



Fase de Forjamento: Soldagem por Atrito Rotacional

Tchernov DP

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Resumo. A fase de forjamento no processo de soldagem por atrito rotacional é estudado em termos de cálculos analíticos e por meio de métodos numéricos matemáticos utilizando-se o método dos elementos finitos para comprovação dos efeitos esperados nesta fase do processo. Uma junta de Aço Inox 304 foi modelada por meio do Autodesk® Inventor® 2016, composta por dois corpos cilíndricos com diâmetro de 19,05 mm por 63,5 mm de comprimento. A simulação numérica foi realizada por meio do Autodesk Simulation®, a força de forjamento calculada analiticamente foi aplicada, assim como todas as outras restrições inerentes ao processo de soldagem foram inseridas. Houve deformação permanente e escoamento do material assim como ocorre na prática, uma vez que se trata de um processo termomecânico.

Palavras-chave. *Soldagem no Estado Sólido, Soldagem por Atrito Rotativa, Fase de Forjamento, Análise por Elementos Finitos.*

Introdução. No decorrer do tempo, a concepção e desenvolvimento de projetos de produtos vem ganhando maior complexidade, justificada por novas aplicações de caráter tecnológico mais avançado. Para acompanhar tal movimento, processos tradicionais de transformação de materiais metálicos sofreram melhorias, ou novas tecnologias foram criadas para suprir demandas emergentes.

A união entre dois materiais (particularmente os metais) podem ser classificadas entre: a) uniões fixas ou permanentes e b) uniões desmontáveis ou não permanentes, sendo que esta última é discriminada majoritariamente por elementos de máquinas. Tratando-se de uniões fixas ou permanentes, podemos citar os processos de soldagem, que é o objeto de estudo em questão. Segundo definição da AWS (American Welding Society), os processos de soldagem são classificados em duas categorias principais: a) processos convencionais de soldagem por fusão e b) processos de soldagem no estado sólido, também conhecido por soldagem por fricção (FW – Friction Welding).

Para Li et al. (1), soldagem por fricção é definida por um processo de união no estado sólido em que o calor gerado pelo atrito dá-se entre o movimento relativo entre dois componentes, com a aplicação de uma força normal. Segundo Vairis et al. (2), existem basicamente três variações distintas dos processos de soldagem por fricção, a saber: a) Soldagem por Fricção Rotativa (Rotary Friction Welding - RFW) b) Soldagem por Fricção Linear (Linear Friction Welding -

LFW) e c) Soldagem por Fricção e Mistura (Friction Stir Welding - FSW). O processo mais comum entre os três processos referidos anteriormente é o de Soldagem por Fricção Rotativa (1). Seu esquema básico de funcionamento é demonstrado na Figura 1:

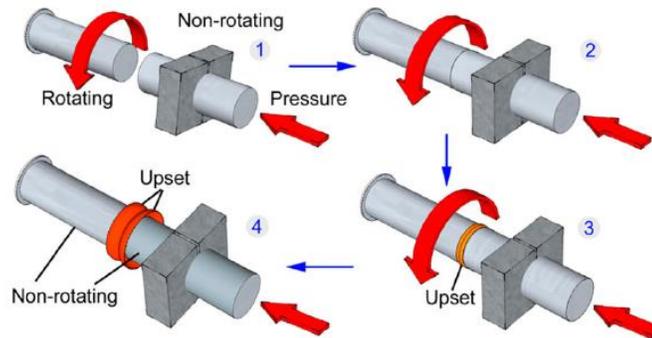


Figura 1. Fases de operação de soldagem por atrito de uma junta cilíndrica (1) inicialização do processo (2) fase de fricção (3) fase de parada (4) fase de forjamento

Além do mais, existem duas variações possíveis em termos de configuração de máquina conforme demonstrado nas figuras a seguir. O processo convencional e o processo inercial Fig.2, que possuem apenas um componente que os diferencia, sendo este, um volante de Inércia (1).

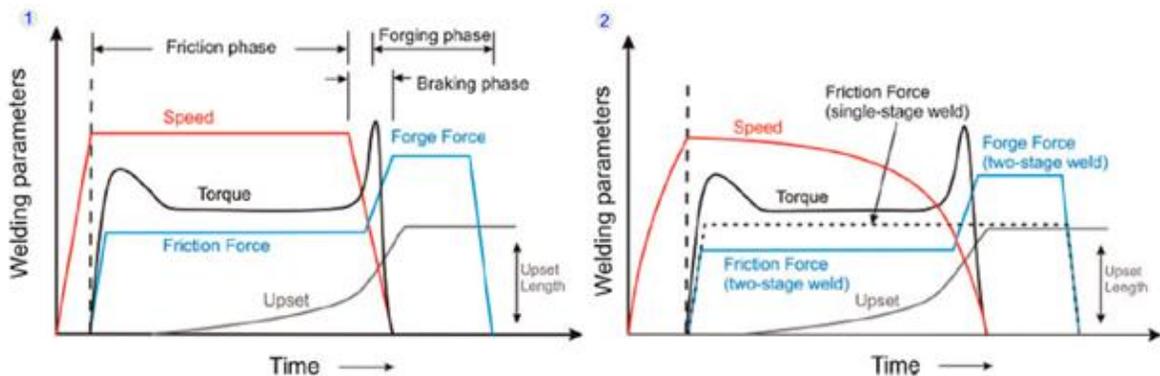


Figura 2. (1) Processo Convencional (2) Processo Inercial

Os principais parâmetros a serem controlados são:

- Rotação/Torque da peça a ser soldada
- Pressão de contato
- Tempo de fricção
- Força/Tempo de Forjamento

A força de forjamento é uma das principais variáveis da máquina. A seguir, são demonstrados por meio de cálculos matemáticos a obtenção do módulo desta grandeza para o Aço Inox 304:

$\mu d = 0,12$	$\rho = 8000 \text{ Kg}/\text{m}^3$	$T_F = 1100 \text{ }^\circ\text{C} = 1373 \text{ K}$
$K = 16,2 \text{ W}/\text{mK}$	$c = 500 \text{ J}/\text{Kg.K}$	$\sigma_e = 215 \times 10^6 \text{ Pa}$ $\sigma_t = 505 \times 10^6 \text{ Pa}$

Tabela 1. Propriedades do Aço Inox 304

$$(1) \quad A_p = \pi \cdot \frac{De^2}{4} = \pi \cdot \frac{(20 \times 10^{-3})^2}{4} = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$(2) \quad A_i = \pi \cdot \frac{Di^2}{4} = \pi \cdot \frac{(0)^2}{4} = 0 \text{ m}^2$$

$$(3) \quad t = \frac{De - Di}{2} = \frac{20 \times 10^{-3} - 0}{2} = 10 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$(4) \quad he_{\min} = t + \frac{De}{10} = 10 \times 10^{-3} + \frac{20 \times 10^{-3}}{10} = 12 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$(5) \quad Ve = A_p \cdot he = 3,14 \times 10^{-4} \cdot 12 \times 10^{-3} = 3,76 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$(7) \quad Vf = he \cdot (A_p - A_i) = 12 \times 10^{-3} \cdot (3,14 \times 10^{-4} \cdot 0) = 3,76 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$(8) \quad me = Ve \cdot \rho = 3,76 \times 10^{-6} \cdot 8000 = 3,01 \times 10^{-2} \text{ Kg}$$

$$(9) \quad mf = Vf \cdot \rho = 3,76 \times 10^{-6} \cdot 8000 = 3,01 \times 10^{-2} \text{ Kg}$$

$$(10) \quad S = \frac{mf}{me} = \frac{3,01 \times 10^{-2}}{3,01 \times 10^{-2}} \Rightarrow S = 1$$

Classe	Valores de esbeltez
S1	$0,63 < S \leq 1,0$
S2	$0,32 < S \leq 0,63$
S3	$0,16 < S \leq 0,32$
S4	$0 < S \leq 0,16$

Tabela 2. Tabela dos valores de Esbeltez

Ap (m ²)	s (m)	b/s
$\leq 18 \times 10^{-4}$	$0,6 \times 10^{-3}$	8

Tabela 3. A/3 - Valores de referência para a execução do colar

$$(11) \quad \frac{b}{s} = 8 \Rightarrow \frac{b}{0,6 \times 10^{-3}} = 8 \Rightarrow b = 4,8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$(12) \quad Vol_{COL} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(De + 2 \cdot b)^2 - De^2 \right] s$$

$$Vol_{COL} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(20 \times 10^{-3} + 2 \cdot 4,8 \times 10^{-3})^2 - (20 \times 10^{-3})^2 \right] \cdot 0,6 \times 10^{-3}$$

$$Vol_{COL} = 2,24 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Resistência Ideal Elástica	Resistencia Ideal Dinâmica
$500 < \sigma_t < 600 \text{ (MPa)}$ $(13) \quad K_{js} = 0,487 \times 10^{13} \cdot T_F^{-4}$ $K_{js} = 0,487 \times 10^{13} \cdot 1100^{-4} = 3,3263$ $K_{js} = 3,3263$	Máquina de Ensaio $(14) \quad K_{jd} = K_{js}$ $K_{jd} = 3,3263$

Tabela 4. Valores de referência para cálculo da força na operação de forjamento

b/s	Fator a	Fator b
6,3	4,15	1,120
8	5,695	1,042
8,5	6,15	1,020

→ interpolado

Tabela 5. Resistência Real a Conformação

$$(15) \quad K_R = a \cdot K_{fd} = 5,695 \cdot 3,3263 \Rightarrow K_R = 199 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$(16) \quad A_R = \frac{(De + 2 \cdot b)^2 \cdot \pi}{4} = \frac{(20 \times 10^{-4} + 2 \cdot 4,8)^2 \cdot \pi}{4} \Rightarrow A_R = 6,88 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$(17) \quad F_{\beta} = A_R \cdot K_R = 6,88 \times 10^{-4} \cdot 199 \times 10^6 \Rightarrow F_{\beta} = 137234 \text{ N}$$

Tendo em vista o cenário apresentado acima, faz-se necessário avaliar o comportamento da junta soldada na fase de forjamento em termos de deformação e a respectiva pressão de contato. Para tanto foi realizada a análise pelo método dos elementos finitos, sendo o pré-processador o Autodesk® Inventor® 2016 e o pós-processador Autodesk Simulation®. Uma montagem foi realizada utilizando-se dois corpos cilíndricos com diâmetro de 19,05 mm por 63,5 mm de comprimento. A precisão dos elementos de malha foi de 0,001 mm. A força de 137.234 N encontrada na equação 17 foi aplicada nas faces de contato de modo a representar a força de forjamento.

Tamanho médio dos elementos (fração do diâmetro do modelo)	0,1
Tamanho mínimo dos elementos (fração do tamanho médio)	0,2
Fator de nivelamento	1,5
Ângulo máximo de giro	60 graus
Criar elementos de malha curva	Sim
Usar medida baseada em peça para a malha da montagem	Sim

Tabela 6. Configurações de malha

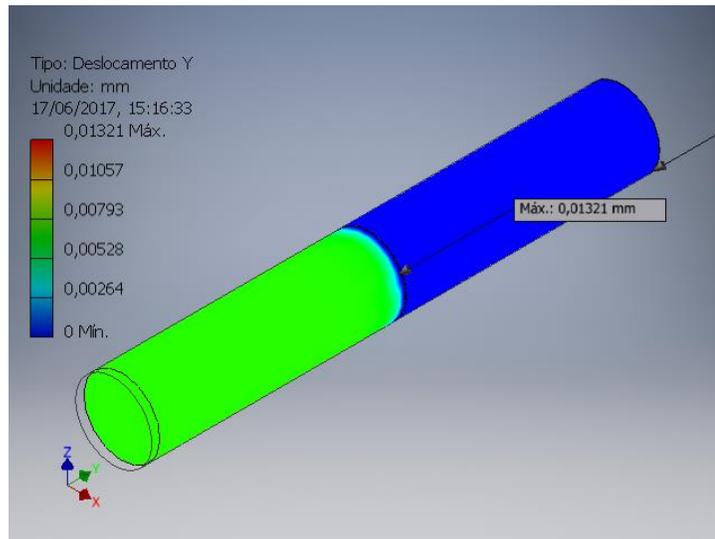


Figura 3. Deslocamento no eixo Y (mm)

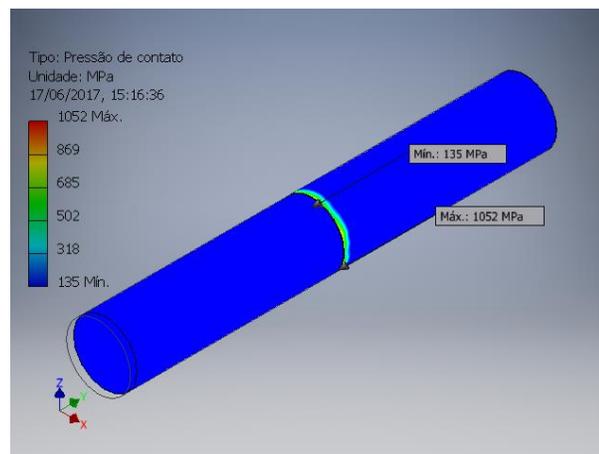


Figura 4. Pressão de Contato (MPa)

Conclusão. Analisando os resultados obtidos extraímos algumas conclusões. A força obtida por meio da teoria clássica de forjamento que foi aplicada na simulação nos revela dois pontos importantes, o primeiro é de que haverá deformação permanente, como nos revela a Figura 3, com amplitude máxima de 0,01321 mm, o que já era esperado por conta da natureza do processo. O segundo aspecto refere-se a pressão de contato com amplitude mínima de 135 MPa e amplitude máxima de 1052 MPa, este último ultrapassando o limite de resistência a tração referenciado na Tabela 1, ou seja, promovendo o escoamento do material, o que na prática também ocorre com a junta quando da formação de rebarbas dado o fluxo de escoamento de material.



Referências.

- (1) LI, W. Y. et al. Linear and rotary friction welding review. International Materials Reviews, v. 61, n. 2, p. 71-100, 2016.
- (2) VAIRIS, A.; PAPAZAFEIROPOULOS, G.; TSAINIS, A. M. A comparison between friction stir welding, linear friction welding and rotary friction welding. Advances in Manufacturing, v. 4, n. 4, p. 296-304, Dec 2016.