

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Problema

Dutos enterrados de longas extensões são largamente empregados no transporte de óleo, gás natural, entre outros produtos. Ao contrário dos dutos aéreos, a análise estrutural, projeto e avaliação de risco nos dutos enterrados devem considerar a interação recíproca que existe entre o duto flexível e o solo circunvizinho. Esta interação pode ser considerada pelo efeito das cargas de serviço, tais como a expansão do duto devido à temperatura e à pressão interna, as cargas de origem geotécnica tais como recalque da superfície do terreno, construções de aterros, variação do nível freático, ocorrência de sismos, empolamento devido a congelamento, além da ação de cargas externas tais como cargas de tráfego ou funcionamento de máquinas.

Para avaliar o problema de interação solo-duto, para o caso de recalque do solo, uma série de fatores deve ser levada em conta: a resposta mecânica do solo circunvizinho ao duto, o comportamento mecânico do duto, a resposta mecânica da interface solo-estrutura, a geometria e a orientação do duto em relação ao recalque do solo, as características gerais do terreno onde o duto é localizado.

Para os dutos enterrados cobrindo longas distâncias é necessário fazer as devidas considerações para as prováveis variações e incertezas que são associadas com a distribuição espacial das propriedades do solo.

Uma grande variedade de procedimentos analíticos e computacionais pode ser aplicada na análise do problema de interação solo-duto, desde modelos simplificados do comportamento do solo que representam a resposta do solo em termos de elementos discretos unidimensionais de mola, a modelos mais complexos que representam uma resposta contínua em três dimensões do solo. Considerações similares aplicam-se ao modelo da resposta estrutural do duto. Em abordagens elementares, o duto é modelado como uma viga flexível que possui rigidez de flexão, axial, de cisalhamento e de torção. Em abordagens mais

avançadas, o duto é modelado como uma casca cilíndrica que possui uma relação tensão-deformação não-linear.

Um aspecto importante que deve ser considerado no estudo de dutos enterrados é o tratamento da interface solo-duto. A modelagem da estrutura considerando o fenômeno de atrito proveniente do contato entre o duto e o solo circunvizinho torna-se necessária. Alguns modelos de elementos finitos desenvolvidos adotam que o solo e o duto são solidários durante a deformação¹ enquanto que outros modelos adotam que pode existir uma separação entre o solo e o duto após a deformação^{2,3,4}.

1.2 Motivação

O sistema de dutos é o meio mais seguro e econômico de transporte e contribui para aumentar a segurança nas estradas e diminuir a poluição causada pelo tráfego pesado das carretas. Portanto, investir na ampliação, modernização e na confiabilidade da malha dutoviária brasileira é fundamental para atender às necessidades e exigências cada vez maiores da população. Entre os dutos que dão suporte a setores de grande importância para o país destacam-se:

- a) na indústria petrolífera, com atividades de exploração, refino e transporte de petróleo e seus derivados: os oleodutos da PETROBRAS: Caxias-Santa Cruz-Volta Redonda, Caxias-Angra dos Reis, Paraná-Santa Catarina, Araucária-Paranaguá, São Sebastião-Paulínea, Rio-Belo Horizonte, Sergipe-Alagoas, Macaé-Caxias, Vale do Paraíba-Utinga, Suzano-Guarulhos, Estreito-Guamaré, Serraria-Estreito, Urucu-Coari e outros.
- b) no setor energético, especialmente com as usinas nucleares de Angra I e II, os dutos para abastecimento de água e gás: tubulações enterradas das Usinas Nucleares ANGRA I e II e das Usinas Termoelétricas a Gás de Uruguaiana (CONSÓRCIO PROMON-MPE-EBE) e Cuiabá (ENRON).
- c) gasodutos de Transporte Sergipe-Alagoas, Macaé-Caxias, Sergipe-Bahia, Furado- Robalo, do Nordeste, Rio-São Paulo, Tabuleiro dos Martins-Salgema, Urucu-Coari, Guamaré-Fortaleza

(PETROBRAS), Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG) e Gasodutos Urbanos de Ponta Grossa (COMPAGAS), Campo Largo (COMPAGAS), Araucária e Curitiba (COMPAGAS), Tijucas (SCGAS), Canoas (SULGAS), Gravataí (SULGAS), Itaboraí (CEG), Barra Mansa (CEG), Campos (CEG), São Paulo (COMGAS) e outros.

A produção de petróleo e o consumo de derivados estão crescendo cada vez mais e é preciso que o cuidado com o transporte desses produtos acompanhe esse crescimento.

A construção de termelétricas por todo o território nacional é a principal alternativa para minimizar o déficit de energia elétrica. Isto representaria uma maior participação do gás na matriz energética brasileira e, conseqüentemente, maior consumo de gás transportado por novos gasodutos.

Devido à sua importância econômica e ambiental, e aos riscos envolvidos com o dano de tais dutos, o objeto principal desta pesquisa é o estudo do comportamento de dutos enterrados considerando efeitos de interação solo-estrutura.

Nos sistemas mencionados são as atividades de inspeção e manutenção de grande relevância visto que a interrupção de uma linha pode ocasionar prejuízos elevados. Em casos extremos a ruptura total ou parcial de dutos pode levar a graves acidentes de trabalho ou ambientais. Destaca-se ainda que alguns dos sistemas de dutos de petróleo, bem como os da Usina de Angra I são, dado o seu tempo de operação, fortes candidatos a apresentarem defeitos por corrosão e dano do material. Assim, atualmente um dos desafios a ser superado é aumentar a vida útil da malha de dutos existentes (40% dos oleodutos da Petrobrás).

1.3 Justificativa

A pesquisa do comportamento de dutos enterrados é importante para o avanço dos conhecimentos básicos do problema, principalmente nos aspectos envolvendo efeitos de interação solo-duto, flambagem, atrito, desgaste, grandes deslocamentos (deformações), enrugamento e corrosão no comportamento mecânico da estrutura, tendo, portanto grande relevância científica.

Tendo em vista os significativos investimentos que o país tem realizado e pretende realizar nos próximos anos na construção de extensas dutovias para transporte de óleo e gás entre eles o Gasoduto Bolívia-Brasil, empreendimento destinado ao transporte de gás natural proveniente da Bolívia até os Estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, totalizando cerca de 3.000 km de extensão. No Mato Grosso do Sul sua extensão será de 702 km, em sua maior parte próxima à linha da rodovia BR 262, que liga o município de Corumbá ao de Três Lagoas. Tendo em vista os acidentes envolvendo vazamentos em dutos enterrados (na baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, em janeiro de 2000; na Refinaria de Araucária, no Paraná, em julho de 2000; na Serra do Mar, no Paraná, em 2001 e 2008), o estudo também se justifica sob os pontos de vista de interesse social, econômico e de conservação ambiental.

1.4 Objetivo

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para o estudo do comportamento estrutural de dutos enterrados com base no método dos elementos finitos e através da formulação matemática do problema de contato com atrito. Neste estudo são considerados os efeitos de comportamento não linear dos materiais envolvidos, a presença de grandes deslocamentos e grandes deformações e a modelagem do contato considerando o fenômeno de atrito entre o duto e o solo circunvizinho para representar a interação solo-estrutura.

1.5. Estrutura da Tese

A tese é compreendida pelos capítulos especificados a seguir:

Capítulo 2: Considerações para o *Projeto Estrutural de Dutos enterrados*; apresenta os aspectos considerados no projeto e análise de dutos enterrados especificados em códigos e normas.

Capítulo 3: Modelos de Interação Solo-Duto. São apresentados modelos propostos na literatura internacional^{6,7,8,9,10,12,13,} para a análise de problemas de

interação solo-duto. Também são apresentados modelos propostos em pesquisas realizadas pela PUC-Rio^{11,14,15,16,17} e em trabalhos desenvolvidos em parceria entre a Universidade Federal do Paraná e a PUC-Rio como parte do projeto: *Análise do Comportamento Estrutural e Geotécnico de Dutos Enterrados* coordenado pela PUC-Rio com colaboração da UFPR^{16,17} e da UENF.

Capítulo 4: Modelos para o Problema de Contato. Neste capítulo são apresentados modelos de contato da literatura. O modelo proposto para o problema de contato é apresentado

Capítulo 5: Formulação do Problema de Contato com Atrito. Neste capítulo apresentam-se: a formulação contínua e o procedimento utilizado para a solução do problema de contato com atrito -método da Penalidade- adotado para a solução deste problema e a sua implementação em elementos finitos.

Capítulo 6: Aplicações: São apresentadas exemplos da literatura com intuito de verificar a adequação do método proposto para a solução do problema de contato com atrito. Finalmente, aplica-se a metodologia à análise de dutos enterrados para a investigação dos efeitos da interação solo-duto.

Capítulo 7: Conclusões e Sugestões: Elaboram-se neste capítulo as principais questões levantadas pelo presente estudo e as suas conclusões

Referências Bibliográficas.