

### 3 MODELOS DE INTERAÇÃO SOLO-DUTO

#### 3.1 Introdução

A análise de elementos finitos<sup>2,3,4</sup> do sistema de interação solo-estrutura, tal como duto enterrado é efetuada levando em conta que:

i) o solo pode ser representado por uma relação tensão-deformação linear ou não-linear; ii) diferentes tipos de elementos podem ser usados para representar o solo e o duto; iii) pode ser necessário permitir movimento entre o solo e o duto, requerendo assim o uso de elementos de interface ou um modelo que represente a interação solo-duto e iv) dutos muito flexíveis podem envolver grandes deslocamentos (deformações), para os quais a solução pode ser geometricamente não-linear.

Quando o comportamento tensão-deformação do solo é considerado não-linear a relação tensão-deformação deverá ser obtida de resultados de testes de laboratório em solos representativos. Foi proposto um método para descrever as características  $\sigma - \varepsilon$  do solo usando parâmetros hiperbólicos e apresentados valores típicos do solo que podem ser usados se os resultados de testes de laboratório não estão disponíveis<sup>5</sup>.

Quando se usa o método de elementos finitos para resolver problemas de engenharia geotécnica, as condições tensão-deformação não-lineares são geralmente obtidas pelo acréscimo de cargas por incrementos e pelo ajuste das propriedades do solo de acordo com a magnitude da deformação. A matriz de rigidez é inicialmente formada usando as propriedades iniciais do solo e da geometria do elemento. Como as cargas são acrescentadas, o solo se deforma e as propriedades do solo mudam, a matriz de rigidez tem que ser ajustada para se obter as novas propriedades do solo.

Se a geometria, propriedades e condições de carregamento forem simétricas, a metade do sistema solo-duto pode ser representada. As condições de contorno ao longo da linha de simetria têm que ser apropriadamente estabelecidas para

modelar o comportamento do sistema. A vantagem obtida da geometria reduz significativamente o tamanho do problema.

## **3.2 Modelos Propostos na Literatura**

### **3.2.1 Modelo de Selvadurai & Pang (1998)<sup>6</sup>**

Nesse modelo do sistema solo-duto, os autores visam estabelecer principalmente as influências da não-linearidade do solo no comportamento interativo de flexão do duto. A interação de flexão é induzida por um deslocamento descontínuo na base de uma linha do solo que contém o duto. Para o tratamento da interação solo-duto é utilizado o esquema de elementos finitos não-lineares que modela o duto como uma casca cilíndrica e o solo circunvizinho como um sólido elasto-plástico idealizado segundo o critério de escoamento de Drucker-Prager e a lei do fluxo associado. A interface entre o solo e o duto é modelada através do contato com aderência perfeita. Este modelo avalia o comportamento de flexão do duto e enfatiza a relação entre a resposta de flexão do duto e a rigidez relativa do sistema solo-duto.

### **3.2.2 Modelo de Zhou & Murray (1993, 1996)<sup>7,8,9</sup>**

O modelo foi desenvolvido com o intuito de realizar análises do comportamento de dutos enterrados que sofrem grandes recalques quando sujeitos a deslocamentos geotécnicos impostos, que são suficientemente grandes para provocar flambagem local severa e enrugamento se desenvolvam. O duto é representado como uma seqüência de elementos finitos retos de viga, suportado na parte inferior por molas de sustentação do solo e no topo por molas de elevação do solo. As propriedades do modelo de viga implicitamente incluem os efeitos de qualquer flambagem local ou enrugamento, que os modelos de casca prevêem que devem ocorrer no duto, e as molas do solo atuam somente em compressão e têm uma resposta elástica perfeitamente plástica. O perfil do recalque do solo é dividido em três zonas: a) zona de desgelo estável, onde nenhum recalque é especificado; b) zona de recalque, provocada pelo *desgelo*, onde as molas do solo

de suporte são deslocadas de um valor de recalque máximo e c) zona de transição sobre a qual os recalques são especificados de tal maneira de unir as outras duas zonas.

### 3.2.3

#### **Modelo de Rajani, Robertson & Morgenstern(1995)<sup>10</sup>**

A NOVA Corporation de Alberta, Canadá, iniciou um programa de pesquisa em colaboração com a Universidade de Alberta para o estudo da interação solo-duto sujeita movimentos devido a deslizamentos. Uma solução analítica foi desenvolvida para um melhor entendimento da influência das principais variáveis e que trace a seqüência de eventos que acontecem como o resultado de uma interação entre o duto e o solo circunvizinho quando o movimento de deslizamento aumenta gradualmente. Estes eventos podem ser resumidos como a seguir: a) um movimento de deslizamento inicial, tanto o duto enterrado, como o solo comporta-se elasticamente; b) enquanto o movimento de deslizamento aumenta, a resistência última passiva desenvolve-se em parte do solo médio circunvizinho enquanto que o duto permanece elástico; c) quando o movimento de deslizamento aumenta mais ainda, uma rótula plástica ou enrugamento pode começar a desenvolver-se no duto dependendo de suas características estruturais. A solução é baseada em um duto elástico enterrado em um solo elástico-perfeitamente plástico. A solução incorpora todas as variáveis que desempenham um papel importante na interação solo-duto.

### 3.2.4

#### **Modelo de Veiga, Romanel & Roehl (2000)<sup>11</sup>**

Pesquisa realizada pela PUC-Rio na área de dutos enterrados e interação solo-duto. O 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. Esta técnica foi empregada neste trabalho para certos problemas de engenharia, como dutovias, túneis e fundações tipo radier, onde a geometria e os parâmetros dos materiais mantêm-se constantes ao longo do eixo longitudinal do corpo, porém admitindo-se variações espaciais no carregamento imposto ao sistema, gerando, assim, um estado tridimensional de tensões. Alguns elementos de interface, com formulação publicada na literatura, foram também considerados na implementação computacional, visto que em problemas de interação solo-estrutura o comportamento do sistema é bastante influenciado pelas propriedades e características mecânicas do solo imediatamente vizinho à estrutura geotécnicos tridimensionais.

### **3.2.5 Modelo de Lim, Kim, Kim & Jang (2001)<sup>12</sup>**

Muitos modelos empíricos têm sido propostos para a magnitude da deformação permanente do solo. Existem três fatores dominantes nesta deformação: 1) a magnitude da deformação longitudinal permanente do solo; 2) o comprimento da zona de expansão; e 3) a variação da magnitude ao longo da zona de expansão, isto é, o padrão da deformação permanente do solo. A liquefação do solo que induz a expansão lateral é um fenômeno muito complexo.

O estudo desenvolvido por Lim, Kim M., Kim T. e Jang, enfoca a deformação longitudinal permanente do solo devida a liquefação que induz a expansão lateral e o comportamento do duto correspondente a essa deformação. Com base na teoria de viga sobre base elástica e no método de elementos finitos, o duto é considerado como uma viga e as forças de interação solo-duto são representadas como uma série de molas axiais do solo. Quando o carregamento externo excede a força de interação solo-duto, inicia-se o deslizamento entre solo circunvizinho e o duto. O comportamento de deslizamento na interface solo-duto foi modelado como um comportamento elasto-plástico. A força última de interação solo-duto é uma relação carga-deslocamento elástica perfeitamente plástica ou exponencial. As principais conclusões obtidas pelos autores, após as análises efetuadas neste estudo, foram: a) a deformação máxima do duto aumenta enquanto que o padrão da deformação permanente do solo e o comprimento da zona de espalhamento lateral aumentam; b) maior diâmetro maior deformação no

duto, devido ao aumento da força de interação solo-duto estimada para diâmetros de dutos padrão. Para o caso da espessura, maior espessura, diminui a deformação do duto; c) o comprimento crítico da zona de espalhamento lateral e a magnitude crítica da deformação permanente do solo, decrescem na flambagem local enquanto a taxa do diâmetro/espessura aumenta independente da profundidade do aterro (acima do duto).

### 3.2.6

#### **Modelo de Mandolini, Minutolo e Ruocco (2001)<sup>13</sup>**

Os autores apresentam o caso de um duto enterrado num solo que sofre deslizamento lento (monitorado nos últimos anos). O procedimento numérico implementado tem como finalidade: i) prever a evolução do fenômeno em termos da tensão induzida na tubulação pelo deslocamento do solo circunvizinho; ii) tornar disponível conjunto de dados do campo de deslocamentos, capaz de analisar o comportamento da tensão-deformação de estruturas similares mas em condições diferentes do caso avaliado. Nesse modelo o duto foi representado como uma viga e o solo através do método de equação integral de contorno considerando o contato solo-duto.

### 3.2.7

#### **Modelo de Mejia & Roehl (2003)<sup>14</sup>**

Pesquisa realizada pela PUC-Rio na área de dutos enterrados e interação solo-duto. Os autores apresentam uma metodologia de análise numérica para dutos enterrados usados no transporte de petróleo e gás, considerando não-linearidades geométricas e não-linearidades de material baseada na formulação Lagrangeana Total. Modelagem com base em uma discretização com elementos especiais de viga. Equações de equilíbrio formuladas a partir do princípio dos trabalhos virtuais, segundo as componentes de tensão e deformação no elemento viga-duto, com a utilização da técnica do Módulo Reduzido de Integração Direta (RMDI), na qual se incorporou o comportamento plástico do material. Esta técnica não considera os efeitos da flambagem local nas paredes do duto. Os efeitos considerados nessa metodologia: 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. As cargas distribuídas são consideradas como constantes no sistema global de eixos.

### 3.2.8

#### **Modelo de Souza, Guimarães & Roehl (2004)<sup>15</sup>**

Pesquisa realizada pela PUC-Rio dando continuidade ao estudo de dutos enterrados e interação solo-duto. Estudo experimental em modelos reduzidos do duto PE-3, construído na Baía de Guanabara em 2003. O duto PE-3 tem diâmetro de 18" e a sua principal característica é a sua geometria em zig-zag. Este duto transporta óleo combustível à temperatura de 80°C da Refinaria de Duque de Caxias aos terminais de navios na Ilha D'Água. Modelos reduzidos com semelhança física foram implementados para avaliar experimentalmente o comportamento do modelo variando-se o ângulo de zig-zag e o comprimento do duto. Os modelos foram submetidos à variação de temperatura, pressão interna e condições de apoio lateral e longitudinal, simulando as condições reais de trabalho do protótipo. Para cada comprimento (12m, 16m e 18m) e ângulo de zig-zag (5°, 10° e 15°) foram realizados ensaios com o modelo sem reação lateral do solo, com reação lateral simulando 1 metro de enterramento no protótipo, com reação lateral simulando 1 metro de enterramento e vão central livre, e com imperfeição horizontal. Foram realizados ainda 2 ensaios com um duto reto para efeito de comparação com o modelo zig-zag. Os resultados mostraram que a geometria em zig-zag minimiza os esforços gerados pela expansão térmica do duto.

### 3.2.9

#### **Modelo de Lazaro, Hecke, Roehl & Machado (2004)<sup>16</sup>**

Pesquisa desenvolvida 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 e da UENF. O objetivo do trabalho é a análise da interação solo-duto em encostas sujeitas a escorregamentos de taludes. O Método dos Elementos Finitos é utilizado para a discretização espacial (2D) e o Método das Diferenças Finitas para a discretização temporal. Na modelagem do duto emprega-se elemento de

viga e o para solo e a região circunvizinha são utilizados elementos isoparamétricos planos. Adotam-se as hipóteses de estado plano de deformação para representar o 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 do solo e da região de interface enquanto para o duto o modelo adotado é linear.

### 3.2.10

#### **Modelo de Souza, Hecke, Roehl & Machado (2005)<sup>17</sup>**

Pesquisa também desenvolvida 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 e da UENF. Os autores apresentam um modelo numérico em elementos finitos para análise não-linear de tensões e deformações de dutos enterrados usados no transporte de petróleo e gás. Atenção especial é dada a problemas de dutos enterrados em encostas que apresentam escorregamento. 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. Adota-se o modelo constitutivo elasto-plástico para o duto, com o escoamento segundo o critério de von Mises com endurecimento isotrópico. A interação solo-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. Um estudo do comportamento do duto é realizado através da análise de simulações numéricas, sujeito a condições de carregamentos externos e/ou internos e deslocamentos impostos.

### **3.2.11 Modelo de Coelho & Roehl (2007)<sup>18</sup>**

Pesquisa realizada pela PUC-Rio dando continuidade ao estudo de dutos enterrados e interação solo-duto. Análises de estabilidade de dutos enterrados submetidos a cargas térmicas são realizadas. As cargas térmicas são devidas ao aquecimento do fluido com o objetivo de facilitar o transporte dos óleos que são escoados nos dutos. O duto expande na direção transversal devido a estas cargas térmicas. Além da expansão na direção transversal o duto retrai na direção axial. Como o duto está restringido em suas extremidades e devido à expansão na direção transversal e retração na direção axial são causadas forças axiais de compressão no duto. Para a análise dos dutos submetidos à variação da carga térmica foram utilizados modelos teóricos e numéricos para o problema de flambagem vertical e lateral, considerando o duto perfeito e com imperfeição. Os modelos numéricos foram desenvolvidos utilizando o programa ABAQUS. Para estes modelos numéricos o duto foi considerado como uma viga e a o solo com elementos de interface e elementos de mola. Foi desenvolvido também um modelo de viga-casca onde parte do duto é modelada como uma casca cilíndrica para permitir a análise de enrugamento e da deformação da seção transversal. São realizados estudos paramétricos numéricos para investigar o efeito do recobrimento do duto, da forma e amplitude da imperfeição e da rigidez do solo na temperatura crítica de flambagem do duto.

### **3.2.12 Modelo de Teixeira & Romanel (2008)<sup>19</sup>**

Pesquisa realizada também pela PUC-Rio dando continuidade ao estudo de dutos enterrados e interação solo-duto. Nesse trabalho, os autores realizaram análises de estabilidade de um trecho da encosta da BR-376, que liga as cidades de Curitiba a Joinville no km 55+800 do oleoduto OSPAR da Transpetro. Segundo as informações disponíveis, devido a cortes executados para duplicação da rodovia provocaram instabilidade em certa área da encosta, em 1995, em janeiro de 1997, durante um período de fortes chuvas, um novo escorregamento

da porção inferior do talude provocou a ruptura do muro existente e uma série de escorregamentos sucessivos, que chegaram a atingir a faixa dos oleodutos. O programa de elementos finitos PLAXIS foi utilizado para as análises de estabilidade e posteriormente, a fim de comparação, o programa Slope/W e Sigma/W. Para as análises no PLAXIS foi utilizado o hardening soil model para o solo, com os parâmetros sendo determinados através de ensaios triaxiais com amostras obtidas de dois blocos de solo coletados da encosta. Os efeitos da movimentação da encosta no oleoduto OSPAR foram analisados por programa 3D de elementos finitos, dando-se ênfase às tensões e deformações para se a fim de verificar a integridade do duto.

### 3.3 Comentários Finais

Neste capítulo foram apresentados modelos da literatura que podem ser aplicados na análise de dutos enterrados, submetidos a diferentes carregamentos, considerando a interação solo-duto. Formulações analíticas ou numéricas são adotadas para a definição do problema, bi ou tri-dimensional, de dutos enterrados<sup>20,21,22,23,24,25,26</sup>. A seguir serão comentados alguns aspectos relevantes desta revisão bibliográfica.

A definição do interesse do estudo pode levar a uma combinação de um modelo relativamente simples para o solo e um modelo relativamente mais detalhado do duto ou vice-versa.

Na análise em elementos finitos de dutos enterrados, o duto é muitas das vezes modelado usando elementos de viga. Os nós do elemento do duto são ligados aos elementos do solo adjacente em seus pontos nodais comuns, porém, em alguns casos, pode ser necessário permitir que ocorra um deslizamento entre o duto e o solo, fazendo-se necessário o uso de elementos de interface entre os nós do duto e os nós do elemento do solo. Esses elementos de interface cinematicamente permitem o movimento entre os nós quando a força superficial de atrito especificada for excedida.

A literatura contém uma variedade de formulações de elemento de interface<sup>27</sup>, porém eles podem ser geralmente classificados como: a) aproximação de rigidez (elementos de rigidez); b) aproximação de restrição (multiplicadores de

Lagrange). Um elemento de interface usando a aproximação de restrição, não com os multiplicadores de Lagrange e sim fazendo uso do Princípio dos Trabalhos Virtuais foi apresentado. A motivação para adotar a aproximação de restrição foi para evitar os problemas de arredondamento numérico inerente à aproximação de rigidez e ao mesmo tempo para um controle direto das forças e deslocamentos relativos na interface e pela sua fácil implementação no método de elementos finitos<sup>28</sup>.

Na interação solo-duto, os efeitos do solo no duto podem ser modelados por uma série de molas. Para estabelecer o modelo de interação, o perfil do solo tem que ser descrito em todos os estágios de deformação. As deformações das molas do solo podem ser determinadas de acordo com as posições relativas do duto e do perfil do solo. Pelo uso das relações constitutivas das molas do solo, que descreve a relação entre as forças e as deformações na mola, as forças de reação das molas do solo podem ser definidas<sup>7,8,9</sup>.

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 do solo-estrutura, a geometria e a orientação do duto em relação à característica do recalque do solo e as características gerais do terreno onde o duto é localizado. As análises de dutos sujeitos a recalques diferenciais podem ser feitas de dois modos: a determinação de um projeto aceitável de um duto para dado recalque diferencial e a determinação de um recalque diferencial aceitável para um determinado duto.

O modelo de análise de dutos sujeitos a recalques diferenciais deve abranger assuntos muito importantes, tais como, i) o recalque do solo induz deformações no duto que produzem alterações na distribuição de deformações e tensões existentes na linha antes do recalque. A magnitude e o padrão desta alteração dependem da resposta estrutural do duto às deformações impostas através do recalque do solo; ii) a interação solo-duto é um aspecto importante a ser considerado. Na interação, tanto o duto como estrutura e o solo como meio de suporte têm que estar apropriadamente modelados, o que usualmente leva a modelos analíticos complexos.

Na análise de recalque o maior interesse pode ser dirigido na re-distribuição das deformações e tensões ao longo do comprimento que na deformação da seção

transversal. Portanto, o modelo analítico tem que abranger um comprimento suficiente para avaliar adequadamente a resposta global. Isto usualmente resulta num modelo de grande escala dependendo da técnica de discretização particular utilizada.

As pesquisas em deformação permanente do solo, seus efeitos no duto enterrado podem ser categorizadas de acordo com o tipo da deformação permanente do solo, isto é: deformação longitudinal permanente do solo e deformação transversal permanente do solo. A deformação permanente do solo é definida como um deslocamento de grande escala. As causas que podem provocar desse deslocamento de grande escala podem ser dadas por: liquefação do solo, movimentos de deslizamento e de falha. Observa-se que dentre estas três causas, os movimentos de deslizamento e de falha apresentam uma baixa frequência de ocorrência; porém, muitos casos de liquefação do solo acontecem mais frequentemente e induzem grandes deformações permanentes do solo, que originam muitos danos às estruturas de dutos. As estruturas de dutos, enterrados a pequenas profundidades, têm a possibilidade de sofrer colapso, localizado ou completo, causado por deformações permanentes do solo.

Portanto, devido à complexidade do problema, há a necessidade de desenvolver um modelo que acople de forma adequada os principais fenômenos envolvidos nos problemas de dutos enterrados considerando a interação solo-duto. Assim, a formulação utilizada para representar a interação solo-duto deve ser robusta e flexível, para permitir sua utilização em problemas com diferentes geometrias. Além disso, o ideal é que os resultados sejam validados com ensaios de laboratório, ou com outras soluções analíticas ou numéricas já validadas.