



Tema: Forjamento

## ANÁLISE DO PROCESSO DE FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA DE EIXO APLICAVÉL EM AEROGERADORES\*

Luana de Lucca de Costa<sup>1</sup>  
 Rodrigo Prestes Limberger<sup>1</sup>  
 Alberto Moreira Guerreiro Brito<sup>2</sup>  
 Lírío Schaeffer<sup>3</sup>

### Resumo

O forjamento a quente em matriz aberta é, atualmente, o processo mais utilizado para a fabricação de peças de grande porte. Neste estudo, a simulação numérica foi utilizada, através do método de elementos finitos, para análise do processo de forjamento em matriz aberta de um eixo vazado e escalonado aplicável em aerogeradores. A partir de um billet cilíndrico vazado de aço AISI 4140, pesando 1 kg, é simulado o processo de forjamento objetivando a obtenção de geometria final apresentada. Utiliza-se matrizes superior e inferior em formato côncavo, e um mandril de manipulação com inclinação de 1,15°. A cinemática da simulação numérica, que inclui 4 passes com um número total de 30 cursos, é avaliada. Ao comparar a geometria apresentada com a obtida observa-se que o alongamento longitudinal da forma final é obtido. A partir da análise da temperatura, pode-se concluir que o reaquecimento deve ser realizado após cerca de 45 s, no final de cada série de 5 cursos.

**Palavras-chave:** Forjamento a quente, matriz aberta, simulação numérica, AISI 4140

### ANALYSIS OF THE OPEN DIE FORGING PROCESS FOR WIND TURBINES SHAFTS

#### Abstract

The open die forging in high temperatures is currently the most widely process used to manufacture large parts. In this study, the finite element method in numerical simulation was used to analyze the forging process in an open and hollow stepped shaft applicable in wind turbines. From a 1 kg hollow cylindrical billet of AISI 4140 steel, the forging process was simulated aiming to obtain the presented final geometry. Upper and lower dies in a concave shape and a mandrel for manipulation with slope of 1.15° were used. The numerical simulation kinematics, which includes 4 passes with a total number of 30 courses, were evaluated. By comparing the presented geometry with the finished one, it is possible to evaluate that the longitudinal elongation of the final shape is obtained. From the analysis temperature, it can be concluded that the reheating should be performed about 45 seconds after the end of each series of five courses.

**Keywords:** Hot Forging; Open Die Forging; Numerical Simulation; AISI 4140

<sup>1</sup> Engenheiro(a) Mecânica, Mestrando(a) do PPGE3M, Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Dr., Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro pesquisador, Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Dr. Ing., Engenheiro Mecânico, Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



## 1 INTRODUÇÃO

O Fórum Mundial de Energia prevê que as reservas energéticas de origem fóssil, tais como, de petróleo, carvão e gás, estarão esgotadas em menos de mais 10 décadas. Os combustíveis fósseis representam mais de 79% da energia primária consumida no mundo, e 57,7% desse montante é usado no setor de transportes [1]. Desta forma, incentivos governamentais para aumentar a proporção de energia produzida por fontes renováveis têm estimulado uma nova era de desenvolvimento tecnológico. As energias renováveis são tratadas como uma solução parcial para três desafios socioambientais: atender à crescente demanda por energia, garantir a segurança energética e reduzir a emissão de emissões nocivas [2].

A capacidade de geração eólica global expandiu-se rapidamente de 10 MW em 1980 para 282 GW de capacidade instalada até o final de 2012. Nesse ano, a Europa e a América do Norte foram responsáveis por mais de 60% da capacidade de energia eólica global. Em geral, os países em desenvolvimento, a China e a Índia são responsáveis por mais de 95% da capacidade global. Em 2010, as turbinas eólicas foram instaladas em, pelo menos, 83 países. Durante o período de 1996 a 2012, o crescimento da capacidade de geração eólica mundial em média 27% ao ano [3].

No aspecto econômico que envolve este contexto, onde há necessidade do uso de geradores cada vez maiores para aumento na produção de energia, o desenvolvimento e aperfeiçoamento tecnológico dos componentes destes geradores tornam-se imprescindíveis. No caso das turbinas eólicas, por exemplo, a potência média, aumentou de 50 kW, no início dos anos 1980, a 7000 kW (7 MW) em 2011, em aplicações *offshore*. Isto resultou em um aumento no peso das turbinas de cerca de 6 a 400 toneladas e o comprimento das lâminas aumentou de 10 para 80 metros [4].

Resumidamente, o processo de conversão de energia em aerogeradores é o seguinte: as hélices movimentam-se a partir da força do fluxo de energia dos ventos. Parte da energia cinética devido ao movimento dos ventos é transferida para as pás do rotor e se torna a energia rotacional das pás. Conseqüentemente, o eixo, que está acoplado às pás, gira junto com elas. Então, a energia rotacional do eixo é transformada em energia elétrica pelo gerador. Por fim, o transformador é o responsável por distribuir externamente esta energia gerada [5].

Os eixos em aerogeradores, como mencionado, fazem parte do sistema de transmissão, e estão sujeitos, principalmente, a tensões de torção e flexão. No entanto, as condições descontínuas de velocidade de vento, e, conseqüentemente, giro do rotor, promovem também esforços cíclicos. Logo, as etapas de projeto, dimensionamento e seleção de matérias devem prever não somente a resistência a tensões estáticas, mas também o comportamento em fadiga. A definição do processo de fabricação desses eixos deve considerar aspectos macros e microscópicos a fim de eliminar o máximo de defeitos internos que possam servir como concentradores de tensões no material e causarem a nucleação e crescimento de trincas de fadiga [6].

Os materiais utilizados na fabricação de tais eixos dependem da severidade da aplicação, potência e tamanho do equipamento, em aplicações severas em equipamentos de grande porte costumam-se ser utilizados aços-liga de alta resistência tratáveis termicamente, podendo citar-se as ligas AISI 1340-50, 3140-50,

---

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



4140, 4340, 5140 e 8650 [6].

A produção desses eixos é realizada através do processo de fundição desde a década de 80. Porém esse processo não agrega boas propriedades mecânicas e qualidade quando comparadas ao processo de forjamento. O projeto da produção de eixos vazados para aerogeradores tem como objetivo desenvolver o componente através do processo de forjamento.

Ao substituir o processo de fundição pelo processo de forjamento, a qualidade do produto final é otimizada no que diz respeito às propriedades mecânicas. Os grãos do material são refinados, permitindo testes ultra-sônicos, ocorre o preenchimento de vazios e rechupes, e com isso a resistência mecânica e à fadiga são aumentadas [7]. A substituição do método de produção demanda um custo maior, porém esse custo é compensado na maior durabilidade do eixo e menor necessidade de manutenção. Deve-se citar ainda que, com a substituição do processo de fundição pelo processo de forjamento, é possível fabricar um eixo vazado, reduzindo consumo de material, conseqüentemente aumentando o rendimento energético.

Segundo Colombo [6], as matrizes côncavas promovem a melhor distribuição de tensões na peça, contribuindo para um maior alongamento da peça. As matrizes concavas, porém, possuem fatores limitantes. Seu raio de curvatura impede que impede o forjamentos de eixos diferentes diâmetros de eixos.

Diante do exposto, neste trabalho são estudadas as condições de alongamento do eixo vazado, buscando manter a forma cilíndrica, diminuindo a quantidade de material a ser retrabalhado através de usinagem. As simulações demonstraram qual estratégia de forjamento apresenta melhores distribuições de deformação, característica que agrega propriedades mecânicas superiores e mais homogêneas quando comparadas ao estado bruto de fusão. As variantes utilizadas das simulações foram: avanço, giro da peça em relação ao eixo inicial e porcentagem de redução do diâmetro em cada passe. Foram observados também para as variações de temperaturas na peça ao longo do processo, propriedade essencial no forjamento a quente.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nas simulações computacionais, foi utilizado um bilhet vazado de 1 kg e sua geometria provém de desenhos industriais em escala, apresentada na Figura 1a. A simulação do forjamento do eixo é feito em 4 diferentes seções, apresentada na Figura 1b. Através do software Simufact.Forming 11.0, foi possível gerar o processo, simular seu comportamento e analisar os resultados.

O estudo foi realizado no Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LdTM - UFRGS), e a utilização do eixo em escala reduzida deve-se à limitação do maquinário disponível, visto que, eixos utilizados em aerogeradores podem atingir até 25 toneladas. Visou-se também atentar para efeitos da escala de forjamento.

O material utilizado é o aço AISI 4140, um aço de baixa liga cujos principais elementos são Cr e Mo, responsáveis pela maior resistência mecânica e ductilidade. É um material amplamente utilizado na indústria de forjados para fabricação de elementos de máquinas, como eixos e bielas, e também na indústria do petróleo, em

---

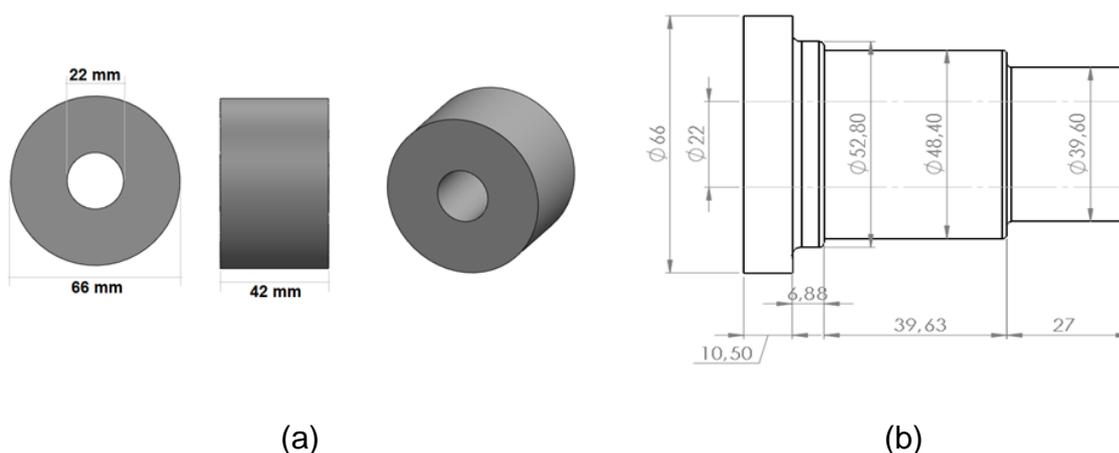
\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



equipamentos relacionados com a exploração, como colunas de perfuração [8]. Sua temperatura de trabalho a quente é aproximadamente 980°C.

Para a simulação do forjamento do eixo, foi utilizado um par de matrizes côncavas, em H13, e um mandril cônico de mesmo material com inclinação de 1,15°, para que a retirada do mesmo após o forjamento fosse facilitada. Outra opção para a retirada do mandril da peça é a utilização de um par de matrizes planas na última etapa de forjamento, como pode ser observado na literatura [9]. As matrizes planas forçam o deslocamento do material para a direção radial, provocando aumento do diâmetro interno, e assim liberando o mandril da peça. Foram incluídos também dados da prensa disponível no laboratório, uma prensa hidráulica, da fabricante EKA (Capacidade máxima: 40 ton) e velocidade de 3,4 mm/s.

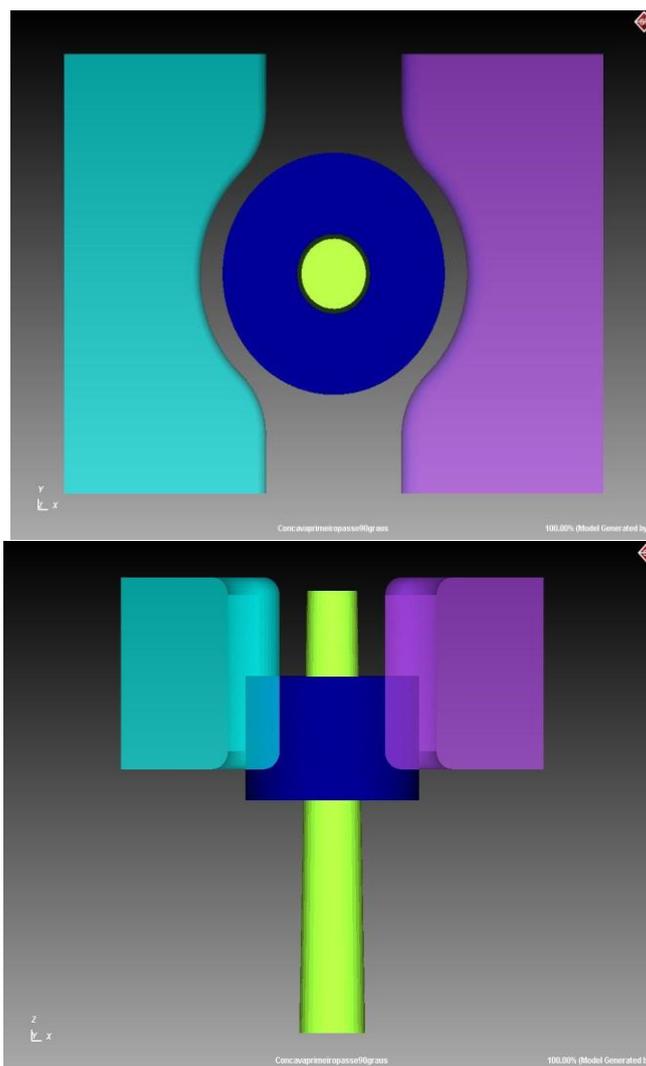
O billet inicial possui diâmetro externo de 66 mm, diâmetro interno de 22 mm e 42 mm de comprimento. É desejada uma flange na peça final, para isso, uma seção de 10,5 mm de comprimento é mantida com diâmetro externo inalterado ao longo do forjamento. A escala foi adaptada mantendo a proporcionalidade do volume de cada passe baseada no forjamento em escala industrial.



**Figura 1.** Dimensões do billet inicial e do modelo após o forjamento.

A malha utilizada para simulação numérica foi a Hexaédrica, gerada pelo próprio software, com tamanho de 4 mm, totalizando 9889 elementos. A temperatura inicial de forjamento do billet é de 1200°C, das matrizes é 300°C e do mandril é, aproximadamente, 25°C (temperatura ambiente). A disposição do forjamento é apresentada na Figura 2a e 2b.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 2.** (a) Vista frontal da disposição das matrizes e bilhet no software. (b) Vista lateral da disposição das matrizes e bilhet no software.

## 2.1 Estratégia de Forjamento

Em simulações preliminares, foi constatado que o uso de matrizes côncavas resultam em uma peça com forma aproximadamente quadrática com cantos arredondados. Tendo em vista que essa forma é indesejada, estipulou-se um giro de 45 graus na peça após cada sequência de 5 mordidas. Desse modo, no primeiro passe, são realizadas 5 mordidas com redução de 6,6 mm (10% do diâmetro inicial), seguido de um giro de 45° e novamente 5 mordidas, porém com redução de 13,2 mm, visando atingir a geometria final requerida no primeiro passe. Após a segunda redução, a peça é novamente rotacionada 45° e mais 5 mordidas são aplicadas, para eliminação da forma indesejada. Cada redução tem duração de 44 segundos. A Tabela 1 descreve a sequência de movimentos executados na simulação.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Tabela 1.** Sequência de movimentos do forjamento simulado.

Passe	Redução	Mordida	Rotação relativa do mandril	Rotação absoluta do mandril	Redução absoluta no diâmetro da peça (mm)
1	1	1	0	0	6,6
1	1	2	90	90	6,6
1	1	3	90	180	6,6
1	1	4	90	270	6,6
1	1	5	90	360	6,6
1	2	1	45	45	13,2
1	2	2	90	135	13,2
1	2	3	90	225	13,2
1	2	4	90	315	13,2
1	2	5	90	45	13,2
1	2	1	0	0	13,2
1	2	2	90	90	13,2
1	2	3	90	180	13,2
1	2	4	90	270	13,2
1	2	5	90	360	13,2
2	3	1	0	0	17,6
2	3	2	90	90	17,6
...	...	...	...	...	...

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise de Temperatura

Após a primeira sequência de deformação do primeiro passe, pode-se verificar, conforme a Figura 3, que a temperatura do billet atinge limite inferior na ordem de 750°C no contato com o mandril, pois o billet não possui massa suficiente para reter calor por muito tempo, ao realizar trocas térmicas com o ambiente, com as matrizes previamente aquecidas e com o mandril na temperatura ambiente.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.





Para homogeneizar a deformação nessa região, sugere-se que a peça seja submetida a um forjamento prévio. Então, é necessário que o billet inicial seja fabricado com maior diâmetro externo e menor comprimento.

### 3.3 Análise da Geometria

Os principais pontos analisados foram o diâmetro interno e a geometria final da peça. O diâmetro interno é um parâmetro importante pois esse pode impedir que o mandril seja recolocado na peça após o reaquecimento, então deseja-se que ele aumente na medida que o forjamento acontece. A geometria final desejada é aquela onde o material forjado atinja da melhor maneira possível o formato desejado para a peça, reduzindo sobremetal e posteriores trabalhos de usinagem.

A Figura 5 compara o resultado obtido na simulação com a geometria pretendida nos três passes do forjamento.

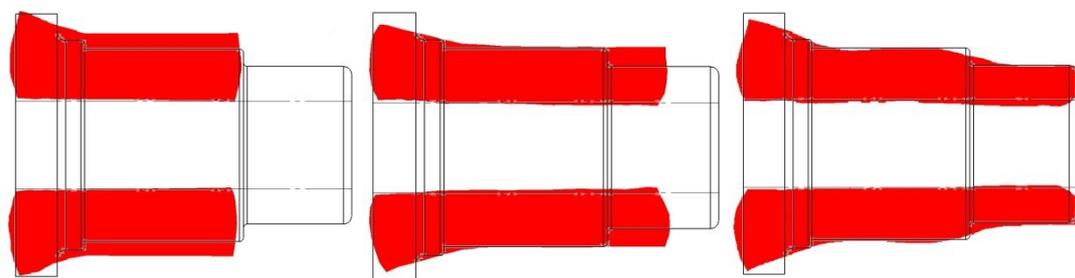


Figura 5. Comparação da geometria após cada passe.

É visto que o diâmetro interno na parte da flange aumenta na medida que o eixo é forjado, porém esse aumento de cerca de 1 mm é pouco significativo. O que leva a necessidade da utilização de um par de matrizes planas nas últimas mordidas das reduções, conforme Dirk [9], para facilitar a retirada da peça do mandril ao colocá-la no forno para reaquecimento, assim como para retirá-la após o reaquecimento.

A geometria final simulada indica que não foi possível atingir a forma final pretendida, assim, é necessário redimensionar o billet da peça para que a falta de material nas determinadas regiões seja preenchida. A Figura 6 apresenta tridimensionalmente a forma final da peça simulada, também, detalhadas quanto as deformações estão apresentados na Figura 4c.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

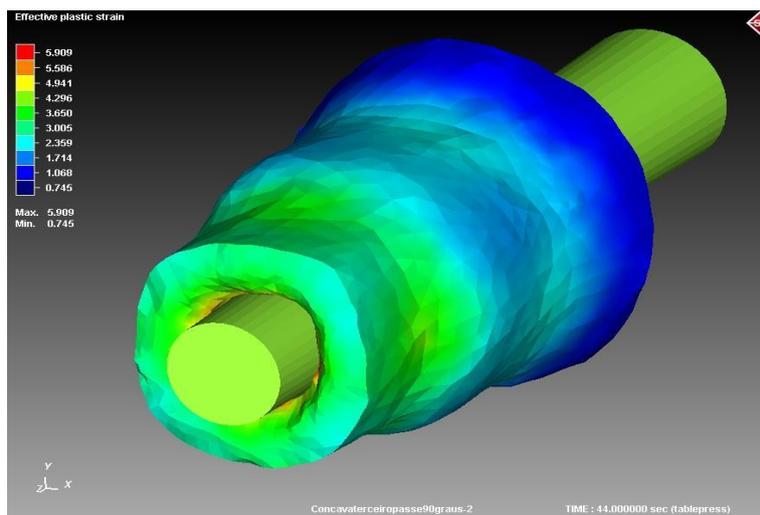


Figura 6. Peça após último passe de forjamento.

## 4 CONCLUSÃO

A simulação numérica através do método de elementos finitos mostrou-se eficaz para prever o comportamento do forjamento a quente em escala do eixo vazado aplicável em aerogeradores. Foram obtidos dados de tempo necessário para reaquecimento, de cinemática do forjamento, de deformações e de geometria aproximada final.

É necessário reaquecimento da peça após cada redução, que dura cerca de 44 s, onde alguns pontos atingem a temperatura de 750°C.

A estratégia de forjamento utilizada foi satisfatória, tendo em vista que a forma final foi praticamente atingida, restando poucas regiões com falta de material, especialmente na flange e na região de menor diâmetro.

O campo de deformações ficou dentro do esperado para o forjamento, salva a parte da flange, garantindo sua homogeneidade, e assim, ocorrendo refino de grão, atingindo o objetivo do projeto.

## 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) pelo financiamento das bolsas de estudo, ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

## REFERÊNCIAS

- 1 Kumar, A, Kumar K, Kaushik N, Sharma S, Mishra S. Renewable energy in India: current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Outubro, 2012. p 2434-2442.
- 2 Bidwell D. The role of values in public beliefs and attitudes towards commercial wind energy. *Energy Policy*, Julho, 2013. p. 189-199.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



- 3 Timilsina GR, Kooten GCV., Narbel, P. A. (s.d.). Global wind power development: Economics and policies. *Energy Policy*, Agosto, 2013.
- 4 Schaeffer L. Renewal proposal for a research grant on the topic - Bulk metal formed parts for power plants, 2012, - Bragecrim Program (CAPES Nº 046/2011). Porto Alegre.
- 5 Maia TA. Projeto e Construção de um Gerador a imãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência. Dissertação - UFMG, Belo Horizonte/MG, 2011.
- 6 Colombo TC. Análise numérica do forjamento em matriz aberta para a produção de eixos vazados [Dissertação de Mestrado]. UFRGS - PPGEM, Porto Alegre/RS, 2012.
- 7 Mayer KH, Berger C, Gnirss G, Heinrich D, Prestes W. Investigations by non-destructive inspection to determine the size of natural defects in large forgings of turbogenerators. *Nuclear Engineering and design*, 1993. North-Holland. 150-170.
- 8 Lima FB. Microestrutura e Tenacidade de Aços Baixa Liga tipo 41XX - Uma abordagem quantitativa [Dissertação de Mestrado]. Rio de Janeiro: UFRJ; 2006.
- 9 Dirk R, Recker D, Gao L, Hirt G. Incremental forging of hollow shafts – Process design evaluation by numerical simulation. 33º SENAFOR. Porto Alegre. 2013.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.