

ANALISE NUMÉRICA E ANALÍTICA DO FORJAMENTO A QUENTE EM MATRIZ FECHADA PARA A FABRICAÇÃO DE UM FLANGE DE AI 6351

Ângela Selau Marques²
Fábio Junkes Corrêa³
Luana De Lucca de Costa⁴
Lírio Schaeffer⁵

O conhecimento da força necessária para o forjamento de uma peça é um parâmetro fundamental no desenvolvimento de um projeto de forjamento, tanto para a determinação da capacidade do equipamento, quanto para o dimensionamento correto das ferramentas. Existem diversos métodos para a determinação desses parâmetros: equações bastante simplificadas, derivadas de modelos analíticos baseados na teoria elementar da plasticidade, conhecida como TEP e métodos numéricos mais sofisticados como o método dos elementos finitos, implementados em softwares de simulação, como o Simufact.Forming, Forge, Larstran, dentre outros. Neste estudo é realizada uma comparação entre os resultados obtidos pelos cálculos analíticos com a simulação numérica. Para o desenvolvimento dos cálculos é utilizado a Teoria Elementar da Plasticidade (TEP) e, na simulação, utiliza-se o método dos elementos finitos (FEM) com o software Simufact.Forming.

Palavras-chave: TEP, Software de simulação, Simufact, Forjamento.

Contribuição técnica a ser apresentada 17ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil/RS, 22 a 24 de outubro de 2013, Porto Alegre, RS, Brasil.

²Professora do Instituto Federal Sul rio-grandense IFSul – Campus Sapucaia do Sul. Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Departamento de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. angela_selau@ufrgs.br

³Engenheiro Mecânica. Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Departamento de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. fabio.correa@ufrgs.br

⁴Engenheira Mecânico. Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Departamento de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. luana.lucca@ufrgs.br

⁵Prof. Dr. -Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Departamento de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Av: Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. schaefer@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de conformação mecânica o forjamento é aquele onde uma geratriz é submetida a esforços compressivos com o propósito de deformar plasticamente até que obtenha a geometria das matrizes [1,4].

A literatura traz poucos estudos relacionados à fabricação por forjamento de peças tubulares utilizadas por vários segmentos da indústria, porém, ainda são fabricadas de forma na forma da tentativa e erro.

A empresa Hatebur Automatic mostra em seu site a fabricação de uma peça vazada, onde o processo é iniciado com um billet maciço, diferentemente do proposto neste estudo que expõe a utilização de billet vazado como geratriz para diminuir as etapas de fabricação. Segundo a empresa V&M do Brasil a perda da matéria prima quando se utiliza billet maciço é 6 vezes maior que vazado. A Figura 1 mostra a sequência de pré-formas utilizadas até chegar ao produto final, a partir, de billet maciço:



Figura 1 - Sequência de fabricação de peças vazadas a partir de billet maciço.

No cálculo dos principais parâmetros de forjamento, a tensão de escoamento (k_f) é imprescindível para quantificar força, preenchimento da ferramenta, tensão na ferramenta, entre outros. Esses dependem de muitas variáveis, sendo as principais: deformação (ϕ), velocidade de deformação ($\dot{\phi}$), e temperatura durante o processo de forjamento (θ) [2].

Essas variáveis podem ser obtidas a partir de modelos matemáticos e experimentais que envolvem níveis de reduções e aproximações com o intuito de resultados próximos à realidade, através da resolução de sistemas de equações diferenciais ordinárias, parciais, lineares e não-lineares. Essas são independentes das características mecânicas e de propriedades, tais como, elasticidade, plasticidade e conformabilidade. A resolução das equações propostas nos modelos matemáticos proporciona detalhamento numérico, porém, cria dificuldades na obtenção de soluções exatas relacionadas às características matemáticas de não-linearidade das equações constitutivas, gerando dificuldade em satisfazer as condições de contorno envolvidas[3,5].

Essas equações referem-se à Teoria Elementar da Plasticidade (TEP), desenvolvida por Siebel e Karman para solucionar problemas ocorridos no processo de laminação e adaptadas por Siebel e Pomp ao processo de forjamento. O aprimoramento da teoria levou ao desenvolvimento dos métodos das tiras, dos discos e dos tubos [2].

A Figura 2 mostra um elemento infinitesimal em uma peça conformada para os três métodos referidos como Teoria Elementar da Plasticidade (TEP).

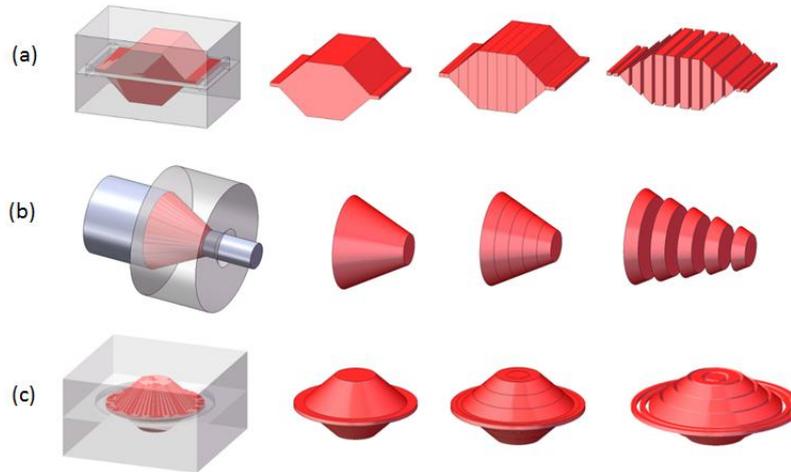


Figura 2 - Representação de um elemento infinitesimal em uma peça conformada. a) Sequência para peça conformada de simetria plana (uso do método das tiras). b) Sequência para peça forjada em matriz fechada (uso do método dos tubos). c) Sequência para peça extrudada ou trefilada (uso do método dos discos) [10].

Dependendo da geometria, plana ou axial, do componente a ser forjado, utiliza-se o método adequado à sua geometria, então, faz-se a discretização em elementos na forma de tiras, discos ou tubos, assim, pode-se prever o esforço em cada segmento [3]. Para geometrias planas usa-se o Método das Tiras, Figura 2.a; para simetria axial usa-se o Método dos Tubos, Figura 2.b, utilizado nos processos de extrusão ou trefilação, ou dos Discos utilizado nos processos de forjamento em matriz fechada com geometrias simétricas, Figura 2.c [5].

Cada método é representado por uma equação adequada (1, 2 e 3):

$$\text{Método das Tiras} \quad \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_x [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Método dos Discos} \quad \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{r} \cdot \sigma_x [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{r} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad (2)$$

$$\text{Método dos Tubos} \quad \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_r [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad (3)$$

Antes de resolver a equação diferencial é necessário o conhecimento da temperatura, deformação (Equação 4) e velocidades de deformação, (Equação 5) a fim de obter o valor da tensão de escoamento (Equação 6) e, então, calcular as tensões localizadas do corpo forjado [5].

As deformações (φ) em cada elemento são calculadas por:

$$\varphi_i = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad [4]$$

Onde h_0 [mm] é altura inicial e h_i [mm] a altura instantânea.

As velocidades de deformações ($\dot{\varphi}$) em cada elemento são calculadas por:

$$\dot{\varphi}_i = \frac{v_m}{h_i} \quad [5]$$

Onde v_m [m/s] é a velocidade da ferramenta

A tensão de escoamento em cada elemento (kf_i) é calculada por:

$$kf_i = kf_0 \cdot e^{-m_1 \cdot T} \cdot \varphi_i^{m_2} \cdot \dot{\varphi}_i^{m_3} \quad [6]$$

Onde kf_i [-] é tensão de escoamento, kf_0 [-] é tensão de escoamento inicial, T [°C] é a temperatura da peça a ser forjada, φ [-] a deformação verdadeira e $\dot{\varphi}$ [s⁻¹] a velocidade de deformação.

Os valores de m_1 , m_2 , e m_3 são constantes características do material obtidas através de regressão matemática de uma curva experimental. Dependendo do material usado, essas constantes podem apresentar valores distintos [7].

A equação diferencial para o Método dos Tubos, Equação 3, pode ser simplificada e dividida em 2 parcelas resolvidas de forma independente segundo as Equações 7 e 8:

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

$$f(r_i) = \frac{2}{h_i} [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] \quad [8]$$

Estas possibilitam a resolução da equação diferencial para o Método dos Tubos, deste modo, a variação da tensão radial (Equação 9) de um elemento em relação ao posterior é calculada:

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

Determinando-se as variações das tensões localizadas radiais de um tubo ao subsequente, obtém-se a tensão radial naquele determinado tubo, segundo a Equação 10:

$$\Delta\sigma_{r_i} = \sigma_{r_i} - \sigma_{r_{i-1}} \quad \sigma_{r_i} = \Delta\sigma_{r_i} + \sigma_{r_{i-1}} \quad [10]$$

A aplicação da teoria de Tresca, a partir da tensão radial e da tensão de escoamento de um determinado tubo, permite calcular a tensão normal, Equação 11, desse tubo:

$$\sigma_{z_i} = \sigma_{r_i} - k_f \quad [11]$$

Com a tensão normal é calculada a tensão normal média, Equação 12, do tubo anterior com o seu subsequente:

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

Com as tensões localizadas médias na direção normal à peça conformada calcula-se a área superficial de contato do tubo, Equação 13, e o esforço em cada tubo, Equação 14, possibilitando o somatório para determinar o esforço máximo de forjamento:

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

$$F_i = \bar{\sigma}_{z_i} \cdot \Delta A_i \quad [14]$$

Nos métodos analíticos, tais como os métodos de tiras, dos tubos e dos discos, referidos como Teoria Elementar da Plasticidade (TEP), um modelo matemático é desenvolvido, com base nas simplificações mencionadas, para cálculo da carga aplicada no processo de forjamento em matriz fechada [2,6]. No entanto, com os grandes avanços nas técnicas computacionais, o Método de Elementos Finitos (FEM) tornou-se uma abordagem poderosa para a simulação numérica dos processos de conformação [4].

Os programas de simulação se tornaram uma ferramenta prática e essencial para o desenvolvimento e otimização da tecnologia de processos de deformação plástica. Inúmeros programas comerciais, baseados em diferentes métodos de solução estão disponíveis no mercado. Os métodos de solução mais empregados são: elementos finitos, volumes finitos, elementos de contorno [8].

A Tabela 1 mostra os principais softwares utilizados para simulação numérica do processo de forjamento e o respectivo fabricante [9].

| Nome | Fabricante |
|----------------|---|
| EESY-FORM | CPM Gesellschaft für Computeranwendung |
| DEFORM | Scientific Forming Technologies Corporation |
| FORGE | Transvalor SA |
| MARC Autoforge | MARC Analysis Research Corporation |
| Simufact | Simufact |
| Qform | Quantor |
| MSC Superforge | Technical Project Coordinator |

Tabela 1- Marcas e fabricantes de softwares [9].

Existem requisitos fundamentais para obtenção de resultados de simulação compatíveis com as situações reais independente do software utilizado. Para isso é necessário introduzir valores confiáveis no programa de para as propriedades físicas, mecânicas e das condições de contorno como os apresentados na Figura 3 [8]:

| Propriedades Físicas | Propriedades Mecânicas | Condições de Contorno |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> •Peso específico •Calor específico •Condutibilidade térmica | <ul style="list-style-type: none"> •Tensão de Escoamento •Módulo de elasticidade •Coeficiente de Poison | <ul style="list-style-type: none"> •Coeficiente de atrito •Coeficiente de calor peça e matriz, peça e ambiente, matriz e ambiente. |

Figura 3 - Propriedades físicas, mecânicas e das condições de contorno.

Considerando a importância dos itens citados acima, para uma representação numérica eficiente, realizam-se ensaios para obter as propriedades corretas e adequadas que devem ser inseridas no software. Os ensaios mais utilizados são o ensaio de compressão, ensaio do anel e de torção.

Cálculos realizados a partir de modelos matemáticos da Teoria Elementar da plasticidade (TEP) e simulações numéricas a partir do método de elementos finitos (FEM) são explicados neste artigo. Utilizando o software Simufact.Forming, cálculos analíticos com o uso Teoria Elementar da Plasticidade e procedimento experimento do forjamento foram comparados e analisados os resultados obtidos para o componentes em questão. O liga Al 6351 foi utilizado como material referência e diferentes resultados obtidos foram comparados e conclusões são feitas com base nesta comparação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga de alumínio AA 6351 (Al, 0,9%Si, 0,5%Fe, 0,10%Cu, 0,6%Mg, 0,2%Zn, 0,2%Ti) foi o material utilizado para a geratriz deste estudo. Para as matrizes utilizou-se o aço AISI H13 que é um aço ferramenta para trabalho a quente com uma excelente combinação entre dureza e resistência à fratura, características importantes para ferramentas de forjamento.

A partir da definição da geometria da peça a ser forjada (Figura 4), dimensionou-se a geratriz e desenvolveu-se o projeto das matrizes utilizando o software SolidWorks, tanto para desenvolvimento do projeto quanto para o detalhamento das matrizes, apresentadas na Figura 4, e geometria final.

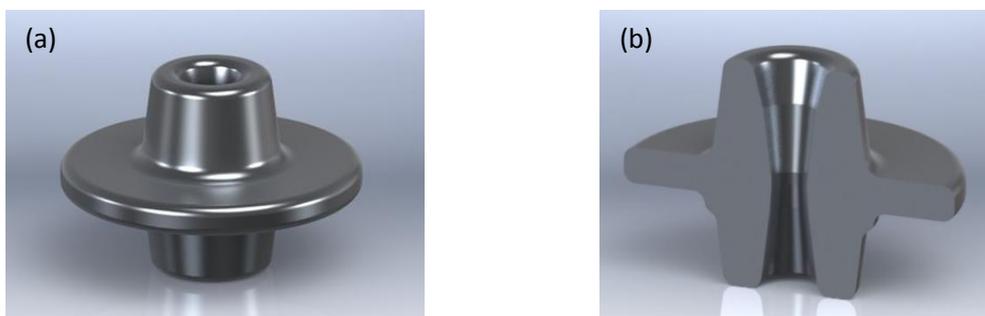


Figura 4 - (a) Representação 3D da peça a ser forjada (b) Vista em corte da peça.

A geratriz foi dimensionada de forma a ter o mesmo volume da peça a ser forjada, considerando o adicional referente à rebarba. Assim, as dimensões do *billet* cilíndrico vazado, são: altura de 32mm, 41,5mm de largura, com furo concêntrico de 12mm. A Figura 5 mostra as matrizes superior e inferior modeladas no software SolidWorks.

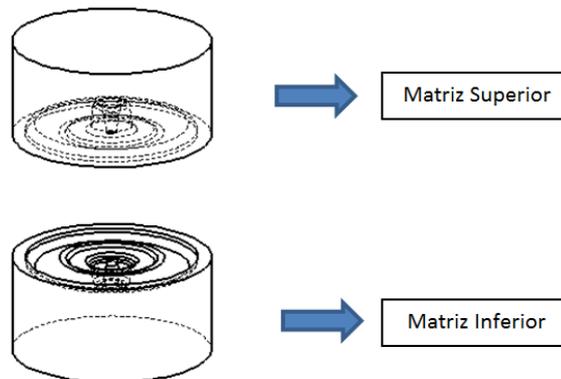


Figura 5 - Imagem 3D das matrizes para forjamento.

Estas peças foram importadas no software de simulação por elementos finitos Simufact.Forming®, onde foram definidos os parâmetros do processo para análises posteriores.

Os parâmetros utilizados no processo são de grande importância para um resultado confiável da simulação. Neste estudo, utilizaram-se como dados de entrada na simulação os valores apresentados na Figura 6:

| |
|--|
| Material |
| •Billet: AA 6351 •Matrizes: H13 |
| Temperaturas: |
| •Billet: 400°C •Matrizes: 50 °C |
| Dados da Prensa: |
| •Prensa Hidráulica •Modelo PH 600 •Velocidade de prensagem: 3,4 mm/s |
| Atrito |
| •Fator de atrito interfacial: $m = 0,3$ |
| Tamanho de malha |
| •0,269 |

Figura 6 - Dados de entrada para inseridos no software de simulação numérica.

Ao chegar à definição ideal dos parâmetros, segundo os resultados apresentados pela simulação iniciou-se a fabricação das matrizes para realização do experimento. Baseado nos resultados obtidos com a simulação numérica aplicou-se os cálculos analíticos, utilizando o método dos tubos, da Teoria Elementar da Plasticidade-TEP devido à geometria da peça.

A TEP é aplicada a partir das dimensões finais da peça forjada. Inicialmente, a peça é dividida em 11 tubos concêntricos (Figura 7).



Figura 7 - Divisão da peça em tubos

Com o valor do raio de cada tubo é calculado a variação radial de um tubo ao anterior. Essas variações radiais são usadas na resolução das equações para cálculo da variação das tensões nos tubos.

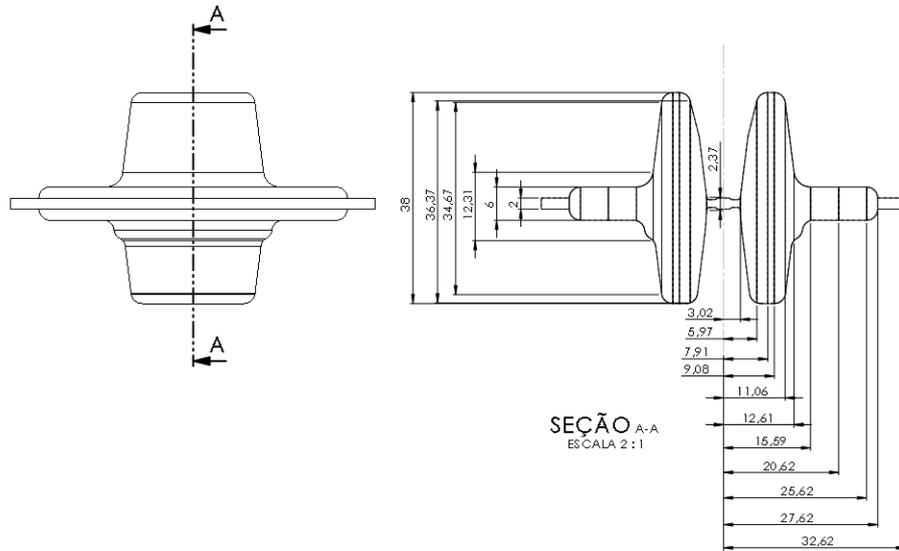


Figura 8 - Divisão da peça em tubos para cálculo da TEP

Ainda, para a realização do procedimento matemático da TEP foram utilizados os dados de entrada demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de entrada do material e ferramentas para cálculo da TEP.

| Descrição | Valor |
|---|------------------------|
| Coeficiente de atrito (μ) | 0,03 |
| Altura original do billet (h_0) | 32 mm |
| Diâmetro original da geratriz (D_0) | 41,5 mm |
| Velocidade da ferramenta | 3,4 mm/s |
| Temperatura do billet | 400°C |
| Temperatura da matriz | 50°C |
| Densidade do material | 2710 kg/m ³ |
| Calor específico | 890 J/kg- °C |
| Fração de energia transformada em calor | 0,9 |
| Módulo de elasticidade | 68.9 N/mm ² |

Por fim, realizou-se o forjamento da peça em estudo utilizando os mesmos parâmetros da simulação com o intuito de comparar os resultados obtidos via simulação numérica, dados analíticos com os experimentos realizados.

Para o forjamento da peça em estudo utilizou-se uma prensa hidráulica da marca FKL, com capacidade de força de 600 ton, e sequência de processo apresentado na Figura 9



Figura 9 - Sequência de forjamento experimental.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na simulação numérica pelo método dos elementos finitos, obtiveram-se os valores dos esforços em função do deslocamento, os quais são mostrados nos gráficos de dispersão, onde os pontos indicam o esforço para cada instante do deslocamento, conforme demonstra o gráfico da Figura 10.

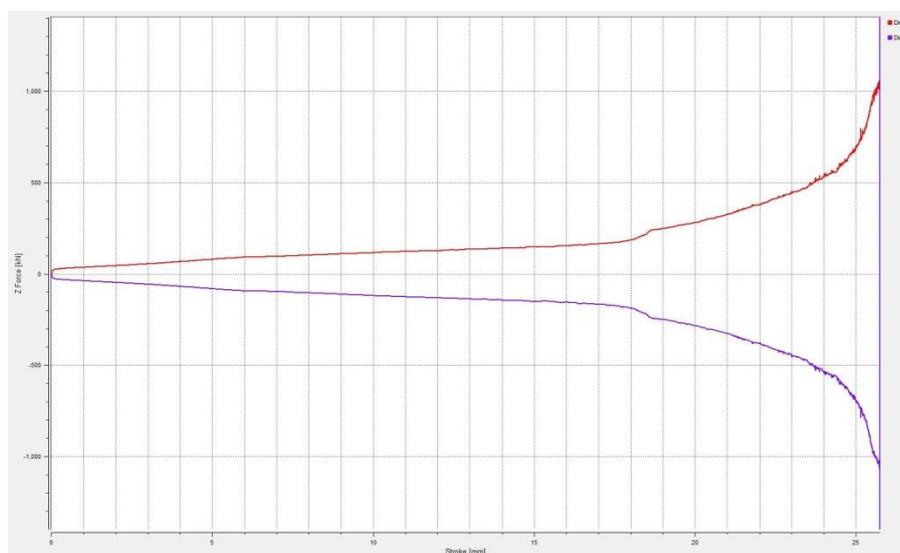


Figura 10 - Esforços instantâneos em função do deslocamento

Conforme observar-se no gráfico, a força necessária para o forjamento da peça, segundo a simulação, é de 233 ton. Também, é possível verificar que a força aumenta consideravelmente a partir do ponto de deslocamento de 18mm, que é o momento em que inicia-se o preenchimento do canal de rebarba.

Foram realizadas simulações com billets de dimensões diferentes, até obter-se o preenchimento completo da matriz e a menor rebarba possível. A Figura 11 mostra a deformação plástica sofrida pela peça e as regiões de maior deformação.

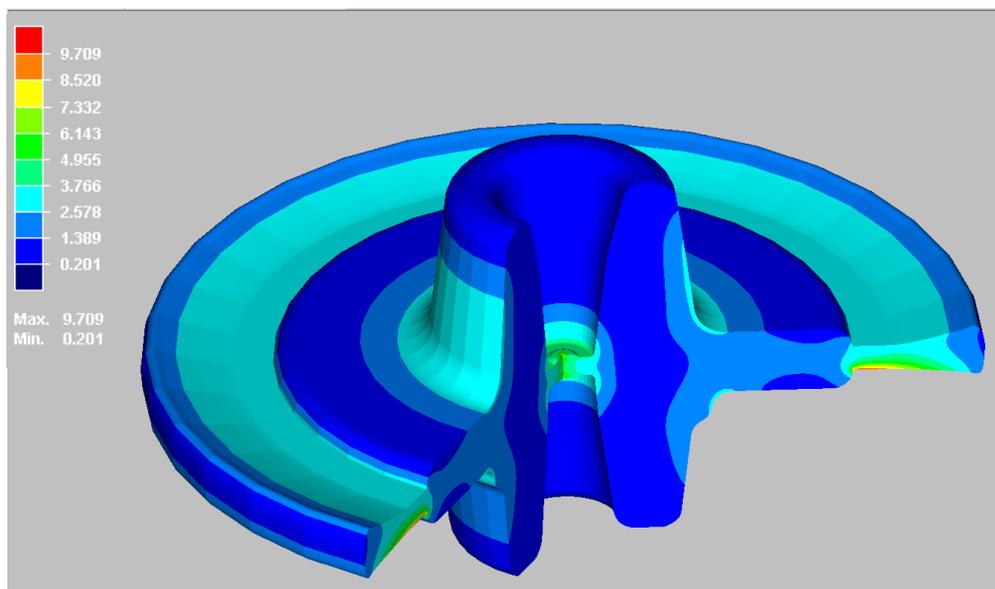


Figura 11 Distribuição de deformações no forjamento

A partir da equação ordinária diferencial para o método dos tubos (Equação 3), iniciou-se procedimento matemático, aplicando-se as equações subsequentes, visando calcular o esforço em cada tubo concêntrico. O procedimento é executado de forma sequencial, sendo que cada estágio subsequente depende dos dados anteriores para prosseguir os cálculos. A Tabela 3 mostra a aplicação dos cálculos, baseadas na TEP. O somatório das forças localizadas em cada tubo permite a determinação do valor da força total de 1667,0 kN ou 169,8 toneladas.

Tabela 3 – Resultado dos calculos da TEP.

| Linha | r_i | Δr_i | ρ | h_i | φ_i | φ_j | k_{fi} | σ_{ri} | σ_{zi} | $\sigma_{zi,m}$ | ΔA_i | F_i |
|-------|-------|--------------|--------|-------|-------------|--------------------|----------|---------------|---------------|-----------------|--------------------|---------|
| i | [mm] | [mm] | [rad] | [mm] | | [s ⁻¹] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [mm ²] | [kN] |
| 0 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 66,1 | 66,1 | # | # | # |
| 1 | 65,2 | 10,0 | 0,46 | 2,0 | 1,61 | 2,50 | 48,8 | 44,5 | 93,3 | 79,7 | 3785,0 | 301,696 |
| 2 | 55,2 | 4,0 | 0,46 | 4,0 | 0,92 | 1,25 | 44,5 | 45,8 | 90,3 | 91,8 | 1338,1 | 122,871 |
| 3 | 51,2 | 10,0 | 0,46 | 6,0 | 0,51 | 0,83 | 41,6 | 35,1 | 76,7 | 83,5 | 5194,1 | 433,831 |
| 4 | 41,2 | 10,1 | 0,46 | 6,0 | 0,51 | 0,83 | 41,6 | 51,0 | 92,6 | 84,7 | 2288,8 | 193,767 |
| 5 | 31,2 | 6,0 | 0,46 | 9,2 | 0,09 | 0,55 | 36,3 | 78,5 | 114,8 | 103,7 | 1517,1 | 157,343 |
| 6 | 25,2 | 3,1 | 0,46 | 23,5 | 0,85 | 0,21 | 37,9 | 84,6 | 122,5 | 118,7 | 461,0 | 54,710 |
| 7 | 22,1 | 4,0 | 0,46 | 36,3 | 1,29 | 0,14 | 37,3 | 90,4 | 127,7 | 125,1 | 750,9 | 93,945 |
| 8 | 18,2 | 2,3 | 0,46 | 38,0 | 1,34 | 0,13 | 37,2 | 93,94 | 131,1 | 129,4 | 249,8 | 32,327 |
| 9 | 15,8 | 3,9 | 0,46 | 36,3 | 1,29 | 0,14 | 37,3 | 100,7 | 138,0 | 134,5 | 671,6 | 90,369 |
| 10 | 11,9 | 5,9 | 0,46 | 23,5 | 0,85 | 0,21 | 37,9 | 121,8 | 159,7 | 148,8 | 333,3 | 49,597 |
| 11 | 6,0 | 6,0 | 0,46 | 2,4 | 1,44 | 2,11 | 47,8 | 0,0 | 47,78 | 103,7 | 114,6 | 11,888 |

Na análise do forjamento experimental a força total constatada pela célula de carga foi de aproximadamente 300 toneladas, como mostra o Gráfico da Figura 12.

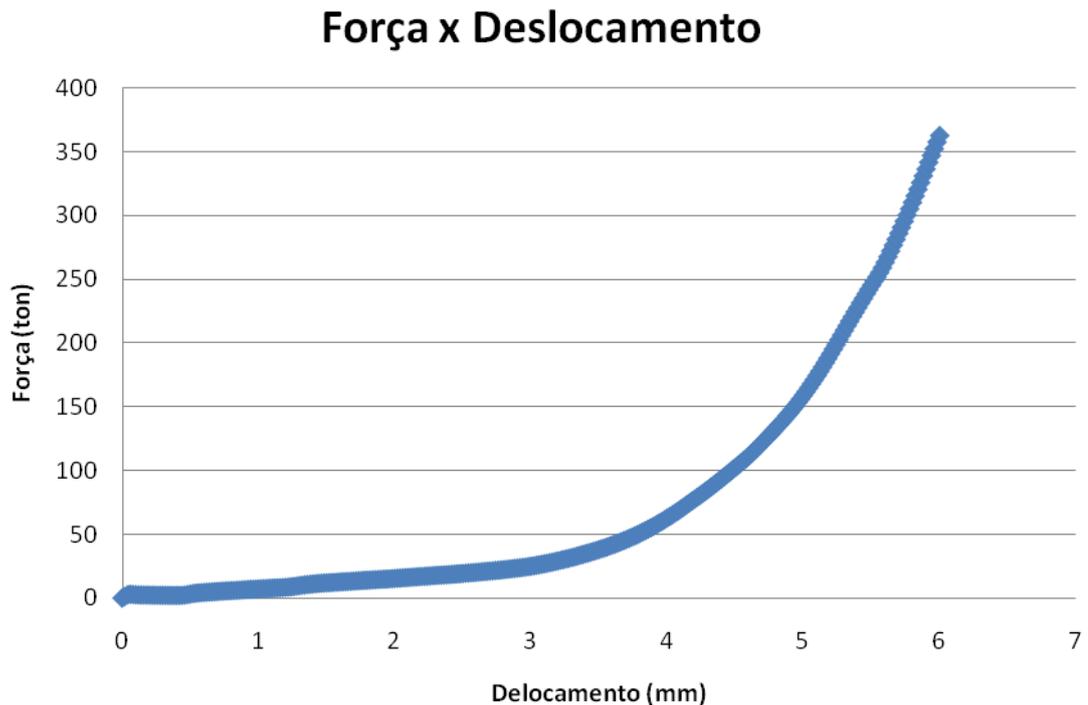


Figura 12 - Força x Deslocamento

A Figura 13 mostra imagens das peças forjadas. Observa-se que não houve o completo preenchimento da matriz e o escoamento do material para o canal de rebarba foi excessivo e está destacado na figura.

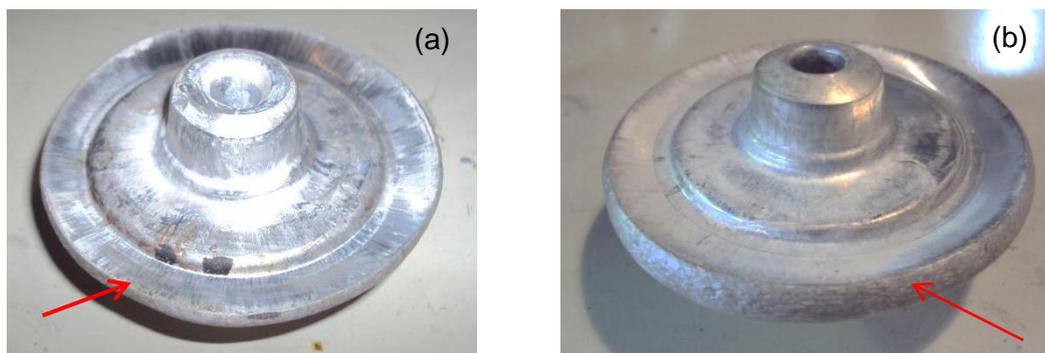


Figura 13 - Peças forjadas. (a) Primeiro e (b) Segundo experimento.

Durante o procedimento experimental ocorreram problemas característicos do processo de forjamento a quente e não identificados na simulação numérica. Estes foram, principalmente, a liberação de gases, característica própria do material em temperaturas elevadas, que dificultou o escoamento do material, e assim, o preenchimento completo da matriz.

A Figura 14 mostra a comparação das forças obtidas pelos métodos de simulação numérica, analítico (TEP) e experimental. A força obtida experimentalmente serve apenas de referência para avaliar as forças obtidas nos métodos de previsões utilizados, pois não foi possível obter o coeficiente de atrito para as condições de forjamento utilizadas, sendo este uma grande fonte de erro para a comparação com os cálculos e a simulação.

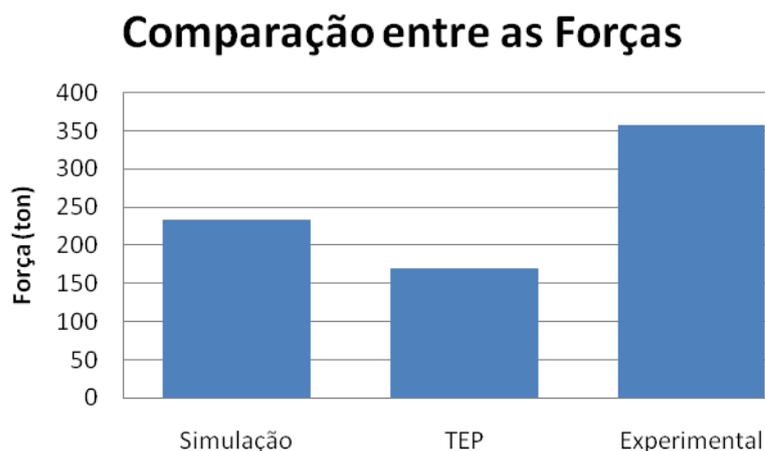


Figura 14 - Gráfico comparativo entre a força obtida pela simulação numérica, método analítico (TEP), e experimental.

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, o modelo analítico da Teoria Elementar da Plasticidade (TEP) determinou uma força de forjamento de 47 % da obtida experimentalmente, já a simulação computacional numérica, baseado no Método de Elementos Finitos (FEM), apresentou uma força de 65%.

Não se pode afirmar a eficiência dos métodos analítico e de simulação computacional, pois, durante o experimento houve a liberação de gases oriundos do material, não previsto pela simulação computacional, que não permitiu o preenchimento completo da cavidade das matrizes solicitando maior força para o forjamento. Propõe-se como solução a usinagem de canais nas matrizes inferior e superior para a saída de gases durante o processo de forjamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito, ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS

- [1] SCHAEFFER, L. Forjamento. 1ª Edição. Porto Alegre – RS: Editora Imprensa Livre, 2001.
- [2] SCHAEFFER, L. Conformação Mecânica. 2ª Edição. Porto Alegre – RS: Editora Imprensa Livre, 2004.
- [3] CORREA, F. J., SCHAEFFER, L. Aplicação da Teoria Elementar da Plasticidade (TEP) no Forjamento em Matriz Fechada. 32º Senafor - 16ª Conferência Internacional de Forjamento (2012), Porto Alegre/RS. Anais. p. 357-368.
- [4] FERESHTEH-SANIEE, F., & JAAFARI, M.. Analytical, numerical and experimental analyses of the closed-die forging. Journal of Materials Processing Technology, 2002, pg. 334–340
- [5] CORREA, F. J.. Uso do método dos tubos para calcular esforços compressivos no forjamento em matriz fechada. Revista Forge (2013), ed. Jan/abril, pag. 43-47.
- [6] YURGEL, C. C.. Substituição do processo de usinagem pelo processo de forjamento a quente na fabricação de pré-formas de brocas de furação de rochas. Dissertação. PPGE3M. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2007.
- [7] HENSEL, A.; SPITTEL, T. Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978
- [8] MARQUES, A. S.; MARTINS, V.; E SCHAEFFER, L.; Benefícios da Simulação Computacional no Processo de Forjamento. 32º Senafor - 16ª Conferência Internacional de Forjamento (2012), Porto Alegre/RS. Anais. p. 369 - 384.
- [9] BRAMLEYU. A.N.; MYNORS. D.J.; “The Use Of ForgingSimulation Tools.” Materialsand Design, v. 21, 2000, p. 279-286.
- [10] MORAES, A. S. (2007). Material de Aulas de Teoria Elementar da Plásticidade, Treimamento em Forjamento, Grupo de Forjamento, Laboratório de Transformação Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre/RS.

HOT FORGING ANALYTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS IN CLOSED DIE FOR THE MANUFACTURING OF A FLANGE OF AI 6351.

The knowledge of the necessary strength for the forging of a piece is a fundamental parameter in the development of a forging project. Importantly for determining the capacity of the equipment and for the correct dimensioning of the tools. There exist several methods for determining these parameters such as simplified equation derived from analytical models based on the elementary theory of plasticity known as ETP and also sophisticated numerical methods like finite element method implemented in simulation software such as Simufact. Forming, Forge, Larstran etc. In this study a comparison is made between the results obtained by analytical calculations with numerical simulation. To develop the calculations elementary theory of plasticity (ETP) is used and simulation is done by finite element method (FEM) using the software Simufact. Forming.

Palavras-chave: ETP, Simulation software, Simufact. Forming, Forging.