaios de forjamento e (b) desenho do forjado



**Figura 4.** Vista do corte da elevação das matrizes de forjamento empregadas para forjamento da peça mostrada na figura 3.b.

A etapa seguinte é a fabricação do modelo do forjado que será empregado para a fabricação das matrizes. De acordo com a geometria do forjado pode-se optar pela utilização de modelos de madeira para peças de revolução pela facilidade de torneamento, ou por modelos de cera para peças mais complexas, visto que a cera é um material facilmente moldável e que pode ser posteriormente removida das matrizes por sua fusão. Há outros materiais possíveis para a fabricação dos modelos como a própria resina epoxi ou o nylon. A figura 5 apresenta alguns modelos fabricados pelos alunos.

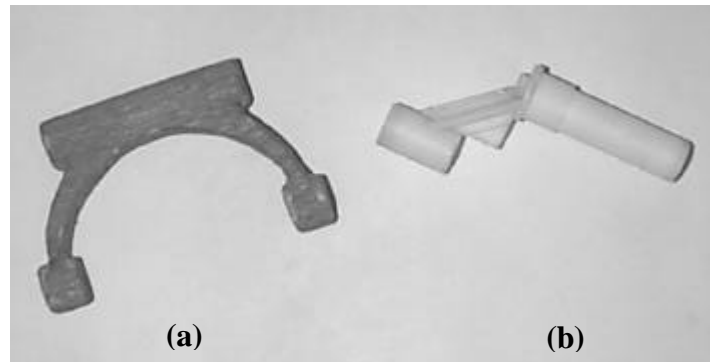
As matrizes de forjamento são fabricadas pela moldagem de camadas de resina epoxi sobre o modelo fabricado. O filme de PVC é empregado para permitir a posterior extração do modelo do interior das matrizes. A figura 6 apresenta algumas matrizes fabricadas.

De posse dos modelos os alunos determinam o volume do forjado, já incluída a bacia de rebarba, e preparam pré-formas que serão ensaiadas para verificar aquela que oferece a melhor condição de preenchimento das matrizes evitando o surgimento de defeitos.

As pré-formas são fabricadas em camadas de massa de modelar de diversas cores de modo a facilitar a observação do escoamento e a distribuição das deformações no forjado. Essa massa é previamente preparada com a adição de gesso em pó com o objetivo de representar adequadamente o comportamento plástico de materiais metálicos conformados a quente. Para

essa qualificação, preparam-se pré-formas com diversas quantidades de gesso que são forjadas obtendo-se peças como as mostradas na figura 1.c, definindo-se como a composição mais adequada, aquela que melhor simule o escoamento do alumínio forjado a quente.

Definida a melhor composição da massa de modelar e fabricadas as pré-formas, executam-se os ensaios de forjamento numa prensa hidráulica, empregando-se o filme de PVC como lubrificante entre as superfícies da pré-forma e das matrizes. A análise dos resultados dos ensaios comporá a segunda avaliação dos alunos.



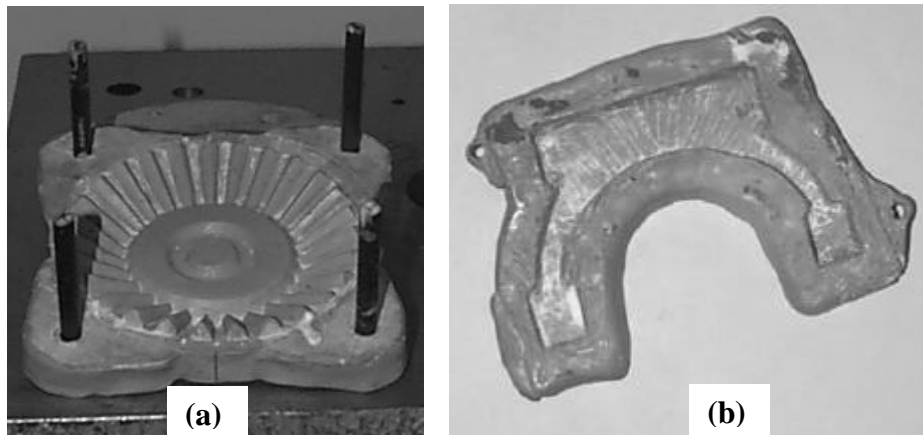
**Figura 5.** Exemplos de modelos fabricados pelos alunos:  
(a) garfo de acionamento de transmissão mecânica em madeira e  
(b) pedal de motocicleta em nylon.

**Análise dos resultados.** O ensaio de forjamento é interrompido durante o curso de trabalho para avaliar-se o modo de escoamento do forjado. Após o forjamento de cada pré-forma analisa-se a qualidade do forjado obtido observando-se se há defeitos de preenchimento causados pelo escoamento inadequado, ou então, se o forjado está corretamente preenchido mas existe um excesso de rebarba que justifique uma redução do volume da pré-forma. Caso necessário, uma nova pré-forma é fabricada, ensaiada e analisada.

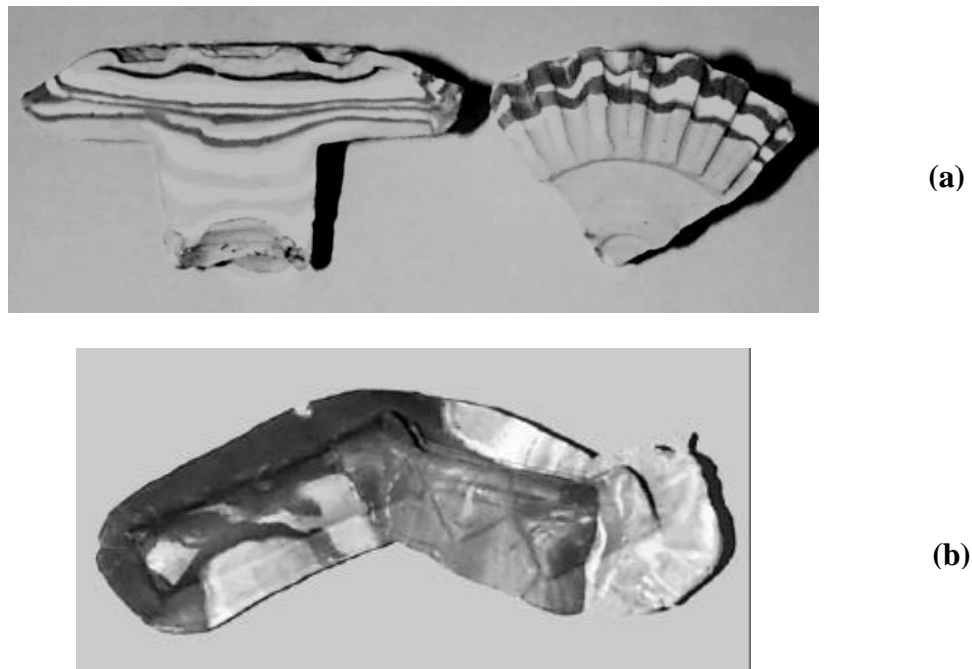
As peças forjadas são cortadas em seu plano longitudinal mediano para análise do modo de escoamento que permita prever a formação de defeitos internos.

A figura 7 apresenta peças obtidas nos ensaios de forjamento. A peça (a) relativa à matriz da figura 6.a é mostrada em um trecho de sua parte superior evidenciando os dentes formados e em seu corte longitudinal evidenciando a simetria do escoamento e o preenchimento completo das matrizes. Nesse caso tem-se um exemplo de processo *near-net shape* em que a geometria e as dimensões do forjado são próximas da peça acabada e não há formação de bacia de rebarba.

Na peça (b) relativa às figuras 5.a e 6.b não houve interesse em verificar-se o aspecto interno do escoamento mas principalmente de observar-se a minimização da bacia de rebarba pelo uso de uma pré-forma adequada. Como se observa na figura essa bacia ainda poderá ser reduzida em ensaios futuros, apesar da geometria complexa da peça que dificulta o preenchimento total das matrizes devido ao escoamento lateral predominante.



**Figura 6.** Exemplos de matrizes fabricadas pelos alunos em resina epoxi: (a) engrenagem cônica e (b) garfo de acionamento.



**Figura 7.** Exemplos de peças obtidas nos ensaios de simulação do forjamento: (a) engrenagem cônica e (b) pedal de acionamento

## 5. CONCLUSÕES

O emprego da simulação física para análise de processos de conformação como o forjamento é uma ferramenta útil para a otimização dos processos além de ser um método interessante e de baixo custo para a complementação prática da formação dos alunos.

Como esse trabalho vem sendo desenvolvido há pouco mais de um ano, verifica-se a necessidade de aprimorar as técnicas de fabricação dos modelos e das matrizes, principalmente no que se refere ao alinhamento das matrizes superior e inferior.

Também verificou-se a necessidade de desenvolver-se paralelamente à simulação física, modelos para a simulação numérica dos processos de modo a permitir a comparação entre os resultados obtidos nos dois métodos e também envolver os alunos com ferramentas modernas de análise de processos.

## 6. AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio da Comissão de Ensino e dos alunos de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

## 7. REFERÊNCIAS

- Altan T. & Ahmetoglu M., 1996, ‘Special Issue: Selected Papers on Sheet Forming and Stamping and Forging and Machining, from the Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, Preface’, Journal of Materials Processing Technology, vol. 59, ns. 1 e 2.
- Altan, T., Oh, S.I. & Gegel, H.L., 1983, “Metal Forming, Fundamentals and Applications”, American Society for Metals, Metals Park, Ohio,USA.
- Billigmann, J. & Feldmann, H.D., 1979, “Estampado y Prensado a Máquina”, Editorial Reverté S.A., Barcelona.
- Bresciani Fo., E., Button, S.T., Gomes, E., Nery, F.A.C. & Zavaglia, C.A.C., 1997, “Conformação Plástica dos Metais”, 5ª ed., Ed. da UNICAMP, Campinas.
- Button, S.T., 1998, “Roteiro para Projeto de Ferramentas para o Forjamento a Quente”, UNICAMP, Campinas.
- Button, S.T., 1999, "O Ensino em Laboratório de Processos de Conformação Plástica de Metais", Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, SP, Brasil, CD-ROM.
- Dieter, G.E., 1981, “Metalurgia Mecânica”, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro.
- Fujikawa S., 2000, “Application of CAE for Hot-Forging of Automotive Components”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, n. 2, pp. 176-181
- Haats, J., 1999, “Lightweight Crankshaft Drives Using Forged Components:”, Forum – Technische Mitteilungen ThyssenKrupp, English Edition, Thyssen Krupp AG, p. 54-55.
- Johnson, W., 1992, ‘Developments in Forming Technology – an Engineering Educator’s Approach’, Journal of Materials Processing Technology, vol. 31, pp. 1-26.
- Lange, K. (Editor), 1985, “Handbook of Metal Forming”, McGraw-Hill Book Co.
- Laue, K. & Stenger, H., 1981, ‘Extrusion, Processes, Machinery, Tooling’, American Society for Metals, Metals Park, Ohio,USA.
- Metals Handbook, 1989, ‘Forging’, vol. 14, 9ª ed., ASM International, Metals Park, Ohio,USA.
- Pertence, A.E.M. & Cetlin, P.R., 1998, “Analysis of a New Model Material for the Physical Simulation of Metal Forming”, J. of Materials Processing Technology, vol. 84, pp. 261-267.
- Schey, J.A., 1987, ‘Introduction to Manufacturing Processes’, 2ª ed., McGraw-Hill Intl.
- Vazquez, V. & Altan, T., 2000, ‘New Concepts in Die Design - Physical and Computer Modeling Applications’, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, n. 2, pp. 212-223
- Yoshimura, H. & Tanaka, K., 2000, ‘Precision Forging of Aluminum and Steel’, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, n. 2, pp. 196-204.