

8 Conclusões

É importante ressaltar que as análises simplificadas ou elásticas lineares dos dutos enterrados apresentam respostas conservadoras, pois se verifica que a resposta não-linear com a presença de contornos absorventes elimina o reflexo das ondas, o que é percebido na diminuição dos deslocamentos. Ou seja, desprezar esses efeitos torna o projeto conservador, podendo inclusive modificar totalmente o problema analisado.

Apresentam-se as principais conclusões obtidas através dos exemplos apresentados. Focaliza-se a obtenção de uma metodologia para análise dinâmica de dutos enterrados, que utiliza técnicas de análise não-linear computacionalmente eficientes e suficientemente aproximadas para a solução do problema.

Os exemplos apresentados no capítulo 7 são avaliados com dados retirados de dutos existentes, assim como as propriedades do solo. De fato, no desenvolvimento deste trabalho, mostra-se a forte influência dos parâmetros geométricos e mecânicos no comportamento do duto e, especialmente, na interação entre solo e duto. Valores irrealistas das propriedades do solo tornam a solução inexistente.

A metodologia apresentada é iniciada a partir de uma análise dinâmica 2D unicamente para o solo, usando um modelo elástico-linear. Os resultados são satisfatórios, sendo esse modelo a base para este trabalho. Tais valores são verificados a partir de cálculos analíticos (Cuellar, 1974).

Com o modelo validado no exemplo 7.1, a etapa seguinte é incluir o Modelo Linear Equivalente e na seqüência incorporar contornos absorventes na malha a analisar. As respostas dos exemplos 7.3 e 7.4 são verificadas com ajuda do programa QUAKE. Com a observação dos resultados, conclui-se que a análise com contornos absorventes apresenta deslocamentos menores.

A partir do exemplo 7.5, são incluídos os elementos de viga de três nós para representar o duto enterrado considerado nos problemas subsequentes. A

primeira verificação relativa aos deslocamentos é que a incorporação do duto no sistema traz uma diminuição dos mesmos.

O incremento de diâmetro do duto de 500 mm para 600 mm apresentado nos exemplos 7.6 e 7.7 acarreta pequenos incrementos em termos de deslocamentos, enquanto que, para as tensões, os incrementos são consideráveis.

Quanto ao Modelo Linear Equivalente adotado para simular o comportamento dinâmico do solo, pode-se afirmar que é de fácil uso, devido à simplicidade de implementação. Quando comparado aos modelos elasto-plásticos dinâmicos, esse modelo disponibiliza curvas de redução de módulo cisalhante G e amortecimento. O Modelo Linear Equivalente tem sido usado por mais de trinta anos, obtendo bons resultados em diversas situações de previsão do comportamento do solo.

De acordo com Bray et al. (1995), a incorporação do Modelo Linear Equivalente somente deve ser empregado para movimentos com aceleração máxima de 0,35g. Conforme informações da literatura, o Modelo Linear Equivalente não produz resultados confiáveis para situações de aceleração máxima de 0,4g. Atendendo à observação anterior, os registros sísmicos adotados neste trabalho não ultrapassam tais valores: acelerograma da figura 7.9 com aceleração de pico de 0,30g e sismo ocorrido no Pisco-Perú 2007 (figura 7.18) com acelerações de pico de 0,35g e 0,23g.

Os históricos de aceleração apresentados nas figuras 7.9 e 7.18 são registrados com incrementos de tempo de 0,02 e 0,01 segundos, respectivamente. Esses incrementos de tempo são adotados na prática para registros sísmicos, a fim de facilitar os cálculos de integração no tempo e garantir a estabilidade da solução.

O comportamento não-linear do duto é solicitado quando uma combinação de forças (pressão interna, cargas externas e outras) e deformações origina tensões maiores que a tensão de escoamento inicial do material. Esse comportamento não-linear requer um procedimento especial para a avaliação dos incrementos de tensão. Neste trabalho utiliza-se o método implícito de Euler, também conhecido como Backward Euler.

A implementação computacional dessa formulação, utilizando elementos de viga com três nós, é bastante eficiente. Atesta-se também o bom comportamento das funções que interpolam os deslocamentos.

A solução da equação não-linear do sistema acoplado solo-duto através do procedimento incremental iterativo proposto por Newton-Raphson apresenta bons resultados, mesmo com poucas iterações numéricas.

A geração da malha de elementos finitos usada nas análises levam em conta o critério de controle do tamanho de elementos proposto por Kuhlemeyer e Lysmer (1973). As ondas tipo P e S têm frequências entre 5 e 10 Hertz e as velocidades avaliadas para os materiais dos exemplos variam entre 275 e 175 m/s. Isso permite o uso de elementos com tamanho máximo de 2,75 m.

A utilização de dutos tipo API-L5 melhora de forma significativa o comportamento estrutural dos dutos e reduz significativamente o peso dos mesmos. Por outro lado, as grandes tensões que suportam requer a proteção dos pontos frágeis (soldas). Verifica-se que as tensões residuais, além de outros problemas, como transporte defeituoso e mau acabamento, expõem esses pontos a potenciais falhas, conforme apresentado nos exemplos.

A metodologia apresentada nesta tese permite avaliar o comportamento de dutos nos pontos frágeis, incorporando no modelo as tensões residuais que, por acaso, apareçam nos mesmos. É importante ressaltar que a desconsideração desses efeitos pode resultar em um projeto com idéia de segurança maior que a verdadeira. Conseqüentemente, as faixas de pressão interna às quais os dutos são submetidos podem ser faixas que o levem à ruína, como ocorre no exemplo 7.9.

Nesse contexto, propõe-se uma metodologia consistente aproximada para avaliação do comportamento dinâmico de dutos enterrados, a ser aplicado levando em conta o emprego do método dos elementos finitos como técnica de discretização do sistema estrutural, além de usar elementos tipo viga, de três nós, para modelar o duto e elementos bidimensionais para o solo. O comportamento dinâmico deste é representado pelo Modelo Linear Equivalente. A interação solo-duto é modelada através de um sistema que integra os elementos viga-duto com elementos de interface e do solo. A solução faz uso do método de Newton-Raphson e algoritmos de Newmark, conjuntamente.

Para prosseguimento dos estudos, recomenda-se:

- A inclusão de efeitos introduzidos pelas deformações por cisalhamento, temperatura e enrugamento da seção na representação

do elemento viga-duto e avaliação de sua influência na resposta do duto enterrado;

- O uso de modelos elasto-plásticos com encruamento cinemático para modelar o comportamento dinâmico do solo;
- A consideração da presença do fluido no esqueleto sólido para realização de uma análise bi-fásica e incorporação dos efeitos de liquefação;
- Otimização do processo de inversão da matriz de rigidez global do sistema.