

INFLUÊNCIA DA ELASTICIDADE DA FUNDAÇÃO NA ANÁLISE DE TENSÕES EM UMA BARRAGEM GRAVIDADE DE CONCRETO

Iarly Vanderlei da Silveira

Lineu José Pedroso

iarlysilveira@hotmail.com

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Grupo de Dinâmica e Fluido – Estrutura (GDFE). Caixa Postal 04492, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70919-970, Brasília – DF.

Resumo. A fundação nas barragens gravidade de concreto é um local de destaque nas análises de estabilidade dessas estruturas, uma vez que os defeitos na fundação ou a sua influência são considerados como um dos principais mecanismos de deterioração e danos ao longo da estrutura. Este estudo consistiu em avaliar a influência da elasticidade da fundação em um perfil de barragem gravidade de concreto com dimensões típicas de uma barragem brasileira, na qual essa estrutura é submetida aos carregamentos gravitacional (peso próprio), pressão hidrostática e sub-pressão. Dessa forma, avaliou-se as tensões principais e deslocamentos em alguns pontos na estrutura variando as condições da elasticidade da fundação. A modelização desse sistema barragem-fundação foi analisada por meio do software ANSYS APDL cuja idealização do solo da fundação e do concreto da barragem foram considerados como materiais de propriedades elásticas, homogêneas e lineares. Os resultados mostram que a modificação da elasticidade da fundação provoca mudanças no comportamento das tensões e deslocamentos na estrutura.

Palavras-chaves: Barragem gravidade de Concreto, Fundação, ANSYS, Estabilidade.

Abstract. The foundation in concrete gravity dams is a prominent place in the stability analyzes of these structures, since defects in the foundation or their influence are considered as one of the main mechanisms of deterioration and damage along the structure. This study consisted in evaluating the influence of the elasticity of the foundation on a concrete gravity dam profile with typical dimensions of a Brazilian dam, in which this structure is submitted to the gravitational loads (own weight), hydrostatic pressure and subpressure. Thus, the principal stresses and displacements at some points in the structure were evaluated by varying the conditions of the elasticity of the foundation. The modeling of this dam-foundation system was analyzed by means of the ANSYS APDL software, whose idealization of the foundation soil and dam concrete were considered as materials of elastic, homogeneous and linear properties. The results show that the modification of the elasticity of the foundation causes changes in the behavior of stresses and displacements in the structure..

Keywords: Concrete Gravity Dam, Foundation, ANSYS, Stability.

1 INTRODUÇÃO

A fundação das barragens de concreto é uma região de destaque na avaliação da estabilidade dessas estruturas. Existem muitos casos de deterioração nesse local em função, principalmente, aos fatores de enchimento e esvaziamento do reservatório que ocasionam diminuição e aumento nos valores das magnitudes de esforços, além da variação do comportamento geomecânico da fundação ao longo dos anos.

A variação dos esforços potencializa as tensões na barragem podendo provocar a instabilidade da estrutura e danos no corpo da barragem e no conjunto barragem-fundação. De acordo com o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens – CBDB (2001) a análise de segurança global deve ser feita para todas as estruturas principais, elementos estruturais e sistemas de interação entre as fundações e as estruturas submetidas aos diversos casos de carregamento e englobará a análise de estabilidade em planos inferiores ao da fundação, a definição dos coeficientes de segurança e a verificação entre as tensões atuantes e as tensões admissíveis dos materiais.

O conhecimento da deformabilidade da fundação tem uma grande importância nas análises de projetos em barragens gravidade de concreto, sendo mais susceptível os problemas de recalques diferenciais da fundação para solos mais flexíveis. A mudança da deformabilidade da fundação provoca alterações no estado de tensões, principalmente, na região próxima ao contato entre a estrutura e o solo.

De acordo com Silveira (2018), no que se refere ao estudo da interação solo-estrutura (ISE) em barragens de gravidade, um fator importante no cálculo dessas estruturas, que demanda uma atenção especial em sua construção, é o conhecimento da deformabilidade da sua fundação que relaciona as solicitações aplicadas e as deformações delas resultantes, além de ser uma região que possui frequentes problemas, em virtude dos recalques diferenciais.

Em função do explicitado anteriormente, os autores desse trabalho objetivam avaliar a influência da relação entre os módulos de elasticidade da fundação e do concreto analisando o comportamento das tensões através desse estudo paramétrico em pontos ao longo da estrutura, além de comparar os resultados obtidos por métodos numéricos via software APDL com as soluções analíticas do método gravidade nesses pontos.

1.1 Principais Estudos

Muitos pesquisadores e engenheiros ao longo dos anos estudaram a influência da fundação na estabilidade das estruturas de barragens gravidade de concreto. Os primeiros estudos relatados começaram com engenheiros franceses e britânicos, como Sazilly (1853), Delocre (1866), Rankine (1881) e Levy (1895) que publicaram marcos nos projetos dessas estruturas. Para os estudos mais recentes, a United States Bureau of Reclamation (USBR) em 1976 propôs a utilização do Método Gravidade em estudos preliminares e o seu emprego no cálculo de projetos em barragens de pequenas dimensões, sendo essa ideia reforçada por Grishin (1982) e Jansen (1988). Em sequência Lo *et al.* (1991) avaliaram a estabilidade existente em barragens de concreto sobre uma fundação rochosa classificando o contato barragem-fundação em três categorias: conectadas, fracamente conectadas e não conectadas. Outro estudo de destaque refere-se a Ram Kumar e G.C Nayak (1994) que apresentaram um análise de tensões através da Mecânica da Fratura Elástica Linear na qual variaram os parâmetros da altura da barragem, razão do módulo de elasticidade e largura da crista.

No Brasil devido ao fato de ser um país com inúmeras barragens em concreto, muitos pesquisadores recentemente estudaram a influência da fundação, com destaque para Gutseind (2003) e (2011) que analisou basicamente as tensões e a estabilidade dessas estruturas considerando a influência da deformabilidade do contato rocha-barragem; em 2006 Ribeiro apresentou toda a formulação analítica para o método gravidade desenvolvido inicialmente pela USBR; Nascimento Junior (2016) propôs um estudo relacionado a avaliação da influência da relação entre o módulo de elasticidade da fundação e do concreto da barragem, assim como estudou e apresentou os pontos de concentração de tensão na estrutura e a sua relação de modificação com o tipo de fundação. Ainda em nível de pesquisas brasileiras, em especial as desenvolvidas pelo Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE) da Universidade de Brasília (UnB) tem se destacado as metodologias adotadas para o tratamento dos problemas relacionados à engenharia de barragens, tais como se observou em Oliveira (2002), Silva e Pedroso (2005), Coelho (2016) e Farias *et al.* (2017), Mendes (2018).

2 FORMULAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estudo da influência da fundação

De acordo com Tyelk (1938) *apud* Chen (2011) o método da gravidade assume a validade da "lei trapezoidal", ocorrendo uma variação linear de tensões verticais entre as faces a montante e a jusante em todos os planos horizontais. Essa suposição é baseada na teoria das seções planas, onde qualquer plano horizontal permanece plano depois da deformação. No entanto, se uma seção de altura fina (por exemplo, represa de perfil triangular) é colocada sobre o fundamento como semi-espaço fino, as tensões são redistribuídas devido à interação barragem-fundação (Figura 3.1).

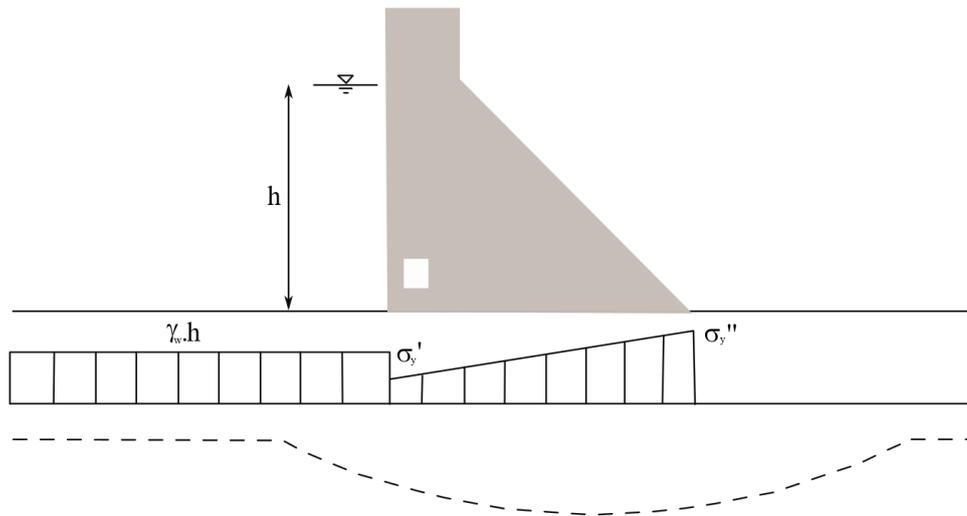


Figura 2-1 Redistribuição de tensões devido à interação barragem-fundação

A solução deste problema de contato para barragem gravidade tem sido estudado em muitos países por ferramentas teóricas e experimentais rigorosas. Essas análises indicam que a suposição "lei trapezoidal" não é válida na área próxima da base da barragem (cerca de 1/3- 1/4 da altura da barragem) devido à concentração de tensões no calcanhar e no pé do perfil, que é atribuível ao ajuste de deformação para a consistência entre o corpo e a fundação da barragem. As tensões neste caso dependem principalmente das propriedades elásticas da barragem e da fundação, no módulo de Young E_c e E_r , e também na razão de Poisson ν_c e ν_r . A Figura 3.2 mostra a distribuição das tensões verticais em diferentes níveis de E_c/E_r e situações do reservatório vazio e cheio. Para o reservatório vazio, E_c/E_r dá maiores concentrações de tensões para σ_y e τ . Para o reservatório cheio, se E_c/E_r é muito pequeno (ou seja, uma fundação flexível), σ_y possui tração tanto na borda de montante como na jusante; quando $E_c/E_r \approx 1$, tem-se maiores concentrações de tensões no calcanhar da barragem; se E_c/E_r é muito grande (ou seja, fundação rígida), esta é cada vez mais concentrada tanto na borda de montante jusante como a montante.

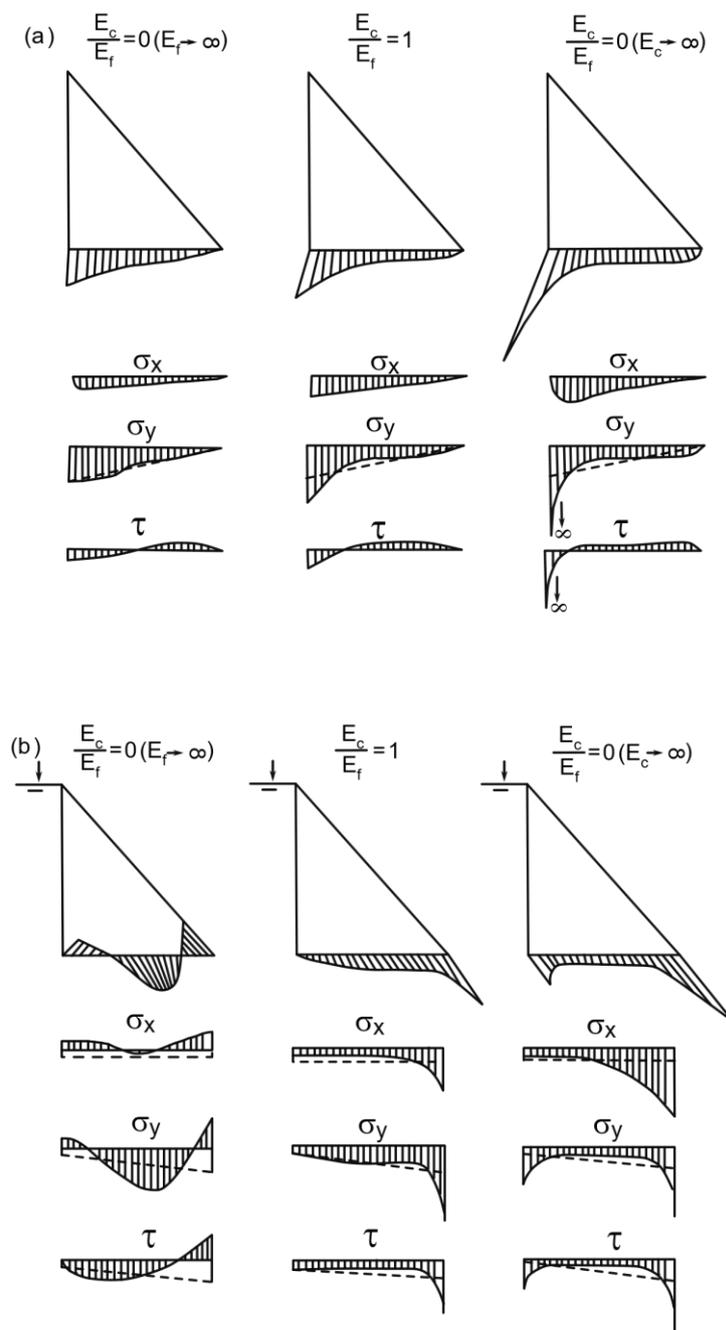


Figura 2-2 Tensões verticais, horizontais e cisalhantes influenciada pela modificação da elasticidade da fundação considerando (a) Peso Próprio e (b) Peso Próprio + Pressão Hidrostática

2.2 Método Gravidade

O Método Gravidade foi desenvolvido em 1976 pelo órgão responsável dos recursos hídricos nos Estados Unidos, United States Bureau Reclamation (USBR), e de acordo com Ribeiro (2006), o método é utilizado para estudos preliminares de barragens de gravidade, dependendo da fase de projeto e da informação necessária, podendo ser utilizado para o projeto definitivo de barragens retas de gravidade onde as juntas de retração não são travadas, nem grauteadas (USBR, 1976).

As principais hipóteses consideradas neste método são:

- O concreto utilizado na barragem é um material homogêneo, isotrópico e uniformemente elástico;
- Não existem movimentos diferenciais no local da barragem devido às cargas hidrostáticas atuantes no reservatório;
- Todas as cargas apresentadas são transferidas à fundação pela “ação de viga”, ou seja, a barragem é analisada em um corte de largura unitária, sem restrição lateral.
- As tensões normais em planos horizontais variam linearmente de face de montante à face de jusante (Figura 2-3);
- As tensões de cisalhamento em planos horizontais variam parabolicamente da face de montante à face de jusante (Figura 2-4).

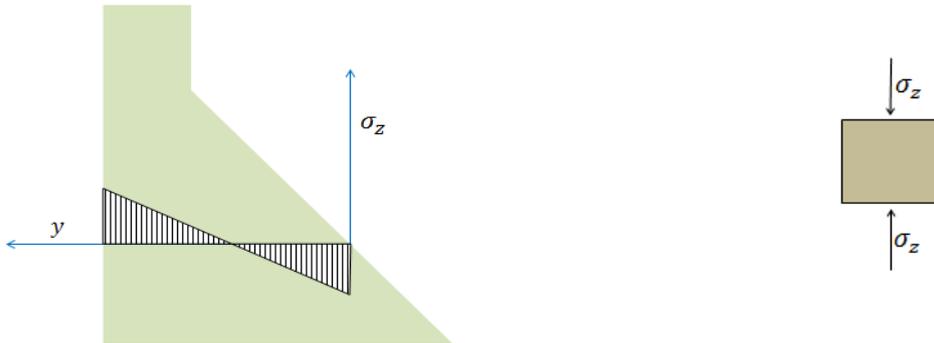


Figura 2-3 Tensões normais ao Plano Horizontal - Adaptado Ribeiro (2006)

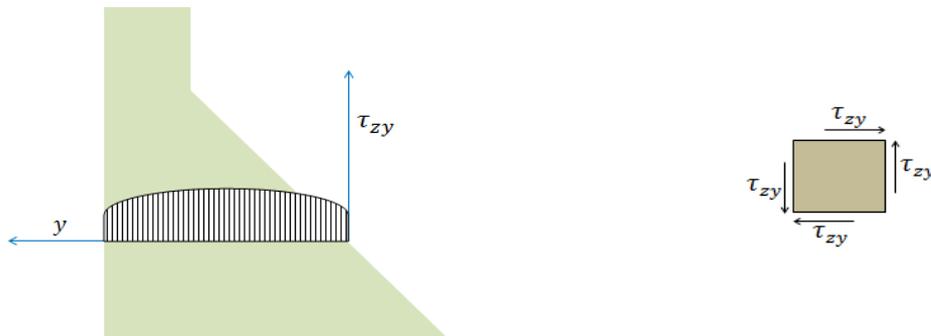


Figura 2-4 Tensões cisalhantes no plano vertical ou vertical - Adaptado Ribeiro (2006)

A simbologia, o carregamento e o perfil para a análise para o método gravidade é disposto na Figura 2-5. O carregamento inclui o peso próprio da barragem, a pressão hidrostática a montante e jusante e a subpressão.

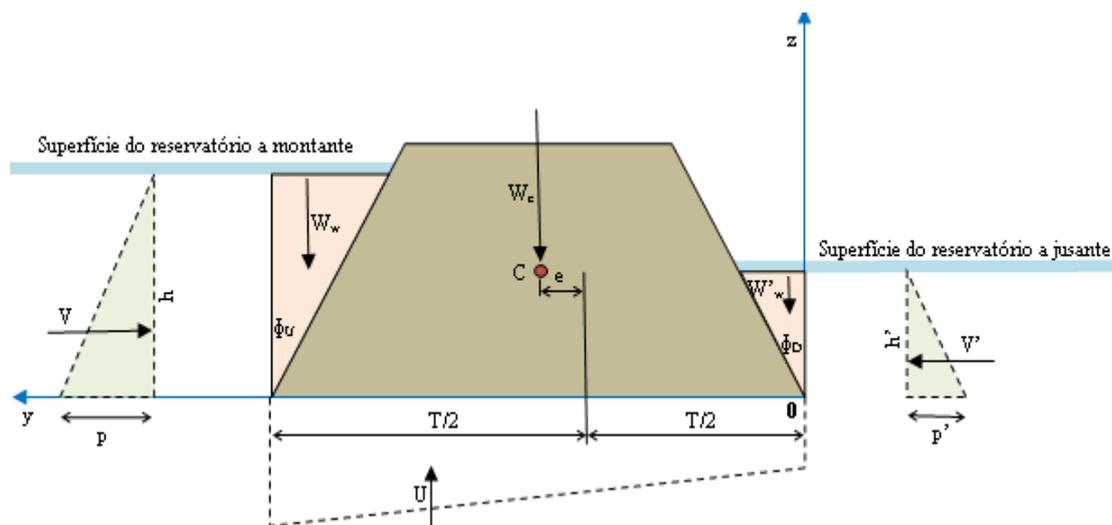


Figura 2-5 Seção transversal típica com combinação de carga usual – Adaptado Ribeiro (2006)

Ribeiro (2006) desenvolveu passo-a-passo as formulações analíticas do Método da Gravidade, que apresentavam de forma incompleta na literatura e mostradas a seguir:

- Tensões normais ao plano horizontal (σ_z)

Partindo-se da suposição da teoria clássica de vigas em pressão-flexão, de que as tensões normais na direção z (σ_z) variam linearmente ao longo da seção tem-se que:

$$\sigma_z(y) = a + by \quad (3.1)$$

$$a = \left(\frac{\sum W}{T} - \frac{6 \sum M}{T^2} \right) \quad (3.2)$$

$$b = \left(\frac{12 \sum M}{T^3} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

σ_z = tensão normal ao plano horizontal;

$\sum W$ = resultante das forças verticais na seção considerada;

T = distância horizontal da face de montante à face de jusante da seção considerada;

a e b = constantes a determinar

y = distância entre a linha neutra e o ponto onde se deseja σ_z obter na seção;

- Tensões cisalhantes no plano horizontal ou vertical ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$)

Admitindo-se ainda uma variação parabólica das tensões cisalhantes em um plano horizontal, tem-se:

$$\tau_{zy}(y) = a_1 + b_1 y + c_1 y^2 \quad (3.4)$$

$$a_1 = \tau_{xy}(0) = \tau_{zyd} \quad (3.5)$$

$$a_1 = (\sigma_{zd} - p') \tan(\phi_d) \quad (3.6)$$

$$b_1 = -\frac{1}{T} \left(\frac{6\Sigma V}{T} + 2\tau_{zyu} + 4\tau_{zyd} \right) \quad (3.7)$$

$$c_1 = -\frac{1}{T^2} \left(\frac{6\Sigma V}{T} + 3\tau_{zyu} + 3\tau_{zyd} \right) \quad (3.8)$$

Onde:

$\tau_{zy}(y)$ = tensão de cisalhamento em um plano vertical ou horizontal;

σ_{zd} = tensão normal a jusante;

p' = pressão hidrostática a jusante;

ϕ_d = ângulo formado pela face do elemento a jusante com a vertical;

ΣV = resultante horizontal das forças acima da seção, igual a $V + V'$;

τ_{zyu} = tensão de cisalhamento a montante;

τ_{zyd} = tensão de cisalhamento a jusante;

a_1, b_1, c_1 = constantes a determinar

- Tensões normais ao plano vertical (σ_y)

A distribuição das tensões normais ao longo da altura da barragem é linear, porém ao longo de uma seção horizontal qualquer é parabólica de terceiro grau:

$$\sigma_y(y) = a_2 + b_2y + c_2y^2 + d_2y^3 \quad (3.9)$$

$$a_2 = a_1 \tan(\phi_D) + p' \quad (3.10)$$

$$b_2 = b_1 \tan(\phi_D) + \frac{\partial a_1}{\partial z} \quad (3.11)$$

$$c_2 = c_1 \tan(\phi_D) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial a_1}{\partial z} \right) \quad (3.12)$$

$$d_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\partial c_1}{\partial z} \right) \quad (3.13)$$

Onde:

a_2, b_2, c_2, d_2 = constantes a determinar

3 DADOS E DEFINIÇÃO DO MODELO

As dimensões da barragem com dimensões típicas de um perfil brasileiro a ser estudada são apresentadas na Tabela 1 e na Figura 3-1.

Tabela 1. Dimensões do perfil típico de uma barragem brasileira

Parâmetro	H	h_c	h_g	B	H_r
Valor (m)	80	20	15	70	72

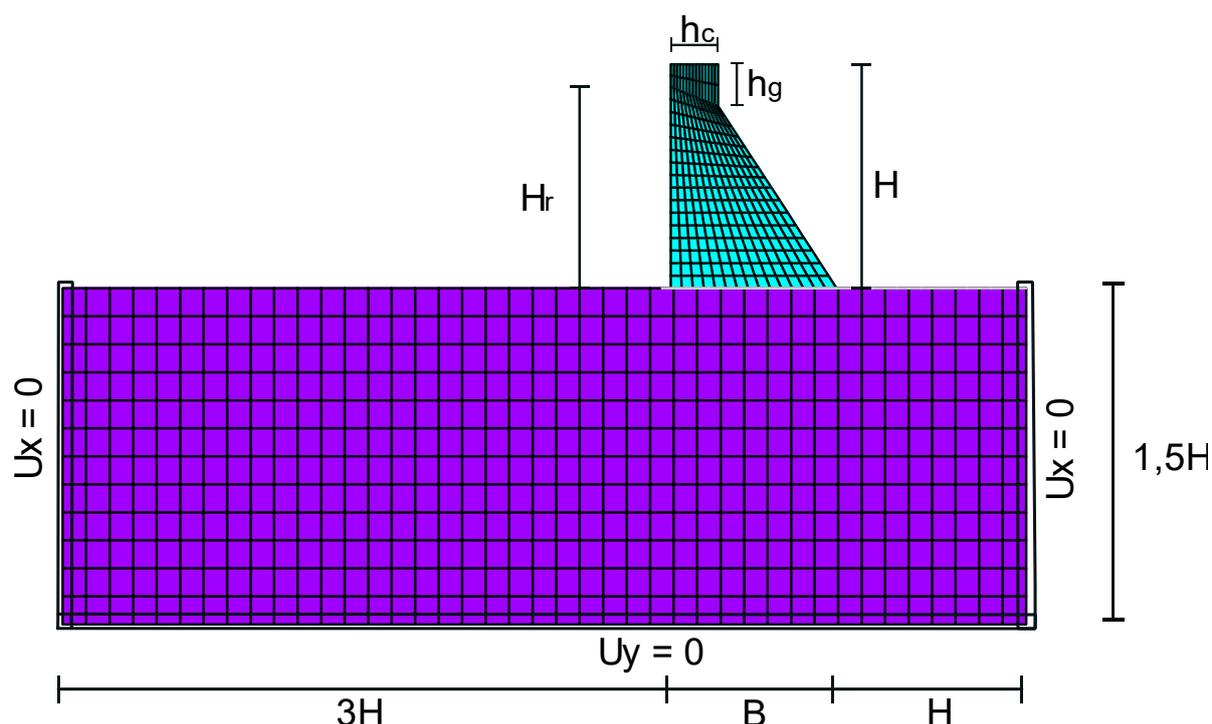


Figura 3-1 Dimensões do sistema avaliado e a sua discretização.

O concreto da barragem apresenta as seguintes propriedades físicas: massa específica $\rho_e = 2400 \text{ kg/m}^3$, módulo de Young $E_c = 25000 \text{ MPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,20$. A rocha da fundação é assumida como sendo sem massa ($\rho_f = 0 \text{ kg/m}^3$) e variou-se o módulo de Young E_f para três casos e um coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$.

O efeito da deformabilidade da fundação tem sido estudado considerando a variação da interação entre a barragem e a fundação pela razão entre E_f/E_c , E_f sendo módulo de elasticidade da fundação e E_c o módulo de elasticidade do concreto. Para esse estudo, foram analisados os 4 casos, $E_f/E_c = 1; 2; 5$ e 20 .

Na modelagem em elementos finitos assumiu que o material da fundação e da barragem são linearmente elásticos, isotrópicos e homogêneos. Para a estrutura e fundação usou o elemento de elemento finito – Plane 183 – no estado plano de deformação. Na interface do problema de interação solo-estrutura usou os elementos CONTA 172 e TARGE 169 que fazem a ligação entre os nós e os elementos nas superfícies de contato.

As cargas a serem avaliadas nesse estudo são o peso gravitacional – peso próprio – e a pressão hidrostática ao longo do barramento de montante.

4 RESULTADOS

Para este trabalho, analisou-se os 4 casos para os dois tipos de carregamento: o estado de construção que inclui apenas o peso próprio da barragem e o estado de operação que além do peso próprio da barragem inclui a pressão hidrostática exercida no barramento de montante.

Foram calculadas as tensões verticais, horizontais e cisalhantes para os dois tipos de carregamento na interface entre a barragem e a fundação, ou seja, na cota zero. Para a tensão vertical comparou-se os resultados com o método gravidade estudado por Ribeiro (2006) e Nascimento Júnior (2016).

Pelo fato de existir uma numerosa gama de resultados, optou-se por resumir esses dados em gráficos que apresentam a variação da elasticidade e suas respectivas tensões ao longo da base da estrutura. Além disso são apresentados os resultados numéricos para os casos extremos com as relações $E_f/E_c = 1$ (fundação flexível) e $E_f/E_c = 20$ (fundação rígida) nos dois estados de carregamento.

As Figuras 4-1 e 4-2 apresentam os resultados para as tensões verticais avaliando o peso gravitacional da barragem, a primeira representa a fundação flexível, enquanto que a segunda uma fundação rígida. Ao observar os resultados percebe uma redução nas magnitudes dos valores das tensões verticais quando torna mais rígida a fundação.

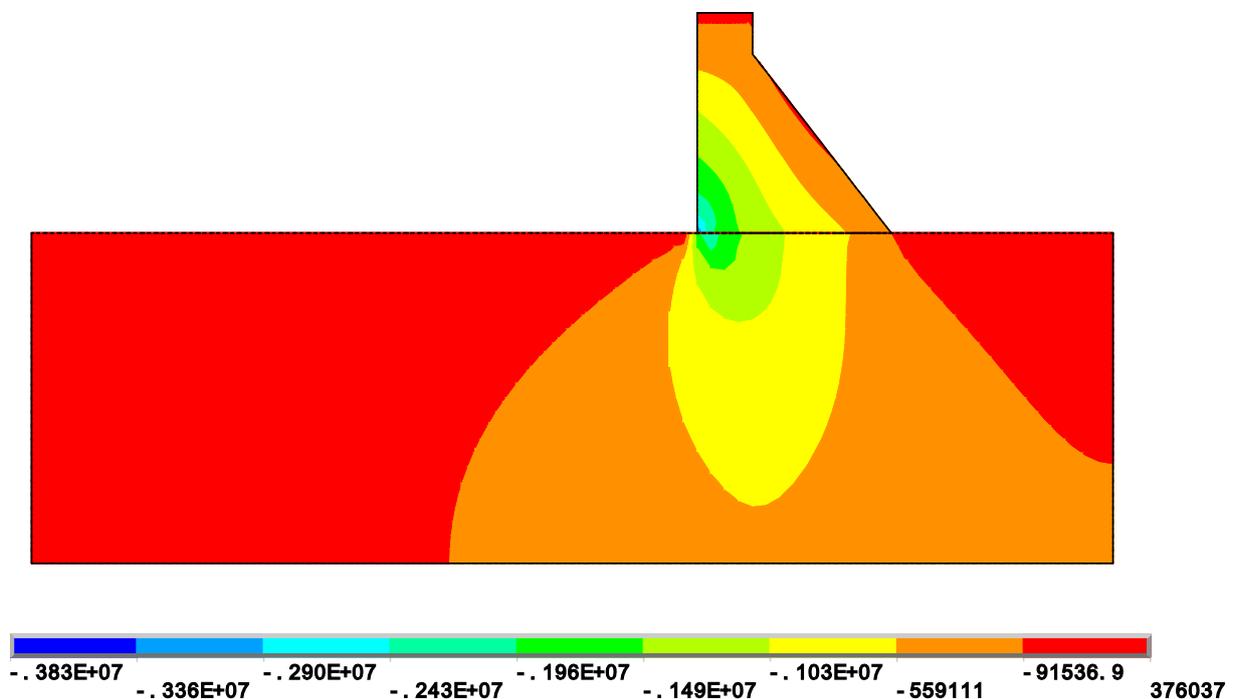


Figura 4-1 Tensões verticais para o peso gravitacional da barragem com fundação flexível

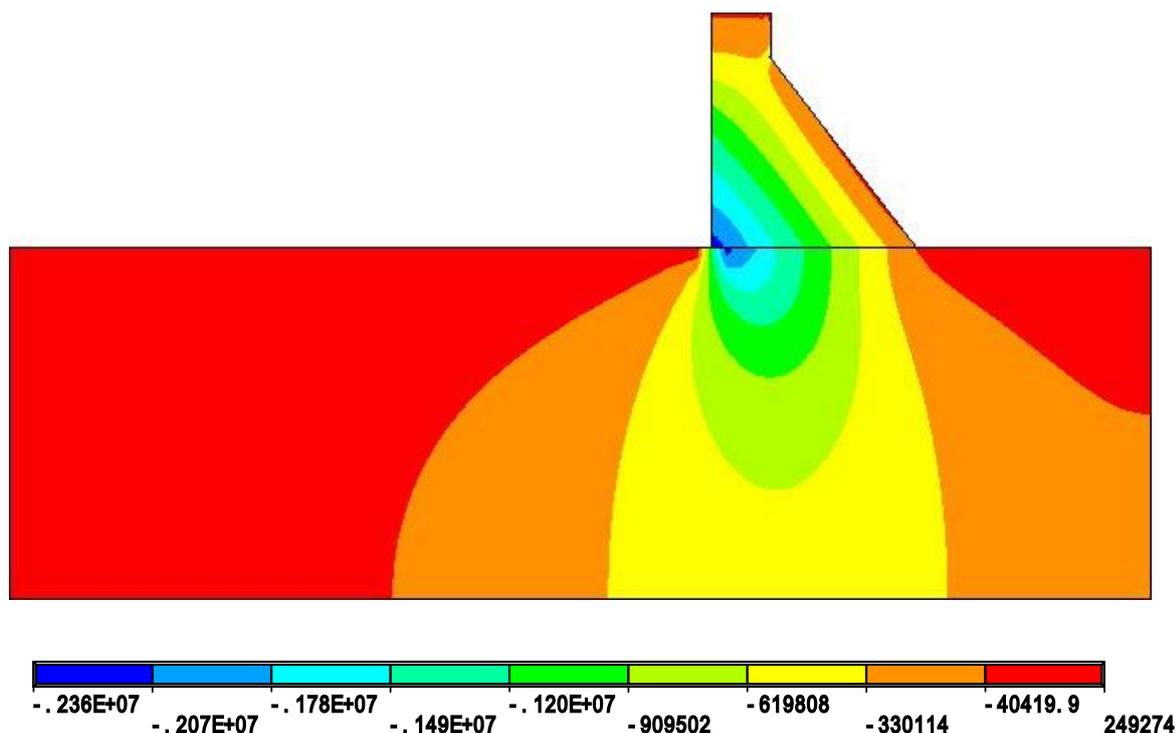


Figura 4-2 Tensões verticais para o peso gravitacional da barragem com fundação rígida

Já as Figuras 4-3 e 4-4 apresentam os resultados para as tensões verticais avaliando a combinação dos carregamentos que envolvem o peso gravitacional da barragem e a pressão hidrostática modificando a elasticidade da fundação para flexível e rígida. De maneira análoga ao avaliado no item anterior ocorre uma redução nas magnitudes dos valores das tensões verticais quando torna mais rígida a fundação. Além disso, a pressão hidrostática atenua as tensões a montante calculadas quando considera apenas o peso da barragem e aumenta as tensões no barramento de jusante.

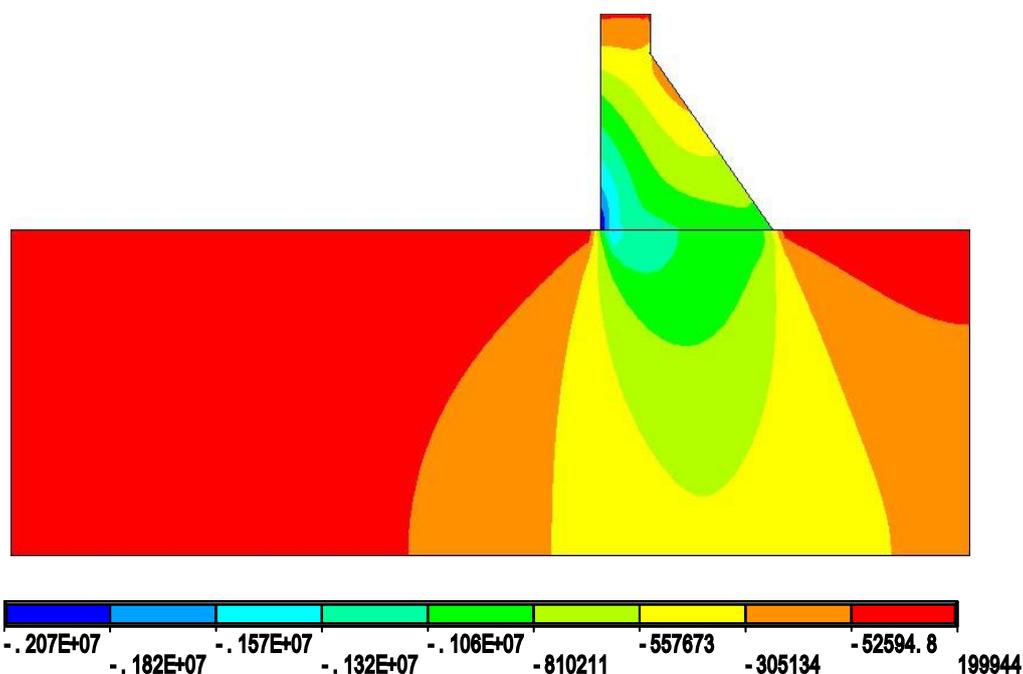


Figura 4-3 Tensões verticais para a combinação do carregamento do peso próprio da barragem e a pressão hidrostática com fundação flexível

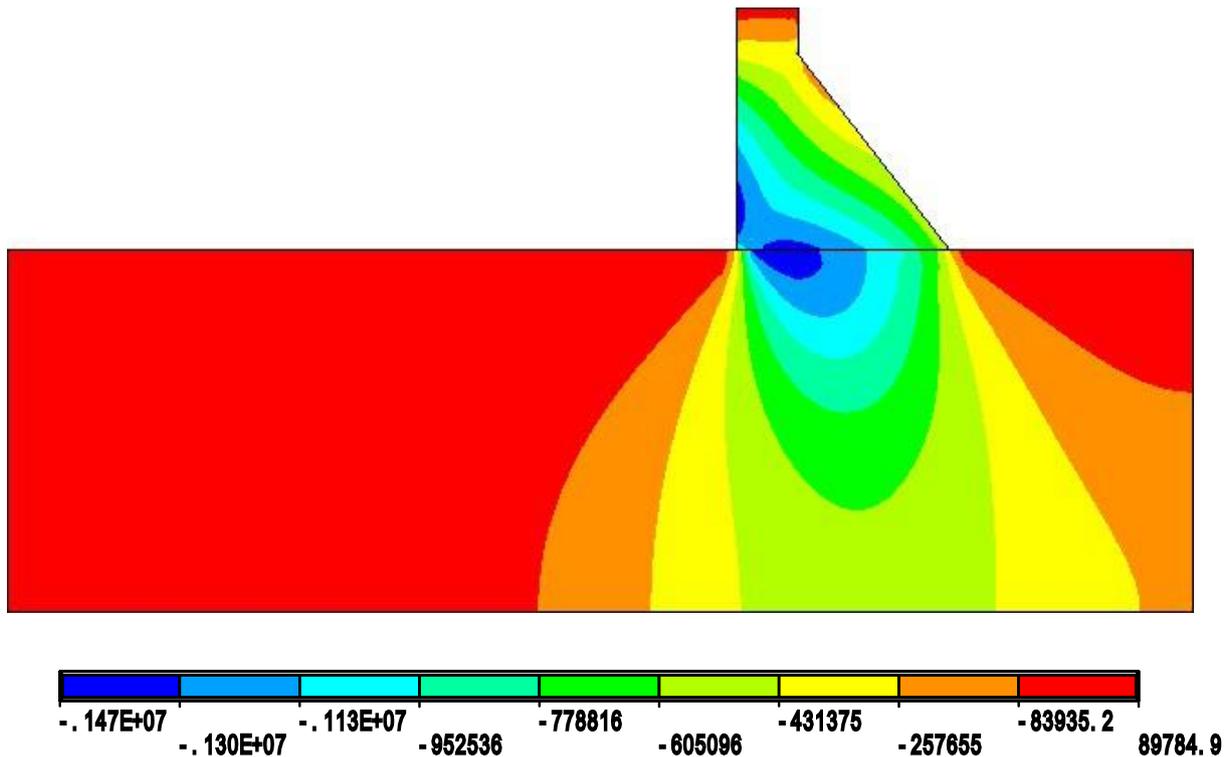


Figura 4-4 Tensões verticais para a combinação do carregamento do peso próprio da barragem e a pressão hidrostática com fundação rígida

Esses resultados mostram a influência da fundação nas magnitudes das tensões ao longo da barragem, mas com relevância na região de contato e em pontos que susceptíveis a concentrações de tensões que são o calcanhar e o pé da barragem.

Dessa forma, os próximos resultados nas Figuras 4-5; 4-6; 4-7 e 4-8 apresentam de forma detalhada as tensões verticais, horizontais, cisalhantes e principais ao longo da região de contato entre a barragem e a fundação.

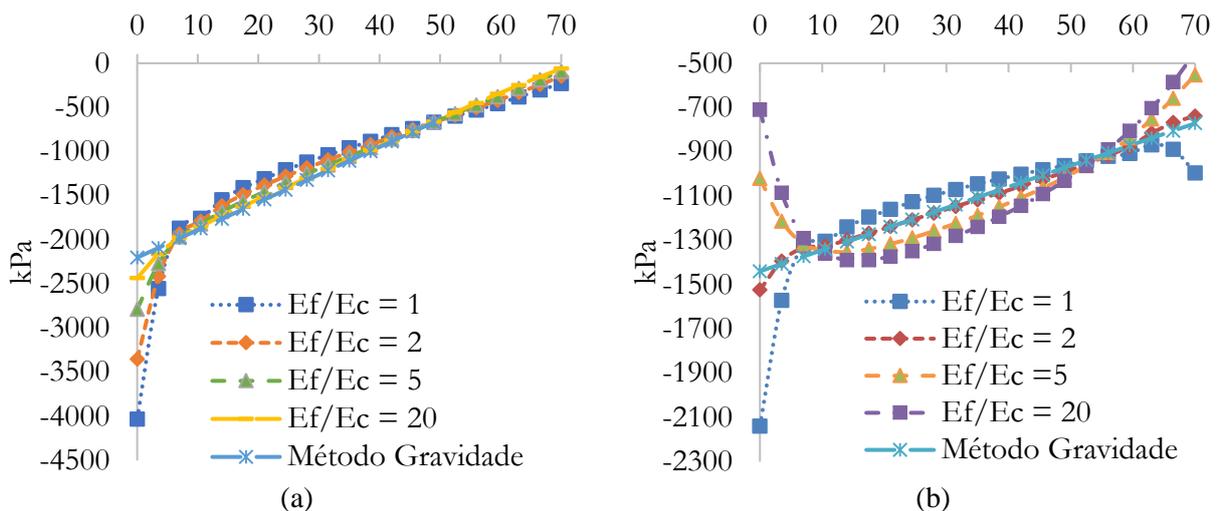


Figura 4-5 Tensões verticais para os carregamentos (a) PP e (b) PP + PH

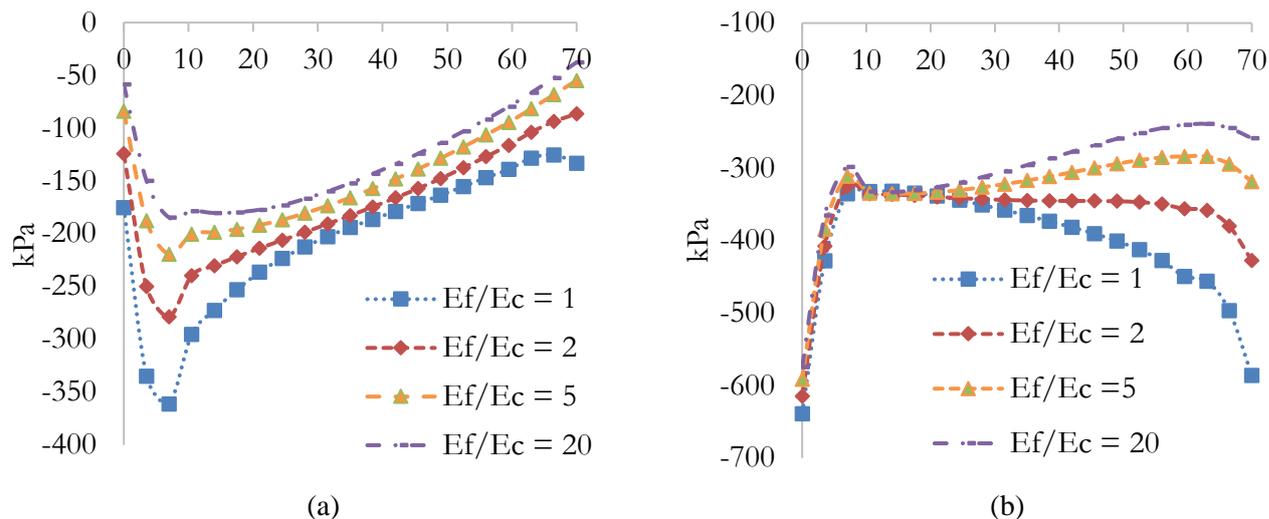


Figura 4-6 Tensões horizontais para os carregamentos (a) PP e (b) PP + PH

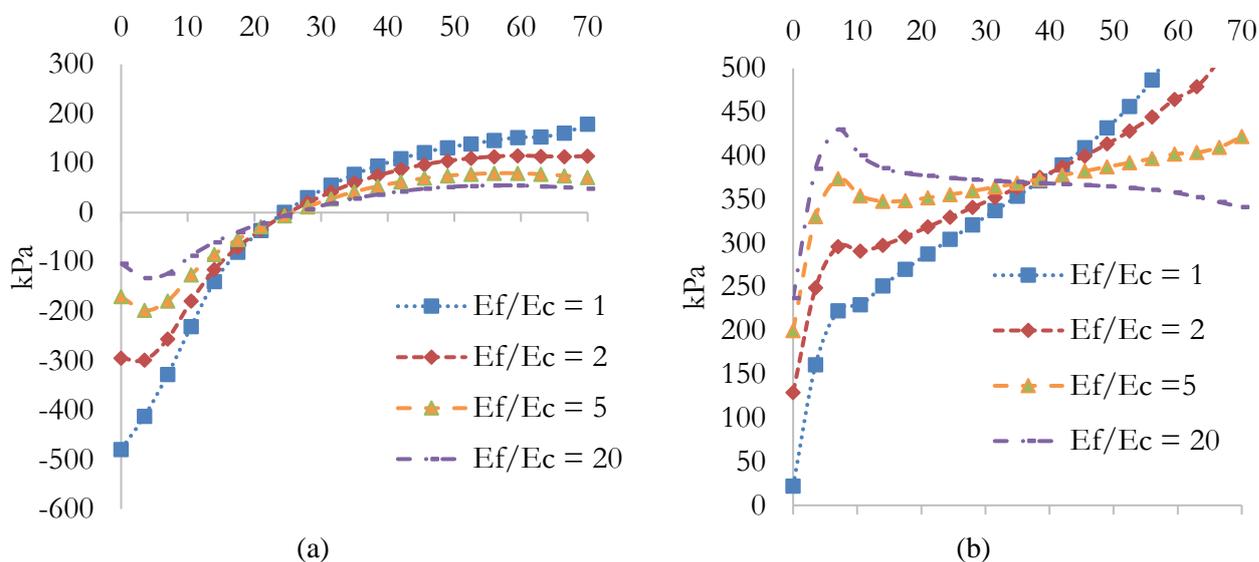


Figura 4-7 Tensões cisalhantes para os carregamentos (a) PP e (b) PP + PH

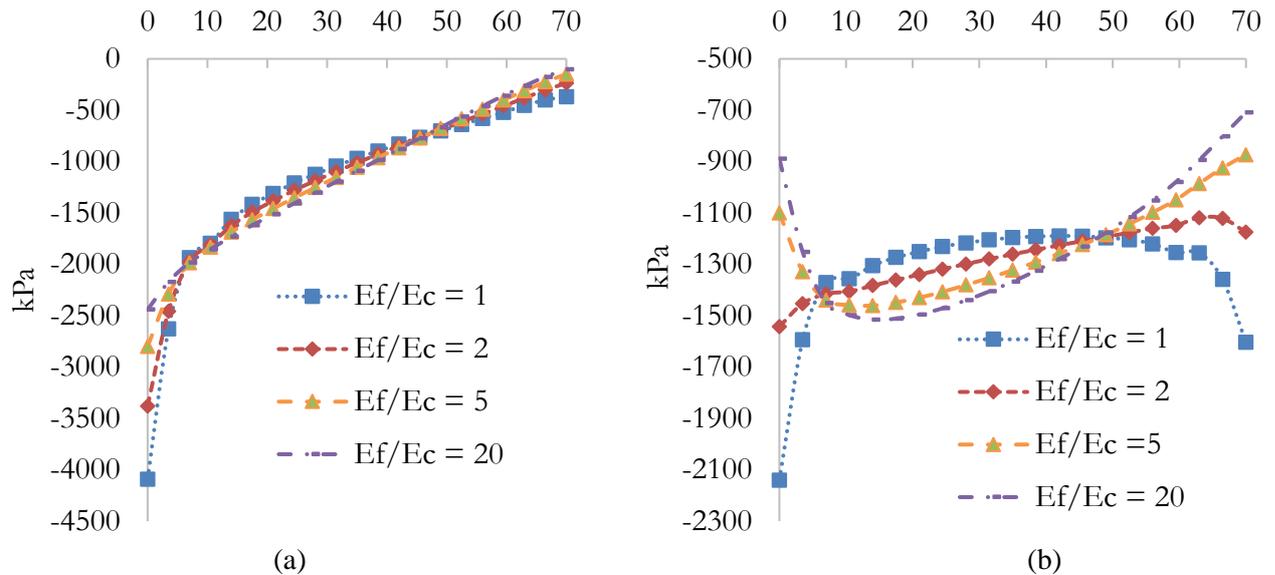


Figura 4-8 Tensões principais máximas para os carregamentos (a) PP e (b) PP + PH

5 CONCLUSÃO

A partir desse estudo pode-se aferir que os resultados mostram que as tensões verticais são muito maiores que as tensões horizontais e cisalhantes, isso fica nítido quando observa-se as magnitudes para as tensões máximas ou principais expressas na Figura 4-8 com valores muito próximos das tensões verticais.

Para o caso das tensões verticais e principais observa-se que no barramento de montante tem-se as maiores magnitudes para o estado de carregamento, e com a inserção da pressão hidrostática no estado de operação tem-se uma suavização nas magnitudes na face de montante e um acréscimo nos valores da face de jusante.

O efeito da deformabilidade da fundação provoca um acréscimo nas magnitudes dessas tensões principalmente nos pontos críticos, calcanhar e pé da barragem, nos dois estados de carregamento. Além disso Pode-se constatar ainda que pelos resultados para uma fundação com uma rigidez de 50GPa já se tem resultados satisfatórios

REFERÊNCIAS

- [1] CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens – Guia Básico de segurança de barragens. São Paulo: Núcleo regional de São Paulo, Comissão regional de segurança de Barragens – CBDB/ICOLD, 2001.
- [2] SILVEIRA, I. V. (2018). Estudo da influência da crosta local no comportamento sísmico do sistema barragem gravidade-reservatório-fundação. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. TD-020A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 144p.
- [3] SAZILLY, J.A.T. 1853. Note sur un type de profil d'égale résistance proposé pour les murs de réservoirs d'eau. Annales des Ponts et Chaussées 6 :191-222
- [4] DELOCRE. F.E. (1866) Mémoire sur la Forme du profil à adopter pour les Grands Barrages en Maçonnerie des Réservoirs. Mémoires et Documents, Annales des Ponts et Chaussées, 2nd Sem, pp 212-272.

- [5] RANKINE. W. J. M. (1881) Miscellaneous scientific papers: Report on the design and construction of masonry dams. Charles Griffin and Company, London.
- [6] LEVY. M. M (1895). Quelques considérations sur la construction de grands barrages. Comptes – Rendus de l’Académie des Sciences 6 :288-300.
- [7] USBR (United States Bureau of Reclamation) (1976). Design of gravity dams. Denver Colorado.
- [8] GRISHIN, N. M. Hydraulic Structures. English Translation Mr Publishers. Moscow, V.1. 1982
- [9] JANSEN, R. B. (1988). Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation. New York: Van Nostrand Reinhold.
- [10] LO, K. Y., OGAWA, T., LUKAJIC, B., SMITH, G. F., and TANG, J. H. K. (1991). ”The evaluation of stability of existing concrete dams on rock foundations and remedial measures.” ICOLD, 17th Congress, Vienna, Austria, 963-990
- [11] KUMAR, R. & NAYAK, G. C. (1994). Numerical modeling of tensile crack propagation in concrete dams. Journal of Structural Engineering, p. 1053-1074.
- [12] GUTSTEIN, D. Estudo das Tensões em Fundações de Barragens de Gravidade de Concreto por meio do Método dos Elementos Finitos. Florianópolis, 2003. 278 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [13] GUTSTEIN, D. Projeto de Estruturas de Barragens de Gravidade de Concreto por meio de Métodos Computacionais: Visão Geral e Metodologia. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- [14] RIBEIRO, P.M.V. Uma Metodologia Analítica do Campo de Tensões em Barragens de Concreto Durante Terremotos. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2006.
- [15] NASCIMENTO JÚNIOR, C. A. Um Estudo Comparativo Analítico – Numérico de Tensões Locais e Globais em Barragens Gravidade de Concreto. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- [16] Oliveira, F. F. (2002). Análise de Tensões e Estabilidade Global de Barragens de Gravidade de Concreto. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM-01A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 160p.
- [17] SILVA, S. F.; PEDROSO, L. Método das diferenças finitas em dinâmica de vigas profundas. Relatório Técnico de Pesquisa, RTP-SFS03, UnB-FT/ENC, Brasília, 2005.
- [18] Coelho, N. A.. Métodos Analíticos e Numéricos para o Estudo dos Efeitos Termomecânicos no Concreto Massa Orientados às Barragens de Gravidade. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, E.TD-007A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 275p.
- [19] FARIAS, J. Y., SILVEIRA, I. V., & PEDROSO, L.J. – Um Estudo do Campo de Tensões num perfil típico de Barragem de Concreto pelo Método Gravidade – XXXVIII Ibero Latin American Congress in Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2017); Florianópolis – Brazil. November 05-08, 2017. Paper Code: CILAMCE2017-0973. doi://10.20906/CPS/CILAMCE2017-0973.

[20] MENDES, N. B. (2018). Um estudo de propagação de ondas e lançamento do sismo na análise dinâmica acoplada barragem em arco - reservatório - fundação. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. TD-004A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 306p

[21] CHEN SH. Hydraulic Structures. (Berlin) Germany: Springer, 2015 (ISBN 978-3-662-47330-6).