

5

EXEMPLOS

Este capítulo tem como objetivo avaliar numericamente a metodologia apresentada para análise não linear de tubulações enterradas que inclui os efeitos de pressão interna e interação solo-duto. São apresentados alguns exemplos de solução analítica conhecida para verificar a exatidão dos resultados fornecidos pela metodologia proposta. Outros exemplos são analisados e os resultados são comparados com os de outras formulações presentes na literatura.

Todos os exemplos aqui apresentados consideram pequenas deformações e grandes deslocamentos. As soluções foram obtidas por um procedimento incremental e iterativo com convergência para o equilíbrio em cada passo. O equilíbrio é atingido quando o trabalho realizado na iteração está abaixo da tolerância imposta. Nos exemplos que se seguem adota-se uma tolerância de 10^{-3} .

Na discretização foram empregados elementos tipo viga de três nós como apresenta a figura (2.9).

As características do duto e pressão interna foram retiradas do Structural Engineering Report Nro 181 Department of Civil Engineering University of Alberta NUMERICAL STRUCTURAL ANALYSIS OF BURIED PIPELINES (1983).

5.1

Exemplo 1

Considera-se uma viga engastada livre mostrada na figura (5.1) que é analisada para uma carga distribuída constante no sistema global de eixos. A

carga foi aplicada utilizando-se 50 passos de carga até o parâmetro de carga K^* igual a 2, onde K^* é definido pela expressão: $\frac{qL^3}{EI}$. Iterações de equilíbrio foram realizadas.

A viga é discretizada em 4 elementos de mesmo comprimento e sua deformada na configuração final está mostrada na figura (5.1).

Este exemplo está apresentado na dissertação de mestrado de ROEHL (1987).

As respostas para cargas constantes no sistema global são comparadas com os resultados analíticos de HOLDEN (1972).

Para obter as condições de uma viga engastada e livre na formulação empregada no programa ITERA não são levados em conta os efeitos de pressão interna e interação solo-duto, ou seja, $p = 0$, $K_{BS} = 0$, $K_{US} = 0$, $K_{LS} = 0$.

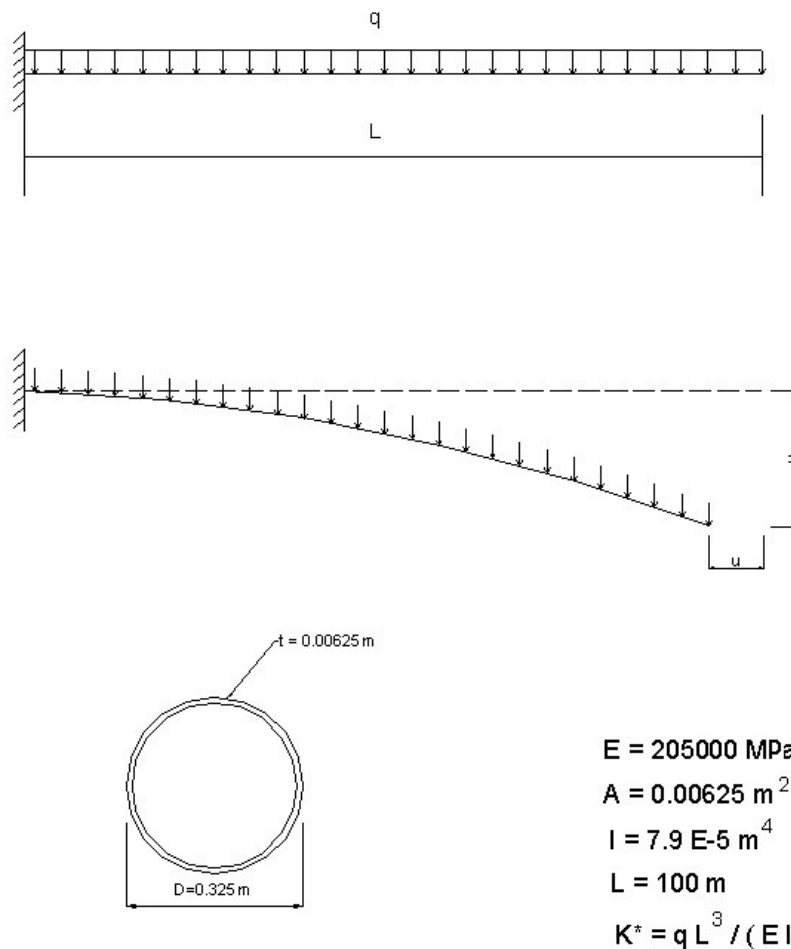


Figura 5.1 Exemplo 1: Viga engastada livre com carga distribuída uniforme.

Como se pode observar na figura (5.2) os deslocamentos obtidos com a metodologia exposta neste trabalho aproximam-se bastante da resposta teórica. Convém ressaltar que poucas iterações, 3 no máximo, foram necessárias em cada passo para atingir o equilíbrio dentro da tolerância imposta.

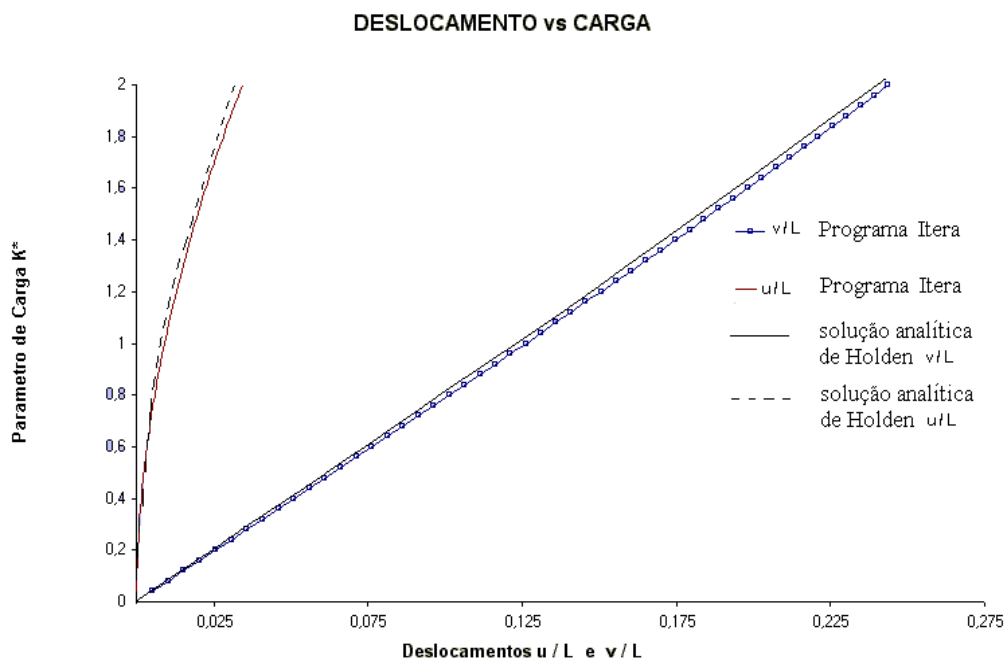


Figura 5.2 Deslocamentos na extremidade livre vs carga para a viga engastada e livre do exemplo 1.

5.2

Exemplo 2

Considera-se a viga biapoiada mostrada na figura (5.3) que é analisada para um momento M aplicado nos apoios. O momento foi aplicado utilizando-se 50 passos de carga até o valor final igual a 81 kN*m. Iterações de equilíbrio foram realizadas.

A viga é discretizada em 4 elementos do mesmo comprimento e sua deformada na configuração final está mostrada na figura (5.3).

As respostas para as condições de carga apresentadas são comparadas com os resultados do programa SAP2000. A análise efetuada no programa

SAP2000 usa 8 elementos de tubulação de aço com as características apresentadas na figura (5.3).

Para obter estas condições, no programa ITERA não são levados em conta os efeitos de pressão interna e interação solo-duto, ou seja, $p = 0$, $K_{BS} = 0$, $K_{US} = 0$, $K_{LS} = 0$.

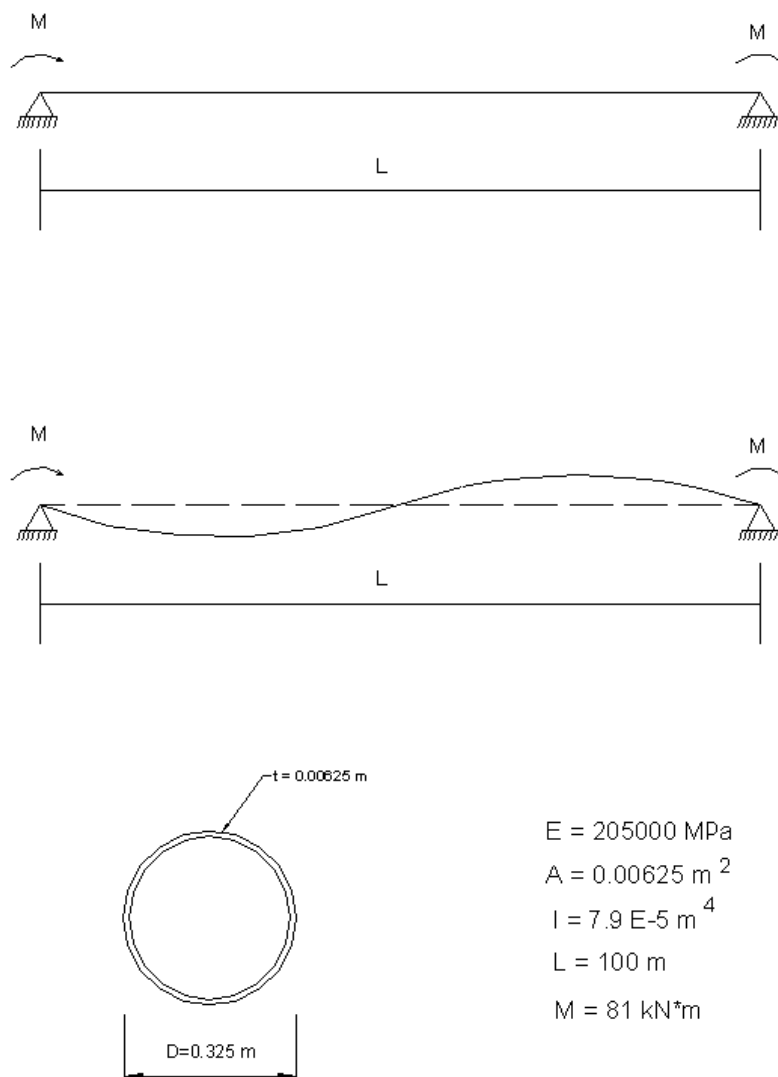


Figura 5.3 Exemplo 2: viga biapoiada com momentos nas extremidades.

A análise efetuada com o programa Itera fornece deslocamentos bastante próximos aos obtidos pelo programa SAP2000.

A figura (5.4) apresenta a comparação da deflexão da viga após ser analisada pelo programa SAP2000 e o programa ITERA.

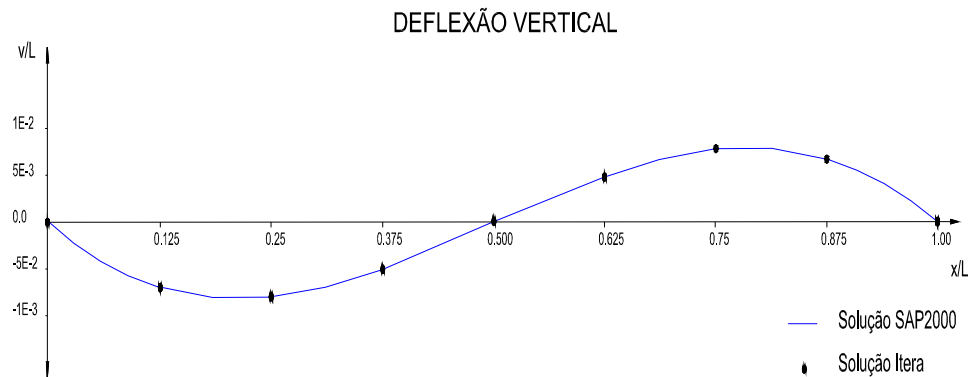


Figura 5.4 Comparação da deflexão vertical (SAP2000 e Itera) exemplo 2.

5.3

Exemplo 3

Considera-se uma viga biapoiada sobre base elástica mostrada na figura (5.5) que é analisada para um momento M aplicado nos apoios. O momento foi aplicado utilizando-se 50 passos de carga até o valor final igual a 81 kN*m.

A viga é discretizada em 4 elementos de mesmo comprimento e sua deformada está mostrada na figura (5.5).

Este exemplo está apresentado na Tese de doutorado, AZOUBEL (1995).

A resposta do programa ITERA é comparada com a solução modal obtida usando a formulação semi-analítica apresentada por Silveira & Gonçalves (1993).

Para reproduzir estas condições o programa ITERA não leva em conta os efeitos de pressão interna, ou seja, $p = 0$.

Como se pode observar na figura (5.6) os deslocamentos obtidos com a metodologia exposta neste trabalho reproduzem a resposta da formulação semi-analítica. Convém acrescentar que novamente poucas iterações, 3 no máximo, foram necessárias em cada passo para atingir o equilíbrio dentro da tolerância imposta e o efeito das molas de levantamento não é considerado.

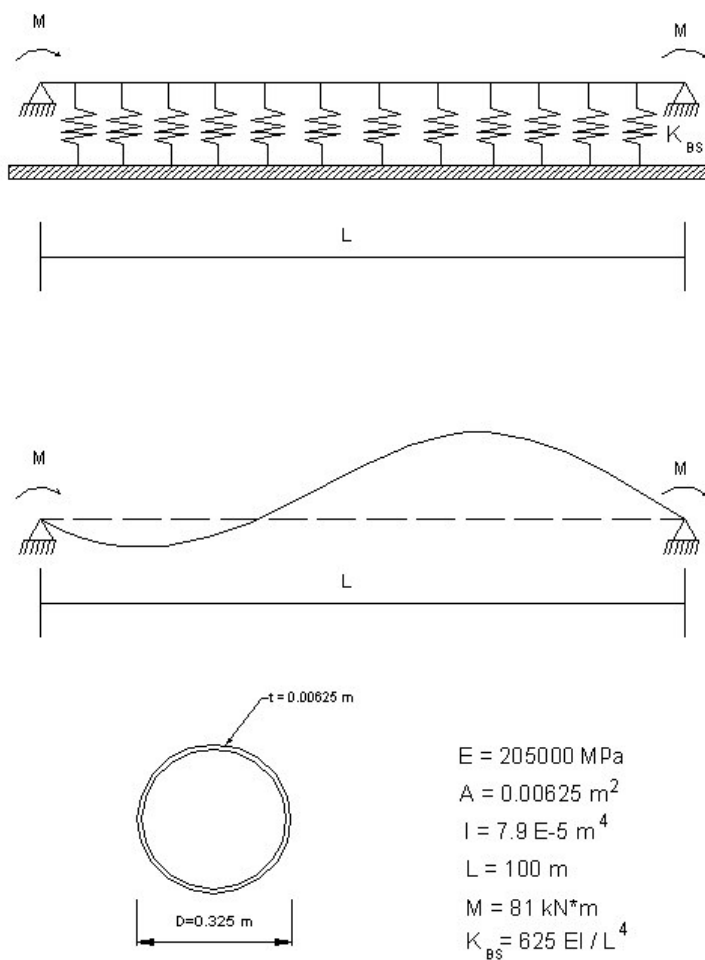


Figura 5.5 Viga biapoiada sob base elástica com momentos nas extremidades.

DEFLEXÃO VERTICAL COM FUNDAÇÃO

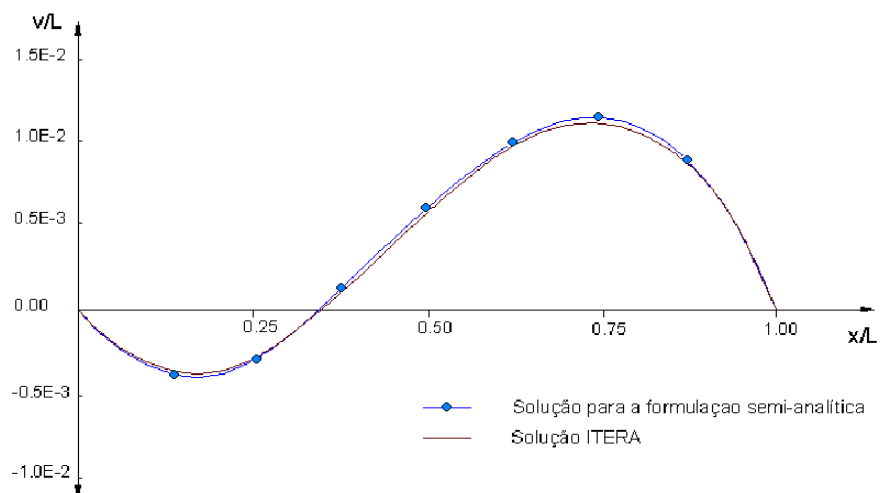


Figura 5.6 Comparação da deflexão vertical (formulação semi-analítica e ITERA).

Dos exemplos 2 e 3 pode-se analisar o comportamento dos elementos de viga com e sem fundação (figura (5.7)).

Levando em conta somente o efeito das molas de apoio, há uma parcela da tubulação que perde contato com os elementos de apoio (fundação), razão pela qual aquela parcela torna-se mais flexível e apresenta maiores deformações.

Para completar a análise, o exemplo 3 foi analisado considerando também os efeitos das molas de levantamento ($K_{BS} = K_{US} = \frac{625EI}{L^4}$), apresentando a deflexão vertical na figura (5.7). Como se pode observar o efeito das molas de levantamento torna a tubulação mais rígida ao levantamento, reduzindo os deslocamentos nesta direção.

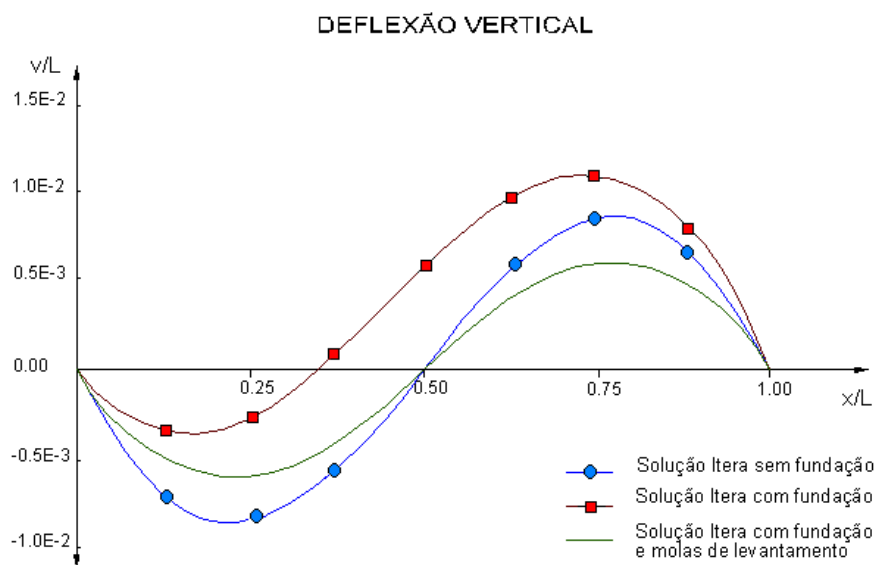


Figura 5.7 Deflexão vertical com e sem fundação (programa ITERA).

5.4

Exemplo 4

Considera-se uma tubulação biapoiada com pressão interna sobre uma base elástica mostrada na figura (5.8) que é analisada para um momento M aplicado nos apoios. O momento foi aplicado utilizando-se 50 passos de carga até o momento final de 81 kN*m.

A tubulação é discretizada em 4 elementos do mesmo comprimento e sua deformada está mostrada na figura (5.8).

As respostas para as condições de carga apresentadas são comparadas com os resultados do programa SAP2000. A análise efetuada no programa SAP2000 neste caso utilizou 256 elementos de tipo casca. Foram usados 8 elementos tipo casca para modelar a seção transversal da tubulação e 32 segmentos no eixo x de aço com as características apresentadas na figura (5.8).

Para reproduzir estas condições o programa ITERA leva em conta os efeitos de pressão interna e interação solo-duto, ou seja, $p \neq 0$, $K_{BS} \neq 0$, $K_{US} \neq 0$, $K_{LS} \neq 0$.

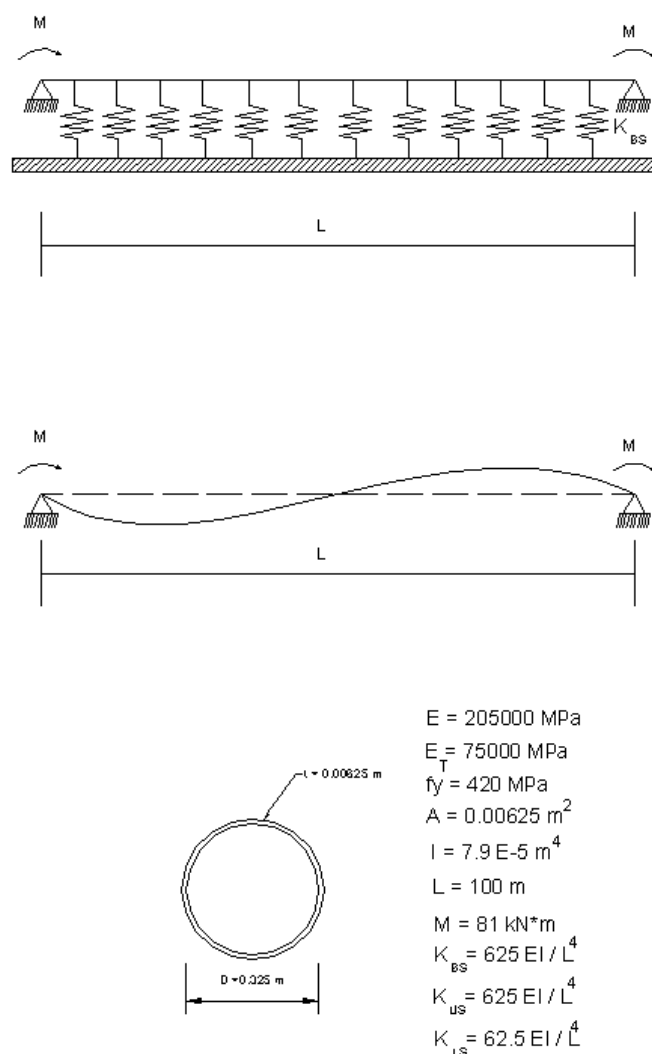


Figura 5.8 Viga biapoiada com pressão interna e momentos nos apoios sobre base elástica.

Foram efetuadas duas análises variando somente a pressão interna da tubulação. Na primeira análise $p = 9 \text{ MPa}$ e na segunda $p = 12 \text{ MPa}$.

As figuras (5.9) e (5.10) apresentam a modelagem feita pelo programa SAP2000, onde se podem observar as molas de solo. Convém acrescentar que o programa SAP2000 considera os efeitos das molas como forças aplicadas em pontos e não como forças por unidade de comprimento como são consideradas pelo programa ITERA, razão pela qual uma conversão de forças distribuídas para forças pontuais aplicadas na seção transversal foi requerida, como mostra a. figura (5.10).

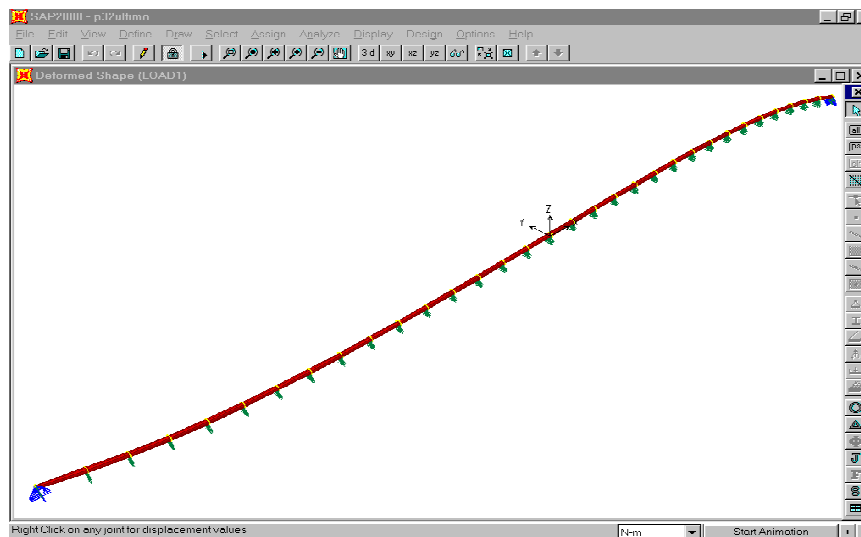


Figura 5.9 Configuração deformada obtida com o programa SAP2000 para uma viga biapoada com pressão interna sobre uma base elástica.

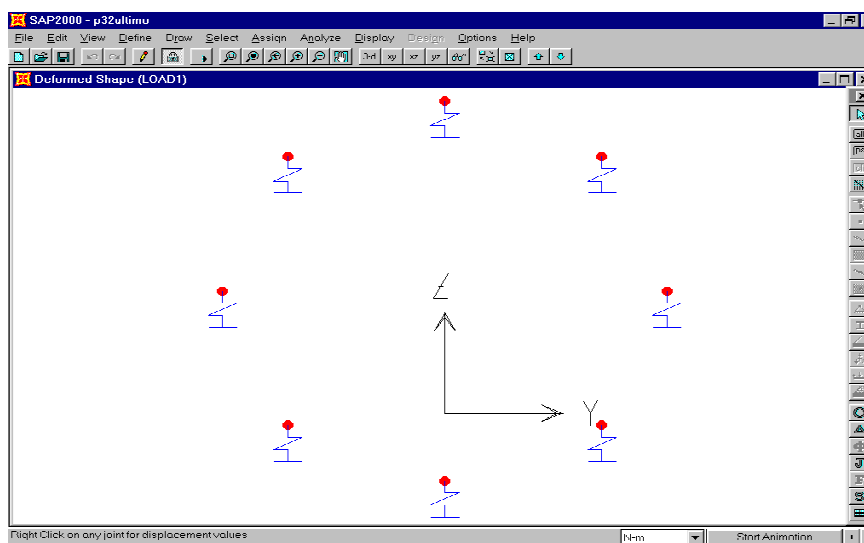


Figura 5.10 Modelagem do SAP2000 para molas de solo na seção transversal do duto.

A análise efetuada com o programa ITERA fornece deslocamentos próximos aos obtidos pelo programa SAP2000. No modelo do programa SAP2000 as molas de apoio trabalham a compressão e tração com a mesma rigidez em ambos os casos. Na simulação com o programa ITERA são empregadas molas de suporte e levantamento com mesma rigidez.

A figura (5.11) apresenta a deflexão da viga após ser analisada pelo programa SAP2000 para dois valores de pressão e a comparação destes resultados com os obtidos no programa ITERA respectivamente.

Destas figuras se pode concluir que a deflexão da viga para uma pressão $p = 9 \text{ MPa}$ é quase a mesma obtida no exemplo 3. Isto se pode explicar porque para este nível de pressão ainda não é atingida a tensão de escoamento para o material. Incrementando a pressão interna da tubulação até atingir valores de tensão maiores que a tensão de escoamento (para o caso de $p = 12 \text{ MPa}$) se observa que a deflexão para a mesma tubulação é maior, uma vez que o material já apresenta deformações plásticas.

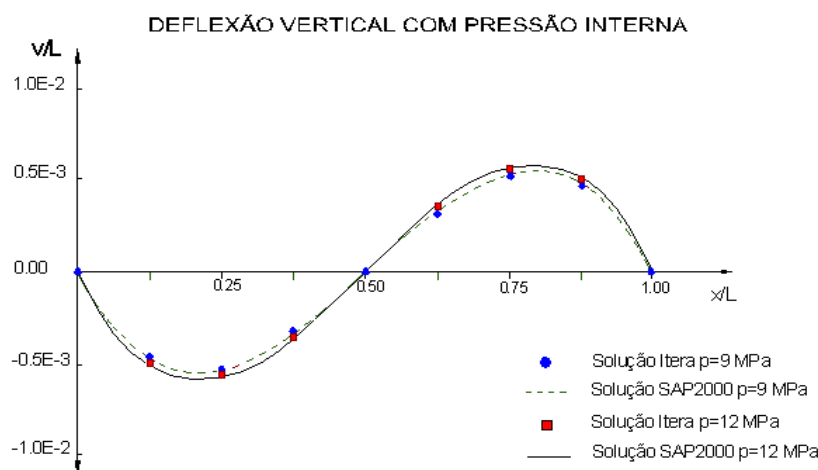


Figura 5.11 Deflexão para uma viga biapoiada com pressão interna sobre base elástica.

5.5

Exemplo 5

Considera-se o duto enterrado apresentado na figura (5.12) submetido às cargas distribuídas originadas pelo solo e por uma sobrecarga externa. As cargas foram aplicadas utilizando-se 50 passos de carga até atingir o total do

carregamento. Para reproduzir as condições do exemplo, o programa ITERA empregou: valores de rigidez das molas; características geométricas e do material descritos na figura (5.12). Discretizou-se o duto em 8 elementos ao longo do comprimento enterrado. A deflexão vertical na configuração final está mostrada na figura (5.13).

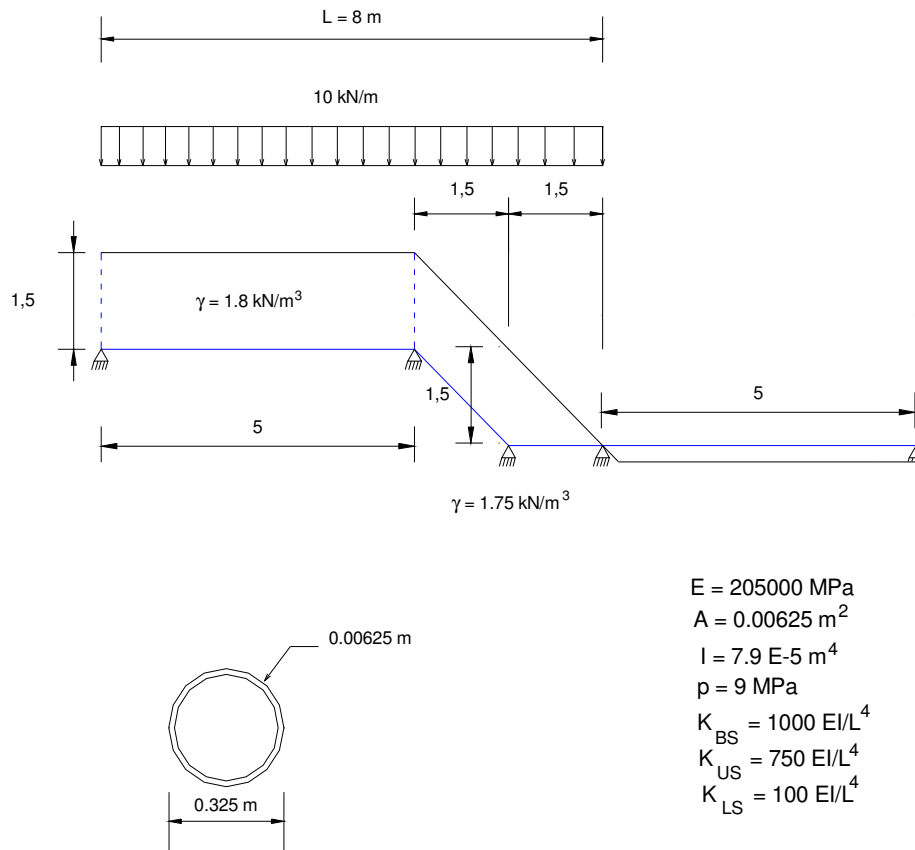


Figura 5.12 Exemplo 5:Duto enterrado.

Para obter as cargas provenientes do solo se considerou dois pesos específicos diferentes ($\gamma = 1,8 \text{ kN/m}^3$ para o tramo horizontal e $\gamma = 1,75 \text{ kN/m}^3$ para o tramo inclinado), uma profundidade de aterro de $1,5 \text{ m}$ e uma largura tributária de $0,325 \text{ m}$.

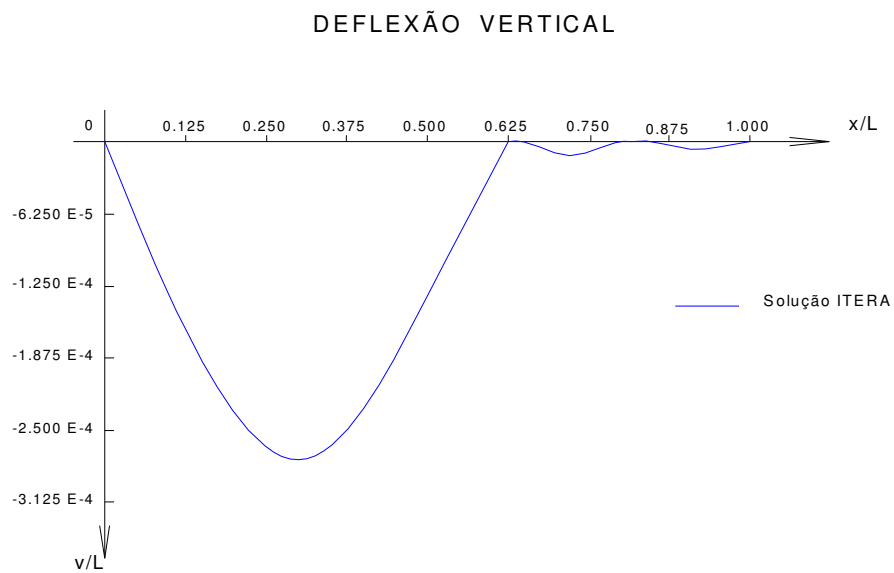


Figura 5.13 Deflexão vertical do duto enterrado.