

2 Modelos para dutos enterrados

2.1 Mecânica do problema

O movimento da superfície do terreno durante um sismo é um dado de grande interesse na hora de projetar dutos enterrados. Hoje é difícil estimar com alguma precisão o movimento sísmico esperado; se pode unicamente adiantar algumas características típicas deste movimento. A figura 2.1 apresenta em detalhe o tipo de onda sísmica que atinge este tipo de estruturas assim como os diferentes tipos de materiais que compõem o modelo a analisar.

O primeiro passo lógico ao iniciar o estudo do movimento da superfície do terreno durante os sismos é analisar os movimentos ocorridos no passado e interpretá-los com teorias suficientemente aproximadas.

Existe um grande número de pesquisas relativas à caracterização do movimento sísmico da superfície do solo, trabalhos onde a partir dos dados básicos do sismo esperado tais como distância epicentral, profundidade focal, magnitude, intensidade entre outros permitem obter um movimento sísmico de cálculo.

Estes procedimentos, mais ou menos estabelecidos permitem conhecer o movimento do solo livre da presença do duto enterrado (movimento de campo livre) embora no projeto de dutos enterrados seja preciso estabelecer o comportamento do sistema solo-duto submetido a ações sísmicas já que a presença do duto modifica o movimento.

O mecanismo pelo qual a presença do duto enterrado influi na resposta no comportamento do solo e reciprocamente é conhecido como interação solo-duto. O mecanismo é complexo, motivo pelo qual é necessário recorrer a um grande número de hipóteses simplificadoras a fim de resolver o problema.

É freqüente analisar os dutos enterrados sem levar em conta o efeito de interação, isto porque o efeito da interação reduz os esforços que ocorrem nos dutos, o que recai num projeto conservador.

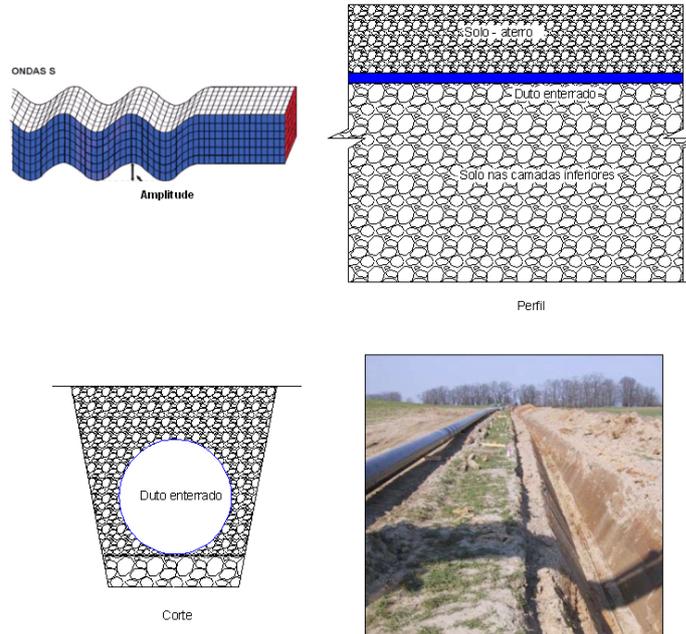


Figura 2.1 - Detalhe da ação das ondas de sismo no sistema duto-solo.

2.2 Definição do movimento

A figura 2.2 mostra como as ondas sísmicas se propagam no espaço. Uma forma de definir o movimento de um ponto durante um sismo consiste em três acelerogramas simultâneos segundo três direções ortogonais.

Os acelerogramas são leis de evolução temporal da aceleração que resultam complexas. A inspeção direta de um acelerograma permite deduzir diretamente qual foi a duração da fase forte do sismo o qual foi à máxima aceleração.

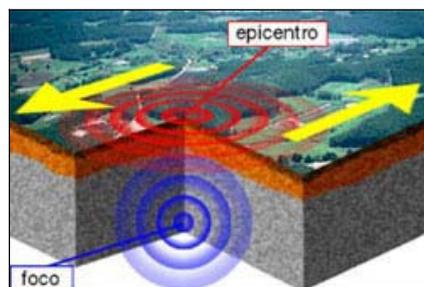


Figura 2.2 - Propagação das ondas no espaço.

Uma simplificação ao procedimento anterior é utilizar apenas um acelerograma relativo a um eixo horizontal, paralelo à superfície do solo como é apresentado na figura 2.3.

Adota-se ainda que o acelerograma numa outra direção horizontal é similar e que na direção vertical é de certa forma proporcional ao correspondente horizontal.

Os estudos de interação são mais simples quando consideramos uma das três componentes do movimento.

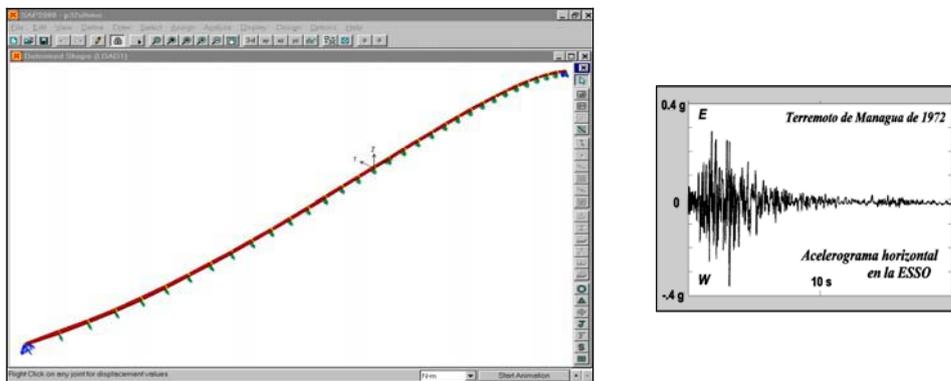


Figura 2.3 - Modelo duto-solo em elementos finitos submetidos ao carregamento do acelerograma horizontal.

Imaginemos o sistema solo - duto caracterizado por uma massa M , uma rigidez K e um amortecimento C para o sistema apresentado na figura 2.4.

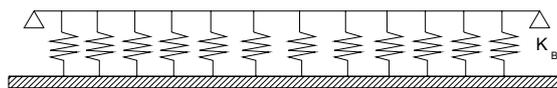


Figura 2.4 - Modelo simplificado de sistema duto-solo.

Quando um sismo desloca o sistema unicamente em uma direção horizontal é possível avaliar o deslocamento da massa M em função do acelerograma do sismo, do fato a seguinte equação básica da dinâmica permite escrever:

$$M(\ddot{x} + \ddot{u}(t)) + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (2.1)$$

Nesta equação, a variável x e suas derivadas em relação ao tempo \dot{x} e \ddot{x} descrevem, respectivamente, o deslocamento, a velocidade e aceleração da massa

M em relação ao terreno, a soma de \ddot{x} e \ddot{u} descreve a aceleração absoluta do sistema.

A equação 2.1 pode ser reescrita como:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{u}(t) \quad (2.2)$$

A dificuldade que apresenta a equação anterior é que a rigidez e forças internas dependem dos deslocamentos.

A solução desta equação diferencial não linear pode ser obtida de acordo com os algoritmos iterativos propostos por Newton-Raphson e integração numérica das equações em sucessivos intervalos de tempo segundo Newmark. Estes temas são tratados em maior detalhe no capítulo 6 deste trabalho.

2.3 Modelos numéricos de interação duto-solo

Há em geral três grandes grupos de modelos analíticos considerando propostas distintas.

Uma é a interação solo-duto, onde se propõe analisar a interação entre o duto e o solo com foco na resposta do solo; conseqüentemente modelos simples para o duto são empregados e modelos mais complexos para o solo. Citasse o modelo de Mohr-Coulomb como o modelo mais simples, o modelo de Lade Kim (1988), o modelo MIT-E3, desenvolvido por Whittle (1987) e Whittle (1991), considerando tanto o comportamento elástico não-linear, como também deformações irreversíveis nos ciclos de carregamento e descarregamento.

Cabe mencionar que também foram estudadas as formulações propostas por Zienkiewicz & Shiomi (1984), Zienkiewicz et al (2000) que consideram as equações de Biot (1956) para analisar a transmissão de ondas em meios porosos saturados.

Outra proposta é o modelo de interação duto-solo, neste tipo de análise tem-se um modelo mais completo para o duto, de modo a que se possam incluir não linearidades, e um modelo simples para o solo, sendo o mais freqüente o uso de molas com propriedades lineares para modelar o comportamento do solo nas proximidades do duto.

Finalmente, também podemos combinar as duas propostas anteriores, ou seja, considerar os dutos como elementos tipo viga ou ainda elementos de casca ou tubo e o solo, por sua vez, por elementos planos ou tridimensionais em modelos numéricos que representem de forma mais precisa o comportamento do solo.

2.4 Pesquisas na área de tubulações.

No âmbito local o desenvolvimento das pesquisas na área de tubulações e descrito a seguir.

No final das décadas passadas foram desenvolvidas na PUC-Rio duas dissertações na área de tubulações intituladas “**Avaliação dos Critérios Para Análise Espectral Sísmica de Sistemas de Tubulações**” Waldo Jim Castañaga Ojeda (1998) e “**Desenvolvimento de Espectros de Resposta para a Análise Estrutural Sísmica em Sistemas de Tubulações**” Marcelo Cerqueira Valverde (1998).

No primeiro trabalho são apresentadas avaliações de critérios e métodos empregados na análise e no projeto dos sistemas de tubulação nas usinas nucleares, dentro do método de análise modal-espectral. Foram tratados tópicos da interação entre o sistema de tubulação e a estrutura que o suporta mediante o uso de espectros acoplados. Foram avaliados parâmetros de esforços internos em trechos de um modelo de um sistema real de tubulações da usina nuclear brasileira, Angra 3. Os padrões foram obtidos por análises no tempo de cada modelo sob o acelerograma de projeto.

O segundo trabalho refere-se às pesquisas dos mecanismos de interação entre dois sistemas vitais nas usinas nucleares, ou seja, o sistema principal e o secundário. Estes mecanismos são avaliados por meio da sua influência nos espectros de resposta, em pontos da estrutura passíveis da existência de suportes nas linhas de tubulação (sistema secundário). Foram consideradas duas hipóteses. A primeira não considera a interação dos sistemas e a segunda avalia esta interação com a introdução de um suporte em cada ponto do sistema principal. As respostas estruturais foram obtidas por integração direta da equação de

movimento do sistema sujeito a dois acelerogramas simultâneos, nas direções horizontais e verticais.

Continuando com a pesquisa dos trabalhos anteriores, no ano 2000 foi apresentada na PUC-Rio a dissertação intitulada “**Localização Ótima de Suportes Estruturais em Linhas de Tubulações de Usinas Nucleares**” Nelly Piedad Rubio Rubio, trabalho que estabelece uma metodologia para a determinação da localização ótima de suportes em linhas de tubulação de centrais nucleares, atendendo a que as tensões atuantes nos elementos da linha de tubulação, devido aos vários carregamentos impostos, estejam dentro dos limites especificados no código da “American Society of Mechanical Engineers” e da “American National Standards Institute” e que os deslocamentos da linha de tubulação não excedam o valor do deslocamento máximo admissível. Empregou-se na modelagem dos tubos elementos de viga. A partir de uma análise preliminar, formulou-se o problema de otimização topológica com restrições de geometria, tensões e deslocamentos.

Seguidamente no ano 2001 foram apresentadas na PUC-RIO as dissertações intituladas “**Um estudo numérico e experimental para a avaliação da interação solo – duto**” Maria Marta de Castro Rosas e “**Análise de problemas tridimensionais solo-estrutura pelo método dos elementos finitos no domínio de Fourier**” Janaina Veiga. No primeiro trabalho diante a exploração e produção crescente de petróleo do tipo semi – submersíveis, estudo-se as regiões críticas onde ocorrem as maiores tensões, em um projeto de riser, ou seja, o trecho junto ao ponto de conexão na plataforma e o trecho junto ao piso marinho. Este trabalho apresenta um estudo da interação solo-duto de risers rígidos. Na primeira parte do trabalho são relatados os resultados de um modelo físico realizado no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), e, na segunda os resultados de análises numéricas que procuraram reproduzir os ensaios no modelo físico. São apresentadas também comparações entre os dois modelos. O segundo trabalho estuda problemas geotécnicos e de interação solo-estrutura utilizando o método dos elementos finitos acoplado com a transformada de Fourier. Pela aplicação da transformada de Fourier, as equações diferenciais que governam o problema elástico linear, com as correspondentes condições de contorno, são reescritas no plano de Fourier, permitindo que um problema de natureza tridimensional possa ser numericamente analisado por uma discretização bidimensional. Alguns

elementos de interface, com formulação publicada na literatura, foram também considerados na implementação computacional.

Continuando com a pesquisa e conscientes do que uma das formas mais comuns de danos presentes nos dutos é a corrosão foi desenvolvida no ano 2002 na PUC-Rio a dissertação intitulada “**Avaliação Numérica da Capacidade de Carga de Dutos Corroídos**” Joabson Lima Alves. Esse trabalho apresenta uma revisão dos métodos empíricos desenvolvidos utilizados para esta determinação. Entretanto estes métodos se mostram, em geral, bastantes conservadores nesta determinação. Assim, métodos alternativos têm sido desenvolvidos baseados no método dos elementos finitos. Este trabalho avalia a capacidade de carga de dutos corroídos submetidos a carregamentos combinados que tentam simular os que ocorrem no campo. Estes carregamentos são: pressão interna, momento fletor e cargas axiais. Carregamentos axiais são provenientes da variação de temperatura e do efeito Poisson existente nas extremidades dos dutos devido à pressão interna. Neste trabalho realizou-se a modelagem de dutos submetidos à carregamentos combinados, onde se tentou reproduzir ao máximo as condições de ensaio. Tomou-se como base ensaios experimentais e numéricos encontrados na literatura. Aspectos globais sobre a modelagem são detalhados.

No ano 2003 as pesquisas efetuadas na PUC-Rio na área de dutos enterrados e interação solo - duto foi apresentada na dissertação intitulada “**Modelo numérico para o estudo do comportamento de dutos enterrados**” Igor Otiniano Mejía, trabalho que propõe uma metodologia de análise numérica para dutos enterrados, considerando não-linearidades geométricas e não-linearidades de material baseada na formulação Lagrangeana Total. Empregando uma modelagem com base em uma discretização com elementos especiais de viga. As equações de equilíbrio são formuladas a partir do princípio dos trabalhos virtuais, segundo as componentes de tensão e deformação no elemento viga-duto, com emprego da técnica do Módulo Reduzido de Integração Direta (RMDI), na qual incorpora-se o comportamento plástico do material. Incorporam-se, nesta metodologia os efeitos de pressão interna constante no duto assim como a interação solo-duto através da modelagem do solo por meio de molas elasto-plásticas verticais e horizontais.

Seguidamente no ano 2004 a consideração de elementos de interface entre o solo e o duto, foi estudada na dissertação intitulada “**Análise não - linear da**

interação solo – duto em encostas empregando elementos de Interface”

Fernando Pereira Lazaro, trabalho desenvolvido em parceria entre a Universidade Federal do Paraná e a PUC-Rio. Este trabalho simula a interação do duto e do solo circunvizinho em encostas sujeitas a escorregamentos de taludes. Emprega o Método dos Elementos Finitos na análise do problema bidimensional, para simular o duto, o solo e a região circunvizinha ao duto. Na modelagem do duto emprega-se um elemento de viga; para o solo e para a região circunvizinha são utilizados elementos isoparamétricos planos. Adotam-se as hipóteses do Estado Plano de Deformação para representar o comportamento do solo e uma alteração na matriz constitutiva de acordo com Desai e Siriwardane (1984) para a região de interface. É considerado um modelo elástico, perfeitamente plástico para as propriedades físicas do solo e da região de interface enquanto para o duto o modelo adotado é linear elástico.

Continuando com a parceria entre a Universidade Federal do Paraná e a PUC-Rio no ano 2005 foi apresentada a dissertação intitulada “**Análise não linear via elementos finitos de um modelo de vigas para dutos enterrados**” Luiz Antonio Farani De Souza. Este trabalho apresenta um modelo numérico aplicando a técnica de elementos finitos para a análise não-linear de tensões e deformações de dutos enterrados. A formulação incremental do elemento viga-duto é desenvolvida a partir do princípio dos trabalhos virtuais, com base nas componentes do segundo tensor de tensão Piola-Kirchhoff e do tensor de deformação de Green-Lagrange, com o emprego da técnica do Módulo Reduzido por Integração Direta (RMDI). O elemento viga-duto é obtido, a partir de elementos especiais de viga bi e tridimensional. A descrição cinemática do elemento admite grandes deslocamentos, grandes rotações, mas pequenas deformações e se dá com base em uma Formulação Lagrangeana Total. Assume-se o modelo constitutivo elasto-plástico para o duto, com o escoamento segundo o critério de von Mises com endurecimento isotrópico. A interação entre o solo e o duto é feita através de um conjunto discreto de molas elásticas idealmente plásticas nas direções vertical, lateral e longitudinal, conectadas ao eixo do duto. Os efeitos da temperatura e pressão interna no duto são considerados.

Recentemente a Universidade Federal do Rio de Janeiro apresenta as pesquisas feitas na área de dutos submarinos no trabalho de tese intitulado “**Metodologia para análises e projeto de dutos submarinos submetidos a altas**

pressões e temperaturas via aplicação do método dos elementos finitos"

Carlos de Oliveira Cardoso – COPPE (2005). Este trabalho apresenta os avanços recentes na avaliação do comportamento estrutural de dutos aquecidos em especial de dutos submarinos. Para avaliar o comportamento estrutural de dutos submarinos aquecidos foram implementadas rotinas no programa AEEPECD que permitam tratar não linearidades físico - geométricas envolvidas durante o processo de flambagem termodinâmica, assim como o efeito acoplado momento-pressão e leis constitutivas para a interação solo-duto que permitam avaliar o efeito de valar escavadas no leito marinho.

A seguir são apresentadas brevemente algumas pesquisas internacionais na área específica de dutos enterrados considerando a interação solo-duto, sendo o solo modelado através de molas.

Dentre esses trabalhos, podem se destacar:

- Trautmann, O'Rourke & Kulhawy (1985) descrevem um estudo experimental do comportamento de dutos enterrados sujeitos a movimentos verticais do solo, com ênfase particular sobre os efeitos da densidade do solo e a da profundidade do duto.
- Zhou & Murray (1993) discutem o comportamento de dutos enterrados incluindo os efeitos de flambagem e enrugamento, quando estes são submetidos a grandes assentamentos geotécnicos impostos.
- Razaqpur & Wang (1995) apresentam um modelo para a análise da interação solo-duto através de um processo termo-mecânico, usando um modelo unidimensional simplificado para determinar o congelamento do solo. O duto é modelado por um elemento finito que o considera como uma viga sobre uma fundação de Winkler.
- Zhou & Murray (1996) apresentam duas técnicas (RMDI e ISPDR) de determinação das rigidezes e forças equilibradoras para modelos de dutos enterrados. Análises incluindo o amolecimento como resultado do efeito de flambagem local são discutidas.
- Ilmura (2004) apresenta três modelos mecânicos para estimar as tensões no duto sujeito a assentamento do solo. Os três modelos são

aplicáveis em: porções enterradas; porções expostas; e na interface entre as porções enterradas e expostas de dutos lineares. A formulação para o cálculo das tensões é derivada assumindo uma viga elástica sobre uma fundação elástica.

2.5 Procedimento simplificado para projeto sísmico de dutos enterrados

A seguir será apresentada em resumo uma análise conceitual do fenômeno de interação solo-duto, sob o qual se sustenta o procedimento de projeto sísmico usado atualmente nesse tipo de estrutura no Chile e em outros países.

Este procedimento baseia-se no trabalho de tese apresentado por Rodríguez, P. (2003) na Universidade do Chile, intitulada "Consideraciones para el diseño sísmico de tuberías enterradas".

- **Deformação Axial de Campo Livre**

Para estimar as deformações de campo livre induzidas no solo considera-se uma onda simples com uma forma constante. A deformação máxima do solo (tração ou compressão) na direção de propagação para ondas P ou R (V_m na direção da excitação) está definida pela equação (2.3).

$$\varepsilon_g = \frac{V_m}{C} \quad (2.3)$$

onde V_m é a velocidade horizontal máxima do solo e C a velocidade de propagação da onda sísmica.

Para o caso de ondas S, nas quais V_m é perpendicular à direção de propagação, pode-se mostrar que a maior deformação axial se origina para um ângulo de 45° entre o duto e a direção de propagação. Neste caso o valor da deformação é a indicada na equação (2.4).

$$\varepsilon_g = \frac{V_m}{2C} \quad (2.4)$$

- **Deformação de Flexão ou Curvatura de Campo Livre**

De forma similar, a curvatura máxima do solo, K_g , é a segunda derivada do deslocamento transversal com relação ao eixo longitudinal do duto é dada pela equação (2.5).

$$K_g = \frac{A_m}{C^2} \quad (2.5)$$

onde A_m é a aceleração máxima do solo perpendicular à direção de propagação da onda.

A deformação por flexão tem efeitos quantitativamente menores sobre o duto em comparação com a deformação axial; somente para dutos de grande diâmetro e frequências altas, a flexão origina esforços significativos.

- **Interação Solo-Duto**

Os danos em dutos enterrados durante sismos são devidos às forças e deformações impostas pela interação entre o solo e o duto. Para fins de análise, qualquer deformação arbitrária do solo pode ser decomposta em uma componente paralela ao eixo do duto e uma componente transversal ao eixo. Na direção transversal, a interação envolve deformações relativas e cargas tanto no plano vertical como no horizontal. No caso de movimento relativo do solo na direção vertical, deve-se distinguir entre o movimento acima e abaixo do duto, uma vez que as forças são diferentes em cada caso, como mostra a figura 2.5. Esta interação pode ser idealizada por molas equivalentes, as quais têm um comportamento perfeitamente elástico até alcançar a capacidade máxima do solo, a partir da qual se comporta perfeitamente plástico.

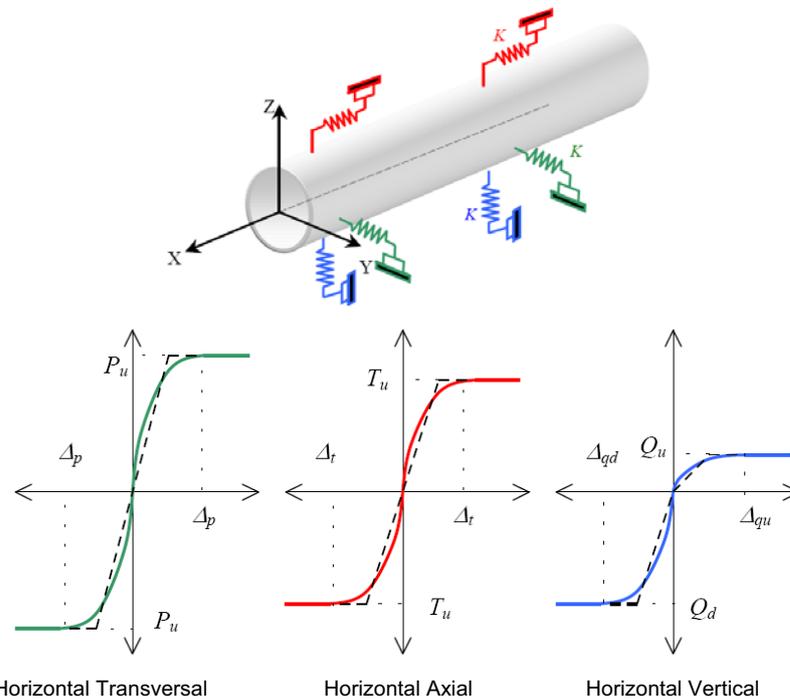


Figura 2.5 - Modelo elasto-plástico Idealizado para as forças de interação solo-duto nas três direções espaciais, ASCE (1984).

- **Forças de Interação em Dutos Enterrados**

As forças de interação para um duto imerso em um meio qualquer podem ser determinadas como mostra a figura 2.6. Pode-se estabelecer uma relação entre a força e a deformação. Com ajuda da determinação destas forças e a deformação associada pode-se modelar a interação do solo com o duto usando molas equivalentes.

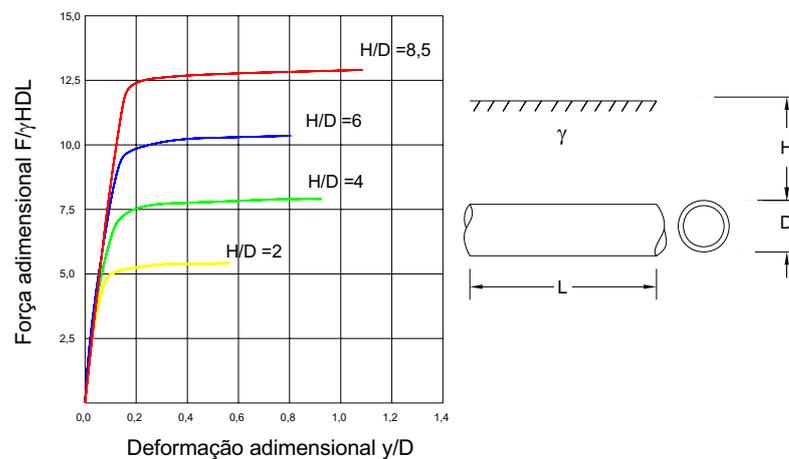


Figura 2.6 - Relação carga–deformação lateral na interface solo-duto para diferentes casos, O'Rourke (1999).

A American Society of Civil Engineering, ASCE (1984), propõe, para métodos de análises, modelos elasto-plásticos idealizados como aqueles mostrados na figura 2.5. Deve-se notar que, o modelo elasto-plástico é totalmente caracterizado por dois parâmetros; a resistência última T_u , P_u e Q_u em unidades de força por unidade de comprimento nas três direções e a máxima deformação elástica Δ_t , Δ_p , Δ_q , em unidades de comprimento.

As expressões que permitem caracterizar o modelo, ou seja, estimar T_u , P_u , Q_u , Δ_t , Δ_p e Δ_q , não foram incluídas neste trabalho. Estas são explicadas em detalhe por Rodríguez, P. (2003).

O coeficiente de mola equivalente do solo elástico K , em unidades de força por unidade de área, é a relação entre a resistência última e a metade da deformação elástica máxima, por exemplo, $2T_u/\Delta_t$ para a direção horizontal segundo o eixo do duto. É importante ressaltar, que esse coeficiente K é efetivo apenas para deslocamentos relativos menores que os valores máximos da deformação elástica Δ_t , Δ_p e Δ_q , sob os quais a resistência é constante.

O procedimento consiste em determinar a deformação axial máxima do duto considerando a deformação máxima do solo por propagação de ondas e a deformação máxima transmissível por atrito na interface solo-duto. Uma vez obtida a deformação do duto é possível determinar os esforços de tração e compressão, os quais são de igual magnitude, dada a natureza senoidal da onda sísmica modelada. Com as deformações e esforços de projeto verificam-se os distintos modos de falha descritos segundo o caso estudado.

A seguir descreve-se o procedimento passo a passo

a) Estimativa da deformação máxima do solo

Utiliza-se a fórmula

$$\varepsilon_g = \frac{V_m}{\alpha C} \quad (2.6)$$

Necessita-se conhecer V_m e C para o sismo de projeto. O sismo de projeto dependerá dos critérios adotados e da importância da tubulação. O valor α depende do tipo de deformação (axial ou giro) e do tipo de onda; Rodriguez (2003).

A velocidade máxima, V_m , é obtida a partir de um estudo de sismologia específica do sítio ou dos registros de sismos anteriores em caso de não se dispor desta informação.

A velocidade de propagação da onda sísmica, C , pode ser determinada por uma avaliação geofísica ou sismológica. Tanto as ondas de corpo como as superficiais podem afetar o projeto de tubulações enterradas. Para as ondas de corpo a velocidade de propagação com respeito à superfície se encontra na faixa de 2000 a 5000 m/s, O'Rourke e El Hmadi (1988), e a ALA (2001) recomendam o valor de 2000 m/s no caso de não se ter melhor informação. No caso de ondas superficiais, das quais as ondas R são as de interesse, a determinação da velocidade de propagação é complexa já que apresentam um comportamento disperso.

O valor para a velocidade de propagação de ondas R varia em geral entre 300 a 700 m/s.

É válido ressaltar que tanto as faixas como as recomendações mencionadas são de origem norte-americana considerando um material rochoso.

b) Determinação da deformação máxima transmissível na interface solo-duto.

Utiliza-se a equação (2.7):

$$\varepsilon_p = \frac{T_u L_s}{AE} \quad (2.7)$$

O parâmetro T_u corresponde à força máxima por unidade de comprimento que pode transmitir o solo para o duto.

O comprimento de onda, caso não se tenha melhor informação, pode ser assumido como 1000 m segundo as normas de projeto da ALA (2001).

c) Escolha da deformação axial de projeto

Escolhe-se simplesmente o menor dos valores entre a deformação máxima do solo e a deformação máxima transmissível na interface solo-duto. Com esta deformação pode-se avaliar os esforços e verificar os critérios de falha.

d) Determinação do esforço de corte e flexão em dutos de grande diâmetro

No caso em que o diâmetro do duto seja importante, deve-se verificar também os esforços de corte e de flexão. Um parâmetro para determinar a influência destes efeitos foi apresentado por Arias (1978).

A flexão se avalia segundo a curvatura obtida com a equação

$$K_g = \frac{A_m}{\alpha_x C^2} \quad (2.8)$$

e) Verificação dos critérios de falha

Os critérios de falha mudam significativamente de acordo com o tipo de duto, já que cada um apresenta características distintas de mecanismos de falha.

A seguir são citados alguns dos critérios mais comuns.

- Falha de tração
- Flambagem local
- Flambagem global

A figura 2.7 apresenta um esquema reduzido do procedimento simplificado para projeto sísmico de dutos enterrados.

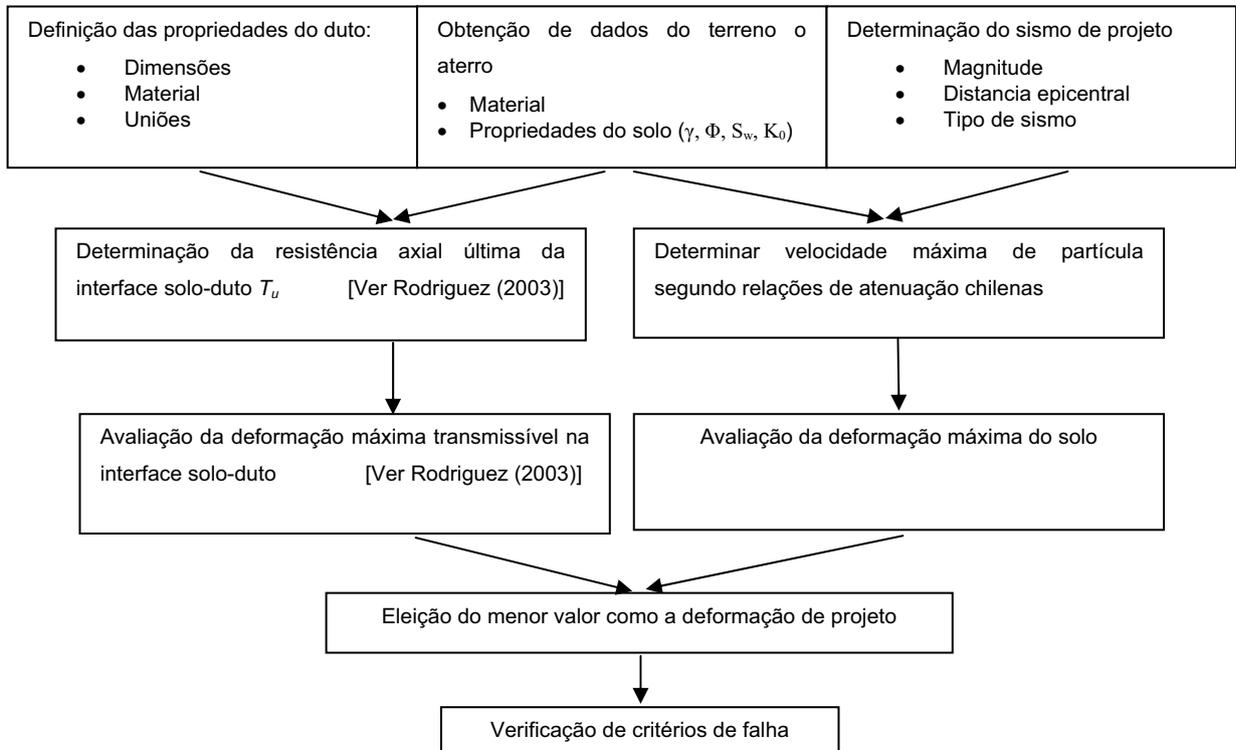


Figura 2.7 - Esquema do procedimento de projeto proposto para tubulações enterradas.
(Rodríguez, P. 2003).