

-  LIRIO SCHAEFFER

- [14 de dezembro de 2014](#)

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE FORJAMENTO A FRIO

ATUALMENTE, JÁ SÃO TAMBÉM DEFORMADOS A FRIO AÇOS QUE APRESENTAM ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA. TODOS OS MATERIAIS QUE APRESENTAM UMA DETERMINADA DUCTILIDADE A TEMPERATURA AMBIENTE PODEM SER DEFORMADOS A FRIO. PEÇAS COM CANTOS VIVOS, REBAIXOS INTERNOS, FUROS COM DIÂMETROS PEQUENOS E PROFUNDOS E MASSAS ASSIMÉTRICAS NÃO SÃO ADEQUADAS PARA A PRODUÇÃO PELA DEFORMAÇÃO A FRIO

O forjamento a frio ocorre na temperatura ambiente, sendo um procedimento particularmente interessante devido ao fato de se permitir a fabricação de componentes com grande precisão dimensional, geometrias complexas e com acabamento próximo ao uso da peça (near-net-shape). A Figura 1 mostra alguns exemplos de componentes forjados a frio. São exemplos típicos para a indústria automobilística, que é a grande beneficiária de peças forjadas a frio.

FORJAMENTO A FRIO

Em materiais não ferrosos como o chumbo, zinco e cobre foram às primeiras aplicações do forjamento a frio. Inicialmente, em relação ao uso de aço, empregou-se quase que exclusivamente aço não ligado. O

efeito do encruamento provocando um aumento na resistência mecânica foi de extrema relevância. Atualmente, já são também deformados a frio aços que apresentam alta resistência mecânica. Todos os materiais que apresentam uma determinada ductilidade a temperatura ambiente podem ser deformados a frio.

Peças com cantos vivos, rebaixos internos, furos com diâmetros pequenos e profundos e massas assimétricas não são adequados para a produção pela deformação a frio. Comparado à usinagem e ao forjamento a quente, o forjamento a frio apresenta maior produtividade e economia de matéria-prima, o que torna esse processo altamente competitivo para a produção de peças em aço.

Como exemplo de alguns materiais comumente deformados a frio destacam-se:

- Aços não ligados: AISI 1010, 1015, 1020;
- Aços ligados: AISI 5115, 6120, 3115;
- Aços para tratamentos térmicos: não ligados: AISI 5140, 4130, 4140, 8620.
- Aços inoxidáveis:
 - perlíticos: AISI 410, 430, 431;
 - austeníticos: AISI 302, 304, 316, 321.
- Ligas de alumínio:
 - baixa liga: 1285, 1070, 1050, 1100;
 - sem encruamento: 3003, 5152, 5052;
 - com encruamento: 6063, 6053, 6066, 2017, 2024, 7075.

Economicamente, em comparação com processos concorrentes ao processo de deformação a frio, nada se pode afirmar a priori. Fundamentalmente, o processo a frio passa a ter vantagens econômicas, dependendo do volume de material e de quanto a peça forjada se aproxima em geometria da peça pronta. É muito importante, ainda, a utilização de um material de menor custo, devido ao encruamento, em substituição de um aço com maior porcentagem de liga. É possível, ainda, a eliminação de tratamentos térmicos após o forjamento.

Não deve ser desconsiderado que o elevado custo do equipamento, somado ao desenvolvimento necessário para definir os passos de trabalho, pode ter como consequência a necessidade de se produzir um número elevado de peças para tornar o processo economicamente competitivo. Em geral, o rendimento só pode ser determinado com base em cálculos comparativos ou com base em experimentos.

Os desenvolvimentos teóricos são extremamente importantes quando se deseja minimizar a quantidade de experimentos para se atingir o produto final. Principalmente no cálculo de custo para a comparação de dois processos, evitando-se a realização de experimentos, a utilização de teorias tem sido de grande importância para a simulação do processo em que se deseja prever o fluxo de material. As teorias mais empregadas são: Teoria dos Elementos Finitos e Teoria do Limite Superior. Em relação às características técnicas necessárias para qualquer cálculo é fundamental o conhecimento da curva de escoamento (Tensão de escoamento em função da deformação logarítmica).

Em relação a materiais empregados, além dos já citados acima, sabe-se pouco sobre novos materiais. Apenas aços ligados ao boro mereceram algum destaque nos últimos anos. Sobre os materiais é importante o conhecimento dos seguintes fatores:

- Tratamento térmico antes de forjar;
- Estrutura metalográfica;
- Tamanho de grão;
- Texturas – linhas de segregação;
- Velocidade de deformação;
- Comportamento da curva de escoamento;
- Ductilidade.

Em relação à Curva de Escoamento é importante observar que o trabalho de conformação dá origem a um aumento de temperatura. As curvas de escoamento em função da temperatura são parâmetros técnicos de fundamental importância na definição das etapas de processo. Em relação aos processos de fabricação como usinagem,

solda, conformação a quente, etc., a conformação a frio apresenta as seguintes vantagens e desvantagens.

Vantagens

- Menor quantidade de matéria-prima requerida (a peça pode ser obtida em sua forma final sem nenhuma perda de material ou com pequena quantidade de sobremetal para usinagem ou ainda necessitando apenas operações de furação ou rebarbagem);
- Redução ou eliminação de operações subsequentes (mesmos motivos anteriores);
- Melhoria das propriedades mecânicas da peça devido ao trabalho de conformação realizado no material (em geral aumenta o limite de ruptura, o limite de escoamento e a dureza, além de se obter uma estrutura granular orientada na direção do trabalho mecânico aplicado);
- Possibilidade de utilização de matéria-prima mais barata (pelos motivos do item anterior);
- Obtenção de formas especiais (é possível obter peças que não seriam produzidas economicamente por nenhum outro processo);
- Alta produtividade;
- Precisão dimensional (tolerâncias reduzidas podem ser obtidas com grande repetibilidade destas, de peça a peça e de lote a lote, reduzindo os custos de inspeção de cada lote);
- Bom acabamento superficial (geralmente obtém-se rugosidade superficial comparável ao retificado);
- A proteção contra a corrosão é aumentada devido à operação de fosfatização.

Desvantagens

- Necessidade de prensas de maior capacidade;
- Pressões elevadas nas ferramentas, necessitando-se assim materiais especiais e em geral de alto custo;
- Necessidade de recozimentos intermediários para obter-se grandes deformações;

- Viável economicamente apenas para lotes grandes de peças;
- Tempos de preparação de máquina e ajuste do ferramental (set up) maiores.

ETAPAS DO PROCESSO

Geralmente, parte-se de um material de seção circular, o qual é cortado em blanques que passarão nas diversas combinações das operações de forjamento até a forma desejada. As etapas são definidas por leis e critérios bastante conhecidos, que limitam o comportamento da peça-trabalho: limite de redução de área, limite de recalque livre ou confinado, conformabilidade do metal, etc.

Corte

O corte dos blanques pode ser feito em operação independente através de corte por cisalhamento em prensas verticais ou horizontais ou dentro de uma operação integrada em prensas de múltiplo estágio. O corte ideal seria por serra circular ou fila horizontal, porém é muito mais caro (tempo de corte, perda de matéria-prima), mas, dependendo da precisão desejada e do tamanho do blanque, este procedimento é inevitável.

O corte por cisalhamento (Figura 2) obtido em operação independente tem a desvantagem de maior número de set up e maior movimentação de material em processo, porém tem a vantagem de poder-se efetuar as operações de tratamento térmico e superficial em separado, que por sua vez trazem vantagens de se poder cortar um material duro (desejável para corte por cisalhamento) e conformar um material de maior plasticidade (após recozimento), e ainda de se obter toda a superfície do blanque recoberta com lubrificante, ou seja, inclusive as faces onde foram feitos os cortes. Observa-se que o corte da geratriz é uma operação fundamental do processo de forjamento a frio. De um modo geral, o preparo da geratriz tem uma influência nos custos de produção e nas dificuldades decorrentes da automação do processo (Figura 3).

Tratamento térmico

Para se obter uma melhor conformabilidade, o material deve estar esferoidizado, sendo esta uma das etapas vitais do processo.

Normalmente, faz-se um recozimento em fornos contínuos com atmosfera neutra e velocidade controlada ou em fornos a vácuo no caso de blanques e em fornos campana a vácuo para bobinas. Esta é uma etapa significativa nos custos, principalmente quando o forjado necessita usinagem posterior como uma operação de fresamento, por exemplo, na qual é necessário regenerar a estrutura para a condição de normalizado.

Decapagem mecânica

A geratriz ou blanque recozido deve passar por uma limpeza com jato de granalha de aço com a finalidade não só de remover a oxidação superficial como também de aumentar a área da superfície e ao mesmo tempo diminuir a área de contato inicial no forjamento. Isso permite, assim como a operação de fosfatização, uma melhor absorção de lubrificante e obviamente uma melhor condição de atrito.

Esta etapa em conformação a frio já é tradicionalmente conhecida como fosfatização/ensaboamento, uma vez que a fosfatização sempre precede a aplicação do lubrificante, que por sua vez é um sabão alcalino. Esta é também uma etapa muito importante no processo, pois altas taxas de pressão específica são verificadas na interface metal/matriz e uma boa lubrificação reduz as forças de atrito existentes nesta região, o que obviamente reduz a força necessária de forjamento, além de aumentar a vida útil da ferramenta e de levar à obtenção de peças mais perfeitas, quer quanto ao seu aspecto, quer dimensionalmente. Dependendo do estado em que o blanque ou geratriz chega para a lubrificação, ele passa pelas seguintes operações:

1. Desengraxamento;
2. Lavagem;
3. Decapagem;
4. Lavagem;
5. Fosfatização;
6. Lavagem;
7. Neutralização;
8. Aplicação do sabão;

9. Secagem.

Descrição Sumária das Operações:

- Desengraxamento: realizado quando as peças vêm para o banho contaminadas com óleo ou graxa ou quando vão para novo tratamento térmico. Desnecessário quando as peças vêm de jateamento de granalha ou de recozimento;
- Lavagem: usada para retirar resíduos da operação anterior, inclusive a solução desengraxante. Feita em água com renovação constante;
- Decapagem: química, neste caso, tendo um papel triplo: eliminar os óxidos superficiais (provenientes de tratamento térmico, ferrugem, etc.); aumentar o microrrelevo das superfícies por multiplicar os pontos de germinação de cristais de fosfatos; deixar o material quimicamente ativo. É feita mediante imersão das peças numa solução aquosa a 10-15% de ácido sulfúrico a uma temperatura de 65-70°C, que contém fracamente um inibidor de ataque do aço;
- Lavagem: esta é necessária porque antecede a fosfatização, que é sensível ao carregamento de soluções dos banhos anteriores. Realizada com água com renovação constante;
- Fosfatização: é a operação mais delicada do processo. Realizada a quente, normalmente com tempo de imersão de 5 a 10 minutos;
- Tem como finalidade formar sobre a superfície do aço uma camada de fosfato de zinco que forma um reticulado cristalino de alta aderência, capaz de reter o lubrificante nas operações de forjamento a frio;
- Lavagem: efetuada como nas etapas anteriores;
- Neutralização: realizada, como o nome diz, para neutralizar os resíduos ácidos da operação de fosfatização;
- Aplicação do sabão: mergulha-se as peças numa solução de sabões alcalinos entre 60 e 80°C e a camada lubrificante de sabão de zinco une-se firmemente à camada de fosfato de zinco e, com isso, à superfície do metal;
- Secagem: efetuada em estufa ou ar para evitar a evaporação da água durante o forjamento, devido ao aquecimento da peça, o que pode impedir o funcionamento do lubrificante.

Tratamento térmico após as operações de forjamento

Conforme citado anteriormente, a peça pode sofrer ainda um tratamento térmico após a última operação de forjamento visando a uma melhor usinabilidade, alívio de tensões ou ainda à obtenção de determinada propriedade mecânica ou de estrutura desejada para que a peça cumpra a função para a qual foi projetada de maneira satisfatória e segura.

RESISTÊNCIA À FADIGA

No forjamento ou na Extrusão a Frio obtém-se uma maior resistência à fadiga devido às tensões residuais de compressão existentes nas camadas superficiais do componente deformado. A densidade de material no contorno de grão também é minimizado (principalmente quando comparado com componentes usinados). O material existente entre o contorno de grão atua como microtrincas. Quanto menos material existe no contorno de grão, maior é a resistência à fadiga. As linhas de fluência e o comportamento de fases contínuas esclarecem o aumento da resistência à fadiga.

DEFEITOS EM PRODUTOS FORJADOS A FRIO

Os defeitos que surgem em produtos forjados a frio são causados basicamente por fatores como:

- Tratamento térmico incorreto e baixa qualidade superficial dos tarugos de partida;
- Deficiência da lubrificação na interface tarugo-ferramentas;
- Execução de etapas de extrusão ou recalque com graus de deformação excessivos e;
- Uso de ferramentas com geometrias inadequadas.

LIMITAÇÕES DO PROCESSO

Como em qualquer processo, as limitações do forjamento a frio de eixos de aço referem-se a aspectos econômicos e relativos à própria natureza do processo.

- A limitação de capacidade do equipamento de forjamento em termos de energia disponível e dimensões;

- Características de produtos forjados;
- As propriedades mecânicas do material empregado na fabricação das ferramentas, em termos de dureza e resistência à compressão.

Esses aspectos fazem com que um dado equipamento seja capaz de produzir forjados com dimensões e geometrias específicas, limitando seu uso para uma categoria de produtos.

As limitações impostas pelas ferramentas apresentam um caráter econômico relacionado com o seu custo e vida de trabalho.

O forjamento a frio apresenta-se como um processo economicamente competitivo em que a escolha adequada do material e dos processos para fabricação do ferramental influi decisivamente.

```
[our_team image="" title="Referências" subtitle="" email="" phone="" facebook="" twitter="" linkedin="" vcard="" blockquote="" style="vertical" link="" target="" animate=""][/our_team]
```

[1] SCHAEFFER, L. Forjamento Introdução ao Processo, 2ª edição, Editora Imprensa Livre, 2006

[2] TONINI, Planejamento do Procossos e de Ferramentas para o Forjamento a Frio, 1999

[3] VILLAS, Análise Numérica do Forjamento a Frio de um Componente Metálico não Axi-Simétrico e Ferramentas, 2011

[4] <http://in3.dem.ist.utl.pt/mscdesign/02ed/01tecmecc/file2.pdf>