

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia com base no método dos elementos finitos para o estudo do comportamento estrutural de dutos enterrados, considerando a interação solo-duto.

Para representar a interação solo-duto foi implementada a formulação do problema de contato considerando o fenômeno de atrito e, para tal emprega-se o método da Penalidade, formulação baseada no trabalho desenvolvido por Laursen^{48,50} & Simo e Laursen⁴⁹, onde as restrições de contato com atrito são satisfeitas de forma aproximada através do emprego do parâmetro de penalidade (normal e tangencial). As relações cinemáticas são dadas em termos de uma função diferenciável da distancia entre os corpos (gap).

O Método da Penalidade para consideração do contato com atrito foi implementado no programa de elementos finitos CARAT (Computer Aided Research Analysis Tool - Universitat Stuttgart) disponível no departamento de Engenharia Civil da PUC/Rio, como já comentado no Capítulo 4, seção 4.3.1

As primeiras análises realizadas tiveram como objetivo principal validar o algoritmo de contato implementado. Subseqüentemente foram efetuadas as análises voltadas para a aplicação da análise de dutos enterrados considerando a interação solo-duto. Os exemplos que apresentados incluem exemplos bi e tridimensionais nos quais podem ser representados modelos com grandes deformações e grandes deslocamentos além de não linearidade do material.

O programa POS3D do grupo Tecgraf da PUC-Rio foi utilizado para a visualização da geometria, discretização da malha em elementos finitos e os resultados obtidos tais como tensões e deslocamentos.

Para a utilização desta metodologia torna-se necessário primeiro fazer uma serie de análises erro-tentativa para a determinação dos parâmetros de penalidade normal e penalidade tangencial a serem utilizados, assim como definir o coeficiente de atrito que melhor representa-se o atrito dos materiais envolvidos. Isto se faz necessário para cada caso a ser analisado. Esses parâmetros de penalidade quando escolhidos adequadamente apresentam resultados bastante

satisfatórios. A escolha destes parâmetros é efetuada de maneira que torne o sistema estável, isto é, que não apresente oscilações nos resultados obtidos.

Na modelagem do sistema solo-duto, o modelo de formulação com elementos de formulação híbrida mista em deformações -EAS- (Hexa8-E3), apresentou ser mais versátil e flexível quando comparado com o modelo de elementos de formulação em deslocamentos (Hexa8).

Na geometria de duto enterrado atravessando uma encosta foram realizadas análises considerando a variação da magnitude do coeficiente de atrito. Os valores considerados foram de $\mu=0.1$, de $\mu=0.3$ e de $\mu=0.6$. Nestas análises verificaram-se diferentes deslocamentos nos nós de contato em função da variação do valor do coeficiente de atrito para $\mu=0.1$ e $\mu=0.3$, onde se conferiu uma diferença nos deslocamentos até de 15.06 mm. Isto mostra a importância de definir um coeficiente de atrito que melhor representa-se o atrito dos materiais envolvidos, para ser utilizado na análise numérica. Para este caso mesma geometria a mudança de $\mu=0.3$ para $\mu=0.6$ não representou uma variação significativa nos deslocamentos.

A hipótese simplificadora adotada de representar o solo como material elástico considera-se representativa para o caso analisado, uma das razões é o interesse principal voltado ao comportamento do duto e da interação solo-duto representada pelo problema de contato com atrito, através dos parâmetros de penalidade e do coeficiente de atrito. Com o intuito de confirmar esta representatividade do modelo do solo, as tensões principais nos elementos do solo foram inseridas no critério de ruptura Mohr-Coulomb em 3D.

Nas análises realizadas verificou-se que a pressão interna induz o surgimento de tensões longitudinais no duto devido ao efeito de *Poisson*. Essa tensão surge quando o duto está restringido nas extremidades e/ou pelo atrito que surge na interação entre o solo e o duto ao longo da seção transversal. A geometria é um fator atenuante no surgimento/concentração de tensões.

A implementação de um algoritmo para a adaptação automática para a seleção dos parâmetros de penalidade normal e tangencial seria de grande valia na continuidade do trabalho.

Uma pesquisa com o modelo numérico aliado ao modelo experimental para a estimativa dos coeficientes de atrito que melhor represente o atrito entre os materiais envolvidos (solo e duto) sem dúvida seria uma valiosa contribuição para

a linha de pesquisa de *Estudos do Comportamento de Dutos Enterrados* que vem sendo desenvolvida no DEC/PUC-Rio.

Para um estudo mais a detalhe do solo é necessário utilizar um modelo elasto-plástico que seja calibrado com resultados obtidos em ensaios de laboratório.

A geração da malha automática torna-se necessária, uma vez que, os modelos para a simulação, compreendem muitos nós e elementos, tornando a malha de elementos finitos muito complexa.

O CARAT (Computer Aided Research Analysis Tool - Universitat Stuttgart) é uma ferramenta potencialmente poderosa e onde podem ser implementados modelos mais específicos para o problema de interação solo-duto.

Uma análise alternativa pode considerar elementos de casca para o duto e elementos sólidos para o solo. A influência do efeito da variação de temperatura (no duto) e de recalques do solo são efeitos que devem ser levados em conta da análise de interação solo-duto também.