

ANÁLISE COMPARATIVA DE TENSÕES DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO EM ARCO DEVIDO A PRESSÃO HIDROSTÁTICA

COMPARATIVE STRESS ANALYSIS OF A CONCRETE ARCH DAM DUE TO PRESSURE HYDROSTATIC

THAIS CARVALHO DOS SANTOS

Acadêmica de Engenharia Civil - Universidade Estadual de Goiás
engthaisc@gmail.com

NEANDER BERTO MENDES

Professor Mestre em Estruturas e Construção Civil - Universidade de Brasília
neanderberto@hotmail.com

JULIANO RODRIGUES DA SILVA

Professor Doutor em Estruturas e Construção Civil - Universidade de Brasília
julianorodriguessilva@gmail.com

LUCAS DE OLIVEIRA ZÚÑIGA

Acadêmico de Engenharia Civil - Universidade Estadual de Goiás
lucas.zuniga7@gmail.com

Resumo: O estudo consiste na análise estática devido à pressão hidrostática de uma barragem em arco considerando uma fundação rígida. A caracterização do desempenho das barragens na presença de ações estáticas é importante devido ao caráter de permanência que apresentam. É importante garantir que, nessas condições de serviço, a obra não apresente qualquer anormalidade. A modelagem e as simulações numéricas foram feitas pelo MEF (Método dos Elementos Finitos). Para tal recorreu-se ao *software* ANSYS e aos dados da barragem *Morrow Point*. Um dos requisitos mais importantes na análise da barragem em arco é desenvolver modelos representativos precisos do comportamento real 3D do sistema. No entanto, a fim de investigar até que ponto algumas simplificações são aceitáveis, somente a estrutura 3D da barragem foi modelada e a água e fundação foram consideradas de forma simplificada. A fundação não foi modelada e assumiu-se que a barragem é engastada ao longo dos contornos simulando, então, uma fundação rígida. O reservatório também não foi modelado e as cargas hidrostáticas foram admitidas como cargas aplicadas à estrutura da barragem. Os deslocamentos e tensões foram computados e os gráficos obtidos foram comparados com os gráficos divulgados na literatura técnica especializada. Concluiu-se que as simplificações utilizadas na modelagem tiveram como consequência uma boa reprodução dos resultados sendo, portanto, aceitáveis.

Palavras-chave: Barragem em arco. ANSYS. Elementos Finitos. Estruturas.

Abstract: The study consists of static analysis due to hydrostatic pressure of an arch dam considering a rigid foundation. The characterization of the performance of dams in the presence of static actions is important as they are present for a long time. It is important to ensure that the construction does not show any abnormality when subjected to this type of action. The modeling and numerical simulations were made by FEM (Finite Element Method). For this were utilized ANSYS software and Morrow Point Dam data. One of the most important requirements in the analysis of arch dam is to develop accurate representative models of actual behavior 3D system. However, in order to investigate to what extent some simplifications are acceptable, only the 3D

structure of the dam has been patterned and the water and foundation were considered in simplified form. The foundation was not patterned and was assumed that the dam is clamped along the contours simulating then a rigid foundation. The reservoir was also not modeled and hydrostatic loads were admitted as loads applied to the dam structure. The displacements and stresses were computed and the figures obtained were compared with the graphics published in the specialized technical literature. It was concluded that the simplified modeling reproduced the results satisfactorily. So simplifications are acceptable.

Keywords: Arch dam. ANSYS. Finite Element. Structures.

1 INTRODUÇÃO

As barragens são construídas para serem disponibilizados recursos hídricos para a população como abastecimento, irrigação, controle de cheias, produção de energia, navegação e atividades turísticas e industriais (SOUSA, 2000, *apud* MÜLLER, 1995). Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), as barragens devem satisfazer as exigências de comportamento necessárias para serem seguras, ou seja, para evitar incidentes e acidentes com consequências relacionadas a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

Dentre os tipos de barragens de concreto existentes, a barragem em arco pode ser uma opção mais segura e econômica, uma vez que explora eficientemente a boa capacidade resistente do concreto à compressão e seu formato colabora para que não ocorram tensões de tração significativas. Em consequência, esse tipo de estrutura necessita de um menor volume de concreto em sua concepção quando comparada à barragem de gravidade. Além disso, há o fato de que as barragens em arco geram impactos consideravelmente reduzidos por exigirem pequenos reservatórios e alagarem áreas menores devido à construção, usualmente, em vales estreitos e encaixados (MENDES, 2013). Levando-se em conta, então, o ponto de vista estrutural e o econômico, a barragem em arco pode também ser considerada uma boa opção no que diz respeito a impactos ambientais.

Apesar das vantagens, este tipo de barragem não é habitual no Brasil. Isso revela que o conhecimento acerca do tema ainda é escasso e é neste fato que a importância deste trabalho se reflete. Este tipo de barragem, em determinados casos, pode ser muito vantajoso e eficiente, o que justifica a relevância desse estudo.

2 METODOLOGIA

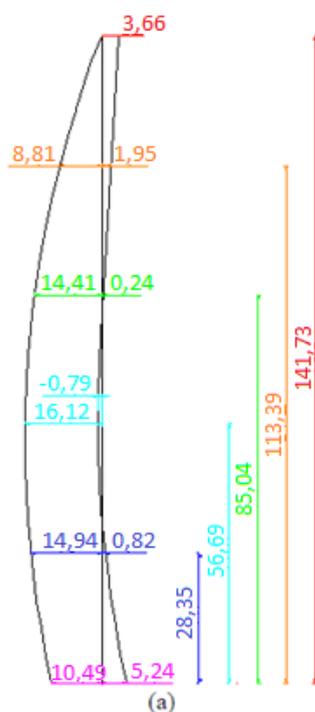
2.1 DADOS

Os dados utilizados são da barragem *Morrow Point* (Figura 1), barragem de concreto em arco de dupla curvatura localizada no rio *Gunnison*, Colorado, EUA.



Figura 1 – Barragem *Morrow Point* (gjhikes.com¹)

As dimensões da barragem *Morrow Point*, segundo Hall e Chopra (1983), são apresentadas na Tabela 1 e na Figura 2, onde h é a altura, B é a largura da seção transversal a partir do eixo e R é o raio. Os dados foram medidos na seção transversal central, o índice m significa montante, o índice j , jusante e θ_0 é o semi-ângulo central dos arcos, em graus. A coluna cor indica a cor de plotagem dos arcos e medidas na Figura 2 (a) e (b).



¹ Disponível em: <<http://www.gjhikes.com/2013/07/mesa-creek.html>> Acesso em abril, 2016.

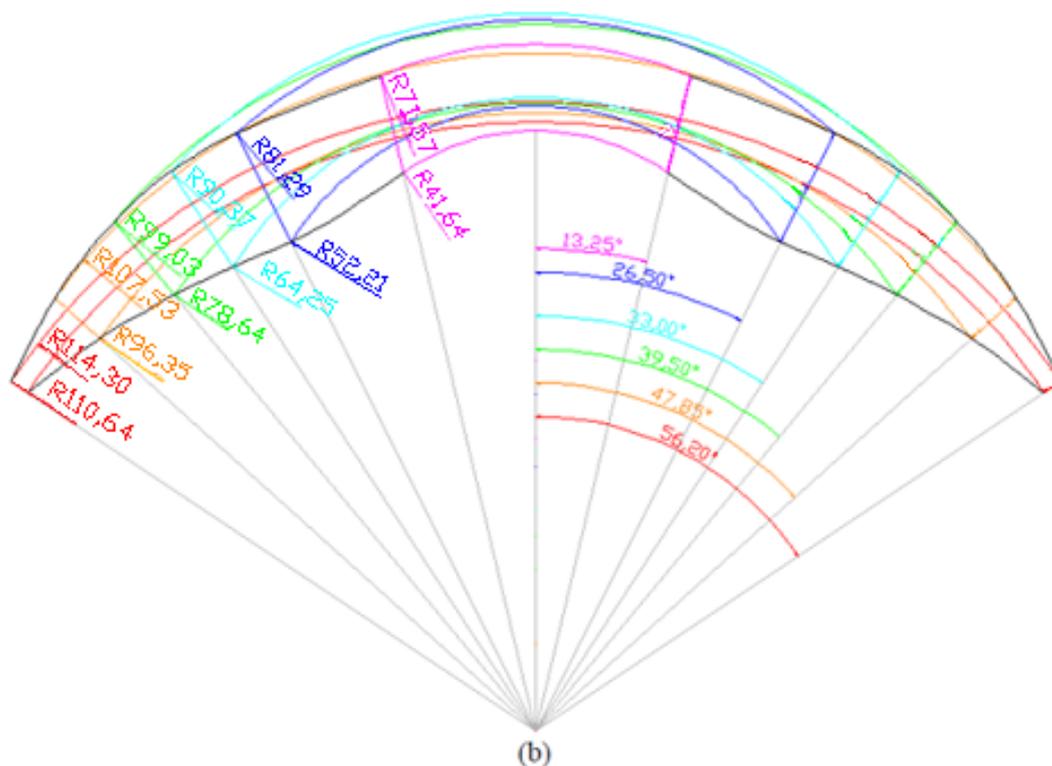


Figura 2 – (a) Seção transversal central e (b) planta superior da barragem *Morrow Point* (MENDES, 2013, p. 105, adaptado).

Tabela 1 – Dimensões da Barragem *Morrow Point*

h (m)	Bm (m)	Bj (m)	Rm (m)	Rj (m)	θ_0	Cor
141,73	0,00	3,66	114,30	110,64	56,20	Vermelho
113,39	8,81	1,95	107,53	96,35	47,85	Laranja
85,04	14,11	0,24	99,03	78,64	39,50	Verde
56,69	16,12	-0,79	90,37	64,25	33,00	Cyan
28,35	14,94	0,82	81,29	52,21	26,50	Azul
0,00	10,49	5,24	71,57	41,64	13,25	Magenta

Fonte: Hall e Chopra, 1983, p. 163, adaptado.

As propriedades físicas do concreto da barragem *Morrow Point* são: massa específica $\rho_c = 2483 \text{ kg/m}^3$, módulo de Young $E_c = 27,58 \text{ GPa}$, relação de Poisson $\nu = 0,2$.

2.2 MÉTODO

De acordo com Silva (2013), numa fase de projeto são utilizados métodos de análise estrutural que possibilitam uma previsão do comportamento da estrutura para que seja

garantida a segurança da obra. Para que isto seja possível deve-se, então, dispor de um modelo capaz de reproduzir de forma satisfatória as condições reais da barragem a ser construída. Vieira (2009) reforça que, em uma obra de complexidade e sensibilidade considerável como é a barragem em arco, a análise estrutural é ainda mais importante visto que, ao contrário de outras estruturas, a interpretação do caminho tomado pelas cargas até a fundação não é óbvia.

2.2.1 Método dos Elementos Finitos e *software* ANSYS

Antigamente, o método dos elementos finitos era impraticável no caso de análises mais complexas, mas atualmente é uma ferramenta de viável aplicação e eficiente quando utilizada para análise das tensões e deslocamentos em estruturas de geometria e condições de contorno complexas (SILVA, 2013). A principal característica do MEF é, segundo Vieira (2009, p.17), “a divisão do meio contínuo inicial em vários subdomínios de dimensão finita e com as mesmas características materiais do meio inicial”. Ou seja, a estrutura passa a ser composta por um número finito de elementos (geração da malha de elementos finitos) que estão ligados nos pontos nodais e o MEF utiliza os nós como parâmetros.

Silva (2013) afirma que quanto mais refinada for a malha de elementos finitos (com menores elementos em maior quantidade), maior e melhor é o grau de aproximação dos resultados do problema estrutural. No entanto, deve-se ter cautela ao refinar a malha, pois em certo ponto o incremento na precisão não é tão significativo e o programa passa a requerer muito tempo para a resolução das equações.

Um dos meios de se fazer uma previsão aproximada do comportamento que as estruturas podem apresentar sob determinadas solicitações é através do ANSYS, um *software* de análise de estruturas via Método dos Elementos Finitos (MARINHO, 2002, apud ANSYS, 1998). O *software* possui elementos para diversas possibilidades de geometria e de análise, inclusive a análise estática, utilizada neste estudo.

2.3 MODELAGEM E ANÁLISE DA BARRAGEM MORROW POINT

Um dos requisitos mais importantes na análise de uma barragem em arco é desenvolver modelos representativos precisos do comportamento real 3-D do sistema considerando um volume apropriado da fundação e do reservatório além do formato da estrutura da barragem.

No entanto, neste estudo, somente a estrutura da barragem foi modelada e a água e a fundação foram consideradas de forma simplificada.

Não foi considerado um volume de fundação e assumiu-se que a barragem é engastada ao longo dos contornos que as servem de apoio (interface barragem-fundação) simulando, então, uma rocha de fundação infinitamente rígida na base da barragem (Figura 3). O reservatório também não foi modelado e as cargas hidrostáticas foram admitidas como cargas de superfície distribuídas aplicadas à estrutura. Após a modelagem da estrutura, as deformações e as tensões na viga em balanço central e nos arcos da barragem foram computadas e analisadas. Os resultados obtidos para a análise estática com ação da pressão hidrostática foram comparados aos resultados obtidos por USACE, em 1994, que utilizou na análise um modelo que considera o volume do reservatório e da fundação.

O modelo tridimensional da barragem de concreto foi construído com um elemento sólido disponível na biblioteca do ANSYS. Foi utilizado o SOLID 95 que é um elemento sólido 3D que permite formas mais irregulares sem grandes perdas de precisão. É um elemento bem adaptado para a modelagem de fronteiras curvas, o que permite levar em conta a forma da barragem.

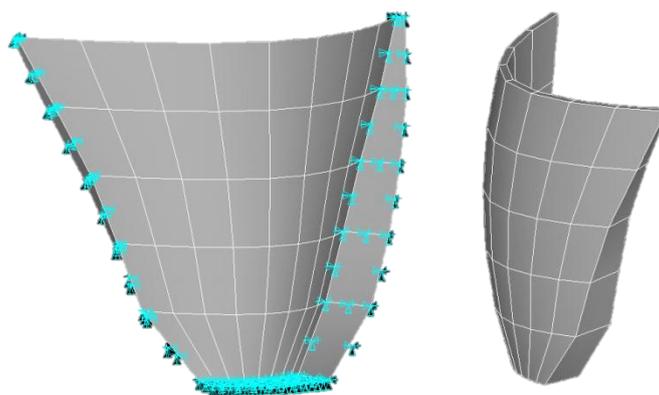


Figura 3 - Estrutura da barragem *Morrow Point* modelada no *software* ANSYS (SANTOS, 2016).

Para a seleção de um tamanho ótimo da malha da barragem foram definidas e analisadas várias malhas de diferentes tamanhos e, então, foi selecionada a que é computacionalmente eficiente e fornece resultados razoavelmente precisos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 4 são apresentados os padrões de deformação na face à jusante da barragem obtidos numericamente no presente estudo (a) e por USACE em 1994 (b). Os gráficos extraídos do livro *Engineering and Design – ARCH DAM DESIGN* (USACE, 1994) têm suas unidades de medida representadas no sistema imperial britânico de medidas. Neles foram utilizadas polegadas (uma polegada = 2,54 cm), pés (um pé = 30,48 cm) e psi (um psi = 6894,801 Pa). Com vistas ao aprimoramento da comparação visual entre os gráficos, os gráficos obtidos numericamente neste estudo também são apresentados com as unidades no sistema imperial.

Dentre as curvas apresentadas na Figura 4(b), a utilizada para comparação é a que apresenta os resultados para uma fundação rígida, indicada pela seta vermelha. Os deslocamentos em relação à distância da base apresentam comportamentos similares em ambos os gráficos, crescendo à medida que se aproximam da crista da barragem. Os deslocamentos obtidos na crista da barragem através da análise via ANSYS e por USACE (1994) foram aproximadamente 0,8 e 0,9 polegadas, respectivamente, indicando uma boa proximidade nos resultados.

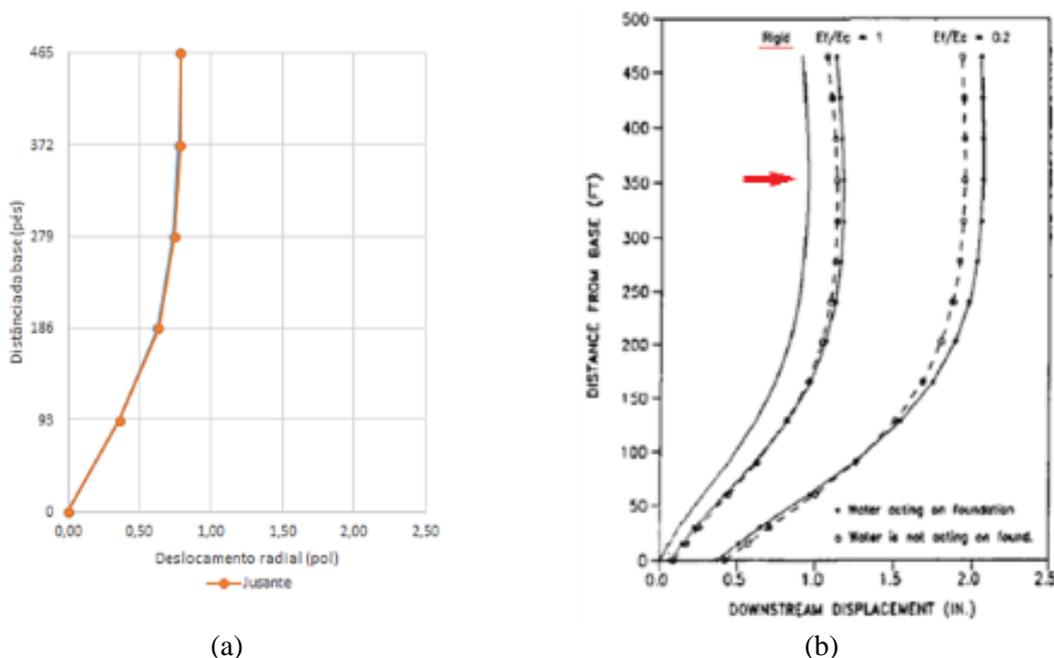


Figura 4 – Deslocamentos radiais na face jusante da barragem *Morrow Point* obtidos (a) no presente estudo e (b) por USACE (1994) (SANTOS, 2016).

Os gráficos das tensões na seção transversal central da barragem, em conformidade com a distância da base, podem ser observados na Figura 5 para o arco e na Figura 6 para a viga em balanço. As curvas obtidas por USACE (1994) utilizadas na comparação são as referentes a uma fundação rígida e estão indicadas por setas. Também são observados comportamentos semelhantes das curvas nos gráficos considerados. As tensões de arco e de viga em balanço são predominantemente de compressão. As tensões de tração máximas na seção transversal central ocorrem na base (contato com a fundação) tanto para as tensões de arco quanto para as de viga em balanço. Os valores máximos e mínimos das tensões estão discretizados na Tabela 2 e são relativamente próximos aos de USACE (1994). É possível notar, além de uma coerência e proporcionalidade nos valores obtidos, que os resultados numéricos são, em grande parte, mais conservadores.

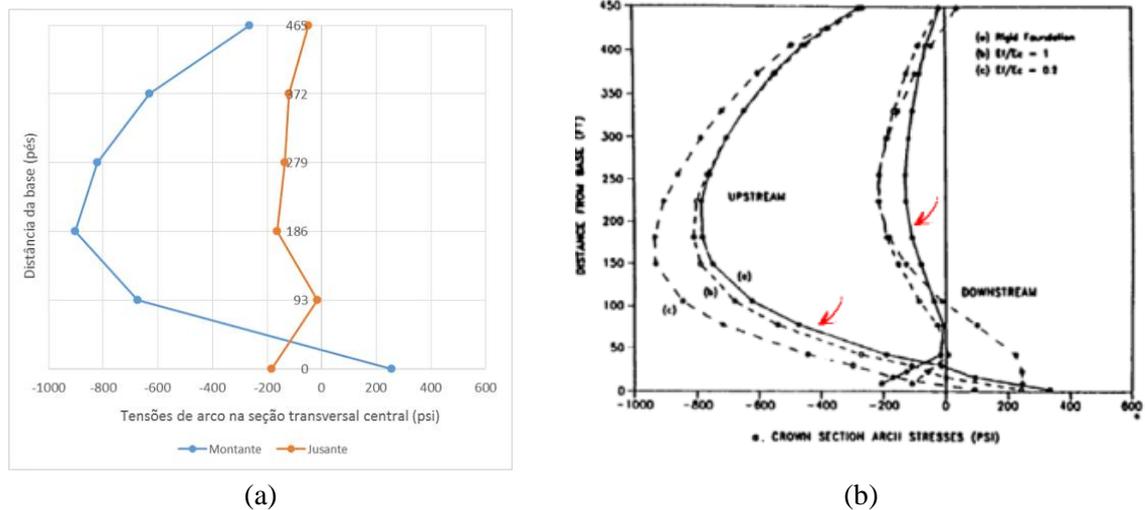
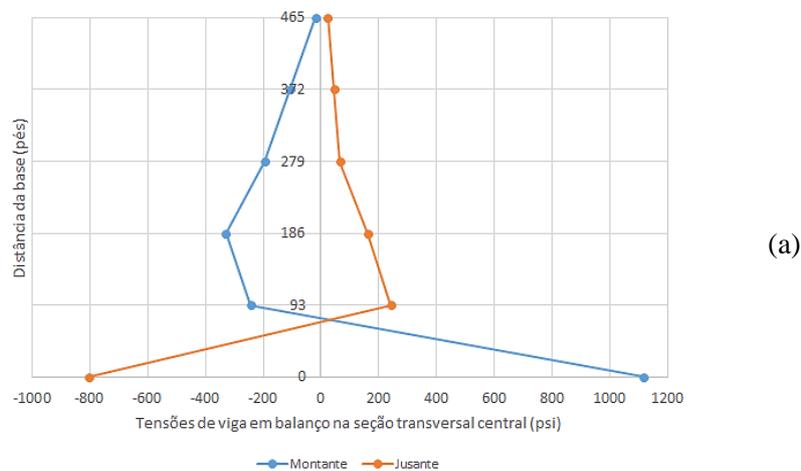
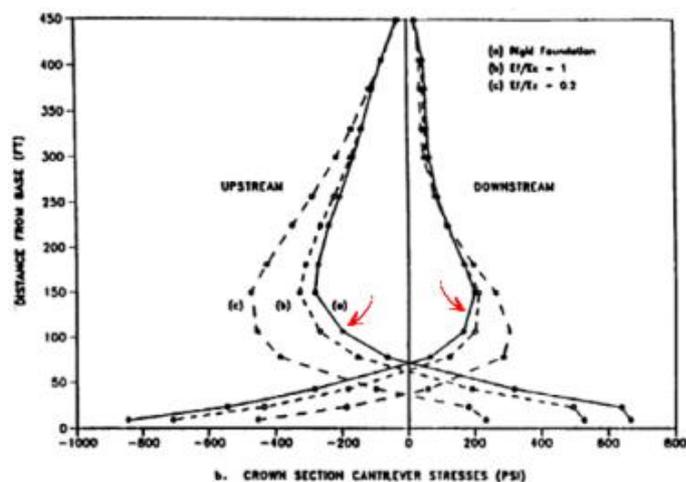


Figura 5 - Tensões de arco na seção transversal central da barragem *Morrow Point* obtidos (a) no presente estudo e (b) por USACE (1994) (SANTOS, 2016).





(b)

Figura 6 - Tensões de viga em balanço na seção transversal central da barragem *Morrow Point* obtidos (a) no presente estudo e (b) por USACE (1994) (SANTOS, 2016).

Tabela 2 – Resumo das tensões na seção transversal central, para o arco e para a viga em balanço, nas faces à montante e à jusante da barragem *Morrow Point*

RESULTADO	TENSÕES DE ARCO (psi)				TENSÕES DE VIGA EM BALANÇO (psi)			
	MONTANTE		JUSANTE		MONTANTE		JUSANTE	
	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.
PRESENTE	255,27	-903,02	-16,83	-183,34	1116,79	-330,56	242,21	-803,39
USACE (1994)	320	-780	-10	-130	670	-283	200	-850

Fonte: SANTOS, 2016.

Foram gerados também os gráficos de contorno das tensões de arco e de viga em balanço (Figura 7 e 8) na face à montante da barragem. Estes gráficos permitem a observação do comportamento da estrutura de forma mais clara e a identificação das áreas mais sobrecarregadas. Nas figuras estão sobrepostos os gráficos gerados no ANSYS e os gráficos obtidos por USACE (1994) para que as semelhanças nos comportamentos sejam verificadas.

É possível verificar que as isolinhas de tensão de USACE estão dispostas concordando com a disposição das cores do gráfico de contorno do ANSYS. Tanto para a viga em balanço quanto para os arcos, o estado de tensão é predominantemente de compressão. Nos arcos (Figura 7) são verificadas tensões de tração nas encostas, ao longo da inserção da barragem. Na figura 8 são verificadas tensões de tração no trecho inferior das vigas em balanço. Pode-se observar que as maiores tensões de tração na barragem ocorrem na base da viga em balanço central e as maiores tensões de compressão verificam-se no fecho dos arcos, ao longo da seção transversal central.



De acordo com USACE (1994), barragens em arco dependem significativamente da ação do arco para transferir cargas para a fundação. Portanto, as tensões de compressão obtidas ao longo da barragem são esperadas. No entanto, diversas análises têm indicado que zonas de tensões de tração horizontal podem se desenvolver nas faces da barragem a montante e a jusante. As análises lineares-elásticas muitas vezes indicam grandes tensões perto da descontinuidade geométrica no contato da fundação, conforme ocorrido no presente estudo. É relevante mencionar que as tensões de tração indicadas na base das barragens em arco em análises lineares-elásticas são parcialmente fictícias, pois estas análises não levam em consideração a ligação limitada entre o concreto e fundação rochosa, bem como as juntas na rocha que podem abrir quando submetidas às forças de tração. Uma representação em maior acordo com a realidade e uma estimativa mais realista das tensões estáticas na base da barragem pode ser obtida através de uma análise que utiliza um módulo de deformação reduzido da fundação, e não uma fundação rígida.

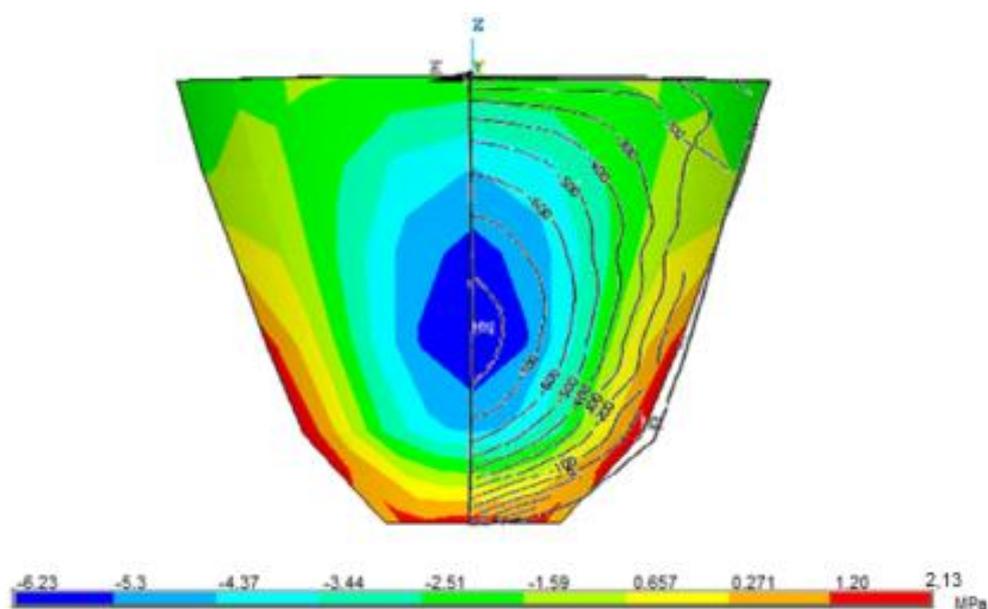


Figura 7 - Sobreposição dos gráficos de contorno de tensões de arco, na face à montante da barragem *Morrow Point*, obtidos no presente estudo via ANSYS e por USACE (1994) (SANTOS, 2016).

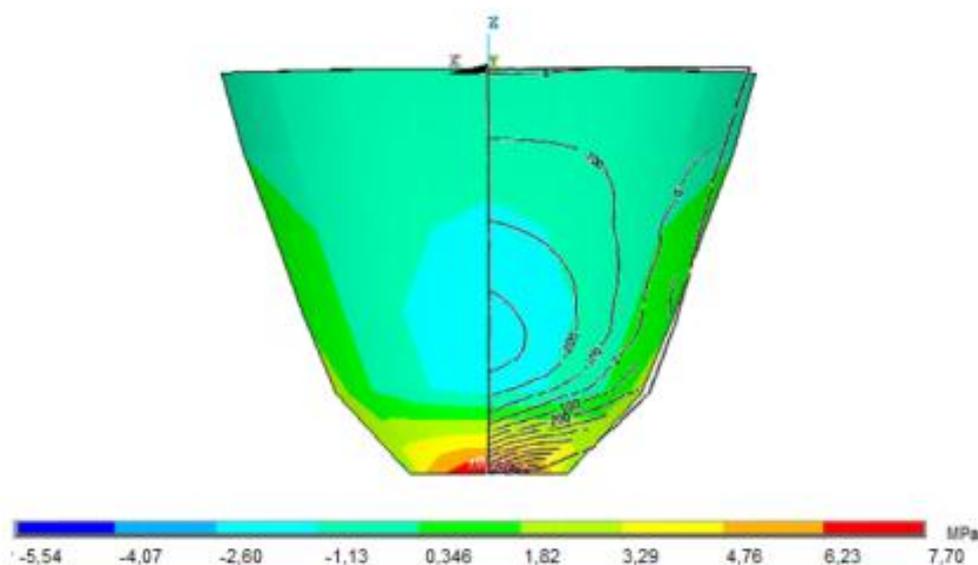


Figura 8 - Sobreposição dos gráficos de contorno de tensões de viga em balanço, na face à montante da barragem *Morrow Point*, obtidos no presente estudo via ANSYS e por USACE (1994) (SANTOS, 2016).

Sendo assim, de acordo com os resultados, pode-se dizer que a zona crítica é a base da barragem sendo, portanto, a zona mais propícia ao aparecimento de fissuras de tração. O modelo simplificado desenvolvido para a barragem em arco em estudo, apesar de considerar as zonas engastadas no vale, tiveram como consequência uma boa reprodução dos resultados. Tal modelo poderia, portanto, ser utilizado em análises mais simples e práticas e em estudos iniciais de barragens reais visto que os resultados foram próximos aos de modelos mais refinados.

4 CONCLUSÕES

No estudo foram obtidos tensões e deslocamentos próximos aos de USACE (1994). Os maiores deslocamentos na seção transversal central ocorreram mais próximos à crista. O estado de tensão foi predominantemente de compressão. As maiores tensões de compressão a montante ocorreram no fecho dos arcos e as maiores de tração, na base da viga em balanço central. A zona crítica e mais propícia ao aparecimento de fissuras de tração é, portanto, a base da barragem.

Sendo assim, as simplificações utilizadas são aceitáveis e uma análise estática devido a ação da pressão hidrostática via ANSYS de uma barragem em arco com fundação rígida fornece bons resultados quando se admite a barragem engastada e a força hidrostática aplicada

diretamente à estrutura. O modelo poderia, portanto, ser utilizado em análises mais simples e práticas e em estudos iniciais de barragens reais.

REFERÊNCIAS

ANSYS. **ANSYS User Manual Revision 5.4**. Pensilvânia: ANSYS, Inc. 1998.

HALL, J. F.; CHOPRA, A. K. Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 109, n.1, fev. 1983.

MARINHO, I. J. P. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS**. 2002. 198 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MENDES, N. B. **Estudo comparativo analítico-numérico de aspectos da interação fluido-estrutura em cascas com aplicações a barragens em arco**. 2013. 343 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica, Brasília, 2002. 148 p.

MÜLLER, A. C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995. 412 p.

SANTOS, T. C. **Análise de tensões em uma barragem de concreto em arco devido à ação do peso próprio, da força hidrostática e de sismos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 2016.

SILVA, J. M. R. M. **Injeção de juntas de contração de barragens abóbada**. 2013. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

SOUSA, W. L. **IMPACTO AMBIENTAL DE HIDRELÉTRICAS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE DUAS ABORDAGENS**. 2000. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

USACE. **Engineering and Design – ARCH DAM DESIGN**. Department of the Army. U. S. Army Corps of Engineers. EM 1110-2-2201. Washington, 1994.

VIEIRA, B. F. Q. **Análise do comportamento estrutural de barragens abóbada com descarregadores de superfície de grandes dimensões**. 2009. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

