

ANÁLISE DO CONTORNO INTERNO DE EIXOS VAZADOS FORJADOS A QUENTE*

Rodrigo Prestes Limberger¹
Luana De Lucca de Costa²
Lirio Schaeffer³

Resumo

A investigação do comportamento de um mandril com diferentes diâmetros ao longo de seu comprimento no forjamento incremental em matriz aberta de eixos vazados para aerogeradores é estudada. Tem-se por finalidade a fabricação de um mandril que se adeque à peça forjada e atinja o formato proposto. Através do uso de simulações numéricas computacionais com o *software* Simufact.forming 12, e simulações com o material modelo plasticina, possíveis geometrias de mandris foram estudadas, variando a angulação na região de troca de diâmetros ao longo do comprimento. Foram estudados ângulos de 0°, 30° e 60°, analisando o comportamento da fluência do material na região.

Palavras-chave: Simulação numérica; Geometria; Modelo de plasticina; Eixos.

ANALYSIS OF INNER CONTOUR OF HOT FORGED HOLLOW SHAFTS

Abstract

The investigation of the behavior of a mandrel with different diameters along its length in incremental open die forging of hollow shafts for wind turbines is studied. It has the purpose of making a mandrel that fits the forged part and reaches the proposed format. Through the use of numerical simulations with Simufact.forming 12 and simulation with plasticine models, possible mandrels geometries were studied by varying the diameters of the switch angle region along the length. Angles of 0°, 30° and 60° were studied, analyzing the behavior of the material flow in the region.

Keywords: Numerical simulation; Geometry; Plasticine model; Shafts.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M), Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Campus do Vale, Porto Alegre, RS, Brasil; rodrigo.limberger@ufrgs.br.

² Engenheira Mecânica, Mestre em Engenharia, Doutoranda do PPGE3M, LdTM, Departamento de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; luana.lucca@ufrgs.br.

³ Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Área de Concentração: Processos de Fabricação, Professor, Departamento de Metalurgia, Coordenador do LdTM, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; schaefer@ufrgs.br.

1 INTRODUÇÃO

O processo de forjamento em matriz aberta é utilizado na produção de peças grandes em pequenas escalas, sendo seu custo reduzido quando comparado com o forjamento em matriz fechada, onde o desgaste da ferramenta é maior assim como desperdício de material [1]. Utilizado na produção de peças de grande porte, tais como, eixos para motores utilizados em navios e engrenagens. Geralmente, as matrizes possuem geometrias bastante simples e caracterizado pelo escoamento livre do material nas direções de alargamento e alongamento [2].

A fabricação de eixos vazados ocorre por processo comum de forjamento em matriz aberta, chamado de estiramento, onde a peça sofre sucessivas compressões e avanços, criando superfícies onduladas [1], que são corrigidas através do controle da largura de mordida. Porém a estrutura inteira é alongada, resultando em uma diminuição de seu diâmetro externo, conforme a Lei da Constância dos Volumes [3].

As matrizes para o forjamento em matriz aberta geralmente possuem formas de geometria simples, como matrizes em V ou matrizes planas. Essas geometrias favorecem o fluxo de material na direção axial e geram tensões de compressão, que são favoráveis quando comparadas às tensões trativas [4-6].

No forjamento de tubos, onde o forjamento do eixo vazado se enquadra, tem como característica a manutenção do diâmetro interno, mantendo-o constante ao longo de todo o forjamento, como mostra a Figura 1. Para permitir que isso aconteça, a utilização de um mandril é essencial.

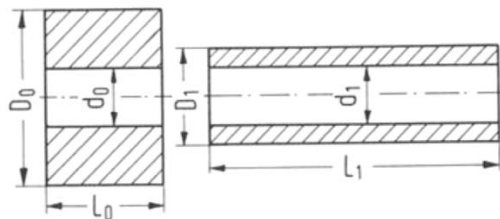


Figura 1. Processo de alongamento no forjamento de tubos vazados [7].

Problemas relacionados com o uso do mandril e o aumento do diâmetro interno nos últimos passes do forjamento foram relatados por Rosenstock [8] como apresentado na Figura 2, onde a simulação computacional mostra o fenômeno, que é consequência da deformação imposta em uma parede fina, apresentada no step 4.

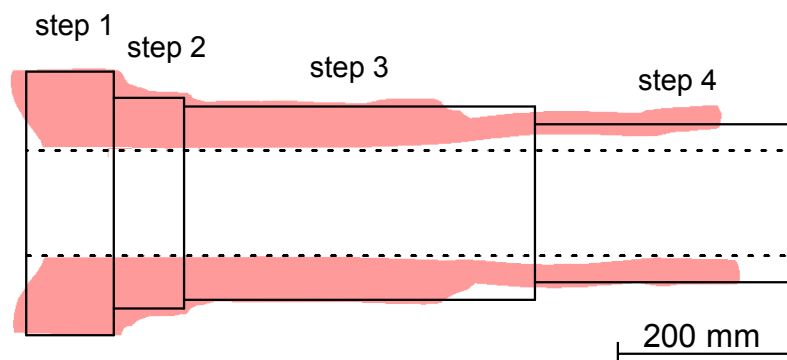


Figura 2. Simulação de eixo vazado forjado em 4 passes [8].

No trabalho de Rosenstock [8], foram encontrados tais resultados utilizando matriz superior plana e matriz inferior em V e simulando o processo no *software* Transvalor Forge 2011. Além disso, foi estudada uma geometria industrial em escala reduzida,

onde problemas de falta de material no último passe foram verificados, sugerindo correções na cinemática do processo e também na compensação de material através de uma geratriz maior.

Banaszek [9,10] investigou geometrias côncavas que visam uniformizar a distribuição de deformações ao longo da peça, visando obter uma peça final livre de defeitos internos, concluindo que matrizes côncavas com partes convexas assimétricas, deformando a peça após um ciclo de 4 rotações de 90° ao longo de todo o seu comprimento, geram deformações homogêneas em todo o volume do forjado.

Chen [11] apresenta estratégias de forjamento otimizadas quando utilizados ângulos de giro de 90° entre mordidas utilizando matrizes planas.

Entretanto, após pesquisa bibliográfica, não foi possível encontrar publicações que tratem de forjamento de eixos vazados com contorno interno. Sabe-se, porém, que existem empresas que possuem tal *know-how* e que produzem peças com mandris que possuem diferentes raios ao longo do seu comprimento.

Portanto, o projeto de um mandril com diferentes diâmetros deve levar em consideração o fluxo do material aliado ao grau de deformação que é imposto. Isso é feito principalmente através do controle dos parâmetros envolvidos no processo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Através do processo de forjamento incremental em matriz aberta, partindo-se do billet vazado ilustrado na (a) (b)

Figura a, que possui 120 mm de diâmetro interno, 360 mm de diâmetro externo e 210 mm de comprimento, produzido em aço AISI 4140 e pesando 150 kg, é almejada a geometria apresentada na Figura 3b.

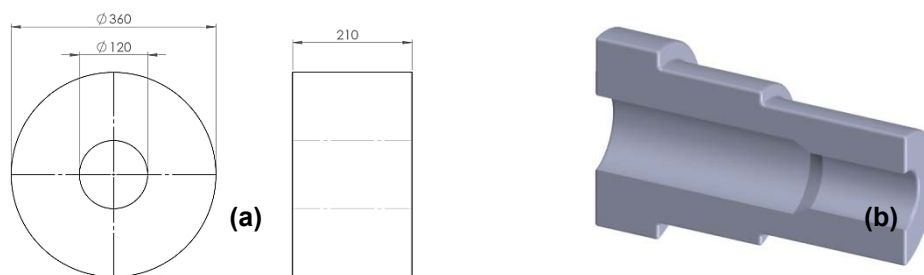


Figura 3. (a) *Billet* inicial utilizado no processo; (b) Geometria do eixo vazado após o forjamento.

As geometrias das matrizes são apresentadas nas Figuras 4 e 5.

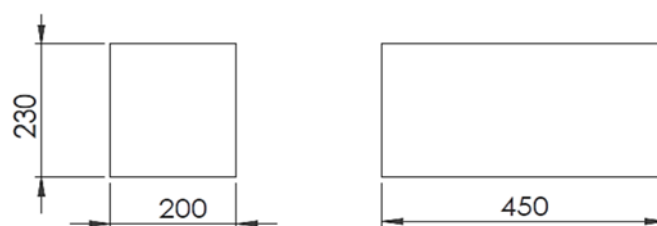


Figura 4. Matriz superior plana.

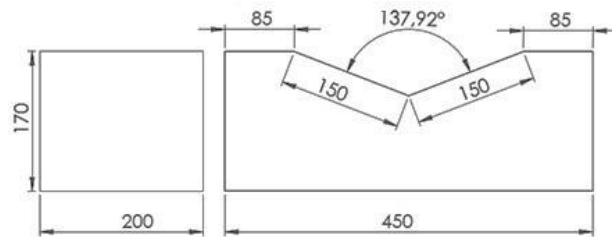


Figura 5. Matriz inferior em V.

A disposição das matrizes, *billet* e mandril é apresentada na Figura 6.

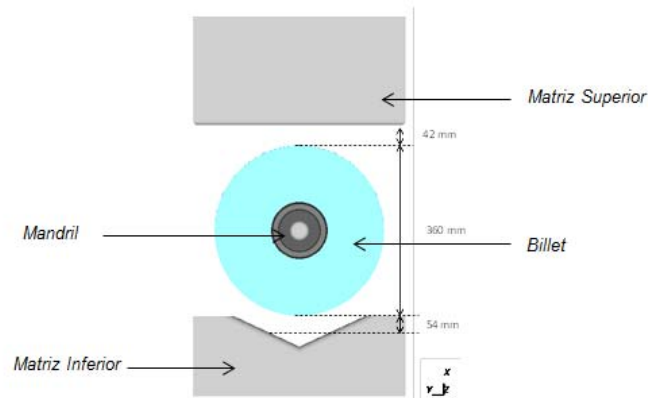


Figura 6. Disposição das ferramentas.

A geometria ideal, principalmente o comprimento de cada região do mandril – de maior e menor diâmetro, foi determinada a partir de simulações numéricas. O estudo foi realizado em função da zona de transição e do comprimento de cada parte de diferentes diâmetros do mandril, conforme o diagrama apresentado na Figura 7.

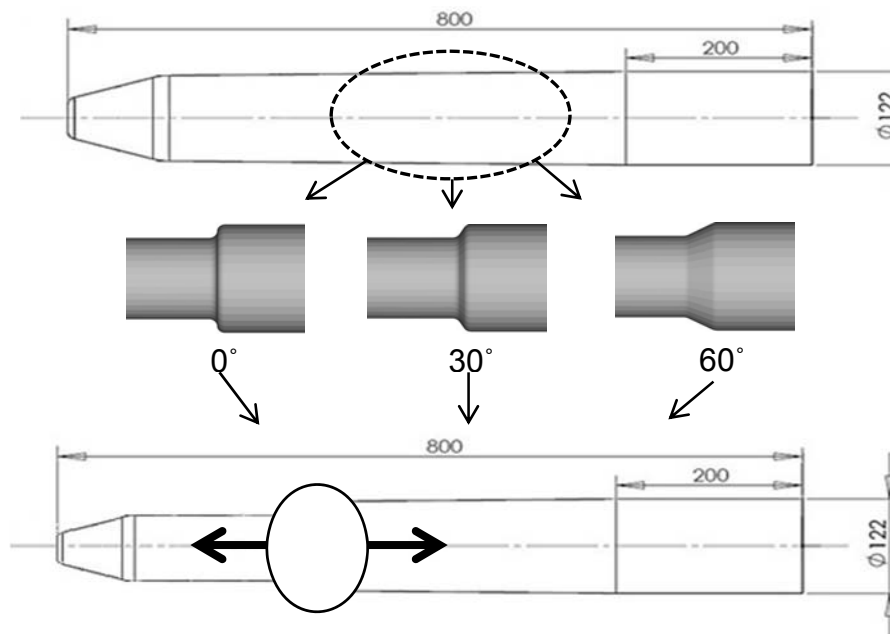


Figura 7. Fluxograma do estudo da geometria do mandril.

Para se alcançar a geometria final, o processo foi dividido em três passes de forjamento. O primeiro passe reduz o diâmetro externo da peça em 15 %, atingindo

306 mm. Essa redução visa deformar homoganeamente o eixo vazado. O segundo passe delimita a região do flange, reduzindo o restante do eixo a uma seção de 250 mm. O último passe é responsável por atingir a forma final do eixo, reduzindo a extremidade da peça a um diâmetro de 210 mm. O sequencial de passes é reproduzido na Figura 8, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

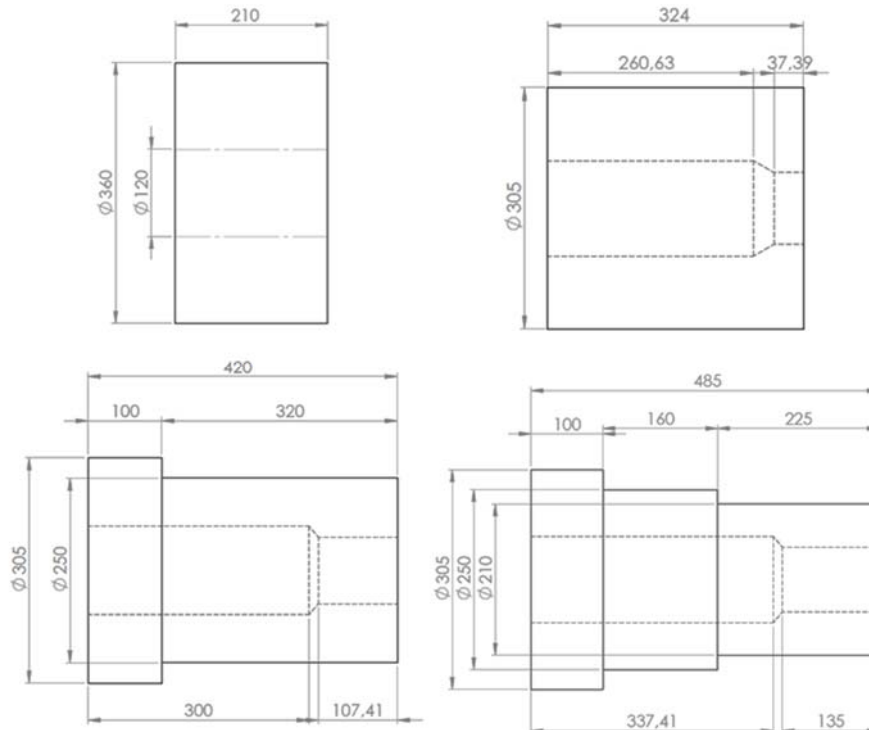


Figura 8. Sequência de passes de forjamento até atingir a forma final.

Os parâmetros da simulação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na simulação numérica.

Parâmetros utilizados	Valores
Malha utilizada	Hexaédrica – 8 nós – 10620 elementos
Tamanho do elemento de malha	10 mm
Temperatura inicial do billet	1200°C
Temperatura inicial das ferramentas	300°C
Coeficiente de atrito	0,2
Velocidade da ferramenta	75 mm/s

A Tabela 2 apresenta a sequência de forjamento utilizada nas simulações.

Tabela 2. Cinemática do forjamento do eixo vazado.

Passe	Avanço	Recalque	Rotação da peça antes do recalque	Rotação absoluta	Distância até flange [mm]	Redução no diâmetro
1	1	1	0°	0°	80	15%
1	1	2	90°	90°	80	15%
1	1	3	90°	180°	80	15%
1	1	4	90°	270°	80	15%
1	1	5	90°	0°	80	15%
...

As ferramentas utilizadas nos modelos de plasticina foram confeccionadas em alumínio e têm escala 1:4 em relação à peça real. Os componentes são apresentados nas Figuras 9 e 10.



Figura 9. Mandris em escala utilizados nos ensaios com plasticina.



Figura 10. Matrizes utilizadas nos ensaios com plasticina.

As cinemáticas utilizadas ao longo das simulações com plasticina foram as mesmas utilizadas nas simulações computacionais. O *billet* escalonado possui comprimento inicial de 52,5 mm, diâmetro inicial externo de 90 mm e diâmetro inicial interno de 30 mm. O posicionamento do mandril em relação à peça de plasticina dista 16,5 mm da parte frontal da peça com a região de troca de diâmetros do mandril.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira simulação realizada, utilizou-se o mandril com região de transição de 0°, foi possível observar a geometria final do eixo forjado, onde é evidente a falta de definição da geometria na região de troca de diâmetros interno. A (a) (b)

Figura a apresenta a geometria final obtida, que não está de acordo com a geometria proposta inicialmente, evidenciando a necessidade de trocas nas cinemáticas.

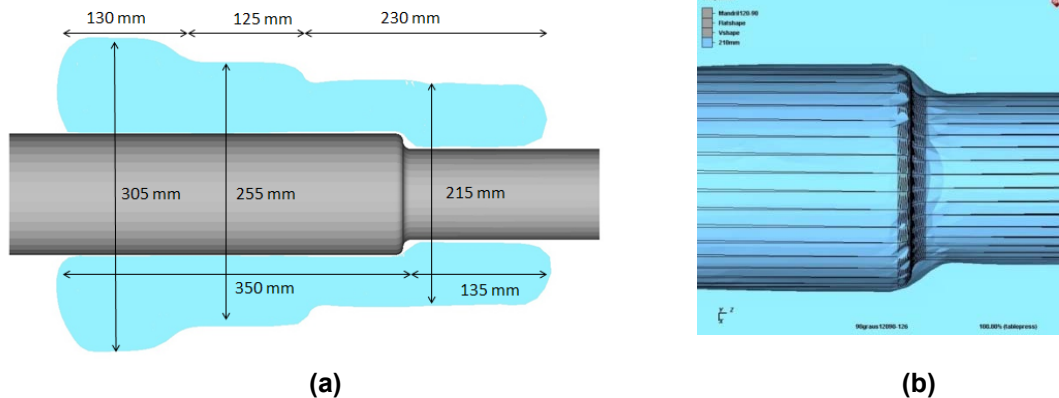


Figura 11. (a) Geometria final da peça simulada com mandril de geometria 0º; (b) Região de transição com o contorno do mandril em evidência.

A região de transição é ampliada na Figura 11b, onde se pode verificar o contorno da geometria do mandril e a área azul claro representa o material forjado. O resultado visto é que o material não preenche a zona de transição. Esse fato é explicado pela troca abrupta de diâmetro ao longo do mandril, juntamente com o fato de que não é imposta restrição no fluxo do material na direção daquela região.

A Figura 12 apresenta as deformações impostas na peça após o final do processo. Pode-se observar que os maiores valores de deformação estão na região de troca de diâmetros, onde estão concentrados em uma pequena parte daquela região.

A distribuição de deformações ao longo da peça indica a homogeneização das deformações. A região da flange possui grau de deformações em torno de 0,8, enquanto o último passe atinge níveis entre 2 e 4, satisfazendo os níveis requeridos pelo projeto.

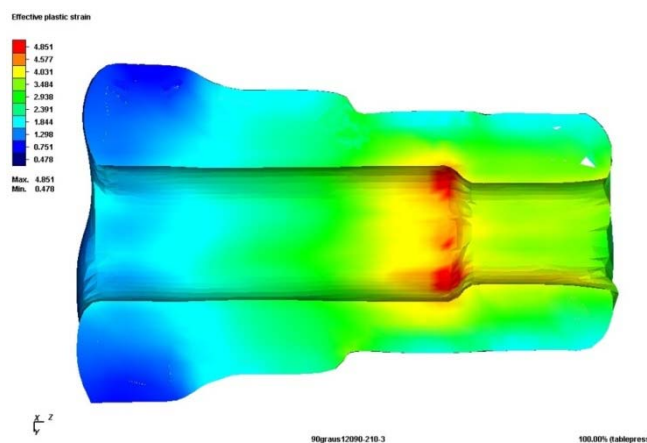


Figura 12. Distribuição de deformações ao longo da peça após o último passe de forjamento.

A geometria final da peça simulada para o ângulo de 30º é apresentada na o das cinemáticas do forjamento.

(a)

(b)

Figura , onde a forma final, assim como na simulação utilizando o mandril com região de transição de 0°, ficou fora do esperado, evidenciando a necessidade de revisão das cinemáticas do forjamento.

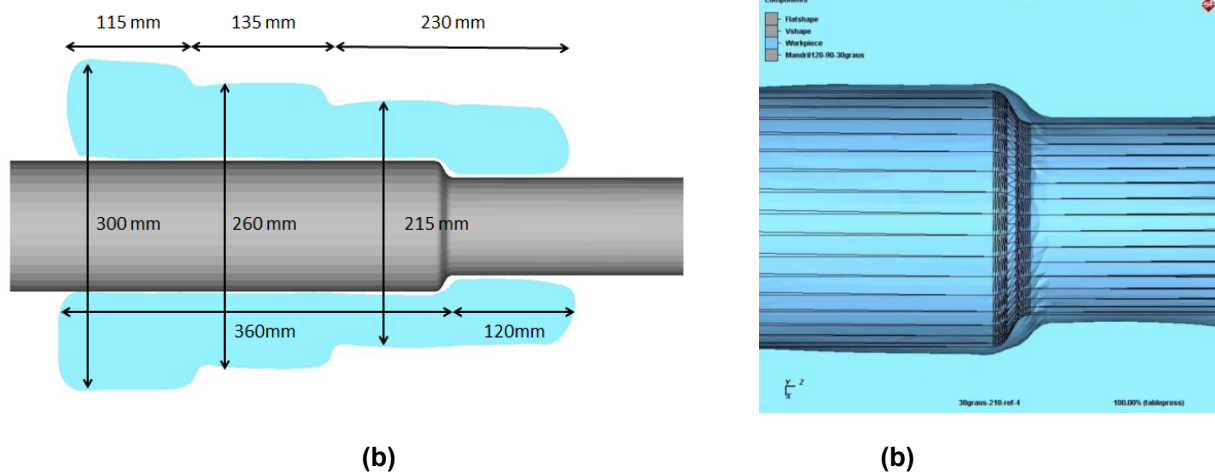


Figura 13. (a) Geometria final da peça simulada com mandril de geometria 30°; (b) Região de transição com o contorno do mandril em evidência.

Em relação ao contorno interno, esses foram praticamente iguais ao simulado com o mandril da seção 4.1. Esse fato é justificado pela falta de material do mandril devido à angulação muito abrupta. Conforme observado na Figura 13b, o contorno não corresponde à forma final desejada.

Em relação à distribuição de deformações a simulação utilizando o mandril com região de transição de 30° apresentou resultados semelhantes ao processo da seção 4.1, no que diz respeito à homogeneidade ao longo da peça. Porém a região de transição de diâmetros mostrou-se com menos pontos de altas deformações, como mostra a Figura 14 indicando resultados positivos para essa simulação.

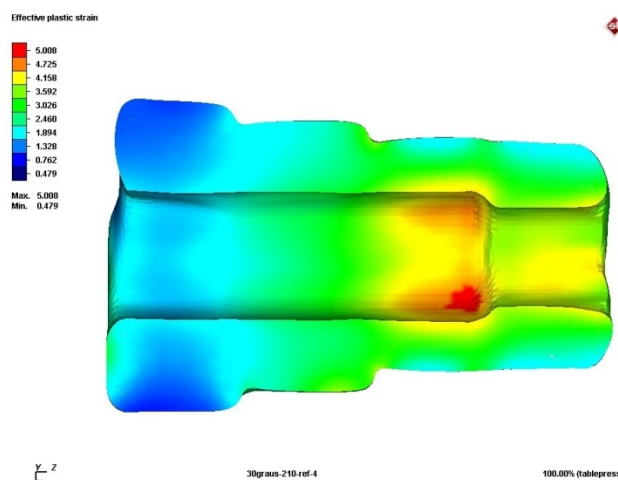


Figura 14. Distribuição das deformações na peça após o último passe de forjamento.

O resultado obtido na simulação utilizando o mandril de região de transição de 60° é apresentado na

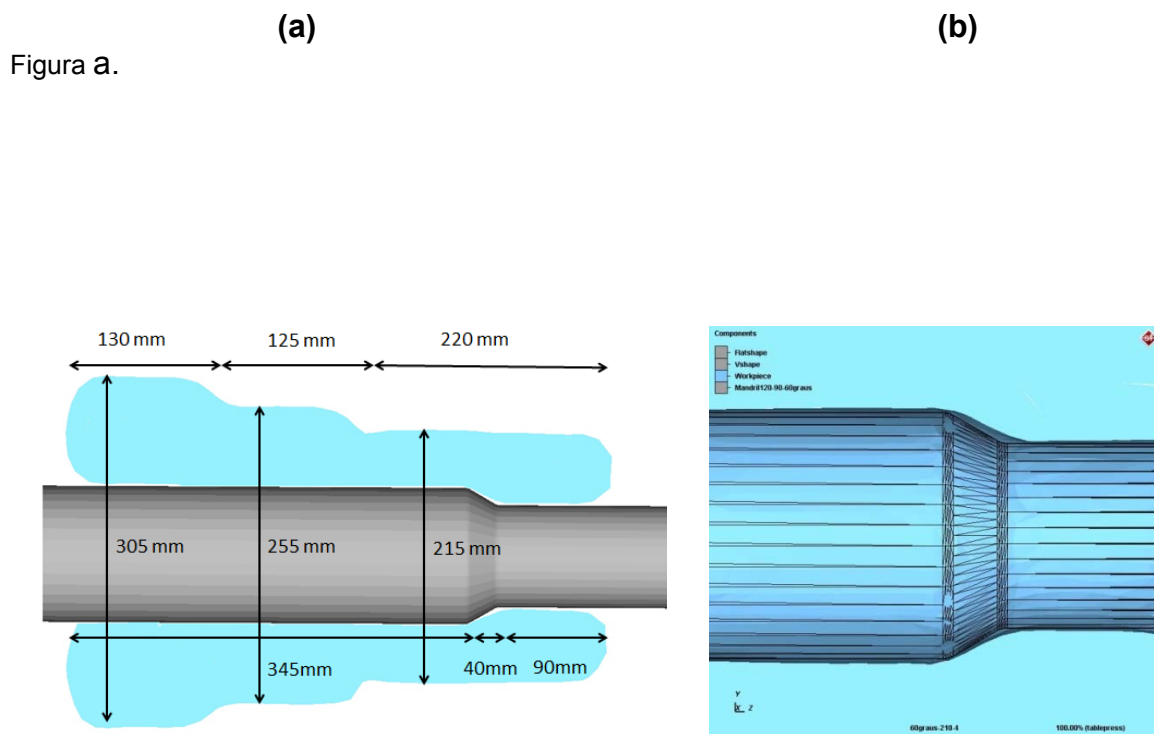


Figura 15. (a) Geometria final da peça simulada com mandril de geometria 60°; (b) Região de transição com o contorno do mandril em evidência.

Pode-se perceber que as dimensões externas da peça também não atingiram as planejadas. Entretanto, o contorno interno da peça apresentou-se adequado e a zona entre diâmetros foi delimitada, conforme apresentado na Figura 15b.

Assim, o processo utilizando o mandril de 60° mostrou-se mais adequado para o forjamento do contorno interno do eixo vazado.

Em relação às distribuições das deformações, pode-se verificar na Figura que na região de transição entre diâmetros, os campos de grandes deformações são menores quando comparados com as deformações das seções 4.1 e 4.2. Afirmando a escolha desse mandril para o processo.

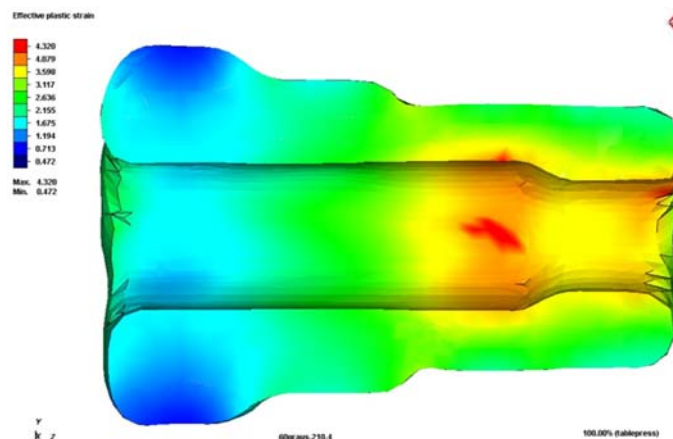


Figura 16. Distribuição das deformações na peça após o último passe de forjamento.

Os ensaios utilizando o material modelo plasticina apresentaram resultados condizentes com a simulação numérica. Entretanto, a plasticina disponível no IBF mostrou-se excessivamente mole para os propósitos do forjamento em matriz aberta, onde era necessária rigidez na hora da manipulação da peça entre os avanços da ferramenta.

Foi observado um fenômeno de aumento excessivo do diâmetro interno. Isso gerou imprecisões no contorno interno da peça, pois o mandril, por vezes, ficava solto na parte vazada, dificultando seu posicionamento.

Os resultados para os três diferentes mandris são apresentados nas Figuras 17, 18 e 19, respectivamente.



Figura 17. Geometria final do ensaio com plasticina utilizando o mandril de 0°.



Figura 18. Geometria final do ensaio com plasticina utilizando o mandril de 30°.



Figura 19. Geometria final do ensaio com plasticina utilizando o mandril de 60°.

4 CONCLUSÃO

Considerando as angulações, para 0° é visto que a forma final não corresponde com a planejada, pois a cinemática aplicada não foi suficiente para reduzir os diâmetros dos passes e alongar a peça suficientemente. Entretanto, o contorno interno pode ser verificado, sendo compatível com a geometria do mandril, já que por ser um material mais dúctil, a plasticina tende a tomar forma mais facilmente. Para os ensaios com os mandris de 30° e 60°, os resultados apresentaram geometrias bem definidas, tanto interna quanto externamente, visto que a cinemática foi alterada a partir do resultado do ensaio com o mandril de 0°. Os resultados indicam geometria externa compatível com a planejada, com definição dos passes e proporcionalidade quando comparados às simulações. Outro fato que é levado em consideração é o surgimento de trincas no último passe dos modelos. Essa é uma tendência vista nos forjamentos práticos realizados no IBF. As trincas são causadas pelas grandes deformações aplicadas nos últimos avanços no último passe, já que as paredes são mais finas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao projeto BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das bolsas de estudo, ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

REFERÊNCIAS

- 1 Cetlin, P. R.; Helman, H. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. São Paulo, Artliber Editora, 2005.
- 2 Schaeffer, L., Forjamento, Introdução ao Processo, Imprensa Livre, Porto Alegre, 2006.
- 3 Grüning, K., Técnica da Conformação, Ed. Polígono, 1973
- 4 Rusinoff, S. E., Forging and Forming Metals, Americal Technical Society, Chicago, Estados Unidos da América, 1952.

- 5 Masek, B., Novy, Z., Kesner, D. Technological Chain of Free Forging of Large Shafts Developed with the Aid of FEM Simulation. Stockholm : I.C.F.G. Workshop on Process Simulation in Metal Forming Industry, Royal Institute of Technology, 2003.
- 6 Xu, B., Sun, M., Li, D. Modeling of the Void Close Behavior in a 100 t Ingot during Hot Forging. China, Steel Research International Journal, 2012.
- 7 Spur, G., Neugebauer, R., Hoffmann, H. Handbuch Umformen. Alemanha : Carl Hanser Verlag, 2012.
- 8 Rosenstock, D., Recker, D., Gao, L., Hirt, G. Incremental Forging of Hollow Shafts - Process Design Evaluation by Numerical Simulation. Brasil : 34ª SENAFOR - Conferência Internacional de Forjamento, 2013.
- 9 Banaszek, G., Dyja, H., Berski, S., Janik, M. Theoretical and experimental analysis of the effect of die shape on the internal quality of forged rods. Polônia : Journal of Materials Processing Technology, 2004.
- 10 Banaszek, G., Dyja, H., Mróz, S., Berski, S. Influence of Main Parameters of Forging Process and Optimal Choice of Shape Anvils of the Internal Quality of Forging for Steel WCL. República Tcheca : 10th International Metallurgical and Materials Conference, 2001.
- 11 Chen, K., Yang, Y., Shao, G., Liu, K. Simulation of Large Forging Flat-Anvil Stretching Process and Its Optimization. China : Journal of Shanghai Jiaotong University , 2011.