

FORJAMENTO A QUENTE DE PRECISÃO: UMA PROPOSTA PARA FLEXIBILIZAÇÃO

Wyser José Yamakami

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Departamento de Engenharia Mecânica

wyser@dem.feis.unesp.br

Sérgio Tonini Button

UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia de Materiais

Sergio1@fem.unicamp.br

Resumo. *Os avanços da tecnologia CNC e dos sistemas de troca rápida de ferramentas têm permitido uma melhoria na flexibilização dos processos de conformação plástica dos metais. Devido às suas características, o forjamento a quente de precisão, apesar de suas vantagens em relação ao processo convencional, dificulta o emprego de conceitos como formação de famílias, tecnologia de grupo, células de manufatura e troca rápida de ferramentas, comumente aplicados na flexibilização dos processos de usinagem. Este trabalho tem como objetivo agrupar peças forjadas em famílias de modo que possam utilizar uma mesma matriz de pré-forma no forjamento a quente de precisão, melhorando a flexibilização deste processo. A análise da viabilidade de se utilizar um mesmo ferramental foi efetuada através da simulação do forjamento utilizando o programa DEFORM 2D. Observou-se que é possível obter forjados acabados, que compõem uma família, utilizando-se um mesma matriz de pré forma, previamente definida, evitando-se assim a troca da mesma e, conseqüentemente, diminuindo o tempo de "set-up". A simulação permitiu a otimização de uma geometria para a matriz de pré-forma que pudesse ser utilizada pelos forjados de uma determinada família, possibilitando uma economia de tempo, material e energia, evitando-se a obtenção de peças defeituosas durante o forjamento.*

Palavras-chave: Forjamento, flexibilização, ferramental, família, simulação.

1. INTRODUÇÃO

A competitividade entre as empresas, em decorrência das exigências dos consumidores e da crescente tendência de rápida obsolescência dos produtos manufaturados, associada à necessidade de redução dos custos indiretos relativos ao financiamento da produção, tem levado a uma busca pela melhoria dos processos produtivos, através de técnicas de organização e fabricação que atenda estas exigências, tornando-os mais flexíveis, rápidos e econômicos (Button - 1995). Entretanto, as alterações nestes processos, devidas às novas tecnologias para atender às necessidades do mercado, que exige uma maior diversificação de produtos, fazem com que o tamanho dos lotes de fabricação seja reduzido (Lima - 1989).

Os processos de conformação plástica dos metais, devido às suas características como ferramental dedicado, custo elevado de equipamentos, alto tempo de preparação da máquina, produtos contínuos ou semicontínuos, sempre estiveram ligados aos conceitos de produção em grandes lotes, inviabilizando a sua aplicação para pequenos lotes (Lima – 1989).

No forjamento convencional a quente o peso do forjado pode atingir o dobro do usinado, e sua rebarba representar de 20 a 40% de seu peso, aumentando os custos com a compra de material, sua manipulação, armazenagem, aquecimento até temperatura de forjamento e usinagem (Shiplely - 1988).

O desenvolvimento da “conformação de precisão”, destacando-se aqui o forjamento de precisão a quente, morno, isotérmico e a frio, corte de chapas, extrusão hidrostática e a frio de eixos com perfis diversos, estampagem de precisão, proporcionou um avanço em termos de técnicas de organização da produção (Button – 1995). O forjamento de precisão é o processo de deformação plástica que visa obter forjados com todas dimensões, ou algumas delas, iguais às do produto acabado, sendo denominados, respectivamente, de “net shape” e “near net shape”. Isto permite a eliminação ou diminuição das etapas de usinagem através da produção de peças mais leves, funcionais, de geometria complexa e tolerância igual ou menor que $\pm 0,25$ mm, reduzindo o tempo, energia, material e mão de obra para obtenção da peça acabada (Kudo 1990) (Shiplely - 1988).

Entretanto, o forjamento de precisão requer alta tecnologia e pesquisa para resolver os problemas causados por fatores como a geometria da peça, propriedades mecânicas e químicas do material a forjar, lubrificação, máquina e ferramentas, projeto da peça conformada e usinagem posterior (Kudo 1990). A. Thomaz (s.d) fornece algumas recomendações para obtenção do forjado com qualidade e economia.

A automação dos equipamentos de conformação ajudou a aumentar a produtividade no período da produção em massa (décadas de 50 e 60), mas a falta de flexibilidade dos mesmos aliada à redução do lote e diversificação dos produtos (década de 70) requereram um desenvolvimento desta característica. Isto ocorreu para os processos onde a forma da ferramenta não estava vinculada à da peça (Schmoeckel – 1991) e, a partir da década de 80, com o desenvolvimento na automação industrial, puderam ser implantados também nos processos de usinagem (Gomide – 1987) (Lima - 1989). Nos últimos anos, a automação dos processos de conformação com a aplicação da tecnologia CNC, aliada ao sistema de troca rápida de ferramenta, têm possibilitado a flexibilização deste processo para diversos produtos e não somente a determinada família de peças (Lima – 1989) (Schmoeckel – 1991).

O processo de forjamento a quente geralmente começa pelo corte das barras, em guilhotina, para obtenção dos tarugos. Os tarugos passam por um forno contínuo para serem aquecidos e posteriormente forjados em prensa. O forjamento deverá ocorrer em duas ou mais etapas que permitam o preenchimento adequado das matrizes. As rebarbas do forjado são retiradas, em uma operação de corte, imediatamente após o forjamento. Após o corte, os forjados são tratados termicamente para obter-se uma microestrutura adequada à usinagem.

A troca de matrizes é realizada manualmente ou com a ajuda de dispositivos, quando o peso é excessivo. As matrizes para obtenção da pré-forma e forjado são retiradas e um outro conjunto é fixado. Após a fixação, forja-se a primeira peça verificando se as dimensões da pré-forma e do forjado estão adequadas. Regulagens e ajustes das matrizes são necessários para obtenção de uma peça boa. Segundo Ravassard (1989) o tempo destas regulagens e ajustes pode representar de 40 a 50% do tempo total gasto na troca do ferramental.

No forjamento a quente a expectativa de melhoria vem através do cisalhamento a quente, manipulação de peças quentes e complexas, forjamento sem rebarba, montagem e regulagem rápida das ferramentas, desenvolvimento de prensas hidráulicas rápidas unidirecionais ou multi-eixos, incorporação de tratamento térmico à conformação ou o aproveitamento do calor residual do processo para efetuar as operações de recozimento ou têmpera (Foray - 1993). Lin

(1994) desenvolve um aço-liga que permite a eliminação do recozimento, posterior ao forjamento, sem prejudicar a usinabilidade do material. Os trabalhos de Lima (1989), Schmoeckel (1991) e Matsushita (1990) mostram alguns melhoramentos na automação, flexibilização e controle dos equipamentos de conformação.

A tecnologia de grupo pode produzir bons resultados, viabilizando a produção de pequenos lotes. A formação de famílias de peças, desde o projeto do produto, aumenta as possibilidades de redução do inventário de produção (Lima - 1989) e dos tempos de montagem e desmontagem das ferramentas.

Um outro modo de flexibilizar os processos de conformação volumétrica é a troca rápida das ferramentas (Lima - 1989) aliada aos esforços para reduzir o seu número e/ou ampliar suas aplicações (Ravassard - 1989) de modo a minimizar os tempos improdutivos.

Este trabalho propõe a flexibilização do processo de forjamento a quente de precisão através da definição de uma família de forjados que possam ser obtidos a partir de uma mesma matriz de pré-forma, mantendo-se os ajustes entre elas, de forma a minimizar o tempo de troca de ferramenta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição do processo

Analisa-se neste trabalho o forjamento a quente de precisão de engrenagens. O processo para obtenção do forjado final adequado à usinagem segue as seguintes etapas: corte da barra, aquecimento do tarugo, forjamento do tarugo, corte do espelho, tratamento térmico de normalização, limpeza e inspeção. As barras de um aço similar ao SAE 8620 são transportadas até a guilhotina por uma empilhadeira para serem cortadas.

Os tarugos obtidos são levados, em uma caixa, até um forno de indução tipo túnel e introduzidos no mesmo por um mecanismo de alimentação que os empurra para dentro. Os tarugos são direcionados por uma guia que atravessa o forno. O operador posiciona os tarugos um ao lado do outro em uma rampa adjacente à guia. O mecanismo empurra os tarugos através da guia deslocando-os de uma distância determinada e recua de modo que o próximo tarugo da rampa se posicione na guia. O tarugo é aquecido até a faixa de 1200 a 1250 °C, sai do forno e desliza através de um canaleta posicionando-se ao lado de uma prensa excêntrica.

Um operário pega o tarugo aquecido, utilizando uma tenaz, e coloca-o sobre a primeira matriz. O operador da prensa, com o auxílio de uma outra tenaz, pega o tarugo aquecido e posiciona-o dentro da referida matriz. O operador aciona a prensa que deforma o tarugo obtendo-se a pré-forma – forjamento em matriz aberta. Imediatamente, esta pré-forma é colocada no segundo conjunto de matrizes para obtenção do forjado com rebarba interna – forjamento em matriz fechada. Este forjado é jogado em um canaleta, localizado na outra lateral da prensa, e desliza posicionando-se ao lado de uma prensa excêntrica dedicada à operação de corte da rebarba. O operador desta prensa pega o forjado e posiciona-o dentro da matriz para operação de corte. Cortado, o forjado é lançado pelo operador dentro de uma caixa, situada atrás da prensa. Os forjados são resfriados antes de serem normalizados em um forno elétrico contínuo à temperatura de 950 °C, durante duas horas. Ao sair do forno, os forjados resfriam-se ao ar e são limpos em uma máquina de tamborear, utilizando-se granalhas de ferro para retirar a camada de óxido.

2.2 Troca das matrizes

A obtenção do forjado com rebarba se faz em duas etapas; exigindo quatro matrizes, duas fixas no cabeçote superior e duas fixas na mesa da prensa. Cada matriz é fixa e localizada por

meio de dois grampos, em forma de meia lua, aparafusados - dois parafusos para cada grampo - contra o cabeçote superior e a mesa da prensa. Os oito grampos estão divididos igualmente entre a parte frontal e posterior da prensa.

A troca das matrizes inferiores e superiores requer que os parafusos dos grampos posteriores sejam afrouxados e que os parafusos e grampos frontais sejam retirados. Isto é realizado sem maiores problemas na retirada das matrizes inferiores, sendo sua remoção realizada manualmente ou com auxílio de um braço mecânico ou empilhadeira, quando o peso for excessivo para o trabalhador. Já no caso das matrizes superiores, é necessário que as mesmas sejam seguras por um braço de alavanca, braço mecânico ou empilhadeira antes de se soltarem os parafusos e grampos da parte frontal, evitando-se quedas. Além disso, deve-se lembrar que existem calços colocados juntamente com as matrizes superiores e inferiores aumentando o peso a ser transportado e o risco de queda. As matrizes são retiradas uma de cada vez, começando pelas inferiores, e colocadas em uma mesa situada próxima à prensa.

Depois de retirada as matrizes, as novas matrizes superiores são colocadas, uma a uma, juntamente com seus calços, manualmente com a ajuda de um braço de alavanca seguro por outro trabalhador. Quando se coloca a matriz com os calços, ela fica apoiada, em parte, no grampo posterior e, em parte, no braço de alavanca. Desta forma o operador fica com as mãos livres para colocar o outro grampo com os parafusos, apertando-os levemente. Quando o peso do conjunto for excessivo utiliza-se um braço mecânico ou uma empilhadeira para movimentação, posicionamento e apoio para fixação da matriz na prensa através dos grampos e parafusos. Fixadas as matrizes superiores, colocam-se, uma a uma, as inferiores com seus calços. Uma vez colocadas sobre a mesa da prensa, manualmente, com auxílio de um braço mecânico ou empilhadeira, o operador empurra a matriz, juntamente com os calços sob a mesma, localizando-a sobre a mesa de forma que se possa colocar o grampo frontal com seus parafusos para fixá-la.

Fixadas as matrizes, forja-se uma peça para verificar visualmente a qualidade da pré-forma e do forjado. Os ajustes são feitos colocando-se ou retirando-se calços debaixo das matrizes inferiores, de forma a elevá-las ou abaixá-las, respectivamente. Para isso, é necessário retirar-se o grampo da parte frontal da prensa, que prende a matriz, soltando-se os dois parafusos. O grampo localizado na parte posterior da prensa não precisa ser retirado, sendo os seus parafusos somente afrouxados. Retirado o grampo, levanta-se a borda lateral da matriz usando uma alavanca com a extremidade em forma de cunha, o que é feito por um operador. Um outro operador introduz ou retira o calço debaixo da matriz. O primeiro operador solta a matriz sobre os calços e empurra-os, com a alavanca, de modo que fiquem totalmente debaixo da mesma. Coloca-se novamente o grampo e os parafusos apertando-os para fixar a matriz. Forja-se outra peça para verificar se as dimensões estão dentro das especificações, caso contrário efetua-se novo ajuste seguindo os passos descritos acima.

2.3 Formação de família de peças e definição da geometria da pré-forma

Propõe-se para a flexibilização do processo de forjamento a formação de famílias de forjados que foram agrupados baseando-se na semelhança geométrica e dimensional entre eles. Este agrupamento foi feito visando a utilização de um mesmo conjunto de matrizes para obtenção das pré-formas dos forjados que compõem determinada família. A Figura 1 mostra o desenho dos forjados para que se tenha uma noção das geometrias e do tamanho relativo entre eles.

Como não existe uma geometria única para a pré-forma de um forjado específico, algumas recomendações obtidas da literatura e de indústrias que trabalham com forjamento são descritas a seguir:

- os tarugos para obtenção das pré-formas dos forjados, que compõem uma família, foram

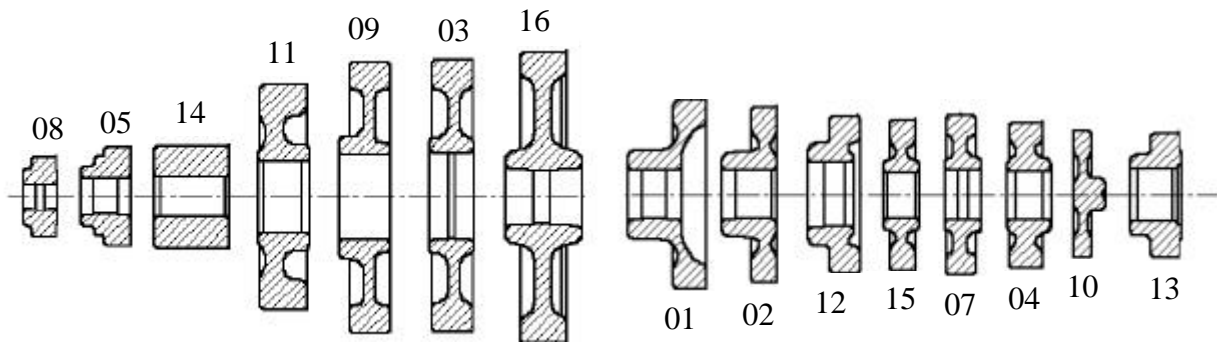


Figura 1 – Forjados utilizados como modelo. Vista em corte

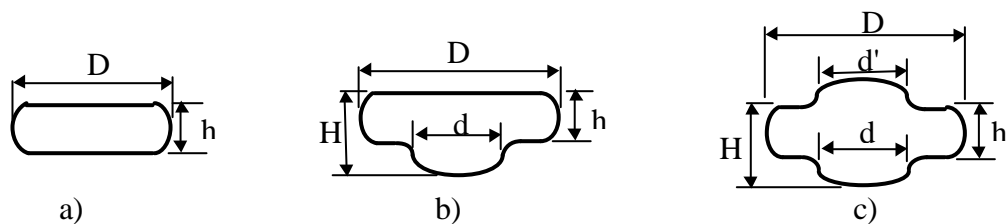


Figura 2 – Pré-formas básicas para obtenção de uma engrenagem
a) "Bolacha" plana b) "Canoa" simples c) "Canoa" dupla

dimensionados com um mesmo diâmetro, variando-se a altura para garantir o volume de material necessário para cada forjado, mas para evitar-se a flambagem obedeceu-se a relação $L/D \leq 1,5$, onde L é o comprimento do tarugo e D o seu diâmetro.

- o estudo da pré-forma deve levar em conta a geometria das matrizes para obtenção da peça forjada final. A pré-forma deve ser a mais simples possível de forma a facilitar a usinagem de sua respectiva matriz, permitir sua fácil localização dentro da matriz final e garantir o preenchimento adequado desta, para formação de um forjado sem defeitos. A matriz para obter a pré-forma deve permitir um posicionamento fácil do tarugo pelo operador.

- as formas básicas das pré-formas mais usuais utilizadas para obtenção de engrenagens são as mostradas na Figura 2. De acordo com a complexidade geométrica do forjado e tipo de operação que se requer durante o forjamento, recalque e/ou extrusão, a pré-forma pode variar de acordo com as formas apresentadas nesta figura. Por exemplo, são recomendadas as pré-formas tipo "bolacha plana" - 2a, "canao simples" - 2b e "canao dupla" - 2c, para os forjados 14, 01 e 16, respectivamente.

2.4 Simulação do processo de forjamento

O programa DEFORM, versão 2.4, permite a simulação da deformação do material, podendo-se obter as tensões e deformações atuantes nas matrizes e no material sendo deformado, bem como a visualização do fluxo deste último dentro das matrizes e, conseqüentemente, da formação de possíveis defeitos quando o tarugo e/ou pré-forma propostos são inadequados para obtenção do forjado, possibilitando que se façam alterações nos mesmos para novas simulações. Este programa é dividido em três partes: 1) Pré-processamento; 2) Simulação; 3) Pós-processamento.

No pré-processamento informa-se que o material a ser conformado é um aço SAE 8620 a ser forjado a uma temperatura de 1250 °C, adotando-se um fator de atrito constante igual a 0,3. A máquina especificada foi uma prensa hidráulica com uma velocidade de descida do cabeçote superior de 5 mm/s. Define-se também, quais as superfícies terão seus

deslocamentos restritos em determinadas direções - condições de contorno. As geometrias das matrizes superior e inferior e do tarugo podem ser introduzidas no programa através de um arquivo IGES.

Informados os dados do problema, inicia-se a simulação em si. São realizadas duas simulações: 1ª) Para obtenção da pré-forma a partir de um tarugo; 2ª) Para obtenção do forjado com rebarba a partir da pré-forma. As informações sobre a pré-forma obtida na primeira simulação são armazenadas em um arquivo que servirá como dado de entrada sobre o material a ser conformado na segunda etapa.

Finalizada a simulação, procede-se o pós-processamento que permite obter as informações citadas acima.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando-se as semelhanças dimensionais e geométricas, os forjados foram agrupados da seguinte forma: família 01: forjados 04, 07 e 15; família 02: forjados 01 e 02; família 03: forjados 03 e 09.

Os forjados 05, 08, 10, 11, 12, 13, 14 e 16 não puderam ser agrupados devido às suas acentuadas diferenças dimensionais e/ou geométricas. Os forjados 08 e 13 são geometricamente semelhantes, mas diferem em suas dimensões. Isto ocorre também entre os forjados 11 e 16.

Desta forma, permite-se a padronização das ferramentas, diminui-se o número de matrizes necessárias para obtenção das pré-formas dos forjados, o tempo de troca de matrizes, o inventário de produção, os custos com material para ferramentas e processo de usinagem para obtenção das mesmas.

O tempo de troca das matrizes será menor uma vez que somente as utilizadas para obter o forjado final serão trocadas. Os ajustes posteriores à fixação das mesmas podem ser eliminados definindo-se previamente os calços. Para isso, são importantes um controle dimensional rígido das matrizes e calços.

A proposta de formação de família de peças visa não somente a utilização das mesmas matrizes de pré-forma para todos os forjados de uma família, mas também manter os ajustes entre elas, ou seja, as pré-formas terão a mesma altura h_1 – vide Figura 2.

Adotou-se a família N^o 02 a fim de implementar a proposta de formação de família visando a padronização do ferramental. A pré-forma adotada é a do tipo observada na Figura 2b. As pré-formas dos forjados 01 e 02 terão as mesmas medidas d_1 , h_1 e h_2 , diferenciando apenas no diâmetro D . Os tarugos utilizados para os forjados 01 e 02 possuem comprimento de 36,47 e 29,94 mm, respectivamente, e um mesmo diâmetro de 25,4 mm. A utilização de tarugos com mesmo diâmetro facilita o ajuste da guilhotina quando do término da produção de um lote de tarugo para o início de outro, bastando ajustar somente o comprimento de corte. Aqui, o planejamento da produção é importante para garantir que os tarugos de mesmo diâmetro, mas com comprimentos diferentes, sejam produzidos em seqüência, de forma a minimizar os ajustes necessários para a operação de corte.

A Figura 3 mostra a geometria da matriz de pré-forma definido para a família 02. O perfil da região "A", foi definido de modo que as pré-formas pudessem ser posicionadas facilmente em suas respectivas matrizes finais, garantindo o preenchimento das mesmas sem a formação de defeitos como dobras, excesso de rebarba em determinada região do forjado, evitando a concentração de esforços em determinadas regiões e, conseqüentemente, um desgaste diferenciado nas superfícies internas das matrizes ou uma sobrecarga que as danifique. O detalhe "B" facilita o posicionamento do tarugo sobre esta matriz.

O programa DEFORM permitiu a análise da viabilidade de utilização de um mesmo conjunto de matrizes de pré-forma para obtenção dos forjados de uma determinada família.

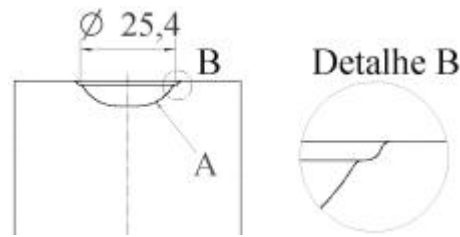


Figura 3 – Geometria da matriz de pré-forma definida para a família 02.

A utilização de uma mesma pré-forma para obtenção de dois ou mais forjados foi simulada, para a família Nº 02, através deste programa, mostrando que é possível obter-se os forjados 01 e 02 utilizando um mesmo conjunto de matrizes de pré-formas (Figuras de 4 e 5).

Observa-se, tanto na obtenção da pré-forma como do forjado final, que o material tende a se deformar preenchendo, primeiramente, a parte mais baixa da matriz inferior. Desta forma, tem-se preferencialmente uma operação de extrusão direta seguida de um recalque.

Na formação do forjado final ocorre simultaneamente a extrusão direta e inversa, mas com o preenchimento primeiro da parte mais baixa da matriz inferior – formação do cubo - e, posteriormente, a região superior da mesma – formação da alma e diâmetro externo da engrenagem. Caso o preenchimento se desse primeiramente na parte superior haveria um refluxo de material da parte mais alta para a mais baixa da matriz inferior elevando a carga necessária para o término do processo e, possivelmente, gerando defeitos no forjado.

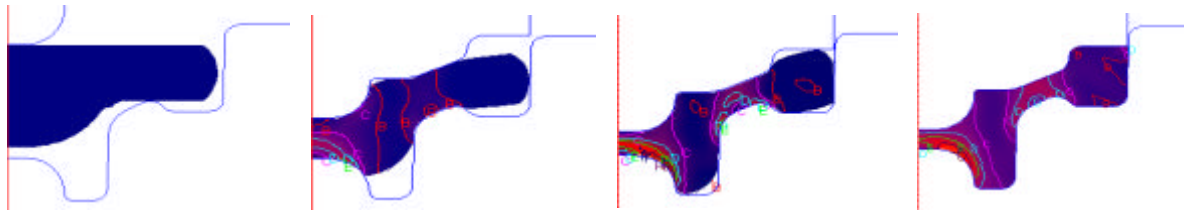


Figura 4 - Obtenção do forjado 01 a partir da pré-forma proposta ($L/D = 1,4$).

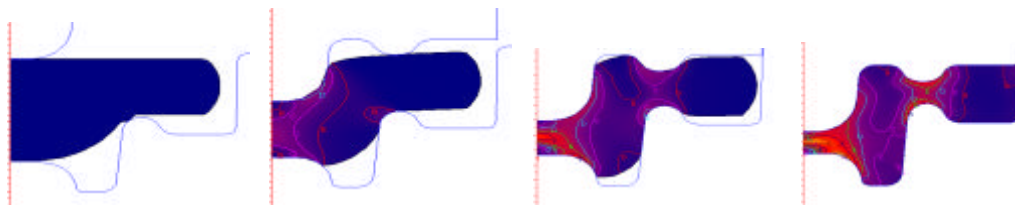


Figura 5 – Obtenção do forjado 02 a partir da pré-forma proposta ($L/D = 1,2$).

4. CONCLUSÕES

É possível agrupar-se os forjados em família, visando padronizar as matrizes de pré-forma e os ajustes entre elas, diminuindo-se assim o tempo de troca das ferramentas.

A simulação do processo de forjamento utilizando um programa adequado pode ajudar a otimizar as pré-formas e prevenir a formação de defeitos nos forjados, evitando-se a confecção de matrizes inadequadas ao processo e, conseqüentemente, a perda de tempo e material que isto representa.

O forjamento de família de peças, visando a flexibilização do processo de forjamento a quente, requer um planejamento e controle da produção mais eficiente, visto que as peças as quais compõem uma família, geralmente, não são solicitadas todas ao mesmo tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e a colaboração da empresa Eaton Componentes Automotivos - Divisão de Transmissões.

REFERÊNCIAS

- Button, S. T., Lima, C. de Á. e, 1995, Programa de Cursos de Extensão - Curso de Especialização - Fabricação e Automação da Manufatura: “*Sistemas Flexíveis de Ferramental*”, OFA – 05, Capítulo III, março, FEM - UNICAMP
- Foray, D., Garrouste, P., Bournicon, C., Ravassard, P., 1993. Equipamentos de produção: a flexibilidade nas forjarias. Máquinas e metais, janeiro, 8p.
- Gomide, F. A. C., Andrade Netto, M., 1987, Introdução à automação industrial informatizada, I Escola Brasileiro - Argentina de Informática - I EBAI - Capítulos 1 e 2, Editorial Kapelusz S.A., Buenos Aires, Argentina.
- Kudo, H., 1990, Towards net-shape forming, Journal of materials processing technology, vol. 22, p. 307-342.
- Lima, M. A., Agostinho, O. L., 1989, A flexibilidade na conformação plástica dos metais, Máquinas e metais, agosto, 5 p.
- Lin, H.-R., Chen, Y.-K., 1994, Development of new alloy steel grade which facilitates elimination of process annealing, Ironmaking and steelmaking, vol. 21, n. 1, p. 27-31.
- Matsushita, T., 1990, Improvements of equipment for close-tolerance forging and extrusion in Japan, Journal of materials processing technology, vol. 22, p. 223-238.
- Ravassard, P., 1989, Troca rápida de fabricação em conformação a frio, Máquinas e metais, agosto, 9p.
- Schmoeckel, D., 1991, Developments in automation, flexibilization and control of forming machinery, Annals of the CIRP, vol. 40, n. 2, p. 615-622.
- Shipley, R. J., 1988, Metals Handbook, Precision Forging, 9^a Edição, ASM, Metals Park, Ohio, vol. 14, p. 158-175.
- Thomas, A., s.d, Manual de Forjamento – Projeto de Matrizes, Drop Forging Research Association, Publicado pela ABM - Associação Brasileira de Metais -, São Paulo, 135 p.

5. ABSTRACT

Precision hot forging: a proposal for flexibilization

The development of NCC technology and quick change systems became possible the improvement in metal forming processes flexibilization. Due to its characteristics, the precision hot forging does not make easy the employment of family groupily, group technology, manufacturing cells and tooling quick change, with large application in machining processes flexibilization. In this work, forged parts were grouped in families to make possible the use of the same preform in precision hot forging, improving the process flexibility. DEFORM 2D has been applied to analyse the viability in using common tools. It was observed that it is possible to obtain finished forgings, grouped in families, using the same blanking tools, decreasing the set-up time. Simulation allowed to optimize the blanking tools geometry, saving time, material and energy and avoiding the manufacturing of defective parts.

Key-word: Forging, flexibilization, tooling, family, simulation.