Dimensionamento estrutural de betão armado de envolvimento de caixa espiral em centrais hidroelétricas

Structural design of reinforced concrete encasing spiral case of a hydroelectrical powerhouse

> João Pedro Nunes Rosado Rui Vaz Rodrigues

Resumo

A caixa espiral constitui um elemento importante associado ao funcionamento e geração de energia em centrais hidroelétricas. Para o dimensionamento estrutural do betão armado do envolvimento da blindagem da caixa espiral são muito relevantes as ações de natureza hidráulica associadas à pressão interna, com carácter dinâmico, que induzem solicitações importantes nas estruturas envolventes. Em particular para o dimensionamento, é importante obter a repartição de esforços entre as blindagens e o betão armado envolvente, em função da rigidez das estruturas. Outro aspeto a ter em conta é a geometria complexa, o que obriga a cuidados especiais na modelação numérica do seu comportamento. No âmbito do presente trabalho, efetua-se um estudo dos diferentes métodos de dimensionamento estrutural do betão armado envolvente da caixa espiral, bem como se apresenta uma pormenorização exemplificativa das armaduras tendo por base sua geometria.

Abstract

The spiral case is a fundamental piece in the operation and energy generation of hydropower powerhouses. For the structural design of the reinforced concrete encasing steel spiral case, the most relevant actions are hydraulic actions that create internal pressures, with dynamic characteristics, inducing important stresses in the surrounding structures. Particularly important for the design, is to obtain the distribution of tensile forces between the steel spiral case and the encasing reinforced concrete according to the structural stiffness of parts. Another aspect that needs to be considered is the complex geometry, which requires special care while implementing the numerical model. The scope of this current work is to elaborate a comparative study of the different methods of structural design of the reinforced concrete encasing the steel spiral case, as well as to present the correspondent reinforcement detailing.

Palavras-chave: Central hidroelétrica / Betão armado / Caixa espiral / Modelação / / Pressão hidrostática / Dimensionamento Keywords: Hydropower powerhouse / Reinforced concrete / Spiral case / / Modelling / Hydrostatic pressure

João Pedro Nunes Rosado

Eng.º Civil, MsC Stucky S.A. Renens, Switzerland joaopnrosado@gmail.com

Rui Vaz Rodrigues

Eng.º Civil, PhD Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente, S.A. Lisboa, Portugal rui.vaz.rodrigues@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ROSADO, J. [*et al.*] – Dimensionamento estrutural de betão armado de envolvimento de caixa espiral em centrais hidroelétricas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 14. ISSN 2183-8488. (novembro 2020) 57-70.

1 Introdução

Em traços gerais, uma central hidroelétrica consiste num edifício que alberga os equipamentos eletromecânicos necessários à produção de energia elétrica [1]. O principal equipamento consiste no par gerador-turbina que converte a energia potencial inerente ao fluxo de água em energia elétrica. A caixa espiral constitui um elemento importante associado ao funcionamento e geração de energia em centrais hidroelétricas [7]. No âmbito do presente trabalho efetua-se um estudo dos diferentes métodos de dimensionamento estrutural do betão armado envolvente da caixa espiral (Figura 2), nomeadamente utilizando métodos simplificados para a modelação bidimensional, recorrendo a formulações de cálculo manual e cálculo de secção transversal ao fluxo com elementos planos, e por fim a modelação tridimensional, recorrendo-se a um programa de cálculo automático de análise estrutural [11]. Posteriormente, efetua-se a comparação e análise de resultados obtidos pelas diferentes metodologias.

Tendo por base os esforços obtidos, apresenta-se ainda a respetiva pormenorização de armaduras, considerando a definição geométrica inicial da estrutura (Figura 1).







Figura 2 Colocação das armaduras envolventes à caixa espiral para posterior betonagem [8]

2 Geometria da caixa espiral

A metodologia geral de definição da geometria da caixa espiral é apresentada em [2]. No presente caso de estudo adotou-se a geometria corresponde à caixa espiral de uma turbina do tipo Francis de eixo vertical, conforme adotado em [3]. Interessa igualmente dispor-se das definições da geometria do difusor e do troço inicial do poço do gerador, uma vez que estes elementos estão conectados à caixa espiral, logo igualmente envolvidos pelo betão circundante à caixa espiral.

A geometria analisada para efeitos do modelo de cálculo desenvolvido neste estudo corresponde a uma simplificação da realidade, uma vez que os esforços decorrentes das forças aplicadas na caixa espiral são suportados pela totalidade do bloco estrutural da central hidroelétrica. Isto é, não é apenas no betão de 2.ª fase que se concentram todos os esforços, mas no conjunto betão de 1.ª fase + betão de 2.ª fase. Assim sendo, a modelação cingiu-se a definir simplificadamente o volume relevante de betão envolvente da caixa espiral resultante da consideração de um paralelepípedo de betão, ao qual se subtraíram os volumes de vazios pertinentes (caixa espiral, poço do gerador, cone do difusor). A Figura 3 apresenta diferentes perspetivas e secções do volume final de betão analisado.



Figura 3 Diferentes perspetivas do modelo tridimensional do betão envolvente da caixa espiral

De modo a permitir a comparação de resultados entre os diferentes métodos de cálculo definiram-se neste estudo um conjunto de secções críticas, as quais se apresentam na Figura 4.

Estas secções correspondem às secções planas verticais transversais ao fluxo no interior da caixa espiral e uma secção horizontal plana segundo o eixo da caixa espiral.



Figura 4 Secções críticas para a comparação de resultados

3 Materiais estruturais, ações e combinações de ações

3.1 Materiais Estruturais

Em geral, para o betão envolvente da caixa espiral adota-se a mesma classe de resistência que o betão de primeira fase, uma vez que em fase de operação da central o betão funciona como um todo. Estas duas fases de betonagem podem ser observadas na Figura 1.

A principal diferença deste betão de 2.ª fase é ser composto por agregados finos, habitualmente auto-compactável, de modo a envolver com maior eficácia as armaduras ordinárias.

É importante referir que o processo de envolvimento da caixa espiral não pode ser feito demasiado depressa para controlar as forças de impulsão sobre a caixa espiral, porém não deverá ser demasiado longo para evitar a formação de juntas frias. Consequentemente, a prática recente é proceder a uma betonagem contínua por camadas (habitualmente com 0,30 m a 0,60 m de espessura), esperando que o betão ganhe presa para iniciar a betonagem da camada seguinte.

Para o caso em estudo, os materiais considerados seguiram o prescrito para a restante estrutura da central hidroeléctrica. Logo, a classe de betão considerada foi C30/37 e para as armaduras ordinárias do betão envolvente da caixa espiral A500NR.

3.2 Ações

No âmbito do presente estudo, são consideradas as seguintes ações:

• Peso próprio

Betão $\Upsilon_c = 24 \text{ kN/m}^3$;

Aço da caixa espiral com placas de 30 mm de espessura Υ_{c} = 78 kN/m³;

• Restantes cargas permanentes

Peso total do gerador, Rotor + Estator, igual a 400 t, considerado como uma carga equivalente uniformemente distribuída de valor, $F_{_{RCP,equiv}} = F_{_{RCP,gerador}} / A_{_{coroa\ circular}}) \cong 45\ kN/m^2$, conforme ilustrado na Figura 5;

Sobrecargas de utilização

Peso próprio dos equipamentos eletromecânicos que existem no piso acima da caixa espiral, e sobrecarga de utilização. $SC = 15 \text{ KN/m}^2$;

Pressões hidrostáticas

Nível de Pleno Armazenamento (NPA) = Nível de Máxima Cheia (NMC) = 130,0 m; $z_{eixo \ da \ turbina}$ (cota altimétrica) = 7,24 m, a pressão hidrostática resultante é P_{ws} = 1228 kN/m²;

• Pressões hidrodinâmicas

Condições normais de operação (NOC), $P_{w,d,NOC} = 1183 \text{ kN/m}^2$ Fecho instantâneo do circuito durante rejeição de carga (Golpe de ariete), $P_{w,d,Ariete} = 1775 \text{ kN/m}^2$.



Figura 5 Carga equivalente correspondente às RCP provenientes do gerador

3.3 Cenários de dimensionamento e verificação da segurança

Das ações consideradas, a pressão hidrodinâmica correspondente ao golpe de ariete é o valor mais elevado que atua na caixa espiral, tendo sido considerado como um cenário normal de operação, é condicionante para efetuar a verificação da segurança.

Para o cenário de dimensionamento, os valores de cálculo dos efeitos das ações foram determinados, combinando os valores das ações que podem ocorrer simultaneamente, conforme indicado na EN 1990 [5].

A verificação da Segurança aos Estados Limites Últimos (ULS) de resistência (STR) foi efetuada conforme prescrito na EN 1990 § 6.4.2 (3), utilizando coeficientes parciais de segurança tendo em conta se a ação é favorável ou desfavorável. De acordo com as ações acima definidas, foram definidos os coeficientes parciais de segurança adaptados a partir do indicado na EN 1990, Anexo A1. No entanto, por se tratar de uma estrutura especial, os valores definidos para edifícios foram ajustados à especificidade da estrutura em causa.

Uma vez que a pressão decorrente do golpe de ariete corresponde já à máxima pressão possível no interior da caixa espiral, é muito conservativo considerar o valor de 1,50 para o correspondente coeficiente parcial de segurança. Em alternativa, adotou-se o valor de 1,20 de acordo com a norma SIA 261 § 4.4.3.4 Tabela 1 [6].

Uma vez que o betão envolvente da caixa espiral está sujeito a vibrações, o critério de verificação aos Estados Limites de Utilização

(SLS) passa por garantir a sua integridade e capacidade de absorção destas vibrações. Em alternativa às prescrições propostas na EN 1990 §6.5.1 (1), seguiu-se o manual USACE EM 1110-2-2104 (3.7) ([9]) o qual define (tendo por referencia a classe de aço ASTM grade 60, com tensão de cedência de 420 MPa), para estruturas hidráulicas, um fator hidráulico, H_{ρ} como forma indireta de controlar a abertura de fendas. Esta metodologia encontra-se ainda apresentada noutros regulamentos específicos [10].

Este fator multiplicativo (H_i) aplica-se diretamente à pressão hidrostática na combinação de ELU, ou indiretamente como fator de redução da tensão de cedência do aço das armaduras. Para os casos de flexão pura é indicado o valor de $H_f = 1,3$ e para os casos de tração pura o valor de $H_f = 1,65$.

De acordo com esta metodologia e conforme os resultados de cálculo as forças de tração são preponderantes, logo optou-se por aplicar, conservativamente, $H_f = 1,65$.

Tendo em consideração o cenário de dimensionamento definido, a combinação de ações para ELU resultante, e igualmente utilizada para SLS, é indicada no Quadro 1.

Quadro 1 Combinação condicionante para o cálculo das armaduras

Combinera	Contrio	Ação					
Combinação	Cenario	PP _{Betão}	PP _{Aço Estrutural}	F _{RCP,equiv}	SC	P _{w,d,Ariete}	
ELU	CC _{Ariete}	1,00	1,00	1,00	-	1,20	

4 Metodologias para a repartição de esforços entre as blindagens e o betão armado envolvente

Previamente à modelação do betão envolvente à caixa espiral, é necessário definir a metodologia de cálculo para a interação entre a blindagem em aço da caixa espiral e o betão envolvente. Este problema coloca-se de modo a lidar com as elevadas pressões hidrostáticas aplicadas no interior da caixa espiral e com a necessidade de implementação de soluções economicamente mais adequadas.

Tomando por base a bibliografia existente [4], são de seguida identificadas quatro metodologias principais de interação.

Metodologia 1 – aplicação de revestimento compressível

Esta metodologia baseia-se na aplicação de um revestimento compressível, habitualmente uma manta de elastómero ou similar, a envolver principalmente a parte superior da caixa espiral, de modo a impedir o contacto da caixa espiral com o betão envolvente e consequente quase nenhuma carga é absorvida pelo betão. Esta metodologia apresenta algumas dificuldades construtivas na sua aplicação em obra o que pode pôr em causa a sua eficácia. Adicionalmente, esta solução apresenta habitualmente custos de implementação elevados.

Metodologia 2 – caixa espiral com (Pressão interior = Pressão atmosférica durante a betonagem do betão envolvente)

Esta metodologia baseia-se simplesmente em efetuar a betonagem do betão envolvente deixando a caixa espiral à pressão atmosférica, funcionando esta apenas com uma simples cofragem. Este procedimento faz com que não haja qualquer folga entre a caixa espiral e o betão envolvente, logo, conceptualmente, qualquer pressão interior superior à pressão atmosférica é imediatamente transferida por contacto ao betão envolvente. Este método não é viável para casos de altas pressões hidrostáticas interiores uma vez que os elevados esforços no betão obrigariam a excessivas quantidades de armadura, o que se torna inexequível e economicamente inviável.

Metodologia 3 – caixa espiral com (Pressão interior = Pressão Hidrostática máxima durante a betonagem do betão envolvente)

Esta metodologia baseia-se em efetuar a betonagem do betão envolvente mantendo a caixa espiral à pressão hidrostática máxima de modo a que a blindagem sofra a máxima expansão de projeto. Consequentemente, assim que a pressão interior for inferior à pressão máxima imediatamente a blindagem descola do betão criando uma folga. Esta retração vai originar a folga máxima entre a caixa espiral e o betão envolvente. Desta forma o betão envolvente deixa de estar sujeito a qualquer pressão proveniente da caixa espiral, ficando a blindagem de aço por si só a suportar a totalidade dos esforços. Esta metodologia acaba por permitir obter resultados similares aos obtidos pela metodologia 1. O aspeto negativo desta solução é obrigar a que as elevadas cargas verticais do gerador sejam diretamente transmitidas através do anel distribuidor no interior da caixa espiral.

Outro aspeto negativo é a complexidade e custo de garantir a estabilidade da aplicação da pressão máxima no interior da caixa espiral durante a fase de betonagem do betão envolvente, uma vez que se trata de uma operação de duração elevada face à quantidade m³ de betão em causa.

Metodologia 4 – caixa espiral com (Pressão interior = Percentagem da Pressão Hidrostática de normal funcionamento durante a betonagem do betão envolvente)

Esta metodologia é muito semelhante à metodologia 3 e baseiase em efetuar a betonagem do betão envolvente mantendo a caixa espiral a uma percentagem, habitualmente em redor dos 50% a 70%, da pressão hidrostática de normal funcionamento, $P_{NOC'}$ de modo a que a blindagem sofra alguma expansão. Consequentemente, assim que a pressão interior for inferior a esta pressão % P_{NOC} imediatamente a blindagem descola do betão criando uma folga. Este método permite repartir pressões acima de % P_{NOC} entre a blindagem de aço e o betão envolvente, reduzindo as cargas transmitidas ao betão envolvente durante o normal funcionamento da turbina e eventos de golpe de ariete (interrupção repentina do funcionamento da turbina).

Conclusões

A metodologia 4 é referenciada como sendo a mais utilizada na prática corrente uma vez que:

- Tira partido da capacidade da blindagem de aço da caixa espiral para resistir à máxima pressão hidrostática de projeto;
- Reduz a carga transmitida pela blindagem ao betão envolvente, o que permite reduzir a quantidade de armadura;

 Garante que a blindagem está em contacto com o betão envolvente durante o normal funcionamento da turbina. Este contacto é altamente recomendado pois permite amortecer as vibrações da caixa espiral e por permitir uma melhor distribuição das cargas provenientes da estrutura do gerador.

Desta forma, a carga teórica máxima que a blindagem transfere para o betão envolvente é dada por:

$$\Delta P_{w,d,Ariete} = P_{w,d,Ariete} - \% \times P_{NOC} \tag{1}$$

No entanto, a determinação do nível de repartição da carga, acima de % × $P_{_{NOC'}}$ entre a caixa espiral e o betão envolvente é um processo complexo no qual a geometria da caixa espiral, a espessura do betão envolvente e a rigidez dos materiais têm um papel fundamental. Consequentemente, há várias formulações que, com maior ou menor grau de complexidade, proporcionam uma aproximação ao problema real. Para dar seguimento à modelação da interação entre a blindagem da caixa espiral e o betão envolvente, adotou-se para o caso em análise que a pressão no interior da caixa espiral durante a betonagem do volume envolvente da caixa espiral é 70% da $P_{_{NOC'}}$ logo carga teórica máxima que a blindagem transfere para o betão é $\Delta P_{_{w,dAriete}} = 947 \text{ kN/m}^2$.

5 Modelação Bidimensional

A modelação bidimensional do betão envolvente da caixa espiral pode ser feita quer recorrendo ao cálculo simplificado aplicando formulações teóricas, quer recorrendo ao cálculo automático pela consideração de secções planas com elementos finitos.

As formulações teóricas permitem compreender melhor o mecanismo de distribuição das cargas entre os materiais, mas não são diretamente aplicáveis à geometria do betão envolvente, requerendo um elevado grau de simplificação da geometria de análise.

Por outro lado, o recurso a elementos finitos planos permite reproduzir com grande fiabilidade a geometria real do betão, no entanto pode produzir resultados ambíguos e inesperados caso as condições de fronteira sejam incorretamente definidas. Consequentemente, a experiência do projetista é fundamental para calibrar o modelo de cálculo por elementos finitos.

A conjugação das duas abordagens é habitualmente utilizada permitindo obter um maior grau de fiabilidade dos resultados.

5.1 Cálculo manual com recurso a formulações teóricas

Na bibliografia existente, existem diversas formas de conceptualizar o problema, tendo-se optado por apresentar neste estudo duas dessas formulações.

Formulação 1 – a pressão hidrostática acima da % $P_{_{NOC}}$ é totalmente transferida para o betão envolvente – anel de armadura

Esta formulação adota uma postura conservativa assumindo que a caixa espiral deixa de resistir para pressões hidrostáticas acima de % $P_{_{\rm NOC}}$ transferindo a pressão adicional ao betão envolvente.

Na realidade, o fornecedor dos equipamentos eletromecânicos

dimensiona a caixa espiral para resistir à máxima pressão hidrostática, logo o adicional de pressão acaba por se repartir entre a caixa espiral e o betão envolvente.

Relativamente ao betão envolvente, a formulação assume que este se encontra fendilhado, logo a resistência do anel de betão envolvente é apenas conferida pela armadura transversal, sendo a influência da armadura longitudinal desprezada.

Tal é compreensível se se planificar a superfície tridimensional da caixa espiral. Nesta visão planificada, é notório que o "vão" na direção vertical (perpendicular à direção do fluxo no interior da caixa espiral) é notoriamente mais curto que o "vão" horizontal (paralelo à direção do fluxo no interior da caixa espiral), funcionando a "laje" numa só direção.

Consequentemente, considerar que todos os esforços são suportados pela armadura circunferencial, $A_{s,cir}$ é uma simplificação plausível que garante o equilíbrio. Assim as armaduras do betão envolvente da caixa espiral são obtidas da seguinte forma:

$$F = \Delta P_{int} \times r_{s,int} \tag{2}$$

$$A_{s,cir} = \frac{F}{f_{yd}} \tag{3}$$



Figura 6 Força de tração na armadura circunferencial do betão armado envolvente

Formulação 2 – a pressão hidrostática acima da % $P_{_{NOC}}$ é repartida entre a caixa espiral e o betão envolvente – teoria de tubos de paredes espessas – equações de Lamé

Uma vez que a blindagem de aço da caixa espiral é dimensionada para resistir à pressão hidrostática máxima, esta tem capacidade para contrariar a expansão sob a ação do adicional de pressão hidrostática, logo transferindo menos carga ao betão envolvente que a Formulação 1. Por outro lado, ao querer expandir, a caixa espiral encontra oposição dada pelo betão envolvente, entrando em jogo as diferenças de magnitude dos módulos de elasticidade entre o aço e o betão.

Para calcular a distribuição de forças entre o aço e o betão, recorre--se, por simplificação, às equações de Lamé aplicadas à teoria de tubos de paredes espessas, para cilindros de secção mista.

Numa primeira etapa, é necessário determinar o valor da pressão na superfície de contacto entre a blindagem de aço e o betão, $p_{c'}$ tendo em consideração a rigidez entre a blindagem e o betão armado envolvente através da relação entre os módulos de elasticidade do aço e do betão.



 b) Diagrama de tensões ao longo da secção transversal do anel de betão envolvente

Figura 7 Modelo para o cálculo da repartição de esforços

$$P_{c} = p_{i} \frac{n \times k_{s}^{'}}{n(k_{s}^{'} + b_{s}) + (k_{c}^{'} + 2 - b_{c})}$$
(4)

Onde:

$$\begin{array}{l} \rho_i = \Delta P_{int}; \\ n = \frac{E_c}{E_s} \text{, em que } E_c \text{ é o módulo de Elasticidade do betão envolvente e} \end{array}$$

E_c é o módulo de Elasticidade do aço da blindagem;

 $b_s = 1 - v_s$, em que v_s é o coeficiente de Poisson do aço da blindagem; $b_c = 1 - v_s$, em que v_s é o coeficiente de Poisson do betão envolvente;

$$K_s = \frac{2}{2 \times k_s + k_s^2} \tag{5}$$

$$k_{s} = \frac{1}{r_{s,int}} \left(r_{s,ext} - r_{s,int} \right) \tag{6}$$

$$k_{c}^{'} = \frac{2}{2 \times k_{c} + k_{c}^{2}}$$
(7)

$$k_c = \frac{1}{r_{c,int}} \left(r_{c,ext} - r_{c,int} \right) \tag{8}$$

Conhecendo o valor da pressão p_c aplicada ao betão, então é possível analisar o "anel" de betão usando as equações de Lamé para determinar as tenções tangenciais nas faces interna e externa.

Considerando que o betão não resiste a tensões de tração, então o diagrama de tensões ao longo da secção transversal do anel é integrado de modo a obter as forças de tração equivalentes que serão utilizadas para calcular as áreas de armaduras.

$$\sigma_{t,int} = (\rho_c - \rho_{ext}) \times (1 + k'_c) - \rho_{ext} \quad \text{se } \rho_{ext} = 0 \Longrightarrow \sigma_{t,int} = \rho_c \times (1 + k'_c) \quad (9)$$

$$\sigma_{t,ext} = (\rho_c - \rho_{ext}) \times k_c - \rho_{ext} \quad \text{se } \rho_{ext} = 0 \Longrightarrow \sigma_{t,ext} = \rho_c \times k_c$$
(10)

$$r_{cm} = r_{c,int} + \frac{h}{2} \tag{11}$$

$$\sigma_{t,cm} = \left(\rho_c - \rho_{ext}\right) \times \left(\frac{r_{c,ext}^2}{r_{c,ext}^2 - r_{c,int}^2}\right) \times \left(\frac{r_{cm}^2 + r_{c,int}^2}{r_{cm}^2}\right) - \rho_c \text{ se } pext = 0 \Longrightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_{t,cm} = \rho_c \times \left(\frac{r_{c,ext}^2}{r_{c,ext}^2 - r_{c,int}^2}\right) \times \left(\frac{r_{cm}^2 + r_{c,int}^2}{r_{cm}^2}\right) - \rho_c$$
(12)

Cálculo das armaduras

$$AS_{int} = \int_{c_{int}}^{t_{cm}} \sigma_t \tag{13}$$

$$AS_{ext} = \int_{t_{cm}}^{t_{c,ext}} \sigma_t \tag{14}$$

5.2 Cálculo automático com recurso a elementos finitos planos

O recurso ao cálculo automático permite analisar várias secções planas verticais, transversais ao fluxo no interior da caixa espiral, de modo a obter as armaduras circunferenciais que conferem a rigidez anelar, mas também analisar as zonas onde a geometria peculiar, por exemplo junto ao anel de distribuição, cria concentração de tensões. Por outro lado, o cálculo automático permite também analisar a secção plana horizontal pelo eixo da caixa espiral, de modo a obter uma estimativa da armadura longitudinal. É primordial, definir corretamente as condições de fronteira a considerar no modelo de cálculo de modo a replicar as restrições impostas pelas outras partes da estrutura da central, como por exemplo restrição dos deslocamentos na direção transversal, conferida pelo confinamento proporcionado pelos blocos adjacentes e pelas paredes da escavação. As figuras 8a) e 8b) e as figuras 9a) e 9b) exemplificam estas particularidades da definição das condições de fronteira.



Figura 8Modelo de cálculo plano – secções

Ao contrário das formulações simplificadas, os modelos de elementos finitos planos permitem considerar todas as cargas atuantes em simultâneo, nomeadamente: peso próprio, cargas provenientes do gerador e mesmo ter em consideração a variação da pressão interna em função da geometria da caixa espiral. As figuras seguintes exemplificam as particularidades das cargas aplicadas.

Na Figura 10 e Figura 11 apresenta-se sumariamente a informação obtida para o cálculo aos ELU para as secções críticas definidas.



b) Secção h-h, W [kN/m²] (F2, eixo local)

Figura 9 Carregamentos aplicados para as restantes cargas permanentes e pressão interna – Modelos planos



Figura 10 Tensões principais de tração, $s_{max'}$ [kN/m²]



Figura 11 Secção h-h, Tensões principais de tração, smax, [kN/m²]

6 Modelação tridimensional

O recurso ao cálculo automático com elementos finitos tridimensionais permite analisar de forma completa a geometria complexa do betão envolvente da caixa espiral sujeita as pressões hidrostáticas no seu interior.

Por este processo é possível averiguar a interferência da variação da redução da secção da caixa espiral e melhor compreender a forma como é feita a repartição da resultante das ações entre as tensões principais.

Este método pode apresentar dificuldades no processo de modelação da geometria, consoante o programa de cálculo de elementos finitos disponível. No presente estudo, recorreu-se ao programa DIANA [11].

É de referir que a modelação em sólidos da blindagem em aço da caixa espiral (espessura de apenas 30 mm) não foi efetuada, uma vez que foi dada prioridade à criação de um modelo com uma malha não demasiado refinada.

Para a apresentação de resultados e posterior comparação com os anteriores métodos de cálculo, produziram-se as mesmas secções planas verticais, transversais ao fluxo no interior da caixa espiral.

Posteriormente aplicaram-se os mesmos métodos de cálculo para a obtenção das armaduras circunferenciais e da armadura longitudinal.

6.1 Modelo de cálculo

O programa de calculo DIANA apresentou grandes vantagens uma vez que permitiu importar a geometria dos volumes previamente definidos no programa de desenho CAD e de seguida criar automaticamente a malha de elementos finitos. Definiu-se para esta malha que o elemento finito base tivesse 0,50 m para a máxima dimensão e fosse do tipo *brick* (20 pontos de integração) uma vez que estes permitem obter melhores resultados quando comparados com os elementos do tipo *tetrahedron* (4 pontos de integração). Apresenta-se na Figura 12 algumas vistas da malha de elementos finitos gerada no modelo de cálculo.



Figura 12 Modelo de cálculo, malha de elementos finitos

As condições de fronteira foram definidas, em conformidade com a geometria da central hidroelétrica considerando as restrições impostas pelas outras partes da estrutura, nomeadamente restrição dos deslocamentos na direção transversal, conferida pelo confinamento proporcionado pelos blocos adjacentes e pelas paredes da escavação, modelo de cálculo, condições de fronteira. Foi ainda modelada a ligação rígida conferida pelo anel distribuidor em aço estrutural, conforme indicado na Figura 13b). Esta ligação é fundamental para o cálculo de modo a garantir o fecho das tensões circunferenciais de tração na blindagem.





b) Modelo de cálculo, anel distribuidor

Figura 13 Modelo de cálculo do betão armado envolvente à caixa espiral

6.2 Resultados

As figuras Figura 14 a) e b) apresentam sumariamente os resultados obtidos para a tensão de tração, tangencial à blindagem da caixa espiral, no volume do betão envolvente para a combinação ELU.



Figura 14 Resultados, tensão principal de tração S1 (eixo principal), ELU [kN/m²]

As figuras Figura 15 a) e b) apresentam sumariamente os resultados obtidos para as seções críticas definidas. Para a análise dos resultados e comparação com as outras metodologias definiram-se as seções locais, conforme indicado.





7 Comparação e análise de resultados

Para a comparação de resultados entre as quatro metodologias diferentes de cálculo das armaduras do betão envolvente da caixa espiral (método simplificado anel de tração, método simplificado equações de Lamé, cálculo automático por elementos finitos planos e cálculo automático por elementos finitos tridimensionais), compilaram-se as tabelas para cada secção crítica (*a-a, b-b* e *h-h*) e para cada secção local de integração. Apresenta-se no Quadro 2, o resumo dos resultados obtidos, as secções locais definidas para a secção crítica *a-a* (tensões positivas são de tração, em kPa, e armaduras resultantes em cm²/m).

Quadro 2 Resumo dos resultados para a secção a-a

		Secção local 1-1					
	-	Cálculo	manual	Cálci	ulo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	3495,2	2325,0	- 280,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	2645,7	5158,0	6955,0		
AS	[cm ² /m]	67,7	27,5	24,6	11,6		
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	23,9	36,6	42,3		
AS	[cm ² /m]	67,7	51,4	61,3	53,8		

		Secção local 2-2					
		Cálculo manual		Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	3495,2	4055,0	4580,0		
$\sigma_{_{ct,ext}}$	[кра]	0,0	2645,7	970,0	- 10,0		
AS	[cm²/m]	67,7	27,5	42,4	70,2		
AS _{ext}	[cm²/m]	0,0	23,9	21,7	10,6		
AS _{total}	[cm ² /m]	67,7	51,4	64,1	80,8		

	-	Secção local 3-3					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct.int}$	[кра]	0,0	3495,2	1697,0	2750,0		
$\sigma_{_{ct,ext}}$	[кра]	0,0	2645,7	1585,0	1380,0		
AS	[cm²/m]	67,7	27,5	28,7	40,7		
AS _{ext}	[cm²/m]	0,0	23,9	27,7	28,3		
AS_{total}	[cm²/m]	67,7	51,4	56,4	68,9		

		Secção local 4-4					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	3495,2	1301,0	700,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	2645,7	0,0	- 80,0		
AS	[cm²/m]	67,7	27,5	28,4	15,8		
AS _{ext}	[cm²/m]	0,0	23,9	7,4	3,2		
AS _{total}	[cm ² /m]	67,7	51,4	35,8	18,9		

Tendo em conta os valores apresentados e a distribuição de tensões principais de tração cálculo por elementos finitos 2D e cálculo por elementos finitos 3D, verifica-se que:

- As secções locais 1-1 e 2-2 apresentam resultados semelhantes ao de uma viga bi-encastrada sujeita a carregamento uniforme, uma vez que na secção local 1-1 a tensão máxima de tração é na face exterior (resultado correspondente ao 1/2 vão) e na secção local 2-2 a tensão máxima de tração é na face interior (resultado correspondente ao apoio encastrado). Este comportamento resulta do facto de a espessura de betão envolvente da caixa espiral entre as seções locais 1-1 e 2-2 variar consideravelmente, o que se traduz em variação acentuada de rigidez de flexão. Consequentemente, os resultados obtidos divergem consideravelmente dos resultados que as formulações teóricas proporcionam;
- Os resultados obtidos pelo cálculo automático para a secção local 3-3 aproximam-se do comportamento previsto pelas equações de Lamé, embora o modelo 3D requeira mais armadura na face interior;

 Já para a secção local 4-4, os resultados obtidos pelo cálculo automático divergem bastante do comportamento previsto pelas formulações teóricas, revelando que restrições na fundação do bloco de betão permitem uma melhor distribuição de tensões de tração.

Apresenta-se no Quadro 3 o resumo dos resultados obtidos para as secções locais definidas para a secção crítica b-b.

Quadro 3 Resumo dos resultados para a secção b-b

		Secção local 1-1					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2456,6	3087,0	1800,0		
$\sigma_{ct.ext}$	[кра]	0,0	1543,7	0,0	275,0		
AS	[cm ² /m]	63,4	29,1	57,3	40,8		
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	23,0	5,4	15,1		
AS	[cm ² /m]	63,4	52,1	62,7	55,9		

		Secção local 2-2					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2456,6	1006,0	570,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1543,7	2422,0	4350,0		
AS	[cm ² /m]	63,4	29,1	16,0	14,6		
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	23,0	25,6	40,1		
AS _{total}	[cm ² /m]	63,4	52,1	41,6	54,7		

		Secção local 3-3					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2456,6	1738,0	2000,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1543,7	0,0	- 260,0		
AS	[cm ² /m]	63,4	29,1	48,8	57,6		
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	23,0	6,2	2,2		
AS	[cm ² /m]	63,4	52,1	55,0	59,9		

		Secção local 4-4					
		Cálculo	manual	Cálcu	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct.int}$	[кра]	0,0	2456,6	1411,0	1110,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1543,7	87,0	0,0		
AS	[cm ² /m]	63,4	29,1	31,8	24,2		
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	23,0	9,0	5,1		
AS _{total}	[cm ² /m]	63,4	52,1	40,8	29,3		

		Secção local 5-5					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct.int}$	[кра]	0,0	2456,6	4836,0	0,0		
$\sigma_{ct.ext}$	[кра]	0,0	1543,7	7252,0	3680,0		
AS	[cm ² /m]	63,4	29,1	25,3	5,7		
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	23,0	33,0	17,4		
AS	[cm ² /m]	63,4	52,1	58,3	23,1		

		Secção local 6-6					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2456,6	4338,0	9500,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1543,7	11320,0	7000,0		
AS	[cm²/m]	63,4	29,1	14,0	25,2		
AS _{ext}	[cm²/m]	0,0	23,0	23,0	21,9		
AS	[cm ² /m]	63,4	52,1	37,2	47,1		

		Secção local 7-7					
		Cálculo	manual	Cálcı	ılo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2456,6	2993,0	2750,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1543,7	- 11,0	300,0		
AS	[cm ² /m]	63,4	29,1	59,6	67,3		
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	23,0	5,1	22,9		
AS	[cm ² /m]	63,4	52,1	62,7	90,2		

Tendo em conta os valores apresentados no Quadro 3 e a distribuição de tensões principais de tração cálculo por elementos finitos 2D e cálculo por elementos finitos 3D, verifica-se que:

- As secções locais 1-1, 2-2 e 7-7 apresentam resultados semelhantes ao de umaviga bi-encastrada sujeita a carregamento uniforme, uma vez que na secção local 2-2 a tensão máxima de tração é na face exterior (resultado correspondente ao 1/2 vão) e nas seções locais 1-1 e 7-7 a tensão máxima de tração é na face interior (resultado correspondente ao apoio encastrado). Este comportamento resulta do facto de a espessura de betão envolvente da caixa espiral entre as seções locais 1-1 e 7-7 variar consideravelmente, o que se traduz em variação acentuada de rigidez de flexão. Consequentemente, os resultados obtidos divergem consideravelmente dos resultados que as formulações teóricas proporcionam;
- Os resultados obtidos pelo cálculo automático para a secção local 3-3 aproximam-se do comportamento previsto pela formulação de anel de armadura, ao contrário do sucedido para a secção a-a. Isto revela que para espessuras maiores as equações de Lamé deixam de modelar o comportamento real, uma vez que a tensões de tração são dissipadas numa faixa de influência;
- Já para a secção local 4-4, os resultados obtidos pelo cálculo automático divergem bastante do comportamento previsto pelas formulações teóricas, revelando que restrições na fundação do bloco de betão permitem uma melhor distribuição de tensões de tração;
- As secções 5-5 e 6-6 evidenciam claramente o comportamento de anel de tração paralelo à blindagem de aço, sendo a força de tração claramente superior ao momento fletor.

Apresenta-se no Quadro 4 o resumo dos resultados obtidos para as secções locais definidas para a secção crítica h-h.

Quadro 4 Resumo dos resultados para a secção h-h

		Secção local 1-1				
		Cálculo	manual	Cálcu	lo FE	
		Anel	Anel Lamé		3D	
$\sigma_{_{ct,int}}$	[кра]	0,0	2167,3	2900,0	550,0	
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1092,7	1070,0	0,0	
AS	[cm ² /m]	208,1	119,1	125,8	23,4	
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	83,4	64,7	5,0	
AS	[cm ² /m]	208,1	202,6	190,5	28,4	

		Secção local 2-2				
		Cálculo manual		Cálcu	lo FE	
	-	Anel Lamé 2D		2D	3D	
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2167,3	- 625,0	490,0	
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1092,7	2044,0	0,0	
AS	[cm²/m]	205,9	110,8	- 0,4	15,0	
AS _{ext}	[cm²/m]	0,0	85,2	64,3	3,2	
AS	[cm²/m]	205,9	196,0	164,0	18,2	

		Secção local 3-3				
		Cálculo manual		Cálcu	lo FE	
		Anel	Lamé	2D	3D	
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2167,3	3094,0	700,0	
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1092,7	1109,0	0,0	
AS	[cm ² /m]	198,1	105,8	95,8	20,3	
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	81,9	50,6	4,3	
AS	[cm ² /m]	198,1	187,7	146,4	24,6	

		Secção local 4-4				
		Cálculo manual		Cálcu	lo FE	
		Anel Lamé 2D		2D	3D	
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2167,3	3044,0	580,0	
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1092,7	1415,0	0,0	
AS	[cm ² /m]	172,4	88,0	67,5	11,5	
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	71,3	41,0	2,1	
AS _{total}	[cm ² /m]	172,4	159,3	108,5	13,6	

	_	Secção local 5-5				
		Cálculo manual		Cálcu	lo FE	
		Anel	Lamé	2D	3D	
$\sigma_{_{ct,int}}$	[кра]	0,0	2167,3	2068,0	950,0	
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1092,7	- 78,0	420,0	
AS	[cm²/m]	182,9	79,8	16,1	9,5	
AS _{ext}	[cm ² /m]	0,0	73,6	1,8	5,9	
AS_{total}	[cm²/m]	182,9	153,4	17,8	15,4	

		Secção local 6-6					
	-	Cálculo manual		Cálcu	lo FE		
		Anel	Lamé	2D	3D		
$\sigma_{_{ct,int}}$	[кра]	-	-	- 1402,0	1450,0		
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	-	-	- 818,0	920,0		
AS	[cm ² /m]	-	-	0,0	24,9		
AS _{ext}	[cm ² /m]	-	-	0,0	19,6		
AS	[cm ² /m]	-	-	0,0	44,5		

		Secção local 7-7				
		Cálculo	manual	Cálculo FE		
		Anel Lamé 2D		2D	3D	
$\sigma_{ct,int}$	[кра]	0,0	2167,3	1680,0	1870,0	
$\sigma_{ct,ext}$	[кра]	0,0	1092,7	1012,0	340,0	
AS	[cm²/m]	213,2	97,7	17,1	21,6	
AS	[cm ² /m]	0,0	88,9	11,1	7,7	
AS	[cm ² /m]	213,2	186,7	28,2	29,3	

Tendo em conta os valores apresentados na Quadro 4 e a distribuição de tensões principais de tração cálculo por elementos finitos 2D e cálculo por elementos finitos 3D, verifica-se que:

 Os resultados para o modelo 3D são significativamente inferiores aos obtidos pelos outros métodos de cálculo. No entanto considera-se que este é o que produz os resultados mais plausíveis, uma vez que:

Quer os modelos simplificados, quer o cálculo por elementos finitos 2D, partem do princípio de que a totalidade da pressão interna é absorvida apenas pela direção paralela ao eixo da caixa espiral. Este comportamento não traduz o comportamento estrutural real, conduzindo a uma sobrestimação das tensões de tração.

 Os métodos 2D apenas analisam a secção horizontal posicionada ao eixo da caixa espiral e estudam os resultados tendo por base análises bidimensionais. Na realidade, devido à geometria circular da secção transversal da blindagem a rigidez da secção de betão aumenta rapidamente, o que provoca uma repartição tridimensional das tensões.

8 Verificação dos estados limites e pormenorização

A verificação da segurança aos ELS para controlo de abertura de fendas é feita de forma indireta através da consideração do fator hidráulico H_f . No âmbito do presente estudo para efeitos comparativos das diferentes metodologias considerou-se a seguinte tensão de cálculo, tendo por base a metodologia exposta em [9], de forma simplificada:

$$f_{yd,ELU} = \frac{f_{yd}}{H_f} = \frac{435}{1,65} = 263 \text{ MPa}$$
(15)

Para o dimensionamento das armaduras, tendo em consideração a limitação da tensão de cedência do aço das armaduras, foram utilizados os resultados do modelo tridimensional, uma vez que este modela de forma mais precisa a geometria do betão envolvente da caixa espiral.

Apresenta-se na Figura 16, o esquema respetivo das armaduras resultante do dimensionamento da secção crítica b-b:



Figura 16 Secção b-b, esquema de pormenorização das armaduras adotadas

9 Considerações finais

O dimensionamento estrutural do betão armado de envolvimento da caixa espiral é uma tarefa de grande complexidade que requer cuidados especiais na forma determinar e avaliar as distribuições de tensões no betão.

Face à especificidade da geometria peculiar verificou-se que a generalização direta de análises simplificadas não corresponde à realidade, devendo-se procurar conhecer de uma forma mais completa o modo como as cargas internas à caixa espiral são repartidas entre a blindagem de aço e pelo betão envolvente.

De um modo geral, constatou-se que a adoção de modelos de cálculo simplificados permite obter ferramentas de aferição para os modelos mais complexos, mas comprovou-se que, para o presente tipo de estruturas, a modelação tridimensional com elementos finitos sólidos é a forma mais completa para garantir que não haja zonas de convergência de esforços que fiquem por estudar.

No entanto, verificou-se que a escolha do programa/ferramentas de cálculo tridimensional é crucial entre ter ou não sucesso em modelar de forma expedita a geometria; gerar malhas automáticas de elementos finitos; visualizar/analisar resultados. Salienta-se que o refinamento da malha dos elementos é algo igualmente importante, pois se o refinamento for elevado, corre-se o risco de o não ter capacidade de processamento suficiente, mas por outro lado uma malha muita grossa não acompanha devidamente a variação da geometria.

Igualmente importante é considerar corretamente as condições de apoio nos modelos de cálculo, pois a diferença entre os resultados que se obtêm é notória, nomeadamente considerar a restrição conferida pelo anel de distribuição no interior da caixa espiral e a restrição, de deslocamentos horizontais, para forças de compressão conferida pelos blocos adjacentes.

A influência dos efeitos do aumento da temperatura durante a

presa do betão envolvente, os efeitos diferidos do betão (fluência e retração) e a fendilhação no betão envolvente não foram abordados no âmbito do estudo comparativo, sendo alguns destes aspetos abordados em [1].

Referências

- ASCE Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments, Volume 3: Powerhouses and Related Topics, 1989, New York.
- [2] Souza et al. Centrais Hidrelétricas, Estudos para Implantação, Centrais Eléctricas Brasileiras S.A. – Eletrobrás, 1999.
- [3] C.S. Lamego, M. Dimensionamento Estrutural de uma Central Hidroeléctrica a Céu Aberto, Tese de dissertação, Instituto Superior Técnico, 2014.
- [4] Nigam P.S. Handbook of Hydro Electric Engineering, Nem Chand and Brothers, 1985, Roorkee.
- [5] NP EN 1990:2009 Bases para o Projeto de estruturas.
- [6] SIA 260:2003 Basis of structural design.
- [7] Oliveira et al. Central do Reforço de Potência do Escalão de Alqueva. Encontro Nacional de Betão Estrutural, 2012.
- [8] http://mechanicstips.blogspot.com/2016/08/spiral-case-of-waterturbine.html, consultado a 6 de março de 2019.
- [9] USACE EM 1110-2-2104 Strength Design for Reinforced Concrete Hydraulic Structures, DEPARTMENT OF THE ARMY, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- ACI 350-01 Code requirements for environmental engineering concrete structures.
- [11] DIANA Finite Element Analysis, DIANA Documentation release 10.3, First edition, March 1, 2019. DIANA FEA bv.

Dimensionamento estrutural de betão armado de envolvimento de caixa espiral em centrais hidroelétricas João Pedro Nunes Rosado, Rui Vaz Rodrigues