

1

INTRODUÇÃO

As linhas de tubulação são o principal meio de transporte de petróleo e gás, portanto são de grande importância para as indústrias destes setores.

A grande relevância destes setores no panorama econômico e ambiental promove a necessidade de um melhor entendimento do comportamento de dutos. Paralelamente convém reavaliar o procedimento atual de projeto levando em conta novos padrões tecnológicos e de controle ambiental.

Linhas de tubulação são estruturas que trabalham em meio ambientes complexos. O comportamento estrutural de tubulações é complexo devido à presença de diversos fatores como a flambagem local de casca, interação solo-estrutura, e combinação de cargas externas e deformações impostas. Uma linha de tubulação e o esquema do duto enterrado pode ser observado nas figuras (1.1) e (1.2).



Figura 1.1 Linha de tubulação.

Apesar do complexo comportamento e condições impostas ao duto o procedimento de projeto é em geral baseado em análises considerando comportamento elástico linear de tensões. Princípios de projeto com base em tensões de serviço não podem ser considerados como uma aproximação racional para o problema de projeto de duto.

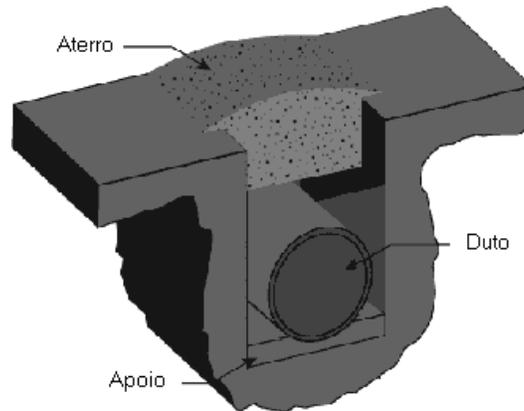


Figura 1.2 Esquema de duto enterrado.

Freqüentemente, as cargas últimas levam uma estrutura a um comportamento caracterizado pela presença tanto de relações tensão-deformação não-lineares como de grandes deslocamentos. Isto ocorre por exemplo para condições de deslocamentos ou deformações impostas onde o escoamento local é significativo e há possibilidade de ocorrência de flambagem local e grandes deformações. 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 esta razão, métodos de análise que incorporem os efeitos não-lineares são necessários ao projeto, pois, reduzindo a incerteza na determinação do comportamento do duto, pode-se ter um projeto mais econômico para o mesmo nível de segurança.

Reconhecendo o inadequado procedimento de projeto acima exposto faz-se necessária uma análise mais racional do problema. Neste sentido um substancial esforço é feito aqui para melhorar o conhecimento e entendimento do comportamento de dutos.

O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar uma metodologia de análise numérica para dutos enterrados considerando não-

linearidades geométricas e do material usando uma formulação Lagrangeana total capaz de avaliar deformações e tensões para estados elásticos ou plásticos.

1.1

Revisão Bibliográfica

1.1.1

Critérios de Projeto Usados na Indústria

Deformações longitudinais têm sido freqüentemente escolhidas como a grandeza sobre a qual se estabelece o critério a ser levado em conta para solicitações impostas por deformações, pelas seguintes razões:

- Primeiro, as cargas surgem para deformações impostas. Isto é, tensões surgem para satisfazer relações deformação-deslocamento compatíveis com a estrutura ou entre a estrutura e seu meio de suporte. A magnitude das forças envolvidas depende da deformação imposta e mais ainda da rigidez da estrutura. Deformações, mais do que forças são grandezas dominantes que controlam a resposta da estrutura sob essas condições.

- Os deslocamentos envolvidos em diversos tipos de movimentos levam usualmente a forças suficientes para deformar o duto na faixa elasto-plástica do material. Uma vez que curvas típicas de tensão-deformação para dutos de metal são muito suaves na faixa elasto-plástica, deformações são grandezas muito mais sensíveis que tensões com relação ao estado de equilíbrio do duto.

- A flambagem da parede do duto depende principalmente da magnitude da deformação longitudinal de compressão. No caso da deformação longitudinal de tração, o comportamento inelástico total é limitado pela deformação longitudinal fornecida pela tensão circunferencial devido á pressão interna.

Buscam-se critérios de deformação para prevenir falhas de dutos. Estes podem falhar por vazamento associado à presença de uma fissura de propagação, ou por excessiva deformação por flambagem local.

Um critério em termos da máxima deformação de tração na direção longitudinal é usado para prevenir a formação de fissuras e sua propagação. O

valor comumente adotado é 0,5%, segundo CANUCK ENGINEERING Ltd. (1983). Estudos posteriores, PRICE (1990), mostram que este é em geral, um critério conservador.

O máximo valor aceitável de deformação longitudinal de compressão é normalmente fixado como o correspondente à carga de flambagem local na parede do duto. Isto se baseia no fato de que o cilindro de paredes finas tem comportamento instável no regime pós-flambagem.

1.1.2

Estudos Experimentais da Deformação de Flambagem.

Muitos testes foram desenvolvidos no passado para estudar o comportamento de dutos sujeito a varias combinações de carga, a maioria com foco na resistência à flambagem originada pela deformação neste estado.

Pode-se mencionar BOUWKAMP e STEPHEN (1973, 1974, 1975), KOROL (1979) e SHERMAN (1976), como alguns destes estudos.

Bouwkamp e Stephen desenvolveram uma serie de testes na Universidade de Berkaley, em 1973, para dutos a serem usados na tubulação da Trans-Alaska. As condições de carga consideradas foram momento fletor variável e pressão interna constante. O principal objetivo deste teste foi pesquisar as deformações sofridas pelo duto. Depois que os resultados dos primeiros testes mostraram que a integridade operacional do duto não é prejudicada pela flambagem, outros testes foram realizados em regime pós-crítico. Desafortunadamente apenas um número reduzido de medidas foram tomadas.

A principal conclusão deste teste foi que falhas que ocorrem ao final da etapa pós-crítica, resultam de excessivas deformações locais, exceto para o caso de rasgamento da parede do duto. Os dutos flambam para valores relativamente baixos de curvatura. As distorções da seção transversal são pequenas para afetar a capacidade de fluxo do duto.

Korol (1979) desenvolveu uma serie de 11 testes para dutos de um vão e dois vãos a fim de comparar seus resultados com as expressões teóricas da flexão inelástica e compressão axial. O foco desta serie de testes foi pesquisar a relação D/t limite para seções circulares que podem ser usadas no projeto plástico. As seções de teste foram carregadas com momentos uniformes. As

propriedades geométricas dos espécimes e deformação de flambagem são apresentadas na tabela (1.1).

Espécime	<i>D</i>	<i>t</i>	<i>D/t</i>	σ_y	ϵ flambagem	E_T flambagem
	pol	pol		ksi	%	ksi
1	4.50	0.156	28.9	44.8	0.82	380
2	6.63	0.156	42.5	44.2	0.59	560
3	6.63	0.188	35.2	53.5	0.72	500
4	20.00	0.250	80.0	54.4	0.17	100000
5	10.75	0.219	49.1	44.4	0.49	690
6	12.75	0.250	51.0	54.5	.052	740
7	14.00	0.250	56.0	43.2	0.44	810
8	16.00	0.250	64.0	44.8	0.46	750
9	4.50	0.156	28.9	44.8	-	-
10	10.75	0.219	49.1	44.4	-	-
11	20.0	0.250	80.0	52.3	0.43	1000

Tabela 1.1 – Propriedades e resultados dos testes de Korol.

Sherman (1976) desenvolveu uma serie de testes para determinar a redistribuição de momentos para dutos e determinar se o principio plástico poderia ser aplicado ao projeto de dutos sujeitos a flexão. Um total de 18 espécimes com diâmetros nominais (10.75 polegadas) foram testados. Três tipos de suporte foram incluídos neste teste: apoios simples nos extremos, apoios fixos nos extremos e um duto em balanço.

As propriedades dos espécimes são apresentadas na tabela (1.2).

Os resultados para esses testes com falha por flambagem também são incluídos na tabela (1.2), onde a curvatura de flambagem foi definida pela variação do diâmetro nominal do duto igual a 0.05 polegadas ou por visualização da flambagem.

Sherman conclui que espécimes com uma relação *D/t* de 35 ou menor podem desenvolver um momento plástico e sustentar suficiente rotação para uma redistribuição de momentos completa. Seções de duto com relação *D/t* de 102 têm flambagem em regime elasto-plástico.

Espécime	Diâmetro meio	Espessura meia	f_y	D/t	L	Condição contorno	ϕ Flambagem	ϕ/ϕ_y	ϵ flambagem
	pol	pol	kis		pol		$10^{-4}/\text{pol}$		%
7	10.785	0.221	58.6	48.6	12	simples	12.54	3.3	0.676
8	10.785	0.221	58.6	48.6	20	fixo	22.73	6.0	1.226
9	10.785	0.221	58.6	48.6	10	balanço	32.04	8.5	1.728
10	10.752	0.194	61.1	55.4	12	simples	7.52	1.9	0.404
11	10.752	0.194	61.1	55.4	20	fixo	12.70	3.2	0.683
12	10.752	0.194	61.1	55.4	10	balanço	32.55	8.3	1.750
13	10.751	0.139	41.8	77.3	12	simples	6.10	2.3	0.328
14	10.751	0.139	41.8	77.3	20	fixo	5.83	2.2	0.313
15	10.751	0.139	41.8	77.3	10	balanço	18.76	7.0	1.008
16	10.746	0.097	44.9	110.7	12	simples	8.30	2.9	0.446
17	10.762	0.105	44.9	102.5	20	fixo	15.46	5.4	0.831

Tabela 1.2 – Propriedades e resultados dos testes de Sherman.

1.1.3

Estudos Analíticos da Deformação de Flambagem.

Predição da deformação de flambagem por métodos analíticos ou análises numéricas têm sido um tema muito estudado. A maioria dos estudos analíticos teve como foco cargas de flambagem e deformações de flambagem, estes estudos estão agrupados em duas vertentes: soluções baseadas em equações diferenciais e soluções numéricas baseadas em procedimentos com elementos finitos.

1.1.3.1

Soluções Baseadas em Equações Diferenciais

Soluções baseadas em equações diferenciais são usadas no caso de dutos comprimidos no eixo longitudinal porque o estado de tensão uniforme

existente anterior à flambagem é facilmente identificado teoricamente. A resposta clássica para a deformação de flambagem para dutos comprimidos no eixo longitudinal tem sido estudada por muitos pesquisadores. Pode-se citar BRUSH AND ALMROTH (1975) entre os pesquisadores que têm estudado estes efeitos.

Para dutos comprimidos no eixo longitudinal como apresenta a figura (1.3) a deformação elástica crítica pode ser expressa por:

$$\varepsilon_{cr} = 1.21 \frac{t}{D} \quad (1.1)$$

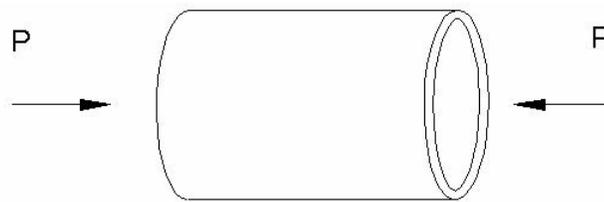


Figura 1.3 Duto submetido a compressão no eixo longitudinal.

BATTERMAN (1965) usou um procedimento similar tanto para flambagem elástica como para flambagem plástica. A partir da equação diferencial incremental de equilíbrio, Batterman empregou uma relação elasto-plástica tensão-deformação para avaliar incrementos de tensão de acordo com a teoria incremental ou teoria de deformação da plasticidade. Grandes esforços foram feitos para examinar as diferenças nas soluções pela controvérsia de que a teoria incremental é essencial para uma descrição do comportamento plástico irreversível. Contudo as cargas obtidas experimentalmente são um bom parâmetro, de acordo com as previsões da teoria da deformação. A deformação de flambagem elasto-plástico foi expressa como:

$$\varepsilon_{cr} = A \frac{t}{D} \quad (1.2)$$

onde

$$A = \frac{4\psi_s}{\sqrt{3((5-4\nu)\psi_t - (1-2\nu)^2)}} \quad (1.3)$$

para a teoria de plasticidade incremental. Já para a teoria de deformação a expressão acima é substituída por.

$$A = \frac{4\psi_s}{\sqrt{(3\psi_s + 2 - 4\nu)\psi_t - (1-2\nu)^2}} \quad (1.4)$$

Nas equações (1.3) e (1.4), ν é o coeficiente de Poisson e ψ_t e ψ_s são a razão entre o módulo elástico e o módulo tangente e entre o módulo elástico e o módulo secante, respectivamente.

WORKMAN (1981) fez uma análise para a NORMAN WELL PIPELINE. A tubulação atravessa o meio ambiente sub-ártico e está submetida a uma complexa combinação de pressão interna, forças axiais e momento fletor. Workman idealizou o problema para determinar a deformação de flambagem com relativa simplicidade achando a deformação de flambagem para um cilindro submetido à compressão axial e pressão interna. As hipóteses empregadas foram que a deformação de flambagem de um duto submetido à pressão interna e forças axiais são similares à deformação de flambagem do mesmo duto submetido a pressão interna e forças axiais e de flexão. Empregando a teoria da deformação da plasticidade e a representação curvilínea do material de Ramberg-Osgood e assumindo ondas seno nas direções longitudinal e circunferencial, a equação característica foi obtida para propriedades de material e dimensões do duto específicas. Esta equação é:

$$\phi(\sigma_x, \sigma_s, m, n) = 0 \quad (1.5)$$

onde σ_x e σ_s são tensões, m e n são o número de ondas, na direção longitudinal e circunferencial respectivamente. O estado de tensão mais baixo possível foi identificado como a deformação de flambagem. Isto foi determinado por um procedimento numérico no qual tensões circunferenciais foram assumidas como constantes e as forças de flambagem foram obtidas através de pesquisa de vários números de ondas. Desde que a teoria da deformação da

plasticidade foi empregada, a deformação de flambagem foi determinada para as tensões de flambagem.

1.1.3.2

Soluções Baseadas em Elementos Finitos

Procedimentos baseados em elementos finitos têm sido muito usados para determinar deformações e carga de flambagem de dutos. Em geral são empregados três tipos de modelos de elementos finitos para estes fins.

O primeiro é um modelo baseado em elementos de casca, como apresenta a figura (1.4), usado por muitos programas comerciais. Este modelo é capaz de modelar geometrias diversas bem com vários modos.

O segundo é baseado em elementos chamados “elbow element” ou elementos tipo cotovelo, como por exemplo o tipo de elemento usado pelo programa ABAQUS. elementos tipo cotovelo têm uma interpolação polinomial entre nós na direção longitudinal e uma interpolação de Fourier na direção circunferencial. Este modelo tem capacidade limitada para modelar deformações.

Finalmente o modelo axisimétrico, modelo baseado em elementos simétricos em relação a seu eixo. Este modelo tem grandes vantagens de eficiência por ter um análise muito parecido ao procedimento usado nos esforços e de deformações planas. Neste trabalho a modelagem do duto, utiliza este tipo de elementos por ter esforços e deformações simétricos com respeito ao eixo vertical da seção transversal do duto.

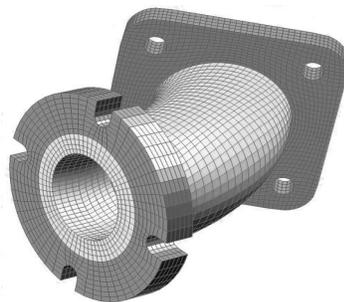


Figura 1.4 Discretização com elementos tipo casca.

Um estudo numérico foi realizado por ROW (1983) para dutos submetidos à pressão interna e carga axial. As paredes do duto foram modeladas usando elementos finitos sólidos assimétricos de 8 nós. Uma relação tensão-deformação multilinear geral com encruamento cinemático foi adotada e uma imperfeição assimétrica foi introduzida para representar a variação de espessura. Com um modelo axisimétrico a curva tensão-deformação média e a deformação crítica correspondente ao enrugamento o flambagem foram obtidas. O problema de flexão foi modelado usando um elemento inelástico tridimensional de casca com grandes deformações. Foram empregadas na análise de flexão a curva real de tensão-deformação e a curva de tensão-deformação média. Os resultados da análise indicam que se comparadas as deformações críticas da fibra externa para ambos os casos de flexão e análise axisimétrica, a deformação crítica da fibra extrema em análises de flexão foi maior que na análise axisimétrica. Uma conclusão similar para curvaturas correspondentes à deformação da fibra extrema foi também validada. O uso das curvas tensão-deformação média resulta na mesma diferença que na resposta momento-curvatura para a solução usando propriedades do material corrente. Esta diferença é significativa na faixa de pós-flambagem.

BUSHNELL publicou uma série de trabalhos (1974,1976,1981 e 1,984), nos quais é apresentado um modelo axisimétrico para análise de cascas de revolução. Foi desenvolvido um programa para esta proposta, BOSOR5. Com esta ferramenta, comportamento de flambagem de vários tipos de cascas de revolução foram analisados para condições de carga e de contorno diversas. A análise de bifurcação se baseou na análise dos autovalores e uma solução incremental foi empregada para a análise não-linear, com o objetivo de determinar a carga de bifurcação ou carga limite.

1.1.4

Análises de Dutos Submetidos a Recalque.

A análise de dutos submetidos a recalque diferencial engloba muitos aspectos. Recalque de solo inclui deformação do duto com distribuição e redistribuição de deformações e tensões existentes na linha previamente ao recalque. A magnitude e extensão da perturbação dependem da resposta

estrutural do duto à deformação imposta pelo recalque. A interação duto-solo é um tema importante porque na interação o duto como a estrutura, e o solo como um meio de suporte, devem ser modelados apropriadamente.

Há em geral dois tipos de modelos analíticos considerando as seguintes propostas distintas.

- No primeiro modelo a interação duto-solo inclui um segmento de duto e do solo circundante, relativamente pequenos.

A proposta deste modelo é analisar a interação entre o duto e o solo com foco na resistência proveniente do solo; conseqüentemente modelos simples para o duto são empregados.

Exemplos deste tipo de análise são os trabalhos desenvolvidos por SELVADURAI (1983), SELIG (1988) e WAGNER (1989), onde os parâmetros corretos do solo usados para o projeto de dutos enterrados são a principal preocupação. A escala do modelo para determinar os parâmetros do solo é relativamente pequena, razão pela qual o solo é considerado homogêneo. Estudos experimentais, SULTANOV (1986) e WAGNER (1989), foram desenvolvidos para estabelecer um modelo analítico.

- O segundo tipo de modelo é o modelo de interação tubo-solo que inclui um comprimento considerável de tubulação e solo de apoio. A proposta deste modelo é analisar a resposta do duto quando este é submetido a deformações impostas aplicadas através da interação duto-solo.

Neste tipo de análise o principal interesse foi pesquisar o comportamento do duto pelo que se tem um modelo relativamente complexo para o duto de modo que se possam incluir as não linearidades da geometria e do material e um modelo simplificado para solo, semelhante a um solo de molas elasto-plásticas. Neste caso estudos experimentais foram difíceis de se desenvolver, porque comprimentos longos de dutos têm que ser cobertos e o solo circundante é difícil de modelar. Dois desses estudos podem ser mencionados: IIMURA e NISHIO (1986), onde somente deformações axiais foram consideradas, e testes sob efeitos de fortes geadas, WILLIAMS (1992).

Neste tipo de modelo, dutos podem ser discretizados com elementos tipo viga ou através de outras opções como elementos de casca ou tubo. Um grande número de graus de liberdade são introduzidos em uma discretização com modelos baseados em elementos casca, tornando uma análise deste tipo custosa em termos de recursos computacionais.

NYMAN (1983) desenvolveu um estudo em análises de recalques por degelo para dutos enterrados. Depois de discutir a classificação das

configurações de recalques por degelo e seus mecanismos, um modelo de viga sobre fundação elástica foi proposto.

Neste modelo o duto é modelado como um elemento de viga elástica com comportamento limitado por um critério em tensões máximas admissíveis. Os carregamentos do solo e condições de apoio são representados por molas de solo fixadas ao duto. A cada mola de solo é associada uma relação carga-deslocamento, na forma de uma curva elasto-plástica perfeita.

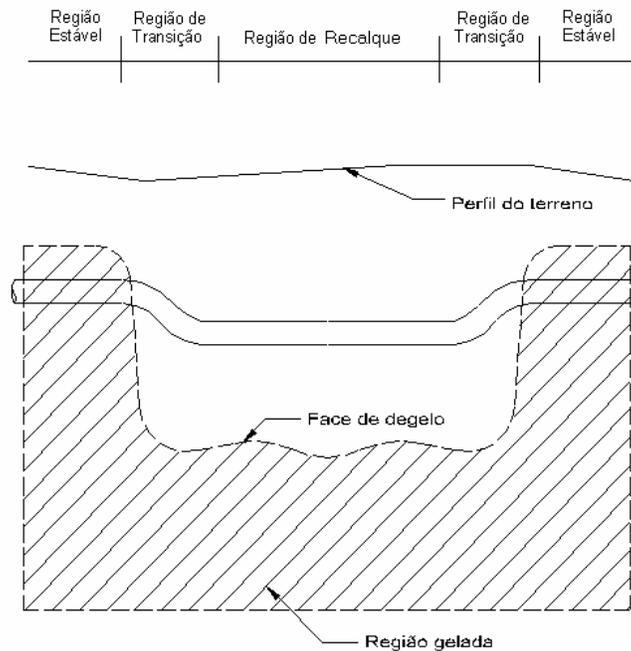


Figura 1.5 - Análise de recalques de degelo para dutos enterrados NYMAN (1983)

Há três aspectos de efeitos de solo a serem considerados na modelagem por molas. São eles:

- Solo de recobrimento e sobrecarga acima do duto.
- Apoio sob o duto.
- Atrito longitudinal ao longo do duto.

Três tipos de mola de solo foram projetadas para esses efeitos:

- Molas de levantamento (uplift).
- Molas de apoio.
- Molas longitudinais.

As regiões de recalque e transição são apresentadas na figura (1.5).

Um modelo mais elegante foi proposto por ROW et al (1983) que se dedicou ao desenvolvimento de programas especializados para análises de tensões e deformações de dutos.

O modelo apresentado em seu trabalho compreende as teorias básicas implementadas no programa PIPLIN III.

As linhas de tubulação foram modeladas como uma serie de elementos finitos do tipo viga inelástica no plano. O material da linha de tubulação foi representado por um modelo de material proposto por MROZ (1967), que considera escoamento para tensões biaxiais (circunferenciais e longitudinais).

A seção transversal é considerada constante (circular). A flambagem local das paredes do duto não foi modelada diretamente; em vez disto deformações críticas de flambagem foram usadas para governar o critério de falha. O solo foi modelado como uma fundação de tipo de Winkler não-linear.

Um modelo interessante foi proposto por SELVADURAI (1985), no qual elementos de viga foram usados para modelar o duto e elementos de contorno foram usados para modelar o solo circundante. A vantagem neste modelo é que o solo foi modelado como um meio contínuo elástico tridimensional; conseqüentemente, os efeitos de solo circundante foram mais bem simulados. Por outro lado esta modelagem resulta em sistemas de equações de grande escala.

1.1.5

Resposta de Linhas de Tubulação sem Flambagem

Considerando um duto com comportamento elasto-plástico com encruamento do material, a resposta do duto, em geral, pode ser caracterizada por uma relação momento-curvatura com encruamento, provando que o flambagem local não ocorre. A predição de resposta elasto-plástica pode ser convenientemente aplicada neste caso.

Para quaisquer carga e curvas tensão-deformação de material elasto-plástico, os valores de força axial e momento fletor para o duto podem ser determinados dentro de qualquer tolerância prescrita, por integração ao longo do caminho de deformação. Em geral, tensões resultantes podem ser determinadas por integração de tensões finais sobre a seção transversal que permanece

circular. As tensões podem ser avaliadas usando relações elasto-plásticas incrementais com controle de carregamento e descarregamento associado com a função de carregamento a cada ponto de integração na seção transversal, ver figura (2.4). Para resultados mais corretos tensões deveriam ser determinadas usando uma técnica sub-incremental ou através de algoritmos implícitos de integração. Na ausência de flambagem local, a técnica de integração direta apresenta uma solução correta.

1.2

Organização do Texto

No capítulo 2 é apresentada a formulação geral para a análise de linhas de tubulação, levando em conta as hipóteses fundamentais, relações deformação-deslocamento, relações constitutivas e interação solo-duto. 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.

O capítulo 3 apresenta o método de solução para a equação não-linear obtida no capítulo anterior. Estes métodos são métodos incrementais e iterativos. Também são apresentados critérios de atualização da geometria e critérios de convergência.

A implementação computacional é apresentada no capítulo 4, que descreve a entrada de dados, a solução passo-a-passo e apresenta resultados.

Os exemplos são apresentados no capítulo 5 através de aplicações práticas.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.