

## A teoria elementar da plasticidade aplicada ao forjamento a frio de um parafuso M6, Din 933

*Dividido em duas edições, neste estudo os autores avaliam o uso da TEP como alternativa de baixo custo, frente ao uso de softwares de simulação*

### Resumo

Nos processos de conformação mecânica é indispensável o conhecimento da força necessária para a obtenção do conformado, pois a partir daí que se torna possível definir o equipamento e o ferramental necessários ao projeto. O método dos elementos finitos (FEM) é comumente utilizado nesta etapa, assim como alguns modelos de cálculo bastante simplificados. Uma alternativa para a determinação da força de conformação é o cálculo baseado na teoria elementar da plasticidade (TEP), que alinha a boa precisão em pontos específicos do FEM com a praticidade do cálculo analítico. Os conceitos básicos sobre a TEP surgiram nos anos 1924 e 1925 como solução de problemas de laminação. Posteriormente essa teoria foi estendida aos processos de trefilação e forjamento. Este artigo avalia o uso da TEP como alternativa de baixo custo, frente ao uso de *softwares* de simulação. Como forma de análise foi adotado o forjamento a frio de parafuso M6 DIN 933, com definição da força axial no recalque do primeiro e segundo estágios pela TEP e FEM, obtendo variação de aproximadamente 3% entre os métodos, alcançando força máxima de 4,97 tons na conformação do primeiro estágio pela TEP e 26,91 tons para o segundo estágio pelo FEM.

### Introdução

A grande importância dos metais na indústria deve-se a facilidade com que esses podem ser trabalhados, nas mais variadas geometrias e propriedades mecânicas.

Processos de conformação mecânica alteram a geometria do material de partida por meio de equipamentos que aplicam cargas suficientemente elevadas, possibilitando a deformação plástica, conferindo-lhe a geometria desejada de acordo com o ferramental utilizado no processo. (SANTOS, 2020).

Componentes obtidos por meio de forjamento apresentam microestrutura homogênea e com fibramento em condições favoráveis às propriedades exigidas em certas



Genival Gonçalves Santos



Lírio Schaeffer

aplicações. (SCHAEFFER, 2006). Button (1999, p. 38), sugere que as limitações do forjamento a frio, assim como em outros processos de conformação, referem-se a aspectos econômicos e relativos ao próprio processo, como por exemplo a limitação da capacidade do equipamento em termos de força, energia e dimensões dos produtos forjados.

Os custos envolvidos no projeto de um forjado variam com o tempo em que esse avança, a fase inicial representa menores custos, por se tratar de etapas de planejamento e é nessa fase que ajustes de projeto representam baixo impacto no orçamento. Para o dimensionamento do equipamento e ferramental empregado no processo é fundamental o conhecimento de parâmetros relacionados à natureza da operação. A figura 1, a seguir, apresenta os principais parâmetros do processo de forjamento.

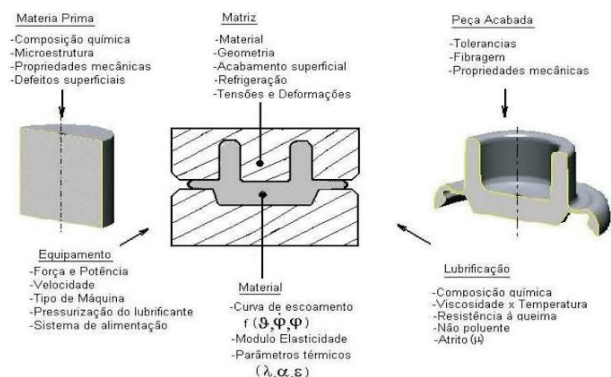


Figura 1 - Parâmetros do processo de forjamento - Schaeffer, 2006

O conhecimento da força necessária ao forjamento de um componente é um parâmetro fundamental no projeto do forjado, tanto na determinação da capacidade do equipamento quanto no dimensionamento correto das ferramentas. (MARQUES, 2013).

Existem diversos métodos para a determinação da força compressiva no processo de forjamento, como modelos de cálculos simplificados onde a peça a ser forjada é considerada como um todo, à medida que mais informações são necessárias como, por exemplo, o nível de tensões nas ferramentas, que se mostra indispensável o uso de métodos mais precisos, como o modelo de cálculo baseado na teoria elementar da plasticidade (TEP), ou modelos computacionais pelo método dos elementos finitos (FEM). (SCHAEFFER, 2020).

Este artigo tem por objetivo determinar a força de compressão necessária no forjamento de um parafuso M6, com o uso da TEP, como alternativa de baixo custo frente ao uso de *softwares* de simulação.

#### A teoria elementar da plasticidade

Os estudos baseados na plasticidade foram modelados em função da relação carregamento versus escoamento do material, os quais dependem de parâmetros como tensão de escoamento, deformação equivalente, propriedades mecânicas e metalúrgicas entre outras. (EDELMAN, F; DRUCKER, D. C. 1951 apud CORRÊA F.J. 2014).

As noções básicas sobre a teoria elementar da plasticidade (TEP), surgiram nos anos de 1924 e 1925, com Siebel e Karman, como solução para problemas de laminação, sendo estendida nos anos seguintes por Sachs para processos de trefilação e ao forjamento por Siebel e Pomp. (SCHAEFFER, 2004).

Corrêa e Schaeffer (2013, p. 43) orientam que para o desenvolvimento dessa teoria certos parâmetros devem ser considerados, as ferramentas de trabalho possuem simetria, as massas e as forças de inércia do ferramental podem ser desprezadas.

Schaeffer (2020, p. 5.5) mostra que com o uso da TEP pode-se analisar as tensões distribuídas no ferramental, quantificando-se os efeitos em pontos específicos de sua geometria, como raios e ângulos, por exemplo. De forma geral, a TEP consiste em dividir o conformado em elementos infinitesimais (discretização), e a partir do balanço de forças nesses elementos chega-se a uma equação diferencial ordinária (EDO) de primeira ordem.

A imagem a seguir mostra a decomposição de tensões aplicadas em um elemento infinitesimal de uma peça plana.

# DINAP FIXADORES



Indústria especializada em barras roscadas e parafusos

- Barras roscadas de 1 a 3 metros
- Linha de parafusos lenticilha autotravante e fenda reta
- Grampos U



DINAP  
INDÚSTRIA DE PARAFUSOS E BARRAS

11 4858.1657

11 9.1121.7377

iris@dinapparafusos.com.br  
www.dinapparafusos.com.br

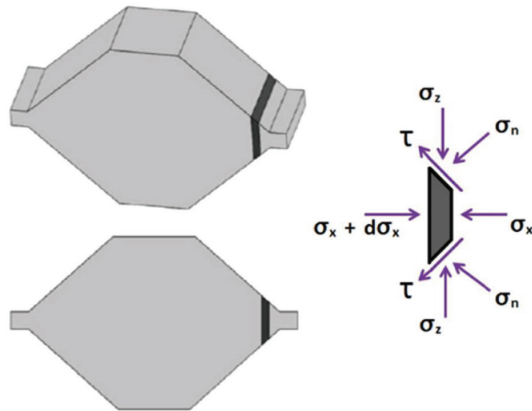


Figura 2 - Decomposição das tensões em uma tira elementar - Adaptado de Corrêa e Schaeffer (2013)

Dependendo da geometria final do conformado, os elementos de volume discretizados podem apresentar diversas formas, logo a TEP é dividida em três métodos, de acordo com a geometria e o fluxo do material, sendo o método das tiras, discos ou tubos. (SCHAEFFER, 2020).

A imagem a seguir mostra de forma simplificada a discretização de três geometrias diferentes, de acordo com o método adotado.

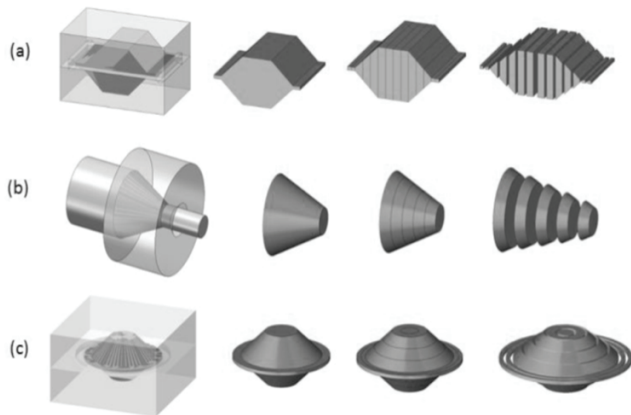


Figura 3 - Representação de elementos infinitesimais em um conformado - Adaptado de Marques et al. (2013)

Cada geometria da figura 3 exige um método diferente de aplicação da TEP, e cada método possui um modelo matemático específico que o representa.

A figura 3a, apresenta uma peça de simetria plana, como na laminação, onde é adotado o "método das tiras", representado pela equação 1.

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_x [tg(\alpha + \rho) - tg(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot kf \cdot tg(\alpha + \rho) = 0 \quad (1)$$

A figura 3b mostra um conformado de perfil axisimétrico, como um elemento extrudado ou trefilado, onde é comumente utilizado o "método dos discos", representado pela equação 2.

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{r} \cdot \sigma_x [tg(\alpha + \rho) - tg(\alpha)] - \frac{2}{r} \cdot kf \cdot tg(\alpha + \rho) = 0 \quad (2)$$

Já em 3c é mostrada uma peça forjada de simetria axial, onde é indicado o uso do "método dos tubos", representado pela equação 3.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_r [tg(\alpha + \rho) - tg(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot kf \cdot tg(\alpha + \rho) = 0 \quad (3)$$

De acordo com Marques et al. (2013, p. 3), alguns parâmetros devem ser conhecidos antes de resolver a EDO adotada para uma determinada geometria.

No caso de um conformado a frio, por exemplo, deve-se conhecer o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) empregado no processo e a curva de escoamento do material utilizado como geratriz. Corrêa (2014, p. 25) destaca ainda que para esse caso a tensão de escoamento ( $\kappa f$ ) em função da deformação verdadeira ( $\varphi$ ) é representada pela equação a seguir:

$$kf = c \cdot \varphi^n \quad (4)$$

Onde "c" e "n" são constantes dependentes do material empregado no processo.

A deformação verdadeira ( $\varphi$ ) necessária para a solução da equação 4 é definida como o logaritmo natural da altura da geratriz ( $h_0$ ) pela altura do elemento de análise ( $h_1$ ), como mostra a equação 5.

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (5)$$

A seguir será apresentado o procedimento matemático adotado no desenvolvimento de um dos métodos da TEP.

### Método dos tubos

Considerando como exemplo de estudo um tubo elementar ( $i$ ), atentando-se a uma análise de equilíbrio de forças na zona de deformação plástica de uma geometria simples, a equação 3 pode ser simplificada em duas parcelas e resolvidas de forma independente, conforme as equações 6 e 7. (SCHAEFFER, 2020).

$$f(r_i) = \frac{2}{h_i} [tg(\alpha + \rho) - tg(\alpha)] \quad (6)$$

$$g(r_i) = \frac{2}{h_i} \cdot kf_i \cdot tg(\alpha + \rho) \quad (7)$$

Onde as variáveis "  $\alpha$  " e "  $\rho$  " representam o ângulo da ferramenta e ângulo de atrito, respectivamente, em radianos. O ângulo de atrito pode ser definido conforme a equação 8.

$$\rho = \arctg(\mu) \quad (8)$$

Schaeffer (2020, p. 46) salienta que, considerando o encruamento do material, a equação 3 leva à complexas integrais, sugerindo assim a utilização de diferenças finitas, logo as equações 3, 6 e 7 se resumem na equação a seguir.

$$\frac{\Delta\sigma_{ri}}{\Delta r_i} + f(r_i) \cdot \sigma_{ri} - g(r_i) = 0 \quad (9)$$

Ainda segundo Schaeffer (2020, p. 46), a aplicação da TEP deve se iniciar na condição de contorno conhecida, e orienta que no forjamento de uma peça de perfil axissimétrico, a tensão radial atuante é máxima no centro e nula em sua periferia, portanto a solução da equação 9 inicia-se na periferia da peça, finalizando em seu eixo de simetria. Ainda na equação 9, é possível calcular a variação da tensão radial ( $\Delta\sigma_{ri}$ ) entre um elemento e o seu posterior.

Marques et al. (2013, p. 4), mostra que uma vez determinadas as tensões radiais localizadas de um tubo ao subsequente, obtém-se então a tensão radial naquele determinado tubo, como mostra a equação 10.

$$\Delta\sigma_{ri} = \sigma_{ri} - \sigma_{ri-1} \quad \leftrightarrow \quad \sigma_{ri} = \Delta\sigma_{ri} + \sigma_{ri-1} \quad (10)$$

Aplicando o critério de escoamento de Tresca (A teoria de Henri Tresca prediz o escoamento, quando a diferença entre a maior e a menor tensão atuante seja maior ou igual à resistência ao escoamento do material.), em um determinado tubo, conhecendo sua tensão radial (equação 10) e tensão de escoamento (equação 4), é possível determinar a tensão normal ( $\sigma_{zi}$ ) aplicada naquele tubo conforme a equação 11. (SCHAEFFER, 2020).

$$\sigma_{zi} = -kf_i + \sigma_{ri} \quad (11)$$

De acordo com Corrêa e Schaeffer (2013, p. 44), obtida a tensão normal em um determinado tubo, deve-se calcular a tensão normal média ( $\bar{\sigma}_{zi}$ ) entre este tubo e seu antecessor, conforme a equação a seguir.

$$\bar{\sigma}_{zi} = \frac{\sigma_{zi} + \sigma_{zi-1}}{2} \quad (12)$$

Conhecidas as tensões locais médias (equação 12), distribuídas axialmente na peça forjada e as áreas superficiais de contato (equação 13), é possível calcular as forças normais instantâneas em cada tubo (equação

14), e finalmente estimar a força axial requerida no forjamento da peça (equação 15).

$$\Delta A_i = \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (13)$$

$$F_{zi} = \bar{\sigma}_{zi} \times \Delta A_i \quad (14)$$

$$F_z = \sum_{i=0}^n F_{zi} \quad (15)$$

### Genival Gonçalves Santos

Engenheiro mecânico pelo Centro Univer. Una, Contagem, MG. Há 18 anos na indústria de fixadores, dos quais 16 são na Acument Brasil Sistemas de Fixação S.A, planta de Contagem, MG. Nessa empresa acumula 11 anos de atuação em ferramentaria, com fabricação e montagem de matrizes para fabricação de fixadores. [genivalgoncalves@hotmail.com](mailto:genivalgoncalves@hotmail.com)

### Lírio Schaeffer

Professor, doutor, engenheiro, responde pela coordenação do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), além de presidir o Senafor, seminário internacional de tecnologias de forjamento metálico. [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br)

**A segunda parte deste artigo será publicada em nossa próxima edição.**

**ZWEZ**  
Produtos químicos em metal



Antes



Depois

**FOSFATIZAR PARA FUNCIONAR!**

Entre em contato.

ZWEZ Química do Brasil LTDA

Blumenau - SC

Fone: 47 3041.0064 / 99620.2226 📞

[zwez@zwez.com.br](mailto:zwez@zwez.com.br)

[www.zwez.com.br](http://www.zwez.com.br)

## A teoria elementar da plasticidade aplicada ao forjamento a frio de um parafuso M6, Din 933 - Parte Final

*Completamos aqui a publicação do estudo que demonstra alternativa econômica ao uso de softwares de simulação*

### Metodologia

Neste artigo foi adotado o método dos tubos para cálculo dos esforços compressivos no forjamento a frio de um parafuso M6 DIN 933, por se tratar de um perfil axissimétrico.

Os valores de força axial encontrados por meio do cálculo analítico com o uso da TEP foram confrontados com os obtidos por meio de simulação pelo método dos elementos finitos (FEM).

O volume total do parafuso foi estimado em 845,79 mm<sup>3</sup>, antes do recorte do sextavado, o que demanda uma geratriz com comprimento de 39,22 mm, com seu diâmetro fixado em 5,24 mm.

O volume destinado à cabeça do parafuso requer o recalque do comprimento parcial de ~19,06 mm da geratriz, que sugere uma relação de recalque (L0/D0) de ~ 3,64, Schaeffer (2020, p. 9.7) orienta que para relações de recalque entre 2,3 até 4,5 o processo de conformação deve ser dividido em duas etapas com o objetivo de eliminar o problema da flambagem. Neste estudo foi definido, então, uma forma intermediária entre a geratriz e a fase final da conformação do parafuso, forjada por martelo móvel.

A imagem a seguir representa de forma simplificada as etapas de fabricação deste parafuso.

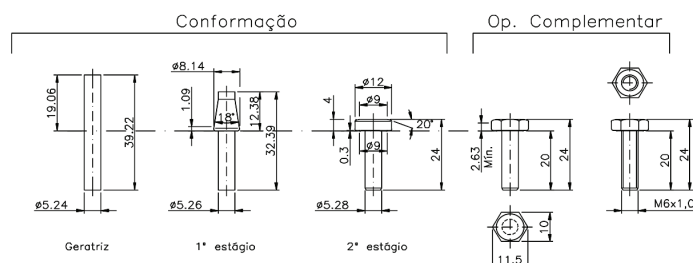


Figura 4 - Etapas de fabricação

A figura 5, mostra em detalhe o ferramental empregado no processo de conformação do parafuso, a imagem trata de um desenho sobreposto, onde à cada recalque, o lado esquerdo do eixo de simetria corresponde ao início do



Genival Gonçalves Santos



Lírio Schaeffer

forjamento, enquanto o lado direito mostra a geometria do parafuso no final da compressão.

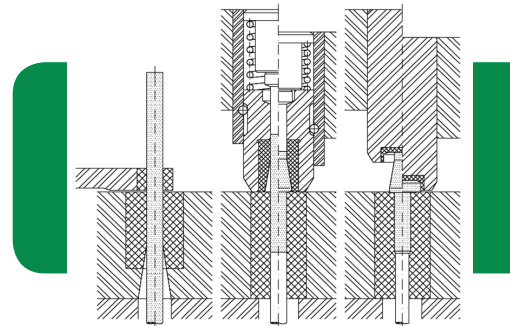


Figura 5 - Processo de conformação em dois estágios

Esta pesquisa limitou-se ao estudo da geratriz e dos estágios do primeiro e segundo recalque, por atender a "Lei de Constância de Volume" ( $V_0 = V_1 = V_2$ ), logo as operações complementares de recorte para formação do sextavado e laminação da rosca não foram considerados na definição da força de forjamento.

### Resultados e discussões

Para desenvolvimento do cálculo analítico com o uso da TEP, foi considerado nos estágios e na geratriz, apenas os comprimentos relativos à formação da cabeça do parafuso, já que as maiores deformações ocorrem nessa região. O material adotado para o parafuso é o

aço ck 10, conforme Heinzt (2005, p. 369), sua curva de escoamento é expressa por:

$$kf = 740. \varphi^{0,216} \quad [\text{MPa}]$$

$$kf_0 = 260 \quad [\text{MPa}]$$

Quanto ao ferramental, foi considerado metal duro na confecção das pastilhas dos martelos e núcleos de matrizes, fixando assim o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) em 0,08. O mesmo procedimento também foi adotado na simulação pelo FEM.

### Definição da força axial no forjamento do primeiro estágio.

#### • Método dos tubos - TEP

Nesta etapa, foi considerado o comprimento de 19,06 mm da geratriz para o primeiro recalque. A forma obtida nesta fase foi discretizada em 10 tubos concêntricos e equidistantes, como apresentado na imagem a seguir.

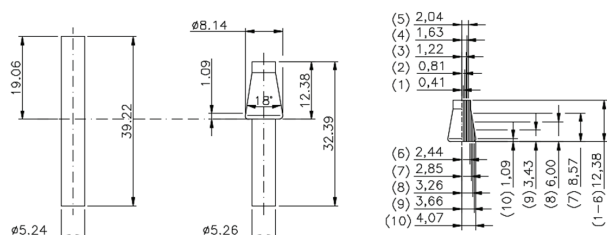


Figura 6 - Discretização do primeiro recalque

Em seguida foram aplicadas as equações 4 a 14, que representam de forma simplificada a equação 3, para o método dos tubos.

O quadro 1 apresenta os resultados dos cálculos desenvolvidos para cada tubo destacado na figura 6.

Tubo (i)	r (i)	$\Delta r$ (i)	$\rho$ (i)	$\alpha$ (i)	$\alpha$ (i)	h (i)	$\varphi$ (i)	kf (i)
[-]	[mm]	[mm]	[Rad]	[°]	[Rad]	[mm]	[-]	[MPa]
0	0,0	0,0	0,080	0,000	0,000	12,38	0,4315	617,148
1	0,407	0,407	0,080	0,000	0,000	12,38	0,4315	617,148
2	0,814	0,407	0,080	0,000	0,000	12,38	0,4315	617,148
3	1,221	0,407	0,080	0,000	0,000	12,38	0,4315	617,148
4	1,628	0,407	0,080	0,000	0,000	12,38	0,4315	617,148
5	2,035	0,407	0,080	0,000	0,000	12,38	0,4315	617,148
6	2,442	0,407	0,080	0,000	0,000	12,38	0,4315	617,148
7	2,849	0,407	0,080	9,000	0,157	8,57	0,7993	705,050
8	3,256	0,407	0,080	9,000	0,157	6,00	1,1558	763,514
9	3,663	0,407	0,080	9,000	0,157	3,43	1,7150	831,447
10	4,070	0,407	0,080	9,000	0,157	1,09	2,8614	928,652

Tubo (i)	g (i)	f (i)	$\sigma_r$ (i)	$\Delta \sigma_r$ (i)	$\sigma_z$ (i)	$\bar{\sigma}_z$ (i)	$\Delta A$ (i)	Fz (i)
[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]
0	7,976	0,013	-292,140	0,000	-909,289	0	0	0
1	7,976	0,013	-287,382	4,758	-904,531	-906,910	0,520	-0,472
2	7,976	0,013	-282,649	4,733	-899,798	-902,164	1,561	-1,408
3	7,976	0,013	-277,941	4,708	-895,089	-897,443	2,602	-2,335
4	7,976	0,013	-273,257	4,684	-890,406	-892,748	3,643	-3,252
5	7,976	0,013	-268,598	4,659	-885,747	-888,076	4,684	-4,159
6	7,976	0,013	-263,963	4,635	-881,112	-883,429	5,724	-5,057
7	39,727	0,019	-245,855	18,108	-950,905	-916,008	6,765	-6,197
8	61,449	0,028	-218,385	27,470	-981,899	-966,402	7,806	-7,544
9	117,054	0,048	-167,443	50,942	-998,890	-990,394	8,847	-8,762
10	411,408	0,152	0,000	167,443	-928,652	-963,771	9,888	-9,529
FORÇA TOTAL [kN]:								-48,716

Quadro 1 - Cálculos aplicados no primeiro recalque

METALÚRGICA **SAM**

(11) 4368-4646  
www.metalurgicasam.com.br  
sam@metalurgicasam.com.br

## ESPECIALIZADA EM PORCAS

**Atendemos revendas em todo Brasil**

**FABRICAÇÃO EM AÇOS LIGA, CARBONO, INOX, ALUMÍNIO E LATÃO**

Além de porcas, produzimos parafusos, arruelas, pinos, prisioneiros e buchas para os setores de telefonia, eletro-eletrônica, automobilística, implementos agrícolas, tratores, sucroalcooleiro, petrolífero e outros.

**ZWEZ**  
Produtos químicos em metal

Antes
Depois

## FOSFATIZAR PARA FUNCIONAR!

Entre em contato.

**ZWEZ Química do Brasil LTDA**  
Blumenau - SC  
Fone: 47 3041.0064 / 99620.2226  
zwez@zwez.com.br  
www.zwez.com.br

Após o desenvolvimento das equações em toda a extensão do primeiro recalque, aplicou-se a equação 15, obtendo a força compressiva no forjamento de 48,716 kN, que representa aproximadamente 4,966 toneladas-força.

• **Método dos elementos finitos - FEM**

Na simulação do primeiro recalque foram adotados os mesmos parâmetros utilizados nos cálculos pela teoria elementar da plasticidade.

A figura 7 mostra em detalhe as tensões equivalentes desenvolvidas nesta etapa do forjamento do parafuso.

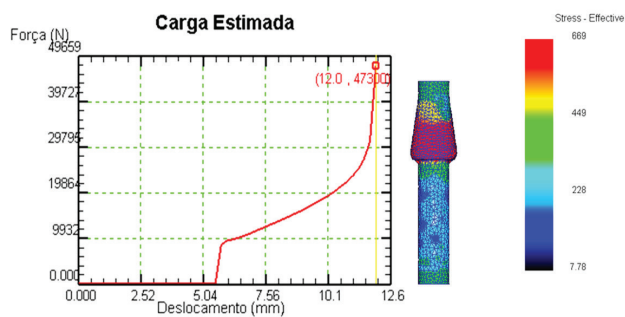


Figura 7 - Simulação do primeiro recalque

O gráfico em destaque nesta imagem, mostra a força de compressão em função do deslocamento do martelo, com carga estimada em 47,3 kN, que representa aproximadamente 4,82 toneladas-força. A simulação adotando somente o volume da cabeça do parafuso apresentou valor semelhante.

**Definição da força axial no forjamento do segundo estágio**

• **Método dos tubos - TEP**

Esta etapa foi desenvolvida de forma análoga ao forjamento do primeiro estágio, desta vez foi considerada como geratriz a geometria obtida após o primeiro recalque, desprezando-se o encruamento residual da primeira operação.

Para cálculo da deformação verdadeira ( $\phi$ ), assumiu-se as alturas parciais definidas para os dez tubos do primeiro recalque.

A geometria final da conformação da cabeça do parafuso, foi então discretizada em dez tubos concêntricos e equidistantes, como mostra a imagem a seguir.

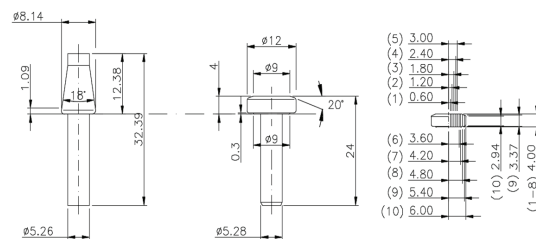


Figura 8 - Discretização do segundo recalque

Assim como no cálculo do primeiro estágio, nesta fase foram aplicadas as equações 4 a 14, em cada tubo da geometria, seus resultados são apresentados no quadro 2.

Tubo (i)	r (i)	$\Delta r$ (i)	$\rho$ (i)	$\alpha$ (i)	$\alpha$ (i)	h (i)	$\phi$ (i)	kf (i)
[-]	[mm]	[mm]	[Rad]	[°]	[Rad]	[mm]	[-]	[MPa]
0	0,0	0,0	0,080	0,000	0,000	4,00	1,1298	759,765
1	0,600	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	1,1298	759,765
2	1,200	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	1,1298	759,765
3	1,800	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	1,1298	759,765
4	2,400	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	1,1298	759,765
5	3,000	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	1,1298	759,765
6	3,600	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	1,1298	759,765
7	4,200	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	0,7620	697,800
8	4,800	0,600	0,080	0,000	0,000	4,00	0,4055	608,905
9	5,400	0,600	0,080	70,000	1,222	3,37	0,0176	309,396
10	6,000	0,600	0,080	70,000	1,222	2,94	0,9922	738,755

Tubo (i)	g (ri)	f (ri)	$\sigma$ (i)	$\Delta \sigma$ (i)	$\sigma_z$ (i)	$\bar{\sigma}_z$ (i)	$\Delta A$ (i)	Fz (i)
[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]
0	30,391	0,040	-2368,836	0,000	-3128,601	0	0	0
1	30,391	0,040	-2295,510	73,327	-3055,274	-3091,938	1,131	-3,497
2	30,391	0,040	-2223,902	71,608	-2983,666	-3019,470	3,393	-10,245
3	30,391	0,040	-2153,972	69,930	-2913,737	-2948,701	5,655	-16,675
4	30,391	0,040	-2085,681	68,291	-2845,446	-2879,591	7,917	-22,797
5	30,391	0,040	-2018,991	66,690	-2778,756	-2812,101	10,179	-28,624
6	30,391	0,040	-1953,864	65,127	-2713,629	-2746,192	12,441	-34,165
7	27,912	0,040	-1891,716	62,148	-2589,515	-2651,572	14,703	-38,985
8	24,356	0,040	-1833,107	58,608	-2442,013	-2515,764	16,965	-42,679
9	665,438	0,520	-1092,764	740,344	-1402,160	-1922,086	19,227	-36,955
10	1821,273	0,596	0,000	1092,764	-738,755	-1070,457	21,488	-23,003
FORÇA TOTAL [kN]:								-257,623

Quadro 2 - Cálculos aplicados no segundo recalque

Após o desenvolvimento das equações em toda a extensão do segundo recalque, aplicou-se a equação 15, obtendo a força compressiva no forjamento de 257,623 kN, que representa aproximadamente 26,26 toneladas-força.

• **Método dos elementos finitos - FEM**

Na simulação do segundo recalque foram adotados os mesmos parâmetros utilizados nos cálculos pela teoria elementar da plasticidade, mesma geometria para a geratriz e desprezando-se, também, o encruamento residual da primeira operação.

A figura 9 mostra em detalhe as tensões equivalentes desenvolvidas nesta etapa do forjamento do parafuso.

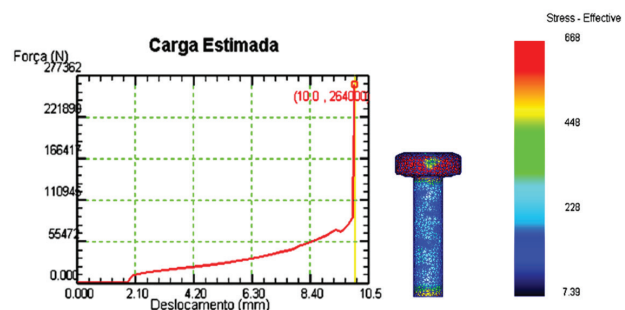


Figura 9 - Simulação do segundo recalque

O gráfico em destaque nesta imagem mostra a força de compressão em função do deslocamento do martelo, com carga estimada em 264 kN, que representa aproximadamente 26,91 toneladas-força. A simulação adotando somente o volume da cabeça do parafuso apresentou valor semelhante.

### Comparativo dos valores encontrados

De posse dos valores obtidos nos dois métodos de análise, é possível comparar os resultados no gráfico abaixo, onde são apresentados os valores para a força de forjamento em cada estágio e por aritmética, a força total na ordem de 30 toneladas-força, na conformação do parafuso, de acordo com cada método.

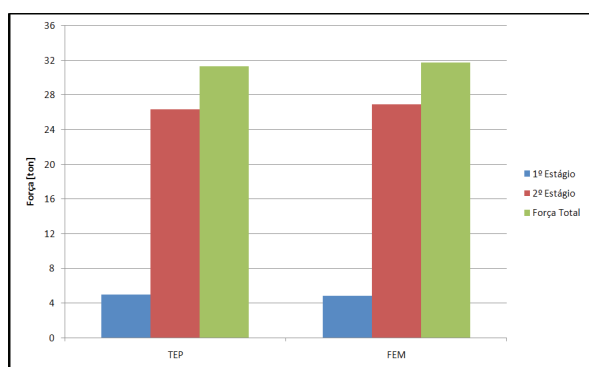


Figura 10 - Comparativo entre os métodos de análise

### Conclusões

Com base nos valores de força axial obtidos em cada estágio da conformação do parafuso, nos dois métodos de análise, é possível notar a paridade entre os resultados da TEP e do FEM.

Na conformação do primeiro e segundo estágios, a variação da força compressiva foi de aproximadamente 3%, enquanto a variação da força total de forjamento mostrou-se abaixo de 2%, o que pode ser explicado pelo fato da força axial máxima ter variado ora pela TEP, ora pelo FEM. A precisão dos resultados da TEP está diretamente relacionada ao número de divisões ao qual a geometria de análise foi submetida, desta forma é possível que os resultados desta pesquisa sejam refinados com a utilização de número maior de tubos para cada estágio.

Com o uso da TEP, é possível verificar de forma simples o comportamento das tensões em cada tubo e, conseqüentemente os esforços sofridos pelo ferramental em um determinado ponto, o que mostra que esta teoria pode se comportar como uma boa ferramenta de análise, e alternativa de baixo custo se comparado ao investimento em softwares de simulação.

## 1º CONGRESSO DE CONFORMAÇÃO METÁLICA JUNHO 2022

O Grupo Aprenda tem o prazer de informar que em 2022 irá reunir seus tradicionais seminários em congressos. Assim, irá realizar no primeiro semestre o **1º Congresso de Conformação Metálica** que conta com os seguintes eventos presenciais:

**4º Seminário de Tecnologia da Estampagem**

**1º Seminário de Tecnologia de Soldagem**

**9º Seminário de Tecnologia do Forjamento**

**2º Seminário de Conformação e Aplicação de Aços de Alto Desempenho (PHS)**

**1º Encontro de Especialistas de Elementos de Fixação (Fastening)**

O **1º Congresso de Conformação Metálica** será realizado nos dias **14 e 15 de Junho de 2022** nas instalações da FSA – Fundação Santo André, na cidade de Santo André, SP.

Não perca a oportunidade e reserve esta data.

**Aguarde, em breve mais informações!**

Realização:



Mídia Digital:



Revistas Oficiais:



Apoio:





## Agradecimentos

Os autores agradecem à contribuição do Dr. Eng. Alberto Moreira Brito e ao Eng. de fixadores José Carlos Benatti.

## Referências bibliográficas

BUTTON, S. T. Planejamento do processo e projeto de ferramentas para o forjamento a frio. São Paulo, UNICAMP, 1999.

CORRÊA, F. J. Aplicação da teoria elementar da plasticidade e da simulação numérica para forjamento em matriz aberta de eixo vazado. Dissertação de mestrado. UFRGS - PPGEM, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

CORRÊA, F. J.; SCHAEFFER L. Uso do método dos tubos para calcular esforços compressivos no forjamento em matriz fechada. Revista Forge, 2013.

DIN 933: M1,6 to M52 hexagon head screws threaded up to the head - Product grades A and B. Berlim, Alemanha, 1987.

HEINZ T. Metal Forming Practise. Dresden, Alemanha, 2005.

MARQUES, A. S. Estudo do forjamento de peças vazadas a partir de geratriz tubular. Dissertação de mestrado. UFRGS - PPGEM, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

MARQUES, A. S.; et al. Análise numérica e analítica do forjamento a quente em matriz fechada para a fabricação de um flange de Al 6351. XVII SENAFOR - Conferência Internacional de Forjamento, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

SANTOS, G.G. Análise teórica de tensões distribuídas em carcaça de matriz de forjamento a frio. Revista do Parafuso, 2020.

SCHAEFFER, L. Conformação mecânica. Ed. Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, L. FORJAMENTO - Tecnologia do processo. Ed. Imprensa Livre, 2020.

SCHAEFFER, L. Introdução ao projeto de ferramentas para forjamento a quente em matriz fechada. Revista Ferramental, 2006.

SCHAEFFER, L.; ROCHA A. S. Conformação mecânica - Cálculos aplicados em processo de fabricação. Ed. Imprensa Livre, 2020.

## Genival Gonçalves Santos

Engenheiro mecânico pelo Centro Univer. Una, Contagem, MG. Há 18 anos na indústria de fixadores, dos quais 16 são na Acument Brasil Sistemas de Fixação S.A, planta de Contagem, MG. Nessa empresa acumula 11 anos de atuação em ferramentaria, com fabricação e montagem de matrizes para fabricação de fixadores. [genivalgoncalves@hotmail.com](mailto:genivalgoncalves@hotmail.com)

## Lírio Schaeffer

Professor, doutor, engenheiro, responde pela coordenação do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), além de presidir o Senafor, seminário internacional de tecnologias de forjamento metálico. [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br)

# O 41° SENAFOR já tem data marcada, e será presencial

Vamos nos encontrar novamente em Porto Alegre, no Centro de Eventos do Hotel Continental.

Como de costume, teremos Visitas Técnicas, palestras, apresentações técnicas orais e em poster, e uma área física para exposição.

E como também já é tradicional, todos os trabalhos apresentados serão publicados no site.

**Dias 5 a 7 de outubro de 2022**  
**Hotel Continental Porto Alegre, RS**

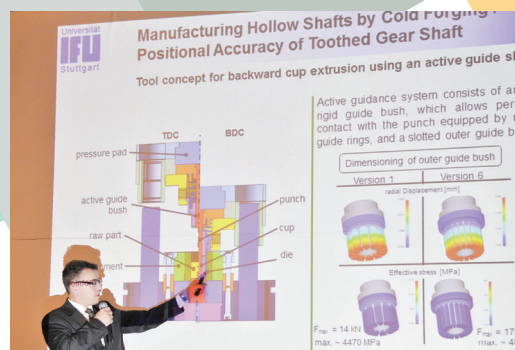
**Informações:**

[www.senafor.com](http://www.senafor.com)

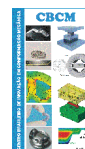
[senafor@terra.com.br](mailto:senafor@terra.com.br)



51 99981.2841



Realização



Apoio

