



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Análise Comparativa dos Esforços Solicitantes entre Modelos Computacionais Do Vertedouro Da Usina Hidrelétrica de Belo Monte

Davi G. Tavares¹, Mayra S. P. L. Perlingeiro²

¹Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda. / davigripptavares@gmail.com

² Universidade Federal Fluminense – UFF / Departamento de Engenharia Civil / mayra@vm.uff.br

Resumo

Os programas computacionais têm evoluído e permitido aos engenheiros fazer modelos numéricos que possibilitam analisar estruturas bem complexas. Julgar os resultados obtidos é fundamental, e tais resultados serão mais confiáveis quanto mais representativa for a modelagem. Portanto, a escolha do tipo de elemento a se usar para a modelagem é primordial. A estrutura analisada é o *Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Belo Monte*, que possui espessura variável, uma galeria que atravessa toda a sua largura e suporta um imenso pilar. Normalmente, este tipo de estrutura, que é um sólido, é modelada, de forma simplificada, em elementos de placa para efetuarem suas análises. Até que ponto se pode afirmar que uma estrutura complexa como o vertedouro pode ser simulada por uma placa e ter suas singularidades simplificadas e até desconsideradas? É apresentada a comparação de modelos computacionais – em elementos de placa e sólido, respectivamente – para analisar os esforços solicitantes da estrutura do vertedouro. Mostram-se as características de cada um dos modelos, com o uso de um programa que possibilita a realização dos cálculos com base na teoria dos elementos finitos. Conclui-se que o modelo em placa não representa tão bem uma estrutura em que todas as dimensões são equivalentes entre si, sendo interessante a modelagem em sólido. Porém, com a tecnologia atual, modelos complexos em sólido são limitados para se obter esforços pontuais, e além de reduzida produtividade em sua elaboração.

Palavras-chave

Usina hidrelétrica de Belo Monte; elementos sólidos; elementos de placa; vertedouro; modelagem computacional; elementos finitos.

1. Introdução

A UHE Belo Monte, construída no Rio Xingu, no estado do Pará, terá uma potência instalada de 11.233 MW e 4.700 MW médios de potência firme durante todo o ano. No primeiro semestre de seu funcionamento, Belo Monte será capaz de gerar grande quantidade de energia, possibilitando que as usinas de outras regiões produzam menos energia e armazenem água em seus reservatórios, principalmente as localizadas no Nordeste e Sudeste.

Conforme características apresentadas em TAVARES (2014), a UHE Belo Monte consiste de uma barragem principal, um reservatório com lâmina d'água total de 441,6 km² e duas usinas hidrelétricas, sendo uma principal, localizada no Sítio Belo Monte, e outra complementar na barragem principal, no Sítio Pimental.

A Fig. 1 representa o esquema geral do Sítio Pimental. A Fig. 2 detalha, unicamente, um bloco típico do Vertedouro.

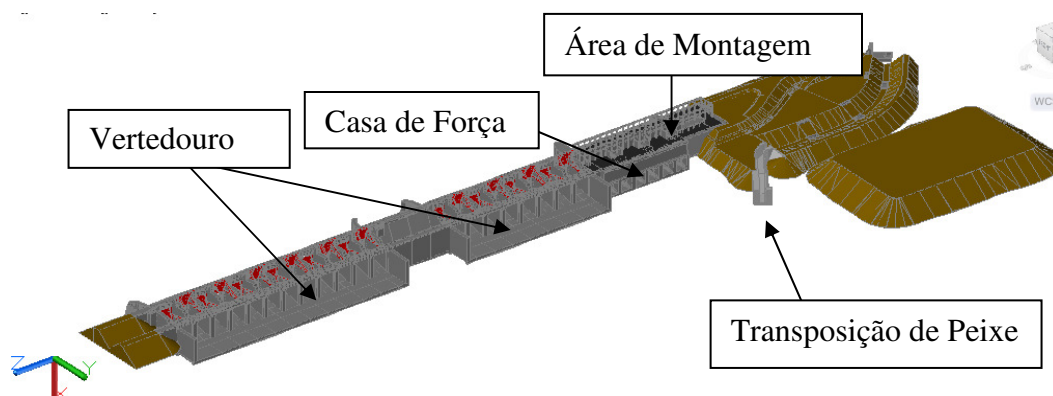


Figura 1 – Esquema Geral da UHE Belo Monte - Sítio Pimental.

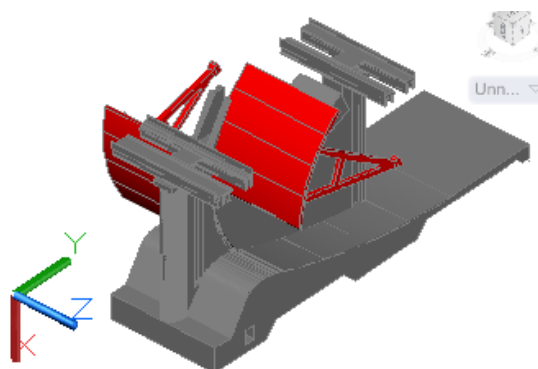


Figura 2 – Bloco típico do Vertedouro.

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho é apresentar soluções de modelagem computacional, tanto em elementos de placa quanto em elementos de sólido, que simulem o Vertedouro da UHE Belo Monte-Sítio Pimental, estrutura utilizada para controle de vazão. Busca-se mostrar o modelo que apresenta melhores resultados em termos de esforços solicitantes, após a análise estrutural.

Para a determinação destes esforços solicitantes, atuantes sobre os elementos estruturais, utilizou-se um programa computacional baseado na teoria dos elementos finitos.

2. Geometria do Vertedouro

A estrutura do Vertedouro do Sítio Pimental compreende 18 vãos, controlados por comportas segmentares e separados por pilares, com 4,50 m de espessura, sobre um piso de altura variável, denominado de ogiva, cuja crista encontra-se na elevação 76,00 m.

Estruturalmente, o Vertedouro é dividido por juntas longitudinais em 15 blocos típicos, VT2 a VT16 e em dois blocos laterais, VT1 e VT17.

A Fig. 3 apresenta a geometria de um dos blocos VT2 a VT16 do Vertedouro:

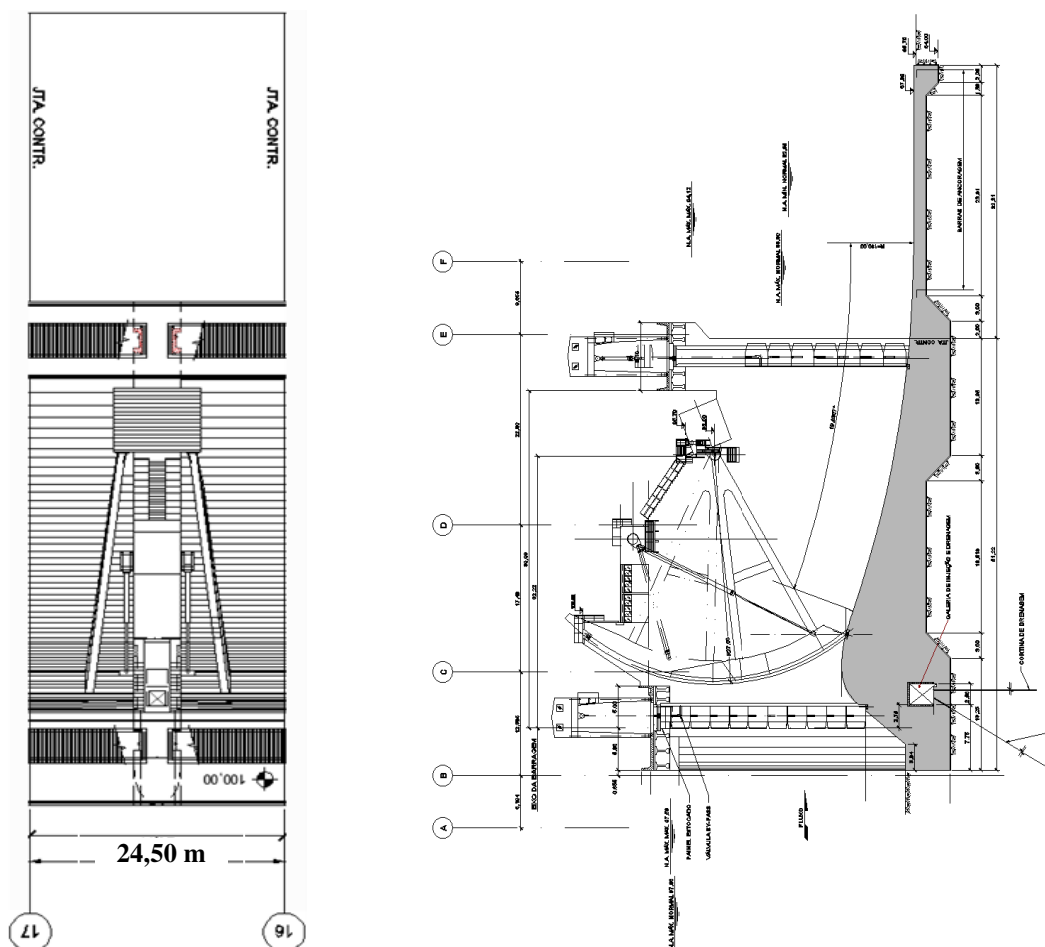


Figura 3 – Vertedouro Bloco VT2 a VT16.

3. Modelos Estruturais

A partir do programa, que utiliza em sua base de cálculo o Método dos Elementos Finitos (MEF), criaram-se dois modelos tridimensionais, formados por elementos tipo shell e sólido. Um modelo possui apenas elementos estruturais em shell, representando tanto o pilar quanto a ogiva (laje), enquanto no outro modelo, o pilar permanece sendo em shell, porém, a ogiva é em sólido.

O concreto estrutural utilizado é o C20, com as características apresentadas na NBR 6118: 2003. O coeficiente de mola vertical tem o valor de $K_v = 2.100.000 \text{ kN/m}^3$, calculado com base em VALLEJO (2003), e o coeficiente de mola horizontal K_h vale a metade do vertical K_v . As molas foram aplicadas na base da ogiva, que está em contato com o solo.

A Fig. 4 apresenta um esquema geral tridimensional dos modelos em sólido e em shell, respectivamente.

Nota-se que somente o modelo em sólido consegue representar a galeria existente para injeção e drenagem.

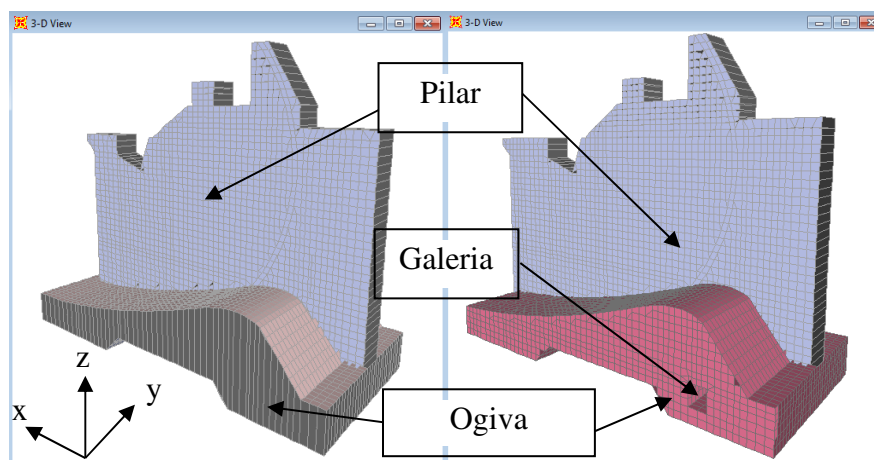


Figura 4 – Modelo tridimensional em shell e em sólido.

3.1 Resultados dos Esforços Longitudinais

O peso próprio foi analisado por ser um carregamento que depende apenas da geometria do modelo. Se ambos os modelos tiverem deformações e solicitações próximas, isso significa que os resultados obtidos pelos outros carregamentos tendem a gerar solicitações semelhantes nos modelos, pois eles estariam trabalhando de forma similar.

A Fig. 5 apresenta a deformada devido ao peso próprio dos modelos em sólido e em shell, respectivamente.

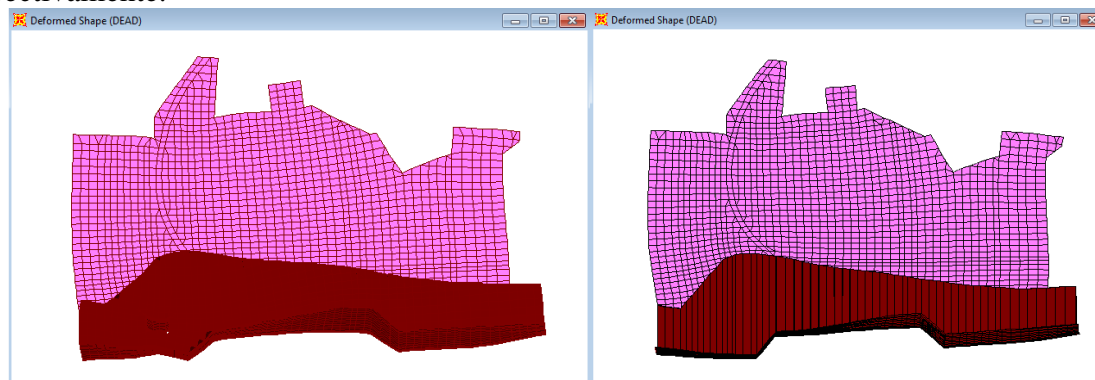


Figura 5 – Deformada devido ao peso próprio – modelos em sólido e em shell.

O maior deslocamento do modelo em sólido é de $-0,054$ cm e o em shell é de $-0,053$ cm. A razão entre suas deformadas é de 98,20%.

Comparou-se, também, as reações totais das molas de apoio de cada modelo, geradas pelo peso próprio. Verificou-se que os resultados estão muito próximos:

- Modelo em sólido – 402728 kN;
- Modelo em shell – 418943 kN.

Para se obter os esforços do modelo em sólido por metro, é necessário integrar os esforços de todos os nós, que estão alinhados em uma seção, e dividi-los pelo comprimento da seção. Com a intenção de achar a média dos resultados, foram divididos pelo comprimento da seção de corte, sendo de 24,5 m para os cortes transversais e de 55,15 m para os cortes



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



longitudinais. O número de seções integradas corresponde ao número de divisões dos elementos em cada direção.

Já os resultados do modelo em shell são apresentados graficamente, gerados automaticamente, sem a necessidade da utilização de recurso numérico.

Os esforços de cortante, apresentados graficamente pelo modelo em shell, seguem uma convenção de sinais opostos aos usuais, onde o cortante é positivo no sólido, ele será negativo no shell e vice versa, sendo importante se ater ao módulo dos valores e ao comportamento da carga.

- Esforço Cortante (kN)

As Fig. 6 e 7 apresentam os diagramas de esforços cortantes dos modelos em sólido e em shell, respectivamente.

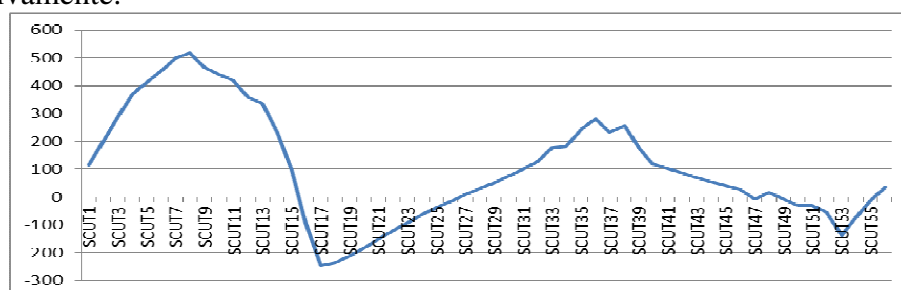


Figura 6 – Diagrama de esforço cortante – modelo em sólido.

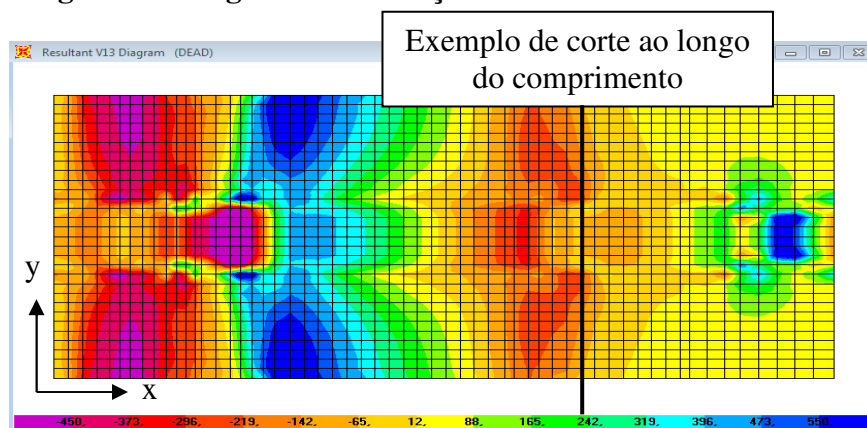


Figura 7 – Diagrama de esforço cortante – modelo em shell.

Os esforços cortantes de ambos os modelos são muito parecidos em valor e em comportamento.

- Momento Fletor em torno do eixo Y (kNm)

As Fig. 8 e 9 apresentam os diagramas de momento dos modelos em sólido e em shell, respectivamente.

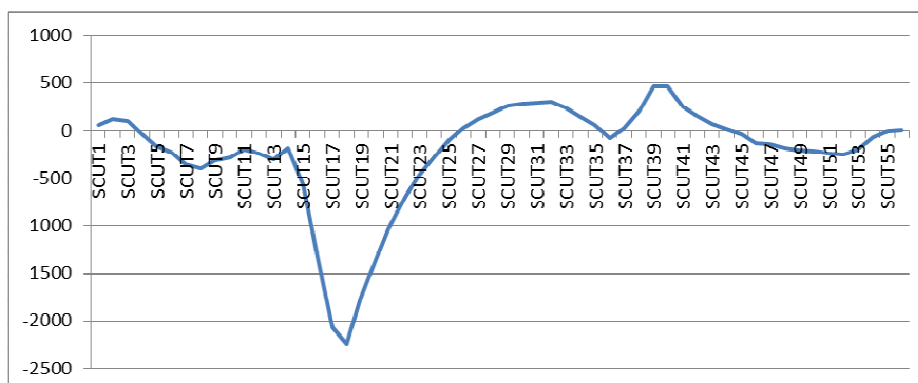


Figura 8 – Diagrama de momentos fletores – modelo em sólido.

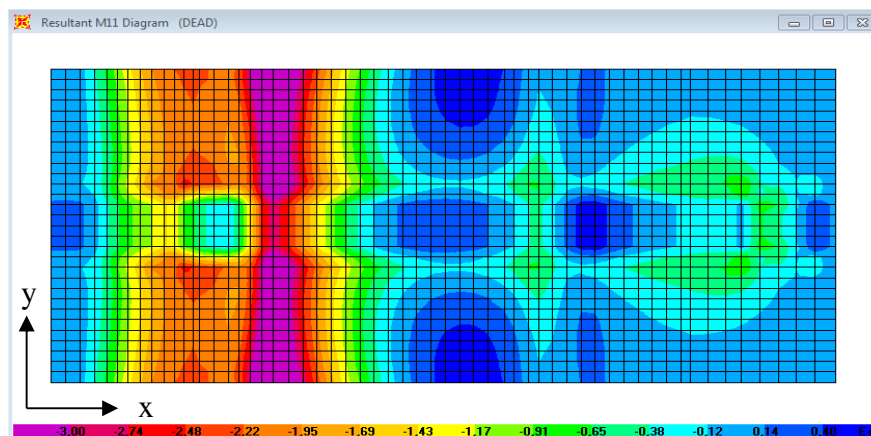


Figura 9 – Diagrama de momentos fletores – modelo em shell.

Observam-se que os valores dos momentos fletores no modelo em shell, próximo ao local mais alto da ogiva, é bem mais conservador que os valores que modelo em sólido apresenta. Conclui-se que os modelos apresentam resultados de momento fletores diferentes, sendo bem visível entre as seções 1 e 18, na região da ogiva, onde existe o furo da galeria de drenagem, que é representado pelo modelo em sólido, porém, inexistente no modelo em shell.

3.2 Resultado dos Esforços Transversais

Ao se analisar as diferenças dos modelos ao longo de seu eixo longitudinal, a verificação mais importante é a direção transversal ao seu comprimento, a de menor dimensão, que é a principal.

- Deformada

A maior deformação do modelo em sólido é de -0,054 cm e o em shell -0,053 cm. A razão entre suas deformadas é de 98,2%.

- Esforço Cortante (kNm)

As Fig. 10 e 11 apresentam os diagramas de esforços cortantes dos modelos em sólido e em shell, respectivamente.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

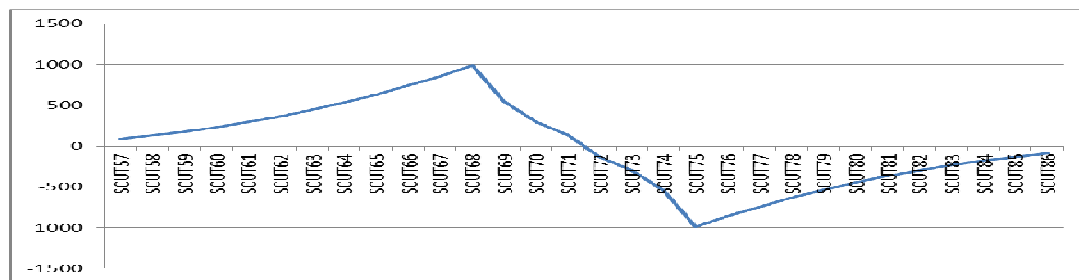


Figura 10 – Diagrama de Cortante – modelo em sólido.

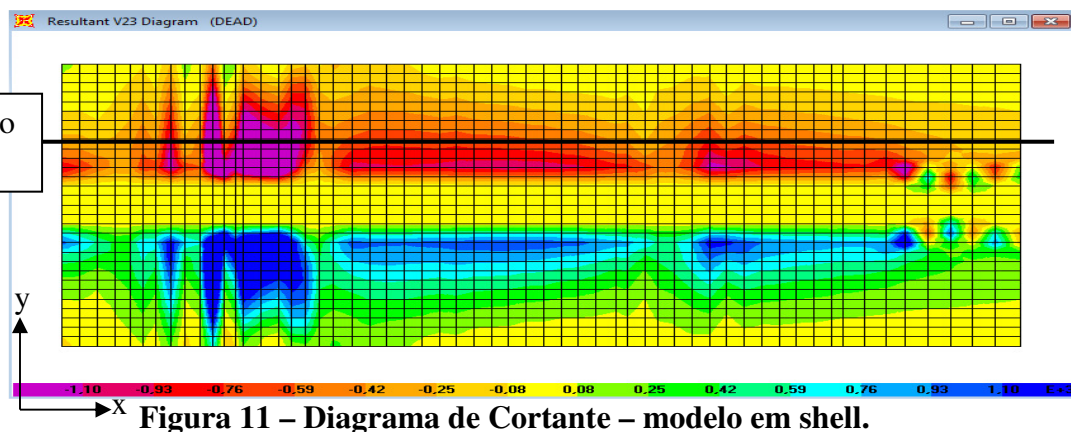


Figura 11 – Diagrama de Cortante – modelo em shell.

Verifica-se que o comportamento do esforço cortante do modelo em sólido se assemelha ao do modelo em shell, porém os valores começam a se diferenciar, pois existe muita variação dos resultados nas diversas seções transversais ao longo do comprimento da estrutura. O modelo em shell apresenta resultados pontuais, sendo claro o local de esforços muito conservadores de pico, enquanto o modelo em sólido, por se limitar a uma média, pode obter resultados não ideais para o dimensionamento.

- Momento Fletor em torno do eixo X (kNm)

As Fig. 12 e 13 apresentam os diagramas de cortante dos modelos em sólido e em shell, respectivamente.

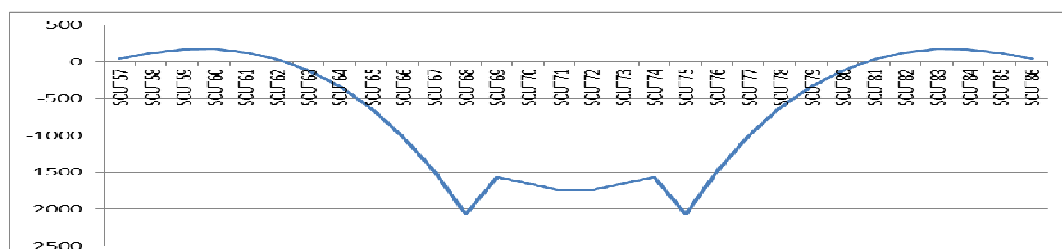


Figura 12 – Diagrama de momentos fletores – modelo em sólido.

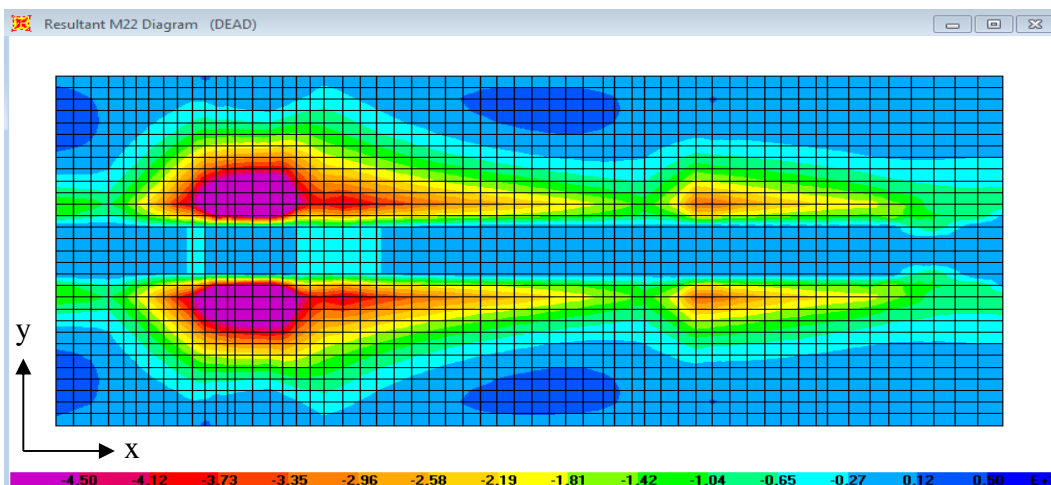


Figura 13 – Diagrama de momentos fletores – modelo em shell.

Analisando-se a variação do momento fletor no modelo shell, verifica-se, novamente, o mesmo problema que o do esforço cortante: o modelo em sólido se limita a uma média de valores, dificultando a obtenção pontual, muitas vezes necessária para um dimensionamento. Na direção transversal, que é a principal da estrutura, o comportamento do shell se assemelha bastante ao sólido e é capaz de apresentar esforços pontuais de forma simples.

3.3 Esforços Pontuais no Modelo em Sólido

Após as análises apresentadas, conclui-se que os modelos têm funcionamento consideravelmente diferente na longitudinal e similar na transversal, a principal direção. Para verificar se é possível obter valores pontuais, integraram-se seções ao longo da direção longitudinal do modelo, porém, restritos a duas regiões. Estas regiões foram escolhidas a partir dos resultados dos esforços de momentos fletores e cortantes transversais no modelo em shell.

As Fig. 14 e 15 apresentam a variação dos esforços cortantes e momentos fletores nas regiões escolhidas para se efetuar a análise pontual no modelo em sólido.

- Esforço Cortante (kN)

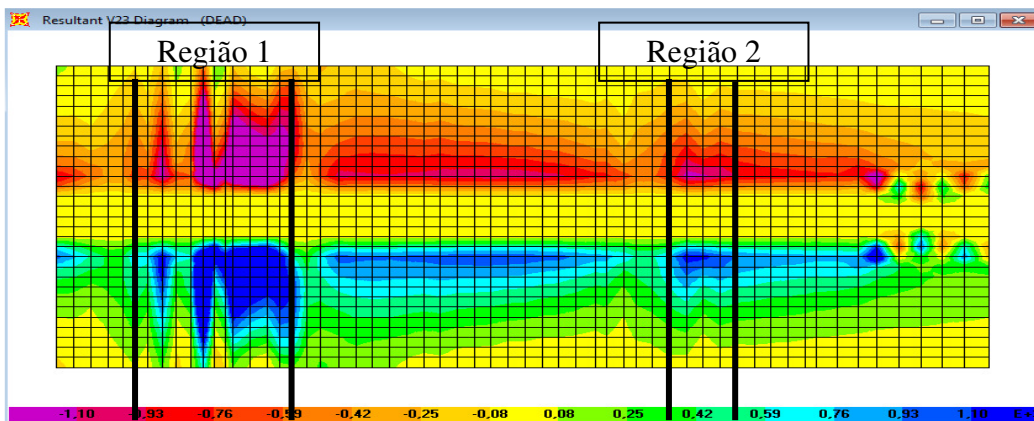


Figura 14 – Regiões do diagrama de esforços cortantes do modelo em shell.



- Momento Fletor (kNm)

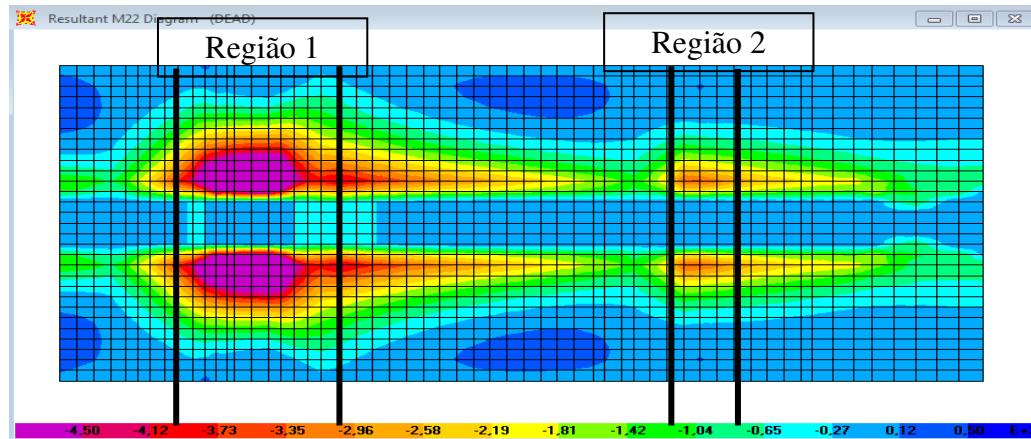


Figura 15 – Regiões do diagrama de momentos fletores do modelo em shell.

3.3.1 Resultados

Esperam-se valores maiores na região 1 que na 2, da mesma forma que ocorre no modelo em shell.

3.3.1.1 Região 1

As Fig. 16 e 17 apresentam os diagramas de esforços cortantes e momentos fletores da região 1, respectivamente.

- Esforço Cortante (kN)

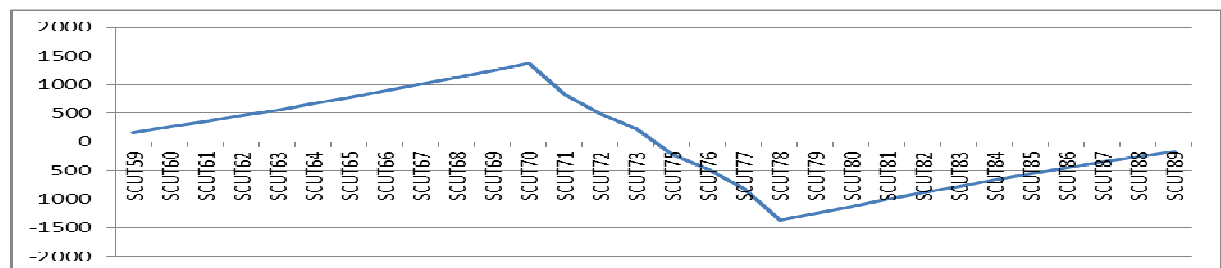


Figura 16– Diagrama de esforço cortante – modelo em sólido – região 1.

- Momento Fletor (kNm)

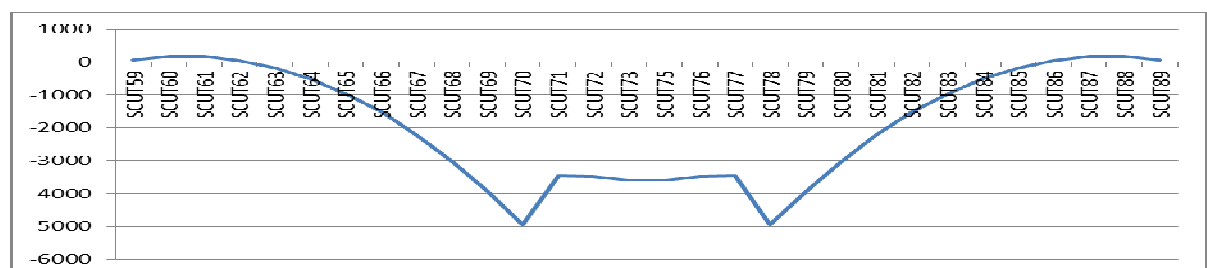


Figura 17 – Diagrama de momentos fletores – modelo em sólido – região 1.



3.3.1.2 Região 2

As Fig. 18 e 19 apresentam os diagramas de esforços cortantes e momentos fletores da região 2, respectivamente.

- Esforço Cortante (kN)

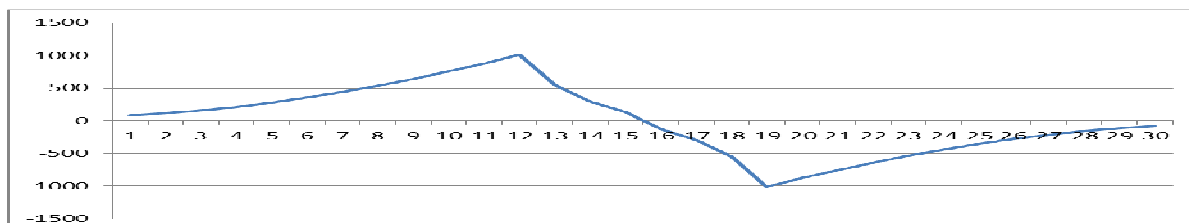


Figura 18 – Diagrama de esforços cortantes – modelo em sólido – região 2.

- Momento Fletor (kNm)

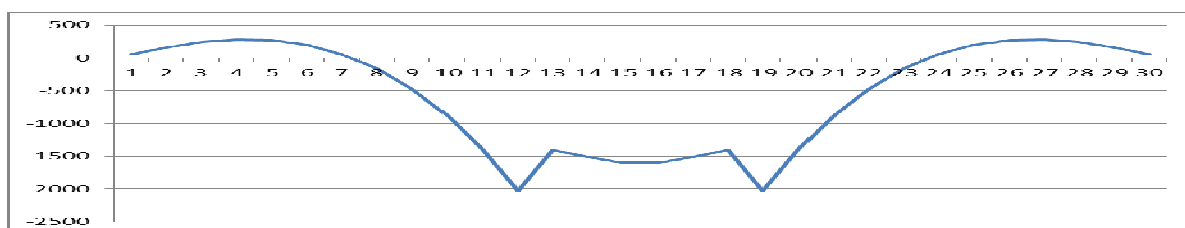


Figura 19 – Diagrama de momentos fletores – modelo em sólido – região 2.

Após a obtenção dos esforços gerados pelas médias das integrais das regiões 1 e 2, é razoável afirmar, com maior certeza, que é possível fazer análises pontuais em modelos em sólidos, porém, com um trabalho muito maior que nos modelos em shell. Prova disso, é que os valores do modelo em sólido, apresentados nas Fig. 16 à 19, se aproximam bem mais dos valores do modelo em shell nas regiões 1 e 2, mostrados nas Fig. 14 e 15, que os valores médios das Fig. 10 e 12, em que não há determinação de regiões específicas.

4. Conclusão

Com base nas demonstrações e análises apresentadas neste trabalho, conclui-se que o modelo em shell apresenta esforços, em geral, mais conservadores, sendo possível obter valores pontuais de forma mais prática, porém, não representa corretamente uma estrutura sólida. O modelo em sólido apresenta menores esforços e melhores distribuídos, sem concentrações irreais de picos, porém, gera maior trabalho para se obter valores pontuais com a tecnologia atual, e representa de forma mais correta uma estrutura sólida.

5. Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6118 – Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. 2003.
- VALLEJO, G.; Ingeniería Geológica. Editora Pearson. Madri, 2002.
- TAVARES, D.; Comparação entre Modelos Computacionais da Estrutura do Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Belo Monte. Trabalho de Conclusão de Curso, UFF, 2014.