

1 Introdução

1.1 Tubulações enterradas

A segurança de tubulações enterradas tem sido muito pesquisada nos últimos anos devido ao grande risco de dano ocasionado por deslocamentos e deformações do solo e/ou por propagação de ondas sísmicas.

As propriedades dos solos sofrem grandes modificações quando são submetidos a solicitações dinâmicas. Os modelos constitutivos que reproduzem adequadamente o comportamento dos solos em situações estáticas tornam-se incapazes de prever como evoluem as tensões e as deformações quando as cargas aplicadas são variáveis no tempo. Por outro lado, as solicitações dinâmicas são muito mais freqüentes que as estáticas na natureza. As situações mais críticas acontecem durante terremotos, onde os solos sofrem grandes deformações que modificam suas características.

Os modelos constitutivos desenvolvidos para analisar esse tipo de problema no solo não são simples.

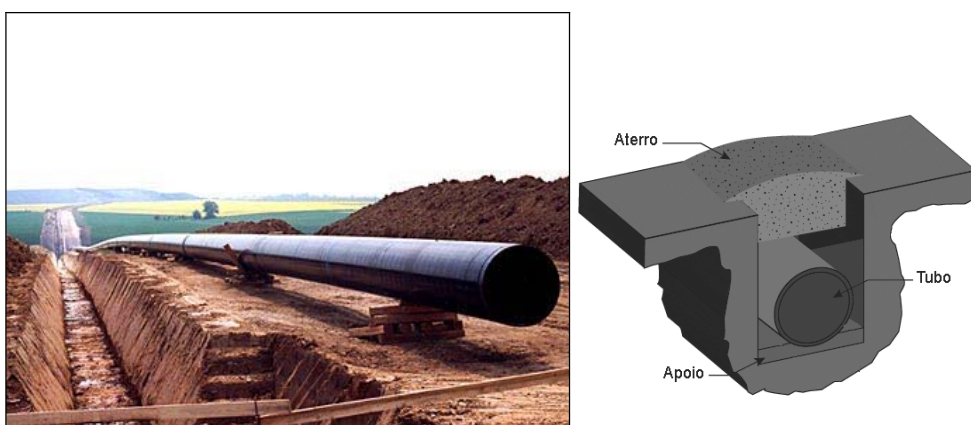


Figura 1.1 – Esquema de tubulação enterrada

No caso de dutos, a hipótese de comportamento linear pode levar a resultados errôneos que mascaram a resposta real da estrutura e dificultam uma determinação precisa da sua segurança. Por essa razão, métodos de análises que incorporem os efeitos não-lineares e dinâmicos são necessários ao projeto.

Na prática, a análise é realizada de acordo a os critérios de projeto em cada caso, não havendo um único procedimento adotado pelos engenheiros. Em particular, as normas de projeto sísmico não contemplam o projeto de sistemas de dutos enterrados.

1.2 Transporte de gás natural

Um dos aspectos que mais caracteriza o gás natural é a possibilidade de seu estado físico ser adaptado às condições de transporte desde a zona onde é produzido até a região onde será utilizado, freqüentemente distantes uma da outra.

Destacam-se as três seguintes alternativas principais:

a) Sob a forma liquefeita em navios criogênicos.

O transporte de gás natural liquefeito (GNL), à temperatura de -162°C negativos, em navios criogênicos, só costuma ser econômico para grandes volumes e distâncias. É usado onde não há a possibilidade de adotar outra alternativa como, por exemplo, nas transferências do Sudeste da Ásia e da Austrália para o Japão, ou onde não havia alternativa na época em que os sistemas foram implantados, como por exemplo da Argélia para a França e Espanha. Os navios utilizados nesse transporte são da ordem de 100 mil m^3 de capacidade.

b) Sob a forma de compostos derivados líquidos ou sólidos.

O transporte do gás natural sob a forma de compostos derivados é, na maior parte das vezes, a forma mais econômica, uma vez que ele é transformado em produtos líquidos ou sólidos que têm custo de transporte mais baixo.

c) Gasodutos.

Gasoduto é uma tubulação para conduzir o gás natural que nele é introduzido sob pressão por meio de compressores. Nos Estados Unidos, por exemplo, existem hoje cerca de 500 mil km de dutos, atendendo a quase 50 milhões de clientes.

Por força do fluxo, há uma perda de energia por atrito, e a pressão vai caindo ao longo da tubulação, sendo necessárias estações de compressão ao longo da linha para elevar a pressão e permitir a continuidade do fluxo do produto.

Nos dutos de transporte de longa distância, as pressões usuais podem atingir de 9 a 12 MPa logo após a estação de compressão, caindo, ao longo do duto, até cerca de 3 a 4 MPa, fazendo-se necessária uma outra estação de compressão. Esse ciclo pode se repetir várias vezes, permitindo atingir distâncias praticamente ilimitadas.

Como exemplo, um gasoduto de 4 mil km leva mais de 200 milhões de metros cúbicos por dia de gás natural desde a Rússia, na região dos Montes Urais, até o centro da Alemanha Ocidental, a custos econômicos.

Nas redes de distribuição para consumo urbano, visando à segurança das comunidades, a pressão é reduzida para 0,5 a 0,6 MPa nos ramais.

O espaçamento entre as estações de compressão resulta de avaliações econômicas, mas varia na faixa de 150 a 600 km. Frequentemente, adota-se um diâmetro grande para o fluxo inicial previsto, com um espaçamento maior das estações de compressão. À medida que o volume a transportar cresce com o aumento da demanda, introduzem-se estações intermediárias de compressão.

O custo de implantação do duto depende fundamentalmente da taxa de ocupação humana das áreas atravessadas, das dificuldades impostas pelo relevo, de eventuais obras especiais exigidas (travessias de grandes rios, de estradas etc.).

As tubulações têm se constituído na solução mais amplamente utilizada para o transporte do gás natural.

As figuras 1.2 e 1.3 apresentam as reservas reais de gás natural na América do Sul e as principais conexões dos gasodutos em operação, construção e estudo, respectivamente.

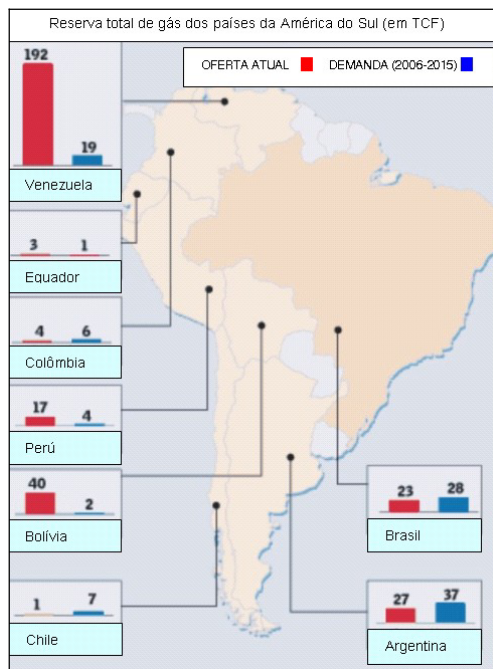


Figura 1.2 - Reservas de gás natural da América do Sul. (Gástech)

TCF (sigla em inglês para trilhão de pés cúbicos, o equivalente a 56 bilhões de metros cúbicos).



Figura 1.3 – Principais conexões dos gasodutos entre os países da América do sul.

(CTGÁS - Centro de Tecnologias do Gás).

1.3 Efeitos sísmicos

Os sismos ou tremores de terra constituem um fenômeno geológico que sempre aterrorizou as populações que vivem em determinadas zonas da Terra. Sismos são abalos naturais da crosta terrestre que ocorrem em um período de tempo restrito, em determinado local, e que se propagam em todas as direções (ondas sísmicas), dentro da crosta terrestre e em sua superfície, sempre que a energia elástica se liberta bruscamente em algum ponto (foco ou hipocentro).

Ao ponto situado na interseção da projeção vertical do hipocentro com a superfície terrestre dá-se o nome de epicentro, quase sempre rodeado pela região macrossísmica, que abrange todos os pontos onde o abalo possa ser sentido pelo homem.

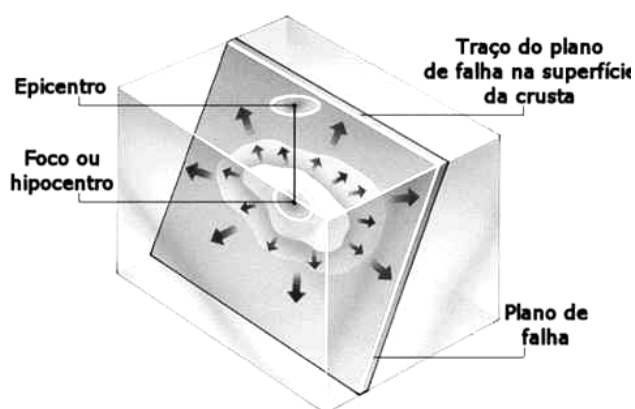


Figura 1.4 - Bloco - diagrama mostrando uma representação esquemática do foco ou hipocentro, plano de falha e epicentro.

O material da crosta terrestre, de acordo com as leis físicas, quando submetido à ação de forças (pressões e tensões) deforma-se até atingir o seu limite de elasticidade. Caso a ação da força prossiga, o material entra em ruptura, libertando instantaneamente toda a energia que havia acumulado durante a deformação elástica. Em termos gerais, é aquilo que se passa quando a litosfera fica submetida a tensões. Sob o efeito das tensões causadas, a maior parte das vezes, pelo movimento das placas tectônicas, a litosfera acumula energia.

Logo que, em certas regiões, o limite de elasticidade é atingido, dá-se uma ou várias rupturas que se traduzem por falhas. A energia bruscamente libertada ao longo dessas falhas origina os sismos. Se as tensões prosseguem, na mesma

região, a energia continua a acumular-se e a ruptura conseqüente far-se-á ao longo dos planos de falha já existentes. As forças de fricção entre os dois blocos de uma falha, bem como os deslocamentos dos blocos ao longo do plano de falha, não atuam nem se fazem sentir de maneira contínua e uniforme, mas por "pulsos" sucessivos, originando cada "pulso" um sismo, as chamadas réplicas. Numa dada região, os sismos repetem-se ao longo do plano de falha, que por sua vez é um plano de fraqueza na litosfera.

Compreende-se então porque é que os sismos se manifestam geralmente pelo abalo principal, logo no seu início. Só no momento em que as tensões levam as rochas rígidas dotadas de certa elasticidade ao "potencial de ruptura" é que a falha se produz, oferecendo um duplo caráter de violência e instantaneidade. Depois da ruptura inicial, verifica-se uma série de rupturas secundárias, as quais correspondem ao reajustamento progressivo das rochas fraturadas, originando sismos de fraca intensidade, as já referidas réplicas. Acontece que, por vezes, antes do abalo principal observam-se sismos de fraca intensidade, denominados abalos premonitórios.

Deve-se notar que os sismos só ocorrem em material rígido. Por conseqüência, os sismos produzem-se sempre na litosfera, jamais na astenosfera que é constituída por material plástico.

A teoria atualmente mais aceita para explicar os movimentos sísmicos foi formulada pelo cientista alemão Alfred Wegener (1912), conhecida como a teoria da deriva dos continentes, a qual admite que há 200 milhões de anos todos os continentes estavam unidos, formando uma só massa continental, denominada Pangea (figura 1.5). No início da era geológica do Mesozóico, esta massa universal começou a fraturar e dividir-se, formando as massas continentais que hoje existem. Os conhecimentos adquiridos pelos pesquisadores e cientistas durante as últimas décadas tendem a confirmar esta teoria da formação dos continentes.

A crosta terrestre está dividida em dezessete placas principais que se movimentam lateralmente umas em relação às outras, impulsionadas por correntes de convecção térmica que se originam no manto terrestre. Esses movimentos estão associados direta (sismos por subducção) ou indiretamente (sismos intraplaca) com a atividade sísmica do planeta.

a) Sismos de subducção

Estudos oceanográficos demonstram que no centro do Oceano Atlântico há uma cadeia montanhosa de aproximadamente 40.000 km de extensão, que se expande e ramifica, formada por material magmático proveniente do manto da Terra. Para compensar a saída desse material magmático é necessário que correntes descendentes mergulhem material da crosta, em movimentos de subducção (figura 1.7). As zonas onde ocorre esta perda de material são conhecidas como zonas de subducção. Os movimentos de subducção são acompanhados de grande liberação de energia, que se irradia sob forma de ondas de tensão, provocando tremores e, conforme a intensidade, terremotos.



Figura 1.5 - Continente universal Pangea.



Figura 1.6 - Distribuição geográfica das placas tectônicas da terra. Os números representam as velocidades em cm/ano entre as placas, e as setas, os sentidos do movimento. Teixeira, Toledo, Fairchild e Taioli (2000).

b) Sismos intraplacas

Representam aproximadamente 25% dos sismos ocorridos a nível mundial, e são caracterizados como de falhamento superficial. Ocorrem entre 5 e 20 km de profundidade, região onde se localizam as rochas de maior dureza e de maior capacidade de armazenamento de energia de deformação. Estes sismos estão indiretamente associados com o fenômeno da subducção, pois são causados pelas concentrações superficiais de tensões no interior das placas tectônicas, que por sua vez são geradas pelos movimentos de subducção. Por serem de pouca profundidade, produzem em geral danos significativos nas regiões mais próximas ao seu epicentro.

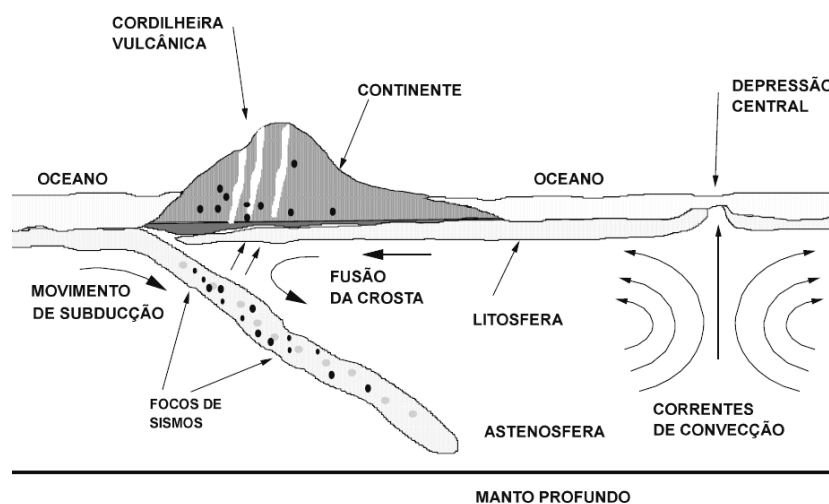


Figura 1.7 - Efeitos de subducção entre duas placas adjacentes.

1.3.1 Parâmetros sismológicos.

a) Magnitude

A magnitude é uma medida instrumental da importância do evento, relacionada com a energia sísmica liberada durante o processo de ruptura em uma falha. Ela é uma constante única e independente do local de observação. A escala de magnitude mais usual é a proposta por Richter em 1933, expressa por ML e conhecida como magnitude local.

b) Intensidade

A intensidade é uma medida subjetiva dos efeitos de um sismo, pois se refere ao grau de percepção do movimento em determinada região. Várias escalas têm sido propostas para medição da intensidade, tais como a escala Mercalli, Rossi y Forel, escala MSK, escala JMA, etc. A escala mais utilizada é chamada de Mercalli Modificada, usualmente expressa pela sigla MM.

c) Aceleração

A aceleração é o parâmetro principal de projeto e é definida como a máxima amplitude registrada em um acelerógrafo, para um determinado sismo. Este registro de acelerações, conhecido como acelerograma, mostra as acelerações produzidas no terreno em função do tempo, conforme figura 1.8.

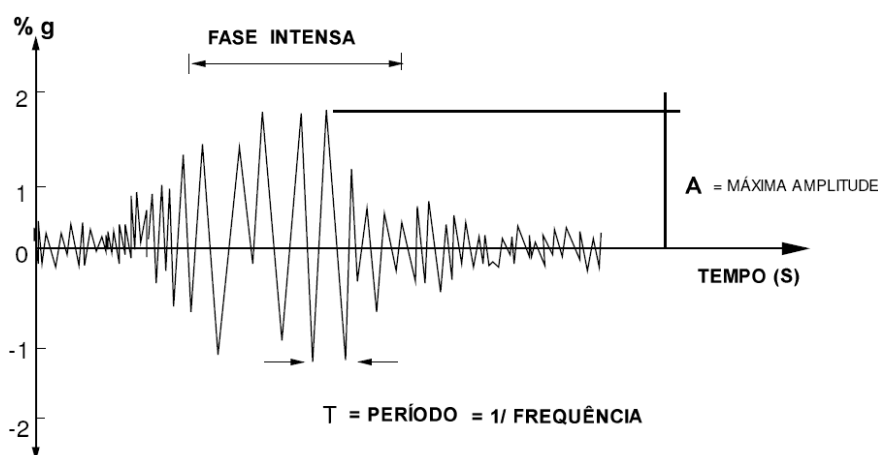


Figura 1.8 - Acelerograma e suas principais características.

d) Atenuação

Atenuação é definida como a variação na amplitude das ondas sísmicas, em consequência de sua transmissão (e perda de energia) através do interior e pela superfície da Terra. Muitas vezes é representada por expressões matemáticas que procuram relacionar a aceleração máxima do terreno A com a magnitude do sismo e as distâncias epicentral ou focal.

1.3.2 Ondas planas de tensão (elásticas)

As ondas sísmicas propagam-se através dos corpos por intermédio de movimentos ondulatórios, como qualquer onda, dependendo a sua propagação das características físico-químicas dos corpos atravessados. As ondas sísmicas classificam-se em dois tipos principais: as ondas que se geram nos focos sísmicos e se propagam no interior do globo, designadas ondas interiores, volumétricas ou profundas (ondas P e S), e as que são geradas com a chegada das ondas interiores à superfície terrestre, designadas por ondas superficiais (ondas L e R). No mesmo contexto referimos as ondas primárias, longitudinais, de compressão ou simplesmente ondas P, ondas transversais, de cisalhamento ou simplesmente ondas S, ondas de Love ou ondas L e ondas de Rayleigh ou ondas R.

As ondas sísmicas são detectadas e registradas nas estações sismográficas por aparelhos chamados sismógrafos. Os sismógrafos mais antigos consistiam, essencialmente, em um pêndulo (vertical ou horizontal) ao qual eram acoplados diversos mecanismos de amplificação, de amortecimento e de registro. Alguns desses sismógrafos ainda se encontram em pleno funcionamento. Os sismógrafos mais modernos são do tipo eletromagnético. Os registros efetuados por estes aparelhos são os sismogramas, cuja interpretação, reservada à especialistas, consiste no reconhecimento e na leitura dos tempos de chegada das ondas sísmicas, permitindo calcular a que distância se encontra o epicentro de um determinado sismo, a chamada distância epicentral. Deste modo, com os dados fornecidos por três estações sismográficas é possível determinar a localização exata do epicentro de um sismo.

Quando uma rocha se fratura devido a deformações da crosta, libera energia acumulada no material e dissipada principalmente sob forma de calor. A menor parte é irradiada para a superfície sob forma de ondas sísmicas que se propagam através dos materiais geológicos sólidos (ondas de tensão). Dois tipos de ondas de tensão podem ser identificados em excitações sísmicas: as ondas de corpo e as ondas de superfície (figura 1.9).

a) Ondas de corpo.

As ondas de corpo se classificam em ondas primárias (P) e em ondas secundárias (S). As ondas P se propagam na mesma direção

de vibração das partículas e as ondas S são as que fazem vibrar uma partícula na direção perpendicular a sua trajetória de propagação, sendo também conhecidas como ondas transversais ou de cisalhamento. Dependendo da direção de vibração da partícula são ainda denominadas SV (movimento contido no plano de propagação) ou SH (movimento normal ao plano de propagação).

b) Ondas de superfície.

As ondas de superfície se propagam na zona superficial da Terra e se manifestam com maior frequência em sismos pouco profundos. Os movimentos produzidos pelas ondas de superfície estão em geral restritos a profundidades inferiores a 30 km. As ondas de superfície podem ainda ser classificadas como:

- Ondas Love (L), que ocorrem em formações estratificadas, provocando movimentos similares aos da onda SH, fazendo vibrar partículas superficiais na direção perpendicular à direção de propagação da onda.
- Ondas Rayleigh (R), que produzem movimentos elípticos de partículas superficiais, contidos no plano de propagação da onda. Ondas R têm velocidade de propagação ligeiramente inferior às ondas SV, dependendo do valor do coeficiente de Poisson do material.

Como as ondas P se propagam com maior velocidade que as ondas S (daí serem conhecidas como ondas primárias), em casos de abalos sísmicos são as primeiras a serem registradas (figura 1.10). Perto do epicentro, as ondas P têm geralmente uma componente vertical maior, são de alta frequência (períodos baixos) e afetam de forma mais prejudicial às estruturas baixas e rígidas, com menores valores de períodos naturais. A distâncias maiores (superiores a 150 km, segundo Sauter 1989) prevalece nos registros sísmicos a ocorrência de ondas de superfície que, em geral, mais severamente afetam estruturas altas, de menor

rigidez e maiores valores de períodos naturais, propagando-se através de grandes distâncias em virtude da menor atenuação das ondas de superfície.

Em eventos de foco profundo prevalecem as ondas de corpo P e S, enquanto que em sismos de foco superficial predominam as ondas de superfície.

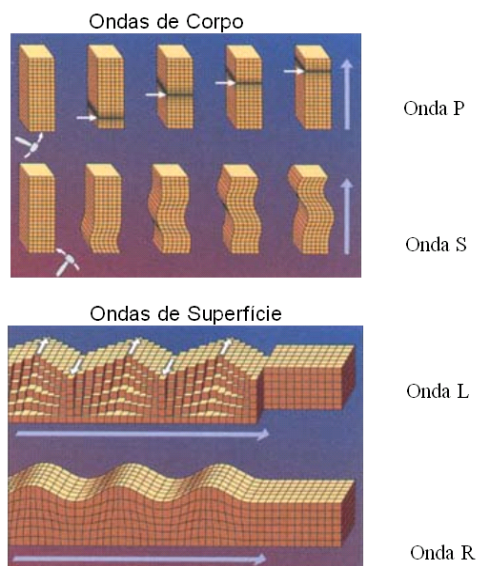


Figura 1.9 - Diferentes tipos de ondas planas de tensão em material sólido
Dourado J. C. (1984).

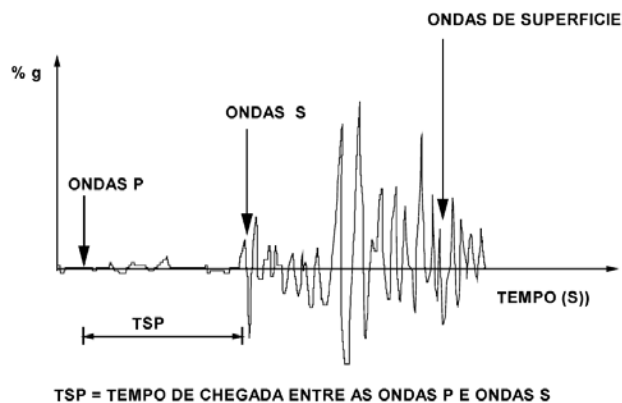


Figura 1.10 - Registro de ondas sísmicas.

1.4 Objetivos e organização do trabalho

A maior parte dos projetos que envolvem dutos enterrados considera exclusivamente um comportamento elástico-linear para o sistema duto-solo. Desconsiderar a possibilidade de plastificação do solo e o duto tem conduzido

freqüentemente a projetos muito conservadores, que se afastam do comportamento real do sistema.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de análise para um modelo numérico acoplado que permita levar em conta a interação duto-solo, para o estudo do comportamento de dutos enterrados sujeitos a cargas dinâmicas pelo método dos elementos finitos.

Emprega-se para tal uma formulação viga-duto para modelar a tubulação. Esse modelo se baseia no trabalho desenvolvido por Zhou & Murray (1996), o qual é apresentado na dissertação intitulada "Modelo numérico para o estudo do comportamento de dutos enterrados" (Otiniano, 2003) e uma formulação com elementos bidimensionais para modelar o solo, baseada na resposta sísmica do modelo Linear Equivalente proposto por Schnabel, Lysmer & Seed em 1972.

Com base neste modelo foi desenvolvido um sistema computacional em linguagem FORTRAN para análise de dutos enterrados. Com esta ferramenta, estuda-se o efeito da interação duto-solo no comportamento de dutos sujeitos a cargas dinâmicas, pressões internas e tensões residuais nas uniões soldadas.

O trabalho está formalmente organizado em 8 capítulos, com os seguintes conteúdos:

O capítulo 1 apresenta a importância dos dutos no transporte de gás natural e outros fluidos e faz uma breve descrição dos efeitos e parâmetros sísmicos. Os modelos para dutos enterrados, a mecânica do problema, pesquisas recentes na área de dutos enterrados e uma forma simplificada de projeto sísmico adotado em outros países são apresentados no capítulo 2.

A formulação de elementos finitos adotada para a análise de linhas de tubulação, levando em conta hipóteses fundamentais que atendem às relações deformação-deslocamento e relações constitutivas, é apresentada no capítulo 3. Por meio das equações de trabalho virtual são formuladas as equações finais da análise de dutos. Ao final do capítulo, apresenta-se a discretização por elementos finitos.

No capítulo 4 são discutidos os modelos constitutivos para o solo e apresentada a discretização dos elementos finitos para o mesmo. No capítulo seguinte, são descritos os tipos de elementos finitos de interface e os contornos artificiais empregados nesta pesquisa.

No capítulo 6 é apresentado o método de solução para o sistema de equações não-lineares. Estes métodos são incrementais e iterativos. Também se discute o critério de convergência.

O capítulo 7 apresenta e discute as simulações realizadas neste trabalho, que permitem formular as conclusões e sugestões obtidas no desenvolvimento desta tese, apresentadas no capítulo 8.