

4

Comparação de modelos com ABAQUS

Neste capítulo serão apresentados modelos experimentais e numéricos desenvolvidos para dutos enterrados submetidos a cargas térmicas. Serão também analisados exemplos de linhas de dutos, através de modelos de viga-elemento de interface. Alternativamente será empregado um modelo no qual parte do duto é discretizado com elementos de casca de modo a possibilitar a representação de fenômenos de flambagem local tais como enrugamento e ovalização de seção.

4.1

Modelo numérico de viga-mola

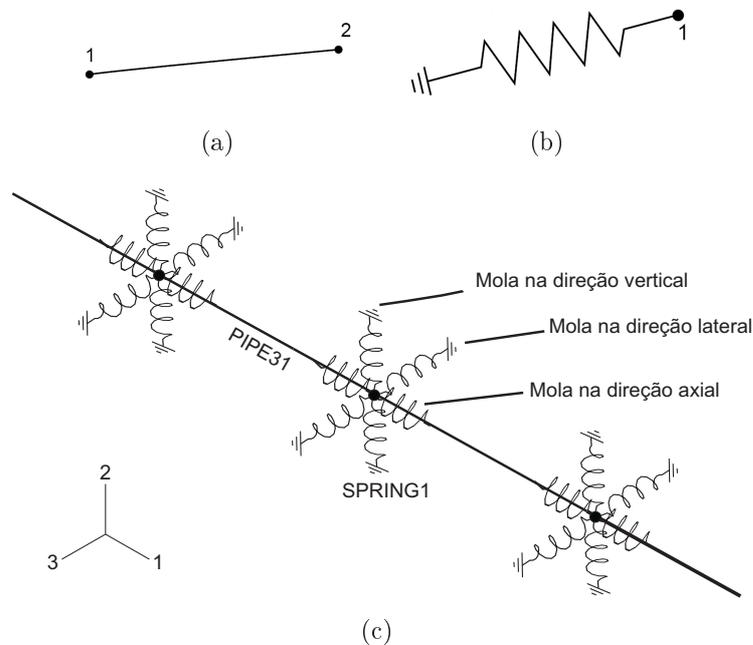


Figura 4.1: (a) elemento PIPE31, (b) elemento SPRING1, (c) representação do modelo viga-mola

Neste modelo o duto é considerado como viga e o solo como mola. Para representar o duto foram utilizados elementos PIPE31, que são elementos tridimensionais com dois nós e seis graus de liberdade para cada nó (três deslocamentos e três rotações). Este elemento representa um cilindro de paredes finas, onde definimos o raio e a espessura e está representado na figura 4.1(a). O elemento utilizado para representar essas molas é o elemento SPRING1, que possui um nó apenas sendo por definição a outra extremidade fixa, apresentada na figura 4.1(b). O modelo de viga-mola está representado na figura 4.1(c).

As molas foram consideradas com comportamento elasto-plástico perfeito. Esse comportamento é descrito com uma relação força-deslocamento, apresentada na figura 4.2. O deslocamento crítico (u_c) e a força crítica (F_c) representam o ponto onde a reação do solo não aumenta com o acréscimo de deslocamento.

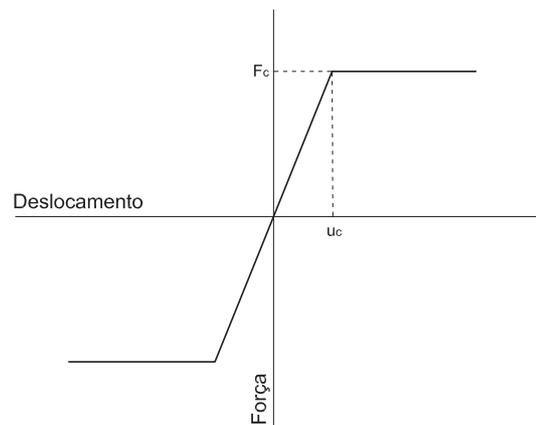


Figura 4.2: Força versus deslocamento para o comportamento elasto-plástico do solo

4.2

Modelo viga-elemento de interface

O modelo de viga-elemento de interface é semelhante ao modelo viga-mola. O solo é representado através de elementos de interface. O elemento de interface utilizado é o PSI34 (Pipe-soil interaction), que é um elemento tridimensional de quatro nós com três graus de liberdade (três deslocamentos), que está representado na figura 4.3. Um lado do elemento está ligado aos mesmos nós do elemento de viga e o outro lado está ligado aos nós de uma base rígida. Os nós da base rígida são restringidos para que não ocorra deslocamento de corpo rígido do sistema viga-elemento de interface. O elemento utilizado para representar a base rígida é o elemento rígido tridimensional RB3D2, que possui

dois nós com seis graus de liberdade para cada nó (três deslocamentos e três rotações). A viga é discretizada com elementos de viga tridimensionais PIPE31 já descritos na seção 4.1

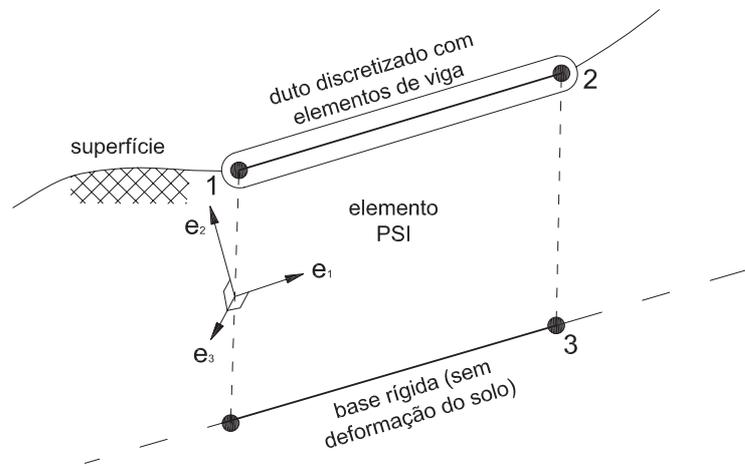


Figura 4.3: Elemento PSI (Pipe-soil interaction)[12]

Os elementos de interface são considerados elasto-plásticos como na seção 4.1, com o comportamento representado na figura 4.2

4.3 Modelo misto viga-casca (enrugamento)

Este modelo foi desenvolvido com o intuito de modelar a flambagem local que ocorre em dutos. A fim de reduzir o tamanho do modelo apenas o trecho do duto mais suscetível à flambagem local é discretizado com elementos de casca, pois com o elemento de viga não é possível observar a ovalização e enrugamento do duto. O restante da linha da tubulação é discretizada com elementos de viga. Para que os esforços da viga sejam transmitidos para a casca utiliza-se um cone com elementos rígidos entre a casca e a viga. O modelo pode ser observado na figura 4.4. Para a casca foram utilizados elementos S4R [12]. Este elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade para cada nó (três deslocamentos e três rotações). Para o cone rígido de transição são utilizados elementos rígidos R3D3 [12], que possuem três nós com três graus de liberdade para cada nó (três deslocamentos). Foram utilizados elementos SPRING1 para a discretização do solo na região da casca, pois os elementos de interface PSI só podem ser utilizados com elementos de viga.

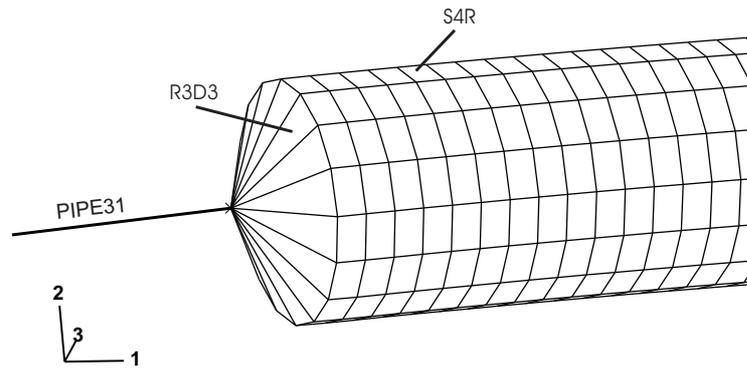


Figura 4.4: Elemento de viga com elemento de casca

4.4

Modelo experimental de flambagem global - Souza

No trabalho de Souza[19] foi realizado um estudo experimental com dutos retos e em zig-zag. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC/RIO. Os modelos desenvolvidos são modelos reduzidos do duto PE-3 da Petrobrás, na escala de 1:6, com semelhança física. O duto PE-3 tem formato zig-zag. Os modelos foram submetidos a variação de temperatura, pressão interna e para simular o solo existente em duto real, condições de apoio lateral e longitudinal foram utilizadas.

Para os modelos considerando um cobrimento de solo de um metro foram realizados ensaios para obter a relação força-deslocamento para a reação lateral do solo. O comportamento do solo é considerado elasto-plástico e os valores obtidos no ensaio estão representados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Reações força-deslocamento para a reação lateral do solo [19]

Força (N)	deslocamento (mm)
0	0
850	18
890	25
890	35

As características dos tubos de aço utilizadas para os modelos são apresentadas na tabela 4.2. Os traçados geométricos dos dutos reto e em zig-zag estão apresentados nas figuras 4.5 e 4.6, respectivamente. O duto reto não possui uma configuração perfeita, ou seja, possui pequenos valores de imperfeição inicial, que podem ser observados na figura 4.5. O ângulo α é definido por Souza[19] como o ângulo de zig-zag e pode ser observado na figura 4.6.

Tabela 4.2: Características dos tubos de aço [19]

Módulo de elasticidade (E)	210000MPa
Coefficiente de poisson (ν)	0,279
Coefficiente de dilatação térmica (α)	$1,26 \cdot 10^{-5}/^{\circ}C$
Diâmetro externo do duto (D_e)	76,2mm
Espessura do duto (t)	2,12mm
Raio de curvatura (w)	2,92m
Tensão de escoamento (f_y)	345MPa

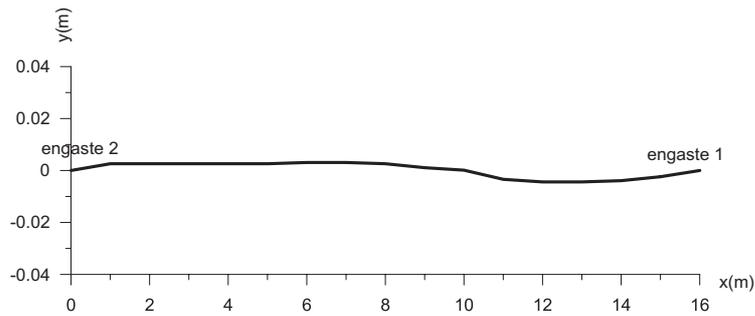


Figura 4.5: Traçado geométrico do duto reto [19]

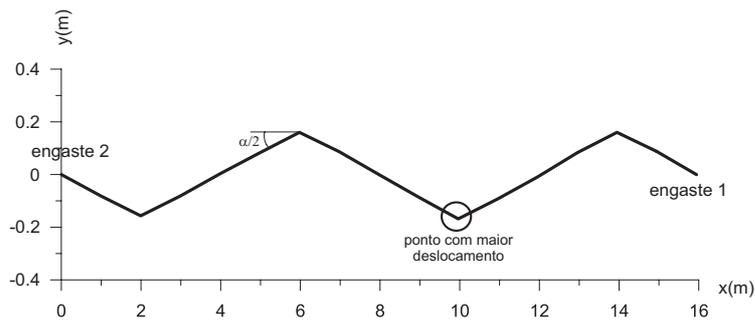


Figura 4.6: Traçado geométrico do duto em zig-zag [19]

O procedimento geral dos ensaios foi realizado em várias etapas. A primeira etapa é o início do ensaio com o modelo sob temperatura de $20^{\circ}C$ e pressão interna igual a zero. Na segunda etapa é aplicada a pressão interna de $4,5MPa$, com temperatura constante e igual a $20^{\circ}C$. Na terceira etapa a temperatura foi elevada de $20^{\circ}C$ para $105^{\circ}C$, com a mesma pressão interna constante. Na quarta etapa a temperatura é diminuída de $105^{\circ}C$ para $20^{\circ}C$, com a mesma pressão interna. Na quinta etapa a pressão é diminuída para zero, concluindo o ensaio.

4.4.1

Modelo numérico viga-elemento de interface para duto reto e em zig-zag

O modelo viga-elemento de interface é utilizado para discretizar o modelo de Souza[19] descrito na seção 4.4. Foram modelados numericamente o duto

reto e em zig-zag considerando em ambos os casos as situações com e sem cobrimento de solo de um metro. O duto reto sem cobrimento foi discretizado com 64 elementos PIPE31 e 129 nós. Para o duto com cobrimento, além dos elementos de viga são utilizados 64 elementos PSI34 e 64 elementos RB3D2. O elemento RB3D2 é um elemento tridimensional de viga rígida com dois nós e possui três graus de liberdade (três deslocamentos). Este elemento é utilizado para fixar a base do elemento PSI.

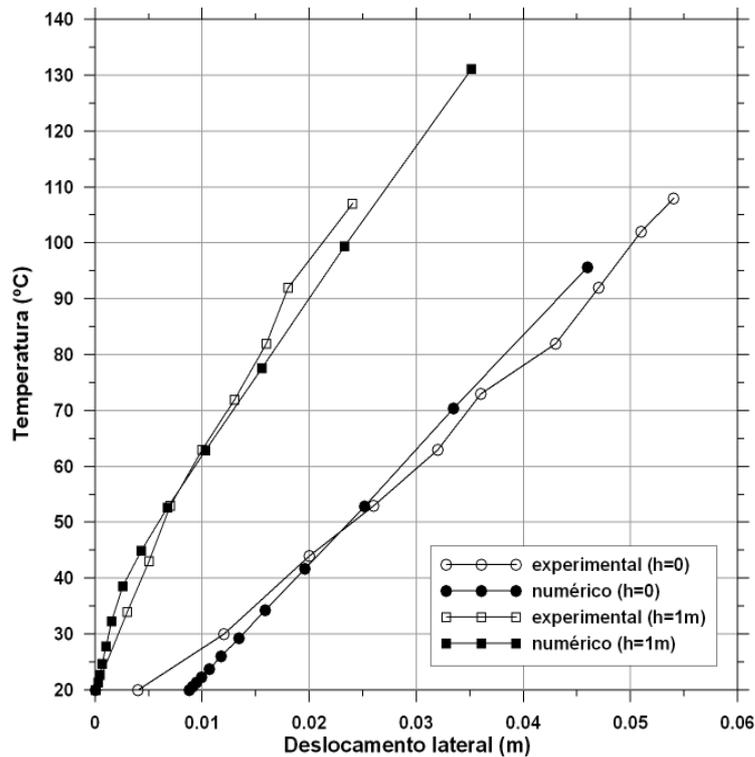


Figura 4.7: Deslocamento lateral versus Temperatura do modelo do duto em zig-zag

Na figura 4.7 temos o comportamento para o duto em zig-zag com e sem cobrimento no ponto de maior deslocamento, que está localizado na figura 4.6, com os valores do trabalho experimental de Souza[19] e os valores obtidos do modelo numérico. Observamos que o comportamento do duto em zig-zag com cobrimento para o modelo numérico e o modelo experimental foram quase coincidentes. O modelo sem cobrimento numérico também apresentou valores bem próximo dos valores experimentais. O valor que apresentou maior diferença foi para o valor do deslocamento na temperatura inicial. Este valor inicial segundo Souza[19] é devido a pressão interna. Isto não ocorre para os casos com cobrimento, pois o cobrimento ajuda a minimizar esses deslocamentos e deformações como foi apresentado na seção 2.3.

O comportamento para o duto reto com e sem cobrimento com os valores do trabalho experimental de Souza[19] e os valores obtidos do modelo numérico é

apresentado na figura 4.8. Podemos observar que, para o duto com cobrimento, a temperatura crítica aumentou em relação a obtida para o duto sem cobrimento, e que, a partir do deslocamento de 0,05, os dois modelos apresentaram o mesmo comportamento. Os valores da temperatura crítica para o duto com e sem cobrimento estão representados na tabela 4.3

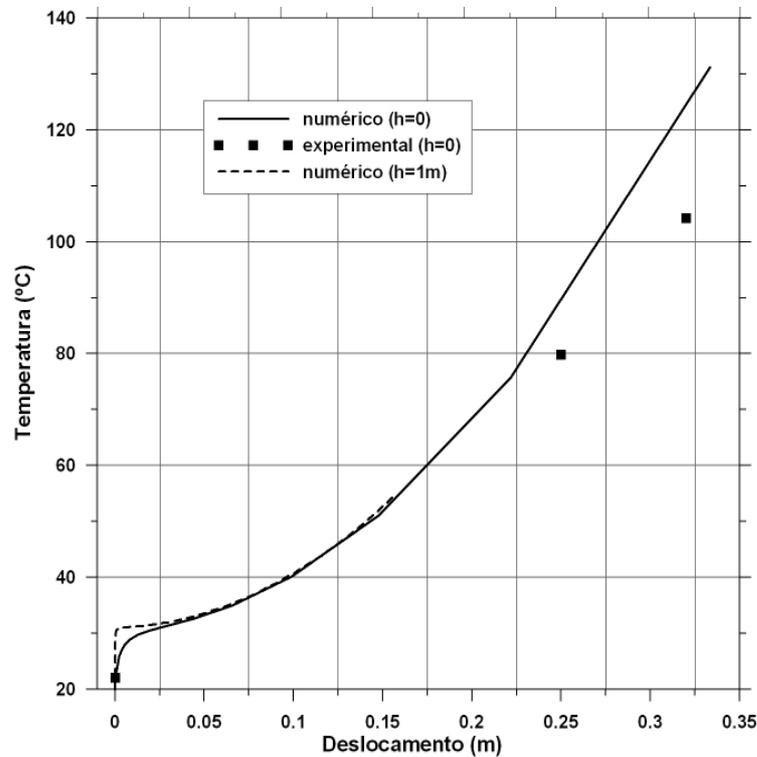


Figura 4.8: Deslocamento lateral versus temperatura do modelo do duto reto

Tabela 4.3: Temperatura crítica para o duto reto

	Temperatura crítica
com cobrimento	31,02 ^o C
sem cobrimento	28,97 ^o C

Observa-se a partir das figuras 4.7 e 4.8 que os deslocamentos ocorridos nos dutos em zig-zag é bem menor que nos dutos retos. No trabalho de Frederiksen, Andersen e Jonsson[45] é realizado um estudo numérico de dutos em zig-zag. Neste trabalho esse tipo de duto é considerado como um controle de flambagem, pois, devido a sua geometria, é imposta a ocorrência de flambagem do duto em intervalos. Com relação à força axial efetiva na pós-flambagem, Frederiksen, Andersen e Jonsson[45] obtiveram uma redução de cerca de um terço comparado com dutos retos. Nos trabalhos de Sriskandarajah et al.[26] e Souza[19] é concluído que o aumento do ângulo de zig-zag é favorável ao comportamento do duto quando este está submetido a cargas térmicas, pois diminui a força axial e os deslocamentos.

A representação dos deslocamentos é feita na figura 4.9. O duto em zig-zag é apresentado na figura 4.9(a), com um fator de aumento de escala na direção 3 de 20 vezes. O duto reto é apresentado na figura 4.9(b), com um fator de aumento de escala na direção 3 de 5 vezes.

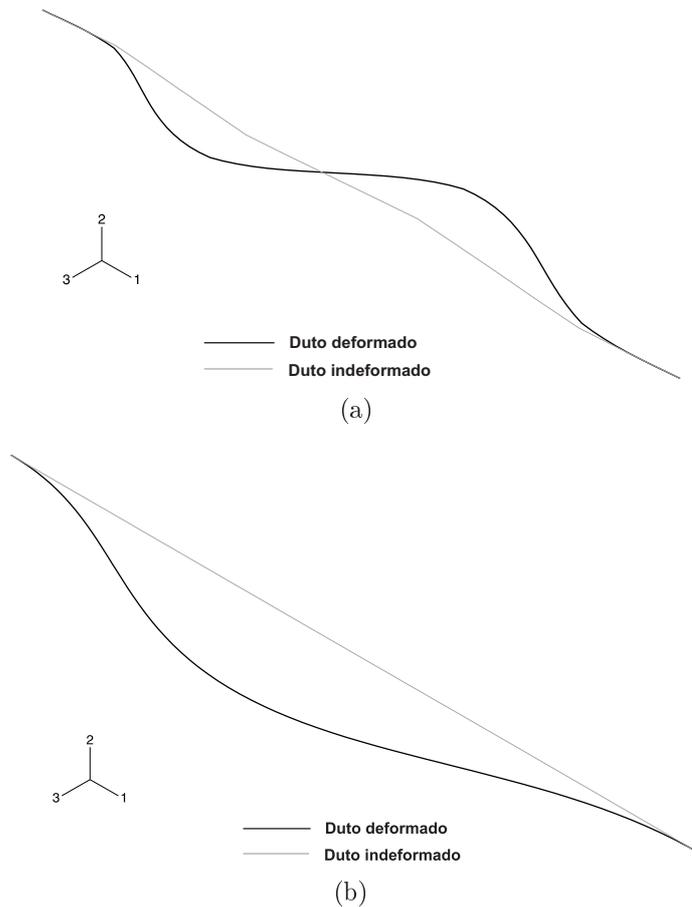


Figura 4.9: Representação dos deslocamentos para: (a) duto em zig-zag (escala=20) (b) duto reto (escala=5)

Observa-se a partir da figura 4.10 que há uma pequena diferença nas respostas numéricas e experimentais tanto para o caso do duto com e sem cobrimento. A diferença maior da resposta para a tensão longitudinal está no caso do duto sem cobrimento.

Comparando as figuras 4.10 e 4.8 observa-se que este modelo numérico representou melhor a relação deslocamento/temperatura do que a relação temperatura/tensão longitudinal.

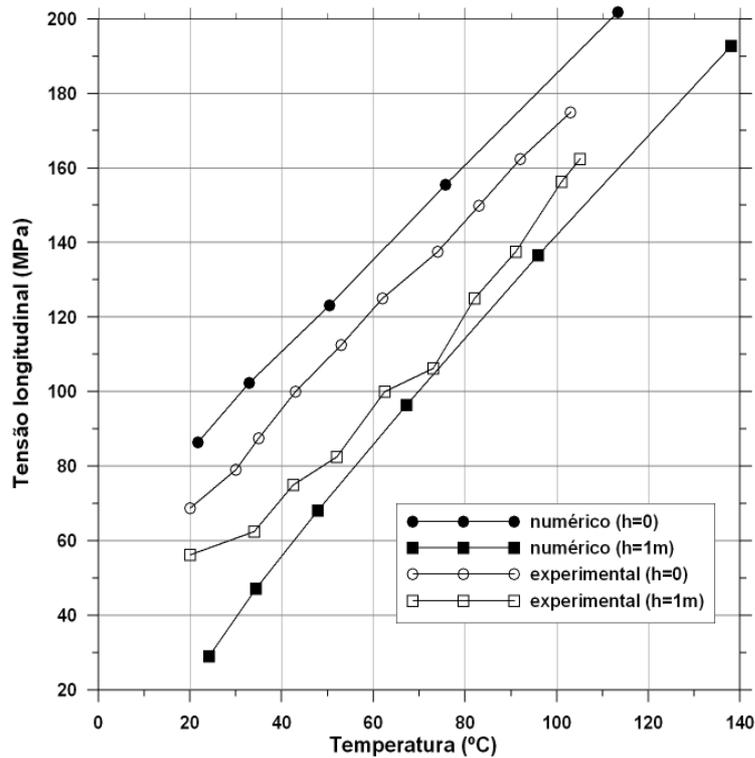


Figura 4.10: Temperatura versus tensão longitudinal para modelo do duto zig-zag

4.5 Modelo numérico de Cunha e Benjamim

No trabalho de Cunha e Benjamim[20] encontra-se o modelo viga e mola. O comprimento modelado é de 1000m que é o comprimento da metade do duto. É modelado metade do duto, pois supõe-se que o comportamento do duto flambado é simétrico. A malha para discretizar o duto tem 1000 elementos do tipo PIPE31.

As reações do solo foram representadas por molas elasto-plásticas, aplicadas em cada nó global da malha do duto nas direções axial, lateral e vertical. O elemento utilizado para representar essas molas é o elemento SPRING1. Os valores para as reações do solo e as características do duto estão apresentados respectivamente na tabela 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4: Reações do solo para cobertura $h=1.0\text{m}$ e diâmetro externo do duto $D_c=0.508\text{m}$ (valores em N/m) [20]

Reação(N)	deslocamento		
	12mm	25,4mm	500mm
axial	2778,0	2916,9	3062,7
lateral	7046,1	9361,9	11677,6
vertical asc.	4246,8	4246,8	4246,8
vertical desc.	7543,1	9482,1	11421,2

Tabela 4.5: Características do duto [20]

Módulo de elasticidade (E)	206000MPa
Coefficiente de poisson (ν)	0,30
Coefficiente de dilatação térmica (α)	$1,17 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
Diâmetro externo do duto (D_e)	0,4064m
Espessura do duto (t)	0,01113m
Peso duto+solo (w)	3217N/m

Foram consideradas para as condições de contorno: uma extremidade engastada e a outra com deslocamento livre somente na direção vertical. Os carregamentos foram aplicados em dois estágios não-lineares, o primeiro corresponde ao peso-próprio, seguido do acréscimo de temperatura. Foi utilizado o método de Riks[10] no estágio de carregamento de temperatura para a determinação do caminho de equilíbrio pós-crítico.

4.5.1

Modelo numérico viga-elemento de interface para duto reto com imperfeição

Neste modelo foram utilizados os dados do duto descrito na seção 4.5. A diferença é que ao invés de utilizar molas para representar o solo foram utilizados elementos de interface. Foram utilizados 1000 elementos PIPE31 para discretizar o duto, 1000 elementos PSI34 para discretizar o solo e 1000 elementos RB3D2 para discretizar a base rígida. Na figura 4.11 e apresentado a temperatura versus deslocamento vertical para os valores do trabalho de Cunha e Benjamim[20] e para os modelos numéricos considerando o solo como mola e como elemento de interface.

Pode-se observar uma diferença entre os modelos considerando o solo como mola (SPRING1) e elemento de interface (PSI34). A temperatura crítica com elementos de interface é maior do que com elementos de mola. Isso se deve ao fato que para o modelo de mola, a mola está localizada apenas nos nós da viga e os elementos de interface estão em contato com toda a superfície

da viga. Portanto se ocorrer um deslocamento no meio da viga o modelo de mola não irá restringir esse movimento, mas o elemento de interface restringirá, aumentando assim a temperatura crítica.

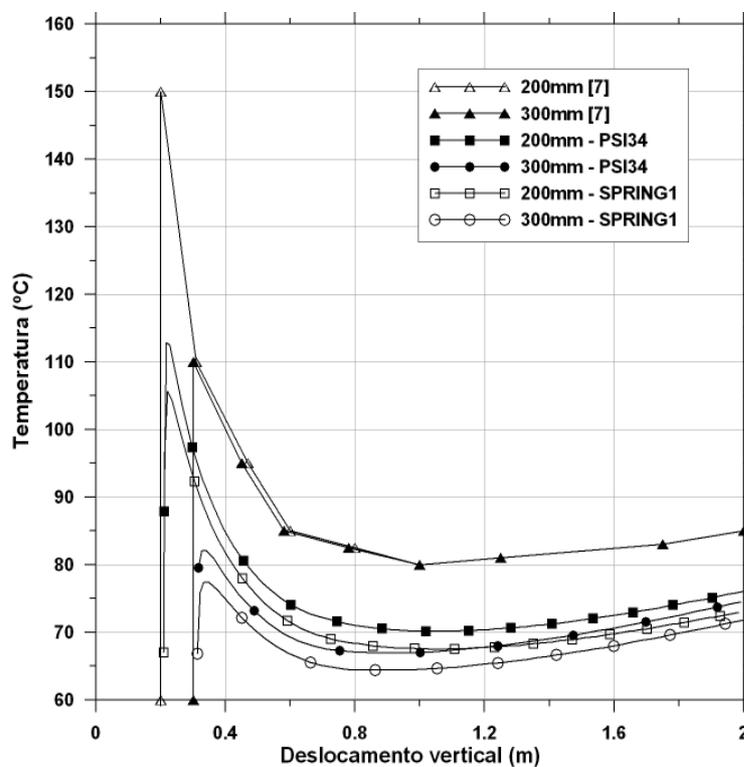


Figura 4.11: Temperatura versus deslocamento vertical [20]

A diferença entre os modelos de Cunha e Benjamim[20] e os de mola e elementos de interface, pode ser pelo fato de que no trabalho de Cunha e Benjamim[20] foi utilizado uma temperatura inicial, mas não está descrito no mesmo trabalho se foi utilizada uma temperatura inicial.

4.5.2

Modelo viga-casca de duto reto com imperfeição

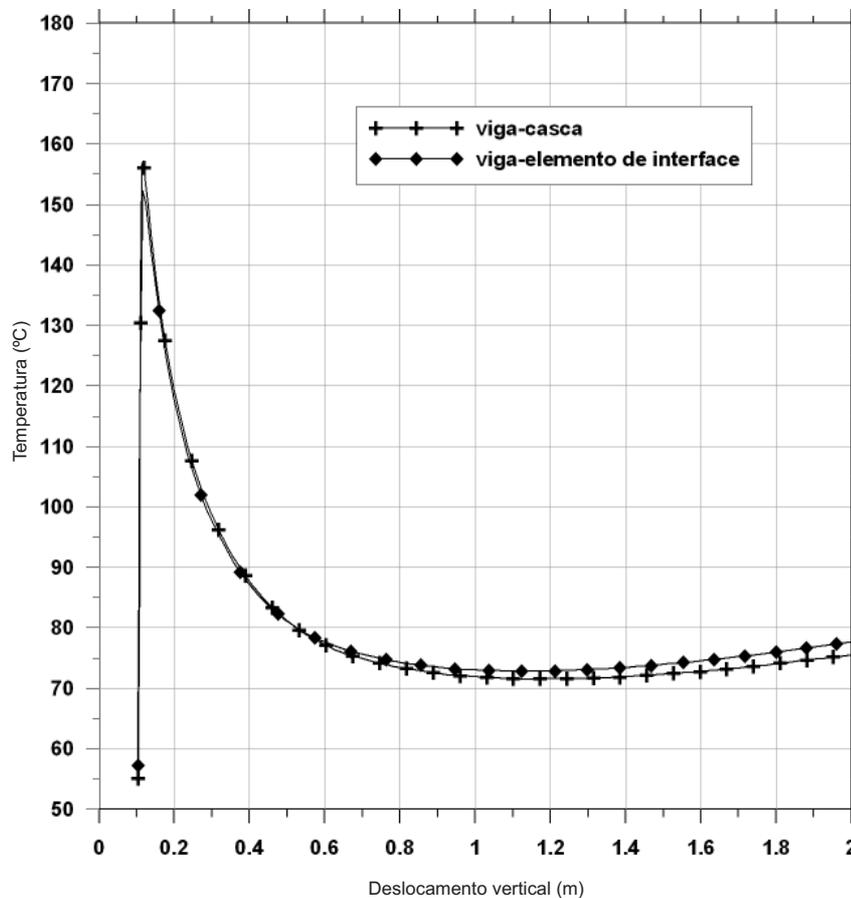


Figura 4.12: Temperatura versus deslocamento vertical para modelos de viga-casca e viga-elemento de interface

Os dados do duto descrito na seção 4.5 também foram utilizados neste modelo. Este modelo tem o intuito de analisar a flambagem local do duto. Para isto foi considerado o modelo de viga-casca descrito na seção 4.3. Como o duto possui 1000 metros, 2 metros foram discretizados com elementos de casca e os outros 998 metros com elementos de viga. Para a casca foram utilizados 640 elementos S4R, para a viga 998 elementos PIPE31. Foram utilizados 16 elementos R3D3 para os elementos rígidos de transição entre a viga e a casca. Para a discretização do solo foram utilizados 998 elementos PSI34 ligados com a viga e para a parte da casca foram utilizados 656 elementos SPRING1. Foram também utilizados 998 elementos RB3D2 conectados com os nós dos elementos PSI34, para a fixação da base dos elementos PSI34. Para a transição da viga para a casca foram utilizados 16 elementos rígidos R3D3. Este cone de transição bem como o modelo viga-casca foi descrito na seção 4.3 e pode ser observado na figura 4.4

Na figura 4.12 está sendo representado o modelo de viga-elemento de interface e o modelo de viga-casca. Podemos observar uma pequena diferença entre os dois modelos. O modelo de viga-casca utiliza elementos de interface PSI na região da viga e na região da casca é utilizado elementos SPRING1. O modelo de viga-elemento de interface utiliza somente elementos de interface para representar o solo. Essa diferença portanto pode ser atribuída a utilização de elementos de mola para representar o solo como foi comentado na seção 4.5.1 e apresentado também na figura 4.11.

Neste modelo misto de viga-casca não foi observada flambagem local. Na figura 4.13 é apresentado o deslocamento vertical para este modelo.

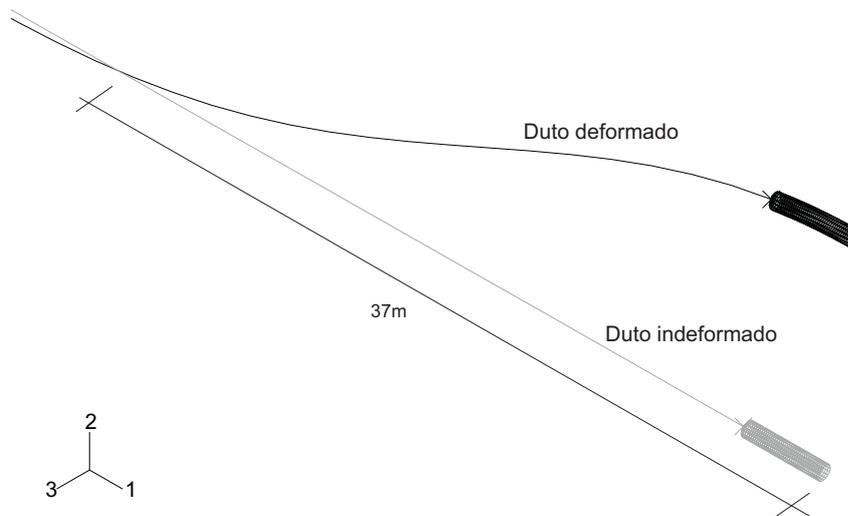


Figura 4.13: Flambagem local com elemento viga-casca

4.6

Modelo numérico de Battista, Pasqualino e Alves

Este modelo numérico foi desenvolvido por Battista, Pasqualino e Alves[21] e é simulado com vigas e molas. O objetivo deste trabalho foi analisar um oleoduto com 16 polegadas de diâmetro externo, aço API LX-52 instalado na Baía de Guanabara na cidade do Rio de Janeiro. Este oleoduto parte da Refinaria de Duque de Caxias e chega a ilha D'água, e foi dimensionado para transportar óleos a temperatura de $75^{\circ}C$. Outro duto que transporta óleos a temperatura ambiente como gasolina e diesel está localizado a uma distância de um metro do duto que transporta fluidos com temperatura elevada. Depois de cinco anos da instalação destes dutos, o solo sobre o duto foi removido por movimentos de marés e ondas. Somente uma parte do duto ficou com um pequeno cobrimento de 5cm enquanto o resto do duto com um cobrimento de

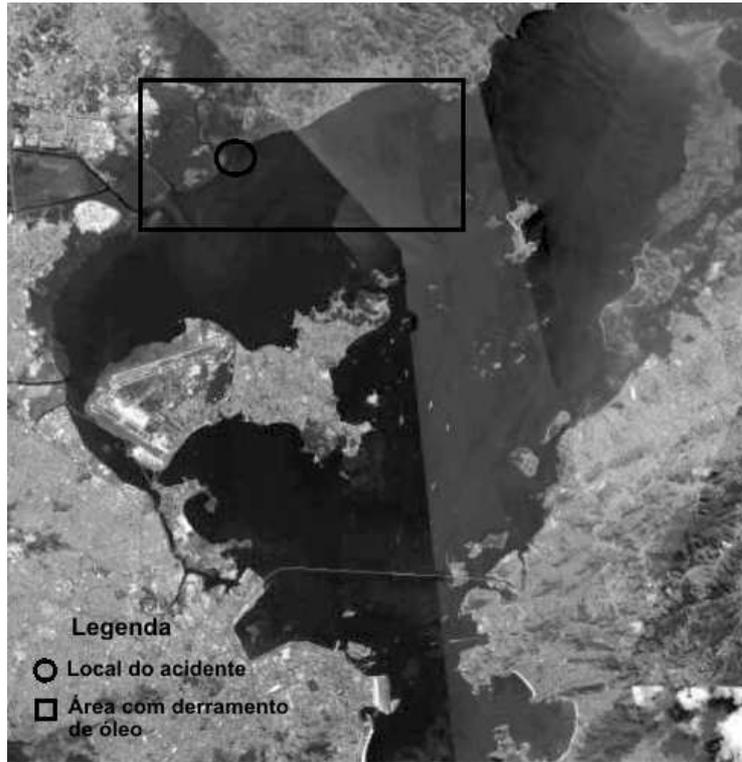


Figura 4.14: Baía de Guanabara - Foto aérea [46]

2m. Segundo Almeida et al.[1] o duto estava bombeando óleo a temperatura de $95^{\circ}C$, $20^{\circ}C$ acima da temperatura para o qual o duto foi dimensionado. Devido ao carregamento térmico excessivo e às condições de contorno do duto, o duto rompeu e espalhou cerca de 1,35 milhões de litros de óleo na Baía de Guanabara. Na figura 4.14 podemos observar o local do acidente e a região atingida pela falha do duto.

A partir de fotos aéreas foi feita uma aproximação do duto com carga térmica com base na configuração do duto frio, pois este sofreu menos deslocamento. A configuração utilizada para o modelo está representada na figura 4.15.

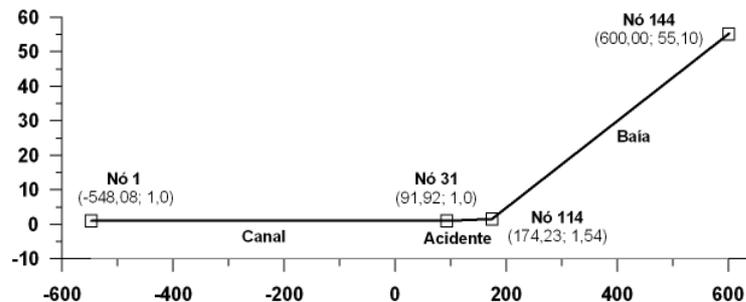


Figura 4.15: Representação dos nós principais com suas coordenadas [21]

Foi utilizado no modelo elementos bidimensionais com dois nós e três graus de liberdade por nó (dois deslocamentos e uma rotação). A malha foi

dividida em três regiões: Canal, Acidente e Baía. Estas regiões podem ser observadas na figura 4.15. Foram utilizadas molas com comportamento elasto-plástico para representar o solo. O elemento de mola possui dois nós, sendo um ligado a viga e o outro fixo. A resistência axial do solo não foi considerada. O duto foi considerado elasto-plástico com encruamento isotrópico. Os valores dos coeficientes de rigidez das molas, as características geométricas do duto para cada região e os valores da relação tensão-deformação do duto estão apresentadas nas tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente.

Tabela 4.6: Valores dos coeficientes de rigidez das molas para as regiões: Canal, Acidente e Baía [21]

	Canal	Acidente	Baía
Força(kN/m)	2,04	0,44	8,50
deslocamento(cm)	0.5	0.2	1.25

Tabela 4.7: Características do duto para as três regiões: Canal, Acidente e Baía [21]

	Canal	Acidente	Baía
Módulo de elasticidade	207000MPa		
Tensão de escoamento	365MPa		
Coefficiente de poisson	0,30		
Coefficiente de dilatação térmica	$1,17 \cdot 10^{-5}/^{\circ}C$		
Diâmetro externo do duto (cm)	40,64		
Espessura do duto (cm)	0,79248	0,79248	1,11252
cobrimento (m)	0,25	0,05	1,9

Tabela 4.8: Valores da relação tensão-deformação do duto

Tensão (MPa)	Deformação
50	0,0
365	0,0034
425	0,0085
512	0,0434
558	0,1749

4.6.1

Modelo numérico viga-elemento de interface do caso da Baía de Guanabara

Para o modelo da Baía de Guanabara foram utilizados elementos semelhantes aos descritos na seção 4.2, a diferença é que neste modelo os elementos são bidimensionais. Para representar o duto foram utilizados 143 elementos

PIPE21 tanto para o duto quente quanto para o duto frio. O elemento PIPE21 possui dois nós e três graus de liberdade (dois deslocamentos e uma rotação). Estes elementos foram separados em três regiões, pois a linha do duto possui três regiões distintas com características geométricas diferentes descritas na tabela 4.7. Na região do Canal e da Baía foram utilizados 30 elementos para cada região e na região do Acidente foram utilizados 83 elementos, pois é a região de análise e precisa de uma discretização maior. Para representar o solo foram utilizados elementos PSI24 na mesma quantidade que os elementos PIPE21 e também é separado em três regiões, pois a linha do duto possui variação significativa na cobertura do solo que pode também ser observada na tabela 4.7. Foi também inserido um contato entre as superfícies do duto quente e do duto frio na região de provável contato.

Foi desenvolvido outro modelo com as mesmas condições do modelo de viga-elemento de interface para a Baía de Guanabara. A diferença do modelo está na geometria e na discretização do modelo. Foi utilizada uma geometria mais próxima da geometria real, pois no trabalho de Battista, Pasqualino e Alves[21] foi utilizada uma geometria simplificada do duto. A discretização do duto também foi diferente; este foi discretizado até o ponto onde ocorreu o deslocamento do duto. No trabalho de Battista, Pasqualino e Alves[21] a discretização estava sendo feita em apenas uma região da ocorrência da flambagem. A diferença entre as duas geometrias pode ser observada na figura 4.16. A região de maior discretização da linha do duto para a geometria simplificada [21] vai do ponto 1 ao ponto 2. Para a nova geometria a região de maior discretização vai do ponto 1 ao ponto 3.

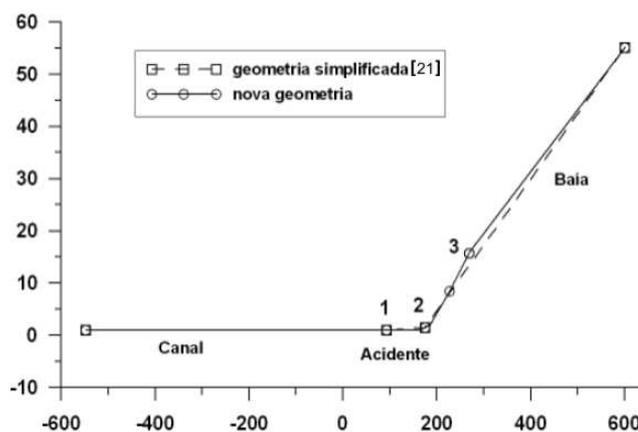


Figura 4.16: Representação da geometria dos modelos com geometria simplificada [21] e com nova geometria

Na figura 4.17 temos os valores da temperatura versus o deslocamento lateral para modelo com a geometria do trabalho de Battista, Pasqualino e

Alves[21], para o modelo com uma nova geometria e modelo considerando apenas o duto quente, sem a presença do duto frio, considerando a temperatura inicial (T_i) para todos os modelos de $20^{\circ}C$.

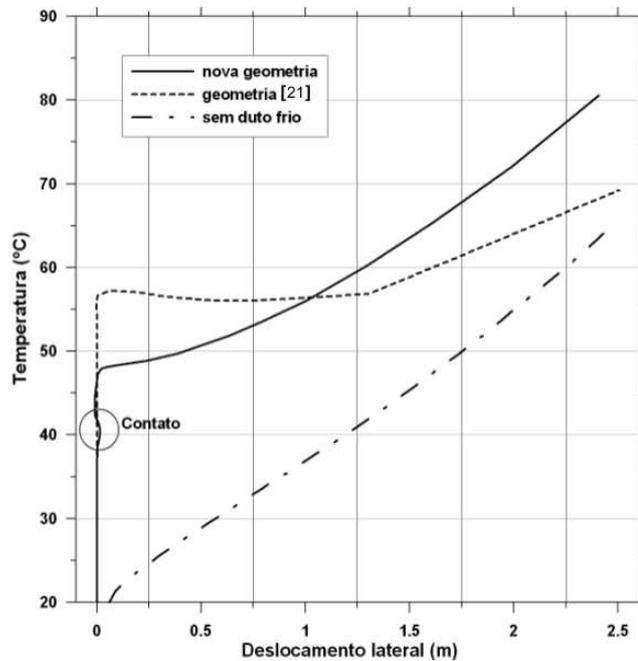


Figura 4.17: Deslocamento lateral versus Temperatura para o duto da Baía de Guanabara ($T_i = 20^{\circ}C$)

Podemos observar uma diferença significativa entre os modelos apresentados na figura 4.17. O modelo do duto com a geometria de Battista, Pasqualino e Alves[21] apresentou uma temperatura crítica maior do que o modelo com a geometria mais próxima da geometria real. O modelo do duto com geometria simplificada [21] não encostou no duto frio, já o modelo com nova geometria encostou no duto frio. No caso real da Baía de Guanabara o duto quente encostou no duto frio. A diferença no valor da temperatura crítica se deve ao fato que o modelo com nova geometria ocorreu o deslocamento do duto quente até ocorrer o contato no duto frio. Este contato não restringe os movimentos do duto quente e ocorre uma reação do duto frio na região de contato, aumentando a movimentação do duto quente na região onde este está menos restringido. A região de contato pode ser observada na figura 4.17.

A representação do deslocamento do duto quente da Baía de Guanabara é apresentada na figura 4.18. Nesta figura pode ser observada a região onde ocorre a reação do duto frio.

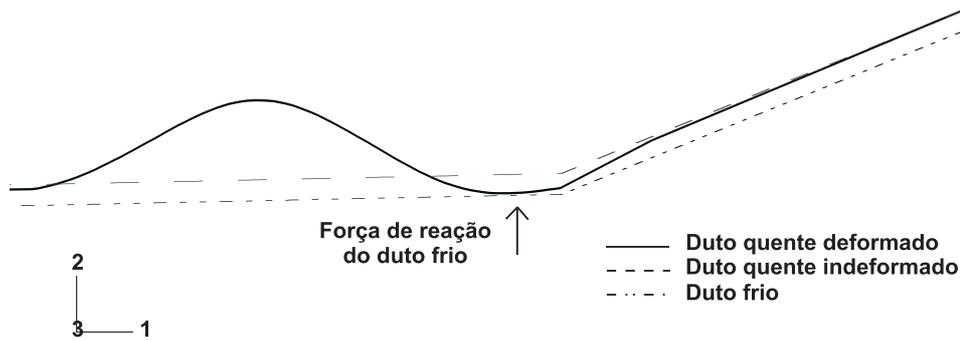


Figura 4.18: Representação do deslocamento do duto da Baía de Guanabara

Na figura 4.17 observa-se também que para o modelo sem o duto frio não ocorre a flambagem. A geometria inicial do duto pode ser comparada a um duto em zig-zag, como foi analisado na seção 4.4 para o trabalho experimental de Souza[19].

No trabalho de Battista, Pasqualino e Alves[21] foi realizada uma análise da temperatura crítica com relação à temperatura inicial que está descrita na tabela 4.9. Pode-se observar que a temperatura crítica (T_c) aumenta com o aumento da temperatura inicial (T_i). A temperatura crítica encontrada no modelo viga-elemento de interface para a geometria simplificada [21] é muito próxima da obtida no trabalho dos mesmos autores. Para a temperatura inicial de $25^{\circ}C$ foi obtido um valor para a temperatura crítica de $61^{\circ}C$ e para a temperatura inicial de $45^{\circ}C$ foi obtido um valor para a temperatura crítica de $88,93^{\circ}C$.

A temperatura inicial utilizada para a análise foi de $20^{\circ}C$ e o valor da temperatura crítica para o modelo com geometria simplificada foi de $57,22^{\circ}C$. Para o modelo com a nova geometria foi utilizada para a análise uma temperatura inicial de $20^{\circ}C$ e a carga crítica obtida foi de $48^{\circ}C$. Os valores para a temperatura crítica para os modelos com geometria simplificada e nova geometria podem ser obtidos da figura 4.17.

Tabela 4.9: Análise da temperatura crítica [21]

$T_i(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$
25	62,31
35	71,25
45	90,17

4.6.2

Modelo viga-casca do caso da Baía de Guanabara

Para este modelo foram utilizados os dados apresentados na seção 4.6. O modelo foi considerado com elementos de viga e elementos de casca descritos na seção 4.3 e a geometria utilizada foi a nova geometria descrita na seção 4.6.1. Foram utilizados 227 elementos PIPE31 para o duto quente, na região onde o duto é considerado como viga. Na região onde o duto é modelado como casca, foram utilizados 2560 elementos S4R em um trecho de 10 metros de comprimento do duto. Para representar o solo no trecho onde há elementos de viga, foram utilizados elementos de interface. Ligado ao duto quente foram utilizados 227 elementos PSI34 dividido em três regiões: canal com 30 elementos PSI34, acidente com 73 elementos PSI34 e Baía com 124 elementos PSI34. Para a região da casca foram utilizados 2576 elementos SPRING1.

O duto frio, foi discretizado com 237 elementos PIPE31 e na discretização do solo ligado ao duto frio foram utilizados 237 elementos PSI34.

Para a região de provável contato entre ambos os dutos foram utilizados elementos de contato ITT31, que são elementos tridimensionais contato duto-duto com três graus de liberdade. As configurações do deslocamento para o modelo de viga-casca estão na figura 4.19.

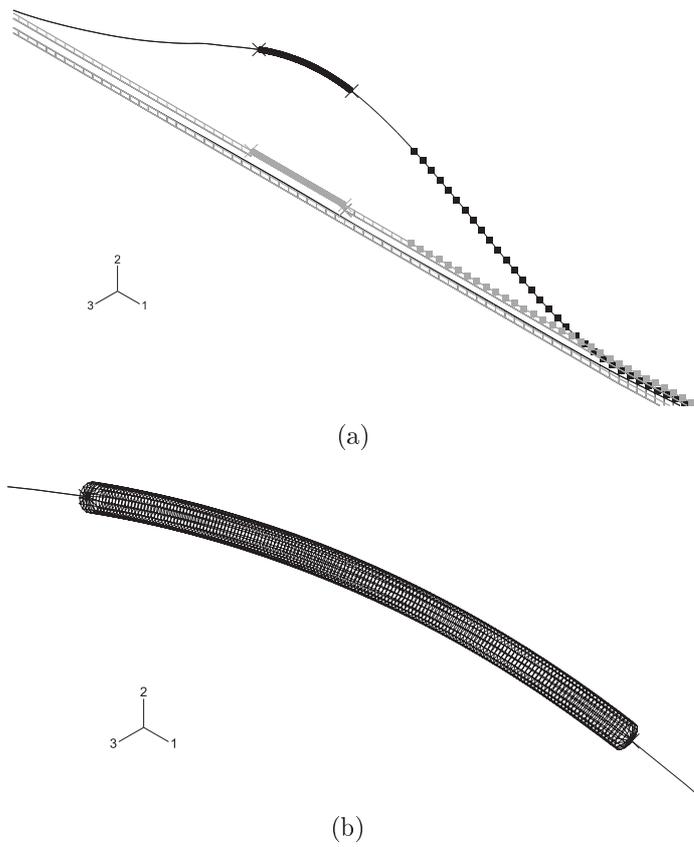


Figura 4.19: Representação dos deslocamentos para o modelo de viga-casca do caso da Baía de Guanabara (a) visão geral (b) detalhe da região da casca