

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DETERMINAÇÃO, VIA CFD, DO CAMPO DE PRESSÃO E VELOCIDADE NA FOLGA ENTRE DOIS CILINDROS CONCÊNTRICOS EM ROTAÇÃO

L. C. BARRETO, lucasc.barreto@hotmail.com¹
J. B. MEDEIROS, jose.bismark@univasf.edu.br²
L. M. PEREIRA, luiz.mariano@univasf.edu.br³
J. P. ALENCAR Jr., jose.pereira@univasf.edu.br⁴

^{1,2,3,4} Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Mecânica.

Resumo: Este trabalho apresenta o emprego de simulações computacionais aplicada a situação de deformação do anel de desgaste estacionário de hidrogeradores que utilizam turbinas do tipo Francis de eixo vertical, onde o concreto sofre reação álcali agregado. Essa reação provoca a perda de circularidade do anel externo, causando o risco de fricção entre o anel interno (rotativo) e o externo e, consequentemente, provocando sérios danos à instalação. É estudado o surgimento de campos de pressão ocasionados pela variação da folga entre os anéis, de forma que a medição destes possam oferecer alternativas para o monitoramento do problema. Busca-se também estudar se esses campos de pressão contribuem para o nível global de vibração do sistema, e assim, possa-se utilizar medições de vibrações como alternativa a detecção do problema. As simulações foram realizadas com auxílio do software de análise de dinâmica dos fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD) ANSYS-CFX® 14.0, considerando-se o escoamento turbulento, tanto na direção axial quanto na direção tangencial, induzido pela rotação do eixo interno. A partir da análise dos contornos de pressão obtidos, foi observada uma queda significativa desta, no caso em que o cilindro externo apresentou uma deformação. Esta análise pode ser utilizada para a detecção de possíveis imperfeições em turbinas do tipo Francis de eixo vertical, por exemplo, a partir do monitoramento dos valores de pressão em diversas posições, ao longo do escoamento.

Palavras-chave: Campo de pressão, Teoria hidrodinâmica, CFD, Máquinas rotativas.

1. INTRODUÇÃO

No escoamento de fluidos, ao redor ou tangente a superfícies, surgem gradientes de pressão que podem contribuir consideravelmente para o nível global de vibração de máquinas e estruturas, e até falhas prematuras, com consequências sérias e não somente econômicas. O escoamento de líquidos nas máquinas motoras e geradoras induz vibrações que podem reduzir a vida útil das mesmas ou danificá-las. Essas vibrações são provenientes dos diversos mecanismos de dinâmica dos fluidos e podem ser classificados de acordo com a natureza do fluxo e da estrutura. No presente trabalho foi realizada uma simulação computacional que modela de forma simplificada, um problema ocorrido em turbinas Francis, largamente empregadas nas usinas hidrelétricas brasileiras. Esse problema tem sido constatado em usinas onde ocorre a reação álcali-agregado do concreto, causando deformações estruturais que, no objeto do estudo aqui apresentado, é a perda da circularidade dos anéis estacionários das turbinas, e consequentemente, a alteração da folga entre esses e os anéis rotativos das mesmas. Com isso, além do risco de contato entre as partes fixas e móveis, a perda de circularidade nesses anéis gera campos dinâmicos de pressões que podem contribuir significativamente para o aumento da vibração do eixo da turbina, mas que podem ser medidos para estimar a proximidade destes anéis. O modelo estudado busca simular a região dos anéis de desgaste, como mostra esquematicamente a Fig.(1), aproximado por dois cilindros concêntricos, sendo que o cilindro interno é dotado de um movimento de rotação. Busca-se mostrar que caso ocorra a perda de circularidade, surgirão regiões de baixas e altas pressões, conforme sugerido pelos trabalhos de Abrantes (2005) e Rocha (2004). Além disso, deve-se deixar claro que avaliações mais detalhadas estão em andamento, fazendo-se inicialmente uma ampla revisão bibliográfica para melhor compreensão do fenômeno de instabilidade de Taylor-Couette, citada nos trabalhos de Meyer (1969) e Dou *et al* (1988), que ocorre quando linhas de corrente curvadas do fluxo circular, num gradiente de pressão axial, causam uma instabilidade centrífuga que produz vórtices toroidais, conhecidos como vórtices de Taylor.

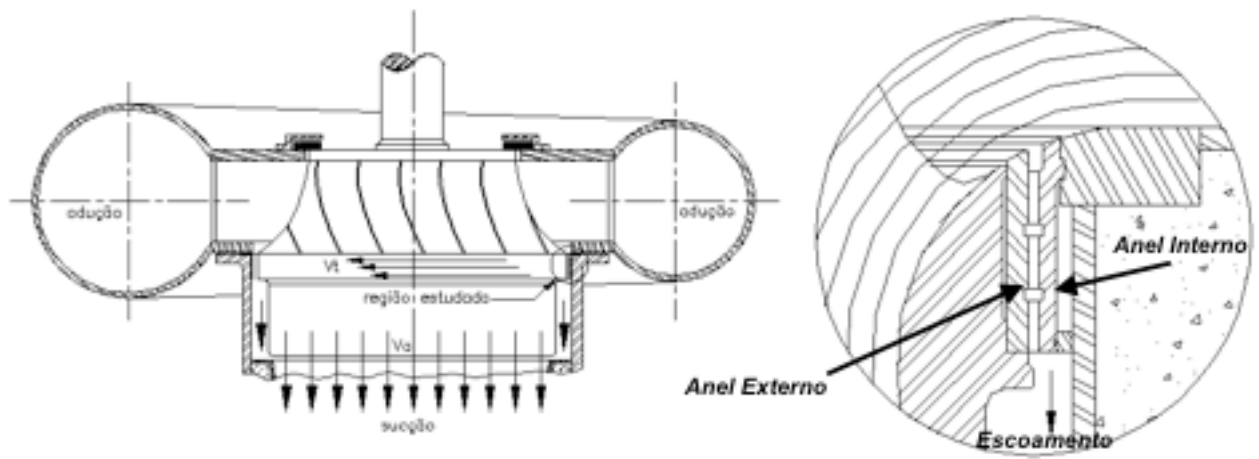
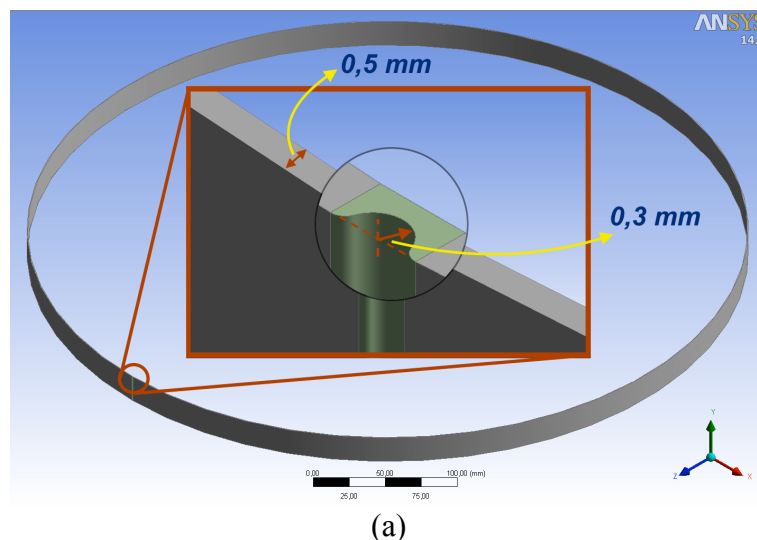


Figura 1. Detalhe da região estudada (anéis estacionário/rotativo). (Abrantes *et al.*, 2005)

Diversos trabalhos estudaram os campos de pressão na folga entre cilindros concêntricos, com um estacionário e outro em rotação. Abrantes *et al.* (2005) e Rocha *et al.* (2004), tentando encontrar coincidências em sinais de vibrações do eixo de uma turbina, com o problema da perda de circularidade do anel externo, realizaram uma análise do problema aplicando a teoria de mancais hidrodinâmicos, valendo-se da equação de Petroff, no intuito de mensurar os campos de pressão e se estes tinham algum padrão de pulsação que pudessem ser medidos com sensores de vibrações. No entanto, conforme Budinas e Nisbett (2008), a utilização da equação de Petroff se dá em condições especiais, sem levar em conta o fluxo axial em folgas muito pequenas e com fluidos de viscosidade muito maior do que a da água.

2. OBJETIVOS

A simulação de problemas de alto grau de complexidade, modelados por equações diferenciais parciais não lineares e que não possuem solução analítica, é uma área de investigação muito promissora na engenharia. Neste trabalho, são utilizadas ferramentas de CFD na simulação um problema prático presente na engenharia. O objetivo deste trabalho é simular o escoamento em cilindros concêntricos, onde o cilindro interno está com uma rotação pré-definida, e o externo encontra-se estacionário, buscando-se analisar o comportamento dos campos de pressão e de velocidade entre os cilindros, utilizando a ferramenta computacional *ANSYS CFX*[®] 14.0. Para isto, foram realizadas simulações acrescentando-se uma deformação na parede do cilindro externo, simulando-se anormalidades que, mesmo muito longe de um defeito real, pudessem evidenciar os primeiros resultados do campo de pressão, devido ao efeito de rotação do cilindro interno, e, conseqüentemente, ser possível capturar as flutuações deste campo de pressões. A Figura (1) apresenta um dos modelos analisados, chamando-se a atenção para o caso onde há a presença da deformação, em forma de ressalto, causaria uma redução da folga de 0,5 mm para 0,2 mm. A região de cor mais clara, na Fig. (1), é a região onde ocorre o escoamento axial, que sofre o efeito do cilindro interno girando. Essas dimensões foram utilizadas para manter uma condição de similaridade, com as dimensões do problema, em uma turbina Francis real, cujo diâmetro externo é de 5 m, com folga de 10 mm e rotação de 120 rpm. Porém, a fim de reduzir o custo computacional na geração da malha, o problema foi resolvido em uma escala reduzida de 1:10.



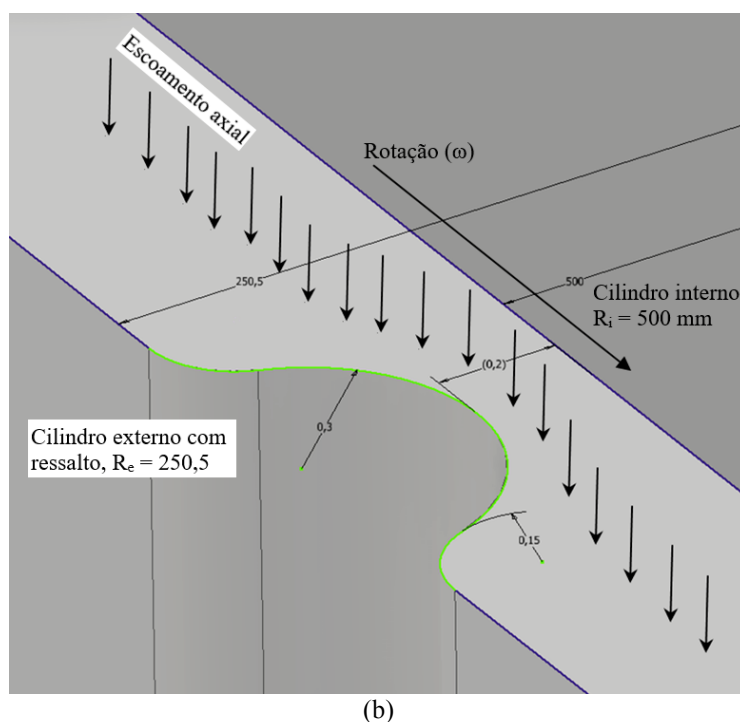
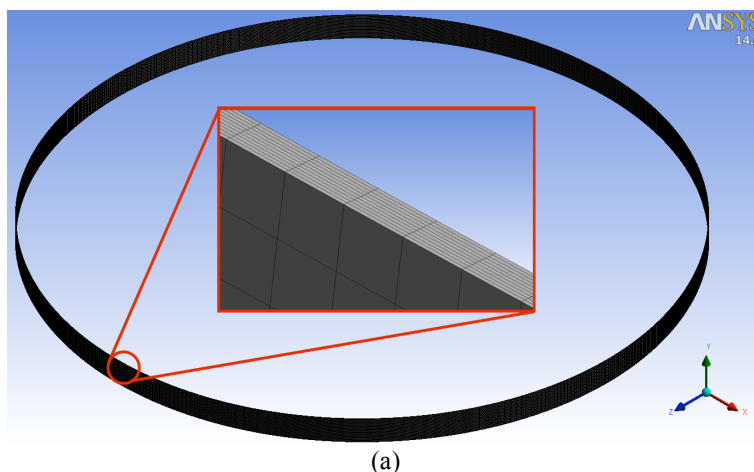


Figura 1. Geometrias geradas: (a) vista estendida da deformação; (b) dimensões.

3. METODOLOGIA

O procedimento computacional foi composto de várias etapas. A primeira etapa foi a de pré-processamento com o desenho da geometria tridimensional a ser analisada, sendo adotadas duas situações: na primeira situação, analisou-se o anel sem a presença de deformação; na segunda, adotou-se o anel com uma deformação no cilindro externo, conforme mostrado na Fig. (1.b). Devido ao grande diâmetro encontrado em turbinas Francis, em torno de 5 m e, a fim de diminuir o custo computacional de processamento, a simulação foi realizada em uma escala reduzida de 1:10. Sendo assim, o diâmetro interno do anel, adotado na simulação, foi de 500 mm. Ainda nesta etapa de pré-processamento, foi gerada a malha computacional, que é uma representação computacional do modelo físico estudado, utilizando a ferramenta *ANSYS Meshing*[®]. Foi utilizada uma malha com geometria quadrilátera, por esta ter representado melhor a forma do cilindro com menor quantidade de elementos e maior facilidade de manutenção nos parâmetros geométricos da malha. Porém, na parte onde há a presença da deformação, a geometria tetraédrica foi utilizada por melhor representar o formato da deformação. Foram necessários ajustes, de forma a favorecer a geração da malha, em função da pequena espessura da região em análise, quando comparada aos raios interno e externo do anel. O raio de 0,15 mm, concordando com a circunferência do ressalto semicilíndrico de 0,3 mm, e com o diâmetro externo de 501 mm, trouxe excelente benefício a convergência da malha. A fim de validar a independência dos resultados em função da malha gerada, foi feita uma análise de convergência da pressão, obtida em diversas simulações. Para tal, variou-se o número de elementos em função da pressão, até que fosse alcançada uma precisão de magnitude aceitável, tomando-se como parâmetro, pelo menos a sensibilidade de alguns sensores comerciais de pressão dinâmica. As malhas utilizadas podem ser visualizadas nas Fig. (2.a e 2.b).



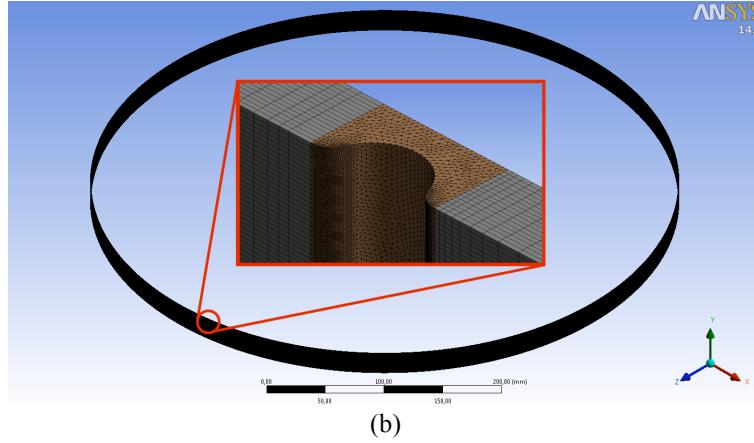


Figura 2. Malhas geradas a partir das geometrias: (a) sem deformação; (b) com deformação.

Ainda na fase de pré-processamento, foram determinados os parâmetros de entrada e saída, bem como as condições de contorno do problema que foram baseadas nas turbinas da hidroelétrica de Paulo Afonso IV. Na entrada do duto, foi adotada uma pressão relativa de 120 mca (1177 kPa) e na saída, adotou-se a pressão atmosférica relativa de 0 mca (0 kPa). Ainda como condição de contorno, foi definida uma rotação para o cilindro interno de 1,226 rad/s (12 rpm) mantendo-se o cilindro externo estacionário.

A distância entre os cilindros interno e externo do anel foi de 0,5 mm, e para representar a deformação presente no cilindro externo, optou-se por um semicírculo de raio 0,3 mm, conforme ilustrado pelas Fig. (1.a) e (1.b).

O modelo de turbulência escolhido foi o k-ε, sendo este, segundo Bardina *et al.* (1997), o modelo mais amplamente utilizado na predição de escoamentos turbulentos de fluidos Newtonianos. O parâmetro de intensidade turbulenta, na entrada e saída, recomendado pelo Manual do Ansys (2013) é adotado como 5 e 10 %, respectivamente.

Depois de finalizada a etapa anterior, foi iniciada a fase de processamento que consistiu na resolução das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento (*Navier-Stokes*), em geometria cilíndrica, que segundo Pereira (2000) e Fox (2010), para o escoamento isotérmico de um fluido incompressível e em regime permanente, são descritas como:

$$\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

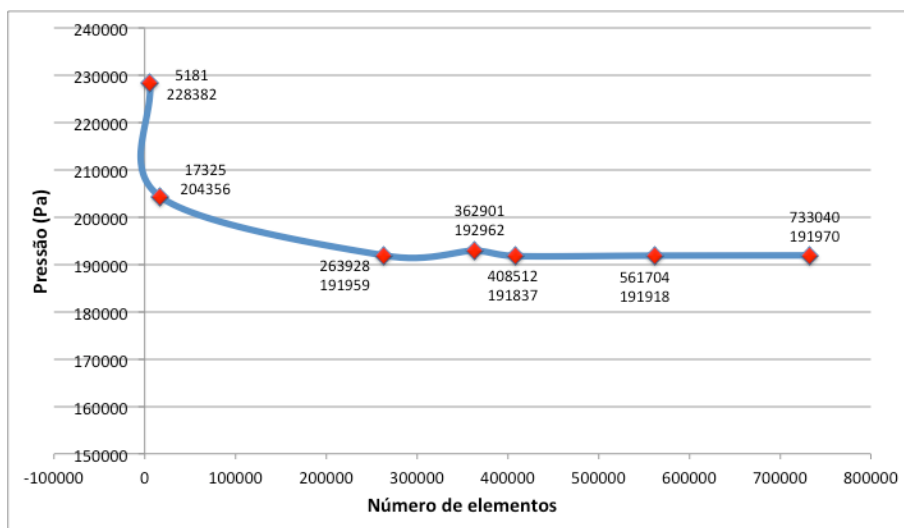
$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

as quais foram resolvidas iterativamente através do método dos volumes finitos.

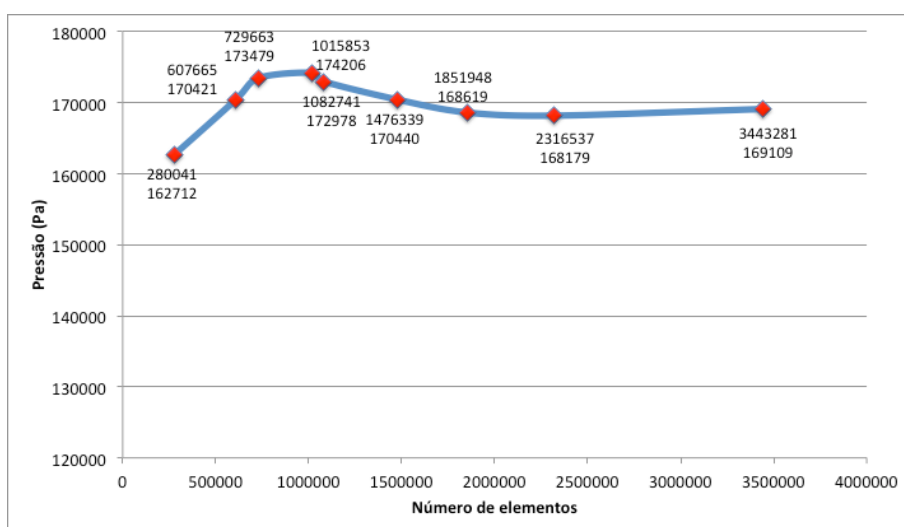
Após a etapa de processamento, foram definidos e analisados os resultados das quantidades físicas desejadas, tais como os campos de pressão e de velocidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma das preocupações neste trabalho foi a busca da confiabilidade dos resultados, diante da falta de avaliações experimentais ou uma revisão bibliográfica mais aprofundada, o que está sendo feito, para encontrar trabalhos científicos que permitam comparações de resultados. No entanto, o problema é de extrema complexidade e Meyer (1969) esclarece que avaliações experimentais têm mostrado que o fluxo tangencial entre cilindros circulares concêntricos, em que o cilindro externo é fixo e o interno é rotativo, como no nosso caso, tem mostrado que a velocidade rotativa do cilindro interno influencia diretamente a estabilidade da camada laminar do escoamento axial.



(a)



(b)

Figura 3. Convergência da malha: (a) sem deformação; (b) com deformação.

Diante desta limitação de literatura especializada, de modo a garantir que os resultados encontrados são independentes do tamanho dos elementos que compõem a malha, foi realizada uma análise de convergência sendo avaliado o comportamento da pressão em um determinado ponto no escoamento em função da variação do número de elementos constituintes da malha. O ponto escolhido se encontrava no meio da folga entre os cilindros e, no caso com deformação, o local de análise foi próximo a esta, devido ao interesse em analisar o escoamento em suas redondezas. As Figuras (3.a e 3.b) apresenta os resultados encontrados a partir dessa análise.

Conforme a Fig. (3.a), a partir de aproximadamente 340 mil elementos, a pressão teve uma variação em torno de 0,04%, sendo este um valor de erro considerado aceitável nesta avaliação, se for levado em conta o valor da pressão na entrada. Por outro lado, para a Fig. (3.b), em aproximadamente 1,5 milhões de elementos foi alcançado um erro de 1%, o que foi considerado também aceitável, devido ao comportamento apresentado pelos pontos posteriores a este (malha mais refinada).

Além da convergência apresentada, foi realizada também uma análise da qualidade da malha gerada em cada simulação por meio de parâmetros disponíveis no ANSYS Meshing®. Para tal, foram utilizados os critérios *skewness* e qualidade ortogonal dos elementos. Segundo o manual do Ansys (2013), o primeiro critério não deve exceder 0,95 e o segundo não deve ser menor que 0,01. As Figuras (4.a e 4.b) mostram os valores encontrados a partir do uso desses critérios para um dos casos analisados.

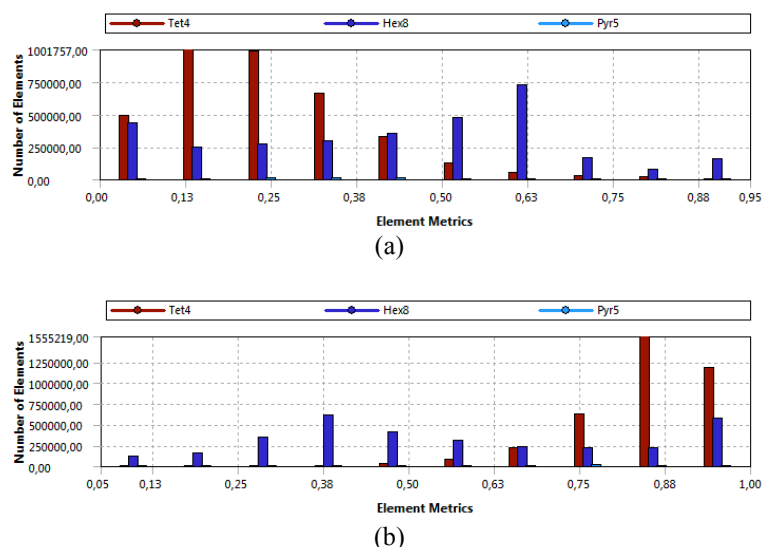
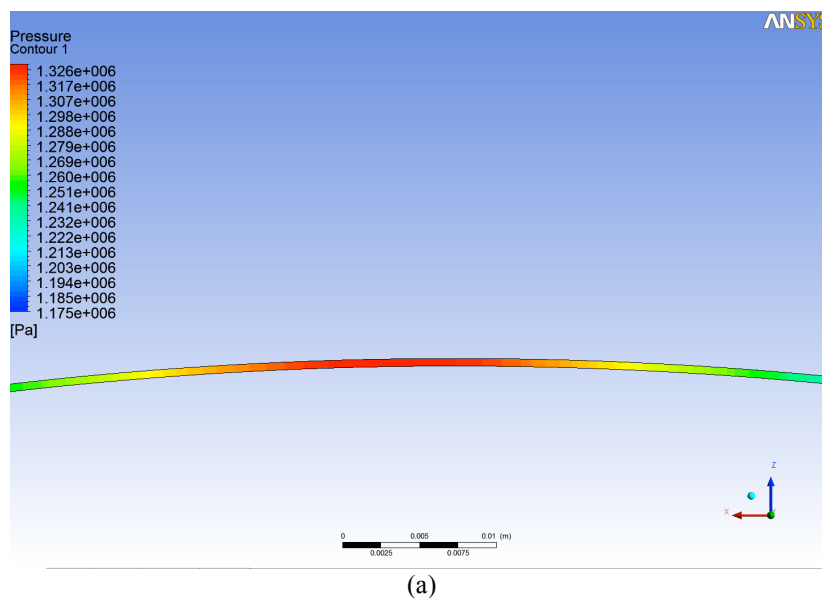


Figura 4. Critérios de análise da qualidade da malha. (a) *Skewness*; (b) Qualidade ortogonal.

É possível perceber que os valores recomendados foram atingidos, além de se ter obtido valores médios, tanto para o critério *skewness* (0,328) quanto para o da qualidade ortogonal (0,720), comprovando assim a capacidade da malha em gerar simulações confiáveis.

A partir do procedimento apresentado na metodologia do presente trabalho, foi possível simular o escoamento ao longo da folga. Os resultados encontrados podem ser visualizados nas Fig. (5.a e 5.b), na forma de contornos de pressão. É possível perceber uma queda acentuada na pressão máxima entre os dois casos analisados, como esperado. No caso sem a presença da deformação (Fig. 5.a), foram captadas pressões na ordem de 10^6 enquanto que, para o caso do cilindro com deformação (Fig. 5.b), os valores atingiram magnitudes da ordem de 10^5 .

Este fato é particularmente interessante porque sugere que a detecção de problemas, devido a reação álcali agregado do concreto, causando deformação no anel externo, as quais podem ser detectadas com sensores de pressão dinâmica. Conclui-se ainda que é perfeitamente possível detectar e monitorar esse tipo de problema, fazendo-se o monitoramento da pressão ao longo da vida operacional da turbina. Como mencionado, uma revisão bibliográfica aprofundada está em curso, mas as tentativas de monitorar este tipo de defeito têm sido realizadas com sensores de proximidade e vibrações, como nas investidas citadas nos trabalhos de Abrantes (2005) e Rocha (2004).



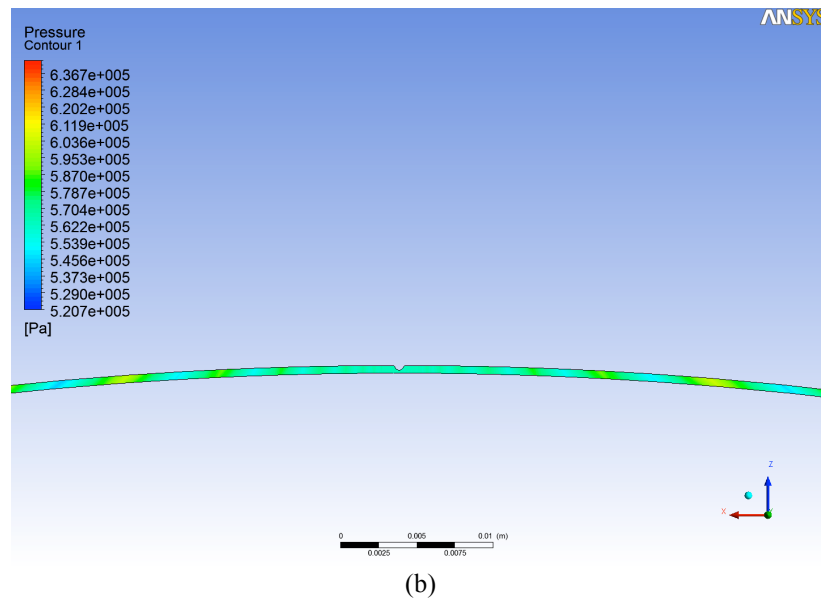
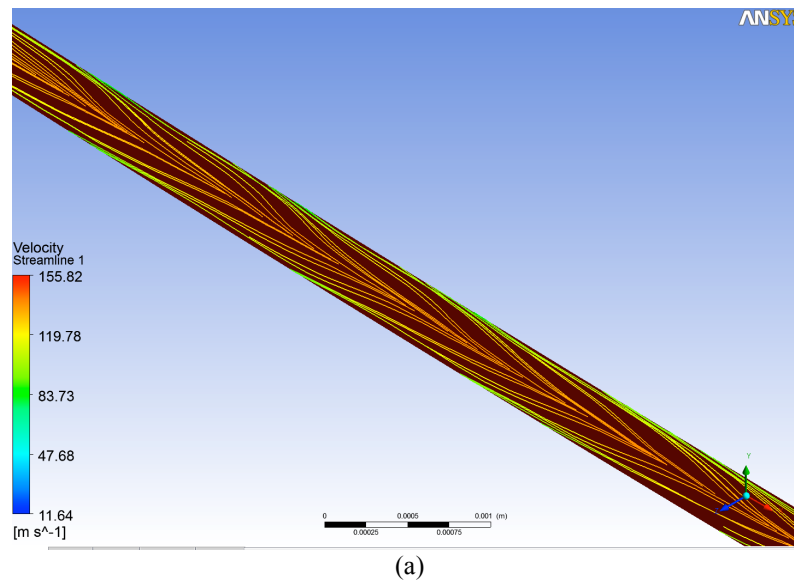


Figura 5. Contornos de pressão, em um plano distando 10 mm da entrada, na geometria: (a) sem deformação; (b) com deformação.

Foram analisadas também, as isolinhas de função corrente para os dois casos e os resultados podem ser visualizados nas Fig. (6.a e 6.b).

É possível perceber que, devido a grande proporção entre o diâmetro e a folga do cilindro, além da abrupta diminuição da área de escoamento devido a deformação, causando uma elevada perda de carga, houve, no segundo caso (Fig. 6.b), diminuição da velocidade do escoamento e a geração de zonas de recirculação ao redor da deformação, causando a perturbação do escoamento. Por outro lado, para o escoamento sem a presença da deformação (Fig. 6.a), é possível visualizar um escoamento muito mais uniforme, sem recirculações.



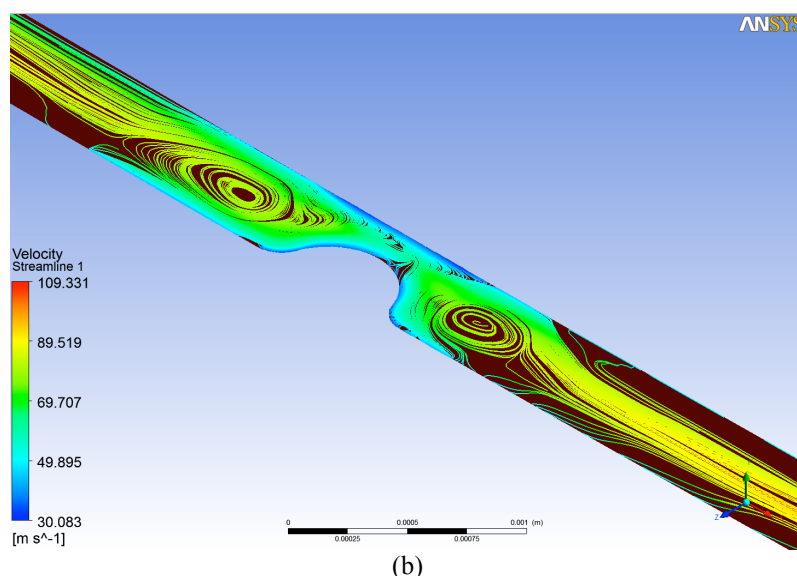


Figura 6. Isolinhas de função corrente, em um plano distando 10 mm da entrada, na geometria: (a) sem deformação; (b) com deformação.

5. CONCLUSÕES

Como mostram os resultados, a partir da análise dos contornos de pressão, foi observada uma queda significativa desta, no caso em que o cilindro externo apresentou uma deformação. Esta análise pode ser utilizada para a detecção de possíveis imperfeições em turbinas do tipo Francis de eixo vertical, por exemplo, a partir do monitoramento dos valores de pressão em diversas posições, ao longo do escoamento. Estes resultados abrem um leque de possibilidades para a realização de manutenção preventiva nestas turbinas, trazendo perspectivas muito boas para monitoramento e acompanhamento do problema pelo setor de manutenção. Sendo assim, detectado previamente os possíveis problemas que possam ser causados pelo aparecimento dessas deformações, é possível executar uma manutenção preventiva, através de paradas programadas dessas turbinas, reduzindo custos e os impactos causados por paradas imprevistas.

Outras investigações estão sendo realizadas, como por exemplo, a aproximação do presente problema como o de escoamento entre placas planas e a avaliação da flutuação de pressão de forma a prever possíveis pulsações que excitam a turbina nesta frequência e assim, o defeito também possa ser avaliado com sensores de vibrações sem a necessidade de instalação de sensores de pressão.

Além da limitação de trabalho reportados na literatura sobre o tema, um grande obstáculo encontrado no estudo foi a pequena dimensão da folga em comparação com o diâmetro do cilindro. Esta desproporção dificultou bastante a simulação, tanto no que diz respeito à geração da malha, quanto a apresentação dos resultados encontrados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESP, pela concessão da bolsa de iniciação científica ao aluno Lucas Campus Barreto, importante para formação de novos profissionais da engenharia e o desenvolvimento de da pesquisa científica.

7. REFERÊNCIAS

- Abrantes, M.V.G.D., Medeiros, J.B. de, Rocha, R.de O. e Zindeluk, M., 2005. "Fault Diagnosis of Rotating Machinery Observing Changes in the Pressure Distribution", Proceedings of the XI DINAME, 28th February – 4th March, Ouro Preto – MG – Brazil, 2005.
- ANSYS Inc., *Ansys Fluent User Theory Guide*, v. 15.0, 2013.
- Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. (1997), "Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development", NASA Technical Memorandum 110446.
- Dou Hua-Shu, Khoon, Boo Cheong Khoo e Yeu, Khoon Seng Yeo, 2008. "Instability of Taylor–Couette flow between concentric rotating cylinders". *International Journal of Thermal Sciences* 47, 1422–1435.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., 2010. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Rio de Janeiro: LTC.
- Meyer, Kenneth A., 1969, "Three-Dimensional Study of Flow between Concetric Rotating Cylinders". *Hight Speed in Fluid Dynamic*. AIP Physics of Fluids, 12, II-165.
- Pereira, L. M., 2000, "Solução das Equações de Navier-Stokes e da Energia em Coordenadas Cilíndricas via Transformação Integral". 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

- Rocha, R.de O., Valentim, M.A. e Medeiros, J. B. de., 2004, “Parâmetros Preditivos para o Comportamento Dinâmico das Turbinas de Paulo Afonso IV afetadas pela Reação Álcali-agregado” Anais do II ENAM, November 7-10, Belém – PA – Brasil.
- Budynas, R. G., Nisbett, J. K., & Shigley, J. E. (2008). “Shigley's mechanical engineering design”, New York, McGraw-Hill.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION, VIA CFD, OF PRESSURE AND VELOCITY FIELD IN THE CLEARANCE BETWEEN TWO CONCENTRIC ROTATING CYLINDER

L. C. BARRETO, lucasc.barreto@hotmail.com¹
J. B. MEDEIROS, jose.bismark@univasf.edu.br²
L. M. PEREIRA, luiz.mariano@univasf.edu.br³
J. P. ALENCAR Jr, jose.pereira@univasf.edu.br⁴

^{1,2,3,4} Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Mecânica,

Abstract. *This paper presents the use of computer simulations applied to deformed stationary ring of hydrogenerators used by the Francis vertical shaft turbines, in which the concrete undergoes alkali-aggregate reaction. This reaction causes the loss of the circularity of the outer ring, causing the risk of friction between the inner ring (rotary) and the external and hence provoking serious damage to the installation. It is also studied the pressure field emergence caused by the variation of the gap between the rings, so that these measurements can provide alternatives for monitoring the problem. It is also sought to study whether these pressure fields contribute to the overall level of system vibration, and thus can be used as an alternative to detection and measurements of vibration problems. The simulations were performed with the aid of a fluid dynamics analysis (Computational Fluid Dynamics - CFD) software (ANSYS®) considering the flow turbulent, both in the axial and tangential direction induced by rotation of the inner shaft. From the pressure contours analysis, it was detected a significant drop in pressure on the ring with the deformation. This analysis can be used in the detection of imperfections in Francis vertical shaft turbines for instance, by monitoring the pressures values in several positions along the flow.*

Keywords: *Pressure field, Hydrodynamics Theory, CFD, Rotary Machines.*