

# SIMULAÇÃO FÍSICA DE ROTAS ALTERNATIVAS DO PROCESSO DE FORJAMENTO A FRIO DE COMPONENTES MECÂNICOS DE UNIÃO<sup>1</sup>

Marta Ribeiro dos Santos<sup>2</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>3</sup>

## Resumo

Foram realizadas análises qualitativas da deformação do material durante as operações de recalque de parafusos de cabeça sextavada de rosca métrica, através de simulações físicas com materiais modelo. Num primeiro momento, empregando-se Plasticinas de diferentes ductilidades, foi simulada a seqüência convencional de recalque dos parafusos (estabelecida e utilizadas em nível industrial) através da qual foram feitas observações em relação aos defeitos formados no processo de forjamento a frio. Num segundo momento, que é o objeto de estudo deste trabalho, foram simuladas rotas alternativas de formação da cabeça sextavadas dos parafusos. Estas rotas consistiram da omissão de uma ou mais etapas da seqüência convencional de recalque dos parafusos. Foram observados os defeitos formados, a severidade e intensidade com as quais ocorreram, além de se avaliar, de maneira indireta, a ductilidade das Plasticinas empregadas na simulação física.

**Palavras-chave:** Plasticina; Simulação física; Forjamento a frio

## PHYSICAL SIMULATION OF ALTERNATIVE INDUSTRIAL COLD HEADING PROCESS

### Abstract

Physical simulation of cold heading was performed using model materials. First, the industrial process was simulated using plasticines with different ductilities. The defects were analyzed and the load was measured. Afterwards, physical simulations were completed in order to formulate alternative routes for industrial cold heading. The new sequence of forging was established skipping one or more stages of the industrial process. The same previously analyzed plasticines were used. The results were compared to those associated with the complete industrial stages. The occurrence and the magnitude of the defects were also investigated, as well as the ductility of the plasticines.

**Key words:** Plasticine; Physical simulation; Cold heading.

---

<sup>1</sup> Trabalho submetido ao 61º Congresso Anual da ABM

<sup>2</sup> Doutorando do Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG

<sup>3</sup> Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de forjamento a frio empregado na fabricação de parafusos envolve, de maneira geral, as seguintes etapas [Mendonça]:

- Corte por cisalhamento;
- Posicionamento do material na ferramenta (conjuntos matriz-prensa-extratores de material)
- Forjamento a frio da cabeça;
- Laminação da rosca.

A simulação apresentada neste trabalho refere-se apenas à etapa de forjamento a frio das cabeças dos parafusos, particularmente, de parafusos de rosca métrica M9.

Para esta classe de parafusos, a seqüência industrial de fabricação pode ser vista na Figura 1.



**Figura 1.** Seqüência de passes de recalque para obtenção de parafuso sextavado de rosca métrica M9. D esquerda para a direita: etapa 1 (tarugo), etapa 2, etapa 3 e etapa 4 (corte).

Partindo-se de um tarugo, são realizadas duas etapas seguidas (2 e 3 na Figura 1) onde ocorre a deformação do material, visando atingir o formato mais adequado à formação do sextavado, última etapa do forjamento e que é feito através do corte de material.

Durante a realização das segunda e terceira etapas, e mesmo na etapa de corte, podem surgir defeitos nos produtos que condenam sua utilização posterior. Os defeitos mais comuns são as trincas e marcas de ferramentas.<sup>(1)</sup>

Os tipos mais comuns de trincas são as trincas  $\alpha$  que são trincas de tração, formadas na expansão livre do material e as trincas de atrito (trincas  $\varepsilon$ ), formadas por lubrificação ineficiente. As marcas de ferramenta ocorrem quando o material é comprimido contra a borda do punção, imprimindo uma marca.

Há fabricantes de fixadores mecânicos que adotam especificações de profundidade máxima de defeitos toleráveis por faixa de bitola da matéria prima inicial em função das diferentes aplicações a que destinam seus produtos. Em experiências anteriores, defeitos surgidos durante o processo de recalque puderam ser repetidos, e até ampliados, quando da realização da simulação física, com plasticina, da seqüência convencional de formação da cabeça sextavada dos parafusos de rosca métrica M9.<sup>(2)</sup>

Neste trabalho, procurou-se simular rotas alternativas de formação da cabeça sextavada do referido parafuso usando a mesma técnica de simulação e as mesmas plasticinas anteriormente utilizadas.<sup>(2)</sup> O objetivo foi avaliar os defeitos surgidos quando da formação do parafuso através de caminhos alternativos, comparando-os com aqueles resultantes da seqüência convencional, e verificando a possibilidade de se estabelecer um novo processo para a formação da cabeça sextavada do parafuso. As rotas alternativas propostas consistiram na omissão de uma ou mais etapas da seqüência convencional de recalque.

As várias etapas de formação das cabeças sextavadas dos parafusos, obtidas através das rotas alternativas, foram comparadas àquelas alcançadas através do processo convencional. Observaram-se os defeitos formados, a profundidade e quantidade com os quais ocorreram e o formato final da região. Finalmente, avaliou-se, indiretamente, a ductilidade das plasticinas empregadas na simulação.

## 2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 2.1 Materiais Modelo

Foram usados dois tipos de materiais modelo, sendo um à base de massa de modelar comercial e um à base de vaselina. A massa de modelar ACRILEX<sup>®</sup> foi empregada como material modelo sem nenhuma modificação de sua constituição, sendo chamada de ACRILEX<sup>®</sup>. O material modelo a base de vaselina foi chamado de PLASTICINA e consistiu de uma mistura em quantidades pré-fixadas de vaselina filtrada no estado líquido e gesso na proporção de 2,5:1 e chamada de PLASTICINA 2,5:1.

Os tarugos iniciais, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 1, foram fabricados por extrusão através de um dispositivo adaptado em uma máquina de ensaios mecânicos, marca Kratos.

**Tabela 1.** Dimensões do tarugo usado na simulação física da fabricação de parafusos de rosca métrica M9.

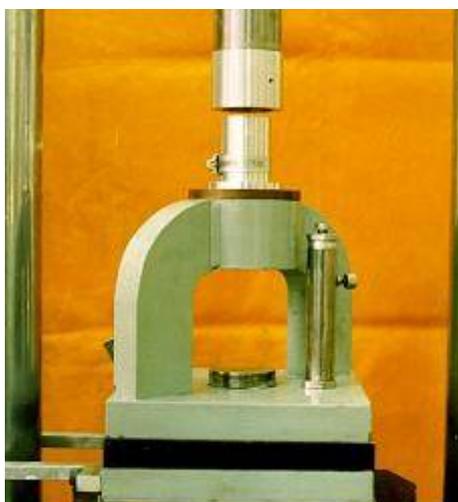
<b>Parafuso</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Comprimento (mm)</b>
M9	11,7	68,9

### 2.2 Punções de Recalque

Os punções de recalque foram confeccionados em resina polimérica que deveria ser transparente para permitir a visualização da evolução da deformação durante o processo de recalque. Porém, ao final da reação de polimerização, a resina ficou opaca impedindo a visualização do material em seu interior. Os punções utilizados para o forjamento, bem como o conjunto dos dispositivos usados no forjamento do parafuso de rosca métrica M9, podem ser vistos nas Figuras 2 e 3, respectivamente.



**Figura 2.** Punções em resina usados para simular a seqüência de passes para obtenção do parafuso sextavado de rosca métrica M9.



**Figura 3.** Conjunto dos dispositivos usados para a realização da simulação do recalque da cabeça de parafuso de rosca métrica M9 montados em uma máquina de ensaios mecânicos Kratos.

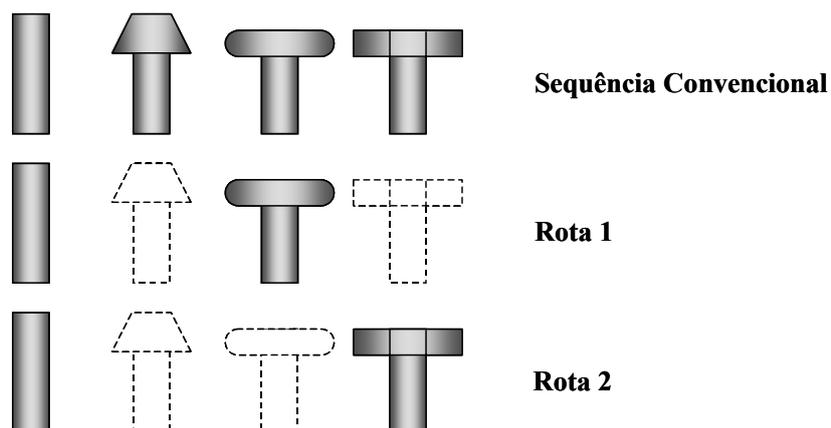
### 2.3 RECALQUES

Os recalques foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos marca Instron, modelo 4482. Os tarugos ficavam apoiados em uma matriz de alumínio bipartida deixando livre apenas a quantidade de material necessária ao forjamento. As matrizes de recalque eram acopladas a um dispositivo ligado ao cabeçote da máquina de ensaios mecânicos, que ao se movimentar em sentido descendente (compressão), aplicava o esforço necessário ao forjamento da cabeça do parafuso. O dispositivo que prendia as matrizes de recalque ao cabeçote da máquina também foi confeccionado em alumínio e permitia a troca dos punções de recalque relativos às várias etapas do processo de fabricação do parafuso. O conjunto dos dispositivos pode ser visto na Figura 3.

A velocidade de compressão do cabeçote da máquina foi de 10mm/min. Os materiais modelo, os punções e as matrizes foram lubrificados com talco. Para simular cada etapa da seqüência de fabricação partia-se de um tarugo e realizava-se o recalque até a etapa de interesse, parando naquela etapa para mostrar os resultados intermediários.

## 2.4 Rotas Alternativas Usadas no Recalque dos Parafusos

Neste trabalho, etapas de fabricação de parafusos sextavados foram reproduzidas alterando-se a seqüência convencional de fabricação, sendo que cada alteração foi estabelecida como uma rota diferente. A primeira alteração foi a omissão da segunda etapa procedendo-se o forjamento da terceira etapa diretamente a partir do tarugo. Esta alteração foi nomeada de Rota 1. A rota 2 foi a formação da cabeça sextavada dos parafusos, diretamente a partir do tarugo. O esquema das etapas do processo convencional e daqueles alternativos pode ser visto na Figura 4.



**Figura 4.** Desenho esquemático das operações de forjamento da cabeça sextavada do parafuso de rosca métrica M9: seqüência convencional, Rotas 1 e Rota 2.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira fase do trabalho foi realizada a simulação física da seqüência convencional de fabricação de parafusos de rosca métrica M9 com os materiais modelo ACRILEX® e PLASTICINA 2,5:1. Os resultados desta simulação estão reunidos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados da simulação física da seqüência convencional de fabricação de parafuso de rosca métrica M9.

<b>Etapa</b>	<b>Material Modelo</b>	<b>Defeitos</b>	<b>Localização</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Profundidade</b>
<b>2<sup>a</sup></b>	ACRILEX®	Marcas do punção	-	-	-
	PLASTICINA 2,5:1	Trincas $\alpha$ Marcas do punção	Base da parte recalçada	pequena	superficiais
<b>3<sup>a</sup></b>	ACRILEX®	Trincas $\alpha$ Marcas do punção	Base e topo da parte recalçada	pequena	superficiais
	PLASTICINA 2,5:1	Trincas $\alpha$	Do topo até a base da parte recalçada	pequena	profundas
<b>4<sup>a</sup></b>	ACRILEX®	-	-	-	-
	PLASTICINA 2,5:1	Trincas $\epsilon$	Faces do sextavado	moderada	superficiais

Os resultados do forjamento, obtidos para o parafuso M9 e para cada rota, podem ser vistos nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3.** Resultados da simulação física da Rota 1 para a fabricação de parafuso de roca métrica M9.

<b>Etapa</b>	<b>Material Modelo</b>	<b>Defeitos</b>	<b>Localização</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Profundidade</b>
<b>3<sup>a</sup></b>	ACRILEX <sup>®</sup>	Trincas $\alpha$ descentralizadas	Do topo até a base da parte recalçada	grande	moderada
	2,5:1	Trincas $\alpha$ descentralizadas	Do topo até a base da parte recalçada	grande	moderada

**Tabela 4.** Resultados da simulação física da Rota 2 para a fabricação de parafuso de rosca métrica M9.

<b>Etapa</b>	<b>Material Modelo</b>	<b>Defeitos</b>	<b>Localização</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Profundidade</b>
<b>4<sup>a</sup></b>	ACRILEX <sup>®</sup>	-	-	-	-
	2,5:1	Trincas $\alpha$ descentralizadas	Quinas do sextavado	grande	profundas

Comparando-se os resultados obtidos com o forjamento das preformas da 3<sup>a</sup> etapa, pode-se notar que, tanto na seqüência convencional quanto na Rota 1, o material foi deformado até o surgimento de fratura dúctil (trincas  $\alpha$ ) na superfície das cabeças recalçadas. No entanto, a severidade dos defeitos formados esteve diretamente ligada ao nível de deformação em cada operação. Na seqüência convencional, a existência de uma etapa de conformação entre o tarugo inicial e 3<sup>a</sup> etapa conferiu ao material a obtenção de uma forma intermediária que necessitaria de menor deformação para alcançar a terceira etapa. Na Rota 1, a obtenção da preforma da terceira etapa, a partir do tarugo, foi obtida após uma grande deformação do material. O alto grau de deformação conduziu à severidade e o número de trincas  $\alpha$  surgidos na preforma proveniente da 3<sup>a</sup> etapa. As preformas da terceira etapa do forjamento do parafuso de rosca métrica M9 formadas pela simulação física com a PLASTICINA 2,5:1 através da Seqüência Convencional e da Rota 1 podem ser observadas na Figura 5, nas quais se pode comparar os defeitos formados nas preformas em função da seqüência de deformação empregada.



(a)



(b)

**Figura 5.** Simulação física, com PLASTICINA 2,5:1, do recalque da terceira etapa da seqüência de fabricação do parafuso sextavado de rosca métrica M9. na esquerda, (a) a pré-forma fabricada via Seqüência Convencional e na direita, (b) via Rota 1.

Também foi observada, no forjamento da terceira etapa através da Rota 1, a descentralização ocorrida entre a cabeça e o corpo das preformas forjadas para ambos os materiais modelo estudados. Esta descentralização pareceu estar relacionada ao maior volume do punção de forjamento da terceira etapa que também apresentava um diâmetro maior. A diferença entre os diâmetros do punção e do tarugo provocou a flambagem do tarugo no início do recalque, causando o desalinhamento entre a cabeça e o eixo do parafuso. Este defeito não foi constatado na preforma da terceira etapa proveniente da Seqüência Convencional.

Na simulação da 4ª etapa, a formação da cabeça sextavada, tanto pela Seqüência Convencional quanto pela Rota 2 houve grande diferença nos resultados devido ao material modelo empregado. Nas simulações utilizando a massa de modelar ACRILEX® não foram observados defeitos na cabeça sextavada, mesmo quando a deformação do material era mais acentuada, como é o caso da conformação através da Rota 2.

Apesar da presença de trincas nas etapas anteriores à de corte, a formação do sextavado com a massa de modelar ACRILEX®, através da Seqüência Convencional eliminou os defeitos formados nas etapas anteriores pelo fato de serem mais superficiais. O parafuso sextavado forjado com o material modelo ACRILEX®, tanto pela Seqüência Convencional quanto pela Rota 1, pode ser visto na Figura 6.



(a)



(b)

**Figura 6.** Formação do sextavado do parafuso de rosca métrica M9. À esquerda (a) é apresentado o sextavado formado através da Rota 2 e à direita (b), via Seqüência Convencional. Material modelo: ACRILEX®.

A PLASTICINA 2,5:1 não apresentou ductilidade adequada para a simulação das etapas de recalque do parafuso de rosca métrica M9, haja visto que foram abertas trincas em todas as etapas de operação nas quais foi empregada.

Observando-se os dados das Tabelas 2, verifica-se que o sextavado formado através da Seqüência Convencional com a PLASTICINA 2,5:1, apresentou trincas do tipo  $\epsilon$  características do atrito ocorrido entre o punção e o material modelo utilizado na simulação física. Estas trincas surgiram devido ao arraste do lubrificante, deixando o material em contato direto com punção de forjamento. Já no caso da conformação seguindo a Rota 2, as trincas do tipo  $\alpha$

foram os principais defeitos surgidos nas cabeças sextavadas, devido à expansão livre do material, e ficaram localizadas em sua quinas.

As quinas, por sua vez, ficaram mais abauladas em relação àquelas formadas no sextavado proveniente da Seqüência Convencional, indicando que os cantos vivos do punção da 4ª etapa não foram completamente preenchidos na operação. A falta de preenchimento total do punção também ocorreu no forjamento da cabeça sextavada com o material modelo ACRILEX®.

A ductilidade dos materiais modelo empregados na simulação física do recalque do parafuso foi avaliada, de maneira indireta, pela severidade dos defeitos formados, principalmente, nas preformas da 4ª etapa. Pode-se observar nas Tabelas 2 e 4 que não houve abertura de trincas quando o sextavado foi formado através da Rota 2, com o material modelo ACRILEX®. Já a PLASTICINA 2,5:1 apresentou grande quantidade de defeitos quando deformada na operação da Rota 2, o que indica que sua ductilidade é inferior à do material modelo ACRILEX®.

Em relação ao recalque do parafuso de aço mostrado na Figura 1, verifica-se que não são formados os defeitos observados na simulação física da Seqüência Convencional com os materiais modelo usados no trabalho. No entanto, os resultados obtidos com a simulação sugerem que a localização das fraturas está de acordo com o que ocorre no forjamento do parafuso de aço, quando há formação de defeitos (Figura 7) no processo de forjamento.



**Figura 7.** Exemplo de defeito formado no recalque da cabeça de parafusos.

Já no caso da simulação de processos alternativos de fabricação de parafusos, os resultados obtidos podem ser usados, de maneira qualitativa, para prever os tipos de defeitos que poderiam vir a surgir durante a conformação. Além do mais, para que os resultados da simulação física pudessem ser estendidos à prática industrial, a modelagem do processo de deformação requereria estudos mais profundos e melhor compreensão das propriedades, condições de atrito e comportamento do material a ser simulado além da correta aplicação da teoria da similaridade dos modelos empregados na simulação física.<sup>(3)</sup>

#### **4 CONCLUSÕES**

- A PLASTICINA 2,5:1 e a massa de modelar ACRILEX® parecem não se adequar à simulação do processo de forjamento da cabeça do parafuso de rosca métrica M9 por meio da Rota 1 devido ao grande número de defeitos formados, o que não se verifica no caso do aço.
- A simulação da Rota 2 pareceu mais promissora para a obtenção da cabeça sextavada do parafuso de rosca métrica M9 (apesar do maior nível

de deformação imposto), desde que simulada com o material de ductilidade adequada.

- Um estudo comparativo da simulação física destes processos alternativos de recalque da cabeça do parafuso de rosca métrica M9, com materiais modelo metálicos e as plasticinas empregadas neste trabalho, poderia validar a viabilidade do uso das rotas alternativas de fabricação do parafuso estudado.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa concedida à aluna de mestrado e pelo apoio financeiro.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 MENDONÇA, A.A, **Desenvolvimento de Fio-Máquina de Aço Ultra Baixo Carbono para Estampagem a Frio**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1995. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 2 SANTOS, M.R., **Simulação Física do Forjamento a Frio de Componentes**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1999. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 3 WONG, S.F., HODGSON, P.D., CHONG, C.J., THOMSON, P.F., **Physical Modelling with Application to Metal Working Especially to Hot Rolling**. Journal of Materials Processing Technology, v. 62, pp. 260-274, 1996.