

PEDRO KUPKA KNOLL - pedro.knoll@ufrgs.br
 LIRIO SCHAEFFER - ldtn@ufrgs.br
 EDUARDO ANDRÉ HENTZ - eduardo.hentz@ufrgs.br
 CHARLES CHEMALE YURGEL - chemale@cimatec.fieb.org.br



PEDRO KUPKA KNOLL

Forjamento a frio de engrenagem em alumínio

O preenchimento insuficiente da matriz é uma das principais limitações no forjamento a frio de engrenagens de dentes retos. Melhorar estas condições para garantir as dimensões e a exatidão neste processo é de fundamental importância. O método de volumes finitos é usado para simular o processo de forjamento a frio destes componentes a partir de um modelo tridimensional, verificando as distribuições das tensões, as velocidades de deformação e os níveis de preenchimento da matriz.

As engrenagens são geralmente fabricadas por processos de usinagem ou forjadas a quente e submetidas a um processo de acabamento por usinagem. Todavia o forjamento a frio de precisão tem sido estudado, nos últimos anos, para a produção de engrenagens com o intuito de eliminar operações subsequentes de acabamento, economizar matéria-prima e minimizar o ruído após a montagem, uma vez que o processo permite a fabricação de peças com dimensões bem próximas ao da peça final (*near net shape*) [1]. Inicialmente utilizaram-se materiais como zinco e aços não ligados em forjamentos a frio. Atualmente, qualquer material que apresente certa ductilidade¹ em temperatura ambiente pode ser utilizado neste tipo de processo. A Tabela 1 mostra as principais vantagens e desvantagens do forjamento a frio em relação a outros processos de forjamento.

Este estudo tem como objetivo analisar as forças obtidas no forjamento a frio de engrenagens em

Vantagens
Menor quantidade de matéria-prima
Redução ou eliminação de operações subsequentes
Melhores propriedades mecânicas finais
Alta produtividade
Precisão dimensional
Desvantagens
Necessidade de equipamento com maior força de forjamento
Elevadas pressões nas ferramentas
Necessidade de tratamentos térmicos intermediários para grandes deformações
Maior tempo de preparação (<i>setup</i>) da máquina e do ferramental

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do forjamento a frio de precisão [2]

liga de alumínio AA6020 comparando com resultados obtidos pela simulação numérica computacional (FEM - *Finite Element Method*).

MATRIZES PARA FORJAMENTO DE ENGRENAGENS

Algumas alternativas de projeto de ferramental para forjamento a morno² de engrenagens avaliando o escoamento do metal e a força exercida sobre cada peça foram desenvolvidas em um estudo prático

[3]. Em um dos projetos a matriz é elasticamente conectada à prensa (Figura 1a) e no outro a matriz é rigidamente fixada na prensa (Figura 1b). O lado direito de cada uma das figuras representa os elementos da ferramenta antes da deformação e o lado esquerdo o sistema após a conformação. Foram feitas ainda comparações com punções planos e punções chanfrados.

A Figura 2a mostra as forças obtidas nas quatro variações de projetos utilizados. A menor carga obtida foi na matriz com molas (móvel) e com punção chanfrado. Quando a matriz está rigidamente presa na prensa, a resistência do atrito na interface matriz/peça se contrapõe ao movimento do punção aumentando a força de forjamento. E quando a matriz está elasticamente presa, a força de atrito atua na mesma direção do movimento do pun-

¹Ductilidade: Propriedade física dos materiais de suportar a deformação plástica, sob a ação de cargas, sem rompimento ou fratura.

²Forjamento a morno: processo realizado a temperaturas entre 100°C e 250°C.

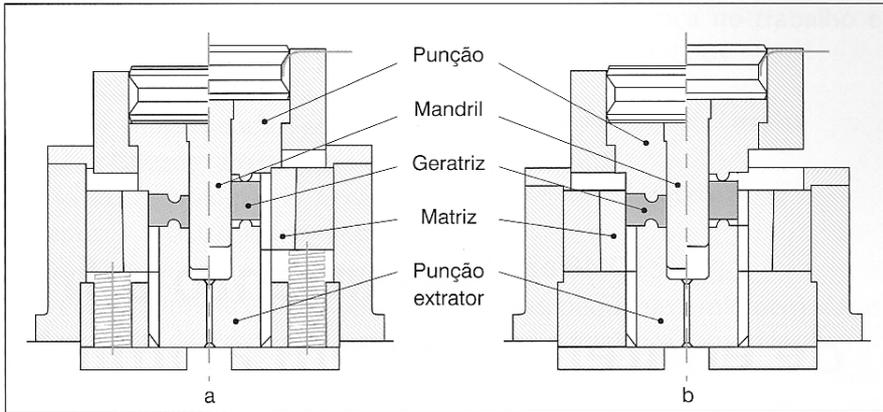


Figura 1 - Representação esquemática dos projetos de ferramenta: (a) matriz elasticamente presa na prensa e; (b) matriz rigidamente presa na prensa [3]

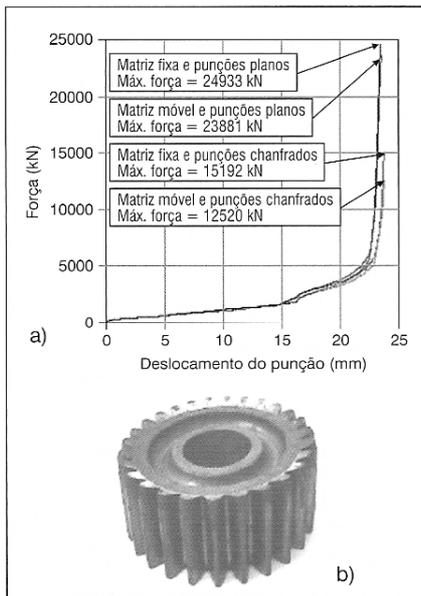


Figura 2 - (a) Gráfico de forças de forjamento utilizando diferentes projetos de ferramenta e; (b) engrenagem forjada [3]

ção diminuindo a força necessária para o forjamento. A Figura 2b mostra a engrenagem de aço AISI 8620H forjada a morno.

Outro estudo realizado com forjamento de engrenagens com dentes em V e com dentes curvos mostra uma alternativa de projeto (Figura 3a).

Uma peça vazada é deformada entre um punção e um contrapunção em uma matriz fechada. O mandril é preso ao punção para impedir a deformação do furo e a superfície periférica escoa para den-

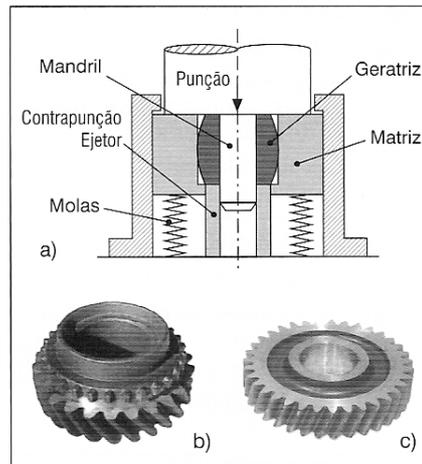


Figura 3 - (a) Sistema de matriz fechada para forjamento de engrenagem; (b) engrenagem automotiva forjada e; (c) engrenagem com dentes em V forjada [4]

tro dos dentes da matriz. Sob a ação do punção, a matriz se move no mesmo sentido da aplicação da força, sendo guiada pelo contrapunção. Em função de a matriz ser completamente fechada, nenhuma rebarba é formada, mas devido a geratriz³ ser aquecida para permitir o escoamento, os dentes não são formados com precisão. A Figura 3b mostra uma engrenagem feita em uma matriz similar. A divisão do fluxo de metal para formar os dentes e o cone nesta engrenagem faz com que o preenchimento da matriz seja mais fácil do que na engrenagem mostrada na Figura 3c.

A precisão dos dentes forjados é

determinada pela precisão da matriz e as dimensões da matriz são afetadas essencialmente pela expansão elástica devido às pressões e a temperatura do forjamento. Quanto maior for a temperatura menor a expansão elástica por pressão, porém aumenta a expansão térmica. As melhores precisões serão obtidas para peças sem pré-aquecimento. A Figura 4 mostra um projeto alternativo. Uma matriz (orifício) com a forma da engrenagem é suportada por um anel externo. A engrenagem a ser forjada tem um diâmetro maior do que o do orifício e é fosfatizada e lubrificada antes do forjamento. O processo consiste em forçar a geratriz pela matriz formando os dentes da engrenagem. Os experimentos realizados mostraram que bons resultados dimensionais e superficiais foram obtidos e que ocorreu um endurecimento nos dentes da engrenagem devido à deformação.

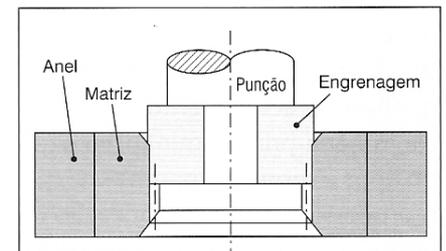


Figura 4 - Processo alternativo de forjamento de engrenagem [4]

O desenvolvimento de um sistema de ferramenta flexível para o forjamento de engrenagens utilizou a técnica de prototipagem computacional baseada em elementos finitos [5]. A aplicação desta técnica permitiu o desenvolvimento do conjunto de ferramentas para os ensaios experimentais. A Figura 5 mostra os detalhes do pro-

³Geratriz: é especificado como o volume de matéria-prima bruta que será utilizada como ponto de partida para o forjamento.

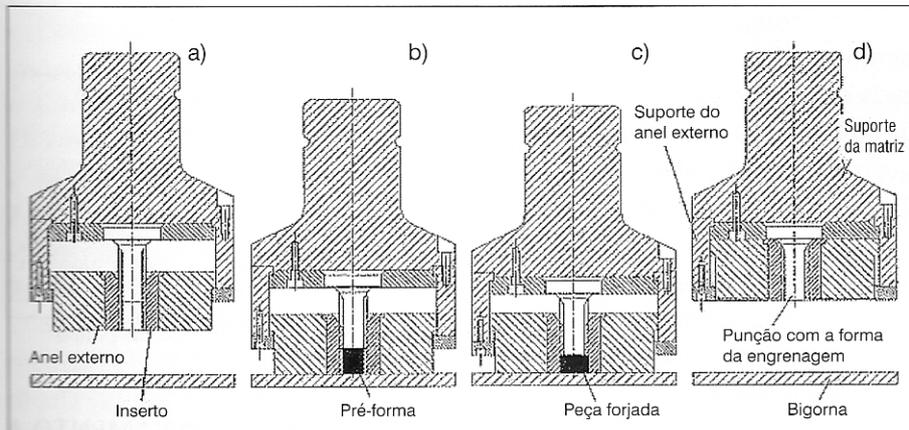


Figura 5 - Esquema do sistema de forjamento de precisão de engrenagens [5]

reto e a seqüência do processo, onde a) é a posição de descanso do sistema, b) é o início do forjamento com a pré-forma (geratriz) em posição de trabalho, c) é o forjamento propriamente dito e d) o final do processo. A Figura 6 apresenta um exemplo de engrenagem forjada neste sistema. A comparação entre a simulação numérica e o experimento realizado com o sistema proposto provou que este processo de forjamento pode ser utilizado para produzir estas engrenagens com boas propriedades mecânicas.

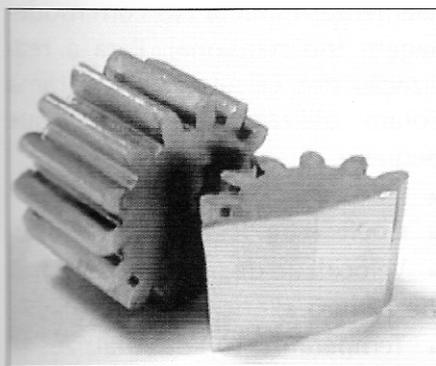


Figura 6 - Engrenagem forjada a frio [5]

PROJETO DO FERRAMENTAL ENSAIADO

O ferramental utilizado no forjamento é constituído de matriz superior e inferior, punção superior e inferior além de um conjunto de molas prato e anel limitador.

A matriz superior é composta de

um anel externo e de uma matriz interna (inserto) colocada por interferência, a qual está pré-tensionada proporcionando maior resistência a esta matriz (Figura 7).

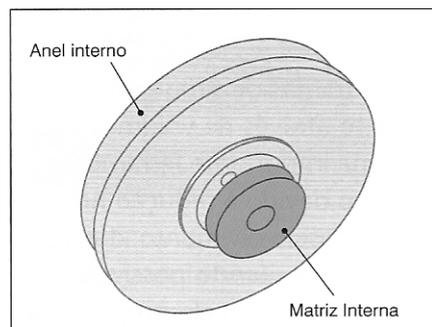


Figura 7 - Montagem da matriz superior

O inserto, a matriz inferior e os punções foram fabricados com aço ferramenta D6⁴. O anel limitador tem a função de restringir o deslocamento da prensa além do necessário para o forjamento da peça. A Figura 8 mostra a montagem do ferramental antes e após a conformação.

Após a confecção do ferramental foi realizado o polimento do inserto para que os dentes da en-

⁴Aço D6: Indicado para a fabricação de ferramentas de corte (matrizes e punções), ferramentas para forjamento a frio e cilindros para a laminação a frio. É composto principalmente de 2,00-2,25% de carbono (C), 0,2-0,6% de manganês (Mn), máximo de 0,03% de fósforo (P), 0,03% de enxofre (S), 0,2-0,4% de silício (Si), 11-13% de cromo (Cr), 0,8-1,25% de tungstênio (W) e 0,15-0,30% de vanádio (V).

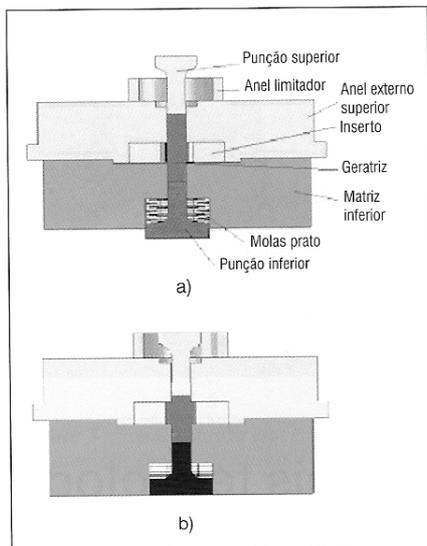


Figura 8 - Montagem do ferramental: (a) antes da conformação e; (b) após a conformação

grenagem forjada apresentassem boa qualidade superficial além de facilitar a extração da peça.

FORJAMENTO DA ENGRENAGEM

O material utilizado neste trabalho foi uma liga de alumínio AA6020, com a composição química apresentada na Tabela 2. A geometria das geratrizes utilizadas é de 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento cada. Para lubrificação das geratrizes, das matrizes e dos punções foi utilizado lubrificante gráfitico Aerodag G da Acheson.

Elementos ⁵	Si	Fe	Cu	Mg	Al	Outros
% em peso	0,46	0,26	0,34	0,76	97,93	0,25

Tabela 2 - Composição química da matéria-prima utilizada obtida via espectrometria óptica

O forjamento foi realizado em uma prensa hidráulica FKL com 700 toneladas de capacidade. A matriz inferior é apoiada sobre a mesa da prensa enquanto a força é aplicada sobre o punção superior até que a mesa superior da prensa atinja o anel limitador. A altura do anel limitador é calculada para que ocorra o total preenchimento da matriz.

O processo foi realizado a temperatura ambiente e a força utilizada obtida por uma célula de carga conectada a um sistema de aquisição de dados Spider 8 da HBM. Para a medição do deslocamento da prensa utilizou-se um transdutor⁶ de deslocamento tipo LVDT (*Linear Voltage Displacement Transducer*) acoplado ao sistema de aquisição de dados.

SISTEMA DE SIMULAÇÃO

O programa Superforge 2004, da MSC Software Corporation, foi utilizado para o desenvolvimento do projeto. Este sistema é baseado no método de volumes finitos [6] e é muito utilizado para simular processos de forjamento, extrusão e laminação.

Programas de simulação de forjamento através de volumes finitos são uma importante ferramenta de trabalho devido à redução no tempo de desenvolvimento de novos processos, evitando possíveis erros que geram custos de projeto, mão de obra, fabricação de matrizes e perda de material pela produção de peças incorretas. Podem auxiliar ainda no cálculo da redução de tensões nas matrizes, aumentando sua vida útil e melhorando a qualidade das peças finais produzidas.

Curvas de escoamento

A Figura 9 mostra a curva de escoamento da liga de alumínio AA6061, similar a liga AA6020, com velocidades de deformação entre 0,01 e 1s⁻¹ para a temperatura de 25°C.

O material utilizado neste trabalho é uma liga Al-Mg-Si, geralmente aplicada em peças que necessitam resistência à corrosão e em peças estruturais para a indústria automobilística [7].

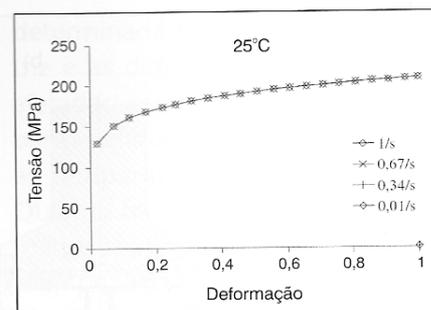


Figura 9 - Curvas de escoamento para a liga Aa6061

SIMULAÇÃO DO FORJAMENTO A FRIO

Para processos de forjamento a frio, os principais dados de entrada no programa são curvas de escoamento do material forjado e informações sobre o atrito existente entre a peça e a matriz, que estão no banco de dados do programa Superforge 2004.

O objetivo da análise numérica computacional foi o de avaliar o comportamento quanto ao preenchimento da cavidade e a força de compactação aplicada.

Neste experimento a simulação da peça foi realizada para o material AA6061 e a matriz discretizada com elementos tetraédricos com modelagem tridimensional. Para a realização dos cálculos no programa foram utilizados os dados que seguem:

- Tamanho da malha = 3 mm;
- Coeficiente de atrito (μ) de 0,3;
- Velocidade de ferramenta (V) de 22 mm/s;
- Temperatura (δ) das matrizes 25°C;
- Densidade (ρ) do material de 2.700 kg/m³;

⁵ Silício (Si), ferro (Fe), cobre (Cu), magnésio (Mg) e alumínio (Al).

⁶ Transdutor: Dispositivo capaz de transformar uma forma de energia em outra, utilizando para isso um sensor que recebe os dados e os transforma. Por exemplo, o sensor pode traduzir informação não elétrica (velocidade, posição, temperatura) em informação elétrica (corrente, tensão, resistência).

- Calor específico (c_p) de 1.132 J/kg.K;
- Condutividade térmica (λ) de 193 W/m.K;
- Módulo de elasticidade (E) de 7.000 kg/mm² e;
- Temperatura da geratriz (δ_m) de 25°C.

O programa de simulação recomenda um coeficiente de transferência de calor, tanto das matrizes quanto da peça para o ambiente, de 50 W/m²/K e um coeficiente de transferência de calor da peça para as matrizes de 6.000 W/m²/K.

Ao final do processo de simulação o programa mostra o preenchimento total da peça, como apresentado na Figura 10. Na Figura 11 estão demonstradas a geratriz e a peça forjada.

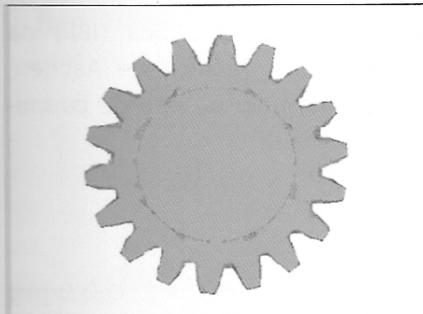


Figura 10 - Resultado final da simulação do processo de conformação da peça

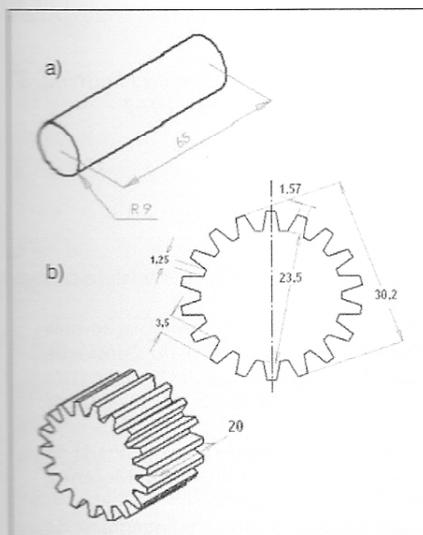


Figura 11- (a) Geratriz e; (b) produto forjado

COMPARATIVO REAL x SIMULADO

Um exemplo de peça obtida no forjamento com o ferramental proposto é mostrado na Figura 12. Pode-se observar, pelos dentes da engrenagem, que ocorreu um completo preenchimento da matriz, mostrando que a limitação adotada para o deslocamento do punção (30,1mm) foi adequada para o processo.

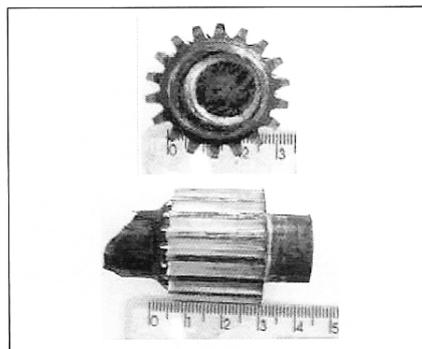


Figura 12 - Engrenagem de alumínio forjada a frio

O gráfico da Figura 13 mostra que a força de forjamento obtida foi de aproximadamente 32 toneladas para o deslocamento de 30,1 mm.

Esta força de forjamento é relativamente baixa proporcionando um menor desgaste de ferramenta e validando o projeto proposto quanto a este requisito.

Resultados da simulação

A Figura 14 representa o resultado final do preenchimento da peça

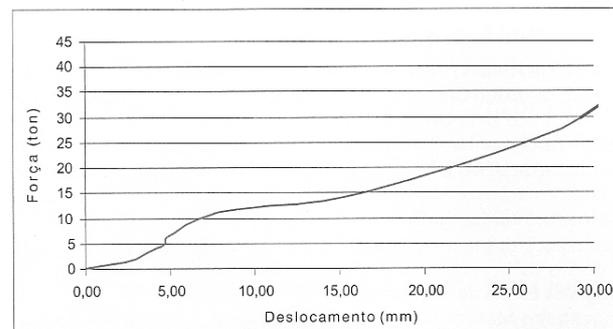


Figura 13 - Gráfico força x deslocamento

obtido na simulação do forjamento com o ferramental proposto, identificando, por uma escala de cores, os pontos de contato do material com a matriz (máximo contato = 1 e mínimo contato = 0). Pode-se observar, pelos dentes da engrenagem, que ocorreu o completo preenchimento da matriz.

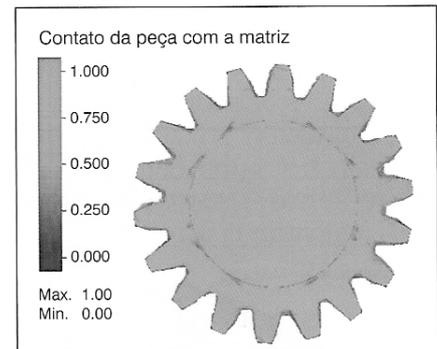


Figura 14 - Representação final do preenchimento da peça

A força de forjamento de 35 toneladas, obtida na simulação, pode ser verificada na Figura 15.

As Figuras 16 e 17 demonstram a tensão de escoamento na peça e na matriz, respectivamente.

Durante o experimento foram obtidas engrenagens de alumínio forjadas a frio, sendo analisadas as forças necessárias para a completa conformação da peça. Foi possível comprovar que o projeto de ferramental proposto é válido para o forjamento deste tipo de peça.

O método de volumes finitos é uma ferramenta adequada para analisar e aperfeiçoar o processo, mas exige que os dados de entrada representem corretamente o que será reproduzido na prática.

Os resultados obtidos através das simulações mostraram que a peça teve um

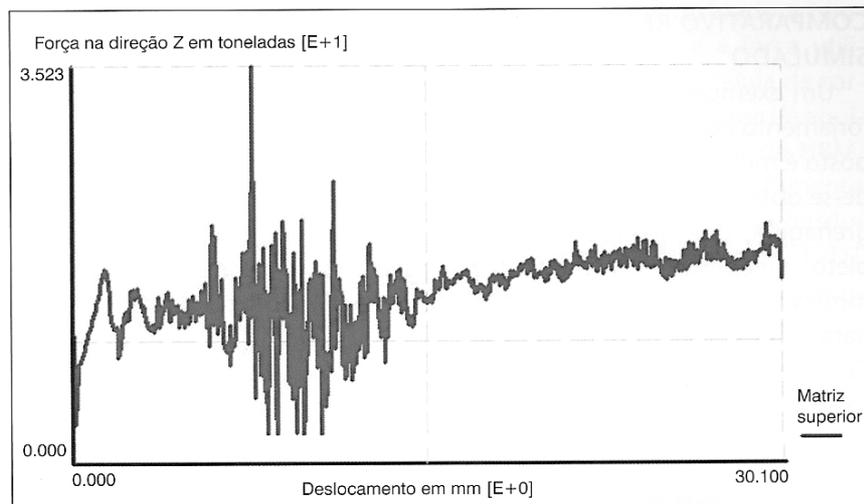


Figura 15 - Força de forjamento obtida na simulação

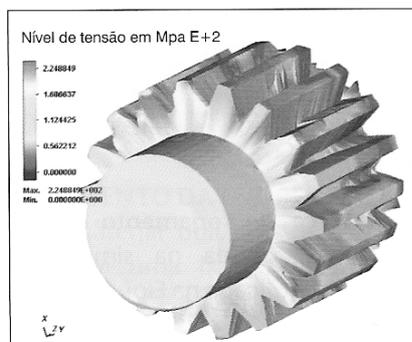


Figura 16 - Tensão de escoamento na peça

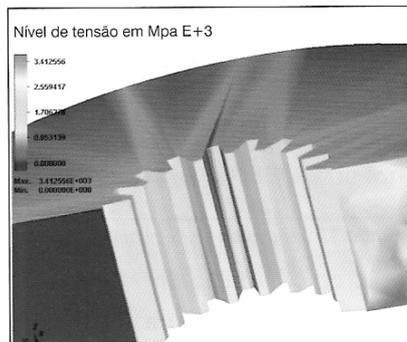


Figura 17 - Tensão de escoamento na matriz

preenchimento total na matriz e que as forças resultantes na simulação foram muito próximas da prática, validando o problema proposto. A tensão obtida na peça ficou abaixo da tensão de escoamento do material da matriz, caracterizando a inexistência de problemas para a conformação.

Neste tipo de forjamento é importante observar o volume da geratriz, evitando que haja excesso de material, uma vez que não há canais de rebarba. O excesso de material pode resultar em aumento significativo da tensão, gerando danos à matriz.

Agradecimentos: ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo financiamento desta pesquisa e ao Instituto de Conformação Mecânica (IBF) da Universidade Técnica de Aachen, Alemanha, pelo projeto de cooperação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Choi, J. C.; Choi, Y.; *A study on the forging of external spur gears: upper-bound analyses and experiments*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38, p. 1193 a 1208, 1998
- [2] Schaeffer, L.; *Forjamento - Introdução ao processo*, Editora Imprensa Livre, Porto Alegre, 2001
- [3] Cai, J.; Dean, T. A.; Hu, Z. M.; *Alternative die design in net-shape forging of gears*, Journal of Materials Processing Technology, 150, p. 48 a 55, 2004
- [4] Dean, T. A.; *The net-shape forming of gears*, Materials Design, 21, p. 271 a 278, 2000
- [5] Alves, M. L.; Rodrigues, J. M. C.; Martins, P. A. F.; *Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation*, Finite Elements in Analysis and Design, 37, p. 549 a 558, 2001
- [6] Geier, M.; Brito, A. M. G.; Schaeffer, L.; *Otimização de um processo de forjamento pelo método de volumes finitos*, Anais 24º Senafor, Porto Alegre, 2003
- [7] Horn, K. R. V.; *Aluminum: Vol. III - Fabrication and finishing*, 3ª Edição, Ohio, American Society for Metals, 1967

Pedro Kupka Knoll - Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina e Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Engenheiro da Gerdau Aços Especiais Piratini.

Lirio Schaeffer - Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Doutor na área de Conformação pela Universidade Técnica de Aachen/Alemanha (RWTH). Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais do CNPq, professor das disciplinas de processos de fabricação por conformação mecânica e vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Energia da UFRGS. Autor de vários livros sobre conformação mecânica.

Eduardo André Hentz - Engenheiro Mecânico Automotivo pela Universidade Luterana do Brasil - Canoas, RS e Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pesquisador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS.

Charles Chemale Yurgel - Engenheiro Mecânico pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e Mestrando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor do CIMATEC, Salvador, BA.