



**XXIV SNPTEE**  
**SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E**  
**TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/21

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

## **GRUPO - 1**

### **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

#### **INFLUÊNCIA DA CRUZETA SUPERIOR NO DIMENSIONAMENTO DO HOUSING DO GERADOR EM USINAS SEM A PRESENÇA DE LAJE DE CONCRETO NO NÍVEL DA PLATAFORMA DO GERADOR**

**Samuel Domingos Leal (\*)**  
**GE Renewable Energy**

**Fabio José Garcia dos Santos**  
**GE Renewable Energy**

## **RESUMO**

Este artigo apresenta um estudo simplificado sobre a influência da consideração da estrutura da cruzeta superior de um gerador vertical no dimensionamento da flexibilidade do barril de concreto, em arranjos em que a presença de laje no nível da plataforma superior é limitada ou inexistente. Dependendo da abordagem aplicada no cálculo da flexibilidade, a espessura do barril e o arranjo da casa de força podem ser otimizados.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Flexibilidade do concreto, Cruzeta do gerador, Otimização casa de força.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A otimização da casa de força contribui consideravelmente para a viabilidade de um projeto hidrelétrico, assim arranjos sem presença de laje de concreto no nível da cruzeta superior do gerador tem se tornado cada vez mais comum. Esta configuração de casa de força pode permitir uma economia de custos, além de reduções significativas nos cronogramas de obras civis e montagem, uma vez que a ausência da laje de concreto no nível da cruzeta superior do gerador facilita a instalação de equipamentos periféricos no nível do piso do gerador.

Por outro lado, a ausência de laje elimina um nível da casa de força para alocação de equipamentos periféricos, motivo pelo qual se recomenda um estudo detalhado de distribuição dos equipamentos para a confirmação da viabilidade da solução. As preferências por uma ou outra solução envolve um ambiente polêmico, motivo pelo que não entraremos no mérito.

Para unidades geradoras dotadas de mancal superior se recomenda que o estabelecimento da elasticidade do conjunto associado a esse mancal seja analisada juntamente com a configuração do poço do gerador, uma vez que o mesmo pode ser caracterizado por apenas um barril de fechamento em concreto ou estar associado a uma laje na sua parte superior.

### **2.0 - CÁLCULO DA FLEXIBILIDADE DO BARRIL DE CONCRETO**

O projeto da estrutura civil da casa de força em uma usina hidrelétrica deve considerar os esforços estáticos e dinâmicos oriundos dos equipamentos eletromecânicos e hidráulicos em serviço. Além de suportar estes esforços com segurança, as deformações da estrutura devem respeitar critérios definidos por normas regulamentadoras,

bem como os limites requeridos para o bom funcionamento dos equipamentos instalados, definidos por seus fabricantes. A flexibilidade da estrutura de concreto é um parâmetro muito importante na análise das rotações críticas da linha de eixo.

A flexibilidade total observada pela linha de eixo é resultado da combinação das flexibilidades de cada elemento mecânico interligado entre o eixo e a estrutura de concreto. Normalmente, os principais elementos são o filme de óleo lubrificante entre o mancal guia e o eixo, a estrutura da cruzeta e a estrutura de concreto.

A análise da flexibilidade da estrutura de concreto é feita pela construtora civil, que normalmente dispõe de pouca informação detalhada a respeito dos equipamentos eletromecânicos a serem instalados. Em usinas com o housing do gerador sem a presença de laje no nível da plataforma superior do gerador, a flexibilidade requerida é comumente obtida aumentando-se a espessura do barril, levando em consideração as cargas de operação atuantes nas fundações da cruzeta, informadas pelo fornecedor do gerador.

Deve-se observar, no entanto, que os esforços oriundos da linha de eixo não são igualmente distribuídos nos pontos de ancoragem no concreto, mas sim dependentes da configuração geométrica da cruzeta superior. Assim, a análise conjunta da estrutura combinada, cruzeta e barril de concreto permite uma avaliação mais precisa da flexibilidade do concreto e evita o superdimensionamento do barril.

### 3.0 - ANÁLISE DA FLEXIBILIDADE DO CONCRETO

Na opção com barril de concreto que permite o vínculo dos braços da cruzeta superior, o cálculo estrutural do concreto deve considerar a distribuição radial das forças associadas a cada braço da cruzeta, com ilustrado na figura 1 e explicado mais adiante no texto. Dependendo da flexibilidade requerida a espessura do barril irá mudar. Linhas de eixo que para o conjunto mancal superior exigem flexibilidade entre 15 e 30  $\mu\text{m}/\text{t}$  devem ter vínculo radial como o poço do gerador e a flexibilidade do concreto tem um papel importante nesse contexto.

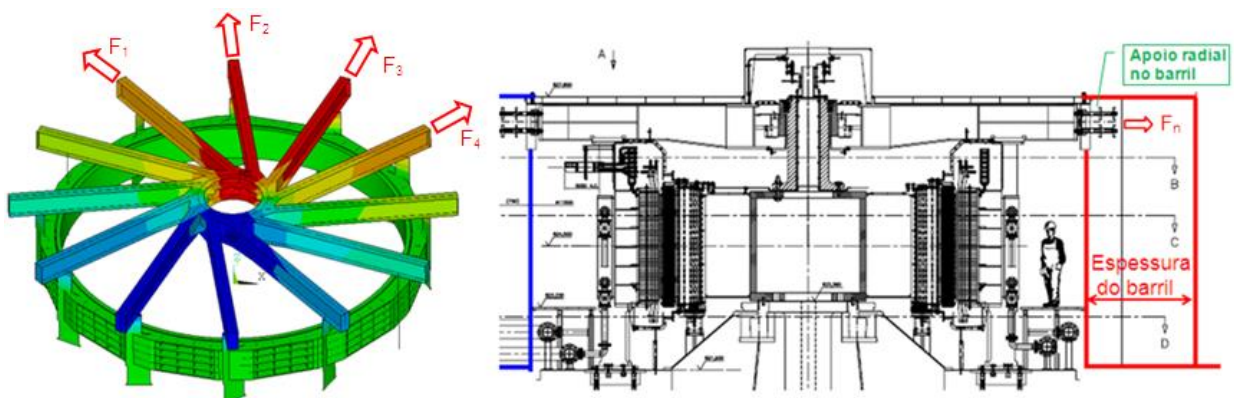


FIGURA 1 – (a) Braços radiais da cruzeta superior, (b) Apoio radial e espessura do barril.

Uma abordagem simples para o cálculo da flexibilidade radial do barril de concreto considera a carga aplicada em um ponto da fundação, normalmente informada pelo fabricante do gerador, e o respectivo deslocamento radial deste ponto, tal como é mostrado na figura 2.

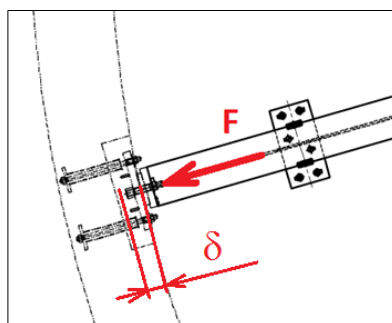


FIGURA 2 – Modelo simplificado para verificação da flexibilidade do barril de concreto.

Este modelo, no entanto, é bastante conservador e geralmente resulta em necessidades de espessuras elevadas no barril, para se atingir o valor mínimo de flexibilidade requerida no cálculo das rotações críticas da linha de eixo. O problema desta abordagem se deve ao fato de considerar o deslocamento do barril em relação a carga de um único braço e não da carga total aplicada sobre a cruzeta.

Exemplificando, se uma carga radial é aplicada no centro da cruzeta, esta é transmitida ao concreto através dos braços, provocando deslocamentos radiais diferentes em cada braço. No entanto, a flexibilidade do concreto deve ser avaliada na direção da força resultante, independentemente de haver ou não uma ancoragem da cruzeta nesta direção. A figura 3 apresenta esta situação.

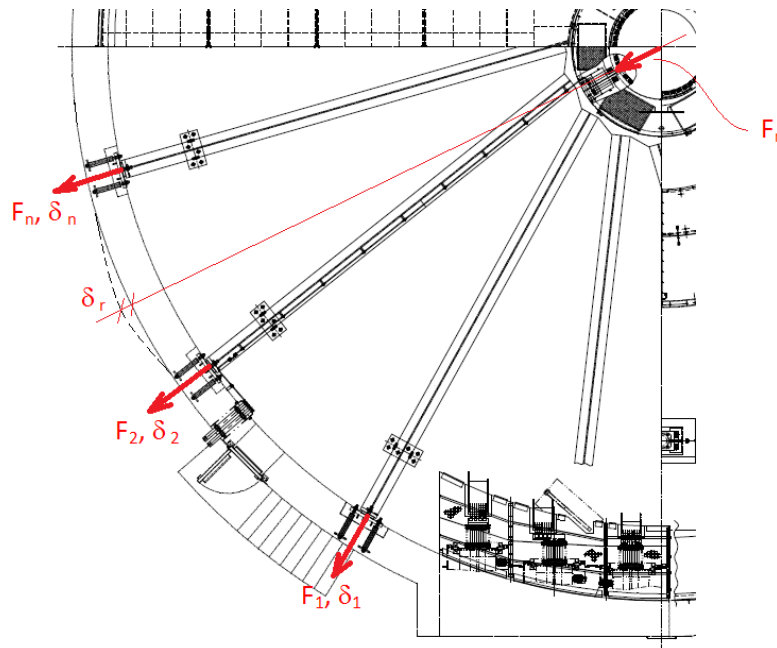


FIGURA 3 – Verificação correta da flexibilidade do concreto.

Esta abordagem também pode ser verificada considerando o sistema formado pelas rigidezes destes componentes. O conjunto cruzeta e concreto pode ser representado por duas molas, cada uma com sua respectiva rigidez  $K$ , associadas em série, tal como é mostrado na figura 4.

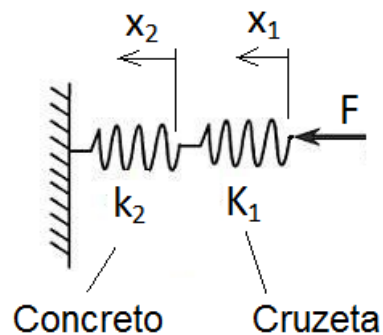


FIGURA 4 – Representação do sistema de rigidezes.

A força  $F$  aplicada no centro da cruzeta é a mesma que atua sobre o concreto. O deslocamento radial de cada componente é dado por:

$$\text{Cruzeta: } x_1 = F / K_1 \quad \rightarrow \quad x_1 / F = k_1^{-1} \quad \rightarrow \quad x_1 / F = f_1$$

$$\text{Concreto: } x_2 = F / k_2 \quad \rightarrow \quad x_2 / F = k_2^{-1} \quad \rightarrow \quad x_2 / F = f_2$$

Onde  $k^{-1}$  é o inverso da rigidez, ou seja, a flexibilidade  $f$ .

Portanto, verifica-se que a flexibilidade do concreto deve ser calculada considerando a força total aplicada sobre a cruzeta e não a resultante de apenas um braço.

#### 4.0 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para comparação das diferenças nos resultados de flexibilidade e de espessura mínima do barril de concreto, os métodos descritos anteriormente foram aplicados em um exemplo hipotético. O modelo é composto de um barril de concreto, sem laje no nível da plataforma superior do gerador e uma cruzeta com braços oblíquos, conforme mostrado na figura 5. Foi feita uma análise por elementos finitos, através do software Ansys Workbench V17.1.

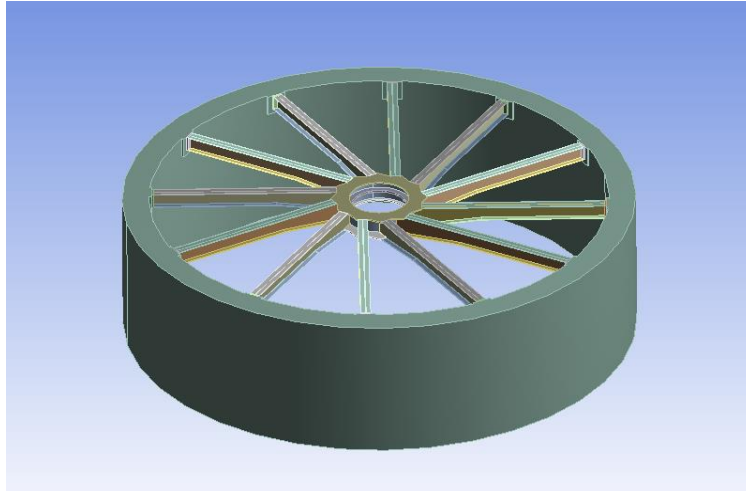


FIGURA 5 – Exemplo de aplicação.

A cruzeta hipotética possui doze (12) braços oblíquos que são ligados ao barril de concreto através de elementos de contato. A parte central possui apoios para doze (12) segmentos de mancal, conforme mostrado na figura 6.

Uma força equivalente a 1,0t foi distribuída sobre cinco (5) segmentos de mancal, considerando uma distribuição cossenoidal. A posição e o valor da força aplicada na cruzeta são apresentados na tabela 1, em relação ao sistema cilíndrico, com origem no centro da cruzeta, conforme indicado na figura 6.

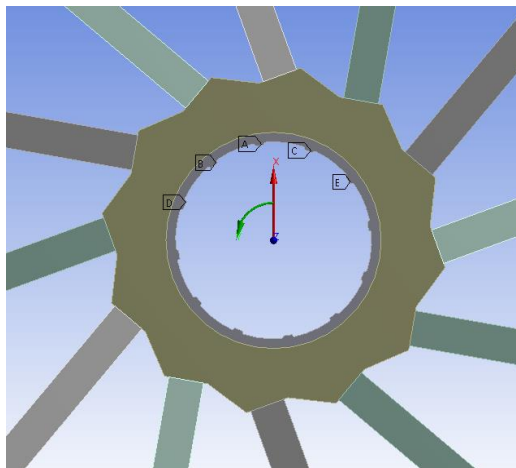


Figura 6 – Parte central da cruzeta.

Tabela 1 – Forças aplicadas na cruzeta

Ponto	R (mm)	$\theta$ (graus)	$F_{\text{radial}}$ (N)	$F_{\text{dirA}}$ (N)
A	1075,0	8,5	3270,0	3270,0
B	1075,0	38,5	2831,9	2452,5
C	1075,0	338,5	2831,9	2452,5
D	1075,0	68,5	1635,0	817,5
E	1075,0	308,5	1635,0	817,5
Total	1075,0	8,5	12203,8	9810,0

A força resultante em cada ponto de ancoragem dos braços no barril de concreto é apresentada na tabela 2, tomando como referência o sistema de coordenadas cilíndrico mostrado na figura 6. Os deslocamentos radiais do concreto em cada ponto de ancoragem são mostrados na tabela 2 e figura 7.

Tabela 2 – Força aplicadas no concreto e deslocamentos radiais

Ponto	R (mm)	$\theta$ (graus)	$F_{\text{radial}}$ (N)	$\delta_{\text{radial}}$ (mm)
A	9400,0	8,5	-	1,35E-3
1	9400,0	15,7	1843,5	1,64E-3
2	9400,0	45,7	1421,0	1,28E-3
3	9400,0	75,7	483,5	4,39E-4
4	9400,0	105,7	-559,7	-4,94E-4
5	9400,0	135,7	-1272,3	-1,10E-3
6	9400,0	165,7	-1489,4	-1,25E-3
7	9400,0	195,7	-1352,3	-1,10E-3
8	9400,0	225,7	-1021,3	-8,35E-4
9	9400,0	255,7	-550,3	-4,94E-4
10	9400,0	285,7	91,0	-1,24E-5
11	9400,0	315,7	889,9	6,42E-4
12	9400,0	345,7	1604,0	1,27E-3

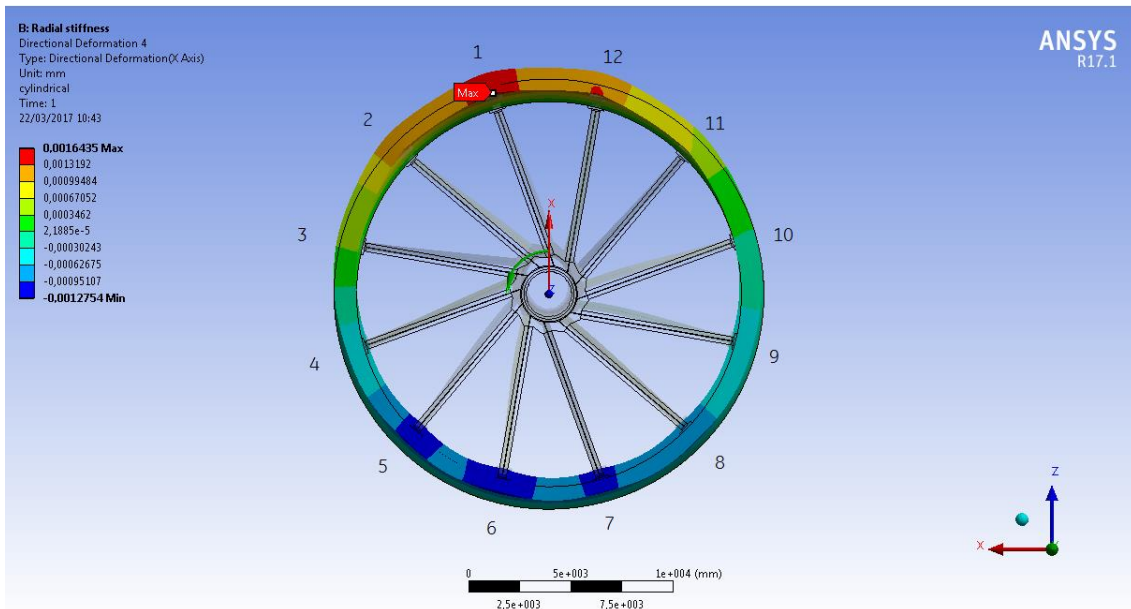


Figura 7 – Deslocamentos radiais do barril de concreto

Considerando a abordagem mais simplista, a flexibilidade do concreto é definida pelo quociente da força resultante no braço mais solicitado pelo respectivo deslocamento radial no mesmo ponto. Assim, a flexibilidade máxima é dada por:

$$f_{\text{concreto}} = \frac{\delta_{r,\text{conc},1}}{F_1} = \frac{1,64 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{1843,5 \text{ N}} = 8,92 \cdot 10^{-7} \text{ mm/N} = 8,92 \mu\text{m/t}$$

Por outro lado, considerando a abordagem mais adequada, obtemos a flexibilidade do barril de concreto através do quociente da força radial total aplicada sobre a cruzeta pelo deslocamento radial do concreto, observado na direção da força.

$$f_{\text{concreto}} = \frac{\delta_{r,\text{conc},A}}{F_A} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{9810,0 \text{ N}} = 1,38 \cdot 10^{-7} \text{ mm/N} = 1,38 \mu\text{m/t}$$

A flexibilidade calculada segundo a abordagem simplista, resulta em um valor aproximadamente seis vezes maior que o mesmo calculado de acordo com a abordagem adequada.

#### 5.0 - IMPACTO NA LINHA DE EIXO

A presença ou não de uma laje no nível da cruzeta superior do gerador pode impactar no arranjo de mancais de guia da unidade geradora, motivo pelo qual se recomenda uma avaliação cuidadosa da solução a ser adotada.

Nos casos em que não é permitido o apoio radial, como barris metálicos ou algumas configurações específicas sem a presença de laje no nível da plataforma superior, ocorrerão altas flexibilidades no conjunto do mancal superior. Portanto, para prover flexibilidade adequada às necessidades da linha de eixo, haverá necessidade de se reforçar a carcaça para torná-la mais rígida ou até adicionar um mancal de guia intermediário, caso o mesmo não esteja presente na unidade geradora.

O impacto na unidade geradora está associado a outros fatores, como rotação nominal da máquina, rotação de disparo, solicitação de rotação crítica posicionada bem acima da rotação de disparo e características sísmicas da região onde a projeto será implementado.

Linhas de eixos com três mancais de guia são adequadas para unidades com média e alta rotação ou com longos comprimentos de eixo. Sem dúvida que esta alternativa se torna mais onerosa, devendo o projetista avaliar esta necessidade para otimizar o conjunto ou propor outra possibilidade.

Naturalmente que as conclusões acima não devem ser tomadas como regras, más bem, se as propõem como ilustrações de tendência e, entendemos que a comunidade irá recebê-las e trata-las como tal.

#### 6.0 - IMPACTO NA CASA DE FORÇA

A otimização da casa de força contribui para a viabilidade de um projeto hidrelétrico, motivo pelo qual arranjos sem presença de laje de concreto no nível da cruzeta superior do gerador tem se tornado cada vez mais comuns. Esta configuração pode permitir uma economia de custos e reduções nos cronogramas de obras civis e montagem, visto que a ausência de tal laje de concreto facilita a instalação de equipamentos periféricos no nível do piso do gerador.

Entretanto, a ausência de laje elimina um nível da casa de força para alocação de equipamentos periféricos, como auxiliares elétricos e mecânicos da unidade geradora. Por esta razão se recomenda um estudo detalhado de distribuição dos equipamentos para a confirmação da viabilidade da solução. As preferências por uma ou outra solução envolve um ambiente polêmico, motivo pelo que não entraremos no mérito.

#### 7.0 - CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a influencia da presença da cruzeta na análise da flexibilidade do barril de concreto em arranjos sem laje no nível da plataforma superior. Neste tipo de arranjo, a ausência da laje facilita a montagem dos equipamentos, porém reduz significativamente a flexibilidade radial do concreto.

Nestes casos, o cálculo simples, considerando as cargas nas fundações da cruzeta, fornecidas pelo fornecedor do gerador, resulta em valores muito elevados de flexibilidade, o que é corrigido aumentando-se a espessura do barril.

A presença da cruzeta no modelo de cálculo permitiu a avaliação da flexibilidade do concreto de uma forma mais correta, pois neste caso, dispunha-se da direção e magnitude da força aplicada.

Recomenda-se a aplicação deste método nos casos de arranjos de casa de força sem a presença, ou com presença parcial de laje, uma vez que a diferença na espessura calculada é significativa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J. ECHEVERRIA, W. OLIVEIRA, M. UEMORI, A especificação dos principais parâmetros e sua influência no custo dos geradores síncronos, Brasília: XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2013.
- (2) P.R. Oda, C. A. Mariano, E. Morales, F. Sá, M. Uemori, W. Oliveira: Redução do Empuxo Magnético Desbalanceado do Rotor da UG11 da UHE Ilha Solteira, XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009.
- (3) LARROZE, P.Y., STROHL, T., “Estudo comparativo das turbinas Bulbo e Kaplan para quedas inferiores a 20m”. IX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1987.
- (4) Ansys Workbench V17.1 for Windows, Ansys.

## DADOS BIOGRÁFICOS



**Samuel Domingos Leal** nasceu em São Paulo, Brasil. Possui graduação em pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) e Mestrado em Engenharia Mecânica pela mesma universidade. Ingressou na ALSTOM em 2007, onde trabalhou como Engenheiro Calculista na área de engenharia de geradores. Atualmente trabalha na GE Renewable.

**Fábio José Garcia dos Santos** nasceu em Guaratinguetá, Brasil. Engenheiro Eletricista, graduado pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Possui pós-graduação em Gestão da Qualidade da Energia em Sistemas Elétricos pela UNESP e Mestrado em Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Atua desde 2003 no cálculo elétrico de geradores e compensadores síncronos e na elaboração de propostas técnicas de equipamentos para centrais Hidrelétricas e Subestações. Atualmente é Engenheiro Sênior de geradores na GE Renewable.