

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/336315186>

Simulação Numérica por Elementos Finitos no Desenvolvimento do Processo Forjamento em Matriz Fechada de Bielas de Alumínio AA6351

Article · October 2019

CITATIONS

0

READS

42

3 authors:



[Luana De Lucca de Costa](#)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

41 PUBLICATIONS 13 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[André Rosiak](#)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

18 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)



[Lirio Schaeffer](#)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

328 PUBLICATIONS 892 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Incremental Sheet Metal Forming [View project](#)



Tool for Forgings [View project](#)

Simulação Numérica por Elementos Finitos no Desenvolvimento do Processo Forjamento em Matriz Fechada de Bielas de Alumínio AA6351

Luana De Lucca de Costa, André Rosiak, Lirio Schaeffer, Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM, UFRS - Porto Alegre, RS - Brasil

Os sistemas CAD (Computer-Aided Design) e CAE (Computer-Aided Engineering) são ferramentas poderosas para redução de custos de um projeto e minimizam, consideravelmente, o tempo de lançamento do produto final. Enquanto o CAD volta-se a investigação em geometria computacional, modelamento e computação gráfica; o CAE engloba simulação, validação e otimização de produtos e ferramentas em processos de fabricação e é o principal provedor de informação às equipes de projeto nas tomadas de decisões. A principal técnica de CAE é o método de análise por elementos finitos (FEM - Finite Element Method). Neste trabalho, são apresentadas todas as etapas computacionais de desenvolvimento de um processo de forjamento em matriz fechada multietapas de bielas de alumínio AA6351. São discutidos os principais aspectos de projeto de matrizes, forjamento de pré-formas e dados de entrada para simulação numérica satisfatória do processo. Ainda, resultados de tensão, deformação, temperatura, preenchimento das cavidades da matriz e força necessária para realização das etapas de forjamento da pré-forma e da peça final são analisados.

Devido a competitividade na indústria de forjados nos últimos anos, a qualidade dos produtos forjados oferecidos é um fator cada vez mais importante na escolha de um fornecedor. Isso se aplica particularmente aos clientes das indústrias automotiva e aeronáutica, onde os requisitos quanto à precisão e qualidade do forjamento são os mais altos. Os processos de forjamento, embora amplamente desenvolvidos, pertencem a uma das técnicas de fabricação mais difíceis para peças de geometria complexa (bielas, juntas universais, turbinas, alavancas, etc.) [1,2].

As tecnologias computacionais são os recursos utilizados para atendimento das exigências do processo produtivo de forjados de alta qualidade, pois possibilitam aprimorar ações de desenvolvimento admitindo maior facilidade, eficácia e agilidade na obtenção de produtos e processos inovadores. Desse modo, a incorporação de sistemas computacionais

em processos de fabricação permite a otimização no desenvolvimento de produtos forjados, tomada prévia de decisão em cada fase do processo e redução da repetição de tarefas que oneram o desenvolvimento de produtos e processos em tempo e custo [3].

O termo Computer-Aided (assistido por computador) engloba os sistemas criados para alcançar o produto final da forma mais rápida possível, usando o poder dos computadores para processamento. Em CAD, a última abreviação vem do termo Design, para o CAE

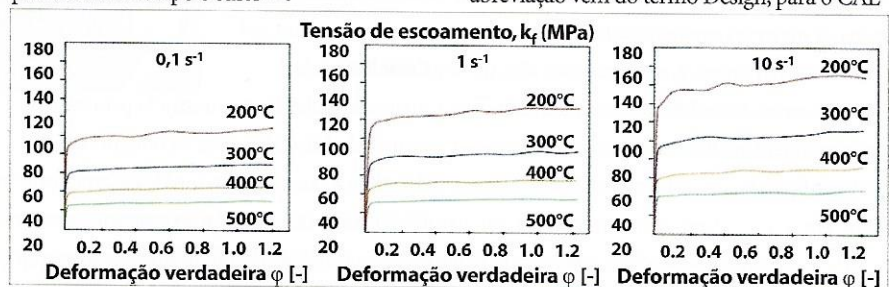


Fig. 1. Curvas de escoamento do AA6351 para diferentes temperaturas e velocidades de deformação

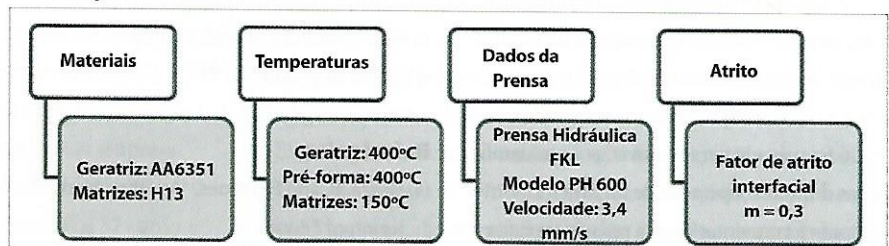


Fig. 2. Parâmetros utilizados no processo de simulação

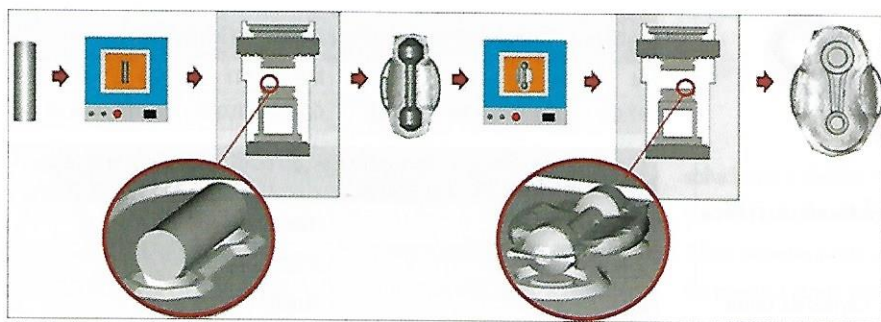


Fig. 3. Etapas planejadas para o processo de forjamento

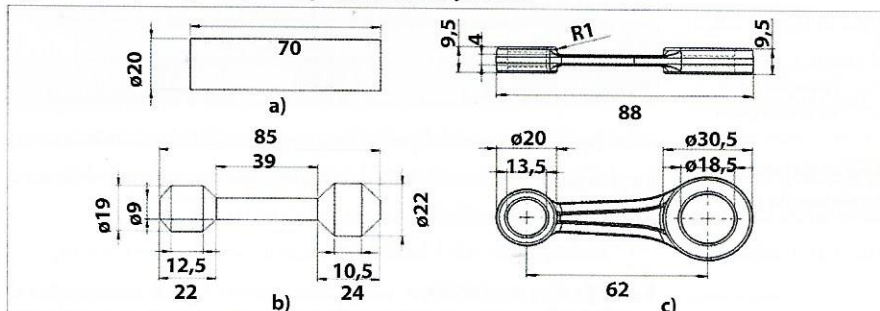


Fig. 4. Representação 2D. Principais dimensões: (a) Geratriz Inicial; (b) Pré-forma; e (c) Peça final

- Engineering e para o CAM - Manufacturing. Juntos, permitem o aumento na produtividade e qualidade nos projetos, otimização da documentação do processo e desenvolvimento

do produto, e a criação de bancos de dados para manufatura.

Um programa CAD (Computer-Aided Design) é um software com foco no desenho

do produto e na documentação da fase de projeto. Ele pode facilitar o processo de manufatura, transferindo diagramas detalhados dos materiais utilizados nos produtos, processos, tolerâncias e dimensionamentos. Isso pode ser usado tanto para a modelagem 2D e 3D, possibilitando a rotação em qualquer ângulo para todas as vistas, quanto para a vista de dentro para fora [4].

Softwares de engenharia desenvolvidos para apoiar a análise de elementos finitos (FEM), dinâmica computacional de fluidos (CFD), dinâmica de multicorpos (MDB) e otimização formam o sistema CAE (Computer-Aided Engineering). Estes, estão sendo usados, por exemplo, para analisar a robustez e o desempenho de componentes e conjuntos. O termo engloba simulação, validação e otimização de produtos e ferramentas de fabricação [5]. Atualmente, o método de análise por elementos finitos (FEM - Finite Element Method) é o empregado em softwares de

VIII Seminário Tecnologia FORJAMENTO

SAVE THE DATE - 04 e 05 de Novembro 2020

Realização:



Grupo Aprenda

CONTATO

Udo Fiorini - Diretor

(19) 99205-5789

(19) 3288-0677

udo@grupoaprenda.com.br



www.grupoaprenda.com.br



contato@grupoaprenda.com.br

Aprenda Eventos Técnicos Eireli

CNPJ: 74.361.288/000166

Rua Ipauçu, 178 - Vila Marieta

Campinas/SP - CEP: 13042-150

(19) 3288-0437

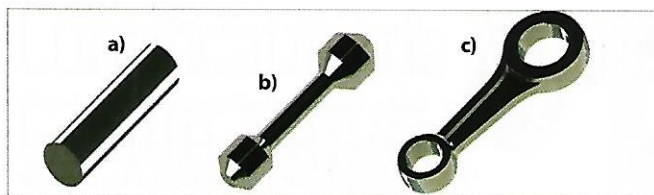


Fig. 5. Representação 3D: (a) Geratriz Inicial; (b) Pré-forma; e (c) Peça final

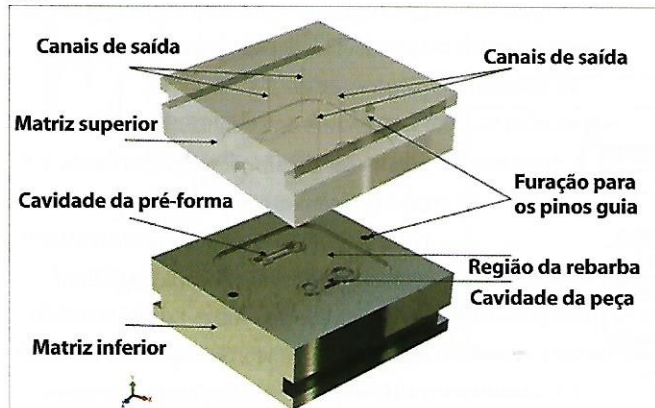


Fig. 6. Vista da montagem em 3D das matrizes superior e inferior

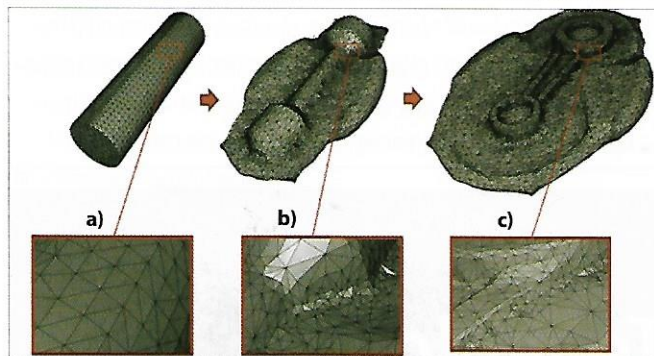


Fig. 7. Formação e distorção dos elementos da malha: (a) malha inicial da geratriz; (b) distorção após a conformação da pré-forma e (c) distorção após o forjamento da peça final

simulação numérica de processos de fabricação [6] e, em linhas gerais, é definido como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados.

No forjamento de bielas a descrição tridimensional de um componente no sistema CAD, dentro de tolerâncias que atingem o mínimo 1/10mm é fundamental para uso destas informações para etapas seguintes: simulação computacional (CAE) ou fabricação de matrizes (CAM - Computer-Aided Manufacturing) [3]. Aqui, as etapas computacionais de desenvolvimento CAD e CAE são apresentadas para um processo de forjamento em matriz fechada em multietapas para fabricação de bielas de alumínio AA6351. Ainda, são discutidos os principais aspectos de projeto de matrizes, forjamento de pré-formas e dados de entrada para simulação numérica satisfatória do processo. Os resultados de tensão,

Tabela 1. Composição química (% massa) do AA6351

Al	Si	Fe	Mg	Mn	Ti	Zn	Cu
97,07	0,42	0,29	0,82	0,24	0,013	0,013	0,18

Tabela 2. Parâmetros otimizados do AA6351 para o modelo matemático de Hensel-Spittel

Parameters	Hensel-Spittel
σ_0 (MpA)	303,5
m1	-0,0043
m2	0,103
m3	0,057
T (C°)	400

deformação, temperatura, preenchimento das cavidades da matriz e força necessária para realização das etapas de forjamento da pré-forma e da peça final são analisados.

Seleção dos materiais

O material selecionado para a fabricação da peça foi a liga de alumínio AA 6351, disponível comercialmente. A composição química do material é listada na Tabela 1.

As curvas de escoamento determinadas experimentalmente mostram que não somente a deformação, mas também a velocidade de deformação e a temperatura influenciam o escoamento do AA6351 [3]. A Fig. 1 mostra a relação entre o aumento da tensão de escoamento com a temperatura e a velocidade de deformação.

Entretanto, a inserção das curvas de escoamento do material no software de simulação numérica, mais facilmente, é necessária que elas possam ser representadas por uma equação matemática, considerando o modelo de Hensel-Spittel, Equação 1. A Tabela 2 apresenta os valores otimizados para o AA6351 dos parâmetros para equação.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-m_1 T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \quad \text{Equação 1}$$

As propriedades térmicas e mecânicas para o AA6351 são listadas na Tabela 3. O aço ferramenta para trabalho a quente H13, comercialmente disponível, foi utilizado para a fabricação das matrizes. As propriedades térmicas e mecânicas do aço H13 são listados na Tabela 4. O material já era cadastrado no banco de dados do software, assim, a inserção das curvas de escoamento não foi necessária.

Parâmetros do Processo

Os parâmetros utilizados são de grande importância para um resultado confiável da simulação. Utilizaram-se os dados de entrada mostrados na Fig. 2

O processo de forjamento foi planejado de acordo com a disposição e dinâmica dos equipamentos do Laboratório de Transformação

Tabela 3. Parâmetros otimizados do AA6351 para o modelo matemático de Hensel-Spittel

Parameters	Valores
Densidade (kg/m ³)	2600
Coefficiente de Poisson	0.33
Módulo de Young (GPa)	70-80 (Dependente da T)
Calor específico (J/(g·K))	0.89
Condutibilidade térmica (W/(m·K))	176
Coefficiente de transferência de calor (geratriz-ferramenta) (W/(m ² ·K))	12.5 (150MPa)

Tabela 4. Propriedades térmicas e mecânicas do aço H13

Parameters	Valores
Densidade (kg/m ³)	7690
Coefficiente de Poisson	0.33
Módulo de Young (GPa)	210 (Dependente da T)
Calor específico (J/(g·K))	0.460
Condutibilidade térmica (W/(m·K))	24.7

mação Mecânica (LdTM). Assim, a geratriz cilíndrica é aquecida a 400°C, transferida para a matriz para o forjamento da pré-forma, forjada, transferida novamente para o forno, reaquecida a 400°C, transferida para a matriz para forjamento da peça final, e forjada. A representação esquemática do processo é mostrada na Fig. 3.

O conhecimento prévio da disponibilidade, capacidade e dinâmica dos equipamentos necessários para a realização das etapas para do processo é de extrema importância para a correta inserção de dados nos softwares de simulação. Um exemplo, nesse processo, são os intervalos de transferência e reaquecimento da pré-forma, que precisam ser inseridos corretamente no software para que o cálculo de resfriamento aconteça de forma ideal.

CAD - Modelagem 2D e 3D

A modelagens da matriz e das geratrizes para o processo de forjamento foram realizadas utilizando o programa CAD do software SolidWorks®. As principais dimensões da peça final, pré-forma e da peça final são mostradas nas imagens 2D da Fig. 4.

As modelagens 3D do conjunto das geometrias são mostradas na Fig. 5. A uti-

lização do sistema CAD permitiu uma série de otimizações com relação a modelagem da peça, das geratrizes e das matrizes de forjamento, pois, a partir do modelamento da peça é possível modelar todo o ferramental de forma simplificada e iterativa.

Na representação virtual da peça forjada foi modelado uma possível geometria da rebarba na peça final, desta forma, foi estimado pela lei da conservação do volume as dimensões da geratriz inicial. A geratriz inicial foi dimensionada de forma a ter o mesmo volume da peça final a ser forjada mais o volume da rebarba.

Os desenhos do canal e do poço de rebarba são necessários também para que se possa desenvolver o projeto do ferramental. Os parâmetros de projeto de matrizes

de forjamento são encontrados na literatura em Schaeffer (2006) e Rodrigues et al. (2005) [7,8]. A Fig. 6 mostra a vista de montagem da matriz superior e inferior, bem como, os canais para saída de ar, a cavidade dos pinos guias e a região de rebarba.

CAE – Simulação Numérica

A simulação numérica auxilia o processo de forjamento através de análises da fabricação das peças dentro das especificações. São analisados parâmetros envolvidos no processo, tais como: a geometria da geratriz e das matrizes, as tensões e deformações ocorridos durante o processo, determinação da força e temperatura durante o forjamento (fundamentais para seleção dos equipamentos), entre outros. Através dos resultados apresentados pela simulação pode-se verificar se a peça forjada será obtida livre de defeitos.

O método de elemento finito foi o escolhido para analisar o processo de forjamento, devido à geometria da peça, utilizou-se a simulação em 3D, cujos resultados são mais confiáveis e adequados para o forjamento a quente, conforme indica a literatura apresentada pelo fabricante do software e pesquisas realizadas [2].

O software utilizado na simulação numérica das duas etapas do processo de forjamento apresentado foi o Forge® NxT2.1, desenvolvido pela Transvalor. O FORGE® NxT é um software para a simulação de processos de conformação a quente e a frio

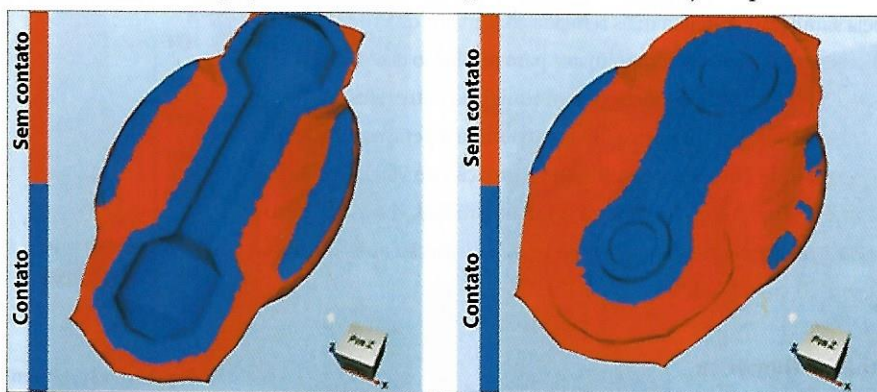


Fig. 8. Áreas de contato com a matriz após o forjamento: (a) pré-forma e (b) peça final

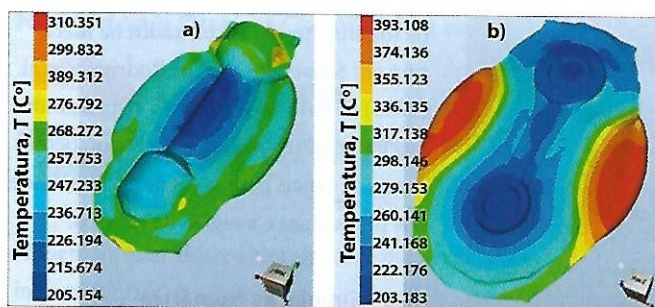


Fig. 9. Temperatura no final do forjamento: (a) pré-forma e (b) peça final

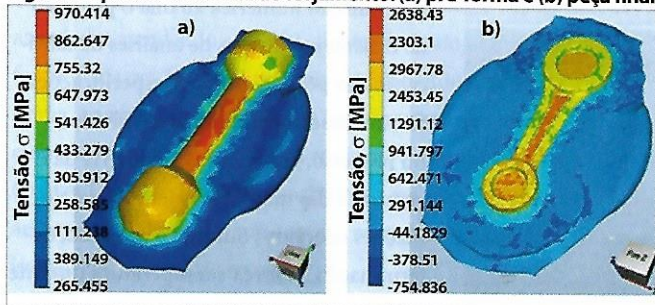


Fig. 10. Distribuição de tensão: (a) pré-forma e (b) peça final

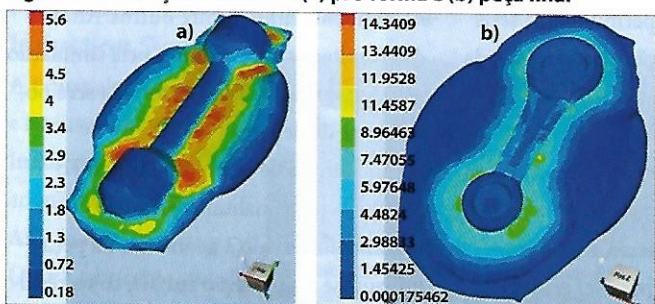


Fig. 11. Deformação plástica: (a) pré-forma e (b) peça final

e atende às necessidades de empresas que produzem peças para uma variedade de setores industriais. O FORGE® NxT permite a simulação de muitos processos de conformação a quente, como forjamento em matriz fechada, forjamento em matriz aberta, laminação, extrusão, trefilação, conformação de chapas metálicas, estampagem profunda, corte, perfuração, e alguns outros processos não convencionais [9].

O tamanho de malha, o tipo e o número de elementos gerados pelo software, influenciam diretamente nos resultados apresentados pela simulação. A malha mais refinada com maior quantidade de elementos resulta em um tempo maior para resolução dos cálculos. Por isso, é necessário que se encontre um equilíbrio entre estes fatores.

Na simulação numérica 3D foi atribuída à geratriz uma malha triangular de 2mm, que resultou na formação de 9601 elementos pelo software. A Fig. 7 mostra a (a) malha inicial, (b) a distorção após a conformação da pré-forma e (c) a distorção após o forjamento da peça final.

Análise Numérica

Os resultados de contato entre as ferramentas e a geratriz após

o fechamento das matrizes validam o projeto do ferramental e o dimensionamento da geratriz e da pré-forma. A Fig. 8 mostra as regiões de contato entre (a) matriz e a pré-forma e (b) entre a matriz e a peça final.

Na Fig. 8 nota-se o completo preenchimento das cavidades e, assim, o projeto do ferramental, geratriz inicial e da pré-forma são validados. Diferentes geometrias para a geratriz podem ser testadas para a redução da rebarba ou seu melhor direcionamento e distribuição.

A temperatura inicial pré-determinada e o resfriamento influenciam no escoamento do material. A Fig. 9 mostra a distribuição da temperatura ao final de cada forjamento. Conforme mostra a Fig. 9a, após o forjamento, a pré-forma apresenta uma distribuição de temperatura inferior a 250°C o que inviabilizaria o forjamento sequencial da peça final e determina a necessidade de reaquecimento.

Assim, para o forjamento da peça final é necessário que a pré-forma volte a ser aquecida a 400°C, conforme é mostrado nas etapas planejadas para o processo (Fig. 3). Já a Fig. 9b, mostra que o peça final apresentou o mesmo perfil de resfriamento da pré-forma, terminando o processo entre 200 e 250°C.

As distribuições de tensão e deformação são mostradas nas Figs. 10 e 11. Percebe-se que as regiões de maior tensão são as correspondentes a de maior deformação. A região de maior deformação é a região da saída do canal de rebarba em ambas as etapas de forjamento.

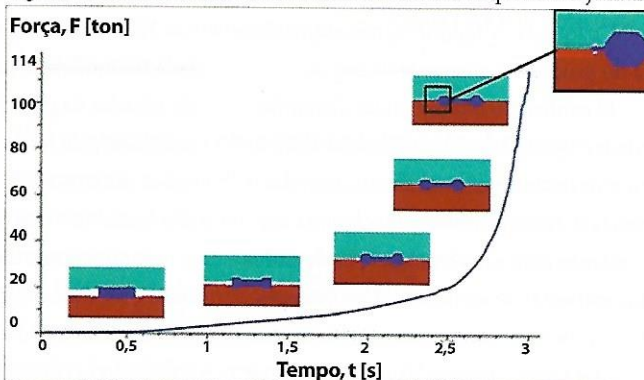


Fig. 12. Comportamento da força versus tempo no forjamento da pré-forma na simulação numérica

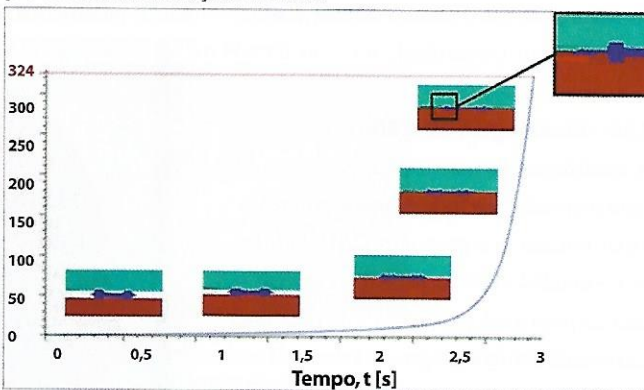


Fig. 13. Comportamento da força versus tempo no forjamento da peça final na simulação numérica

to. Nessa região há um estreitamento para que haja dificuldade do material fluir nessa direção antes de completar o preenchimento das cavidades para formação da pré-forma e forma final.

A alta tensão concentrada no corpo da pré-forma, Fig. 10a, deve-se ao escoamento do material da geratriz para as regiões periféricas a partir da conformação da região central. Como é mostrado nas etapas de planejamento do processo (Fig. 3), o posicionamento da geratriz na matriz de forjamento da pré-forma, é feito na região central, sendo as outras regiões formadas a partir do escoamento do material para as regiões. Ainda, ocorre uma distribuição de tensões e deformação homogênea em ambas as etapas de forjamento. Sendo esta geometria não apresenta expressivos concentradores de tensão para a peça final.

Os resultados gráficos de força versus tempo para as etapas de forjamento são mostrados nas Figs. 12 e 13. Ambos os gráficos apresentam o mesmo perfil mostrado na literatura ^[8,9] para processos convencionais de forjamento a quente em matriz fechada. À medida que a ferramenta vai se deslocando e forjando o material, é necessário um maior esforço para continuar o forjamento, isso se deve principalmente ao resfriamento do material, devido ao contato com as matrizes, e também pela dificuldade no preenchimento impostas pela geometria. Em ambos os gráficos são mostrados a que pontos, durante o processo de forjamento, correspondem os acréscimos na força necessária à conformação. Conforme mostram os gráficos, são necessárias 114 toneladas para o forjamento da pré-forma e 324 toneladas para o forjamento da peça final. A força aumenta expressivamente próximo ao final do processo, quando o material inicia seu escoamento pela região do canal de saída da rebarba até o completo fechamento da matriz.

Conclusões

Este estudo propôs apresentar todas as etapas computacionais de desenvolvimento de um processo de forjamento em matriz fechada multietapas de bielas de alumínio AA6351, através do uso de diferentes softwares CAD e CAM concluiu-se que:

- A utilização do sistema CAD permitiu otimizações com relação a modelagem da peça, das geratrizes e das matrizes de forjamento;
- A partir do modelamento CAD da peça foi possível modelar todo o ferramental de forma simplificada e iterativa;
- No sistema CAE, o tamanho de malha, o tipo e o número de elementos gerados pelo software, influenciam diretamente nos resultados apresentados pela simulação;
- O ferramental projetado mostrou-se viável para o forjamento da peça final através do uso de uma pré-forma;
- É necessário o reaquecimento da pré-forma para o forjamento da peça final;
- As regiões de maior deformação são nas saídas para o canal de rebarba;

- O comportamento força versus tempo segue os perfis já apresentados anteriormente na literatura. 

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 as instituições de apoio financeiro CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). À empresa AutoLens, na pessoa do Sr. Oswaldo Ravanini, pela disponibilização do software Forge® NxT 2.1.

Referências

- [1] DOEGE, E. et al. (1992). Hot forging of precision parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 65. Páginas 469-481.
- [2] MARQUES, A. S. et al. (2015) Sistema CAD/ CAE/CAM no forjamento de geometria de média complexidade. *Revista Forge*. Edição de Abril. Páginas 21-25.
- [3] MARQUES, A. S. et al. (2018) Optimizing Hot Forging Process Parameters of Hollow Parts Using Tubular and Cylindrical Workpiece: Numerical Analysis and Experimental Validation.
- [4] SALDANHA, L. (2017) CAD, CAE E CAM: Qual a diferença entre eles? *Revista eletrônica 4ieng*. Disponível em: <https://www.4ieng.com.br/>.
- [5] ZANOLLA, T. (2018) Gestão da Tecnologia e Informação. *Revista eletrônica*. Disponível em: <https://www.autoyas.com>.
- [6] SALLES, F. P. (2008) Aplicação do Método de Elementos Finitos para Aprimoramento da Análise de Motores de Indução Trifásicos Acionados por Inversores. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] SCHAEFFER, L. (2006) Forjamento (Introdução ao Processo). Editora: Imprensa Livre, Porto Alegre, Brasil.
- [8] RODRIGUES, J. et al (2005) Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação plástica – Vol. II Aplicações Industriais. Editora: Escolar Editora. Lisboa, Portugal.
- [9] FORGE®. Best-in-class simulation software for the forging industry. Transvalor. Disponível em: www.transvalor.com.

A autora **Luana De Lucca de Costa** é Engenheira Mecânica, Mestre em Processos de Fabricação. Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais (PPGE3M) da UFRGS.

O autor **André Rosiak** é Engenheiro Metalúrgico, Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais (PPGE3M) da UFRGS.

O autor **Lirio Schaeffer** é Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia, Professor Titular na UFRGS. Os autores podem ser contatados pelos e-mails luana.lucca@ufrgs.br, andre.rosiak@ufrgs.br e schaefer@ufrgs.br.

O Uso da Manufatura Aditiva em Matrizes de Forjamento

- ▶ **Especial:**
Entrevista Prensas Schuler
- ▶ **Simulação do Tamanho de Grão no Forjamento**
- ▶ **Aumente a Vida da Matriz com Solda por Inundação**
- ▶ **Selecionando o Equipamento Para Lidar com Forjados Pesados**
- ▶ **Desenvolvimento do Processo Forjamento em Matriz Fechada**
- ▶ **Resolvendo Falha de Matrizes com Aços Ferramenta Especiais**