



Estudo da Convergência de Malha Hexaédrica. Estudo de Caso: Estrutura de contraforte D38 – Usina hidrelétrica de Itaipu (UHI)

Neto W*, Aracayo L. A. S*

**Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens – CEASB, Fundação Parque Tecnológico de Itaipu, Foz do Iguaçu – Brasil*

Resumo. O presente trabalho aborda uma atualização da análise de convergência de malha utilizando o programa *Ansys®*, com o enfoque nas tensões geradas no Bloco de Contraforte D-38, através do final de enchimento do reservatório em 1982. A convergência se dará por meio do refinamento dos elementos da malha, em busca da diminuição do erro numérico, procurando uma malha com qualidade que não influencie no modelo numérico que representará o comportamento da estrutura no instante da aplicação da carga. Os dados de simulação convergem quando o tamanho dos elementos estão em um intervalo de 1 a 2 metros.

Palavras Chaves. *Curva de convergência, Refinamento de malha, Método dos elementos Finitos.*

Introdução. Com o objetivo de estudar o comportamento da convergência de malha para simulação de tensão e deformação através do método dos elementos finitos, esse estudo relaciona diferentes tamanhos dos elementos que compõe a malha com seus respectivos resultados de tensões e deformações.

Desta maneira, para comprovar a convergência dos valores através da malha, apresenta-se um gráfico onde é possível verificar o comportamento de convergência dos valores de tensão e deformação conforme é alterado os tamanhos dos elementos na malha. O processo de simulação demonstrou convergência para os valores de tamanho dos elementos no intervalo de 1 a 2 metros.

Assim, garantindo nesse intervalo, quais quer que seja o tamanho da malha a mesma vai retornar valores iguais para tensão e deformação. Demonstrando que nesse intervalo o tamanho dos elementos da malha não interfere nos resultados das simulações, garantindo confiabilidade nos dados obtidos.

Para realização do estudo foram assumidos valores de cargas, propriedades do material e para as condições de contorno conforme os relatórios de técnicos do Bloco D-38 encontrados no acervo de dados da UHI. Sendo eles, nível do reservatório, valores de subpressão dos piezômetros instrumentados no bloco. Para a fundação assumiu-se rígida e o bloco com movimentos livres a jusante e nas laterais.

Contextualização. Durante a etapa de projetos da UHI, utilizou-se o método dos elementos finitos (MEF) para compreender as tensões e deformações geradas e auxiliar os projetistas em suas decisões (1). Considerando que MEF atualmente apresenta um nível de desenvolvimento computacional muito representativo em relação a capacidade técnica computacional na época da elaboração dos projetos da UHI (em torno da década de 1970), a utilização de programas atuais de maneira adequada conduz o retorno de dados seguros. (3). Além da possibilidade de verificação e validação dos dados através do estudo de convergência.

Desta forma utiliza-se nesse estudo de caso do bloco de contraforte D-38 o programa *Ansys®*, para modelagem da geometria e construção da malha e para fins de validação o estudo de convergência da malha utilizando os dados das pressões geradas pelo o reservatório após seu enchimento.

Problemática. Objeto de estudo nesse trabalho é o Bloco de contraforte D-38 que constitui a barragem lateral direita da UHI, assentado sobre a cota 172,00m e seu topo localizado na cota 225,00m e possuindo uma largura de 17m. Bloco possui inclinações em sua geometria sendo montante de $59,89^\circ$ e a jusante de $65,29^\circ$ ambas com orientação da base para o topo, conforme a Figura 1.



Figura 1. Perfil a jusante do Bloco de Contraforte D-38.

A importância da escolha do Bloco-D38 em específico se justifica com a presença de um grande número de instrumentos em sua estrutura (pêndulos, piezômetros, rosetas, termômetros e

extensômetros). O monitoramento dos dados de seu comportamento, refletem em segurança para os demais Blocos que compõem a barragem lateral direita, pois em geral, os blocos de contraforte desse trecho possuem o comportamento semelhante (2).

Tabela 1. Dados de Projeto do Bloco de contraforte D-38.

Elevação de assentamento	172,00
Elevação do topo	225,00
Largura	17 m
Inclinação a montante	59,89°
Inclinação a Jusante	65,29°

Simulação. A primeira etapa do estudo consiste na modelagem da estrutura no programa *SpaceClaim*, o qual, é pertencente ao ambiente *Ansys*®, viabilizando ao usuário o fator de compatibilidade e excluindo a necessidade de correções em caso de importação da geometria por via de outros programas. O processo de modelagem foi sob consulta as dimensões dispostas nas plantas utilizadas na construção da UHI, todas essas informações foram coletadas no acervo de dados da UHI. Figura 2.

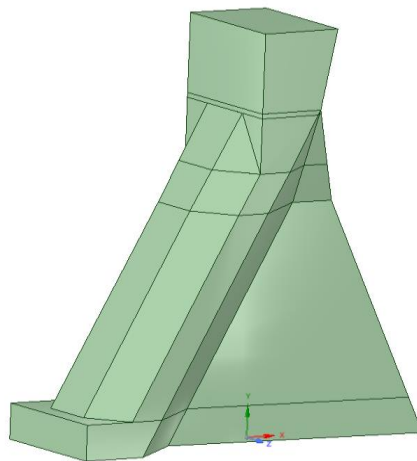


Figura 2. Bloco D-38 modelado na Plataforma *SpaceClaim*®

A etapa posterior foi a implementação da malha no programa *Mesh*®, assim como o *SpaceClaim*®, também pertence a o ambiente *Ansys*®. Foram utilizadas as ferramentas listadas abaixo:

- **Body Sizing:** Utilizado para definir o tamanho das divisões dos elementos na malha.
- **MultiZone:** Utilizado para modelagem Zonas Adversas de na forma de Hexaedros.
- **Sweep Method:** Utilizado para criar elementos regulares em zonas de projeções ou varreduras.
- **Face Sizing:** Utilizada para modelagem de elementos na face do corpo, normalmente correções na malha.
- **Edge Sizing:** Utilizado para definir o tamanho dos elementos a partir das arestas.

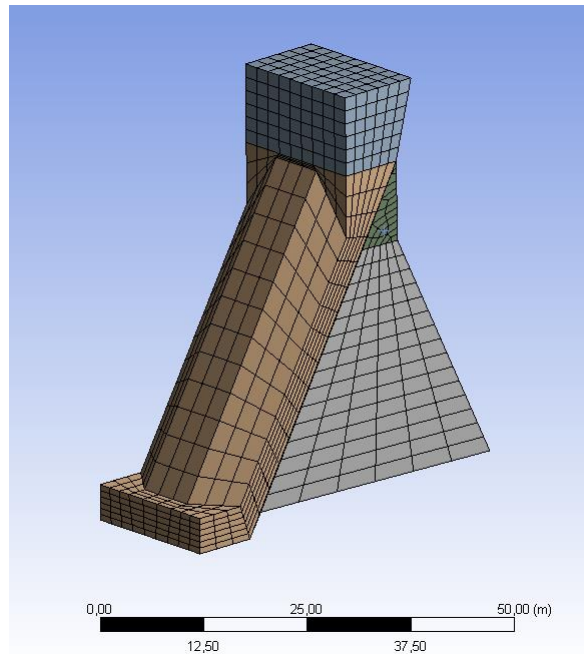


Figura 3. Malha implementada na geometria do Bloco – D38.

Como a plataforma *Ansys*® possui um vasto acervo para simulação, cabe ao usuário decidir qual o tipo de elemento aplicar no processo de simulação, para este trabalho utilizou-se o SOLID186, esse tipo de elemento é utilizado para aplicações em estruturas solidas tridimensionais, é definido com oito nós, possui em cada nó três graus de liberdade (translações nas direções X, Y e Z) e seu formato possui a forma de um Hexaedro (4), conforme Figura 4.

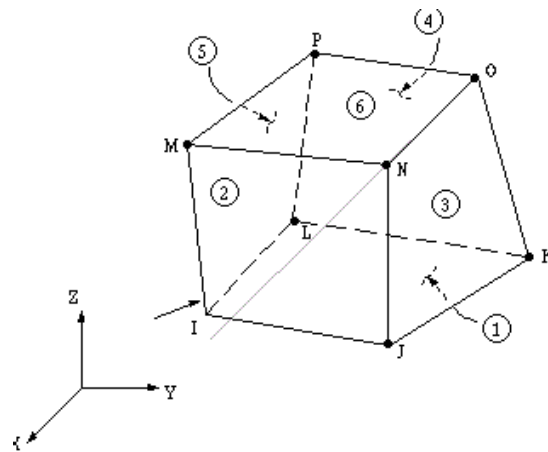


Figura 4. Perfil de um Bloco Hexaédrico. Fonte: *Ansys User Support*

O processo de simulação exige algumas condições de contorno, onde o usuário define de qual maneira vai estabelecer os critérios de cargas, apoios e pressões, de maneira que seja o mais próximo a realidade (5).

A primeira condição de contorno estabelecida nesse estudo de caso é o nível do reservatório. Sua finalidade é simular as condições de pressão hidrostática no bloco, coletadas junto ao acervo de dados da UHI, os registros do nível do reservatório na data em que ele se estabeleceu cheio a nível operacional. A data utilizada foi 18/05/1984, onde o reservatório estava na cota 217,77m (43,77 metros da base do Bloco). A partir dessas informações, foi implementado a pressão hidrostática distribuída a montante do Bloco D-38.

Segunda condição de contorno foram as subpressões estabelecidas no contato entre o bloco e a fundação na cota 172,00m (cota inferior do Bloco D-38), essas informações foram coletadas a partir de dois permeâmetros (PS-D-85 e PS-D-86) que estão instalados entre os contados, os registros foram coletados junto ao acervo da UHI, seguindo da mesma maneira a data de 18/05/1984, garantindo que as subpressões estão de acordo com o nível do reservatório. Seus valores respectivamente são de 16,12 e 17,49 mca.

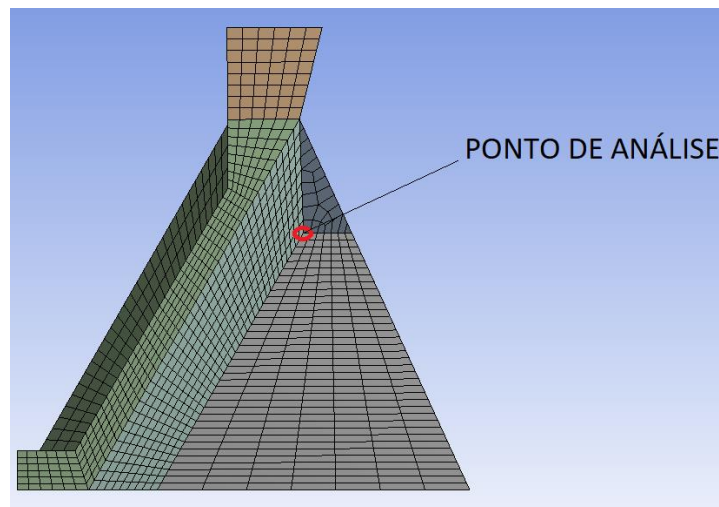
A terceira e última condição de contorno foi implementar o comportamento da fundação junto ao bloco, dessa maneira foi considerado um contato rígido desconsiderando recalques, porém o deslocamento livre a montante. Além das laterais também possuem deslocamento livre, a fim de estudar o comportamento do bloco de maneira única e não levando em consideração o atrito que possui junto as juntas de vedação com os blocos vizinhos D37 e D39.

O processo de simulação também necessita da definição das propriedades no material, dessa maneira a tabela abaixo demonstra os dados implementados para o comportamento do concreto, todos os dados foram retirados dos registro de construção da UHI.

Tabela 2. Dados de Projeto do Bloco de contraforte D-38.

Densidade do Concreto	2500 kg/m ³
Densidade do Fluido (água)	997 kg/m ³
Coefficiente de Poisson	0,2
Módulo de Elasticidade	30 GPa

Por fim o processo de simulação variando o tamanho dos elementos na malha, com valores definidos entre 1 e 5 metros, conseqüentemente a densidade dos elementos da malha aumenta conforme reduzimos os tamanhos de seus elementos. Assim, para analisar a convergência dos valores de tensão e deslocamento é definido um ponto de prova (análise), localizado entre a alma do bloco e o encaixe da cabeça, conforme a figura 5.

**Figura 5.** Perfil a jusante do Bloco de Contraforte D-38.

Resultados. Os gráficos 1 e 2, demonstram os valores de tensão e deslocamento gerados no ponto de prova, podemos observar a convergência dos valores conforme reduzimos o tamanho dos elementos.

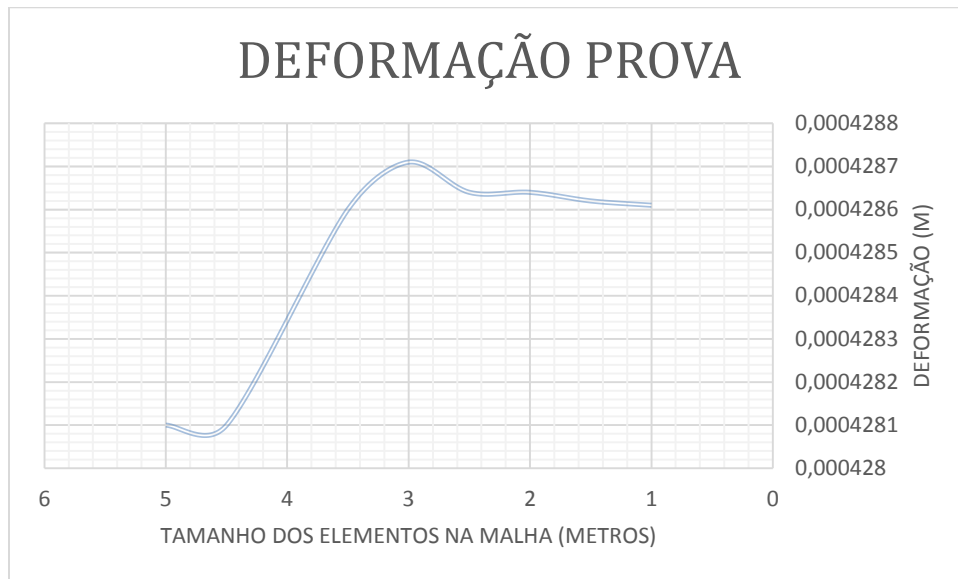


Gráfico 1 – Valores de deformação no ponto de prova



Gráfico 2 – Valores de Tensão no ponto de prova



Conclusão. O procedimento de simulação pelo MEF, necessita de um estudo de convergência de malha, desta forma o usuário certifica-se com a convergência a não necessidade de alterações na malha, pois os valores do tamanho dos elementos estão calibrados para o modelo, assim, quais quer alterações no número de elementos da dentro daquele intervalo não irá afetar os resultados de simulação.

Para o estudo de caso do Bloco-D38, os elementos com tamanho entre 1 e 2 metros retornam resultados semelhantes confirmando sua convergência.

Vale ressaltar que a densidade da malha interfere na sua qualidade e no tempo de processamento, ou seja, quanto menor o tamanho dos elementos mais densa a malha e de melhor qualidade, porém, conseqüentemente necessitará de mais processamento, cabe ao usuário encontrar um meio termo condizente com sua necessidade.

Referencias.

(1) ITAIPU - Usina Hidrelétrica de ITAIPU. Aspectos de Engenharia. Foz do Iguaçu, PR, 2008. 790p.

(2) Fiorini AS, Porto EC, Paredes MAL, Piasentin C. Barragem de Itaipu – Comparação de domportamento dos diferentes tipos de barragens de concreto. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. 2001; 599-614. Brasil.

(3) Filho FH, Proença MS, Paschoalini AT, Estudo da convergência de malha no estado plano de tensões utilizando o elemento finito isoparamétrico quadrilateral de quatro nós. XXVIII Congresso de Iniciação Científica da UNESP. 2014. Brasil

(4) Ansys. User Supporter. Disponível em: <
http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-185.htm /> Acesso em: 03 de Setembro de 2018.

(5) Rodrigues Filho, Bruno Amado - Estudo da convergência no método de elementos finitos aplicados a dispositivos eletromagnéticos não lineares. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. 153 p.