

OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE

Angelo Caporalli Filho

Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Departamento de Materiais e Tecnologia, caporali@feg.unesp.br – Guaratinguetá, SP, Brasil.

Wyser José Yamakami

Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica, wyser@dem.feis.unesp.br – Ilha Solteira, SP, Brasil.

Sérgio Tonini Button

Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Departamento de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, sergio1@fem.unicamp.br – Campinas, SP, Brasil

Resumo. *Os processos de conformação plástica dos metais devido às suas características como ferramental dedicado, custo elevado de equipamentos, alto tempo de preparação da máquina e produtos contínuos ou semi-contínuos, sempre estiveram ligados aos conceitos de produção em grandes lotes. A automação dos processos de conformação com a aplicação da tecnologia CNC aliada aos conceitos e técnicas, antes aplicados mais à usinagem, como a tecnologia de grupo, formação de famílias, troca rápida de ferramentas, tem possibilitado uma certa flexibilidade, rapidez e economia nestes processos, viabilizando a sua aplicação para pequenos lotes. O desenvolvimento de sistemas especialistas para o forjamento a quente deve-se aos importantes avanços verificados nesse processo que influíram na modificação da geometria das ferramentas e na qualidade dimensional e geométrica dos forjados. Este trabalho apresenta o Sistema Especialista para o forjamento a quente de precisão - Automatização do Projeto de Ferramentas para o Forjamento a Quente (APFFQ) - de engrenagens e peças com geometria axissimétrica, cuja relação altura / diâmetro do forjado é bem menor que 1, modeladas pelo software SolidEdge v. 3.5, com interface gráfica programada por rotinas do Visual Basic v. 5.0, como a etapa inicial do planejamento do processo para o forjamento a quente de precisão. Um Dispositivo de Troca Rápida de Matrizes também foi desenvolvido com objetivo de reduzir o tempo despendido nesta etapa do forjamento. Essa otimização possibilitou uma redução nos tempos de projeto do ferramental e de troca das matrizes de, aproximadamente, 25 para 2 horas e de 7,5 para 2,5 minutos, respectivamente.*

Palavras-chave: *planejamento, forjamento de precisão, sistemas especialistas, projeto de ferramentas, troca rápida*

1. INTRODUÇÃO

O processo de forjamento a quente distingue-se do realizado a morno pela faixa de temperatura na qual é realizado, isto é, faixa de temperatura em que ocorrem os mecanismos de recuperação e recristalização. Para o forjamento a quente de aços as temperaturas estão entre 1100 e 1280°C, conforme Doege⁽¹⁾.

Aproximadamente metade do custo de um forjado se faz em função do custo da matéria prima. Com o processo de forjamento de precisão pode-se alcançar uma economia de 15% dessa matéria

prima, e então o custo do forjado ser reduzido em 7,5%. Como exemplo, Douglas ⁽²⁾ cita uma peça forjada de precisão com massa de aproximadamente 8 lb (aproximadamente 3,6 kg) resultou em uma redução no custo de usinagem de US\$ 1,00 quando comparado com aquele do mesmo produto forjado de forma convencional.

Devido a todas essas características descritas, os processos de manufatura por forjamento são encarados mais como uma arte e não como uma ciência, pois envolvem criatividade, intuição e principalmente a experiência dos engenheiros que atuam na área. Atualmente, os engenheiros planejam processos utilizando manuais, ábacos obtidos empiricamente e principalmente as experiências por eles acumuladas, conforme descrito por Glynn ⁽³⁾ e Viecelli ⁽⁴⁾. Assim sendo, esses processos são realizados pelo método da “tentativa-e-erro”, o que aumenta significativamente o custo do processo, item crítico do ciclo produtivo segundo Yang ⁽⁵⁾ e Song ⁽⁶⁾.

Com o desenvolvimento da informática e a introdução dos sistemas CAD, CAM e CAPP entre outros, aplicados como ferramentas de auxílio no planejamento de processos de forjamento, associados aos métodos de “tentativa-e-erro” bem como aos métodos baseados na experiência adquirida pelos profissionais, projetistas e engenheiros da área puderam auxiliar consideravelmente a automação dos diversos procedimentos, atuando como fonte de informações e organização de dados para o planejamento de novos processos.

Muitos Sistemas Especialistas (SE) em operação, aproximadamente 80%, são para utilização em PC's e desenvolvidos sobre *softwares* comerciais. Outros podem ser escritos em uma linguagem de Inteligência Artificial, como *PROLOG* ou *LISP*. King ⁽⁷⁾, (Glyn ⁽³⁾, Dobrzański ⁽⁸⁾ e Sitaraman ⁽⁹⁾ dividem um SE em três componentes básicos: base de conhecimento – *knowledge base* -, máquina de inferência – *inference engine* - e uma interface com usuário – *user interface*.

Base de conhecimento: como uma base de dados, armazena informações sobre o processo, critérios de produção, isto é, pares “condição-ação” permitindo a manipulação/interpretação desses dados. Esses critérios podem ser na forma de afirmações factuais, estruturais, critérios ou procedimentos. A sintaxe desses critérios pode ser representada por comandos do tipo: “If<condição>” e “Then<ação>”, o Quadro 1 apresenta um exemplo de uma série de condições que levam a uma ação.

Quadro 1 – Exemplo apresentado por Glynn ⁽³⁾.

| | |
|---|--------------|
| IF, material é Iconel 718 | (condição 1) |
| AND, lubrificante é Silicato B | (condição 2) |
| AND, volume inicial do tarugo < 9 in ³ | (condição 3) |
| THEN, use Prensa C | (ação) |

Máquina de Inferência: a função desta estrutura é executar uma estratégia lógica no controle dos dados na base de conhecimentos, que é concluída pela rotina seguinte, verificando fatos e critérios armazenados no banco de dados, o que leva a uma conclusão direta em função de informações fornecidas pelo usuário.

Interface com Usuário: São os meios de comunicação do usuário com o sistema, pelos quais são introduzidas as informações necessárias. Atualmente, a interface gráfica é a mais empregada e pode ser orientada por objetos, ter controles por “mouse” ou apresentada em janelas.

Associada aos sistemas especialista, um outro avanço no sentido de aumentar a flexibilidade de processos de conformação plástica é a troca rápida de ferramentas, como mencionado por Lima ⁽¹⁰⁾. A análise da troca rápida nos processos de conformação plástica pode ser melhor realizada com a divisão do planejamento destes em etapas conforme relacionadas por Button ⁽¹¹⁾.

O conceito de troca rápida de ferramentas foi desenvolvido a partir da década de 50 por Shigeo Shingo ⁽¹²⁾ para processos de usinagem e foi denominado SMED (*Single Minute Exchange of Die*). O objetivo principal é minimizar ou eliminar os tempos parciais que compõem o tempo total de fabricação Button ⁽¹¹⁾.

Os trabalhos de Schmoeckel ⁽¹³⁾ e Matsushita ⁽¹⁴⁾ mostram alguns melhoramentos na automação, flexibilização e controle dos equipamentos de conformação.

O monitoramento e o controle dos processos permitem que se obtenham peças boas, evitando-se

a aplicação de cargas excessivas para sua conformação, que sobrecarregam a máquina desnecessariamente, levando a um maior desgaste de seus componentes e das ferramentas.

A automação permitiu, em parte, a diminuição dos tempos de troca de ferramentas, minimizando os custos dos produtos. Outros tempos improdutivos podem comprometer a tentativa de flexibilização do processo a fim de se diminuir os lotes de fabricação, principalmente quando eles implicam em paradas da máquina. Assim sendo, Ravassard ⁽¹⁵⁾ ressalta a importância de se reduzir o número de ferramentas e/ou ampliar suas aplicações.

A mudança do processo de fabricação ou das ferramentas se torna em geral muito dependente do tipo e das especificações da máquina ou da operação efetuada em cada montagem. De acordo com Ravassard ⁽¹⁵⁾ os tempos de troca de ferramental podem consumir de 4 a 24 horas dependendo do tipo de máquina e operação.

Os tempos totais de mudança se dividem em:

- preparação e verificação de novas ferramentas: 20 a 30% do tempo total;
- desmontagem e montagem das ferramentas: 5 a 15%;
- centragem e regulagem das ferramentas: 15 a 20%;
- regulagem e ajustes para obtenção de peças boas: 40 a 50%.

O conceito SMED classifica as operações de montagem e preparação necessárias para obtenção da peça em: internas - exigem a parada do equipamento produtivo – e, externas - realizadas simultaneamente à produção. Esta classificação é importante, pois pode levar a uma redução de 30 a 50% do tempo em que o equipamento fica inativo.

É necessário para esta classificação que se conheçam as operações e os tempos envolvidos em cada uma delas. Um estudo das operações pode proporcionar uma redução do tempo de preparação e montagem pela transformação de operações internas em externas, como as operações de regulagem do equipamento, diminuindo o tempo em que o mesmo fica parado.

Pode-se, simultaneamente a esse estudo, procurar reduzir os tempos de execução das operações internas e/ou externas pela racionalização de todos os aspectos da operação, além de otimizar as regulagens do ferramental ou mesmo suprimir os ajustes para obtenção de peças boas.

Ravassard ⁽¹⁵⁾ descreve os tempos elementares, com seus problemas e possíveis soluções, os quais se dividem em 4 famílias características: - limpeza e preparação de ferramentas; desmontagem e montagem das ferramentas; regulagem e ensaio; montagem e regulagem dos acessórios.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo otimizar o processo de forjamento a quente na fase de projeto das ferramentas, utilizando o sistema especialista intitulado “Automatização do projeto de Ferramentas para o Forjamento a Quente – APFFQ”, e na etapa de troca das matrizes durante o processo produtivo, por meio de um dispositivo de troca rápida que foi projetado, confeccionado e testado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição dos Softwares Utilizados

O *Solid Edge*® *Solid Edge*⁽¹⁶⁾ é um programa de CAD, para modelagem de sólidos de utilização extremamente fácil já que esse *software* apresenta um manual de operação dentro de seu *help* associado a um tutorial que facilita o aprendizado. Além disso, ele apresenta uma lista denominada *Feature PathFinder* que permite acompanhar a seqüência utilizada no desenvolvimento de um sólido, permite a geração de sólidos possibilitando assim a visualização da peça no espaço, além de permitir que a partir do sólido, o desenho de projeto seja gerado rapidamente, o que é para o desenvolvimento do SE um facilitador, por ser parametrizado, qualquer alteração efetuada no sólido original é automaticamente atualizado.

É importante destacar que o *Solid Edge*® possui em seu *help* a opção *Programming with Solid Edge*, que apresenta algumas rotinas escritas na linguagem *Basic* que podem ser atualizadas para aplicação direta dentro da estrutura desenvolvida para o sistema especialista.

O *Visual Basic*® *Microsoft* (17) é um ambiente de programação baseado na linguagem *Basic*, utilizado para o desenvolvimento de programas com interface gráfica, sendo bastante versátil e de fácil manipulação. As aplicações que a linguagem permite criar diferenciam-se pela qualidade gráfica da interface com o usuário. Essa interface consiste basicamente de objetos, como botões de comandos, botões de opções, aos quais associam-se propriedades, tais como títulos, nomes, cores, tamanho da janela, disponibilidade de acesso, disponibilidade de visualização, entre outras.

Depois de criada a disposição gráfica dos vários objetos (caixas de diálogo, botões de comando, caixas de texto etc.) escreve-se o código que dá ação à interface conforme os eventos ocorram. Com o *Visual Basic*® é possível criar aplicações poderosas, fazendo ligações dinâmicas entre vários outros produtos padrão *Windows*®. Foi por isto, a linguagem escolhida para criação da interface apresentada.

3.2. A Necessidade da Interface para o Sistema Especialista

A necessidade básica que motivou a criação de uma boa interface para o usuário foi a possibilidade de que um profissional, que não estivesse diretamente ligado ao projeto da peça forjada, pudesse fazê-lo utilizando as sub-rotinas sem conhecer sua programação. Isto foi conseguido pelo uso de janelas gráficas que continham informações gráficas e textuais, bem como campos a serem preenchidos pelo projetista, de um modo similar ao que ocorre com a maioria dos utilitários do sistema *Windows*®.

3.3. Nomenclatura Utilizada para Caracterização da Geometria da Peça a ser Forjada.

Como já mencionado, as geometrias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, são de engrenagens forjadas, obtidas a partir de sólidos de revolução, e denominadas peças axissimétricas. Assim, é necessário apresentar a nomenclatura das partes que compõem cada engrenagem já que esta informação será de suma importância no decorrer do trabalho, pois será em função dessa nomenclatura que algumas decisões fundamentais serão tomadas pelo usuário.

A Figura 1 mostra uma engrenagem com a nomenclatura utilizada e representa a forma mais complexa dentre as estudadas no desenvolvimento deste trabalho. Essa nomenclatura também é utilizada para as demais geometrias de engrenagens, desde que apresentem semelhanças geométricas, como furo, cubo e alma.

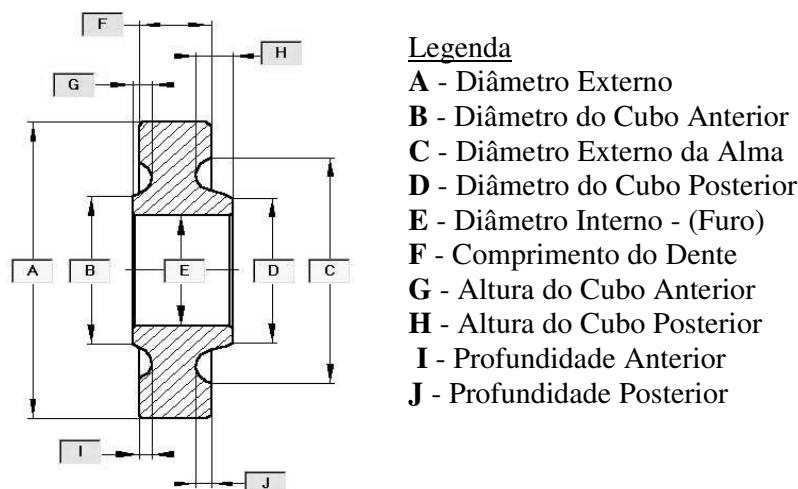


Figura 1. Nomenclatura das partes da engrenagem.

3.4. A Interface

O programa do sistema especialista executável em ambiente *Windows*® é chamado pela abreviação do objetivo principal deste trabalho: Automatização do Projeto de Ferramentas para o Forjamento a Quente - APFFQ.

Quando o APFFQ é inicializado, a primeira janela a ser apresentada ao usuário contém o título do sistema, sua autoria, bem como recomendações para o uso Figura 2a. Em seguida, é apresentada a janela denominada “Esboços” mostrada na Figura 2b e que contém quatro famílias de engrenagens agrupadas em função de detalhes geométricos semelhantes.

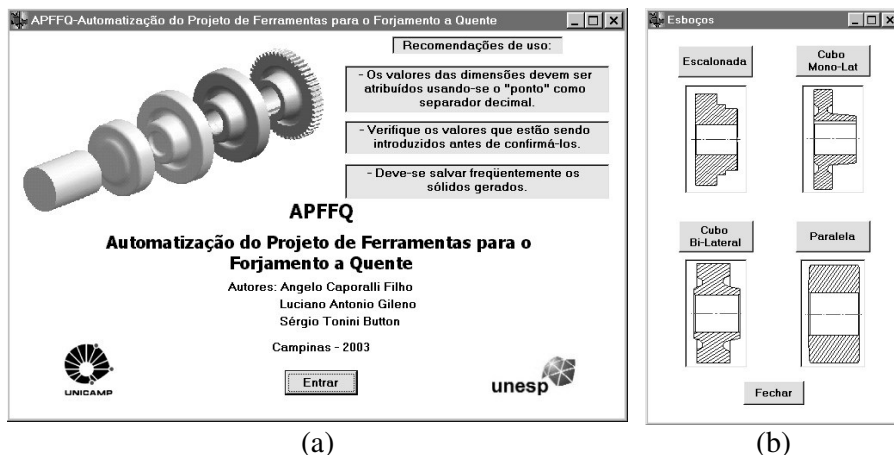


Figura 2. (a) Janela de abertura do APFFQ e (b) Janela inicial intitulada "Esboços", com as quatro famílias.

Neste trabalho são apresentados quatro tipos de peças, que diferem entre si pelo aspecto geométrico. Esse número de tipos poderia ser maior ou menor em função da variedade de peças em produção em uma determinada empresa.

Após a apresentação dessa janela, o usuário deve clicar sobre uma das opções de família disponíveis para dar seqüência ao desenvolvimento do projeto do forjado. O botão “Fechar” encerra o aplicativo.

Os esboços dos perfis propostos para as engrenagens foram escolhidos para representar as geometrias que caracterizam a grande maioria de engrenagens forjadas nas indústrias, e que foram classificadas como segue:

- uma família de engrenagens caracterizadas por apresentarem vários diâmetros, ao longo do perfil, que caracteriza o grupo denominado de “Escalonada”;
- uma família de engrenagens que apresentam o “Cubo” saliente em apenas um dos lados, representando o grupo denominado “Cubo Mono-Lateral”;
- uma família de engrenagens com “Cubo” em ambos os lados da peça, que representa o grupo denominado “Cubo Bi-Lateral” e
- o quarto grupo formado por engrenagens do tipo “Paralela”, ou seja sem escalonamento de diâmetros.

Como todo sistema de planejamento ou projeto de processos de fabricação é dependente da experiência e criatividade do projetista envolvido no desenvolvimento de um novo produto forjado, buscou-se um sistema com razoável interação com o usuário e para isso no início do planejamento o projetista deverá ter em mãos o desenho do produto final, que é o desenho da peça acabada após todas as operações subseqüentes de usinagem. Será sobre as dimensões desse desenho que o sistema acrescentará o sobremetal, ângulos de saída, raios de canto e de filete, enfim, todos os detalhes necessários para a geração do produto forjado.

De posse do desenho do produto usinado, o projetista seleciona, visualmente, por semelhança geométrica, uma das famílias apresentadas na Figura 2b. Feita a seleção do perfil acessa-se outra

janela. Por exemplo, clicando-se sobre o botão intitulado “Cubo Bi-Lateral” a nova janela disponibilizada é a “Dimensões – Cubo Bi-Lateral”, mostrada na Figura 3a. Para os demais botões, acessam-se as janelas correspondentes para cada uma das formas apresentadas na janela mostrada na Figura 2b.

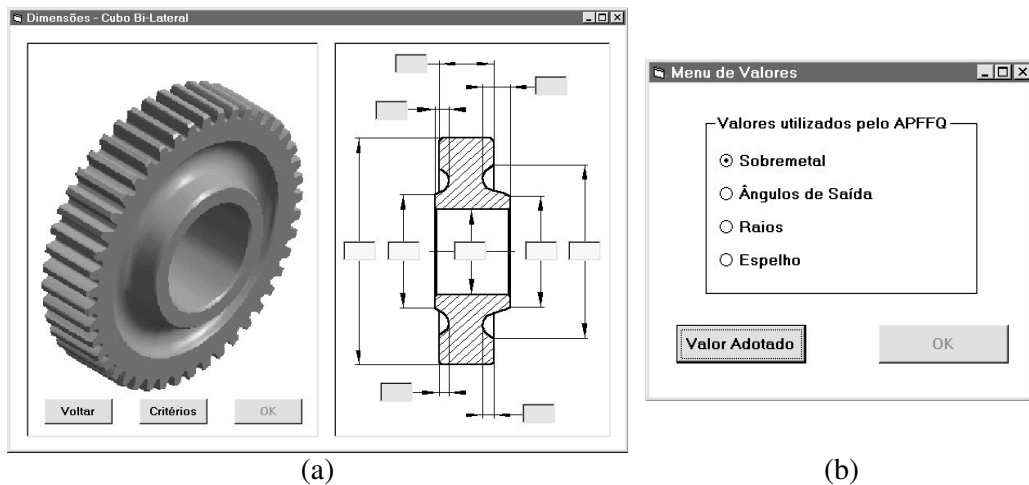


Figura 3. (a) Janela “Dimensões – Cubo Bi-Lateral” e (b) Janela "Menu de Valores".

A janela mostrada na Figura 3a apresenta vários campos, caixas de texto, para preenchimento pelo projetista, com os valores das respectivas dimensões extraídas do desenho de projeto do cliente. Após a entrada desses dados deve-se executar o dimensionamento do forjado segundo critérios de projeto previamente adotados, para a definição de sobremetal, ângulos de saída, raios de canto e de filete e dimensão do espelho. A janela intitulada “Dimensões – Cubo Bi-Lateral”, Figura 3a, possui três botões na região inferior sob a figura tridimensional. O primeiro botão, “Voltar”, permite que o usuário, caso tenha cometido um engano ao selecionar o perfil da peça, possa reiniciar o planejamento do processo.

O segundo botão, “Critérios”, possibilita a verificação dos valores de sobremetal, raios, ângulos e espelho, adotados para aquelas dimensões que foram atribuídas aos campos nessa janela. O terceiro botão, “Ok”, somente será habilitado após a verificação desses critérios. Sendo assim, ao clicar-se o segundo botão, tem-se acesso à janela intitulada “Menu de Valores”, a partir da qual serão verificados os valores adotados para sobremetal, ângulos de saída, espelho e raios Figura 3b.

Esta janela apresenta a variável sobremetal como opção padrão para verificação dos valores adotados. A ordem dos itens verificados é a mesma utilizada nas indústrias de forjados. Para proceder a verificação deve-se clicar sobre o botão intitulado “Valor Adotado”, que dá acesso a uma nova janela. Esse procedimento é o mesmo para cada um dos critérios verificados nessa janela.

Para cada um dos critérios de projeto apresentados na janela “Menu de Valores” existe janelas com característica próprias do critério os são apresentados valores médios da cada critério. Como exemplo citamos o caso do sobremetal que toma como base para o cálculo do sobremetal adotado a dimensão máxima do usinado.

Após a geração dos sólidos da peça forjada e das ferramentas Figura 4 o passo seguinte é a geração do desenho de projeto, ou seja, o desenho que será enviado à ferramentaria para posterior confecção do jogo de ferramentas. Para a seqüência do planejamento do processo utiliza-se um outro aplicativo do *software Solid Edge®* que é o *Draft* usado para gerar o desenho bidimensional de projeto.

Após a finalização do desenvolvimento do novo forjado e já com o desenho de projeto concluído e atualizado, o *Solid Edge® Draft* poderá ser fechado.

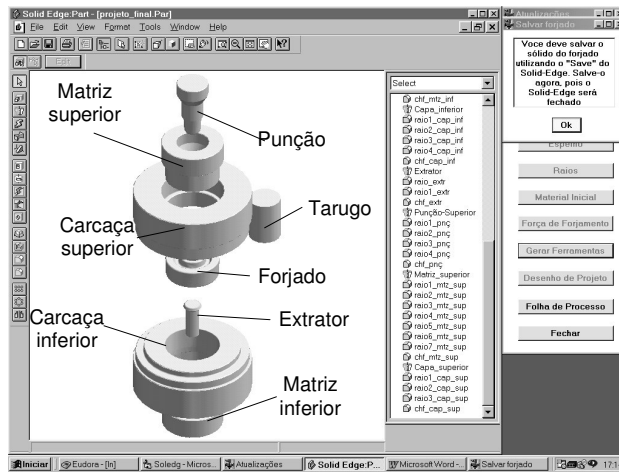


Figura 4. Geração dos sólidos do forjado e da ferramenta.

4. PROJETO DO DISPOSITIVO DE TROCA E FIXAÇÃO RÁPIDAS DE FERRAMENTAS

Para reduzir os tempos em que a prensa fica parada – tempos internos – para realização da troca das matrizes e dos ajustes para obtenção de um forjado sem defeitos no forjamento a quente de um novo lote de peças foi confeccionado um dispositivo de troca rápida que atenda os seguintes requisitos: - permitir que a montagem das matrizes e os ajustes para se obter um forjado bom sejam feitos fora da prensa e manter, após fixado na prensa, os ajustes previamente realizados.

O dimensionamento dos componentes foi baseado:

- nas dimensões da prensa hidráulica, ou seja, no vão livre que se tem para introduzir o dispositivo, fixá-lo na prensa e realizar o forjamento de forma adequada e segura;
- nas dimensões das matrizes, procurando facilitar seu manuseio, localização e fixação pelo operador, dentro do espaço disponível;
- nas dimensões dos dispositivos de fixação rápida selecionados.

Existem dois tipos de presilhas de fixação: um para fixação das matrizes no dispositivo de troca rápida (Figura 5a) e outro para fixação deste na prensa (Figura 5b). Essas presilhas não foram projetadas, mas sim especificadas a partir de um catálogo comercial, sendo definido a partir de alguns requisitos.

Para fixação das matrizes no dispositivo de troca rápida, a presilha de fixação deve permitir uma fixação rígida e segura de matrizes com diversas dimensões no dispositivo de troca rápida.

Para fixação do dispositivo de troca rápida de matrizes na prensa, as presilhas de fixação devem permitir uma fixação rápida e segura daquele primeiro na prensa. Estas presilhas devem também permitir que o dispositivo de troca rápida seja liberado da prensa de forma rápida e segura.

Os tempos foram medidos de acordo com as etapas apresentadas por Slack ⁽¹⁸⁾ para o estudo dos tempos, adotando-se uma escala de avaliação de desempenho igual a 100.

4.1. Dispositivo de Troca e Fixação Rápidas de Ferramentas

O dispositivo de troca rápida de ferramentas proposto, visando atender os requisitos descritos anteriormente, é mostrado na Figura 5a. Ele é composto de duas mesas móveis e quatro colunas.

Sobre as duas mesas móveis – superior e inferior - são posicionadas e fixadas por presilhas as matrizes superiores e inferiores, respectivamente. As matrizes superiores, assim como as inferiores, são compostas pelas matrizes para obtenção da pré-forma e do forjado final.

As mesas móveis possuem quatro furos passantes, localizados em seus cantos, por onde são colocadas as colunas que têm a função de manter o alinhamento entre as matrizes superiores e inferiores.

Auxiliam ainda na troca rápida duas guias laterais e dois calços que atuarão como *stop*. As guias laterais - direita e esquerda - e os *stops*, fixados sobre a mesa da prensa, servirão para orientar e posicionar o dispositivo de troca rápida sobre ela.

4.2. Troca das Matrizes Utilizando o Dispositivo de Troca Rápida

Para entendimento do processo de troca, supõe-se que um novo lote de peças será produzido e que o conjunto de matrizes utilizadas na produção do lote anterior tenha sido retirado da prensa utilizando o dispositivo de troca rápida.

Neste instante é essencial que o conjunto de matrizes para produzir este novo lote esteja montado em um outro dispositivo de troca rápida. É necessário, como se observa, que se tenha dois dispositivos de troca rápida: um para as matrizes que estão forjando determinada peça e outro para as que serão usadas no forjamento do próximo lote de peças.

Estando as presilhas fixadas sobre a mesa e cabeçote superior da prensa abertas, a inserção das matrizes utilizando o dispositivo de troca rápida é realizada da seguinte forma:

1) Este dispositivo é levado até a prensa utilizando-se um carrinho e depositado sobre a mesa da prensa e posicionado sobre ela.

2) Abaixa-se então o cabeçote superior da prensa até encostá-lo no dispositivo de troca rápida, fecha-se as presilhas pressionando as placas móveis superior e inferior do dispositivo contra o cabeçote superior e mesa inferior da prensa, respectivamente.

3) Levanta-se o cabeçote superior promovendo um distanciamento entre as placas móveis e permitindo que as colunas guias do dispositivo possam ser retiradas.

4) Retiram-se as quatro colunas finalizando a fixação das matrizes com o auxílio do dispositivo de troca rápida o que permite iniciar o forjamento das peças. A Figura 5b mostra o dispositivo com as matrizes fixado na prensa permitindo o início do forjamento.

Finalizado o forjamento de um lote de peças, a retirada das matrizes da prensa é feita realizando-se ações de forma inversa às descritas nos itens do procedimento acima, começando pelo item 4 até o item 1.

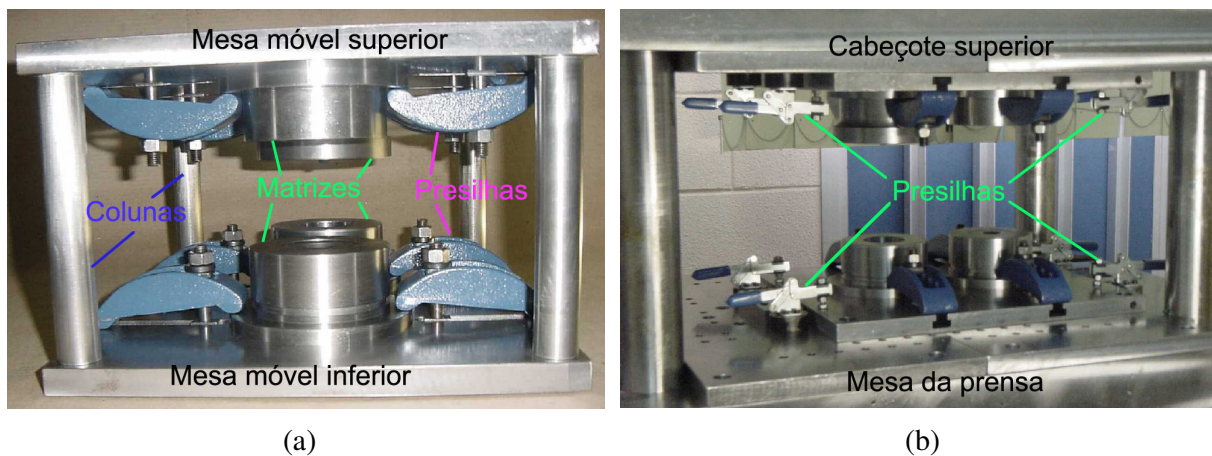


Figura 5. (a) Dispositivo de troca rápida de matrizes. (b) Dispositivo fixado na prensa.

4.3. Troca das Matrizes sem o Dispositivo de Troca Rápida

O procedimento de montagem das matrizes é semelhante ao realizado na fixação delas nas mesas móveis inferior e superior do dispositivo de troca rápida mostrado anteriormente. Neste caso as mesas móveis inferior e superior correspondem à mesa e cabeçote superior da prensa, respectivamente, necessitando que a esteja parada.

É importante ressaltar que os ajustes para obter o primeiro forjado bom – sem defeitos – são feitos por “tentativa e erro”, inserindo ou retirando calços sob as matrizes inferiores. Porém agora, estes ajustes são realizados sobre a mesa da prensa, o que torna necessário a parada da mesma.

A retirada das matrizes exige também que a prensa esteja parada de forma que as matrizes superiores e inferiores possam ser liberadas do cabeçote superior e mesa da prensa, respectivamente.

Um detalhamento maior do projeto e montagem do dispositivo de troca rápida bem como do procedimento de troca das matrizes com e sem a utilização deste dispositivo pode ser obtido no

trabalho de Yamakami ⁽¹⁹⁾.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise dos Procedimentos Projeto através do APFFQ

A primeira análise é a mais importante e relaciona-se aos objetivos do trabalho que foram plenamente alcançados, pois com o uso do sistema especialista desenvolvido demonstrou-se que houve uma redução acentuada nos tempos de planejamento do processo e, conseqüentemente, dos custos relacionados ao projeto de engrenagens forjadas.

1) O sistema mostrou-se útil e eficiente no desenvolvimento de novos planejamentos de processos de forjamento para as engrenagens, proporcionando ao projetista uma visão geral do projeto e permitindo-lhe verificar as diversas etapas de projeto do produto forjado e de suas ferramentas.

2) O sistema é de fácil utilização, que foi proporcionada pela interface desenvolvida que permite ao projetista facilidades na atribuição de valores durante o planejamento do processo e projeto do novo forjado. Graças a essa interface, o sistema apresenta, e exige, poucas informações em forma de texto, já que grande parte do planejamento se dá de forma gráfica e apresenta ao projetista a seqüência de desenvolvimento do projeto a ser seguida.

3) Como grande parte das ferramentas que têm a informática como base de seu desenvolvimento, este sistema também tem algumas desvantagens ou problemas que deverão ser oportunamente sanados. A principal desvantagem refere-se à automação que é suficiente para os objetivos inicialmente propostos, mas que pode ser aumentada de modo a tornar o planejamento do processo mais eficaz e menos susceptível a erros do projetista.

4) Quanto aos *softwares* utilizados, conclui-se que foram bem selecionados pois a facilidade de se programar o *Solid Edge*® por meio de rotinas do *Visual Basic*®, em muito facilitou a elaboração e avaliação dessas rotinas.

5.2. Análise dos Procedimentos de Troca e Fixação Rápida

As vantagens da utilização deste dispositivo na troca das matrizes, em relação à forma convencional, ou seja, sem utilização do mesmo seriam:

1) Permitir a montagem e desmontagem das matrizes fora da prensa: A prensa pode continuar funcionando, forjando uma determinada peça, enquanto um novo conjunto de matrizes é montado no dispositivo de troca rápida. No processo convencional – sem utilizar o dispositivo de troca rápida – a prensa fica parada – tempo interno – a fim de que os operadores possam retirar o conjunto de matrizes, utilizadas no forjamento de uma peça, e montar um outro para se obter um novo forjado.

2) Permitir que os ajustes, para obter um forjado bom, sejam feitos fora da prensa: além dos tempos de montagem e desmontagem, os ajustes das matrizes e determinação do peso do tarugo para se obter um forjado bom representam tempos internos quando se realiza a troca de matrizes de forma convencional, o que não ocorre quando se utiliza o dispositivo, pois neste caso, os ajustes podem ser realizados sem a necessidade de parada da prensa. Os ajustes das matrizes se restringem em colocar calços de diferentes medidas sob as matrizes inferiores, ou retirá-los, a fim de obterem-se distâncias entre as matrizes superiores e inferiores, de pré-forma e finais, que assegurem a formação de uma pré-forma e forjado final sem defeitos, preenchendo adequadamente as matrizes e evitando sobrecargas que danifiquem a prensa e/ou matrizes.

Para se obter um forjado bom na primeira tentativa, seja no processo convencional ou utilizando-se o dispositivo, é necessário um maior controle dimensional e geométrico das matrizes, calços, tarugos, prensa e dispositivo, no caso de sua utilização.

Deve-se registrar as espessuras dos calços recomendados em função das dimensões dos forjados e pré-formas obtidos, os pesos dos tarugos, as medidas e os desvios dimensionais e geométricos de cada componente e também do conjunto montado para cada peça a ser forjada.

3) Permitir maior segurança aos funcionários: o dispositivo evita as possíveis quedas das matrizes, calços e/ou presilhas durante a movimentação e colocação do ferramental no cabeçote

superior da prensa, visto que são montados e fixados previamente sobre a mesa móvel superior do dispositivo.

No forjamento convencional, ou seja, sem o dispositivo de troca rápida, as matrizes, os calços e presilhas são colocados manualmente quando o conjunto matriz e calços forem suportáveis, ou com o auxílio de uma empilhadeira quando o conjunto matriz e calços forem muito pesados, aumentando os riscos de quedas. Além disso, os esforços realizados pelos funcionários no processo convencional seriam minimizados com a utilização do dispositivo.

5.2. Análise dos Tempos de Troca e Fixação Rápida.

Verificou-se um menor tempo de troca das matrizes com a utilização do dispositivo e também que ele manteve o alinhamento entre as matrizes, levando a obtenção de boas peças forjadas com esses materiais e evidenciando que, para estas condições, as presilhas, guias e *stops* foram eficientes.

Apesar do dispositivo ter atendido aos requisitos desejados, verifica-se que ele apresenta certas limitações que podem ser minimizadas em alguns casos:

1) Nos casos em que as matrizes, por serem leves, eram trocadas manualmente, a utilização do dispositivo no qual elas são fixadas impede que essa operação possa ser realizada de forma totalmente manual. Mesmo no laboratório, onde se trabalhou com tamanhos reduzidos – redução de 2/3 nas dimensões dos forjados e, conseqüentemente, das matrizes e dispositivo, o peso estimado do conjunto montado – 65 kg – é significativamente alto, mesmo que manipulado por dois operadores.

2) Para que o dispositivo possa, efetivamente, permitir uma diminuição do tempo de troca de ferramentas é necessário que se tenha um controle rígido das medidas e dos desvios dimensionais e geométricos das partes que compõem as matrizes, o dispositivo e a prensa. Estes dados devem ser compilados e atualizados sempre que houver alguma modificação dimensional, evitando que se façam ajustes errados, o que levaria a uma perda de tempo.

3) Em vista do item anterior, se faz necessário que o fluxo de informações entre o pessoal dos departamentos de engenharia e produção seja rápido e confiável. Os funcionários devem estar mais atentos às alterações que ocorram no forjado, ferramental ou dispositivo durante o processo, comunicando-as aos departamentos e registrando-as de alguma forma preestabelecida.

Como se observa, as vantagens obtidas com a utilização do dispositivo de troca rápida têm, em contra partida, a exigência de alteração da forma de trabalho, um aumento das responsabilidades dos trabalhadores envolvidos no processo produtivos e a adoção de um planejamento e controle da produção mais eficiente.

A Tabela 1 mostra as medidas de tempo da troca de matrizes na prensa de laboratório feita de forma convencional – sem utilizar dispositivo - e utilizando-se o dispositivo de troca rápida. Pode-se afirmar com 90% de confiança que os tempos são diferentes, sendo o tempo médio para a troca utilizando o dispositivo aproximadamente 65% menor que o gasto na troca convencional. Observa-se também uma redução significativa no tempo médio gasto desde o início do desenvolvimento de um novo projeto até sua conclusão quando se compara os métodos convencionais de projeto com o *software* APFFQ.

Tabela 1. Tempos de troca de matrizes e do Projeto do forjado e ferramental.

| | Troca de Matrizes (min.:s) | | Projeto do forjado + ferramental (horas) | |
|-------|----------------------------|--------------|--|-------|
| | Convencional | Troca rápida | Convencional | APFFQ |
| Média | 7 : 23 | 2 : 34 | 25 | 2 |

6. CONCLUSÕES

1) A utilização do dispositivo de troca rápida de matrizes contribui para a redução dos tempos internos, permitindo uma redução de aproximadamente 65% no tempo total de troca em relação ao processo convencional.

- 2) A utilização do dispositivo de troca rápida requer uma alteração na forma de trabalho, maior responsabilidade dos trabalhadores envolvidos no processo produtivo e a adoção de um planejamento e controle da produção mais eficiente.
- 3)

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – pelo apoio financeiro para realização destas pesquisas. São gratos também pelo auxílio concedido pela Fundunesp – Fundação para o desenvolvimento da Unesp - para apresentação deste trabalho no 3º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – de 12 a 15 de abril de 2005 em Joinville / SC – Brasil.

8. REFERÊNCIAS

1. DOEGE, E.; BOHNSACK, R. Closed die technologies for hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.98, p.165-170, 2000.
2. DOUGLAS, R.; KUHLMANN, D. Guidelines for precision hot forging with applications. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.98, p.182-188, 2000.
3. GLYNN, D.; LYONS, G.; MONAGHAN, J. Forging sequence design using an expert system. *Journal of Material Processing Technology*, Amsterdam, v.55, p.95-102, 1995.
4. VIECELLI, A.; SCHAEFFER L. Um *software* para o projeto de matrizes para peças axissimétricas com rebarba. *Máquinas e Metais*, p. 66-96, dez. 1995.
5. YANG, G.; OSAKADA, K. A review of expert systems for process planning of cold forging. *Manufacturing Review*, New York, v.6, n.2, p.?-?, june, 1993. (Faltando as páginas usadas)
6. SONG, J. H.; IM, Y. T. Expert system for the process sequence design of a ball stub. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v. 89-90 (0), p.72-78, 1999.
7. KING, B. Expert systems in manufacturing. School of computing & information systems, University of Sunderland. Occasional paper 93-1, 2nd Ed. Disponível em: <[http://osiris.sunderland.ac.uk/research/es_ai/brend/es.htm#\[Esp90\]](http://osiris.sunderland.ac.uk/research/es_ai/brend/es.htm#[Esp90])>. Acesso em: 20 dez. 1994.
8. DOBRZAŃSKI, L. A.; MADEJSKI J.; MALINA W.; SITEK, W. The prototype of an expert system for the selection of high-speed steels for cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.56, p.873-881, 1996.
9. SITARAMAN, S. K.; KINZEL, G. L.; ALTAN, T. A Knowledge-based system for process-sequence design in axisymmetric sheet-metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.25, p.247-271, 1991.
10. LIMA, M. A.; AGOSTINHO, O. L. A flexibilidade na conformação plástica dos metais. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.25, n.283, p.53-57, 1989.
11. BUTTON, S.T.; LIMA, C.A. *Sistemas flexíveis de ferramental*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, 1995. cap.3. (OFA – 05 - Programa de Cursos de Extensão - Curso de Especialização - Fabricação e Automação da Manufatura).
12. SHINGO, S. *A revolution in manufacturing: the SMED system*. Cambridge: Productivity Press, 1985. 361p.
13. SCHMOECKEL, D. Developments in automation, flexibilization and control of forming machinery. *Annals of the CIRP*, Paris, v.40, n.2, p.615-622, 1991.
14. MATSUSHITA, T. Improvements of equipment for close-tolerance forging and extrusion in Japan. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.22, p.223-238, 1990.
15. RAVASSARD, P. Troca rápida de fabricação em conformação a frio. *Máquinas e Metais*, São Paulo, 9 p., agosto, 1989.
16. SOLID EDGE®. Disponível em: <<http://www.solidedge.com/>>. Acesso em: 19 fev.2003.
17. VISUAL BASIC®. Disponível em: <<http://www.visualbasic.com>>. Acesso em: 19 fev. 2003.

18. SLACK N. et. al. *Administração da produção*. São Paulo: Atlas, 1997. p. 713-721.
19. YAMAKAMI, W. J. *Uma proposta para a flexibilização do forjamento a quente de precisão*. Campinas, 2003. 261p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

PLANNING HOT FORGING PROCESSES OPTIMIZATION

Angelo Caporalli Filho

UNESP – São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho”, Materials and Technology Department, Guaratinguetá, SP, Brazil. caporali@feg.unesp.br

Wyser José Yamakami

UNESP – São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho” Mechanical Engineering Department, Ilha Solteira, SP, Brazil. wyser@dem.feis.unesp.br

Sérgio Tonini Button

UNICAMP – State University of Campinas, Materials Department, Mechanical Engineering Faculty, Campinas, SP, Brasil. sergio1@fem.unicamp.br

Abstract. *Hot forging processes planning is a time-consuming activity with high costs involved because of the trial-and-error iterative methods. Some processes demand many months to produce forged parts with controlled shapes, dimensions and microstructures. This paper shows how expert systems can help engineers to reduce the time needed to design precision forged parts. The software ADHFD interfacing MS Visual Basic v.5.0 and SolidEdge v.3.0 was used to design flashless hot forged gears, chosen from families of gears. Forming processes automation with CNC technologies, and the use of concepts and techniques like group technology, families of parts, quick change of dies, hot shearing of billets and controlled cooling are important tools to make these processes flexible, and to reduce the production times and costs. The main objective of this work is to present some proposals for the flexibility of hot precision forging by using some of these tools. A die quick change set up was designed, built up and tested to analyze the possible reduction of production time. The ADHFD system and quick change of dies allowed a significant reduction of the unproductive times.*

Keywords. *planning, precision forging, expert system, design tool, die quick change*