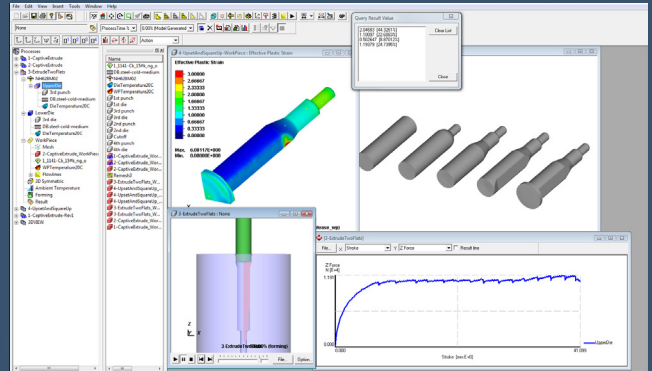




# Simulação Numérica na Predição de Carga de Conformação



A predição de força de conformação é um dos fatores de grande importância no dimensionamento do maquinário necessário para se forjar uma peça. Este artigo traz uma avaliação da predição de força de conformação de peças em liga de titânio pela simulação numérica computacional, contrastado com os resultados experimentais.

Engº Diego Rodolfo Simões de Lima - UFRGS, Rio Grande do Sul / Engº Alessandro S. Moraes - UFRGS, Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer - UFRGS, Rio Grande do Sul

**E**xistem diferentes métodos aproximados, tanto analíticos quanto numéricos, para analisar as operações de forjamento. Nenhum deles é exato, em função das hipóteses assumidas no desenvolvimento do modelo matemático e dos dados de entrada, a exemplo curva de escoamento do material e coeficiente de atrito [1, 2, 3]. Os métodos numéricos por simulação computacional apresentam os melhores resultados, porém há um custo elevado devido aos recursos computacionais (software e hardware) exigidos.

O objetivo deste artigo é avaliar a predição da força de forjamento calculada pelo método numérico através do programa de simulação Simufact.Forming 9.0, tendo como referência a força experimental de forjamento de duas peças aleatórias, forjadas na liga Ti-6Al-4V, obtida por uma célula de carga acoplada a prensa.

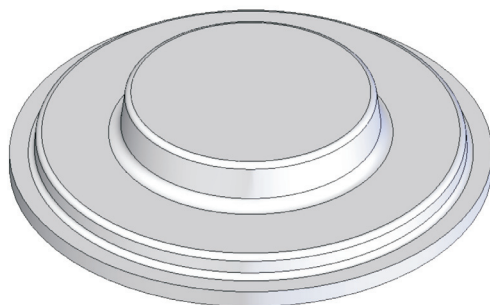
## Procedimento Experimental

### Peças de Trabalho

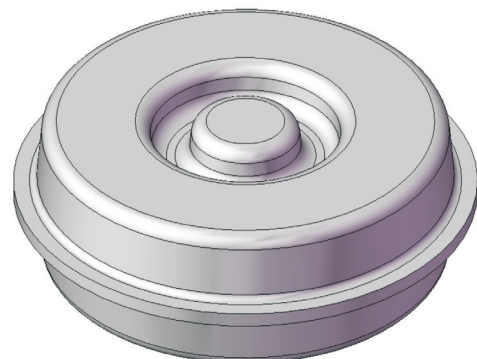
As peças escolhidas para estudo foram um flange da liga Ti-6Al-4V, cuja aplicação original é a indústria de extração e transporte de petróleo e uma polia, da mesma liga, destinada a indústria automotiva de alto-desempenho. Neste trabalho, as peças foram forjadas em escala reduzida, com o objetivo de servir de protótipo para futuros processos em ritmo industrial. Na Figura 1 podem ser observados os modelos geométricos tridimensionais do flange e da polia utilizados como moldes para as cavidades das matrizes.

### Modelagem Numérica

Na simulação do forjamento a quente, inicialmente foi estipulado o resfriamento do tarugo por 10 segundos, que é aproximadamente o



(a)



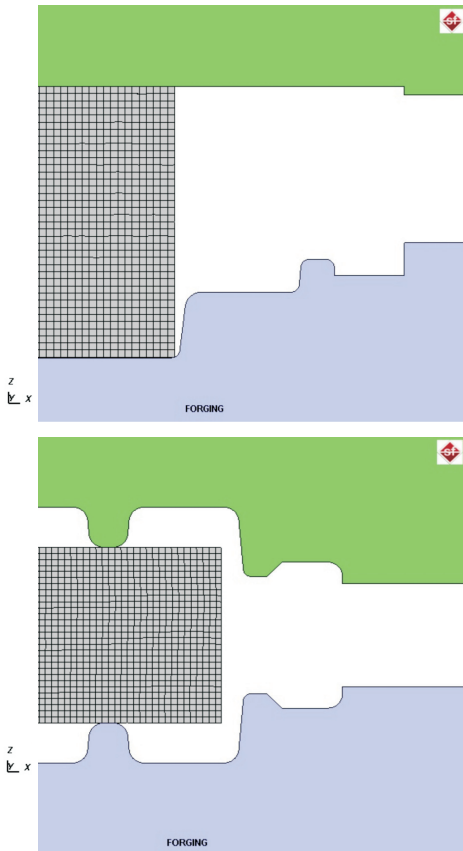
(b)

Figura 1 – Modelo tridimensional do flange (a) e da polia (b) utilizados como moldes para a cavidade das matrizes



# Simulação Numérica na Predição de Carga de Conformação

tempo de transporte do forno até a matriz. Na sequência, procedeu-se a simulação do forjamento propriamente dito. Ambos os processos foram modelados no programa comercial Simufact.Forming 9.0, utilizando o método dos elementos finitos. Visando reduzir o tempo computacional, foi realizada uma análise axissimétrica do processo, sendo isto possibilitado pelas matrizes e o tarugo apresentarem geometria de revolução em torno do mesmo eixo. A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente pelo programa, calculando o tamanho de elementos mais adequado para a simulação. A Figura 2a ilustra o modelo de elementos finitos para a análise do flange e a Figura 2b para a análise da polia.



**Figura 2 – Modelo de elementos finitos para análise do flange (a) e para análise da polia (b)**

Os parâmetros do processo foram configurados de acordo com o processo físico, sendo:

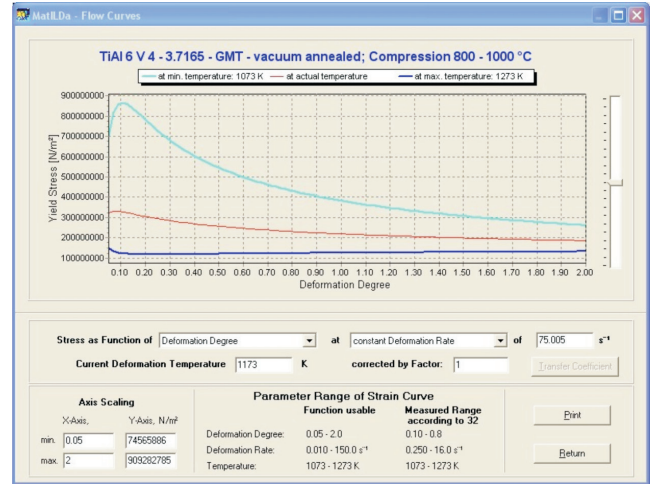
- Coeficiente de Atrito = 0,3
- Velocidade da Prensa Hidráulica = 7 mm/s
- Coeficiente de transferência de calor por contato = 5000Watt/(m<sup>2</sup>\*K) [4]
- Temperatura das matrizes = 300°C
- Temperatura inicial do tarugo = 980°C

## Análise Experimental

Neste trabalho foram utilizadas duas barras de liga de titânio, apresentando diâmetros de 40mm e 50mm, para o forjamento do flange e da polia, respectivamente. Estas barras foram seccionadas de modo a obter uma altura de 33mm e 25mm, referentes, em ordem, à flange e à polia. A liga de titânio escolhida foi a Ti-6Al-4V, a qual consiste em uma liga de titânio  $\alpha+\beta$ , com temperatura de transformação beta entre 979 e 1007 °C [5]. As

matrizes de revolução em torno do mesmo eixo. A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente pelo programa, calculando o tamanho de elementos mais adequado para a simulação. A Figura 2a ilustra o modelo de elementos finitos para a análise do flange e a Figura 2b para a análise da polia.

As propriedades da liga de titânio Ti6Al4V foram inseridas no modelo de simulação utilizando o material disponível no banco de dados do Simufact.Materials, conforme pode ser visto na Figura 3. As matrizes foram configuradas rígidas, assim, não é necessário especificar material para as ferramentas.



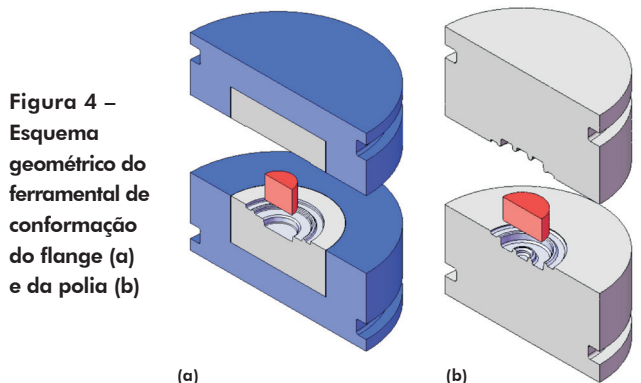
**Figura 3 – Propriedade mecânica da liga Ti6Al4V do banco de dados do Simufact.Materials.**

peças foram forjadas em matriz fechada, onde na Figura 4 pode se observar um esquema do ferramental de cada peça conformada.

Para lubrificar os tarugos e as matrizes, foi utilizado o Aerodag G, da empresa Acheson, tratando-se de um lubrificante aerossol de grafite coloidal com álcool isopropílico atuando como veículo. O lubrificante foi pulverizado sobre os tarugos à temperatura ambiente. Após a secagem do lubrificante, formou-se uma camada invólucra de grafite.

Depois de lubrificados, os tarugos foram aquecidos por 30 minutos a aproximadamente 980°C em um forno elétrico. O tempo de transporte destes do forno para a prensa foi de aproximadamente 10 segundos, obtendo-se uma temperatura inicial de forjamento de 950°C. As temperaturas, do forno e das matrizes, foram medidas através de um termopar tipo K conectado a um multímetro digital. As matrizes foram aquecidas com dois maçaricos de GLP até o momento do forjamento. Os maçaricos foram apagados, a matriz foi pulverizada com o lubrificante e em seguida foi medida a temperatura da matriz, registrando aproximadamente 300°C.

O forjamento foi efetuado em uma prensa hidráulica FKL com capacidade de 750 toneladas, com uma velocidade de ferramenta de aproximadamente 7mm/s. Os dados de força de prensagem foram adquiridos por uma célula de carga com capacidade de 400 toneladas,



**Figura 4 – Esquema geométrico do ferramental de conformação do flange (a) e da polia (b)**

# Simulação Numérica na Predição de Carga de Conformação



enquanto que os dados de deslocamento da prensa foram obtidos por um extensômetro LVDT T50. Ambos os equipamentos foram acoplados ao sistema de aquisição de dados Spider8 e para registrar os dados foi utilizado o software Catman Express. A aquisição de dados foi feita com uma frequência de 10Hz.

## Resultados e Discussões

A Figura 5 apresenta a temperatura e o preenchimento da cavidade da matriz no final da simulação do processo de forjamento do flange. Pode se observar na Figura 5 (a) que as regiões mais externas da peça, que estão em contato com a matriz durante o processo de conformação, perdem maior quantidade de calor em comparação com o núcleo das peças. Essas perdas são amenizadas nas regiões referentes aos bordos e rebarba do flange devido ao incremento de temperatura que vem da maior deformação registrada nestes locais.

Na Figura 5 (b) é evidenciado o completo preenchimento da cavidade da matriz, fornecendo peças conforme a geometria esperada.

De maneira homóloga, a temperatura e o preenchimento da cavidade da matriz no final da simulação do forjamento da polia estão ilustrados na Figura 6. Assim como na conformação do flange, no processo de deformação da polia pode se perceber uma perda maior de temperatura nas regiões extremas da peça, sendo compensadas parcialmente nas regiões de mais deformação plástica. Também na simulação da polia se obtém um completo preenchimento da cavidade da matriz.

A Tabela 1 apresenta a carga de conformação medida experimentalmente em contraste com a carga obtida pela simulação numérica computacional do processo. É apresentada ainda a diferença relativa entre os valores.

A diferença obtida na simulação do flange superestimou a força em aproximadamente 20 toneladas, representando uma discrepância de

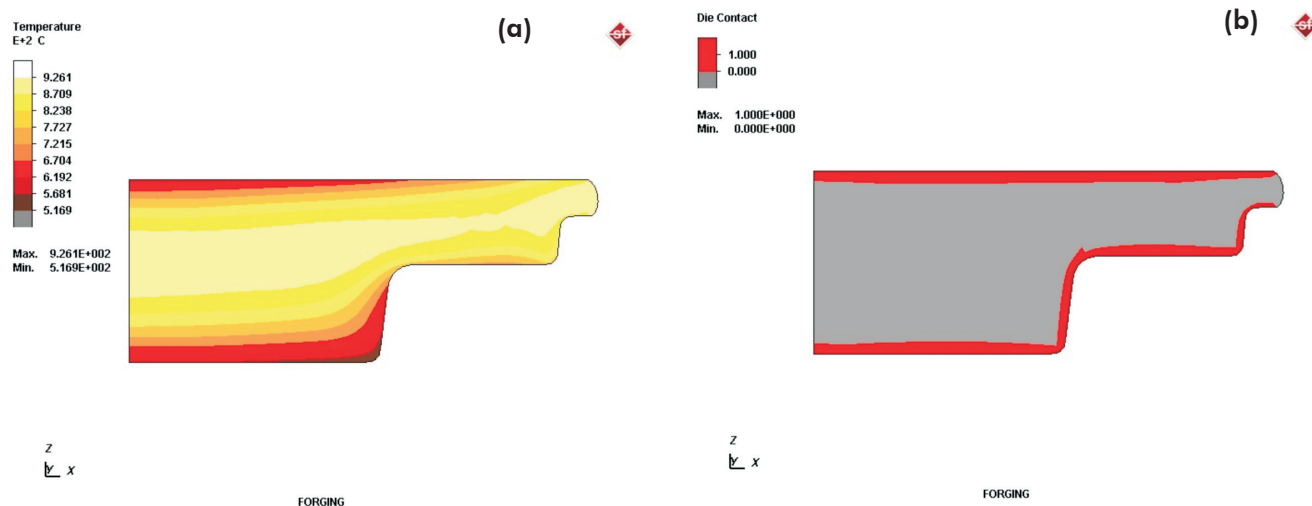


Figura 5 – Temperatura (a) e preenchimento da matriz (b) resultados da simulação do forjamento do flange

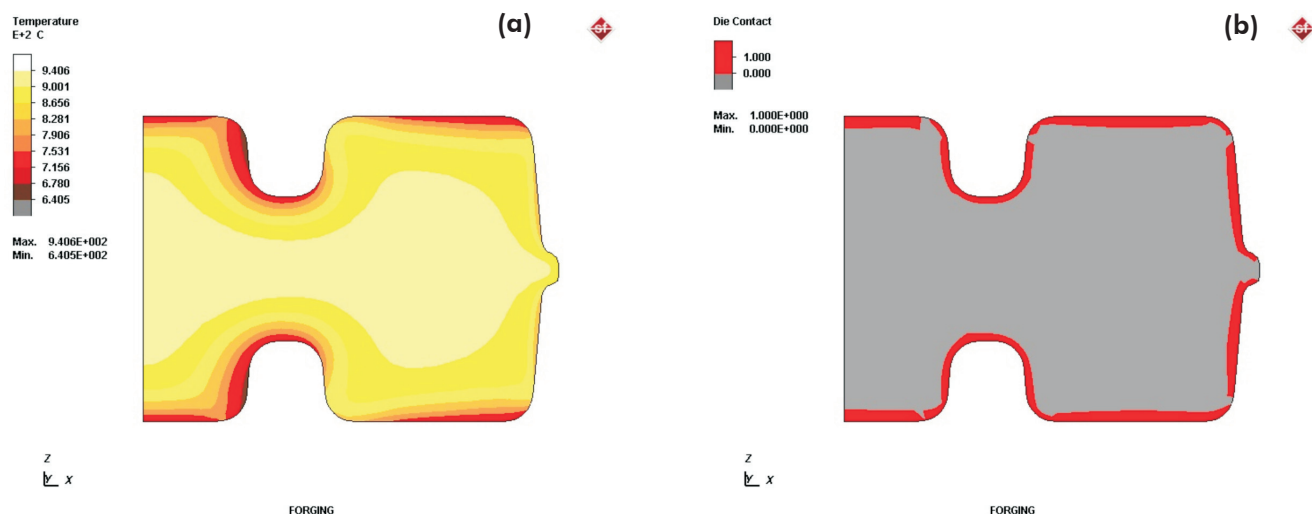


Figura 6 – Temperatura (a) e preenchimento da matriz (b) resultantes da simulação do forjamento da polia





# Simulação Numérica na Predição de Carga de Conformação

6,5%. No caso da análise do processo de produção da polia, a diferença encontrada foi menor, situando-se em 4 toneladas, ou seja, 2,1% de superestimação da força.

Esse erro é considerado pequeno para os processos em questão e estão associados principalmente aos dados de entrada, os quais foram obtidos de dados bibliográficos e bibliotecas do software. Através de dados levantados experimentalmente, referentes as condições de processo e características específicas dos materiais empregados, um resultado ainda mais preciso pode ser obtido.

## Conclusões

Neste trabalho ficou evidenciada a eficiência da técnica de simulação numérica computacional para prever resultados práticos do processo de conformação de peças em liga de titânio.

A aproximação obtida foi de 6,5% no processo de obtenção do flange e de 2,5% no processo da polia, ambas superestimando o resultado prático experimental.

O erro obtido se deve principalmente a utilização de dados de entrada obtidos em bibliografias e banco de dados de software, podendo ser minimizado ainda mais se utilizados dados experimentais específicos do processo.

Por fim, a simulação numérica computacional apresentou resultados corretos quanto à predição de preenchimento de cavidade da matriz, de onde se obteve peças com completa sanidade geométrica. ⚙️

Peça	Valor medido	Valor simulado	Dif. relativa
Flange	3100 kN	3300 kN	+ 6,5 %
Polia	1920 kN	1960 kN	+ 2,1 %

**Tabela 1: Valores da carga de conformação de ambas as peças**

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho. E à Simufact-Americas LLC pela disponibilização do programa de simulação Simufact. Forming 9.0.

## Referências

- [1] SCHAEFFER, L.; Conformação dos Metais: Metalurgia a Mecânica; Editora Rígel; Porto Alegre.
- [2] SIEBEL, E., BEISSWANGER, H., Tiefziehen, 1955., in: MARUMO, Y., SAIKI, H., RUAN, L.; Effect of sheet thickness on deep drawing of metal foils; Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol 20, pg 479-482, 2007.
- [3] ALTAN, T.; Conformação dos Metais: Fundamentos e Aplicações; EESC-USP, 1999; São Carlos, São Paulo.
- [4] BOUTONNET, A.S.; Etude de la resistance thermique de contact a l'interface de solides deformables en frottement: applications aux procedes de forgeage; Institut National des Sciencenes Appliquees de Lyon, 1998.
- [5] KNOLL, P. K.; SCHAEFFER, L.; Análise microestrutural da liga de titânio  $\alpha+\beta$ , ti-6al-4v, forjada a quente; 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materials, Foz do Iguaçu, 2006.

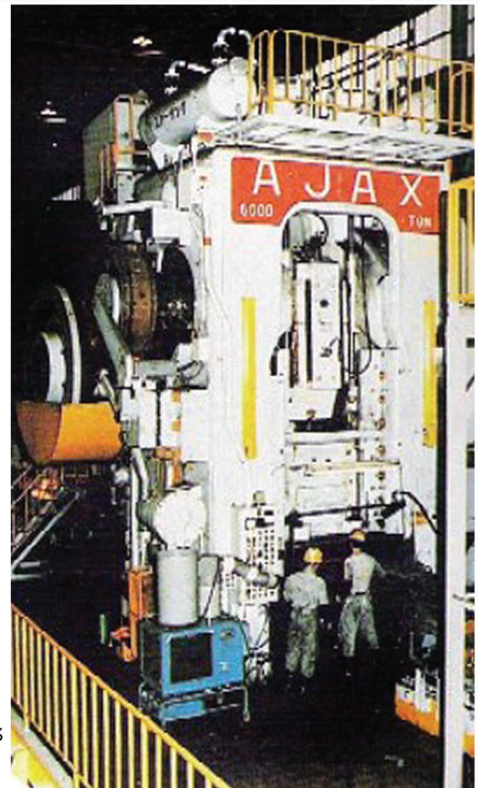


29100 LAKELAND BLVD.  
WICKLIFFE, OHIO, EUA 44092

# Ajax CECO

- FORJADORES COM MATRIZ
- PRENSAS DE IMPACTO
- MARTELOS
- PRENSAS DE FORJA
- LAMINADORA DE TUBOS
- MAQUINAS DE FORJA
- REFILADORAS DE ARAME
- PEÇAS DE REPOSIÇÃO
- REFORMAS
- SISTEMAS DE TROCA RÁPIDA DE FERRAMENTAS

[WWW.AJAX-CECO.COM](http://WWW.AJAX-CECO.COM)



P: +1 440-295-0244  
F: +1 440-295-0245