



## O USO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL EM CONFORMAÇÃO DE METAIS NA DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS, TAXAS DE DEFORMAÇÃO E PRECISÃO DIMENSIONAL

<sup>1</sup> Debora Viviane Faro Oliveira (Senai- CIMATEC) – debora.vfo@gmail.com; <sup>2</sup> Fernando Okigami (Senai - CIMATEC) – fernando@okigami.com.br; <sup>3</sup> Rodrigo Santiago Coelho (Senai- CIMATEC) – rodrigo.coelho@fieb.org.br

**Resumo:** Pacotes de simulação numérica computacional são uma poderosa ferramenta utilizada pela indústria para prever resultados de processos e desempenho de produtos. Este trabalho tem por objetivo avaliar o uso do software Simufact Forming®, que utiliza o método de elementos finitos e volume finitos para simular processos de conformação de metais. A partir de uma revisão de literatura, três estudos de casos foram selecionados para avaliar a precisão e previsibilidade dos resultados apresentados na simulação em comparação com o resultado do teste real. O software apresentou desempenho consistente e satisfatório na determinação nos diferentes aspectos analisados: esforços e cargas de forjamento, taxa de deformação do material no forjamento e especificação dimensional do produto forjado.

**Palavras-Chaves:** Simufact Forming, forjamento, elementos finitos, simulação numérica, modelagem computacional

## THE USE OF COMPUTATIONAL MODELING OF METALS IN THE DETERMINATION OF EFFORTS, DEFORMATION RATES AND DIMENSIONAL ACCURACY

**Abstract:** Computational numerical simulation packages are a powerful tool used by industry to predict process outcomes and product performance. This work aims to evaluate the use of Simufact Forming software, which uses the finite element and finite volume method to simulate metal forming processes. From a literature review, three case studies were selected to evaluate the accuracy and predictability of the results presented in the simulation compared to the real test result. The software presented consistent and satisfactory performance in determining the different aspects analyzed: forging efforts and loads, deformation rate of forging material and dimensional specification of the forged product.

**Keywords:** Simufact Forming, forging, finite element, numerical simulation, computational modeling



## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da competitividade na indústria tem obrigado as empresas a investirem em tecnologias não apenas com foco em aumentar o *market share*, mas também para se tornarem cada vez mais competitivas. Para acompanhar a tendência do mercado industrial, as empresas se utilizam de ferramentas tecnológicas que simulam e modelam virtualmente produtos e processos [1,2].

Com o advento da Digitalização da produção e a Indústria 4.0, a modelagem computacional avança no desenvolvimento de processos aliados à alta qualidade de produtos e estabilidade da produção. A ação de replicar virtualmente um comportamento real de um sistema através de modelos analíticos já é uma realidade [3]. Dentre inúmeros modelos, o método de elementos finitos (MEF) é amplamente utilizado na conformação de metais com o objetivo de prever a qualidade do produto acabado além de obter maior controle do processo – distribuição de cargas e esforços, deformação do material e variáveis do ferramental [2,3,4].

Entretanto, a qualidade dos resultados está diretamente relacionada aos parâmetros de entrada dos modelos de simulação, onde podemos destacar: propriedades mecânicas, densidade, módulo de elasticidade, condutividade térmica, calor específico, coeficiente de atrito, curva tensão-deformação, microestrutura, etc. Propriedades estas obtidas na literatura, na biblioteca dos softwares e/ou coletadas através de experimentos laboratoriais [4,5].

Simufact Forming é um software de simulação de processos de conformação de metais, desenvolvida pela Simufact Engineering, uma subsidiária da MSC Software sediada em Hamburgo, Alemanha. O software utiliza de dois métodos de cálculo numérico para simulação, volumes finitos baseado na tecnologia Dytran e elementos finitos na tecnologia Marc, ambos reproduzem modelagem de processos dos fenômenos físicos complexos e não lineares, oferecendo alta precisão de resultados no uso da termomecânica e conformação elasto-plástica [9].

O Simufact Forming realiza simulação bidimensional (axissimétrica e plana) e tridimensional na mesma interface permitindo transição entre as duas. O uso do software permite a simulação de etapas únicas ou combinadas de processos através dos módulos de aplicação, processos de conformação e tratamento térmico de materiais e seus efeitos combinados na análise de fadiga e falhas. Com um banco de dados de 750 materiais, possibilita a importação de CAD de formatos mais comuns, armazenamento da rotina de modelagem com controle de estágios possibilitando o desacoplamento dos componentes durante o processo da simulação [9].

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso da simulação numérica na modelagem do processo de conformação de metais. As análises foram feitas a partir de estudos da literatura que utilizaram o software Simufact Forming® para prever diferentes aspectos do processo de conformação por forjamento. A proposta foi avaliar o uso desta ferramenta na determinação de parâmetros críticos do processo: (i) esforços e cargas necessárias no forjamento [6]; (ii) taxas de deformação do material durante o forjamento [7]; (iii) especificação dimensional do produto forjado [8].



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O uso da simulação numérica na modelagem do processo de conformação de metais foi avaliado baseado em três (03) casos selecionados da literatura. Todos utilizando o software de simulação *Simufac Forming*:

### *Caso I: Predição de cargas no forjamento de liga Ti-6Al-4V [6]*

- Objetivo: Estudo comparativo entre a predição da força do forjamento calculada *versus* a força de forjamento medida no experimento físico.
- Materiais e métodos: Dois componentes foram analisados, flange aplicada na indústria de extração e polia utilizado na indústria automotiva. Os dois componentes feitos de Ti-6Al-4V de barras de 40 e 50mm de diâmetro respectivamente. As peças foram forjadas em matriz fechada em uma prensa hidráulica. Ambos os corpos de prova seguiram toda a dinâmica de modelagem e simulação do software.
- Parâmetros: Temperatura das matrizes 300 °C, temperatura do tarugo 980 °C, velocidade da prensa hidráulica 7 mm/s, tempo de resfriamento do tarugo 10 segundos, coeficiente de atrito 0.3 e coeficiente de transferência de calor por contato 5000 watt/ (m<sup>2</sup>\*K).
- Variáveis principais: velocidade da prensa, temperatura da ferramenta, lubrificante e temperatura.

### *Caso II: Projeto e fabricação de rebite de alumínio 1100 [7]*

- Objetivo: Impacto da utilização da simulação computacional no projeto e fabricação de rebites.
- Materiais e métodos: avaliação do ferramental para a produção de rebites feitos de alumínio 1100. As fases de desenvolvimento do produto foram simuladas desde os requisitos, projeto conceitual, validação do ferramental e sistema físico.
- Parâmetros<sup>1</sup>: temperatura de conformação ambiente, prensa de três estrágios, projeto dimensional em 3D no Solidworks e exportado para o Simufact.
- Variáveis principais: ângulos e raios da ferramenta, diâmetro do flange do rebite e preenchimento no flange.

### *Caso III: Dimensional e qualidade do forjado [8]*

- Objetivo: Atingir alta precisão dimensional e qualidade na superfície do forjado.

---

<sup>1</sup> Dados específicos de parâmetros de processo como velocidade de prensa, coeficientes de atrito e tempo de transferência não foram fornecidos pelo autor



- Materiais e métodos: Engrenagens com dentes retos e eixo vazado feitos de 16MnCr5 fabricados por forjamento com matriz fechada. Simulação computacional do teste de Zidek<sup>2</sup> e forjamento a quente do produto.
- Parâmetros: tarugos com entalhes são forjados em um prensa LZK1600 até a deformação de um terço da altura do tarugo (13mm) e em seguida aquecidos a temperaturas de 600, 650, 700 e 750 °C, para avaliação do comportamento do entalhe.
- Variáveis principais: Pré-aquecimento, grau de formabilidade e comportamento do material dentro da cavidade.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos de caso serão analisados comparando os resultados apresentados pela simulação versus o teste real, a partir dos parâmetros de processos e geometria do produto e ferramenta.

#### *Caso I: Predição de cargas no forjamento de liga Ti-6Al-4V [6]*

Com o objetivo de comparar a predição da força do forjamento simulada com a força de forjamento medida no experimento físico, a comparação da simulação versus experimento apresentou uma variação de +6.5% para o flange e +2.1% na força de carga. Os resultados estão compilados na Tabela 1. Os autores classificaram os resultados como aceitáveis, visto que os dados imputados foram obtidos a partir de bibliografias e banco de dados do software. Os mesmos relatam que os erros podem ser minimizados com a realização de testes específicos do processo [6].

Tabela 1. Caso I valores de carga de conformação [6]

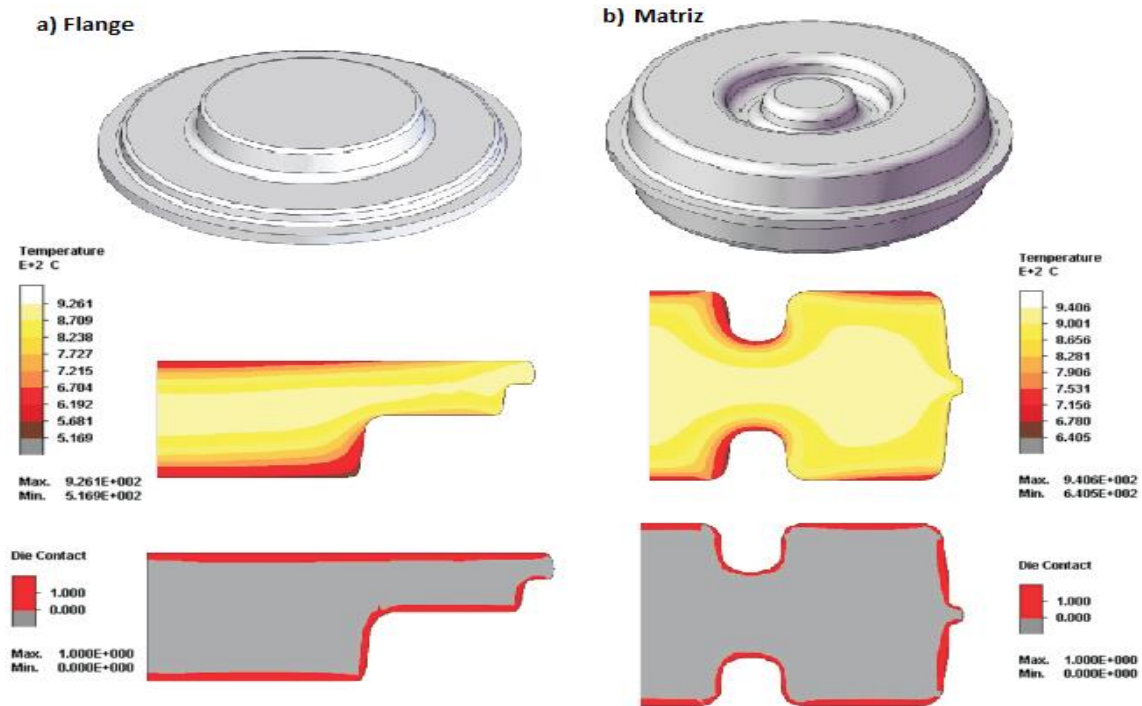
Peça	Valor medido	Valor simulado	Dif. relativa
Flange	3100 KN	3300 KN	+6.5%
Polia	1920 KN	1960 KN	+2,5%

A Figura 1 evidencia o completo preenchimento da cavidade tanto do flange quanto da polia na simulação e a temperatura durante a conformação. Analisando o preenchimento da cavidade e geometria da peça pode-se concluir que a simulação obteve resultados satisfatórios, confirmando a eficiência da simulação do processo [6]

<sup>2</sup> O teste de Zidek é um teste realizado para verificar a forjabilidade a quente de um material cujo corpo de prova cilíndrico, com quatro entalhes ao redor da circunferência é submetido a uma força de forjamento vertical LZK 1600 em quatro temperaturas diferentes.



Figura 1: Caso I: temperatura e preenchimento da matriz [6]



Com base nos resultados, variação +6.5% e + 2,5% no flange e polia respectivamente, e distribuição de temperatura e material dentro da cavidade da matriz pode-se afirmar a aplicabilidade e eficiência do *Simufact Forming* na determinação de parâmetros de processos ao realizar a predição da força de carga de forjamento em matriz fechada de peças de liga de titânio.

#### Caso II: Projeto e fabricação de rebite de alumínio 1100 [7]

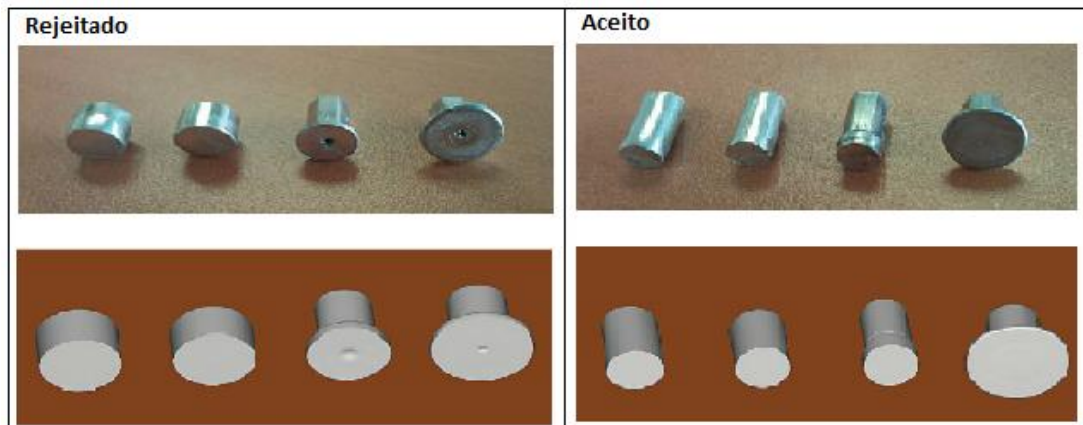
O estudo de caso II é um exemplo da funcionalidade da *Simufact Forming* em prever o comportamento mecânico e fluxo de material na cavidade da ferramenta baseado nas características do material, geometria da ferramenta e parâmetros do produto final, e de como a não utilização da simulação pode impactar um projeto.

Foi realizado uma alteração no raio da ferramenta sem analisar através da simulação os impactos causados no produto final, seguindo para fabricação da ferramenta e produto final. A mudança no raio da ferramenta alterou o fluxo de material dentro da cavidade e comprometeu o material de preenchimento no flange gerando rejeição do produto pelo cliente conforme Figura 2. Com a rejeição da peça pelo cliente, a empresa assumiu todos os custos de retrabalho do projeto, fabricação da nova ferramenta, das peças rejeitas, do retrabalho do projeto com remodelagem computacional.



O resultado na nova remodelagem identificou a necessidade de alterar a geometria do produto final, aumentando o diâmetro do flange para garantir 100% de material de preenchimento devido a alteração do raio na ferramenta.

Figura 2: Antes e depois da peça e simulação computacional 3D [7]



Na Figura 2, a representação digital e física das duas fases do projeto são apresentadas, no lado esquerdo a peça rejeita e a simulação após não aceitação do cliente e no lado direito o projeto retrabalho, com novo diâmetro do flange.

Neste estudo o Simufact Forming apresenta não apenas confiabilidade em reproduzir computacional o processo da conformação como a importância da simulação computacional na indústria para analisar os impactos que mudanças de parâmetros de processos podem alterar o resultado final. Neste caso, a alteração do raio impactou em má distribuição de material na cavidade e para garantir 100% de material de preenchimento foi necessário remodelar a geometria da peça final.

### *Caso III: Dimensional e qualidade do forjado [8]*

No estudo de caso III o Simufact Forming foi aplicado para simular o teste de Zidek, modelagem geométrica da peça final e ferramenta, além de simular o processo de forjamento do produto final. Baseado na metodologia adotada neste artigo, comparar resultado real versus simulação, apenas o teste de Zidek será utilizado para analisar a precisão e previsibilidade do software.

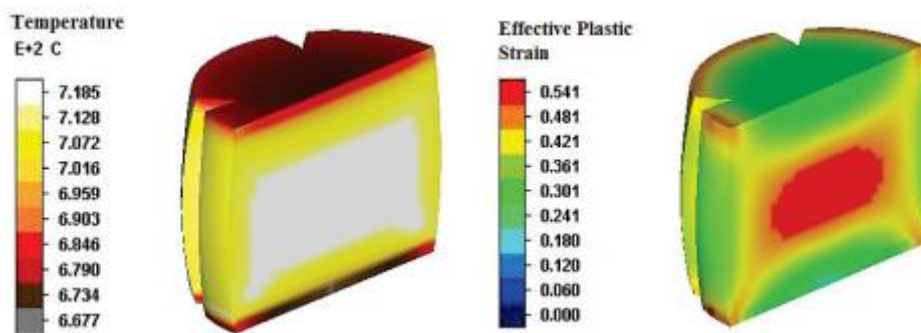
As Figura 3 apresenta o resultado final do teste físico e computacional do corpo de prova após a conformação e temperatura enquanto a Figura 4 apresenta a simulação da temperatura e distribuição de tensão no corpo de prova após a conformação e temperatura a 700 °C.



Figura 3: Deformação a 700°C: a) experimento físico b) simulação [8]



Figura 4: Distribuição de temperatura e tensão no corpo de prova a 700°C [8]



Após as etapas de pré-aquecimento e forjamento, os entalhes ao redor do corpo de prova foram avaliados e classificados conforme grau de formabilidade estabelecido. Ao reproduzir com precisão os resultados da simulação computacional e os testes termomecânicos, o software comprova a sua precisão e previsibilidade em prever o comportamento mecânico do material e deslocamento de descontinuidade geométricas do produto em processos de conformação onde ocorre a variação de temperatura.

#### 4. CONCLUSÕES

Ao se comparar os resultados das simulações computacionais e experimentos físicos dos estudos de casos selecionados, pode-se garantir a aplicabilidade, precisão e previsibilidade do Simufact Forming em reproduzir o fluxo de material e comportamento mecânico em processos de conformação metais:

- Caso I: o software é utilizado como ferramenta para definir parâmetros de processos determinando a carga de operação para forjar um flange e polia de liga de titânio baseado na geometria de projeto.



- Caso II: é evidente os impactos negativos com custos adicionais de produção e nova ferramenta à empresa ao não utilizar a simulação após modificar a geometria da ferramenta na fase de projeto.
- Caso III: o software apresenta elevada eficiência ao simular o comportamento do material no corpo de prova ao ser submetido pelas etapas de conformação a quente do teste de Zidek.

Em todos os casos analisados o resultado da simulação computacional foi comparado ao experimento físico e o Simufact Forming apresentou dados consistentes e satisfatórios na determinação dos diferentes aspectos analisados: esforços e cargas de forjamento, taxa de deformação do material no forjamento e especificação dimensional do produto forjado.

A partir qualidade dos resultados apresentados pelo Simufact na reprodução de processos de conformação através da simulação computacional, pode-se sugerir simulações de conformação de chapas a quente com aquecimento a joule e forno de indução, seguindo a metodologia adotada neste artigo, comparando simulação computacional versus experimento físico.

## 5. REFERÊNCIAS

<sup>1</sup> YURTDAS, Sezgin et al. A case study for improving tool life in cold forging: Carbon fiber composite reinforced dies. **Research on Engineering Structures & Materials**, 2016.

<sup>2</sup> MANDIĆ, Vesna et al. Concurrent engineering based on virtual manufacturing. **Tehnički vjesnik**, v. 19, n. 4, p. 885-892, 2012.

<sup>3</sup> AMARAL, Ricardo de Moraes. **Métodos computacionais em engenharia mecânica**. 2008. Tese de Doutorado. FCT-UNL.

<sup>4</sup> CUNHA, Patrick Marques da. **Simulação numérica do processo de estampagem a quente**. 2016. Dissertação de Mestrado.

<sup>5</sup> NIELSEN, Karl Brian et al. Sheet metal forming simulation using explicit finite element methods. In: **EURODYN'93, Trondheim, Norge, 1993**. 1993

<sup>6</sup> DE LIMA, Eng<sup>o</sup> Diego Rodolfo Simões et al. Simulação Numérica na Predição de Carga de Conformação. 2010.

<sup>7</sup> WALKER, M.; ASHLEY, R. Aluminum Automotive Rivet Forming: Case Study Using Simulation Software. **Fastener Technology International**, v. 35, n. 4, p. 28-29, 2012.

<sup>8</sup> KAPUSTOVÁ, Mária; GÖRÖGOVÁ, Ingrid. Application of computer simulation at optimization of technological parameters of precision die forging. **Technical Gazette**, v. 23, n. 2, p. 357-361, 2016.

<sup>9</sup> MSC Software Company. **Simufact Simulating Manufacturing**. Disponível em: <<https://www.simufact.com/simufactforming-forming-simulation.html>> Acesso em: 1 de julho de 2018.