

5 Avaliação dos fatores de concentração de deformação através do método de elementos finitos

O objetivo desta seção é, através de diferentes métodos e modelos, avaliar os fatores de concentração de deformação gerados no enrolamento do duto pela instalação de sapatas de anodo na superfície externa do duto. A região avaliada será sempre a do lado compressivo, pois neste é que ocorrerá a possível falha por flambagem localizada.

5.1. Descrição geral

O processo de avaliação apresentado neste capítulo foi gradual, com o início dos estudos a partir de modelos de elementos finitos com configuração simplificada até atingir um modelo com abordagem mais complexa. Estas etapas foram necessárias para o desenvolvimento do aprendizado em relação ao problema que até então não tinha sido avaliado e comprovado passo a passo. Os dutos considerados para as análises estão apresentados na Tabela 1.

A primeira etapa de desenvolvimento do trabalho procurou verificar se os modelos desenvolvidos utilizando o método de elementos finitos estavam de acordo com os critérios apresentados na Seção 3 e se estes apresentavam um comportamento que permitisse os efeitos de flambagem localizada respaldadas analiticamente.

Em seguida foi necessário gerar um modelo de duto bidimensional que flexionasse sobre um elemento rígido e fosse capaz de apresentar resultados condizentes com a deformação longitudinal analítica apresentada na Seção 4.2. Apenas o primeiro enrolamento foi avaliado. Com a aprovação deste modelo, o próximo passo foi transformá-lo em tridimensional e novamente comparar o seu resultado com o valor da deformação analítica. Estes dois modelos forneceram base e confiança para o desenvolvimento de modelos mais complexos.

A partir do instante em que um duto sem SNCF apresentou valores de deformação comparáveis aos resultados analíticos, elementos concentradores

de deformações como a sapata de anodo e o cordão de solda foram inseridos no modelo. O cordão de solda foi inserido apenas como elemento geométrico. As propriedades mecânicas foram as mesmas utilizadas no duto. Foram realizadas diversas análises onde parâmetros como a relação DE/t , diâmetro da sapata e distância do mesmo até o cordão de solda, sofreram variações com o objetivo de avaliar qual o efeito destas variáveis no SNCF.

Existem outros tipos de abordagem através do método de elementos finitos para solução do mesmo problema. A falta de uma base analítica comparativa devido aos elementos concentradores de deformação torna necessário uma avaliação com um modelo diferente do inicialmente proposto. Neste caso, o novo modelo apresentou uma superfície de carretel giratória assim como o problema real. Desta forma, foi possível avaliar a eficiência do modelo proposto inicialmente e determinar se uma outra abordagem seria mais vantajosa em termos de eficiência computacional e confiabilidade de resultados.

Quando a primeira fase do ciclo completo foi estudada e entendida, o movimento seguinte foi avaliar o ciclo completo de enrolamento e desenrolamento observando o efeito de concentração de deformação que a sapata de anodo poderia produzir ao longo da história do duto. O mesmo modelo bidimensional inicialmente abordado foi reestruturado para o ciclo completo a fim de definir a curvatura que o “Straightener” impõem para retificar o duto após o ciclo de carregamento na embarcação. Esta curvatura foi reutilizada no modelo tridimensional já que este possui um custo computacional elevado.

Com o comportamento do duto definido foram implementados outros elementos que poderiam influenciar na reposta dos modelos como, por exemplo, revestimentos e carga de enrolamento.

As seções seguintes farão uma abordagem mais detalhada da seqüência de desenvolvimento dos modelos apresentados.

5.2.Método de elementos finitos

O método de elementos finitos teve seu desenvolvimento iniciado em meados do século passado. No entanto, devido à sua complexidade algébrica e à necessidade de realizar uma grande quantidade de cálculos, este método caiu em desuso até o desenvolvimento dos primeiros computadores. A partir deste instante o método teve seu retorno no meio científico e começou a ser revisto pela sua aplicabilidade em disciplinas ligadas a engenharia.

A partir da década de 80 este método apresentou um forte desenvolvimento, pois foi o momento da história em que os computadores deixaram de ser grandes “mainframes” e se tornaram mais comuns em escritórios de engenharia com o advento dos computadores pessoais. Os micro-computadores permitiram a aceleração do desenvolvimento de “solvers” e interfaces capazes de resolver os problemas de engenharia de forma mais econômica evitando diversos testes em escala real até a obtenção de um protótipo confiável.

Atualmente, computadores pessoais são capazes de resolver problemas de engenharia de grande complexidade. O movimento atual do mercado visa gerar interfaces cada vez mais fáceis de operar, a fim de atingir um maior número de engenheiros de projeto e ao mesmo tempo reduzir o tempo de resposta aos problemas propostos.

Tecnicamente, o método de elementos finitos é um método onde um sistema físico, como um componente ou estrutura de engenharia, é dividido em pequenas sub-regiões/ elementos. Cada elemento pode ser caracterizado como uma simples unidade no espaço na qual o comportamento mecânico pode ser calculado por uma função de forma interpolada a partir dos valores dos nós que constituem o elemento. A união dos resultados das funções de forma de cada elemento resulta na resposta para um sistema físico completo. Na formulação de elementos finitos o princípio do trabalho virtual, junto com as funções de forma é utilizado para transformar as equações diferenciais de equilíbrio em equações algébricas.

A exigência deste trabalho é que o modelo de elementos finitos seja confiável na previsão de efeitos de flambagem e colapso (Figura 41) através da

permissibilidade de grandes deformações presentes durante o processo de enrolamento de dutos. Desta forma, deve-se dar atenção especial a determinados pontos durante a modelagem, como os indicados abaixo.

- O modelo deve permitir grandes deformações e grandes rotações;
- Os modelos devem ter uma boa representação das condições de contorno;
- Os materiais envolvidos devem estar de acordo com as características mecânicas apresentadas;
- A aplicação dos carregamentos nos modelos deve ser de forma seqüenciada e planejada;
- O modelo deve ter a capacidade de apresentar modos de falha condizentes com o problema proposto.

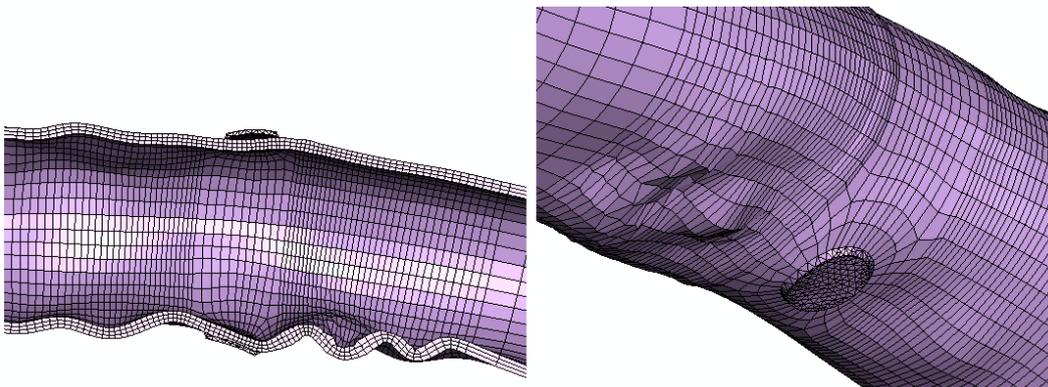


Figura 41 – Flambagem localizada de um duto com sapata de anodo

Este trabalho exigiu a utilização de análises de elementos finitos devido à complexidade do modelo e ao alto custo caso fosse necessário a montagem de uma bancada de teste real. O método de elementos finitos permite analisar um maior número casos modificando as variáveis definidas no escopo do problema.

O software utilizado para realizar as análises deste trabalho foi o ABAQUS, da empresa Dassault Systems. A escolha do software se deve pelos seguintes razões:

- Excelentes resultados em modelos não-lineares;
- Possibilidade de simular efeitos de flambagem/ colapso;
- Desenvolvimento das análises através de passos (“steps”);

- Fácil interface de trabalho;
- Geração de malha confiável;
- Disponibilidade de diversos modelos de contato;
- “Solver” de alta performance;
- Confiabilidade dos resultados;
- Possibilidade de solucionar análises em seqüência (“batch”).

O ABAQUS faz uso de análises através de passos. Cada passo possui um número de incrementos que podem ser ou não fixados. Nas análises realizadas neste trabalho o incremento foi sempre selecionado como “automático”. Isto permite em uma primeira abordagem de modelo que o software escolha o tamanho do incremento necessário através da avaliação do percentual de erro. Caso a evolução do incremento seja entendida, uma taxa constante pode ser fixada para tentar reduzir o tempo de reposta. Como as análises de enrolamento apresentaram um comportamento não-linear do tamanho do incremento ao longo das análises tornou-se inviável a possibilidade de fixar o valor do mesmo.

Portanto, nas próximas seções serão discutidos os modelos, as técnicas de modelagem empregadas, e os casos que serão validados ao longo deste trabalho.

5.3. Propriedades dos materiais elastoplásticos

O comportamento mecânico de materiais elastoplásticos foi discutido na Seção 2.3. Esta seção apresenta as propriedades mecânicas do aço e dos materiais poliméricos que foram utilizados nas análises de elementos finitos ao longo da Seção 5.

Dutos rígidos com aplicação offshore são comumente normalizados pela API 5L (2004). Para este trabalho todos os dutos utilizaram as propriedades do aço API 5L X60 por ser um material comumente utilizado no processo de enrolamento. As propriedades mecânicas deste material estão apresentadas na Tabela 8.

MATERIAL	S _y (MPa)	S _u (MPa)	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν
API 5L X60	414	517	207	7900	0.29

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do aço API 5L X60 [Vallourec-Mannesmann]

A utilização de materiais elastoplásticos não-lineares é necessária para que seja obtido um resultado coerente com os objetivos das análises deste trabalho, onde existe a possibilidade de ocorrerem efeitos de flambagem/colapso. A curva tensão-deformação do aço API 5L X60 utilizada foi proveniente da formulação de Ramberg-Osgood. O objetivo da utilização desta curva em relação a uma curva obtida a partir de testes reais é que as curvas de Ramberg-Osgood são mais conservativas que as obtidas em testes. A curva de Ramberg-Osgood (Vallourec-Mannesmann) pode ser obtida através da equação apresentada abaixo.

$$\varepsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} \cdot \left[1 + \frac{3}{7} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.7}} \right)^{n-1} \right] \quad (48)$$

Os parâmetros da curva Ramberg-Osgood referente ao aço API 5L X60 estão apresentados na Tabela 9. Estes parâmetros foram fornecidos pela empresa Vallourec-Mannesmann para o projeto de “Golfinho” executado pela empresa Subsea 7 para a Petrobras.

Parâmetro	Valor
σ _{0.7}	385.93 MPa
n	18.84

Tabela 9 – Parâmetros para a curva Ramberg-Osgood do material API 5L X60

O gráfico da curva tensão-deformação nominal pode ser apresentado a partir da equação (48) e dos parâmetros estabelecidos na Tabela 9. A Figura 42 apresenta o gráfico mencionado.

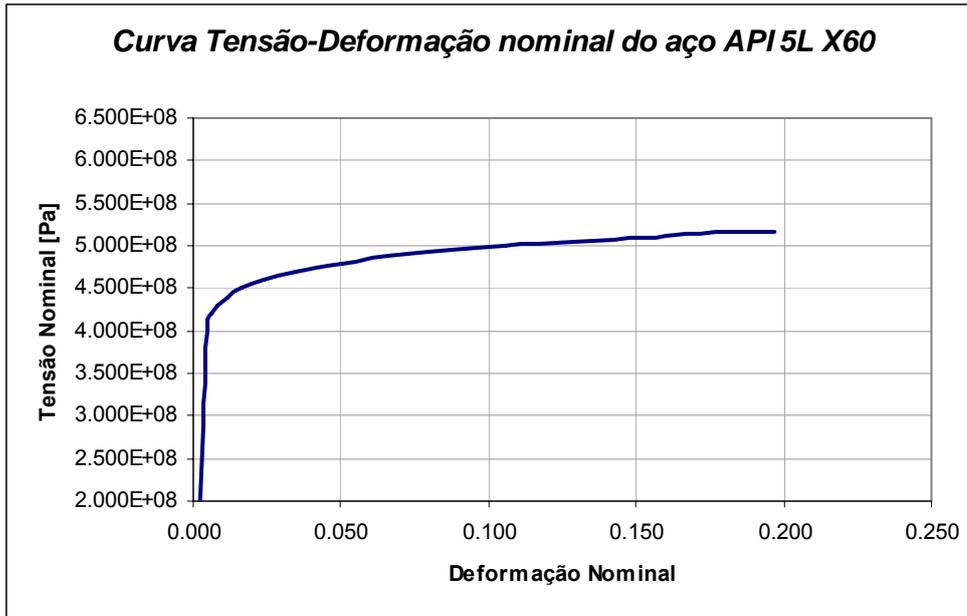


Figura 42 – Curva tensão-deformação nominal do aço API 5L X60 a partir da equação de Ramberg-Osgood

Como mencionado na Seção 2.3.3, o software ABAQUS utiliza como dado de entrada para as características do material a curva tensão verdadeira versus deformação plástica verdadeira. Utilizando as equações (5) e (10) é possível a partir dos valores nominais obter os valores verdadeiros para deformação e tensão respectivamente. A Tabela 10 apresenta todos os valores calculados.

Tensão Nominal (Pa)	Deformação Nominal	Tensão Verdadeira (Pa)	Deformação verdadeira	Deformação elástica	Deformação Plástica
0.000E+00	0.00%	0.00E+00	0.00%	0.00%	0.00%
4.140E+08	0.49%	4.16E+08	0.49%	0.20%	0.29%
4.200E+08	0.59%	4.22E+08	0.59%	0.20%	0.38%
4.300E+08	0.81%	4.33E+08	0.81%	0.21%	0.60%
4.400E+08	1.14%	4.45E+08	1.13%	0.21%	0.92%
4.500E+08	1.64%	4.57E+08	1.62%	0.22%	1.40%
4.600E+08	2.37%	4.71E+08	2.34%	0.23%	2.12%
4.700E+08	3.45%	4.86E+08	3.39%	0.23%	3.16%
4.800E+08	5.03%	5.04E+08	4.90%	0.24%	4.66%
4.900E+08	7.31%	5.26E+08	7.05%	0.25%	6.80%
5.000E+08	10.59%	5.53E+08	10.07%	0.27%	9.80%
5.100E+08	15.28%	5.88E+08	14.22%	0.28%	13.93%
5.170E+08	17.72%	6.09E+08	16.31%	0.29%	16.02%
5.170E+08	19.68%	6.19E+08	17.97%	0.30%	17.67%

Tabela 10 – Valores de tensão e deformação para o aço API 5L X60

No entanto, o software de elementos finitos exige que a deformação verdadeira referenciada ao valor da tensão no limite elástico seja igual a zero. O valor de 414MPa é referente ao SMYS, o qual já possui um valor associado de 0.29% de deformação plástica verdadeira, de acordo com a Tabela 10. Desta forma foi considerado o valor de 395MPa para a tensão no limite elástico, para que a transição do regime elástico para o plástico ocorra suavemente. Caso este requisito seja aplicado é introduzida uma descontinuidade na curva tensão-deformação verdadeira. A Tabela 11 apresenta os dados de entrada finais da curva tensão verdadeira versus deformação plástica verdadeira para o “X60”.

Tensão Verdadeira [Pa]	Deformação Plástica Verdadeira
3.95E+08	0.00%
4.16E+08	0.29%
4.22E+08	0.38%
4.33E+08	0.60%
4.45E+08	0.92%
4.57E+08	1.40%
4.71E+08	2.12%
4.86E+08	3.16%
5.04E+08	4.66%
5.26E+08	6.80%
5.53E+08	9.80%
5.88E+08	13.93%
6.09E+08	16.02%
6.19E+08	17.67%

Tabela 11 – Dados de entrada do ABAQUS da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira do API 5L X60

Na Seção 5.12 serão inseridos no modelo revestimentos poliméricos. Dois tipos de revestimento serão utilizados nestas análises: o Polipropileno Sólido e Polipropileno Sintático. Os revestimentos apresentam algumas características como isolamento térmico e resistividade a abrasão. Os dados destes revestimentos foram obtidos com a empresa “Bredero Shaw”, especializada na fabricação deste tipo de material. As propriedades mecânicas destes estão apresentadas na Tabela 12.

MATERIAL	S_y (MPa)	S_u (MPa)	E (GPa)	ρ (kg/m ³)	ν
Polipropileno Sólido	10.0	22.5	1.02	900	0.4
Polipropileno Sintático	3.7	4.5	0.38	900	0.4

Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos materiais poliméricos

A Figura 43 e a Tabela 13 apresentam o gráfico da curva tensão-deformação nominal e os dados relativos a tensões e deformações do Polipropileno Sólido. Estes dados foram obtidos através de testes.

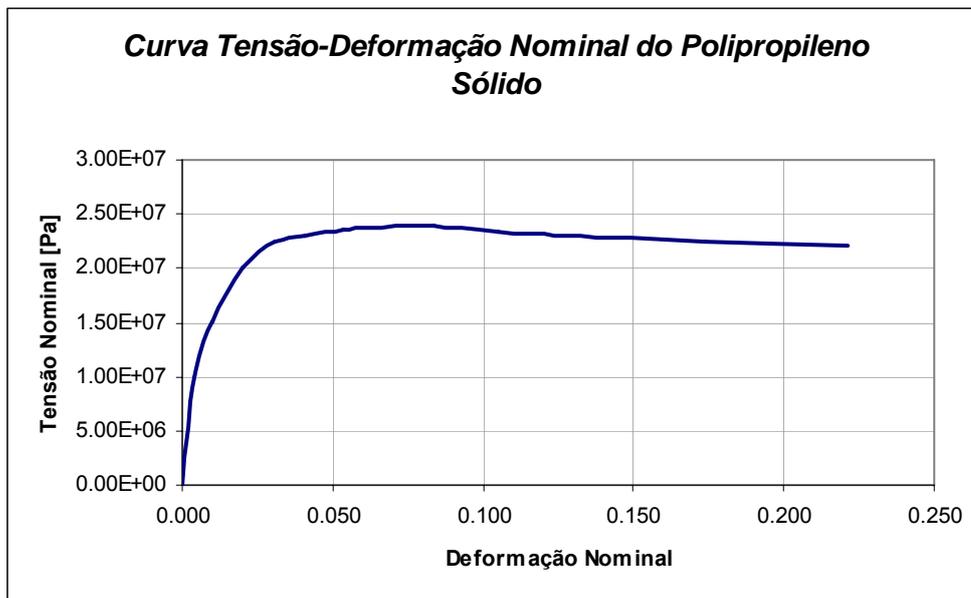


Figura 43 – Curva tensão-deformação nominal do Polipropileno Sólido [Bredero-Shaw]

Tensão Nominal (Pa)	Deformação Nominal	Tensão Verdadeira (Pa)	Deformação verdadeira	Deformação elástica	Deformação Plástica
0.00E+00	0.00%	0.00E+00	0.00%	-	-
1.00E+07	0.40%	1.01E+07	0.40%	-	-
1.50E+07	1.01%	1.52E+07	1.00%	-	-
2.00E+07	2.02%	2.04E+07	2.00%	-	-
2.24E+07	3.05%	2.31E+07	3.00%	2.26%	0.74%
2.31E+07	4.08%	2.40E+07	4.00%	2.35%	1.65%
2.35E+07	5.34%	2.48E+07	5.20%	2.43%	2.77%
2.37E+07	6.18%	2.51E+07	6.00%	2.46%	3.54%
2.40E+07	7.90%	2.59E+07	7.60%	2.54%	5.06%
2.39E+07	8.33%	2.59E+07	8.00%	2.54%	5.46%
2.34E+07	10.52%	2.59E+07	10.00%	2.54%	7.46%
2.30E+07	12.75%	2.59E+07	12.00%	2.54%	9.46%
2.25E+07	17.35%	2.64E+07	16.00%	2.59%	13.41%
2.20E+07	22.14%	2.69E+07	20.00%	2.64%	17.36%

Tabela 13 – Valores de tensão e deformação para o Polipropileno Sólido [Bredero-Shaw]

A Figura 44 e a Tabela 14 apresentam o gráfico da curva tensão-deformação nominal e os dados relativos a tensões e deformações do Polipropileno Sintático. Estes dados foram obtidos através de testes.

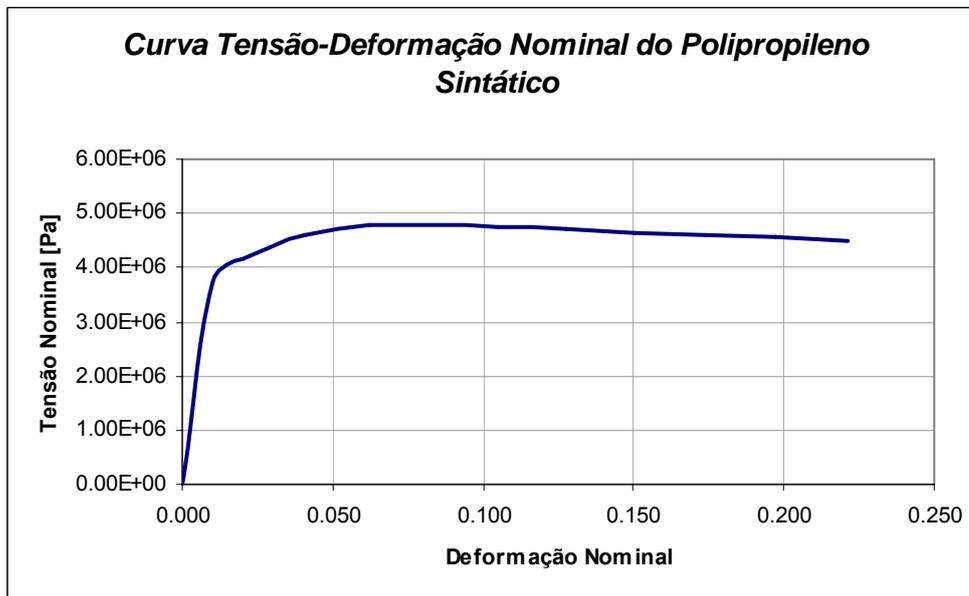


Figura 44 – Curva tensão-deformação nominal do Polipropileno Sintático

Tensão Nominal (Pa)	Deformação Nominal	Tensão Verdadeira (Pa)	Deformação verdadeira	Deformação elástica	Deformação Plástica
0.00E+00	0.00%	0.00E+00	0.00E+00	-	-
3.71E+06	1.01%	3.75E+06	1.00E-02	-	-
4.17E+06	2.02%	4.25E+06	2.00E-02	1.13%	0.87%
4.61E+06	4.08%	4.80E+06	4.00E-02	1.28%	2.72%
4.80E+06	6.18%	5.10E+06	6.00E-02	1.36%	4.64%
4.80E+06	8.33%	5.20E+06	8.00E-02	1.39%	6.61%
4.75E+06	10.52%	5.25E+06	1.00E-01	1.40%	8.60%
4.70E+06	12.75%	5.30E+06	1.20E-01	1.41%	10.59%
4.65E+06	15.03%	5.35E+06	1.40E-01	1.43%	12.57%
4.60E+06	17.35%	5.40E+06	1.60E-01	1.44%	14.56%
4.55E+06	19.72%	5.45E+06	1.80E-01	1.45%	16.55%
4.49E+06	22.14%	5.48E+06	2.00E-01	1.46%	18.54%

Tabela 14 - Valores de tensão e deformação para o Polipropileno Sintático

Da mesma forma que foram apresentados os dados de entrada do ABAQUS para o aço API 5L X60, a Tabela 15 apresenta os dados de entrada para o Polipropileno Sólido e para o Polipropileno Sintático.

Polipropileno Sólido		Polipropileno Sintático	
Tensão verdadeira [Pa]	Deformação verdadeira	Tensão verdadeira [Pa]	Deformação verdadeira
2.04E+07	0.00%	3.75E+06	0.00%
2.31E+07	0.74%	4.25E+06	0.87%
2.40E+07	1.65%	4.80E+06	2.72%
2.48E+07	2.77%	5.10E+06	4.64%
2.51E+07	3.54%	5.20E+06	6.61%
2.59E+07	5.06%	5.25E+06	8.60%
2.59E+07	5.46%	5.30E+06	10.59%
2.59E+07	7.46%	5.35E+06	12.57%
2.59E+07	9.46%	5.40E+06	14.56%
2.64E+07	13.41%	5.45E+06	16.55%
2.69E+07	17.36%	5.48E+06	18.54%

Tabela 15 – Dados de entrada do ABAQUS da curva tensão verdadeira versus deformação plástica verdadeira do Polipropileno Sólido e do Polipropileno Sintático

5.4. Validação dos critérios através do método de elementos finitos

O objetivo desta seção é validar e entender o critério de flambagem localizada proposto pela DNV (2000) através da utilização do método de elementos finitos. Esta análise visa definir o grau de conservadorismo apresentado nas soluções analíticas antes que sejam iniciadas as análises contendo sapatas de anodo.

5.4.1. Descrição

O método para esta avaliação utiliza uma seção curta dos dutos definidos na Tabela 1 com diversas relações DE/t sendo flexionados até o colapso da seção transversal em um ponto onde as deformações crescem localmente. O incremento do momento será medido até o “ponto limite” como mencionado na Seção 3.5. O ponto com maior deformação longitudinal no instante em que ocorre o momento máximo é a posição onde a flambagem localizada iniciou. A partir da identificação deste ponto é traçado o histórico de deformações do local e é desenhado um gráfico de momento versus deformações análogo ao apresentado na Figura 34.

Os valores obtidos com o gráfico mencionado podem ser comparados com os resultados obtidos a partir do cálculo do momento crítico apresentado na equação (26) e com a deformação característica “ ϵ_c ” da DNV (2000), apresentada na equação (13).

5.4.2. Modelo

O modelo para avaliação dos critérios consiste de uma seção de duto sendo flexionada até a ocorrência do colapso plástico em uma determinada região próxima ao ponto de sustentação do modelo. Para desenvolvimento do modelo foi necessário o atendimento de algumas premissas apresentadas a seguir.

- O modelo necessita ser tridimensional com o objetivo de permitir a obtenção de efeitos localizados na espessura da parede e visualização da evolução da ovalização durante o aumento da curvatura;

- Devem ser utilizados elementos sólidos 3D com o objetivo de capturar detalhadamente os efeitos de flambagem localizada;
- O modelo deve ser simétrico em função do aumento da eficiência computacional e redução do tempo de solução;
- A malha empregada deve ser suficientemente refinada para capturar efeitos localizados com precisão;
- A evolução do momento aplicado deve ser gravada ao longo do desenvolvimento da análise para geração dos gráficos necessários para validação do critério;
- O comprimento dos dutos analisados deve ser maior que no mínimo o valor de dois diâmetros nominais com o objetivo de eliminar qualquer possível interferência dos resultados da região onde é aplicada a rotação sobre o ponto de falha;
- O modelo deve ser resolvido em um passo (“step”) para que a resposta de momento seja contínua e comparável às curvas de momento analíticas;
- Nenhuma outra carga além da imposição da curvatura pode ser aplicada, pois invalidaria os resultados comparativos em relação ao momento crítico apresentado na equação (26).

O modelo geométrico utilizado para esta validação consiste em uma seção 180° de duto tridimensional como apresentado na Figura 45.

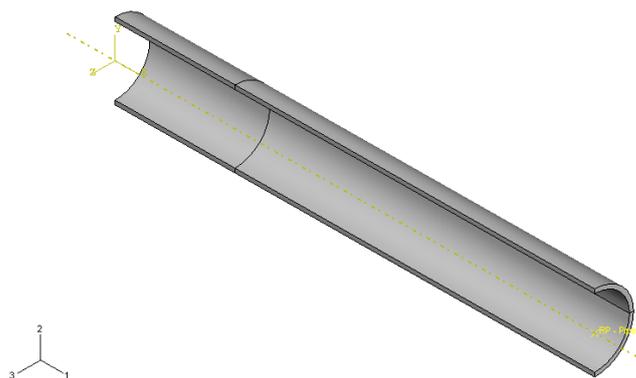


Figura 45 – Modelo tridimensional típico da seção de duto utilizada

A malha utilizada nas análises é constituída de elementos sólidos hexaédricos de 8-nós do tipo “C3D8R”. Este é um elemento linear que com uma

boa resolução de malha representa de forma eficiente os efeitos de flambagem necessários sem comprometer o tempo de solução. O comprimento médio dos elementos utilizados foi de 50mm, com valor reduzido nas regiões de refino de malha. O refinamento desta região foi determinado a partir de análises sucessivas com a redução gradual do tamanho do elemento. A malha foi considerada aceitável quando os resultados obtidos de uma análise apresentassem valores com pequena diferença em relação aos da malha anteriormente utilizada. Na curvatura da seção foram definidos 39 elementos para uma boa representatividade da circunferência do duto. Na espessura de parede do duto foram utilizadas três camadas de elementos, suficientes para descrever com precisão as tensões e deformações ao longo da parede do duto. A geometria do duto foi seccionada a 500mm de distância do ponto de sustentação na extremidade esquerda, como apresentado na Figura 45. Esta é a seção onde o duto tem maior probabilidade de falhar localmente justificando a necessidade do refino de malha na região. A Figura 46 apresenta uma malha típica utilizada em todos os modelos.

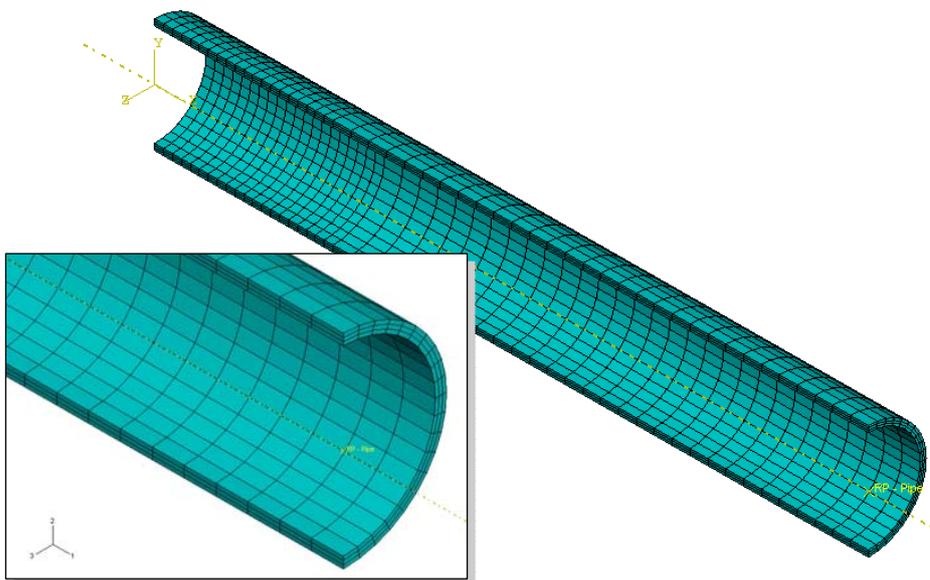


Figura 46 – Malha utilizada no modelo de elementos finitos

As condições de contorno estão aplicadas em quatro pontos da geometria. O modelo geométrico é simétrico nos planos 1-2 e 2-3 como apresentado na Figura 47. As condições de contorno de simetria restringem um grau de liberdade de deslocamento e dois de rotação no plano perpendicular da direção de deslocamento restrita. A simetria no plano 2-3 é aplicada, pois o duto não

pode ser engastado uma vez que isto impediria a ovalização da seção de sustentação. No entanto, as condições de simetria não restringem o deslocamento do duto na direção “2”. Para impedir o deslocamento nesta direção foi aplicada uma restrição em uma aresta localizada na linha de centro do duto. Esta restrição não impede a ovalização da seção transversal do duto.

A curvatura necessária para o efeito de flexão no duto é obtida através de uma rotação prescrita na direção “UR3”, como apresentado na Figura 47. Esta rotação é aplicada em um “ponto de referência” que é conectado à face da extremidade onde está localizado através de um elemento de acoplamento. A face é restrita aos deslocamentos e rotações que o ponto de referência estará sujeito. A rotação é aplicada com um crescimento linear do início ao fim do passo da análise. Os valores de rotação variam de acordo com a relação DE/t analisada (de 1rad a 2rad). Este valor no final da análise somente necessita ser o suficiente para o tubo alcançar o seu limite plástico e flambar.

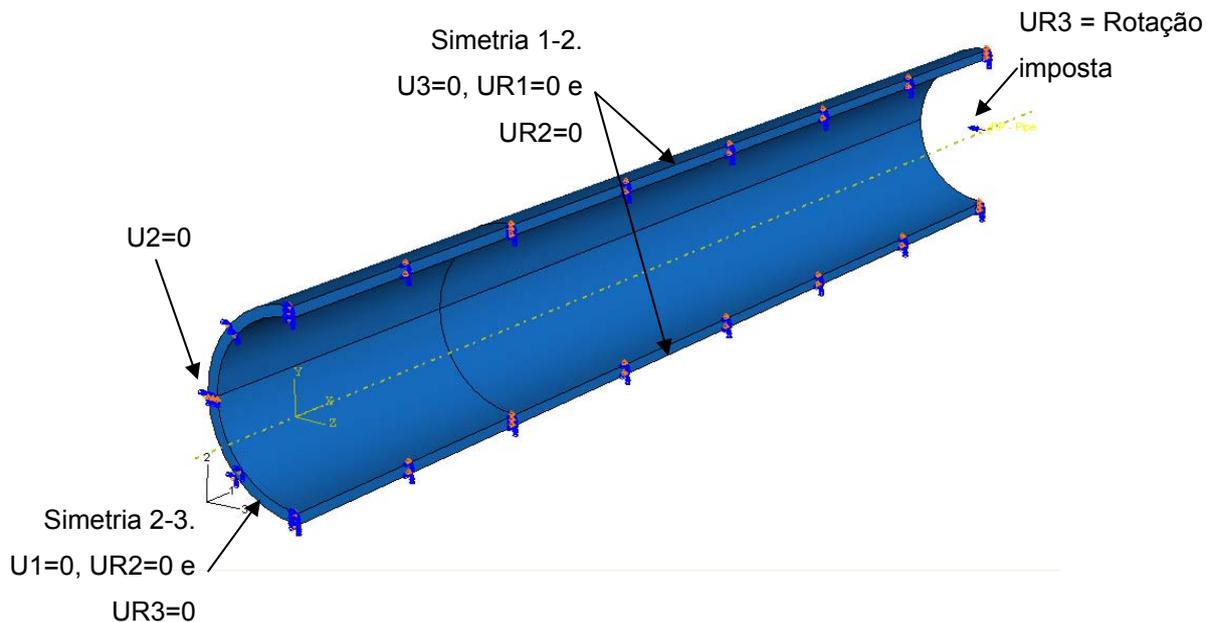


Figura 47 – Condições de contorno e carregamento utilizados no modelo

No ponto de referência, onde a rotação prescrita foi aplicada, o valor do momento é medido como resultante do carregamento aplicado. A partir desta medição é possível criar as curvas de Momento versus Deformação longitudinal que são apresentadas na Seção 5.4.3.

Um conceito importante que será aplicado em todas as análises deste trabalho é o de associação de um sistema de coordenada local ao material. A associação tem como objetivo obter os resultados corretos das deformações longitudinais. O sistema de coordenada local inicia a análise alinhado com o sistema de coordenada global apresentado no canto esquerdo inferior da Figura 45. A medida que o duto flexiona o sistema de coordenada local acompanha a mudança de direção do duto, sempre medindo o valor de deformação longitudinal alinhado com o eixo do duto. Caso não fosse feita a associação, o valor de resposta da deformação longitudinal iria ser igual à direção “1” do sistema de coordenadas global apresentando uma resposta errada ao longo do comprimento do duto.

5.4.3. Resultados – Comparação Valores Analíticos versus Método de Elementos Finitos

O objetivo desta seção é apresentar os resultados dos cálculos analíticos referentes aos valores de Momento Crítico apresentados no relatório SUPERB (1996) e os valores da deformação característica da DNV (2000) em função dos diversos valores da relação DE/t . Após os cálculos destes dados, algumas das relações DE/t serão avaliadas através do método de elementos finitos e seus resultados serão comparados aos valores analíticos. Desta forma será possível validar os critérios e medir o grau de conservadorismo de ambos. A confiabilidade destes resultados permitirá aprovar os demais modelos deste trabalho.

A partir da equação (13) e da equação (29) foi possível gerar a Tabela 16 onde são apresentados valores do momento crítico “ M_c ” e deformação característica “ ϵ_c ” em função de diversas relações DE/t com valores de DE fixos. Para o cálculo dos valores “ ϵ_c ”, foram considerados o valor de 0.92 para “ α_h ” por conservadorismo, e 1 para “ α_{gw} ” de acordo com a Figura 31, uma vez que a relação DE/t está abaixo de 20.

DE (mm)	t (mm)	DE/t	M _c (N*m)	ε _c (%)
323.85	27.0	12.0	1.21E+06	6.49%
323.85	25.4	12.8	1.14E+06	6.05%
323.85	23.8	13.6	1.06E+06	5.61%
323.85	22.2	14.6	9.91E+05	5.18%
323.85	20.6	15.7	9.18E+05	4.74%
323.85	19.0	17.0	8.45E+05	4.30%
323.85	17.4	18.6	7.72E+05	3.87%
323.85	15.8	20.5	6.99E+05	3.43%
273.05	27.0	10.1	8.62E+05	7.86%
273.05	25.4	10.8	8.11E+05	7.34%
273.05	23.8	11.5	7.59E+05	6.82%
273.05	22.2	12.3	7.07E+05	6.30%
273.05	20.6	13.3	6.55E+05	5.78%
273.05	19.0	14.4	6.03E+05	5.27%
273.05	17.4	15.7	5.51E+05	4.75%
273.05	15.8	17.3	4.99E+05	4.23%
219.075	22.2	9.9	4.57E+05	8.07%
219.075	20.6	10.6	4.23E+05	7.43%
219.075	19.0	11.5	3.90E+05	6.78%
219.075	17.4	12.6	3.56E+05	6.14%
219.075	15.8	13.9	3.23E+05	5.49%
219.075	14.2	15.4	2.90E+05	4.85%
219.075	12.6	17.4	2.56E+05	4.20%
219.075	11.0	19.9	2.23E+05	3.55%
168.275	20.6	8.2	2.51E+05	9.94%
168.275	19.0	8.9	2.31E+05	9.10%
168.275	17.4	9.7	2.11E+05	8.26%
168.275	15.8	10.7	1.92E+05	7.42%
168.275	14.2	11.9	1.72E+05	6.58%
168.275	12.6	13.4	1.52E+05	5.73%
168.275	11.0	15.3	1.32E+05	4.89%
168.275	9.4	17.9	1.13E+05	4.05%

Tabela 16 – Valores calculados do Momento Crítico e Deformação Característica em função da relação DE/t

Como mencionado anteriormente, os dutos simulados de acordo com o modelo apresentado na Seção 5.4.2 são os indicados na Tabela 1. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos a partir das análises de elementos finitos e os compara com os valores de critérios avaliados.

DE (in)	DE (mm)	t (mm)	DE/t	ϵ_{FEA} no pt. Momento Máx	DNV ϵ_c	Momento Máximo Elem. Finitos(Nm)	Yong Bai Mc (Nm) (Sy=414MPa)	Yong Bai Mc (Nm) (Sy=395MPa)
6.625	168.275	19.05	8.83	10.18%	9.12%	211980	232146	221492
10.75	273.05	25.4	10.75	7.96%	7.34%	753772	810562	773363
12.75	323.85	25.4	12.75	6.47%	6.05%	1071002	1136915	1084737
10.75	273.05	17.5	15.60	4.85%	4.78%	528834	554526	529077
12.75	323.85	17.5	18.51	3.91%	3.89%	747284	776747	741099
12.75	323.85	15.9	20.37	3.60%	3.44%	680036	703802	671502

Tabela 17 – Resultados das análises de elementos finitos

Na Tabela 17 foram apresentadas duas colunas a partir da equação (29) com limites de escoamentos diferentes. Como o modelo de elementos finitos utilizou a curva descrita na Seção 5.3 (com $S_y=395\text{Mpa}$), para fins comparativos foi necessário apresentar os resultados da equação (29) calculada a partir do valor mencionado. Isto não ocorre no cálculo de “ ϵ_c ”, pois a equação (13) não depende do limite de escoamento do material. A Tabela 18 apresenta as diferenças percentuais das respostas obtidas a partir do método de elementos finitos e dos cálculos analíticos.

DE/t	Diferença deformação máxima com ϵ_c	Diferença Mc (Sy=414MPa)	Diferença Mc (Sy=395MPa)
8.83	11.63%	9.51%	4.49%
10.75	8.42%	7.53%	2.60%
12.75	6.88%	6.15%	1.28%
15.60	1.51%	4.86%	0.05%
18.51	0.46%	3.94%	-0.83%
20.37	4.65%	3.49%	-1.25%

Tabela 18 – Comparações percentuais das respostas analíticas com o modelo de elementos finitos

A partir da Tabela 18 foi observado que os resultados das análises de elementos finitos são próximos aos valores calculados divergindo apenas nas extremidades da faixa das relações DE/t selecionadas. Isto é favorável uma vez que os dutos disponíveis no mercado para enrolamento estão dentro da faixa selecionada da relação DE/t.

Para os resultados de momento crítico, mesmo utilizando o escoamento no valor de 395MPa para o modelo de elementos finitos, a maior diferença encontrada foi de 9.51% sobre o valor calculado analiticamente.

Para os resultados de “ ϵ_c ”, o método de elementos finitos para a relação DE/t de 8.83 obteve uma resposta 11.63% maior que o obtido a partir da equação da DNV (2000). Portanto, o cálculo numérico apresenta em algumas relações uma margem maior do que o indicado pela DNV. Caso um modelo numérico de enrolamento seja realizado e este obtenha concentrações de deformações maiores que “ $\epsilon_c/\gamma_\epsilon$ ”, como sugerido pela DNV (2000), um modelo como o apresentado na Seção 5.4.2 deve ser avaliado com o objetivo de obter uma resposta mais realista e assim diminuir o fator de segurança “ γ_ϵ ” da DNV (2000).

Desta forma é possível concluir que tanto a formulação de “ ϵ_c ”, quanto a de “ M_c ” são válidas. A Figura 48 e a Figura 49 apresentam os resultados da Tabela 16 e da Tabela 17 em uma forma gráfica com o objetivo de observar as pequenas divergências entre as respostas.

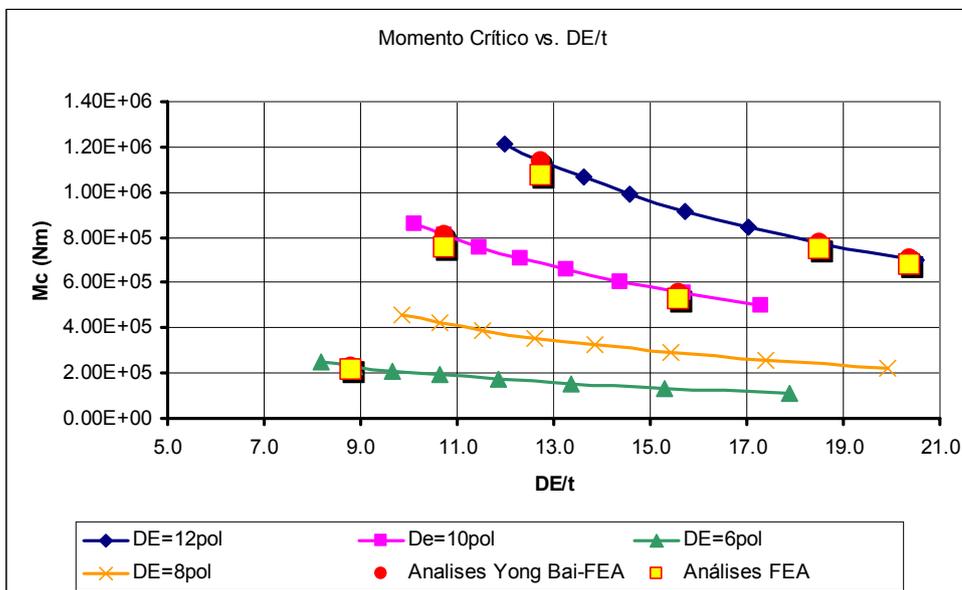


Figura 48 – Gráfico do Momento Crítico versus DE/t

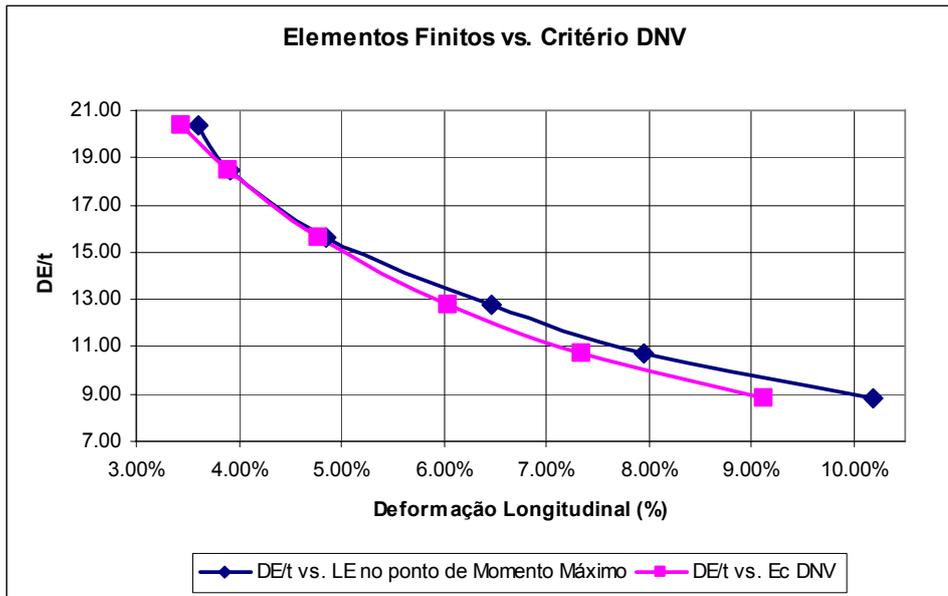


Figura 49 – Gráfico dos resultados das análises de Elementos Finitos versus o critério DNV

Os resultados das análises de elementos finitos foram obtidos a partir de curvas análogos ao gráfico apresentado na Figura 34. Os gráficos resultantes são análogos, pois ao invés de considerar as curvaturas foram utilizados os valores de deformação longitudinal. A metodologia para o conhecimento dos valores de momento máximo é apresentada abaixo.

- O duto é deformado até que ocorra a flambagem localizada;
- O gráfico do momento aplicado versus tempo de análise é construído. Os valores de momento resultantes devem ser multiplicados por dois, uma vez que o modelo utilizado possui simetria;
- A partir do gráfico é verificado o valor máximo de momento e em que instante este ocorreu;
- Constrói-se um gráfico da distribuição da deformação longitudinal na fibra mais externa do duto no instante em que ocorreu o momento máximo. Neste gráfico é localizado o ponto onde a flambagem ocorre;
- Constrói-se um gráfico da deformação longitudinal no ponto de flambagem versus tempo de análise;

- As informações do gráfico de evolução da deformação longitudinal e da evolução do momento aplicado são cruzadas. A partir delas é construído o gráfico de Momento aplicado versus Deformações longitudinais;
- No ponto de máximo momento aplicado é obtido o valor da deformação limite que é comparável com o valor da deformação característica definida pela DNV (2000).

Os gráficos de momento aplicado versus deformação longitudinal das análises de elementos finitos estão representados na Figura 50.

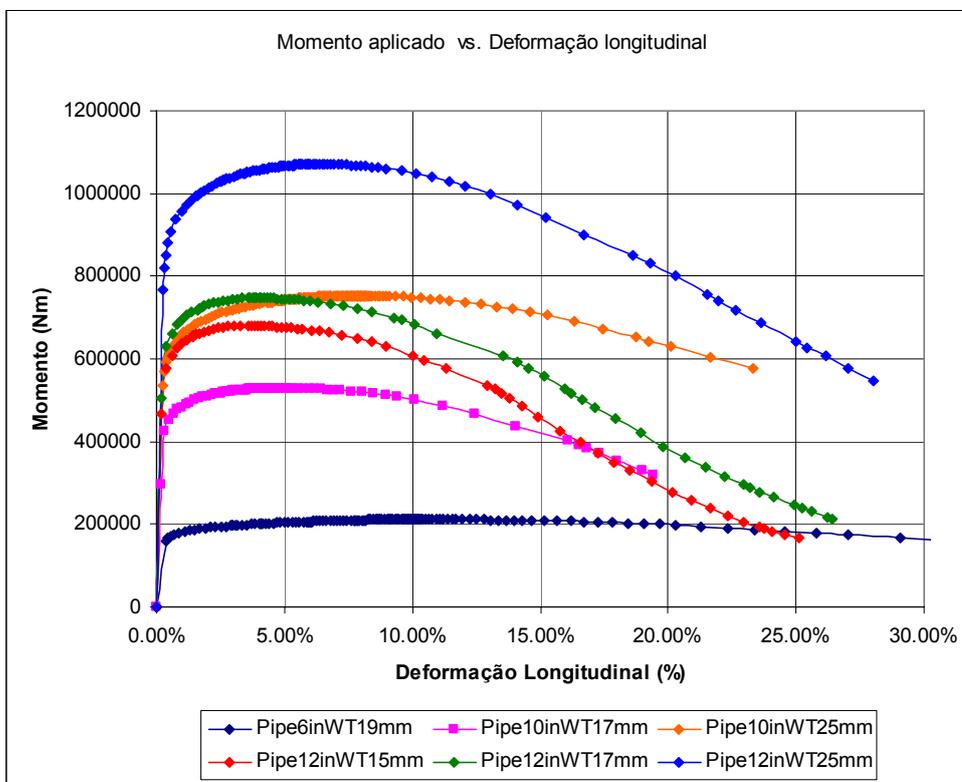


Figura 50 – Gráfico do Momento aplicado versus Deformação longitudinal

O desenvolvimento da falha por flambagem localizada pode ser observada em quatro instantes diferentes na Figura 51 e na Figura 52 relativas ao duto de 10.75" com espessura de parede de 17.5mm. Os resultados relativos as outras relações DE/t estão apresentados no APÊNDICE V – Resultados das análises de elementos finitos para verificação dos critérios de momento limite plástico e deformação característica. Os instantes apresentados nas figuras estão ordenados de acordo com a seqüência numérica das imagens, e significam:

- (1) Instante em que o duto atinge a deformação “ ϵ_C ”, calculada pela DNV (2000);
- (2) Instante em que o duto atinge a deformação limite relativa ao momento limite. Deformação limite de flambagem localizada a partir do modelo de elementos finitos;
- (3) Instante onde a flambagem localizada é visível;
- (4) Instante da configuração final.

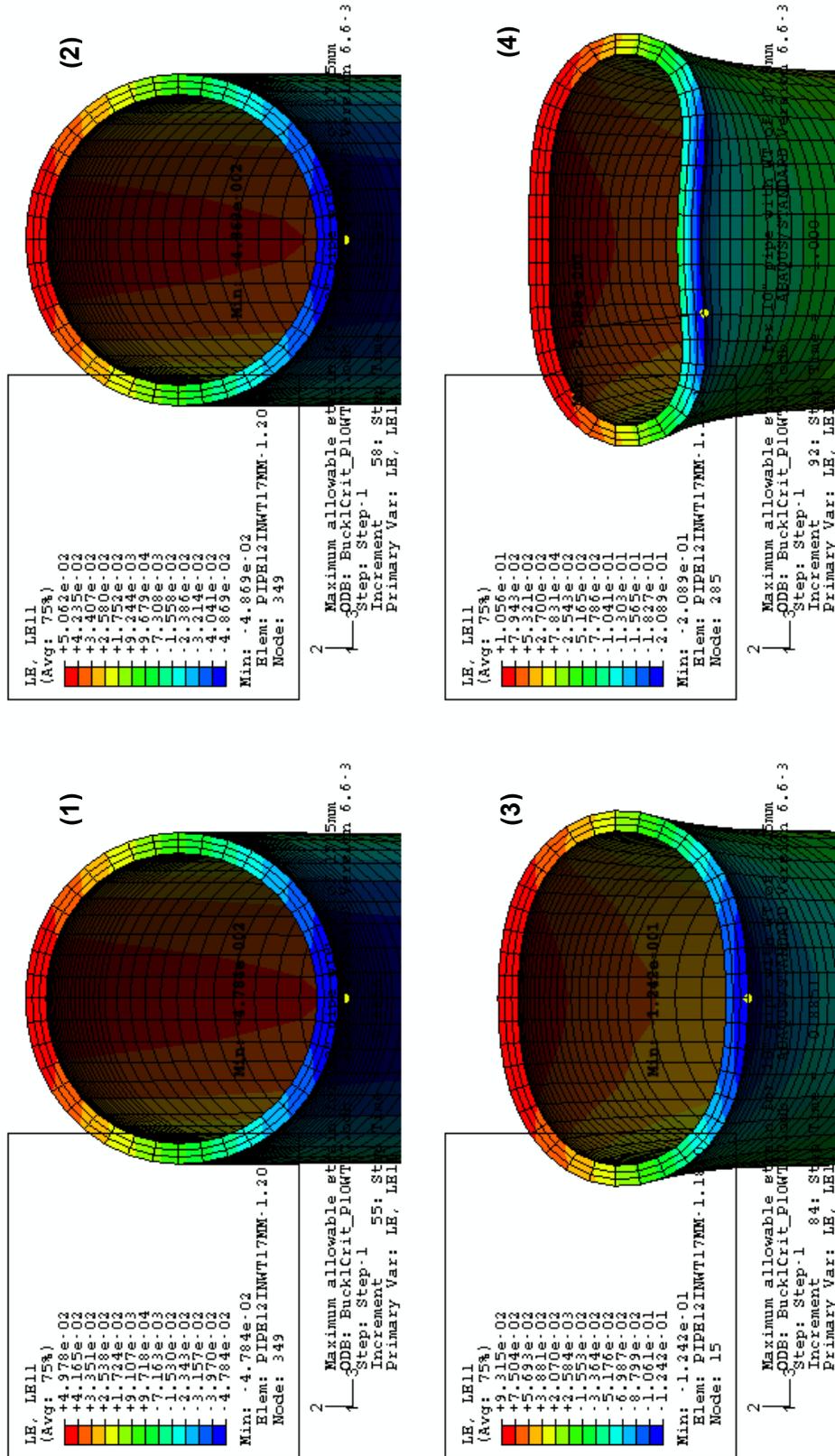


Figura 52 - Evolução da flambagem localizada – DE=10.75” e t=17.5mm – Vista corte

5.5. Modelo simples de enrolamento – Duto engastado 2D

Nesta seção será apresentado um modelo bidimensional que simula a primeira etapa do processo de carregamento de dutos em uma embarcação PLSV.

5.5.1. Modelo

O processo de enrolamento pode ser simulado de diversas formas diferentes. O modelo que será utilizado nas próximas seções consiste em flexionar o duto sobre uma superfície rígida para observar a configuração final de deformações longitudinais às quais o duto estará submetido no raio interno do carretel. Portanto, não serão avaliadas as deformações ao longo da história de carregamento do duto.

Para o entendimento e validação das análises, o primeiro modelo avaliado foi bidimensional com elementos de viga. Este tem como objetivo verificar se as condições de contorno, carregamento e contatos serão próprios para a obtenção dos resultados desejados. A análise foi avaliada em um passo com incremento automático.

A Figura 53 apresenta a montagem utilizada no modelo bidimensional. Foi simulada uma única seção de duto de diâmetro de 12.75” e espessura de parede de 17.5mm. O comprimento de duto avaliado foi de 9m, pois este é um valor típico no fornecimento de dutos. O raio do carretel relativo a embarcação Seven Oceans é de 9m como apresentado na Seção 2.4.

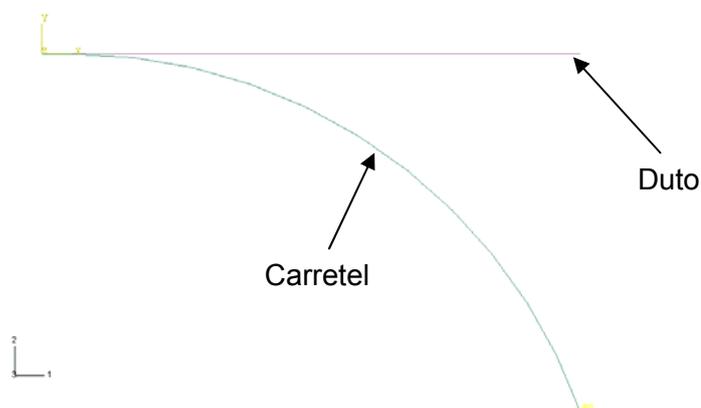


Figura 53 – Montagem do modelo de enrolamento simples bidimensional

O modelo, por ser bidimensional, utiliza elementos de viga. A malha utilizada no duto é constituída por elementos de viga linear com 2-nós no plano do tipo “B21”. O comprimento médio de cada elemento foi de 50mm. O carretel foi definido com sendo um corpo analítico rígido por ser considerado uma estrutura rígida e por não haver interesse em medir as deformações na sua superfície. A utilização deste tipo de abordagem reduz significativamente o tempo computacional de solução da análise.

A interação carretel-duto é resolvida através da definição de contato. O contato entre o duto e o carretel foi definido como rígido na direção normal e sem atrito na direção tangencial.

A Figura 54 apresenta as condições de contorno e carregamentos utilizados no modelo. O duto teve uma extremidade engastada, com os seis graus de liberdade iguais a zero, e na outra foi aplicada uma carga seguidora de 55t. Este tipo de carga permite que ao longo da análise a direção desta seja sempre paralela à seção duto. Se esta condição não fosse aplicada, a carga seria decomposta à medida que a extremidade do duto fosse sendo rotacionada. Desta forma seriam introduzidos esforços axiais, que neste momento não são de interesse da análise. O carretel foi engastado.

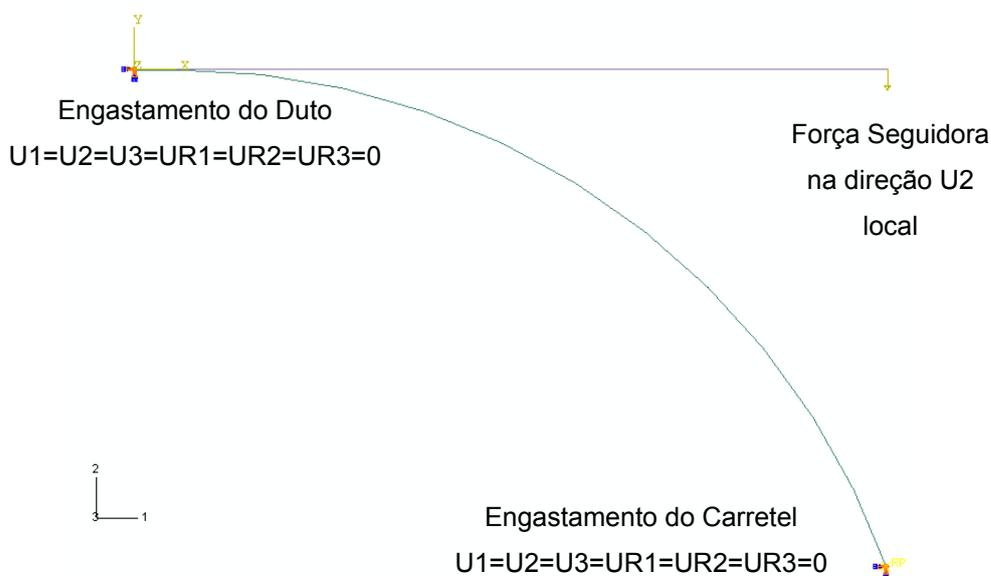


Figura 54 – Condições de contorno e carregamentos aplicados no modelo bidimensional

A força de 55t foi definida a partir da realização de diversas análises até que atingisse um valor suficiente para que o duto fosse completamente flexionado sobre o carretel. Este valor servirá de base para utilização nos modelos tridimensionais apresentados nas seções seguintes. Como a análise foi realizada em um passo, o valor da carga cresce linearmente do início ao fim do passo, onde atinge o valor máximo aplicado.

O comentário da Seção 5.4.2, relativo à associação do material do duto ao sistema de coordenada local não é aplicado a este modelo, uma vez que elementos de viga precisam da definição da direção de um sistema de coordenada local para orientar a seção em relação à geometria de linha ao qual é associado.

5.5.2. Resultados

O resultado desta análise foi como o previsto com o duto flexionando sobre o carretel. A Figura 55 apresenta a configuração final do duto.

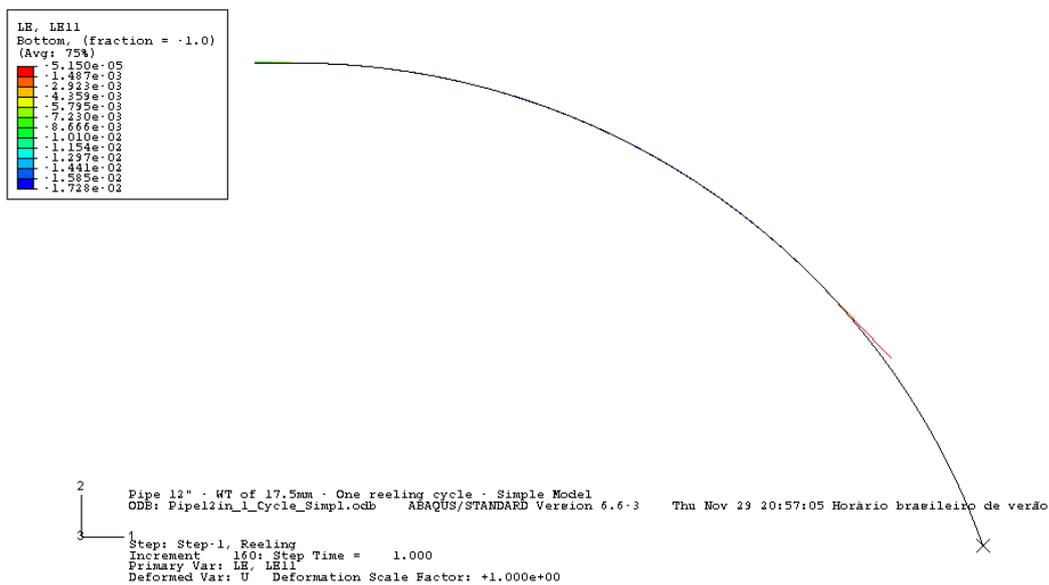


Figura 55 – Resultado das deformações longitudinais compressivas do modelo de viga 2D

A Figura 56 apresenta um gráfico das deformações longitudinais da região compressiva versus a posição ao longo do duto no último instante do passo da

análise. Este gráfico será observado em todas as análises de enrolamento deste trabalho e pode ser caracterizado como típico para um duto sem elementos que possam gerar SNCF. Como pode ser observada na região central do gráfico a deformação longitudinal permanece constante. Na extremidade esquerda do duto (de acordo com a Figura 56) a deformação é reduzida para valores baixos devido à condição de engastamento. Na extremidade direita o valor é reduzido para zero, uma vez que apenas uma parte não foi flexionada no carretel, permanecendo retilínea. Isto não representa um problema em relação aos resultados desejados. A característica importante nas análises de enrolamento é obter um trecho da região central longo o suficiente, com deformações constantes próximas ao valor nominal calculado analiticamente pela equação (36).

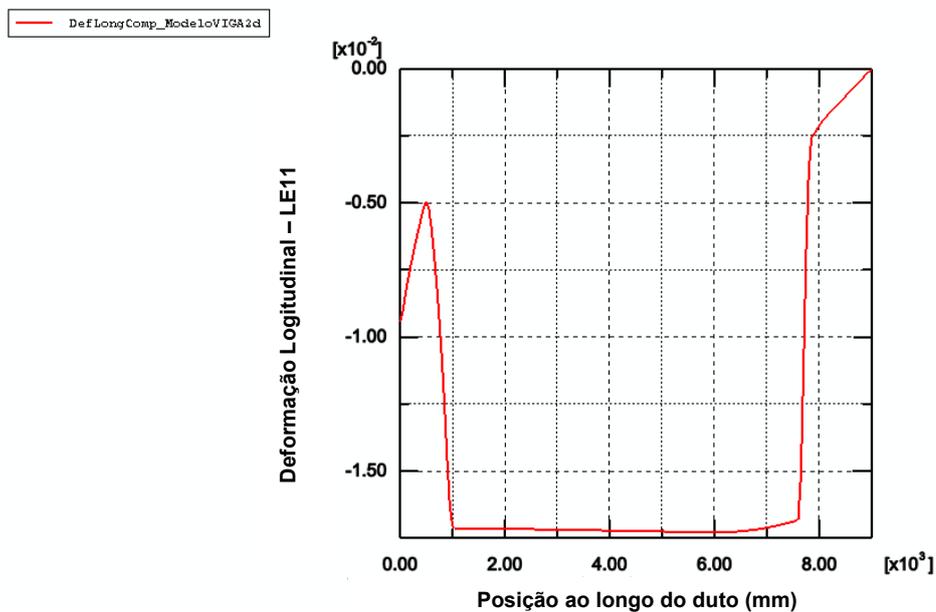


Figura 56 – Gráfico de resultados do modelo de viga 2D. Deformações longitudinais compressivas versus posição ao longo do duto

Observando a Figura 56 verifica-se que o valor da deformação longitudinal compressiva na região onde permanece constante foi de 1.72%. A Tabela 19 apresenta um resumo com os valores calculados à serem comparados. O cálculo dos valores de “ $\epsilon_{\text{analítico}}$ ”, “ ϵ_C ” e “ ϵ_{adm} ” podem ser avaliados no APÊNDICE I – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem localizada utilizando a DNV OS-F101 (2000).

DE (pol)	DE (mm)	t (mm)	$\epsilon_{\text{analítico}}$ (%) Eq. (36)	ϵ_c (%) Eq.(13)	ϵ_{adm} (%) Eq.(19)	$\epsilon_{\text{FEA 2D}}$ (%)
12.75	323.85	17.5	1.757	3.893	1.884	1.72

Tabela 19 – Resultados da análise do modelo de viga 2D

Os resultados não foram avaliados pela API (1999) já que o elemento utilizado nesta análise não permite ovalização, item necessário para o cálculo do critério da API (1999). Isto será avaliado na Seção 5.6.2.

Os valores encontrados tanto no cálculo analítico como no modelo de elementos finitos foram abaixo do admissível calculado pela DNV (2000). Portanto, este duto pode ser enrolado sem possibilidade de flambagem localizada.

5.6. Modelos simples de enrolamento – Duto engastado 3D

Este modelo apresenta as mesmas características mencionadas da Seção 5.5, porém o modelo foi transferido para um ambiente 3D como parte do desenvolvimento de um modelo para inclusão de SNCF. O duto sem elementos de SNCF é flexionado até acomodar-se sobre a superfície do carretel.

5.6.1. Modelo

A Figura 57 apresenta a montagem utilizada no modelo tridimensional. Foi simulada uma única seção de duto de diâmetro de 12.75” e espessura de parede de 17.5mm. O comprimento de duto avaliado foi de 9m como no modelo bidimensional. O raio do carretel relativo à embarcação Seven Oceans é de 9m como apresentado na Seção 2.4. A análise foi simulada em dois passos. O primeiro é para a detecção do contato carretel-duto e o segundo para a flexão completa do duto.

O modelo, por ser tridimensional, utiliza elementos sólidos. A malha utilizada no duto é constituída por elementos hexaédricos lineares com 8-nós do tipo “C3D8R”. A Figura 58 apresenta a malha utilizada no modelo. A malha deste modelo apresenta características similares às descritas na Seção 5.4.2. O comprimento médio dos elementos utilizados foi de 50mm. Novamente, o refinamento da malha foi determinado a partir de análises sucessivas com a

redução gradual do tamanho do elemento. A malha foi considerada aceitável quando os resultados obtidos de uma análise apresentassem valores com pequena diferença em relação aos da malha anteriormente utilizada. Este conceito foi aplicado aos demais modelos abordados neste trabalho. Na curvatura da seção foram definidos 39 elementos. Na espessura de parede do duto foram utilizadas três camadas de elementos. Assim como o modelo bidimensional, o carretel foi definido com sendo um corpo analítico rígido.

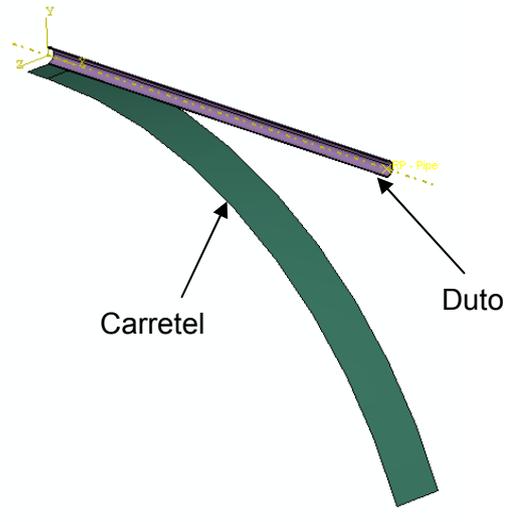


Figura 57 – Montagem do modelo de enrolamento simples tridimensional

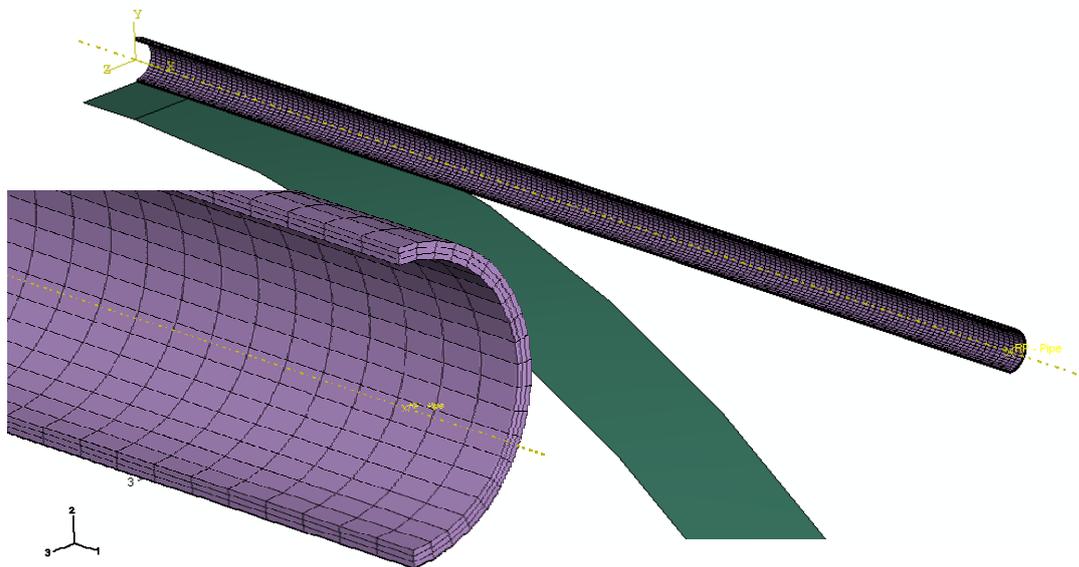


Figura 58 – Malha utilizada no modelo de enrolamento simples tridimensional

A interação carretel-duto é resolvida através da definição de contato. O contato entre o duto e o carretel foi definido como rígido na direção normal e sem

atrito na direção tangencial. $\frac{1}{4}$ da circunferência do duto foi selecionada para realizar o contato com a superfície do carretel.

A Figura 59 apresenta as condições de contorno e carregamentos utilizados no modelo. O duto teve uma extremidade engastada e na outra foi aplicada uma carga seguidora de 55t como no modelo bidimensional. A carga foi aplicada em um ponto de referência que é conectado à face da extremidade do duto por um elemento de acoplamento. Isto permite que a face tenha os mesmos deslocamentos/ rotações do ponto de referência. Um valor de 10% da carga foi aplicado no 1º passo para auxiliar o modelo na detecção do contato. O restante da carga é aplicado no 2º passo.

Para reduzir o tempo computacional de solução foi utilizado um modelo simétrico no plano 1-2. A condição de contorno de simetria restringe um grau de liberdade de deslocamento e dois de rotação no plano perpendicular da direção de deslocamento restrita. O carretel foi engastado.

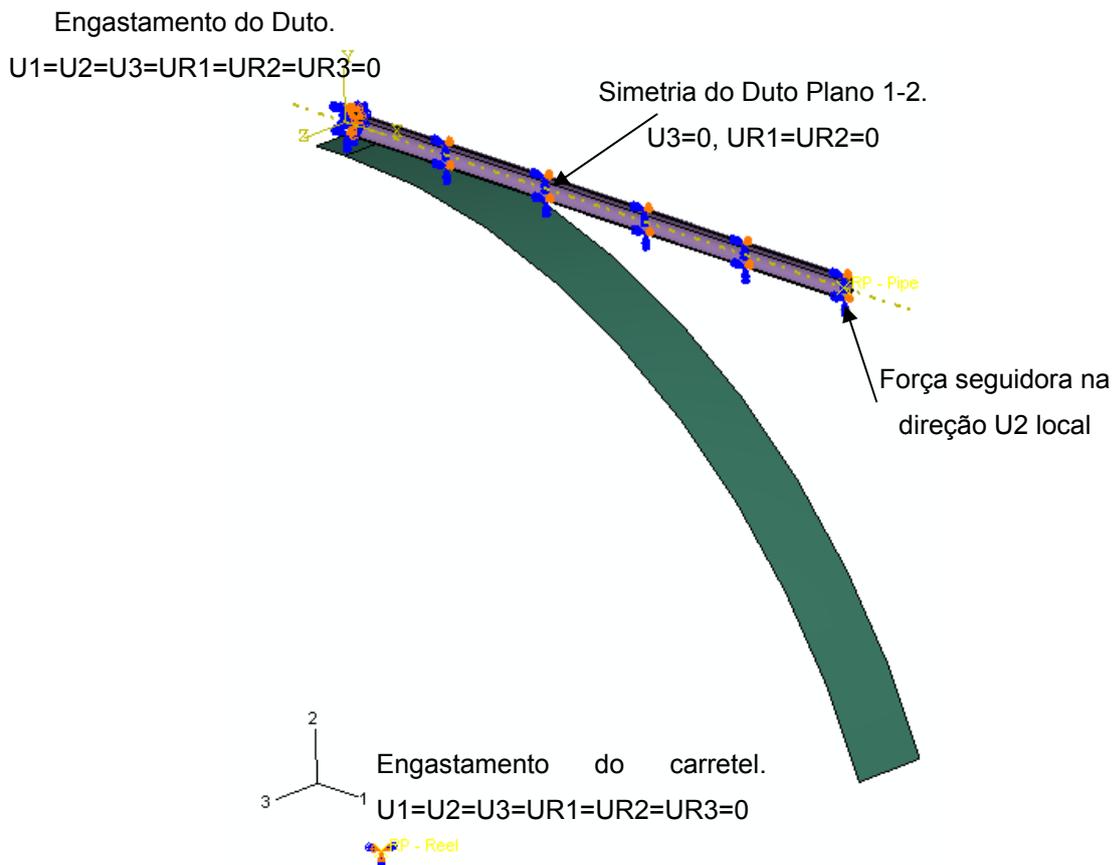


Figura 59 – Condições de contorno e carregamento aplicados ao modelo tridimensional

O comentário da Seção 5.4.2, relativo a associação do material do duto ao sistema de coordenadas locais, foi aplicado também à este modelo para a obtenção das deformações longitudinais corretas.

5.6.2. Resultados

O resultado desta análise foi como o previsto com o duto flexionando sobre o carretel. A Figura 60 e a Figura 61 apresentam a configuração final do duto.

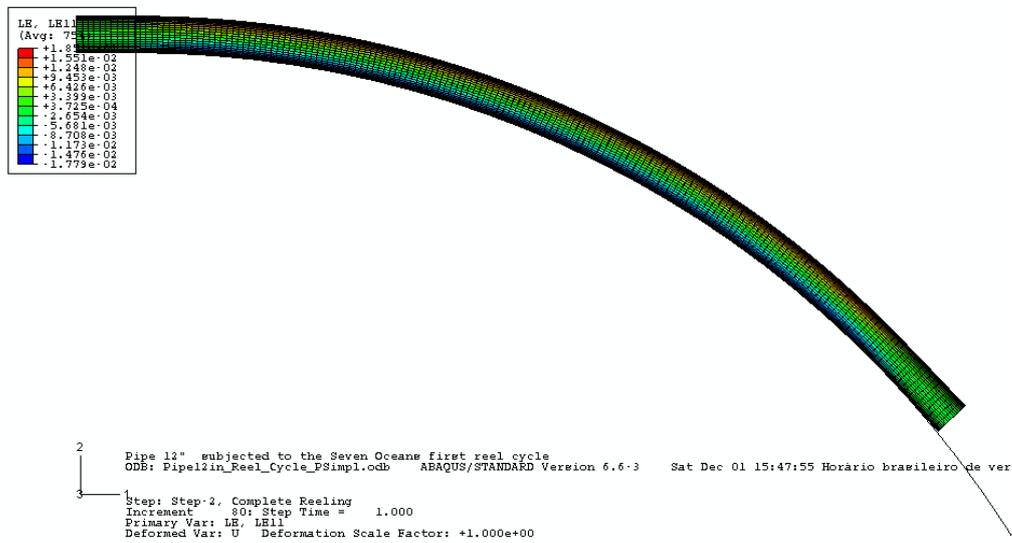


Figura 60 - Resultado das deformações longitudinais compressivas para o modelo tridimensional – vista lateral

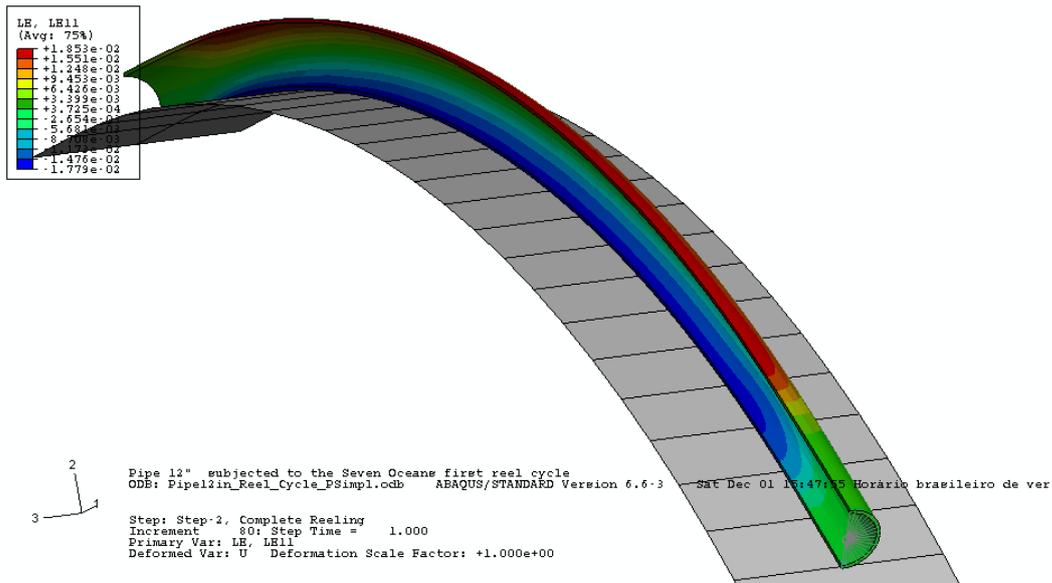


Figura 61 – Resultados das deformações longitudinais compressivas para o modelo tridimensional – vista em ângulo

A Figura 62 apresenta o gráfico das deformações longitudinais da região compressiva versus a posição ao longo do duto no último incremento de tempo do passo da análise.

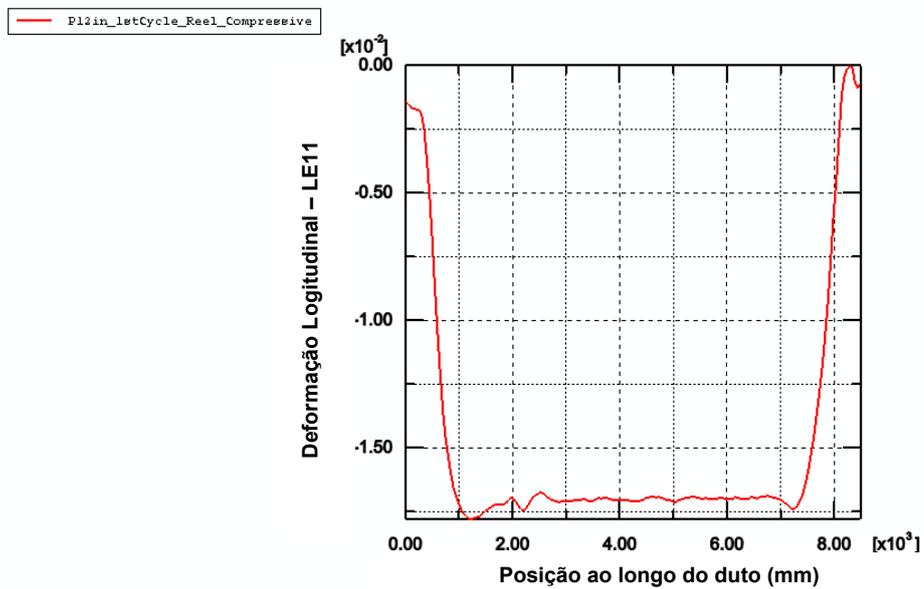


Figura 62 - Gráfico de resultados do modelo tridimensional. Deformações longitudinais compressivas versus posição ao longo do duto

Observando a Figura 62 verifica-se que o valor da deformação longitudinal compressiva na região onde permanece constante foi de 1.71%. A Tabela 20 apresenta um resumo com os valores calculados a serem comparados. O cálculo dos valores de “ $\epsilon_{\text{analítico}}$ ”, “ ϵ_C ”, “ ϵ_{adm} ” da DNV (2000) e “ ϵ_{adm} ” da API (1999) podem ser avaliados no APÊNDICE I – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem localizada utilizando a DNV OS-F101 (2000) e no APÊNDICE II – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem utilizando os critérios da API RP 1111 (1999). O valor da deformação admissível da API foi calculado a partir da ovalização obtida de 1.129% deste modelo 3D, como apresentado no Apêndice mencionado.

DE (pol)	DE (mm)	t (mm)	$\epsilon_{\text{analítico}}$ (%)	ϵ_{admDNV} (%)	ϵ_{admAPI} (%)	$\epsilon_{\text{FEA 2D}}$ (%)	$\epsilon_{\text{FEA 3D}}$ (%)
12.75	323.85	17.5	1.757	1.884	2.204	1.72	1.71

Tabela 20 – Resultados da análise do modelo tridimensional

Com relação ao modelo bidimensional apresentado na Seção 5.5, o valor da deformação longitudinal apresenta uma diferença desprezível de 0.58%. Desta forma, a passagem do modelo 2D para o 3D não apresentou nenhum problema. O duto continua sendo aceito pelos critérios de deformações admissíveis da DNV (2000) e da API (1999).

Como nenhuma carga de tracionamento do enrolamento foi aplicada, o duto apresenta um pequeno descolamento da superfície do carretel como indicado na Seção 4.3. Um descolamento de 1mm fica evidente observando a Figura 63 que apresenta um gráfico de descolamento da superfície inferior do duto (6 horas) com o carretel versus o comprimento do duto. Neste instante, o duto apresenta um raio pouco maior que o do carretel. Quanto maior o raio de curvatura, menor será a deformação calculada analiticamente. Desta forma é explicada a razão da diferença entre o valor de deformação analítico “ $\epsilon_{\text{analítico}}$ ” em relação ao resultado de elementos finitos “ ϵ_{FEA} ”. A Figura 64 apresenta uma visualização aproximada da região de descolamento.

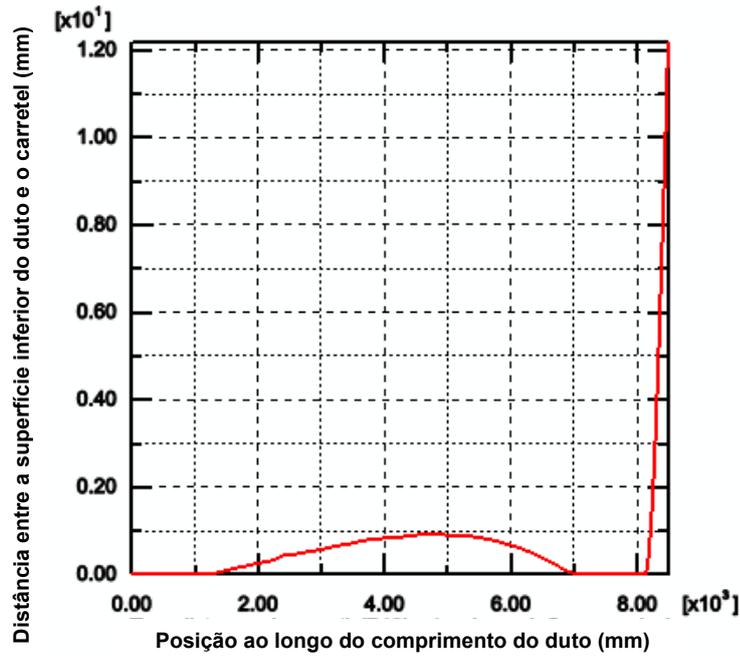


Figura 63 – Gráfico da distância do duto ao carretel (mm) versus comprimento do duto (mm)

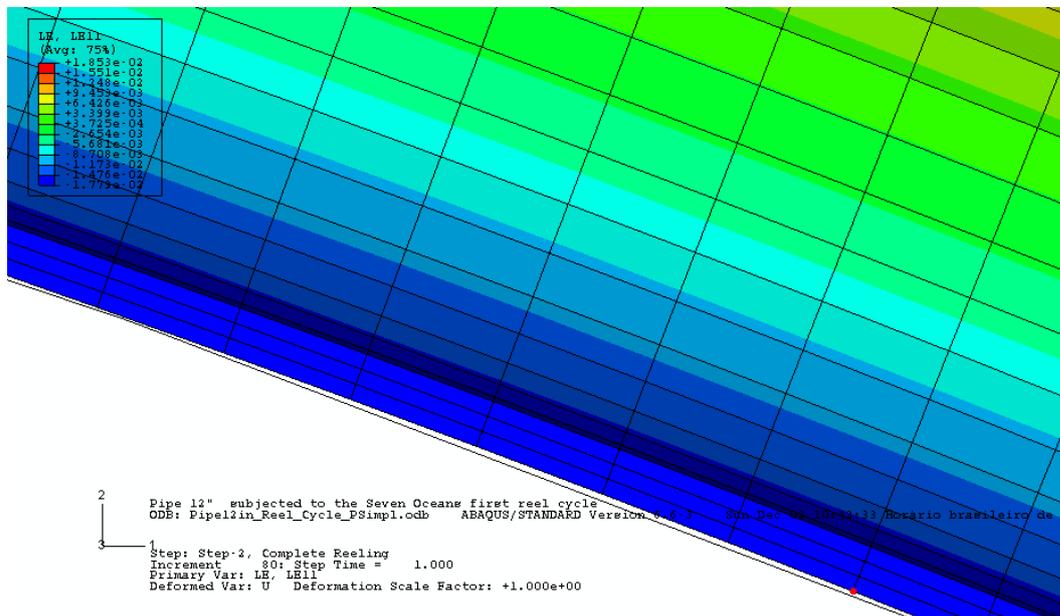


Figura 64 – Visualização do descolamento do duto da superfície do carretel

Uma última avaliação deste modelo é relativa à comparação com o resultado analítico do limite da zona elástica apresentado na Seção 4.4. A Figura 65 apresenta uma seção transversal do duto enrolado com o valor de “yy” e uma sobreposição da seção original. Para identificar a zona elástica, a resposta

gráfica de deformações foi limitada para valores de $\pm 0.2\%$ referentes ao valor de deformação plástica referente à tensão de escoamento. Observando os resultados, dois valores de “y” com um pequeno desvio foram apresentados em virtude de uma assimetria no resultado. O valor analítico encontrado de “yy” foi de 18.32mm e está demonstrado no APÊNDICE IV – Cálculo do limite da zona elástica ao longo da seção de um duto sob esforços de flexão. As diferenças percentuais em relação aos valores de 17.83mm e 20.31mm do cálculo de elementos finitos foram de 2.77% e 10.83% respectivamente. Estas diferenças podem ser esclarecidas em virtude da maior complexidade do modelo numérico, onde são considerados ovalização, endurecimento do material, entre outros fatores, que não são considerados no modelo analítico. No entanto, os valores calculados a partir do modelo analítico são satisfatórios e podem representar mais um critério de avaliação do modelo numérico.

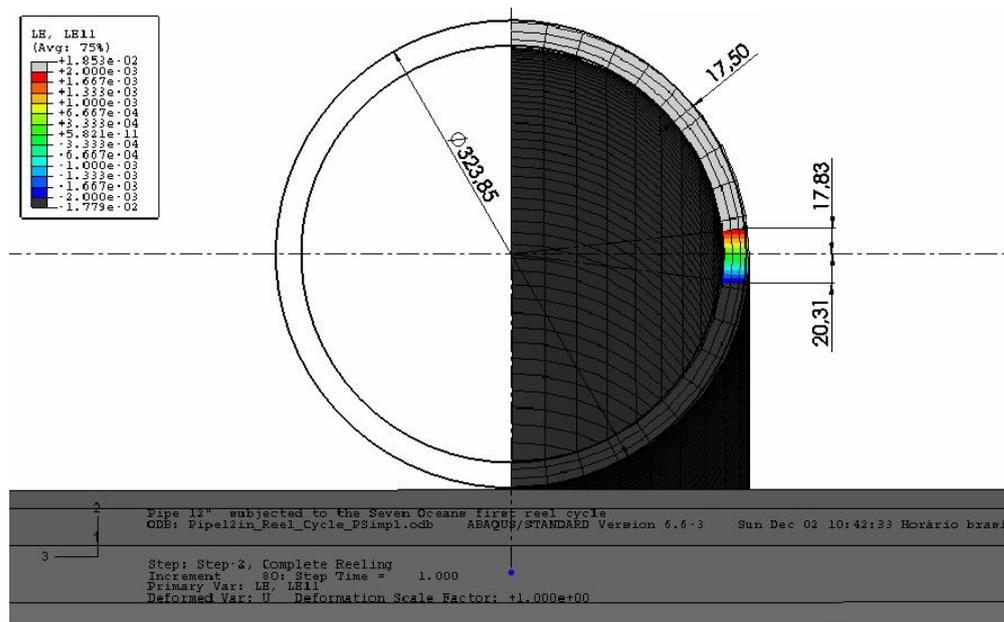


Figura 65 – Limite da zona elástica na seção transversal do duto enrolado

5.7. Modelo com sapatas de anodos – Duto engastado 3D

Nesta seção serão introduzidos no modelo as sapatas de anodo e o cordão de solda como elementos concentradores de deformação para medir o SNCF e avaliar seus efeitos sobre o projeto do duto. Apesar do interesse deste trabalho em avaliar as deformações na região compressiva, a sapata de anodo foi adicionada à geometria em ambos os lados do duto, pois este modelo será base para o modelo utilizado na Seção 5.11. O cordão de solda é simulado apenas como uma imperfeição geométrica do duto, não possuindo propriedades de materiais específicas para a região.

5.7.1. Modelo

Duas variáveis da sapata de anodo serão avaliadas para todas as relações DE/t dos dutos apresentados na Tabela 1. Elas são o diâmetro da sapata “ D_{sapanodo} ” e a distância da sapata ao cordão de solda “ L_{sapanodo} ”. No total foram realizados 22 casos diferentes apresentados na Tabela 21. A Figura 66 apresenta como são medidas estas variáveis. Estes casos foram avaliados com o objetivo de entender o comportamento dos elementos geradores de concentradores de deformação.

Análise	DE (in)	DE (mm)	DI (mm)	t - Espessura Parede (mm)	Diâmetro Anodo (mm)	Distância ANODO-SOLDA	DE/t
1	6.625	168.28	130.18	19.05	60	50	8.83
2	6.625	168.28	130.18	19.05	80	50	8.83
3	6.625	168.28	130.18	19.05	80	100	8.83
4	6.625	168.28	130.18	19.05	80	150	8.83
5	6.625	168.28	130.18	19.05	100	50	8.83
6	10.750	273.05	222.25	25.4	80	50	10.75
8	12.750	323.85	273.05	25.4	80	50	12.75
9	12.750	323.85	273.05	25.4	80	100	12.75
10	12.750	323.85	273.05	25.4	80	150	12.75
11	12.750	323.85	273.05	25.4	100	50	12.75
12	12.750	323.85	273.05	25.4	120	50	12.75
7	10.750	273.05	238.05	17.5	80	50	15.60
13	12.750	323.85	288.85	17.5	80	50	18.51
14	12.750	323.85	288.85	17.5	80	100	18.51
15	12.750	323.85	288.85	17.5	80	150	18.51
16	12.750	323.85	288.85	17.5	100	50	18.51
17	12.750	323.85	288.85	17.5	120	50	18.51
18	12.750	323.85	292.05	15.9	80	50	20.37
19	12.750	323.85	292.05	15.9	80	100	20.37
20	12.750	323.85	292.05	15.9	80	150	20.37
21	12.750	323.85	292.05	15.9	100	50	20.37
22	12.750	323.85	292.05	15.9	120	50	20.37

Tabela 21 – Casos analisados

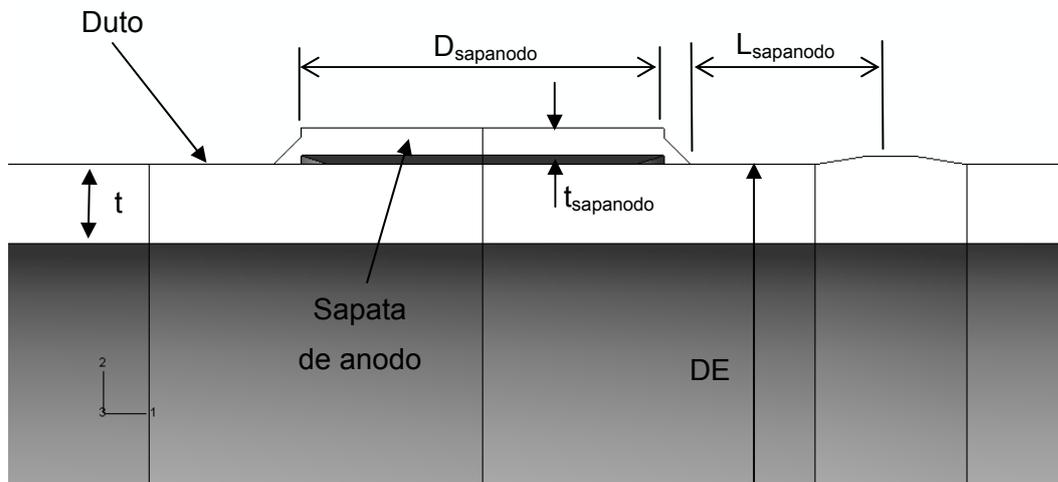


Figura 66 – Variáveis utilizadas nos modelos

O modelo desta seção apresenta as mesmas características de montagem, quantidade de passos, contatos, condições de contorno e carregamentos demonstrados na seção 5.6.1, não sendo necessária uma nova explanação sobre estes pontos.

Para simular a sapata de anodo com uma geometria mais próxima da realidade foi considerado que superfície interna da sapata não teve contato com a superfície externa do duto. A sapata e o duto estão conectados através do filete de solda no contorno da sapata. Para todos os modelos foi considerada uma espessura de sapata de $\frac{1}{4}$ ", e 2mm de espaço duto-sapata. A Figura 67 apresenta o detalhe da geometria. Devido à complexidade da geometria da sapata de anodo, foi necessário construir o modelo dentro do software de CAD Solidworks e então exportá-lo para o ABAQUS. O formato de arquivo de exportação foi o ".IGES" com características de COSMOS, outro software de elementos finitos.

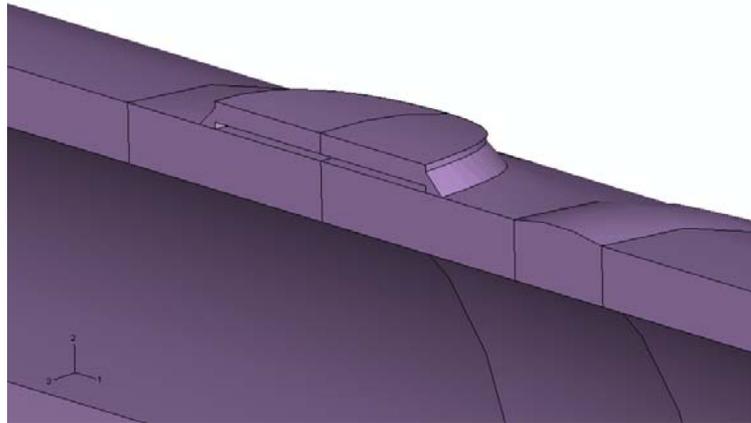


Figura 67 – Geometria da sapata de anodo no modelo de elementos finitos

Uma malha mista foi utilizada neste modelo devido à sua complexidade geométrica e por este motivo houve a impossibilidade de construir uma malha apenas com elementos hexaédricos como apresentado na Seção 5.6. A Figura 68 apresenta as regiões dos tipos de malha atribuídos à geometria. A cor verde representa os elementos hexaédricos lineares de 8-nós do tipo “C3D8R”. A cor amarela representa os elementos hexa-dominantes e utiliza o mesmo elemento da cor verde. A cor roxa representa os elementos tetraédricos lineares de 4-nós do tipo “C3D4”.

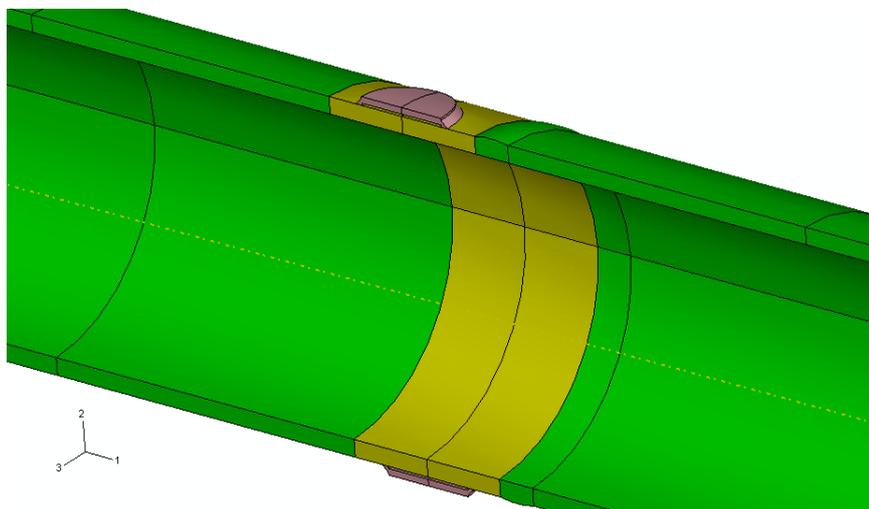


Figura 68 – Distribuição dos tipos de malha no modelo

O comprimento médio dos elementos foi de 50mm e ao longo da curvatura da seção do duto foram utilizados 39 elementos. Regiões do duto próximas às sapatas foram divididas para o refino de malha, uma vez que o objetivo da

análise é avaliar as deformações no local. Na espessura de parede do duto foram utilizadas três camadas de elementos. Em média, as malhas utilizadas nos modelos desta seção continham de 15000 a 20000 nós. A Figura 69 apresenta a malha resultante do modelo. O carretel foi definido com sendo um corpo analítico rígido.

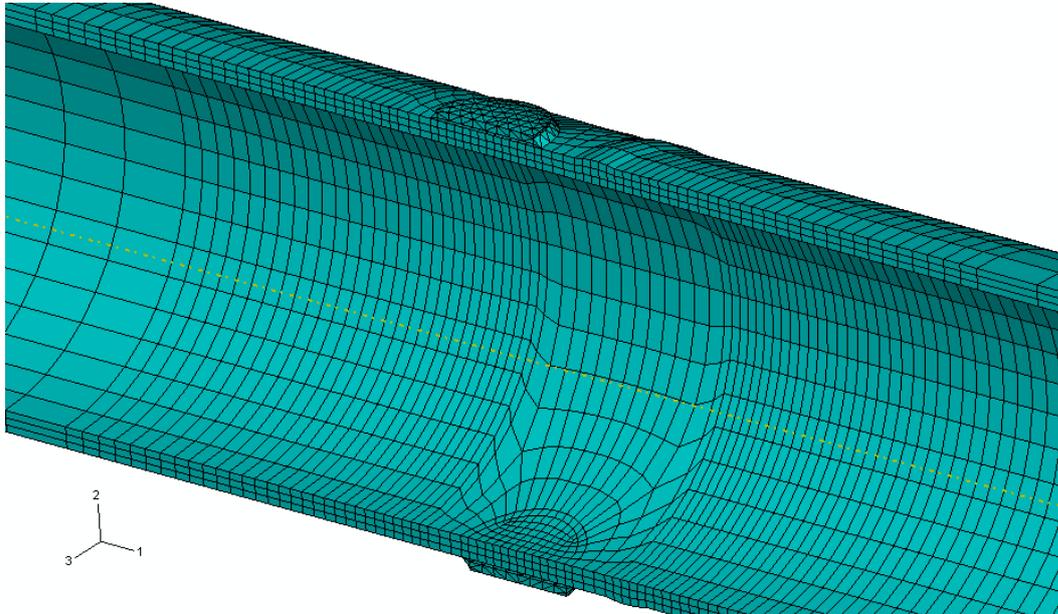


Figura 69 – Malha típica do modelo tridimensional com sapata de anodo

As análises desta seção não consideraram o revestimento. Os efeitos da utilização do revestimento serão vistos na Seção 5.12. Como os revestimentos possuem uma espessura igual ou maior do que a da sapata de anodo, não foi considerado o contato da sapata com o carretel. Isto induziria efeitos de concentração de deformação muito elevados e irrealistas, pois a sapata nunca entra em contato com a superfície do carretel.

5.7.2. Resultados

Devido ao grande número de análises realizadas, os resultados obtidos foram condensados na Tabela 22. Da Figura 70 até a Figura 73 são apresentados resultados típicos deste modelo. Todas as respostas gráficas estão apresentadas no APÊNDICE VI – Resultados dos modelos de sapata de anodo com duto engastado 3D.

Lista Análises

Diâmetro do Carretei = 18000 mm
 Módulo Elástico (E) = 207000 MPa
 Tensão Escoramento (Sy) = 414 MPa
 Deform. Elástica (Ee) = 0,200 %
 Load factor (Y) = 1,200
 Condition load effect factor (Yc) = 0,92
 YFE = 0,84
 Z1

Deformação Analítica

$$\epsilon_{analítico} = \frac{D_{tubo}}{D_{carretei} + D_{tubo}}$$

Deformação Característica DNV

$$\epsilon_e = 0,78 \times \left(\frac{t}{DE} - 0,01 \right) \times \alpha_h^{-1,5} \times \alpha_{Fv}$$

Análise	DE (m)	DE (mm)	DI (mm)	t. Espessura Parede (mm)	Diâmetro Anodo (mm)	Distância ANODO-SOLDA	DE/t	t/DE	Emalítico (%)	agw	Ec(%)	εc·YE	Escrito = εc/YE (YFy)	Ed FEA (%)	Ed FEA Escrito	Ed Max Anodo Esquerda FEA (%)	Ed Max Anodo Direita FEA (%)	Fator de Conc. Deform. Esquerda	Fator de Conc. Deform. Direito	ed MAESq - Escrito	ed MADir - Escrito
1	6,625	168,28	130,18	19,05	60	50	8,83	0,113	0,93	1,00	9,123	4,344	4,415	0,867	OK	1,265	1,197	1,43	1,35	OK	OK
2	6,625	168,28	130,18	19,05	80	50	8,83	0,11	0,93	1,00	9,123	4,344	4,415	0,865	OK	1,192	1,179	1,35	1,33	OK	OK
3	6,625	168,28	130,18	19,05	100	50	8,83	0,11	0,93	1,00	9,123	4,344	4,415	0,863	OK	1,227	1,241	1,39	1,41	OK	OK
4	6,625	168,28	130,18	19,05	120	50	8,83	0,11	0,93	1,00	9,123	4,344	4,415	0,864	OK	1,222	1,271	1,38	1,44	OK	OK
5	6,625	168,28	130,18	19,05	140	50	8,83	0,11	0,93	1,00	9,123	4,344	4,415	0,863	OK	1,062	1,073	1,23	1,22	OK	OK
6	10,750	273,05	222,25	25,4	80	50	10,75	0,09	1,49	1,00	7,339	3,495	3,451	1,433	OK	2,133	2,239	1,49	1,56	OK	OK
7	12,750	323,85	273,05	25,4	80	50	12,75	0,08	1,77	1,00	6,049	2,860	2,927	1,717	OK	2,476	2,672	1,44	1,56	OK	OK
8	12,750	323,85	273,05	25,4	80	100	12,75	0,08	1,77	1,00	6,049	2,860	2,927	1,714	OK	2,531	2,410	1,48	1,41	OK	OK
9	12,750	323,85	273,05	25,4	80	150	12,75	0,08	1,77	1,00	6,049	2,860	2,927	1,717	OK	2,596	2,494	1,49	1,45	OK	OK
10	12,750	323,85	273,05	25,4	80	200	12,75	0,08	1,77	1,00	6,049	2,860	2,927	1,716	OK	2,496	2,466	1,45	1,49	OK	OK
11	12,750	323,85	273,05	25,4	120	50	14,58	0,08	1,49	1,00	7,781	2,927	2,941	1,569	OK	2,453	2,585	1,49	1,49	OK	OK
12	10,750	273,05	268,85	17,5	80	50	10,51	0,05	1,77	1,00	3,893	1,854	1,884	1,449	OK	2,682	2,697	1,48	1,66	Não Conforme	OK
13	12,750	323,85	268,85	17,5	80	100	10,51	0,05	1,77	1,00	3,893	1,854	1,884	1,711	OK	2,625	2,469	1,44	1,66	Não Conforme	Não Conforme
14	12,750	323,85	268,85	17,5	80	150	10,51	0,05	1,77	1,00	3,893	1,854	1,884	1,711	OK	2,620	2,618	1,53	1,53	Não Conforme	Não Conforme
15	12,750	323,85	268,85	17,5	80	200	10,51	0,05	1,77	1,00	3,893	1,854	1,884	1,715	OK	2,623	2,755	1,53	1,61	Não Conforme	Não Conforme
16	12,750	323,85	268,85	17,5	120	50	10,51	0,05	1,77	1,00	3,893	1,854	1,884	1,733	OK	2,502	2,718	1,44	1,57	Não Conforme	Não Conforme
17	12,750	323,85	268,85	17,5	120	50	10,51	0,05	1,77	1,00	3,893	1,854	1,884	1,711	OK	2,580	2,770	1,51	1,62	Não Conforme	Não Conforme
18	12,750	323,85	292,05	15,9	80	50	20,37	0,05	1,77	1,00	3,443	1,640	1,666	1,701	Não Conforme	2,609	2,517	1,53	1,48	Não Conforme	Não Conforme
19	12,750	323,85	292,05	15,9	80	100	20,37	0,05	1,77	1,00	3,443	1,640	1,666	1,705	Não Conforme	2,653	2,653	1,56	1,56	Não Conforme	Não Conforme
20	12,750	323,85	292,05	15,9	80	150	20,37	0,05	1,77	1,00	3,443	1,640	1,666	1,699	Não Conforme	2,532	2,919	1,49	1,72	Não Conforme	Não Conforme
21	12,750	323,85	292,05	15,9	80	200	20,37	0,05	1,77	1,00	3,443	1,640	1,666	1,711	Não Conforme	2,625	2,747	1,53	1,61	Não Conforme	Não Conforme
22	12,750	323,85	292,05	15,9	120	50	20,37	0,05	1,77	1,00	3,443	1,640	1,666	1,711	Não Conforme	3,394					

Tabela 22 – Resultados do modelo com sapata de anodo

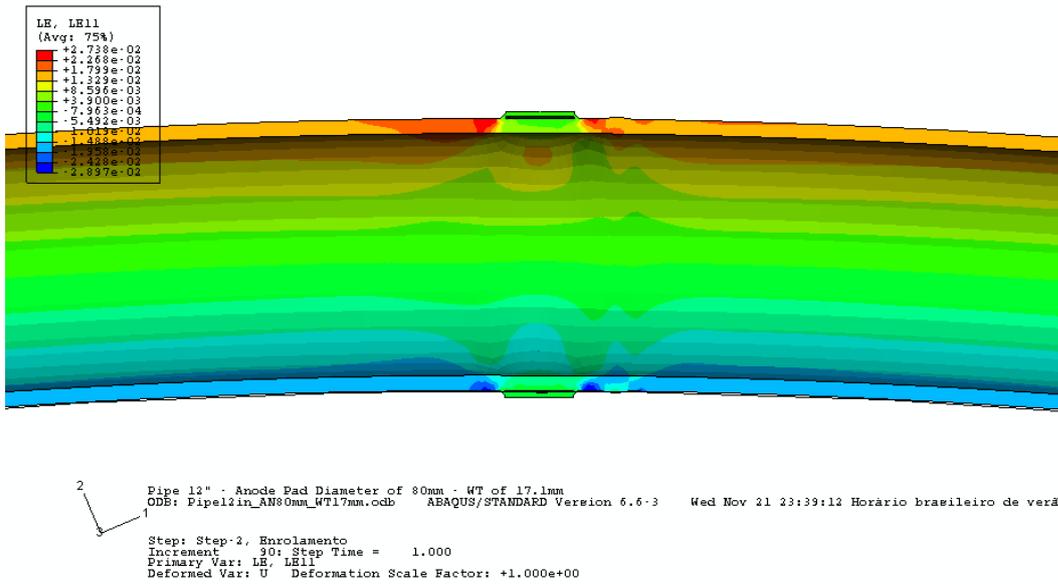


Figura 70 – Resultado das deformações longitudinais para $DE= 12.75''$,
 $t=17.5\text{mm}$, $D_{\text{sapanodo}}=80\text{mm}$ e $L_{\text{sapanodo}}=50\text{mm}$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510810/CA

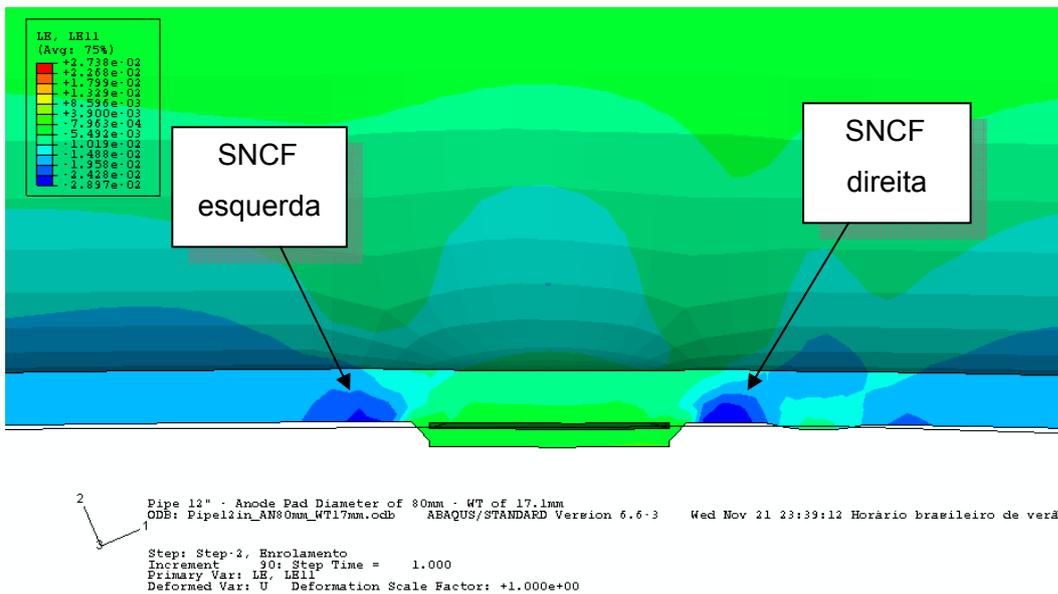


Figura 71 – Resultado das deformações longitudinais para $DE=12.75''$,
 $t=17.5\text{mm}$, $D_{\text{sapanodo}}=80\text{mm}$ e $L_{\text{sapanodo}}=50\text{mm}$ (região sob compressão)

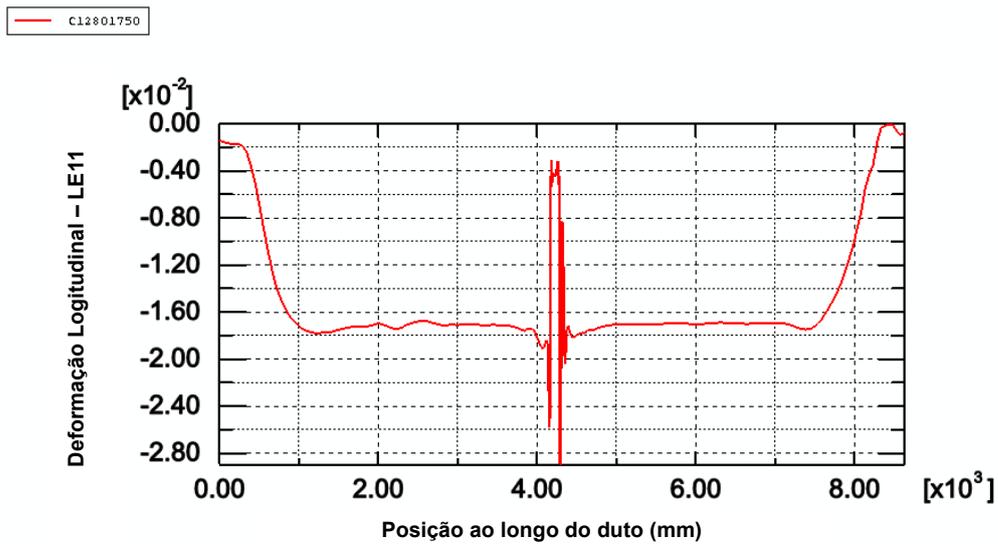


Figura 72 – Gráfico das deformações longitudinais para DE=12.75”, t=17.5mm, $D_{\text{sapanodo}}=80\text{mm}$ e $L_{\text{sapanodo}}=50\text{mm}$ (região 0 a 9m)

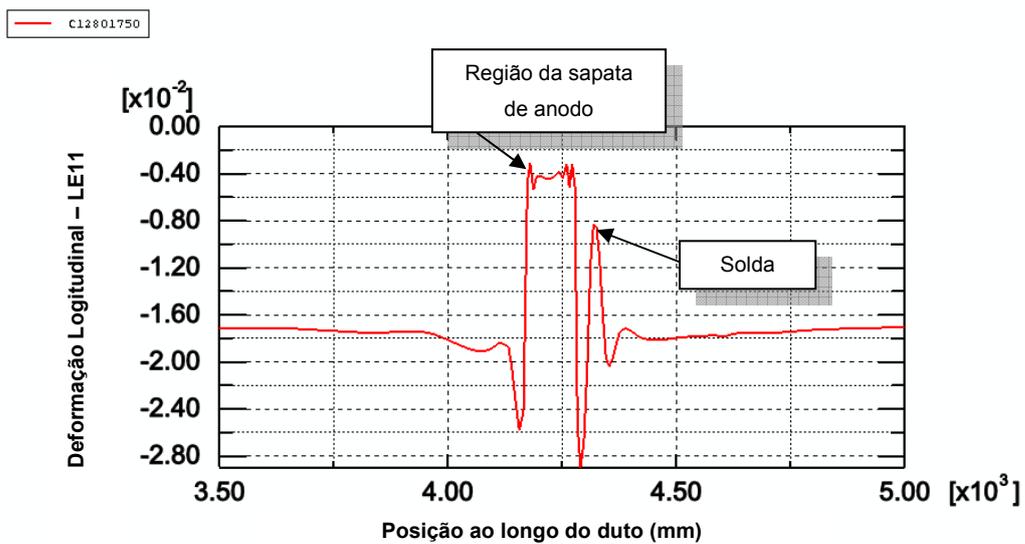


Figura 73 – Gráfico das deformações longitudinais para DE=12.75”, t=17.5mm, $D_{\text{sapanodo}}=80\text{mm}$ e $L_{\text{sapanodo}}=50\text{mm}$ (região 3.5m à 5m)

A Tabela 22 apresenta diversos resultados a partir dos modelos analisados. Para facilitar o entendimento dos resultados foram definidos dois pontos de concentração de deformação à esquerda e a direita de acordo com a visualização da Figura 71. Os resultados são assimétricos devido a presença da

solda no lado direito do anodo. Esta convenção será aplicada para todos os modelos que contiverem sapatas de anodo e cordão de solda.

A Figura 72 e a Figura 73 apresentam gráficos típicos das deformações longitudinais na posição 6 horas do duto. A sapata de anodo gera nos resultados uma perturbação de pequena extensão ao longo do duto. As figuras apresentadas acima mostram que a concentração de deformação longitudinal é localizada também na extensão da parede do duto, pois não está distribuída por completo ao longo da mesma. Na região da superfície do duto no interior da sapata de anodo as deformações diminuem, pois esta funciona como um aumento de espessura e torna a região mais resistente.

Os fatores de concentração de deformação (SNCF) foram calculados dividindo o valor da deformação de elementos finitos na posição de deformação máxima ao lado das sapatas de anodo, pelo valor da deformação nominal obtida também pelo método de elementos finitos.

Em uma avaliação inicial da Tabela 22 foi percebido que os valores de “ ϵ_d ” para relações DE/t de 20.37 não atenderiam o critério da DNV. Quando avaliados os valores das regiões de concentração esquerda e direita, os dutos com relação DE/t maiores do que 18.51 também não seriam aprovados pelo critério DNV considerando todos os fatores de segurança da norma. Portanto será necessário aplicar os conceitos aprendidos na Seção 5.4 para reavaliar os modelos estudados, porém com a inclusão da sapata de anodo. Desta forma serão obtidos os valores de deformação limite com a presença da sapata de anodo no modelo e, portanto verificado a resistência do duto ao processo de enrolamento. Este problema é abordado na Seção 5.13.

Com o objetivo de obter respostas relacionáveis, é sugerida uma análise dimensional das análises realizadas. A partir da Figura 66 é possível listar todas as variáveis de interesse. As escolhidas foram “ DE ”, “ t ”, “ $D_{sapanodo}$ ”, “ $t_{sapanodo}$ ” e “ $L_{sapanodo}$ ”. Cinco variáveis exigem a escolha de quatro “pi” termos apresentados a seguir.

$$\frac{DE}{t}, \frac{t}{D_{sapanodo}}, \frac{t}{t_{sapanodo}}, \frac{t}{L_{sapanodo}}$$

A Figura 74 e a Figura 75 apresentam dois gráficos comparativos em relação à variação do diâmetro da sapata de anodo para dutos com “DE”, “t” e “L_{sapanodo}” iguais. Da resposta gráfica pode-se concluir que o diâmetro do anodo possui pouca influência sobre a resposta de deformações. A variação dos valores máximos de deformação à esquerda e à direita dos anodos é mínima. Isto se repete com outras relações DE/t. Portanto foi concluído que o diâmetro da sapata de anodo não é variável determinante para o SNCF. Logo, o “pi” termo $t/D_{sapanodo}$ não apresenta resultados representativos.

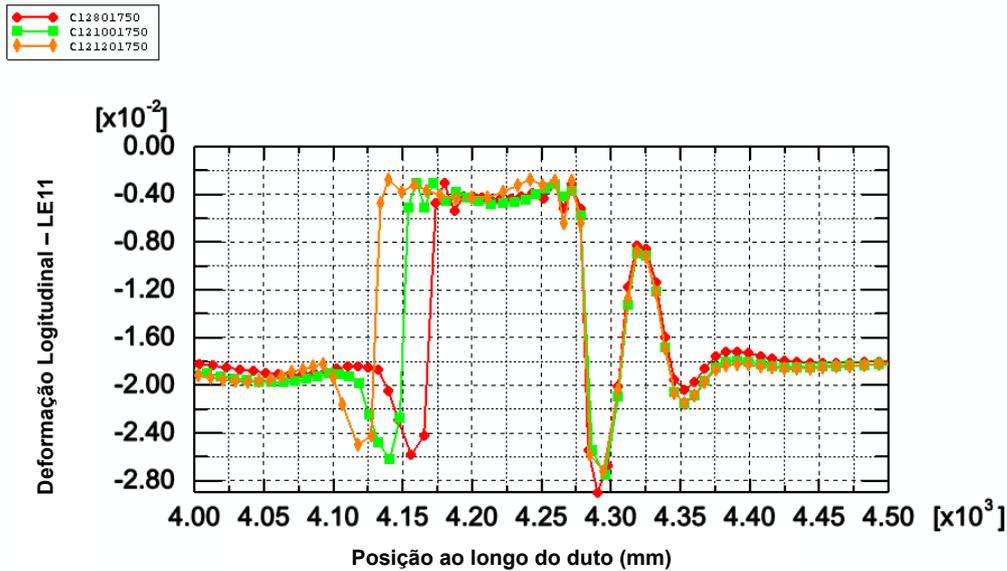


Figura 74 – Gráfico comparativo da região da sapata de anodo para DE=12.75, t=17.5mm e L_{sapanodo}=50mm. D_{sapanodo}=80mm, 100mm e 120mm.

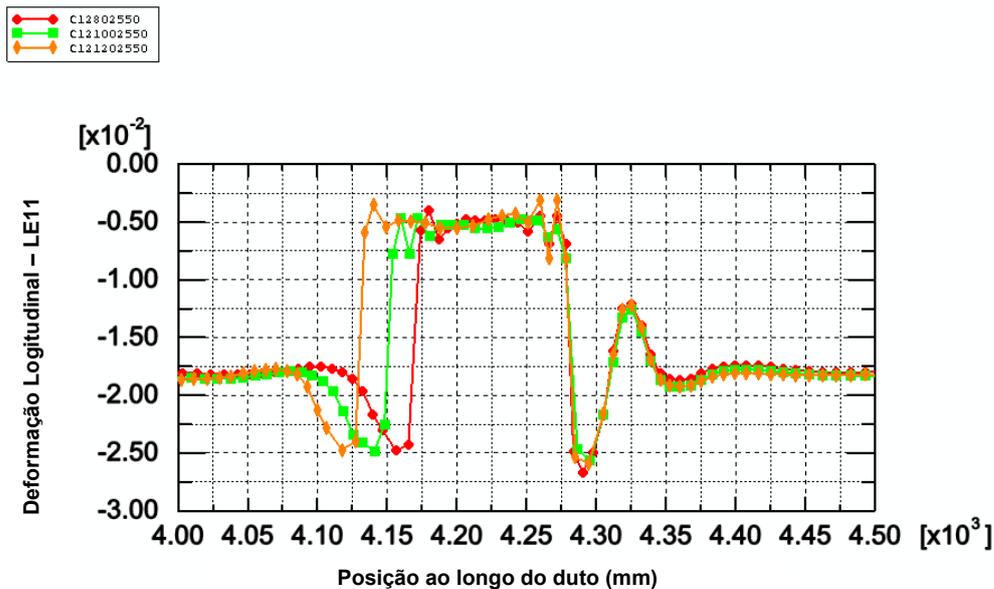


Figura 75 – Gráfico comparativo da região da sapata de anodo para DE=12.75, t=25.4mm e L_{sapanodo}=50mm. D_{sapanodo}=80mm, 100mm e 120mm.

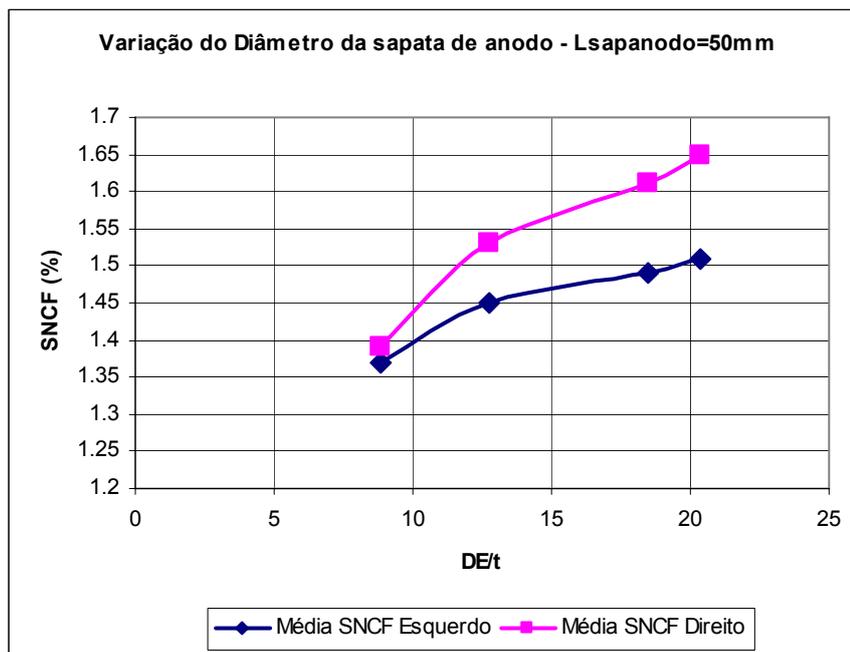


Figura 76 – Gráfico SNCF versus DE/t para $L_{\text{sapanodo}}=50\text{mm}$

Se o diâmetro da sapata de anodo não sensibiliza o valor do SNCF é razoável realizar a média dos valores dos fatores de concentração para obter um valor para cada relação DE/t. O gráfico da Figura 76 traduz este raciocínio e indica que a concentração de deformação gerada a partir da sapata do anodo é sensível à relação DE/t para uma distância " L_{sapanodo} " constante. Para este gráfico a variável " L_{sapanodo} " foi mantida constante e igual a 50mm. A amplificação dos valores de concentração é induzida pela proximidade da sapata de anodo com o cordão de solda conforme a curva descrita para o SNCF direito. Quanto menos espessos os dutos (maiores DE/t) maiores são os valores de SNCF, apresentando-se assim um comportamento bastante razoável.

A partir do mesmo tipo de raciocínio, a variação na distância da sapata de anodo ao cordão de solda não apresentou sensibilidade para valor do SNCF. A Figura 77 mostra que os valores de deformação longitudinal permanecem com pequenas variações para ambos os lados da sapata de anodo, quando modificada a distância ao cordão de solda. Novamente, outro "pi" termo t/L_{sapanodo} não apresenta resultados representativos.

Se a distância entre a sapata de anodo e o cordão de solda não sensibiliza o valor do SNCF é razoável novamente realizar a média dos valores dos fatores

de concentração para obter um valor para cada relação DE/t . O gráfico da Figura 78 traduz este raciocínio e indica novamente que a concentração de deformação gerada a partir da sapata do anodo é sensível à relação DE/t para um diâmetro de sapata constante. Para este gráfico a variável “ D_{sapanodo} ” foi mantida constante e igual a 80mm.

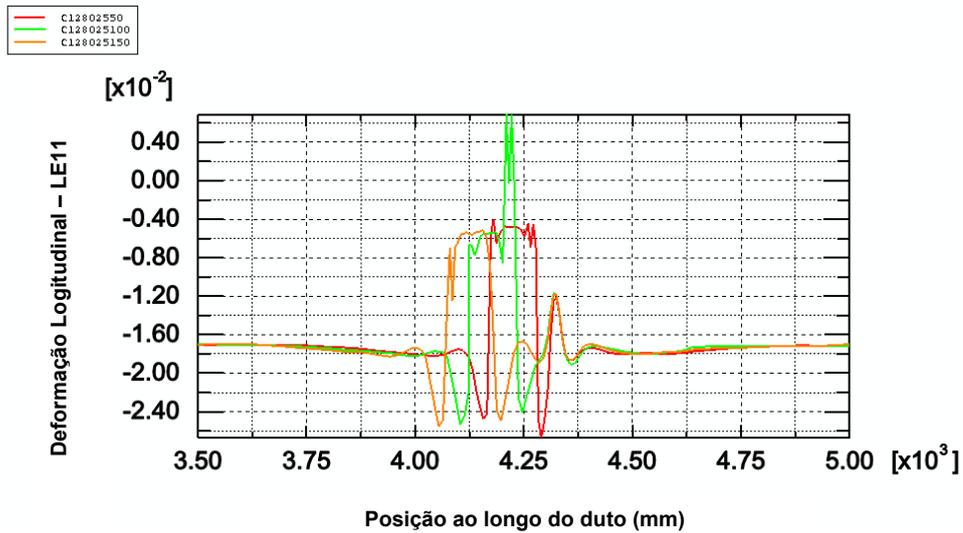


Figura 77 - Gráfico comparativo da região da sapata de anodo para $DE=12.75$, $t=25.4\text{mm}$ e $D_{\text{sapanodo}}=80\text{mm}$. $L_{\text{sapanodo}}=50\text{mm}$, 100mm e 150mm .

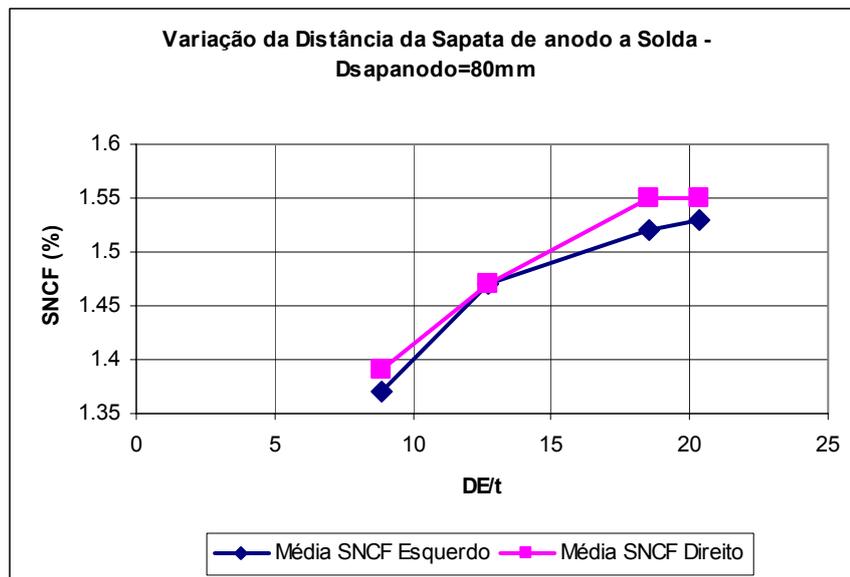


Figura 78 - Gráfico SNCF versus DE/t para $D_{\text{sapanodo}}=80\text{mm}$

O último “pi” termo a ser avaliado é o t/t_{sapanodo} . Para avaliação deste foi necessário fixar as variáveis “ DE ”, “ D_{sapanodo} ” e “ L_{sapanodo} ”. Observando a Tabela

22, somente a partir do duto de 12.75” é possível filtrar três resultados para uma avaliação de valores de SNCF apresentados na Figura 79. Os demais diâmetros possuem apenas duas repostas. Para o cálculo dos valores de t/t_{sapanodo} foi considerado o valor de “ t_{sapanodo} ” constante e igual a 6mm.

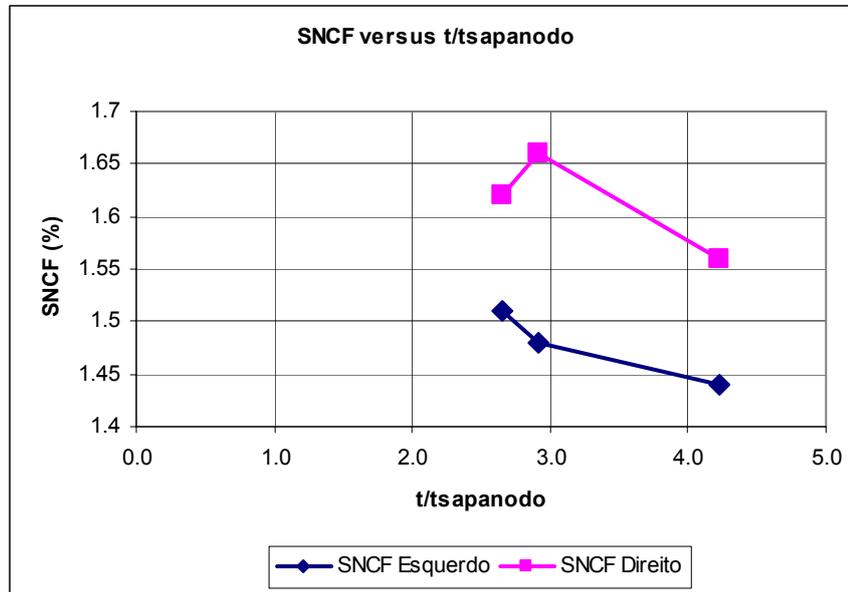


Figura 79 - Gráfico SNCF versus t/t_{sapanodo} para $DE=12.75$ ", $D_{\text{sapanodo}}=80\text{mm}$ e $L_{\text{sapanodo}}=50\text{mm}$

Como pode ser observado na Figura 79 o lado esquerdo da sapata, o qual não sofre influência da solda, apresenta um comportamento de decaimento uniforme a medida que a relação t/t_{sapanodo} é aumentada. No entanto, o lado direito não apresenta um comportamento uniforme. Isto ocorre provavelmente por interferência da geometria de solda. A partir dos resultados obtidos, foi observado que para uma avaliação criteriosa deveriam ser analisados uma quantidade maior de modelos para a obtenção de uma curva significativa. No entanto, o gráfico indica que o “pi” termo analisado é representativo, o que é suficiente para este estudo.

Após todas as análises realizadas foi concluído que os SNCF variam primariamente com a relação DE/t . A margem de variação foi de 1.22 a 1.72 para relações DE/t de 8.83 a 20.37. Estes valores podem ser observados na Figura 80. Para o projeto de sapatas de anodo foi observado que esta margem de resultados dificulta uma previsão analítica. Como foi mostrada anteriormente, a modificação de uma variável perturba a amplificação do efeito da resposta. Se os

gráficos da Figura 76 e da Figura 78 forem comparados para as mesmas relações DE/t, os SNCFs serão diferentes. No entanto, observando a Figura 80 é possível traçar uma curva a partir dos valores máximos de SNCF para cada DE/t e a partir deste ponto gerar uma sensibilidade da resposta esperada. Por exemplo, para uma relação DE/t de 8.83 poderia ser aplicado um SNCF de 1.44. Da mesma forma para um DE/t de 20.37 poderia ser aplicado um fator de SNCF de 1.72. Estes valores são os mais conservativos e são aplicáveis somente aos limites de DE/t definidos e a margem das variáveis de anodo utilizadas neste trabalho. Isto não significa que o projeto deva ser reprovado caso as deformações obtidas sejam maiores do que os critérios de normas. Na Seção 5.13 o valor crítico de deformação é abordado e discutido com base na utilização de modelos de elementos finitos.

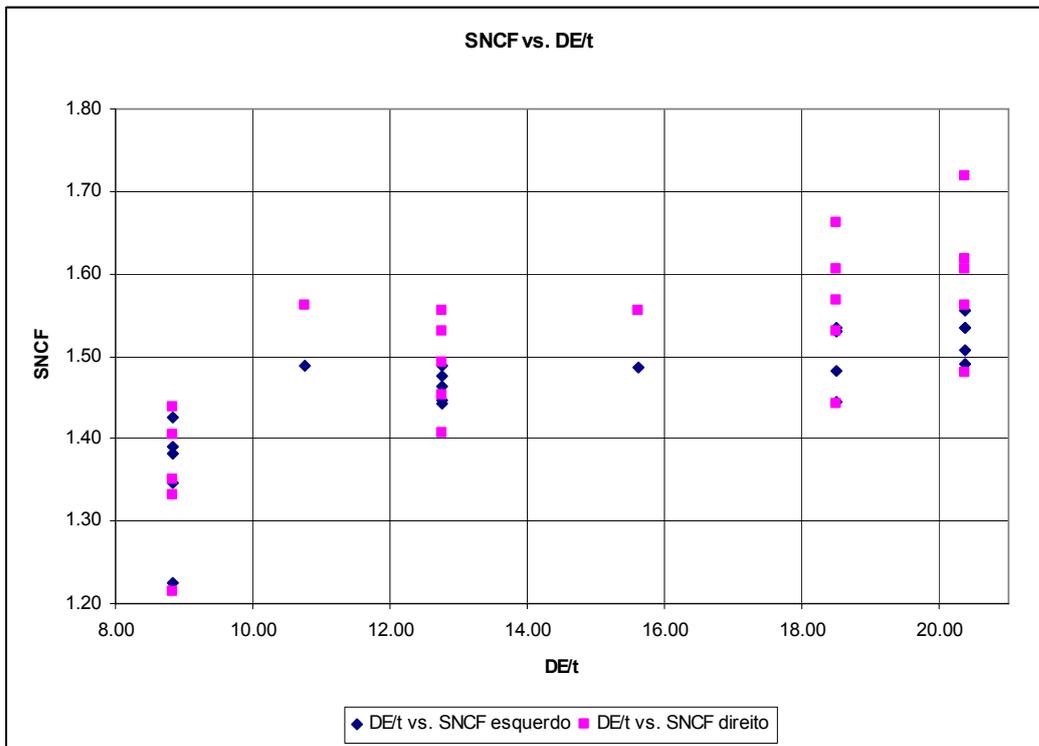


Figura 80 – Gráfico geral de resultados

5.8. Modelo com sapatas de anodo e aplicação da carga para enrolamento (“back tension”)

O modelo utilizado nesta seção é exatamente o utilizado na Seção 5.7.1. No entanto, foi introduzida uma carga na extremidade do duto, com o objetivo de simular o carregamento de tração ao qual o este é sujeito durante o enrolamento como mencionado na Seção 4.3.

5.8.1. Modelo

As condições de contorno e o carregamento transversal são os mesmos descritos na Seção 5.7.1. A carga para o enrolamento é aplicada na direção longitudinal do duto e no mesmo ponto de referência onde é aplicada a carga transversal. Ela é do tipo seguidora com o objetivo de manter a sua orientação alinhada com o eixo do duto.

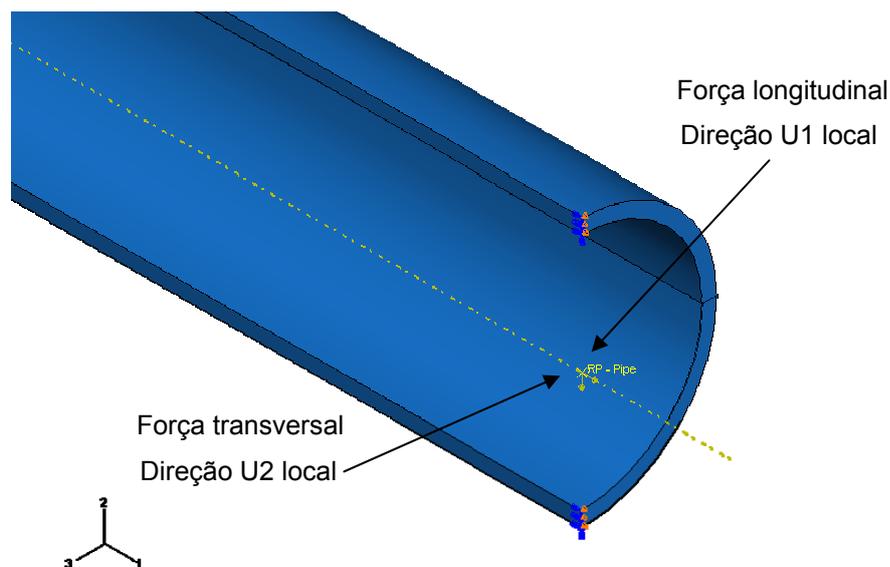


Figura 81 – Carregamento aplicado ao modelo tridimensional

A análise é realizada em dois passos. O valor da carga de longitudinal é aplicado integralmente no 1º passo para garantir que o duto esteja totalmente tensionado no início do 2º passo, onde toda a carga transversal é aplicada. Isto permite que o duto flexione em um estado de deformações previamente influenciado pela carga de enrolamento.

Os dutos com a sapata de anodo foram submetidos a valores de cargas de enrolamento de 8.68t, 25t, 50t e 100t. Desta forma, será possível mensurar a influência da carga de enrolamento nas deformações longitudinais. O valor de 8.68t foi escolhido a partir do cálculo analítico apresentado na Seção 4.3 e no APÊNDICE III – Cálculo da mínima carga para enrolamento (“back tension”). Os demais valores foram escolhidos aleatoriamente, apenas com o objetivo de observar uma faixa de valores ao qual o duto pode ser submetido durante o enrolamento.

5.8.2. Resultados

Os resultados obtidos referentes às deformações longitudinais foram condensados na Tabela 23 e na Figura 82. As respostas gráficas destes resultados estão apresentadas da Figura 83 até a Figura 85.

DE (mm)	t (mm)	Carga de Enrolamento ("Back Tension") (t)	ϵ_d FEA (%)	ϵ_d Max Anodo Esquerdo FEA (%)	ϵ_d Max Anodo Direito FEA (%)
323.85	17.5	0	1.70	2.58	2.90
		8.65	1.67	2.58	2.76
		25	1.60	2.51	2.70
		50	1.52	2.78	2.59
		100	1.36	2.98	2.33

Tabela 23 – Resultados das análises de carga de enrolamento

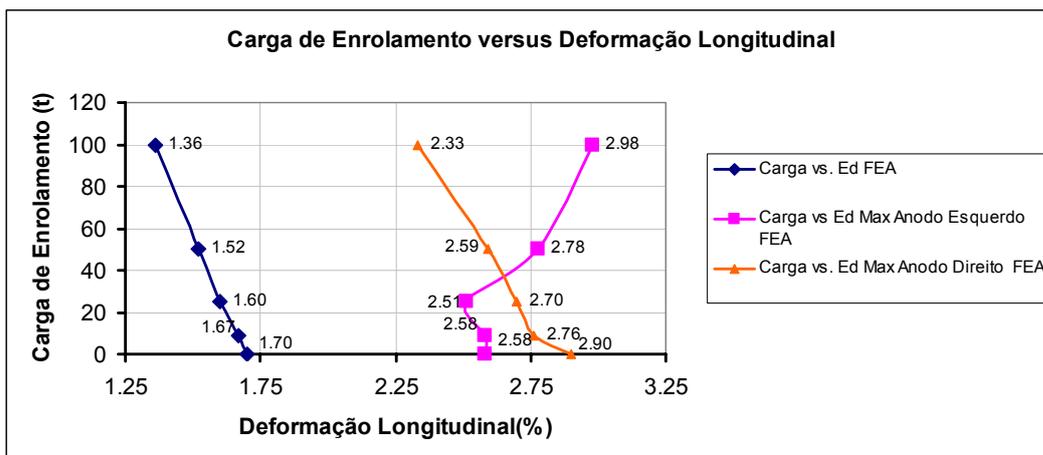


Figura 82 – Gráfico dos resultados das análises de carga de enrolamento versus a deformação longitudinal

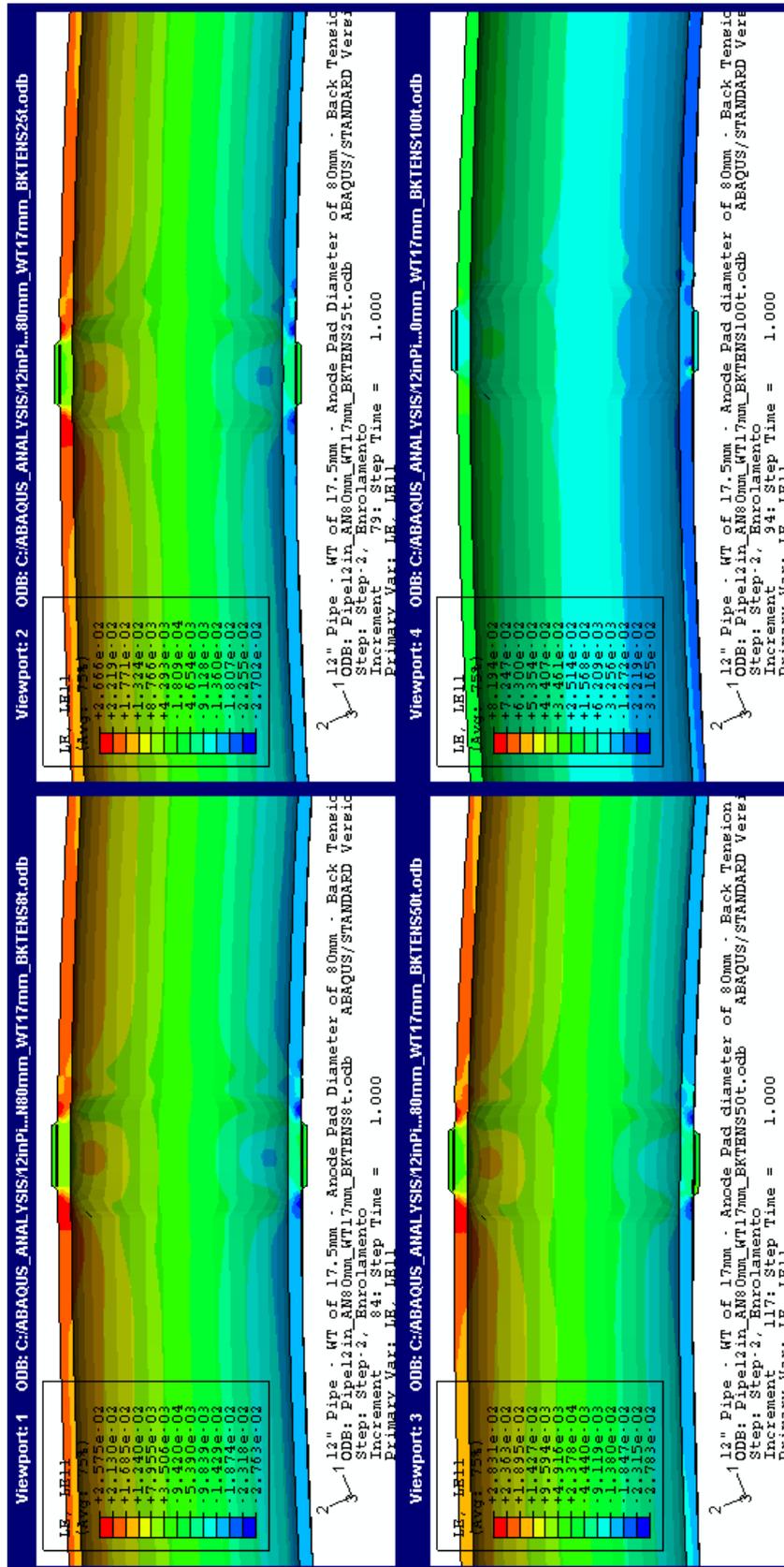


Figura 83 – Resultados das deformações longitudinais para cargas de enrolamento de 8.65t, 25t, 60t e 100t

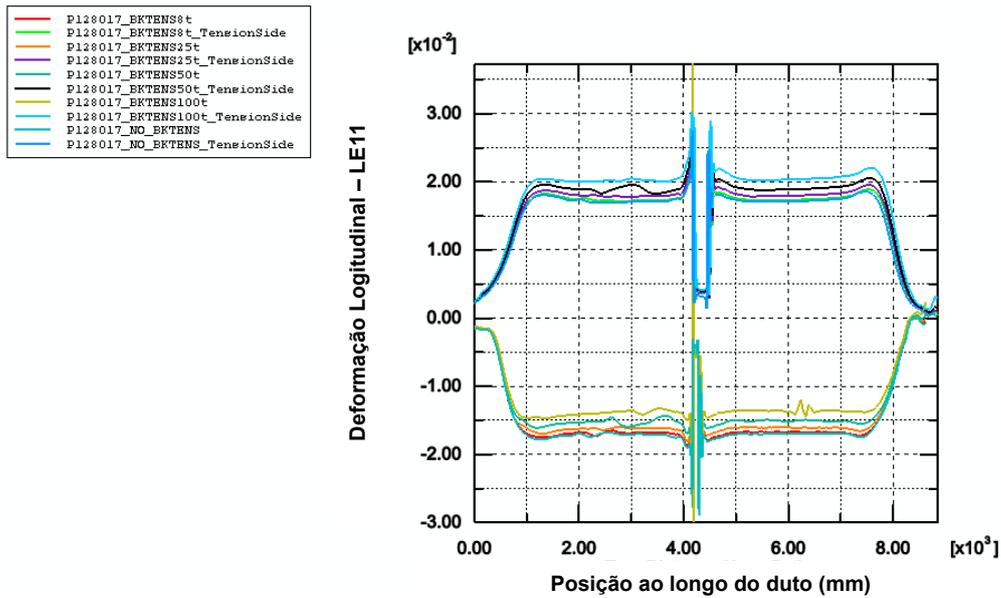


Figura 84 – Resultados das deformações longitudinais para diferentes cargas de enrolamento

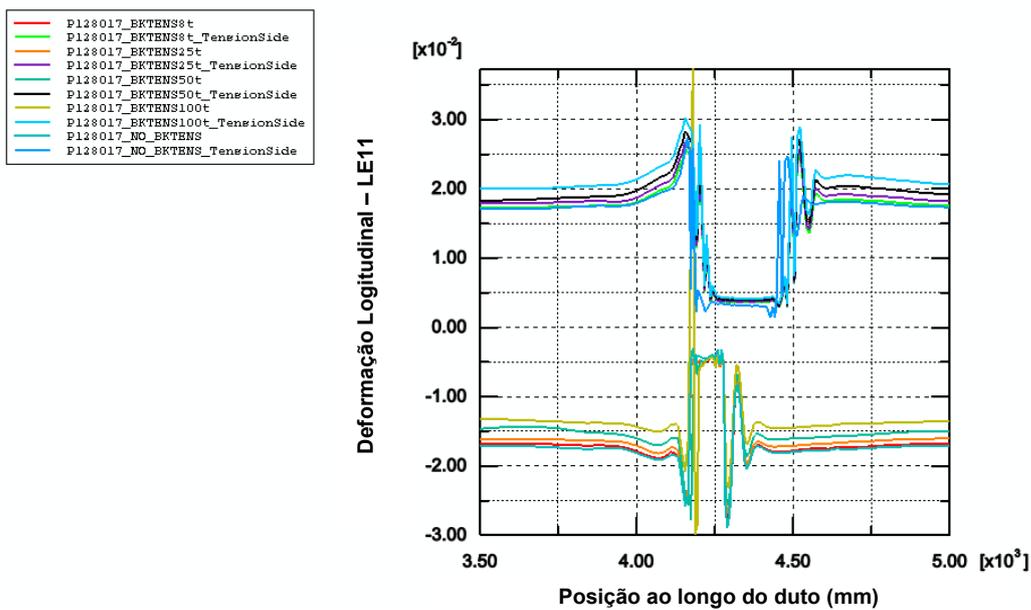


Figura 85 – Resultados das deformações longitudinais para diferentes cargas de enrolamento na seção de 3.5m até 5m

Os resultados apresentados na Tabela 23 e nas figuras acima apresentam valores esperados para a deformação “ ϵ_{FEA} ”, onde a deformação longitudinal na região compressiva tem o seu valor reduzido com o aumento da carga de enrolamento. Isto ocorre em virtude das tensões nesta região serem negativas, e a carga de enrolamento produz tensões positivas reduzindo o valor das

deformações compressivas. O oposto ocorre na região sob tração, na parte superior do duto, onde o valor da deformação longitudinal aumenta, pois os valores de tensão da região sob tração se somam com o valor das tensões positivas produzidas pela carga de enrolamento. Isto é observado na Figura 84 e na Figura 85.

Nas regiões de concentração de deformação, ao lado das sapatas de anodo, um comportamento similar da região sem concentradores é observado para as deformações do lado direito da sapata. Porém no lado esquerdo ocorre um comportamento inverso. As deformações crescem à medida que a carga de enrolamento aumenta. Este comportamento pode ser explicado pelo lado esquerdo ser uma região menos rígida que a direita estando sujeita a concentração de deformações. O lado direito possui uma geometria de transição da espessura da sapata de anodo até a espessura da parede do duto de forma “mais suave”, devido à presença da descontinuidade da solda. O lado esquerdo faz uma transição da espessura total (sapata de anodo + parede do duto) brusca para a espessura de parede do duto. Isto gera curvaturas maiores nesta área e conseqüentemente concentrações de deformação, que aliadas à carga de enrolamento estão aumentando o efeito de deformação localizada.

Portanto, incluir no processo de enrolamento cargas longitudinais que tensionem os dutos auxilia na diminuição dos efeitos compressivos da parte do duto em contato com o carretel. Conseqüentemente, o risco do efeito de flambagem localizada é reduzido. No entanto, devem ser avaliadas regiões de concentradores como sapatas de anodo, transições de espessura, entre outras variações geométricas, e observar se as concentrações de deformação estão aumentando, o que pode provocar a flambagem do duto naquela região. As cargas de enrolamento na embarcação “Seven Oceans” estão na ordem de 25t a 40t, não representando um risco de falha estrutural para o duto.

5.9. Modelo complexo com sapatas de anodos e rotação do carretel – outra abordagem

Esta seção tem como objetivo validar o modelo utilizado até o momento verificando o mesmo problema com uma abordagem completamente diferente. Se os resultados de ambos os modelos forem equivalentes significará que o padrão de reposta obtida pelo modelo utilizado tem sua confiabilidade aumentada.

5.9.1. Modelo

Este modelo consiste em utilizar o mesmo duto com sapata de anodo, tendo a mesma malha descrita na Seção 5.7, e bobiná-lo através da rotação do carretel. Foi selecionada uma única geometria de duto para validar o modelo. O diâmetro do duto utilizado foi de 12.75” com espessura de parede de 17.5mm. O diâmetro da sapata de anodo foi de 80mm distanciado 50mm do cordão de solda. A utilização da mesma malha utilizada na Seção 5.7 é imprescindível para comparação com o modelo de mesmas dimensões. A vantagem inicial deste modelo é que este representa o histórico de deformações à medida que o duto é enrolado. Este é um modelo mais próximo do enrolamento real. Em contrapartida, demanda mais tempo computacional para resolvê-lo. Na Seção 5.9.2 serão discutidas as vantagens e desvantagens de cada modelo.

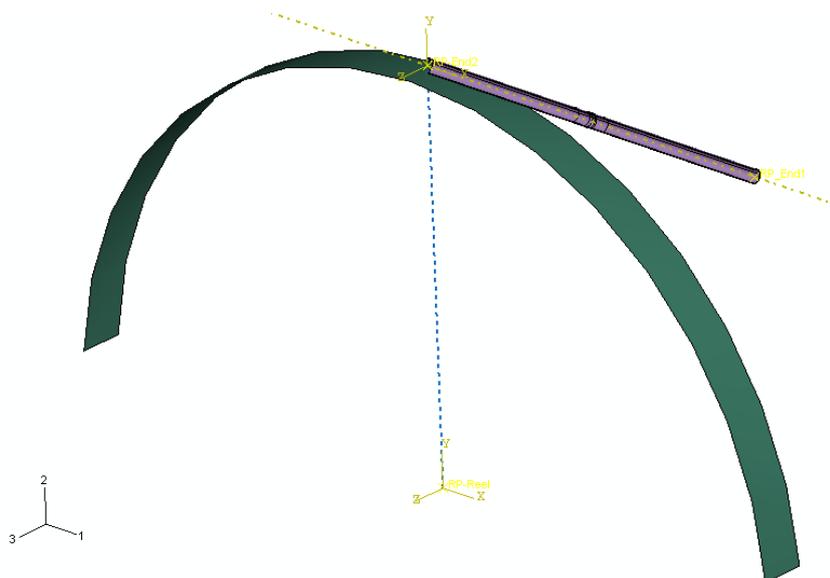


Figura 86 – Montagem do modelo de rotação do carretel

A Figura 86 apresenta a montagem do modelo utilizada. Como pode ser observado, o carretel apresenta uma seção de 160°. O raio utilizado foi de 9m, valor relativo à embarcação Seven Oceans.

A análise é dividida em dois:

- **Passo 1:** O duto é flexionado através de um deslocamento prescrito de 100mm em uma das extremidades sobre o carretel para que seja determinado o contato carretel-duto. A outra extremidade próxima ao carretel permanece engastada. O duto é simétrico no plano 1-2 e a condição de simetria foi aplicada. Está aplicada ao carretel neste instante uma condição de engastamento. Este passo está representado na Figura 87.
- **Passo 2:** O engaste da extremidade do duto é desativado e esta é conectada ao centro do carretel por um elemento de ligação do tipo “viga”. A extremidade onde foi aplicado o deslocamento prescrito se torna livre na direção U1 e fixa nas direções U2 e U3, a fim de permitir que o duto “deslize” sobre estas condições de contorno quando o carretel iniciar a rotação. No carretel, todos os graus de liberdade são fixados com exceção de UR3, na qual foi imposta uma rotação prescrita de 1rad (=57°). Este valor é calculado a partir da equação (49) e é função do comprimento de arco bobinado. O carretel inicia a rotação e esta é transferida ao duto através do elemento de ligação. Desta forma o duto inicia o processo de enrolamento até o final do passo 2. A curva de crescimento de rotação é linear. Este passo está representado na
- Figura 88.

$$\theta = UR3 = \frac{\text{comprimento duto}}{r_{car}} \quad (49)$$

As condições de contorno aplicadas em ambas as extremidades do duto foram aplicadas a pontos de referência e estes foram conectados às respectivas faces através de um elemento de acoplamento utilizando o mesmo procedimento apresentado na Seção 5.6.

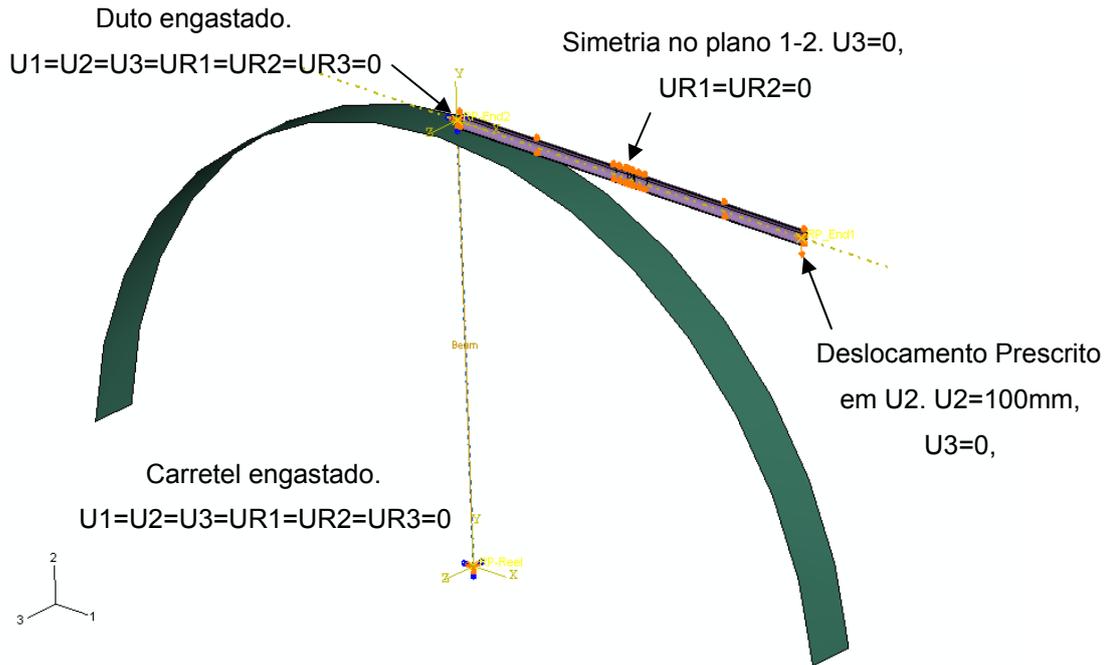


Figura 87 – Condições de contorno e carregamentos aplicados no Passo 1

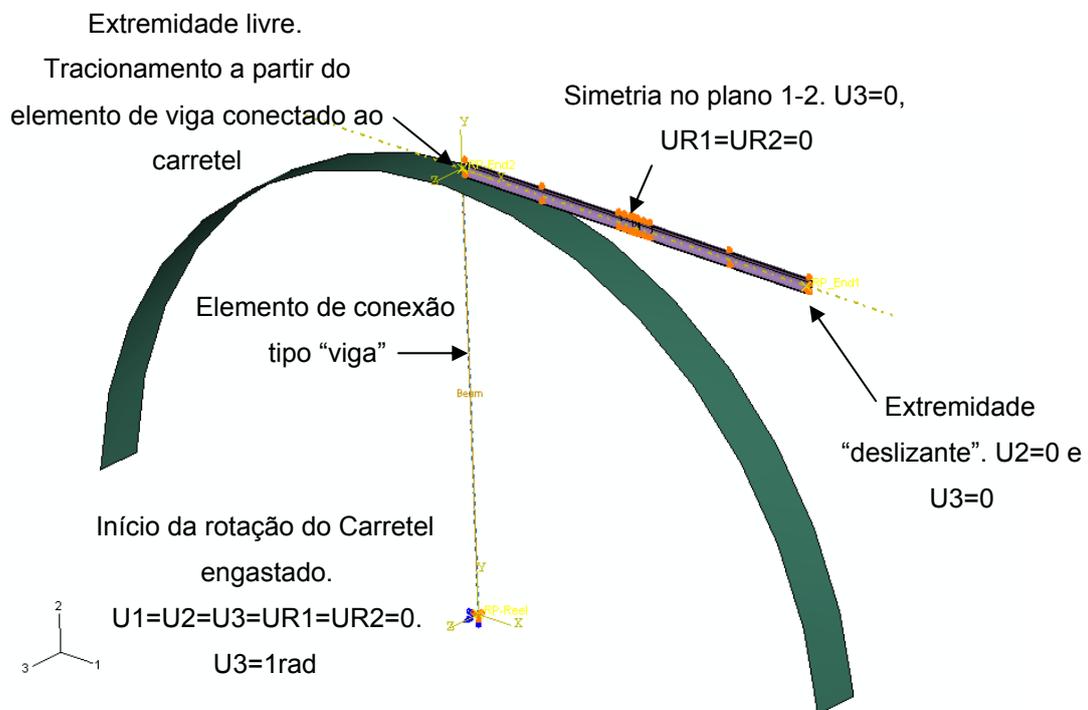


Figura 88 – Condições de contorno e carregamento aplicados no Passo 2

O contato carretel-duto apresenta as mesmas características descritas nos modelos das seções anteriores. O carretel foi modelado como um corpo rígido analítico, tal como nas seções anteriores.

O comentário da Seção 5.4.2 relativo à associação do material do duto ao sistema de coordenadas locais foi aplicado à este modelo, para a obtenção das deformações longitudinais corretas.

5.9.2.Resultados

A Figura 89 e a Figura 90 apresentam os resultados do modelo de rotação do carretel na seqüência de enrolamento. Nestas figuras pode ser observada a rotação do carretel através do giro do elemento de conexão tipo “viga”. Estas respostas são apenas relativas ao Passo 2, uma vez que o Passo 1 foi definido apenas para identificação do contato carretel-duto. A Figura 90 apresenta a seqüência em ângulo e foi observado que a distribuição das deformações longitudinais é suave, atingindo uma boa qualidade de resposta.

Da Figura 91 até Figura 94 são apresentados os resultados de deformação longitudinal do duto relativos ao último incremento do Passo 2. Na Figura 93 e na Figura 94, os resultados desta seção são comparados com os do modelo apresentado na Seção 5.7, para a mesma geometria. Na Tabela 24 estes dados são apresentados na forma numérica. A partir das figuras e da tabela mencionadas foi observado que as curvas de deformação longitudinal são muito próximas, apresentando uma pequena discrepância na região dos concentradores de deformação. A maior discrepância foi encontrada no lado direito das deformações, com um valor de diferença de 5.6%. A distância entre as respostas aumenta um pouco mais quando são comparados os SNCFs. Isto ocorre pelo fato dos SNCFs serem calculados à partir da deformação nominal obtida através do método de elementos finitos. Esta discrepância foi de 4%. Como mencionado anteriormente, as diferenças no valor nominal são devidas ao raio de curvatura assumido pelo duto no enrolamento. O duto, pelo método de rotação do carretel, está com raio de curvatura pouco maior que o do modelo de flexão e isto se refletiu na deformação nominal.

As diferenças apresentadas por ambos os modelos foram muito pequenas podendo-se afirmar que a utilização de qualquer um dos dois modelos é confiável, sendo o modelo de duto sob flexão um pouco mais conservativo.

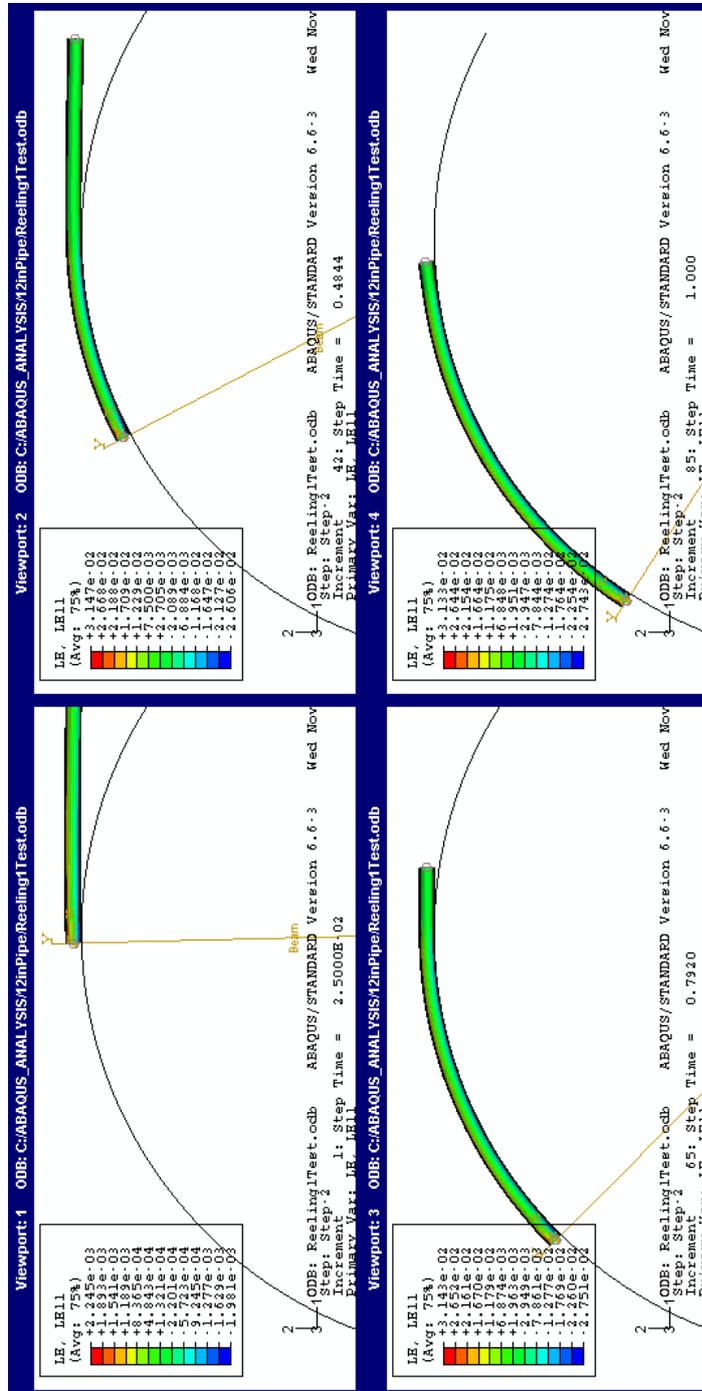


Figura 89 – Seqüência de enrolamento do duto no modelo de rotação do carretel (vista lateral)

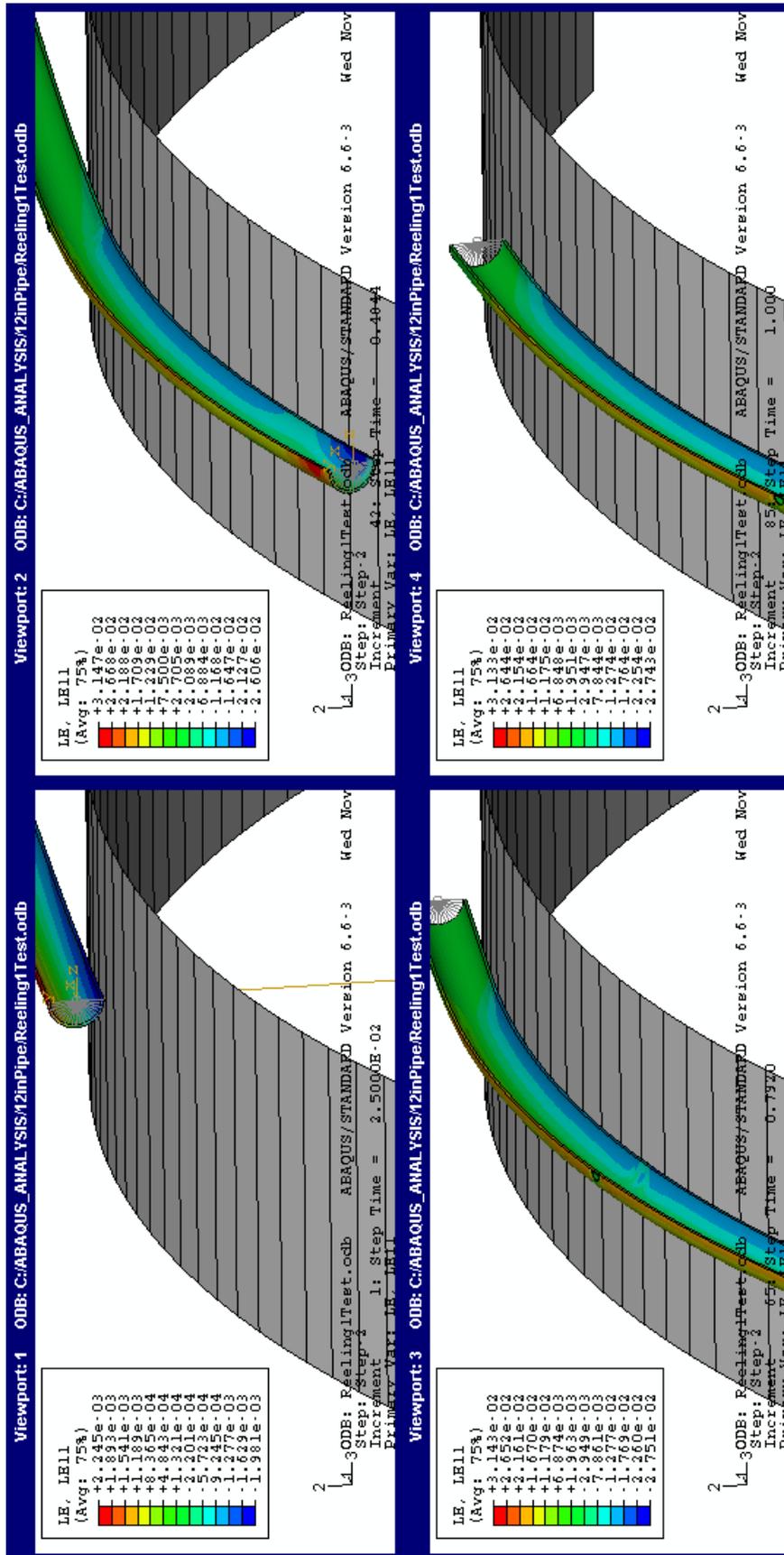


Figura 90 – Seqüência de enrolamento do duto no modelo de rotação do carretel (vista em ângulo)

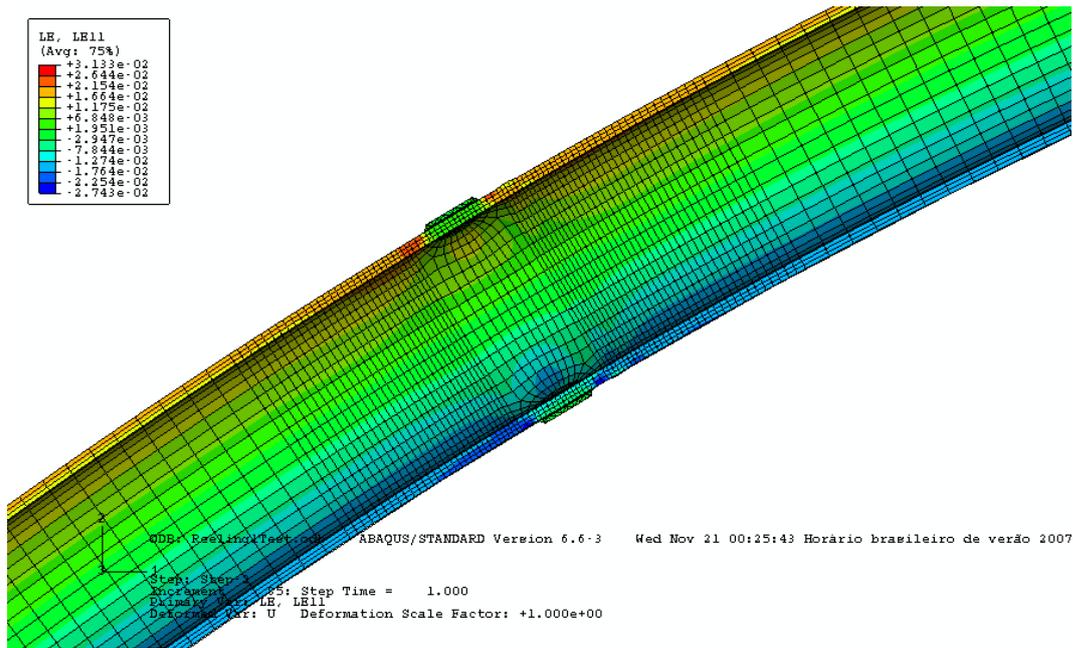


Figura 91 – Resultado do modelo de rotação do carretel.

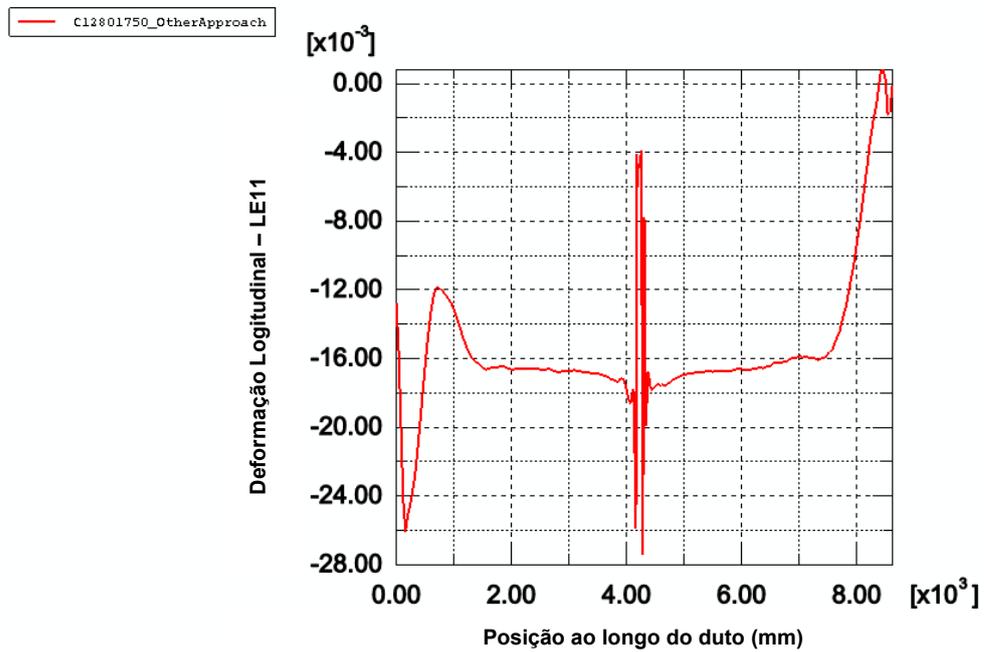


Figura 92 – Gráfico de deformações longitudinais do modelo de rotação do carretel

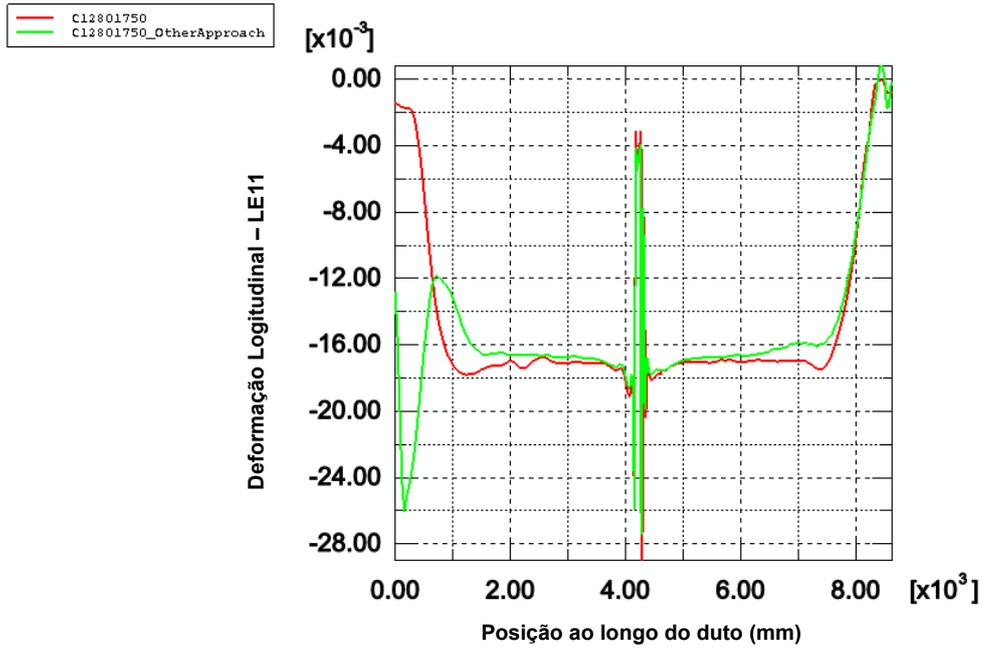


Figura 93 – Gráfico comparativo do modelo convencional de flexão do duto com o modelo de rotação do carretel (região de 0 a 9m)

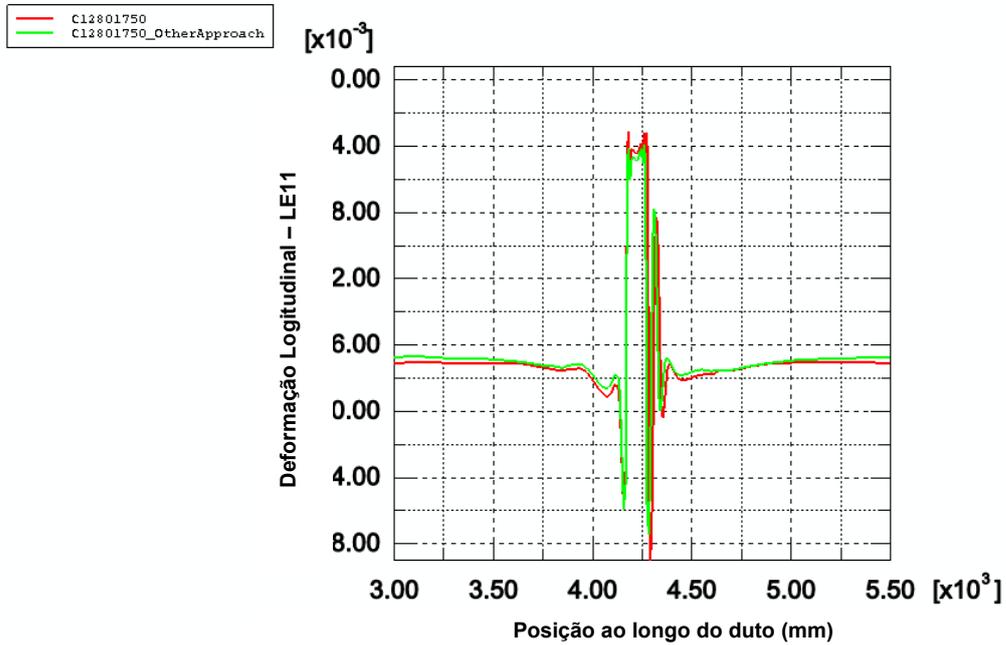


Figura 94 – Gráfico comparativo do modelo convencional de flexão do duto com o modelo de rotação do carretel (região de 3.5m a 5m)

Lista Análises

Diâmetro do Carretel = 180,00 mm
 Módulo Elástico (E) = 207000 MPa
 Tensão Escoamento (Sy) = 414 MPa
 Deform. Elástica (Eel) = 0,200 %
 Load factor (Lf) = 1,200
 Condition to ad stress factor (σ) = 0,82
 μ = 0,2
 ν = 0,21

Deformação Analítica

$$S_{analítico} = \frac{D_{tubo}}{D_{carretel}} + D_{tubo}$$

Deformação Característica DIN

$$\epsilon_s = 0,78 \times \left(\frac{z}{D_E} - 0,01 \right) \times \sigma_s^{-1,5} \times \sigma_{pe}$$

Análise	DE (in)	DE (mm)	DI (mm)	I - Espessura Parede (mm)	Diâmetro Anodo (mm)	Distância AHODO. SOLDA	DEI	tDE	Emalítico (%)	σ _{gr}	ε _c (%)	ε _y E	Critério = Ed/ (σ _y Y _{cd})	Emalítico <= Escrito	Ed FEA (%)	Erro (Caralítico/E A) (%)	Ed Max Anodo Esquerda FEA (%)	Ed Max Anodo Direita FEA (%)	Fator de Conc. Deform. Esquerda	Fator de Conc. Deform. Direita	Ed MAEsq <= Escrito	Ed MADir <= Escrito
1 - Modelo flexão do tubo	12,750	323,65	288,65	17,5	80	50	19,51	0,05	1,77	1,00	3,853	1,954	1,894	OK	1,742	1,456	2,562	2,857	1,48	1,66	Não Conforme	Não Conforme
2 - Modelo Rotação carretel	12,750	323,65	288,65	17,5	80	50	19,51	0,05	1,77	1,30	3,853	1,954	1,894	OK	1,675	5,515	2,590	2,743	1,55	1,64	Não Conforme	Não Conforme

Tabela 24 – Resultados comparativos do modelo convencional de flexão do duto com o modelo de rotação do carretel

Após a realização deste estudo podem ser concluídas algumas vantagens e desvantagens do modelo de rotação do carretel em relação aos modelos apresentados na Seção 5.7 e nesta seção. A seguir são apresentadas algumas destas vantagens e desvantagens.

Principais vantagens do modelo de rotação do carretel em relação ao de flexão do duto:

- Proximidade com o problema real;
- Dados de deformações podem ser avaliados durante todo o processo da análise;
- Possibilidade de simular comprimentos longos de dutos;
- Possibilidade de simular uma rotação completa no carretel;

Principais desvantagens do modelo de rotação do carretel em relação ao de flexão do duto:

- Tempo de simulação mais elevado;
- Montagem do modelo mais complexa e conseqüentemente mais demorada;
- Condições de contorno das extremidades dos dutos podem perturbar as repostas de deformações ao longo do duto, caso estas não sejam bem definidas;
- Simular o ciclo completo seria extremamente complicado, porém possível, e computacionalmente teria um custo elevado.

O critério de escolha do modelo fica a cargo do engenheiro projetista e do problema que este deve solucionar. Não existe um modelo melhor. Um modelo considerado bom é aquele que se adequa às necessidades do problema e o resolve da forma mais rápida e eficiente possível.

5.10. Modelo simples para avaliação do ciclo completo - Duto engastado 2D

Depois de ter simulado o duto a partir de vários modelos diferentes no primeiro ciclo de carregamento, o passo seguinte foi o de observar o comportamento das deformações nominais e de concentrações ao longo do ciclo completo de enrolamento e desenrolamento na embarcação. Para isso foi necessário retornar ao modelo bidimensional para validar um modelo com ciclo completo, e na seqüência, o mesmo foi transformado em tridimensional. No modelo desta seção não serão avaliados os SNCFs pelo fato do modelo ser 2D. Este tipo de análise fornece dados de entrada para os relatórios de ECA, onde são avaliados os comprimentos admissíveis de defeitos a partir do histórico de carregamentos ao qual o duto está submetido.

O ciclo completo é composto pelas seguintes etapas definidas na Seção 2.6, as quais serão correspondentes aos cinco passos aplicados no modelo. São elas:

- **Passo 1:** Enrolamento no carretel (0s – 1s);
- **Passo 2:** Desenrolamento do carretel (1s - 2s);
- **Passo 3:** Flexão sobre o “aligner” (2s – 3s);
- **Passo 4:** Retificação no “straightener” (3s – 4s);
- **Passo 5:** Descarregamento elástico (4s – 5s).

5.10.1. Modelo

O modelo desta seção é o mesmo desenvolvido na Seção 5.5, inclusive nas dimensões do duto utilizado. Para simular o ciclo completo foram adicionados novos corpos analíticos rígidos para simular as etapas não previstas nas análises anteriores. A Figura 95 apresenta estes novos elementos. Portanto foram adicionadas superfícies para o “Straightener” e para a superfície de desenrolamento. Não foi adicionada nenhuma superfície para o “aligner”, pois na embarcação Seven Oceans esta possui o mesmo raio de 9m do carretel.

O duto na 2ª etapa assume um raio da ordem de 80m. A superfície de desenrolamento é responsável por garantir que o duto ao desenrolar assuma

esta curvatura. O raio mencionado é apenas um valor aproximado, mas serve de base para os estudos realizados.

Para a etapa do “straightener” não existe um raio definido. Neste momento, o modelo bidimensional se torna obrigatório, uma vez que foi necessário realizar diversas análises variando o raio deste corpo. O raio para este elemento é satisfatório quando, na etapa de alívio, o duto atingir uma deformação próxima de zero. Isto significa que o duto retornou à sua retilidade inicial antes de ser bobinado.

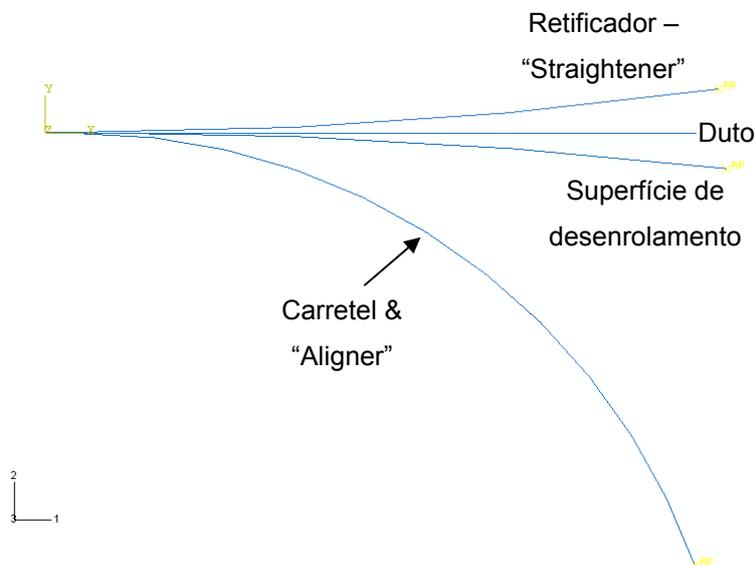


Figura 95 – Montagem do modelo bidimensional de ciclo completo

A Figura 96 apresenta as condições de contorno utilizadas neste modelo. Todas os corpos analíticos encontram-se engastados. O duto apresenta uma extremidade engastada e a outra com uma força seguidora de 55t, a qual esta sempre direcionada para a superfície em que o duto irá ser flexionado. Somente no último passo esta força é desativada, a fim de deixar o duto retornar elasticamente à sua condição inicial.

O contato do duto com as superfícies possui as mesmas características apresentadas em relação ao carretel da Seção 5.5. Do início ao fim da análise o duto possui relações de contato com os corpos rígidos. O contato com a superfície de desenrolamento é ativado a partir do passo 2. Depois de

completada a etapa, este contato é desativado para o duto atravessar a superfície.

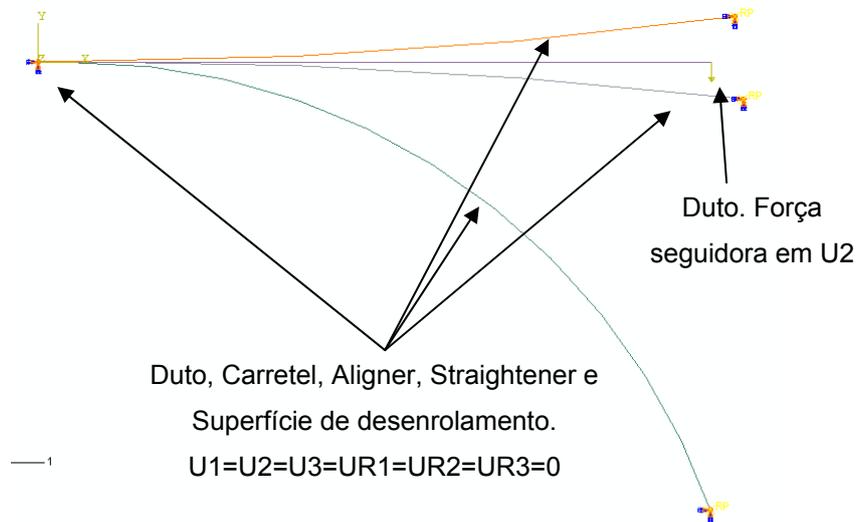


Figura 96 – Condições de contorno e carregamento do modelo bidimensional de ciclo completo

As demais características do modelo, como por exemplo, a definição de malha, são as mesmas apresentadas na Seção 5.5.

5.10.2. Resultados

A Figura 97 e a Figura 98 apresentam o desenvolvimento dos valores de tensão e deformações longitudinais durante todas as etapas definidas para as posições 6 (curva vermelha) e 12 (curva verde) horas do duto na seção localizada na metade do mesmo. Para o gráfico de deformações longitudinais representado pela Figura 98, é observado que os pontos em alguns instantes são tracionados e em outros são comprimidos, devido à seqüência de enrolamento e desenrolamento do duto.

Os valores de deformação longitudinal compressiva máxima são iguais tanto na etapa 1 quanto na etapa 3. Isto se explica, pois o carretel e o “aligner” possuem diâmetros iguais e desta forma o duto está se acomodando para uma mesma curvatura.

Na etapa 2, as deformações ficam próximas a um valor nulo significando que a curvatura atingida entre o carretel e o “aligner” está condizente com o esperado, uma vez que o duto fica próximo da sua configuração retilínea.

Na etapa 5, onde ocorre a acomodação do duto após a retificação no “straightener”, as deformações residuais são pequenas. O raio encontrado para o “straightener” foi de 65m. Com um ajuste mais fino os valores residuais de deformação poderiam ser reduzidos a zero. Na prática, o “straightener” também é ajustado. Antes da instalação de qualquer duto rígido, uma seção é submetida a todo o ciclo de carregamento até o “straightener”. São feitos ajustes no equipamento até ser obtido um duto o mais próximo da sua configuração inicial. Estes testes são denominados de “testes de retificação” (“straightening trials”).

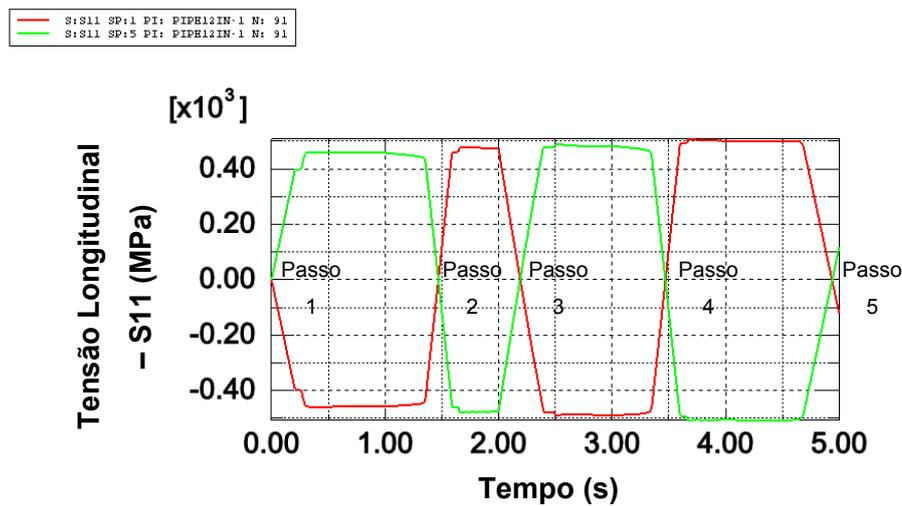


Figura 97 – Evolução da tensão longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)

os valores de deformação acumulada ao longo da história de curvaturas impostas ao duto. A deformação acumulada pode ser entendida como a soma das parcelas tratativas. A obtenção deste valor permite o cálculo do dano acumulado ao longo do ciclo completo necessário para definir o máximo comprimento de defeito permitido na região das soldas. A Tabela 25 foi gerada com o objetivo de avaliar a deformação acumulada ao longo do ciclo completo apenas para valores sob tração. A razão para isto é que deformações negativas na contribuem para o crescimento de trincas. Como podem ser observadas na tabela, as deformações acumuladas para o ciclo simulado em elementos finitos foram de 3.81% (6h) e 3.4% (12h). O valor máximo admissível para o dano na fase de instalação é de 10% da vida à fadiga, com um fator de segurança de 2.5 de acordo com a DNV (2006). A fase de instalação contempla o processo de enrolamento e desenrolamento somados aos efeitos de lançamento do duto até a chegada no solo marinho. Portanto, os valores encontrados de 3.81% e 3.4% não possuem uma base comparativa, uma vez que estes serão dados de entrada para os cálculos de dano acumulado. A partir deste ponto é obtido um fator de dimensionamento como indicado na DNV (2006).

	Deformação longitudinal <u>total</u> (Tração)		Deformação no final da etapa
	6h	12h	
Passo 1: Enrolamento		1.70%	1.70%
Passo 2: Desenrolamento	1.89%		-0.19%
Passo 3: Aligner		1.70%	1.70%
Passo 4: Straightener	1.92%		-0.22%
Deformação acumulada para cada posição	3.81%	3.4%	

Tabela 25 – Tabela das deformações as 6 e às 12 horas ao longo das etapas do ciclo.

Esta mesma avaliação pode ser realizada analiticamente utilizando a equação de “ $\epsilon_{\text{analítico}}$ ” apresentada na Seção 4.2. A apresentação deste cálculo pode ser verificada no APÊNDICE VII – Cálculo analítico da deformação acumulada para um ciclo completo. O valor calculado analiticamente foi de 7.267% apresentado pouca diferença em relação ao calculado pelo método de

elementos finitos. Portanto, pode ser concluído que o modelo bidimensional realiza uma boa avaliação do ciclo completo.

5.11. Modelo complexo para avaliação do ciclo completo - Duto engastado 3D

Os estudos realizados na Seção 5.7 e na Seção 5.10 foram base para o modelo tridimensional apresentado nesta seção.

5.11.1. Modelo

Foi utilizado o modelo do duto 3D da Seção 5.7 e aplicado o conceito de ciclo completo da Seção 5.10. As sapatas de anodo foram incluídas nesta análise, e o ciclo de concentração de deformações poderá ser avaliado. O diâmetro do duto utilizado foi de 12.75" com uma espessura de parede de 17.5mm. O diâmetro do anodo foi de 80mm e este estava distante 50mm do cordão de solda.

A Figura 100 apresenta a montagem do modelo utilizado. Este modelo é similar à montagem do modelo bidimensional.

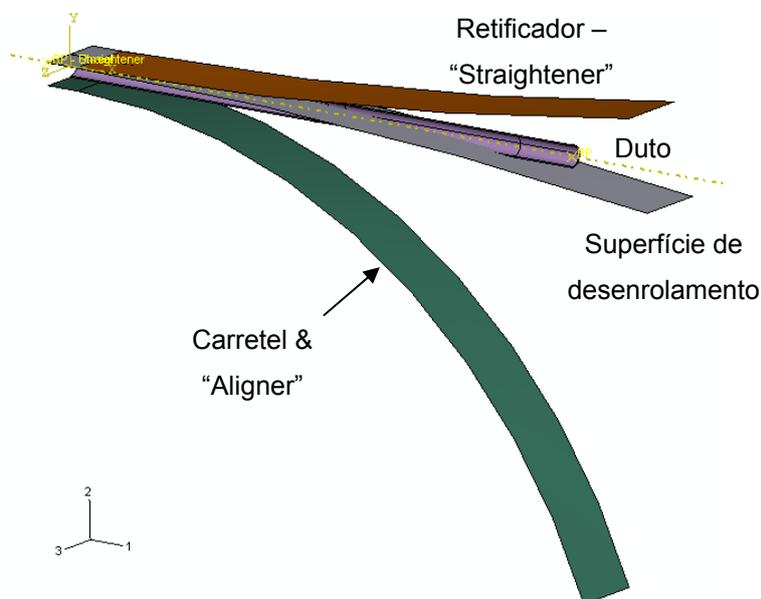


Figura 100 – Montagem do modelo de ciclo completo 3D

Assim como o modelo bidimensional, o ciclo completo é composto pelas seguintes etapas definidas na Seção 2.6, as quais serão correspondentes aos cinco passos aplicados no modelo. São elas:

- **Passo 1:** Enrolamento no carretel (0s – 1s);
- **Passo 2:** Desenrolamento do carretel (1s - 2s);
- **Passo 3:** Flexão sobre o “aligner” (2s – 3s);
- **Passo 4:** Retificação no “straightener” (3s – 4s);
- **Passo 5:** Descarregamento elástico (4s – 5s).

A malha e as definições de contato não serão revistos, pois foram apresentados anteriormente na Seção 5.7. A Figura 101 apresenta a malha utilizada. Superfícies de contato adicionais foram aplicadas ao duto para que este reconheça as demais superfícies de contato da superfície de desenrolamento, do “aligner” e do “straightener”.

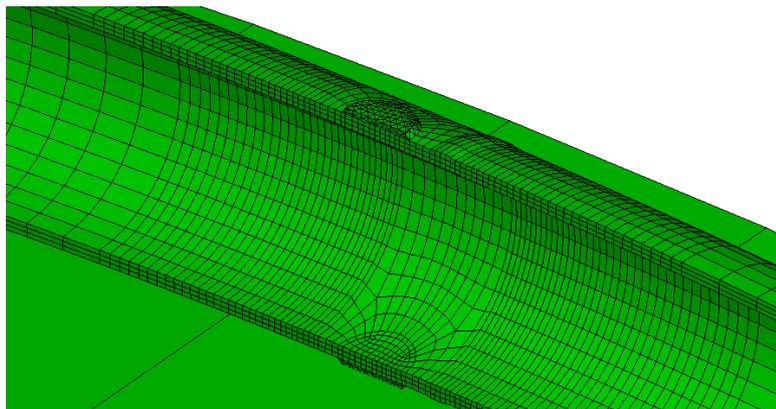


Figura 101 – Malha do modelo de ciclo completo 3D

A Figura 102 apresenta as condições de contorno e carregamento aplicado. O duto apresenta uma extremidade engastada e a outra com uma força seguidora de 55t, a qual é sempre direcionada para a superfície em que o duto irá ser flexionado. Somente no último passo esta força é desativada, a fim de permitir o duto que retorne elasticamente à sua condição inicial. Foi também aplicada ao duto a condição de simetria no plano 1-2. Todos os demais corpos foram engastados.

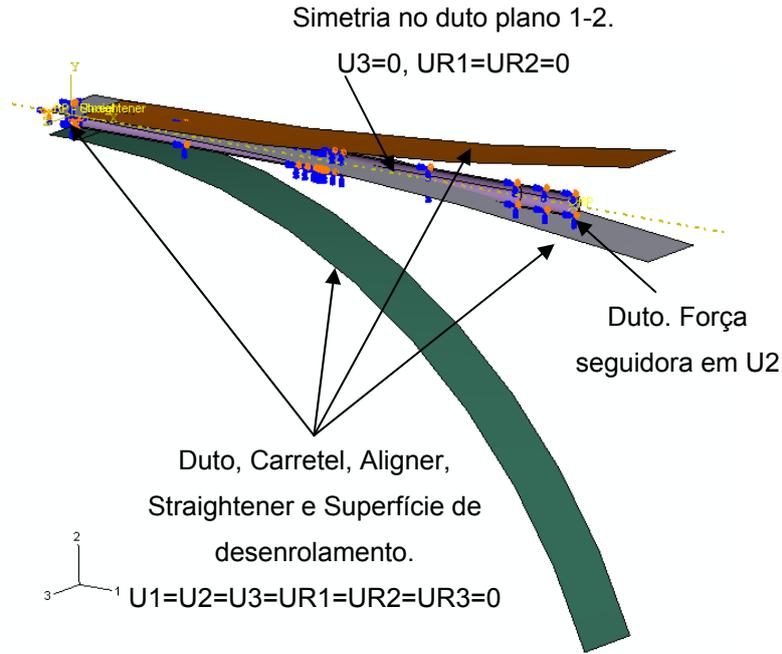


Figura 102 – Condições de contorno e carregamentos do modelo de ciclo completo 3D

5.11.2. Resultados

Este modelo permite a avaliação de diversos critérios até o momento estudados. Nesta seção foram mensurados os valores de tensão e deformação ao longo do ciclo, o valor da deformação acumulada e o valor da ovalização acumulada. A avaliação destes resultados permitirá aprovar o modelo para sua utilização em futuros estudos envolvendo elementos concentradores de deformação. Os dados de concentração de deformação não são inseridos no ECA, pois este relatório tem como objetivo avaliar as regiões soldadas dos dutos. Portanto, para uma análise de deformações acumulada o modelo bidimensional é mais vantajoso pelo pouco tempo computacional gasto na avaliação de um modelo.

Da Figura 103 à Figura 107 são observados os cinco passos ao qual o duto é submetido. Avaliando a Figura 107 observa-se que o duto está retilíneo após todo o ciclo de enrolamento e desenrolamento, porém ao lado das sapatas de anodo existe a presença de concentrações de deformações longitudinais. A configuração retilínea do duto demonstra que o raio do “straightener” foi bem selecionado e que o modelo bidimensional é um modelo bom para a definição do raio deste elemento.

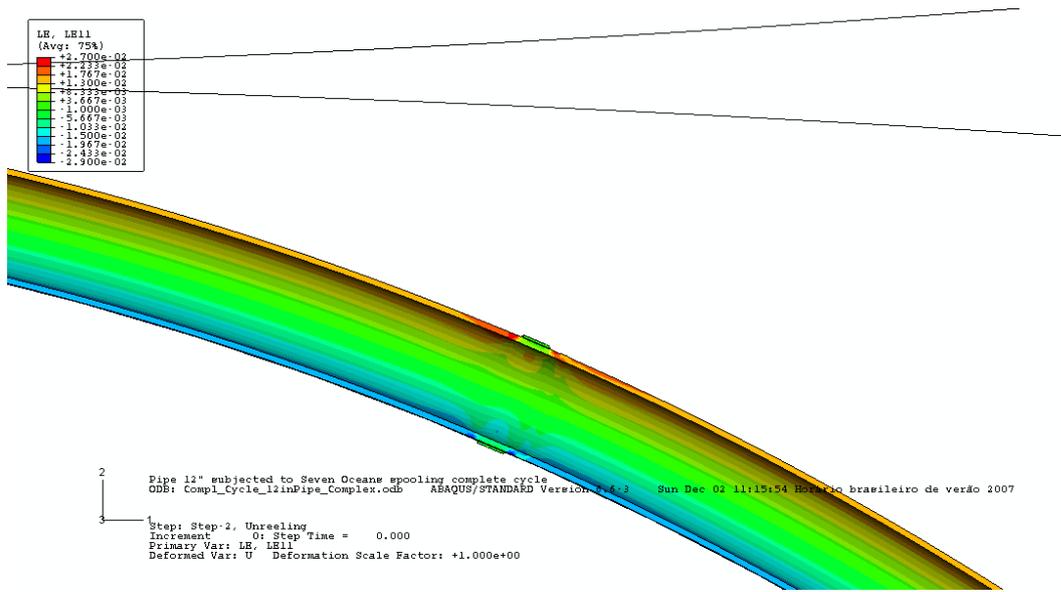


Figura 103 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 1 para o modelo de ciclo completo 3D

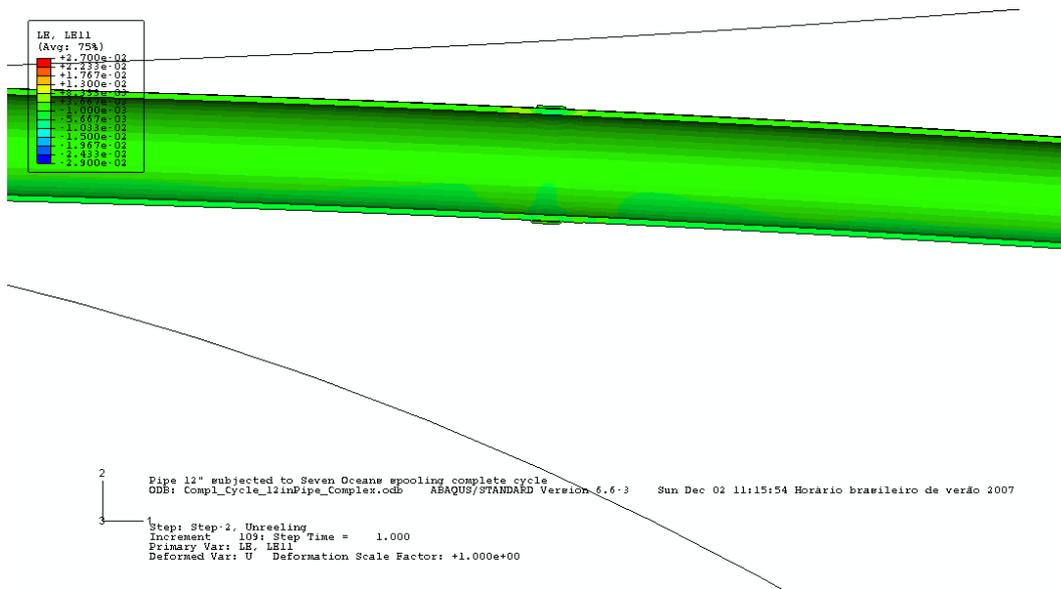


Figura 104 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 2 para o modelo de ciclo completo 3D

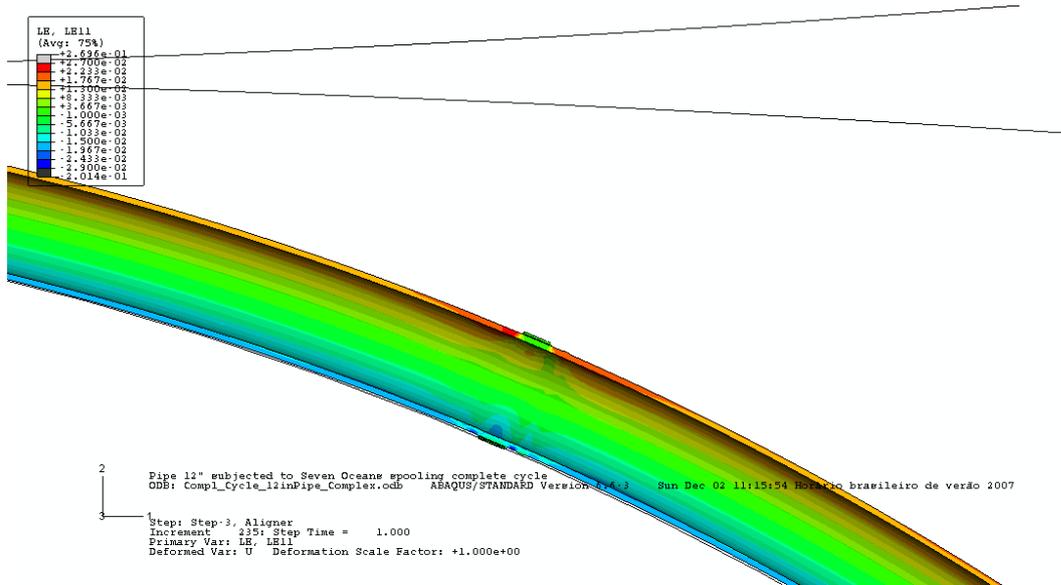


Figura 105 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 3 para o modelo de ciclo completo 3D

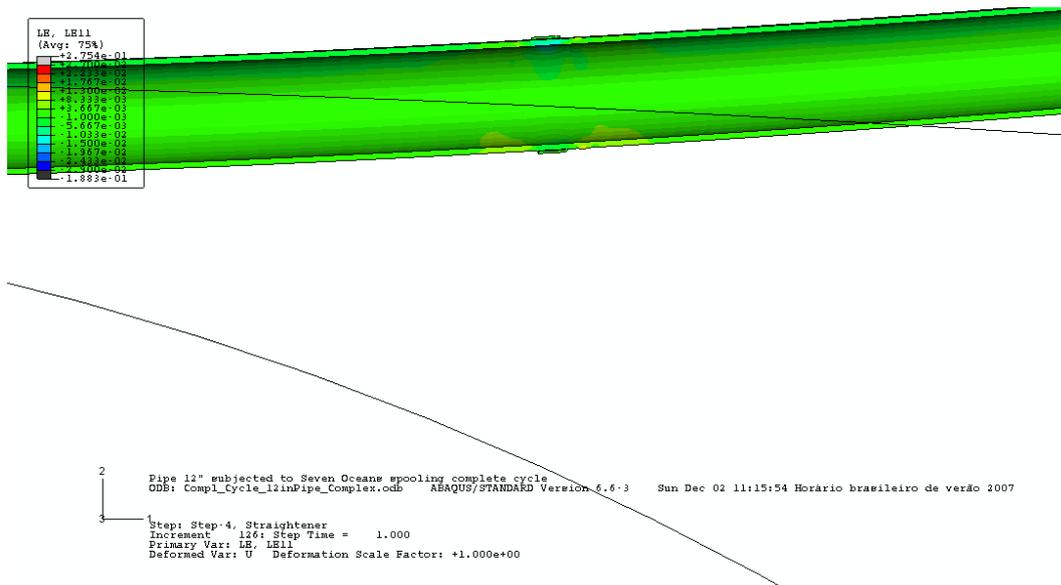


Figura 106 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 4 para o modelo de ciclo completo 3D

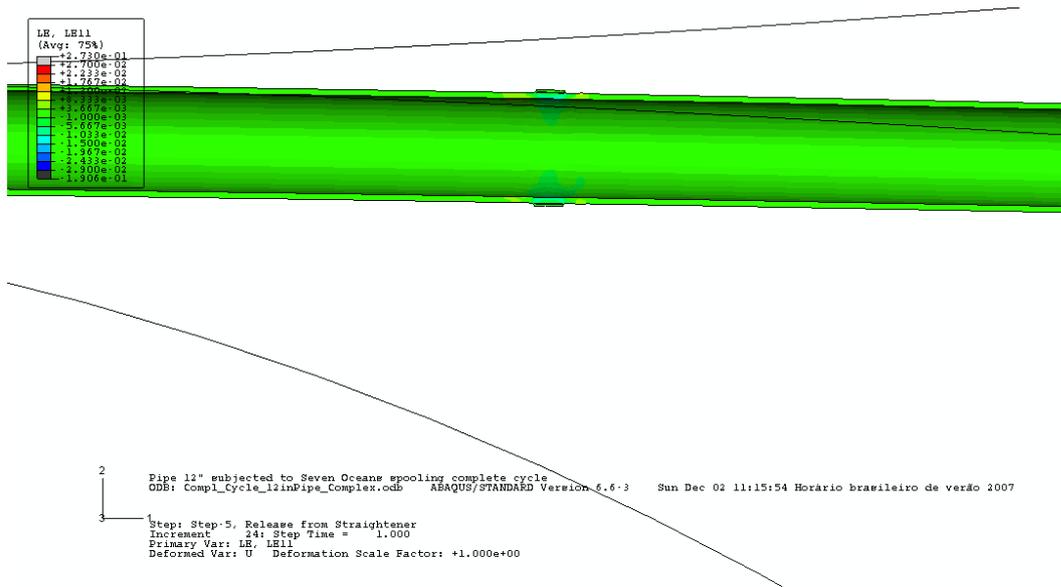


Figura 107 – Resultado de deformação longitudinal do Passo 5 para o modelo de ciclo completo 3D

A Figura 108 indica a posição dos nós utilizados para a geração da curvas apresentadas a partir da Figura 109 até a Figura 111. No modelo foram selecionados seis pontos em três diferentes seções ao longo do duto. A primeira seção escolhida localiza-se em uma região não influenciada pelos efeitos de concentradores. Esta seção do duto apresentará resultados similares aos obtidos na Seção 5.7. Ao lado das sapatas de anodo foram selecionadas as duas seções restantes sob efeito do elemento concentrador de deformação. Nas três seções foram selecionados pontos de tração e compressão.

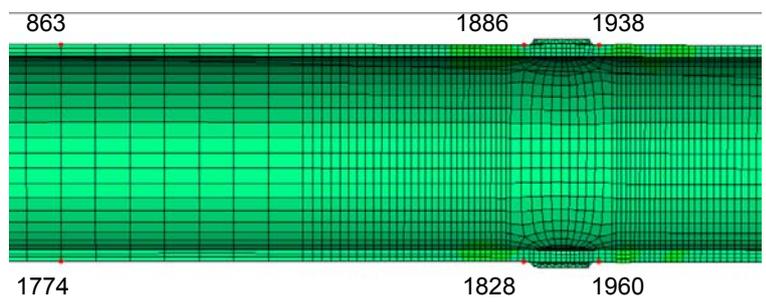


Figura 108 – Posições dos nós mensurados para avaliação do ciclo completo

Na Figura 108 e na Figura 109 foram observadas concentrações em função das diferenças das tensões e deformações em relação à posição onde foram medidas. Os valores de deformação variam também em relação ao lado em que foram medidas. Isto era esperado, uma vez que no lado direito da sapata

existe um cordão de solda que funciona como um perturbador dos valores de deformação.

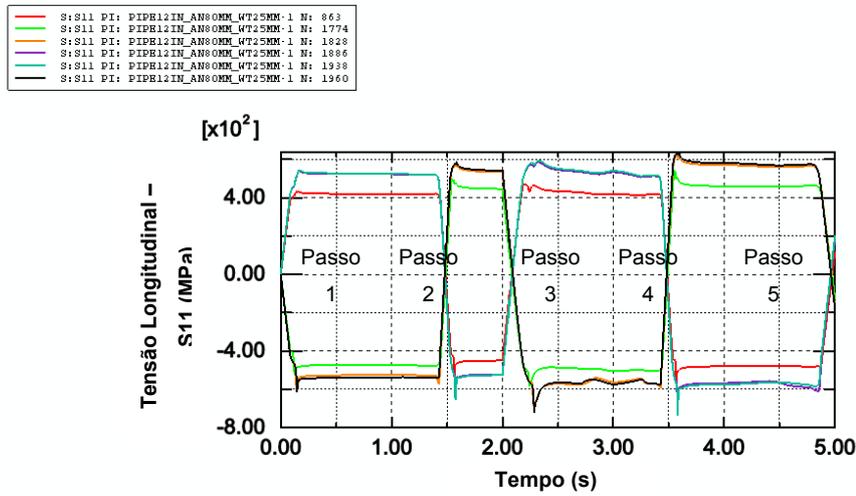


Figura 109 – Evolução da tensão longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)

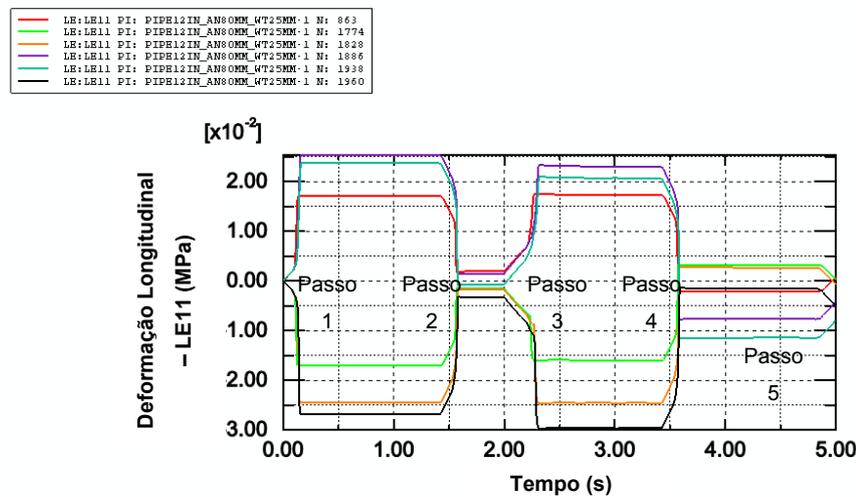


Figura 110 – Evolução da deformação longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)

O comentário realizado para a Figura 107 sobre concentrações de deformação no final do ciclo é justificado a partir da observação da Figura 111, onde são apresentadas deformações residuais para os nós 1818, 1886, 1938 e 1960. Os nós 863 e 1774 apresentam a deformação próxima de zero. O valor não resulta em zero para estes pontos em virtude da necessidade de um ajuste mais fino para o raio do “straightener”. No entanto, os resultados apresentados são suficientes para o objetivo de avaliação do modelo.

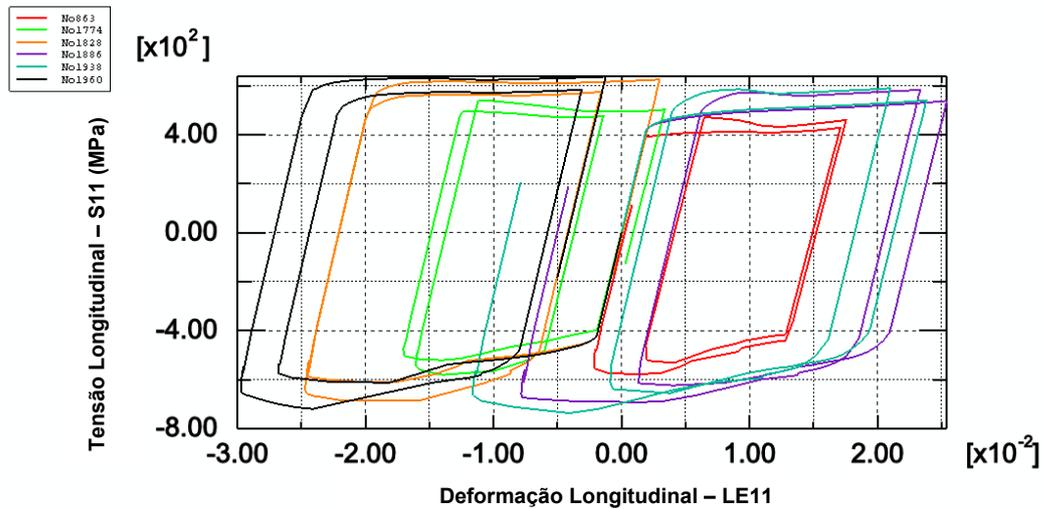


Figura 111 – Evolução da tensão – deformação longitudinal ao longo do ciclo completo (posição 6 e 12 horas)

As tabelas apresentadas a seguir mostram o mesmo cálculo da deformação acumulada apresentado na seção 5.10. No entanto, para esta seção foram avaliadas as deformações acumuladas nas regiões de concentração.

	Deformação longitudinal total (Tração)		Deformação no final da etapa
	6h	12h	
Passo 1: Enrolamento		1.71%	1.71%
Passo 2: Desenrolamento	1.91%		-0.2%
Passo 3: Aligner		1.75%	1.75%
Passo 4: Straightener	1.95%		-0.2%
Deformação acumulada para cada posição	3.86%	3.46%	

Tabela 26 – Resultados de deformação acumulada para seção longe da sapata de anodo (nós 863 e 1774)

Comparando o valor de deformação longitudinal acumulada do modelo tridimensional da Tabela 26 com o bidimensional da Tabela 25 foi observada uma diferença de 1.5%. Conclui-se a partir deste baixo valor que ambos os modelos são confiáveis na determinação de resultados fora da área de concentração de deformações.

Na Tabela 27 e na Tabela 28 são apresentados os valores de deformação longitudinal acumulada à esquerda e à direita respectivamente. O valor acumulado para o lado esquerdo foi maior que o do lado direito. A distância da sapata de anodo ao cordão de solda é de 50mm. A proximidade entre estes dois elementos possivelmente enrijece a região reduzindo as concentrações. No entanto, a diferença entre os dois resultados é pouco representativa.

	Deformação longitudinal total (Tração)		Deformação no final da etapa
	6h	12h	
Passo 1: Enrolamento		2.53%	2.53%
Passo 2: Desenrolamento	2.67%		-0.14%
Passo 3: Aligner		2.33%	2.33%
Passo 4: Straightener	3.03%		-0.7%
Deformação acumulada para cada posição	5.7%	4.86%	

Tabela 27 - Resultados de deformação acumulada para seção à esquerda da sapata de anodo (nós 1828 e 1886)

	Deformação longitudinal total (Tração)		Deformação no final da etapa
	6h	12h	
Passo 1: Enrolamento		2.36%	2.36%
Passo 2: Desenrolamento	2.42%		-0.06%
Passo 3: Aligner		2.09%	2.09%
Passo 4: Straightener	3.21%		-1.12%
Deformação acumulada para cada posição	5.63%	4.45%	

Tabela 28 - Resultados de deformação acumulada para seção à direita da sapata de anodo (nós 1938 e 1960)

A Tabela 29 apresenta os valores de ovalização calculados a partir da DNV (2000), como mencionado na Seção 3.3. A ovalização foi medida em uma seção sem influência das sapatas de anodo. Portanto o valor que está sendo avaliado pode ser interpretado como o de um duto sem concentrador de

deformação. Como pode ser observado o valor final de ovalização foi de 3.61% após todo o ciclo. Segundo a DNV esta ovalização não é aceitável, pois o valor é superior a 3%. No entanto, a DNV apresenta valores de projeto conservativos. Na Seção 5.4 foram realizadas análises para validar o critério de flambagem local apresentado pela DNV. Revisando o modelo que possui as mesmas propriedades geométricas do duto desta seção foi observado que a ovalização na posição onde ocorre o momento limite e conseqüentemente a flambagem localizada foi de 5.99%. Portanto, o duto não falharia ao apresentar um valor superior ao do critério de ovalização. A conclusão referente a este ponto é: caso o duto apresente valores de ovalização acima do limite de 3% DNV, uma análise de flambagem da estrutura deve ser desenvolvida.

	MIN	MAX	OVALIZAÇÃO PARCIAL
Passo 1	319.6	327	2.29%
Passo 2	320.7	325.8	1.57%
Passo 3	316.3	328.6	3.80%
Passo 4	316.7	328.4	3.61%
Passo 5	316.7	328.4	3.61%

Tabela 29 – Resultados da ovalização acumulada do duto a partir do modelo de elementos finitos segundo a DNV (2000)

5.12.Avaliação dos efeitos de concentrações de deformação devido à sapata de anodo combinado com a presença de revestimento

Esta seção pretende avaliar o efeito combinado da sapata de anodo com o revestimento. O objetivo é verificar se a sapata de anodo posicionada próxima ao revestimento submeterá o duto a concentrações de deformação maiores que os valores previstos.

5.12.1.Modelo

Foram utilizadas duas espessuras de revestimento para avaliar o efeito desta variável sobre o SNCF. Os valores de espessura escolhidos foram de 8mm e 85mm. Estes são valores apresentados no mercado. A espessura do revestimento é função das propriedades de trabalho do mesmo. Revestimentos finos normalmente são utilizados para proteção à abrasão, enquanto que os espessos são utilizados para isolamento térmico. O modelo e as propriedades

mecânicas dos dutos utilizados para esta avaliação são os mesmos descritos na Seção 5.7.

Nas análises desta seção não foi considerado o revestimento de junta de campo (FJC). Este tipo de revestimento é instalado após a soldagem de duas seções consecutivas de duto. Os revestimentos de junta de campo não foram incluídos, pois estes poderiam encobrir os resultados desejados, uma vez que estes são instalados sobre as sapatas de anodo. Na prática, os dutos são enrolados com o revestimento de junta de campo instalado. No entanto, existem algumas seções de dutos utilizadas em testes offshore que necessitam ser cortadas rapidamente, a fim de não atrasar o lançamento das tubulações permanentes. A alta aderência deste revestimento aumenta a dificuldade de remoção do mesmo.

A Figura 112 apresenta a montagem do modelo utilizada tanto para revestimentos de 8mm quanto para 85mm. O diâmetro do duto utilizado para as duas análises foi de 12.75" e espessura de parede de 17.5mm. O diâmetro da sapatina de anodo foi de 80mm distanciada de 50mm do cordão de solda.

As condições de contorno e carregamentos utilizadas foram os mesmos empregados no modelo da Seção 5.7 e podem ser observadas na Figura 113. A simetria no plano 1-2 foi aplicada também às faces dos revestimentos. A carga aplicada para flexionar o duto permaneceu como 55t, mesmo com a introdução do revestimento.

O material do revestimento de 8mm é composto apenas de Polipropileno Sólido, como apresentado na Figura 114. O revestimento de 85mm, apresentado na Figura 115, é constituído por uma camada de 3mm de polipropileno sólido, uma camada de 77m de polipropileno sintático e uma camada de 5mm de polipropileno sólido. As propriedades destes materiais são apresentadas na Seção 5.3. Para a modelagem do revestimento foi assumida a hipótese que o revestimento não se deslocaria da face do duto. Na fabricação, entre o duto e revestimento, é sempre aplicada uma camada de epóxi (FBE) que garante a aderência entre as partes. O revestimento para ambos os estudos foi modelado como sendo parte do duto e não como uma peça separada. Desta forma, o revestimento é fixado junto ao duto. O material é diferenciado a partir da definição de seções associadas presente no ABAQUS. Existem elementos

específicos para trabalhar com coesão entre partes. No entanto, a aplicação destes é vinculada às propriedades coesivas do revestimento, as quais não são fornecidas pelos fabricantes.

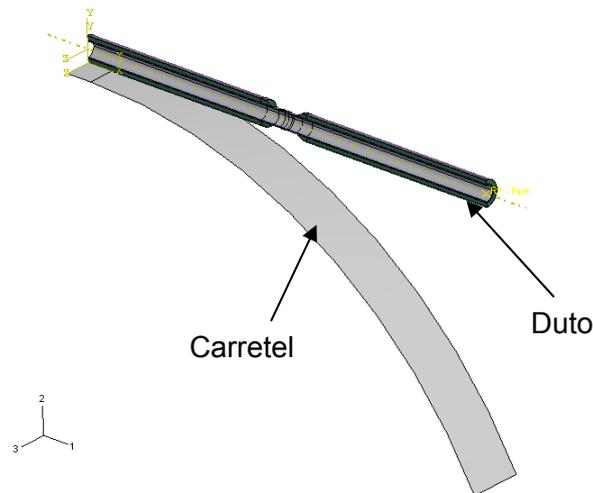


Figura 112 – Montagem do modelo das análises de enrolamento com revestimento

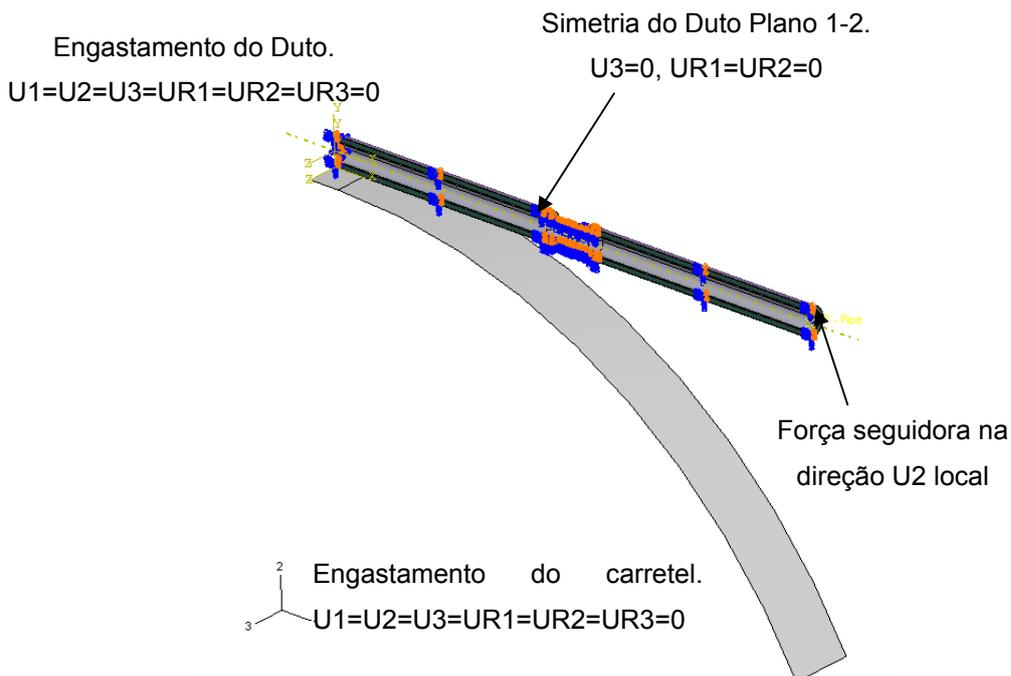


Figura 113 – Condições de contorno e carregamentos das análises de enrolamento com revestimento

A malha para o duto possui as mesmas características apresentadas na Seção 5.7. Para o revestimento foram utilizados os mesmos elementos da malha do duto. A Figura 114 e a Figura 115 apresentam a malhas obtidas para os conjuntos com revestimento de 8mm e de 85mm.

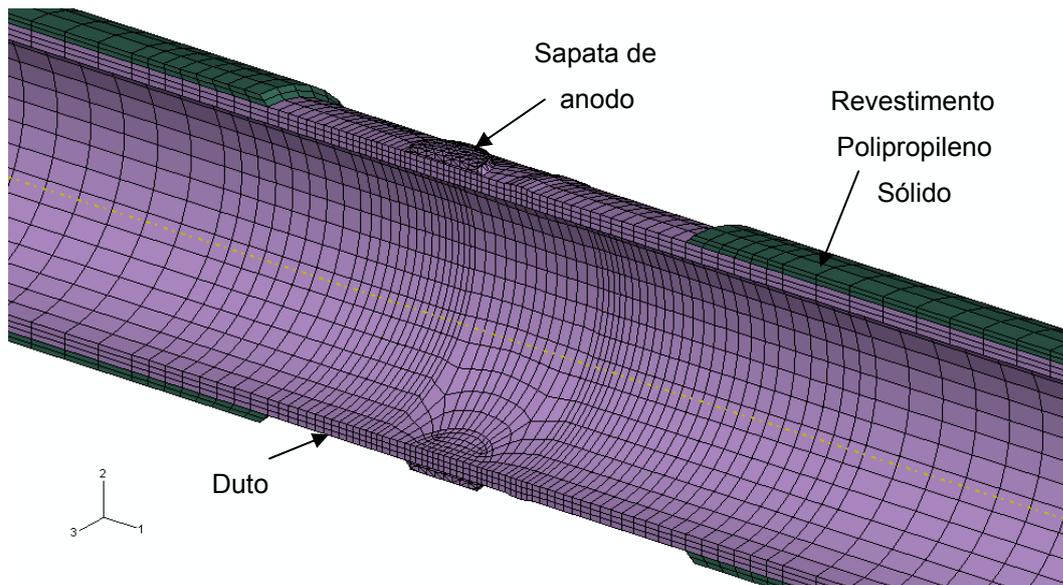


Figura 114 – Malha da análise de enrolamento com revestimento de 8mm

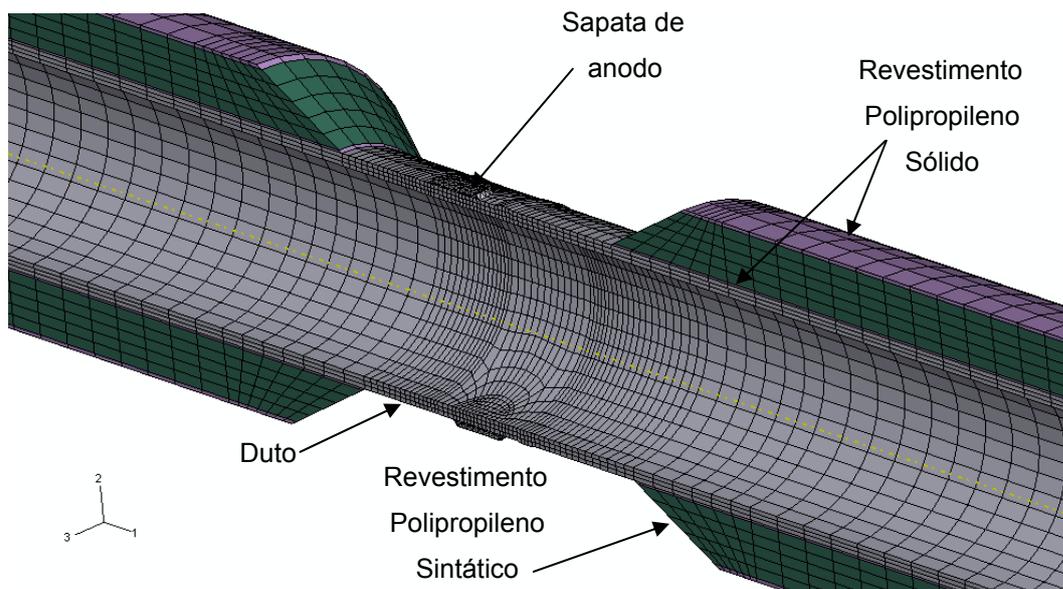


Figura 115 – Malha da análise de enrolamento com revestimento de 85mm

5.12.2. Resultados

Os resultados apresentados nesta seção permitem avaliar o efeito combinado do revestimento com as sapatas de anodo. Neste modelo foram mensurados os valores de concentração de deformação ao lado da sapata de

anodo. Obtendo estes valores é possível comparar com o resultado do duto de mesma geometria apresentado na Seção 5.7 e e verificar se houve alteração dos SNCFs.

A Figura 116 e a Figura 117 apresentam os resultados de deformação longitudinal para os dois modelos de revestimento.

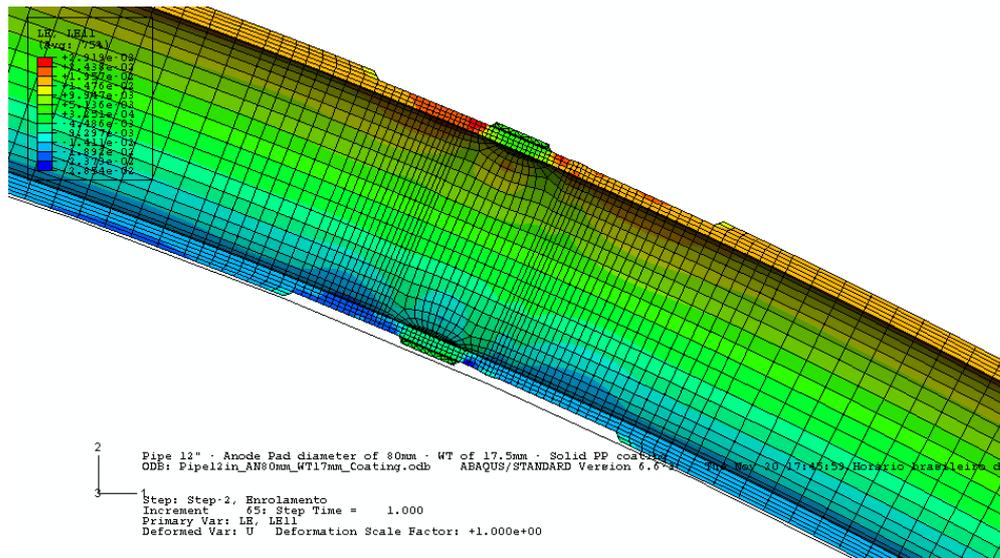


Figura 116 – Resultados da análise de enrolamento com revestimento de 8mm

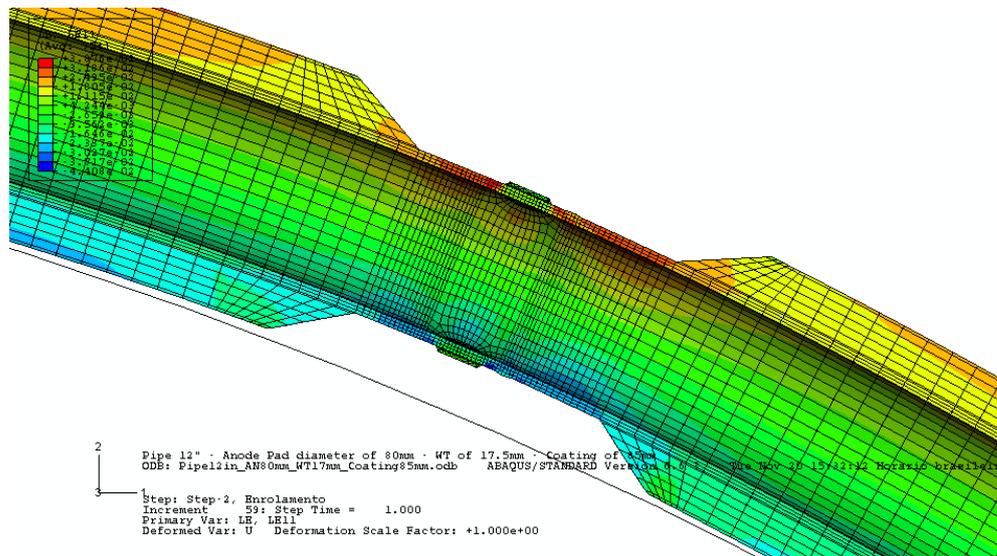


Figura 117 – Resultados da análise de enrolamento com revestimento de 85mm

Os gráficos apresentados na Figura 118 e na Figura 119 apresentam os resultados obtidos na análise sem revestimento da Seção 5.7 e os resultados

das análises com revestimento. Como pode ser notado, o revestimento de 85mm aumenta sensivelmente os valores de deformação longitudinal nas regiões ao redor da sapata de anodo. No entanto, o revestimento de 8mm foi pouco sensível a variações nas deformações.

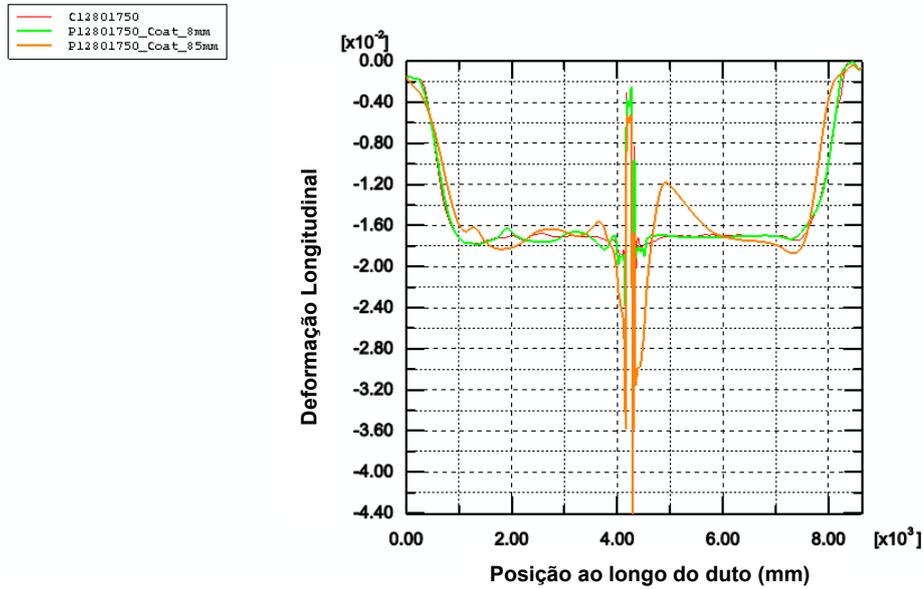


Figura 118 – Resultados comparativos das análises sem revestimento, com revestimento de 8mm e com revestimento de 85mm (Região 0 a 9m)

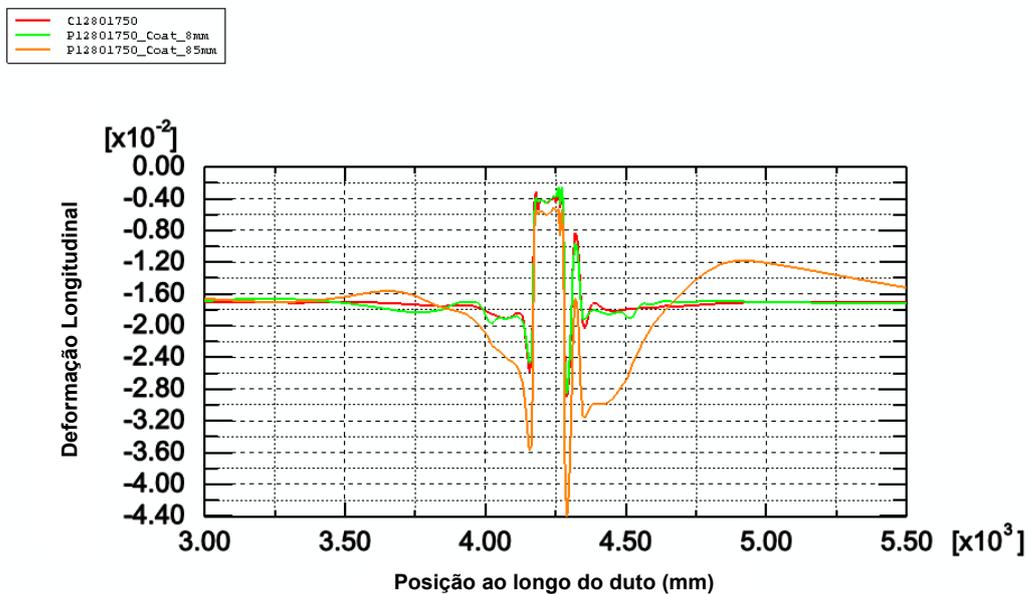


Figura 119 – Resultados comparativos das análises sem revestimento, com revestimento de 8mm e com revestimento de 85mm (Região 3 a 5.5m)

Lista Análises

Diametro do Carretel = 18000 mm
 Módulo Elástico (E) = 207000 MPa
 Tensão Escoamento (SY) = 414 MPa
 Deform. Elástica (Epl) = 0.200 %
 Load factor (Yf) = 1.200
 coeficiente de efeito tecnológico = 0.92
 VE = 2.1

Deformação Analítica

$$\epsilon_{analítico} = \frac{D_{pabo}}{D_{carretel} + D_{pabo}}$$

Deformação Característica DNV

$$\epsilon_s = 0.78 \times \left(\frac{t}{DE} - 0.01 \right) \times \alpha_h^{-1.5} \times \alpha_{gr}$$

Análise	DE (in)	DE (mm)	O1 (mm)	t - Espessura Paralela (mm)	Diametro Anodo (mm)	Diferença entre S.O1/OA	DEt	UDE	εanalítico (%)	εgr (%)	εcyE	Crítico = $\frac{\epsilon_{gr}}{\epsilon_{cyE}}$ (Y/Yc)	εanalítico escrito	Ed FEA (%)	Erro Analítico q/E A1 (%)	Ed Max Anodo Esquerdo FEA (%)	Ed Max Anodo Direto FEA (%)	Fator de Conc. Deform. Esquerdo	Fator de Conc. Deform. Direto	Ed MA Esq. critério	Ed MADIF. critério
1	12,750	322,95	269,65	17,5	80	-50	19,51	0,05	1,77	1,00	3,853	1,884	OK	1,742	1,456	2,552	2,857	1,48	1,85	Não Conforme	Não Conforme
2 - Revestimento Ep. Anodo	12,750	322,95	269,65	17,5	80	50	19,51	0,05	1,77	1,00	3,853	1,884	OK	1,894	4,240	2,475	2,654	1,46	1,69	Não Conforme	Não Conforme
3 - Revestimento de 85mm	12,750	322,95	269,65	17,5	80	50	19,51	0,05	1,75	1,00	3,853	1,854	OK	1,702	2,686	3,578	4,406	2,10	2,59	Não Conforme	Não Conforme

Tabela 30 – Resultados de deformações longitudinais do modelos com revestimento

A Tabela 30 apresenta os resultados das deformações longitudinais e os cálculos dos SNCFs para os três casos mencionados. Observando os resultados da tabela, os valores das deformações atingidos são mais altos que os valores definidos pela DNV. Isto era esperado em função do resultado da análise sem revestimento, onde as deformações concentradas haviam apresentado valores maiores que o da norma. A solução para este problema está em avaliar o valor de deformação crítica para uma análise contendo a sapata de anodo como mencionado na Seção 5.7. Este problema será avaliado na Seção 5.13.

O revestimento espesso é de fato um concentrador de deformações em função dos resultados obtidos. Na situação em que o revestimento de junta de campo não está instalado, a região sem revestimento assume uma rigidez diferente da parte com revestimento. O aumento das concentrações de deformação é atribuído a esta diferença de rigidez. Como procedimento de segurança, um revestimento temporário deve ser instalado em torno do duto com o objetivo de reduzir estes efeitos de concentração durante o enrolamento. A questão que permanece é a de definir qual a espessura de revestimento que gera valores de concentração de deformação altos o suficiente para serem considerados. No momento, a única ferramenta disponível é a realização de análises individuais para cada situação de grandes espessuras, uma vez que cada revestimento possui propriedades mecânicas diferentes. Um estudo futuro poderia tentar definir uma espessura mínima de revestimento para análise de uma dada relação DE/t .

5.13.Avaliação do critério DNV com a inclusão das sapatas de anodo no modelo de momento limite plástico

Esta seção tem como objetivo reavaliar os valores de deformação crítica calculada a partir do critério da DNV (2000), porém com a utilização das sapatas de anodo no modelo.

5.13.1.Modelo

O modelo utilizado será flexionado até que o duto falhe localmente por flambagem como apresentado na Seção 5.4. No entanto, é esperado a falha do duto na região próxima à sapata de anodo devido às concentrações de deformação geradas a partir do modelo. Foram avaliadas todas as relações DE/t apresentadas na Tabela 1. O diâmetro do anodo considerado em todas as

análises foi de 80mm. Não foi considerado o cordão de solda, uma vez que o objetivo é de avaliar a falha do duto em função de um elemento concentrador de deformação.

O modelo utilizado possui as mesmas características mecânicas, condições de contorno e carregamentos apresentados na Seção 5.4. A diferença do modelo está na inclusão da sapata de anodo e na malha utilizada. Esta é similar na definição de refinamentos e tipos de elementos apresentados na Seção 5.7. A Figura 120 apresenta a malha utilizada nos modelos. A Figura 121 apresenta as condições de contorno utilizadas.

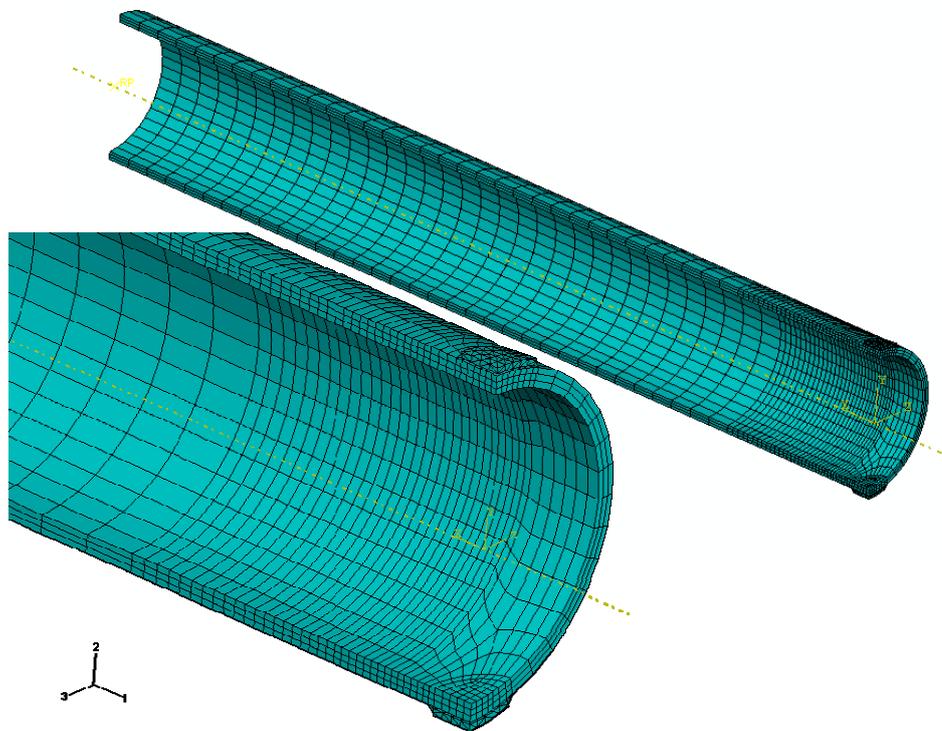


Figura 120 – Malha típica utilizada no modelo de avaliação do critério DNV (2000) com sapata de anodo

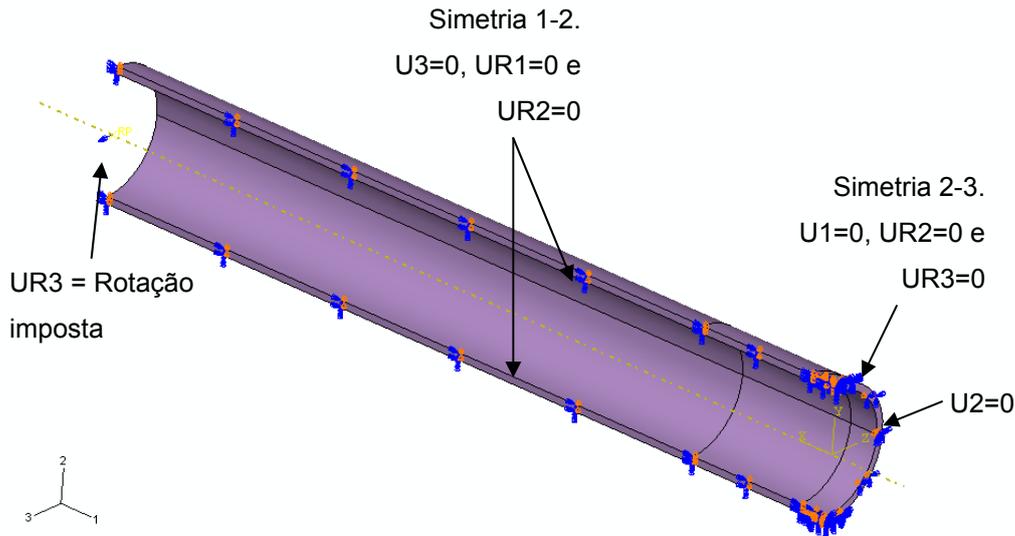


Figura 121 – Condições de contorno e carregamento aplicados no modelo

5.13.2. Resultados

Os resultados obtidos nesta seção mostram que com a instalação das sapatas de anodo, mesmo com a presença de valores de concentração de deformação, o duto não flamba localmente.

Como mencionado anteriormente, os dutos simulados de acordo com o modelo apresentado na Seção 5.13.1 são os indicados na Tabela 1. A Tabela 31 apresenta os resultados obtidos a partir das análises de elementos finitos e os compara com os valores dos critérios mencionados na Seção 5.4.

DE (in)	t (mm)	DE/t	ϵ_c FEA no pt. Momento Máx	DNV ϵ_c	Momento Máximo Elem. Finitos(Nm)	Yong Bai Mc (Nm) (Sy=414MPa)	Yong Bai Mc (Nm) (Sy=395MPa)
6.625	19.05	8.83	11.49%	9.12%	212960	232146	221492
10.75	25.4	10.75	10.50%	7.34%	754972	810562	773363
12.75	25.4	12.75	8.95%	6.05%	1072988	1136915	1084737
10.75	17.5	15.60	6.31%	4.78%	530104	554526	529077
12.75	17.5	18.51	5.62%	3.89%	749246	776747	741099
12.75	15.9	20.37	5.06%	3.44%	682042	703802	671502

Tabela 31 – resultados das análises de elementos finitos

Na Tabela 31 foram apresentados duas colunas a partir da equação (29) com limites de escoamentos diferentes pela mesmo motivo descrito na Seção

5.4.3. A Tabela 32 apresenta as diferenças percentuais das respostas obtidas a partir do método de elementos finitos e dos cálculos analíticos.

DE/t	Diferença deformação máxima	Diferença Mc (Sy=414MPa)	Diferença Mc (Sy=395MPa)
8.83	25.96%	9.01%	4.01%
10.75	43.04%	7.36%	2.44%
12.75	48.04%	5.96%	1.10%
15.60	31.97%	4.61%	-0.19%
18.51	44.34%	3.67%	-1.09%
20.37	46.91%	3.19%	-1.55%

Tabela 32 – Resultados percentuais das respostas analíticas com o modelo de elementos finitos

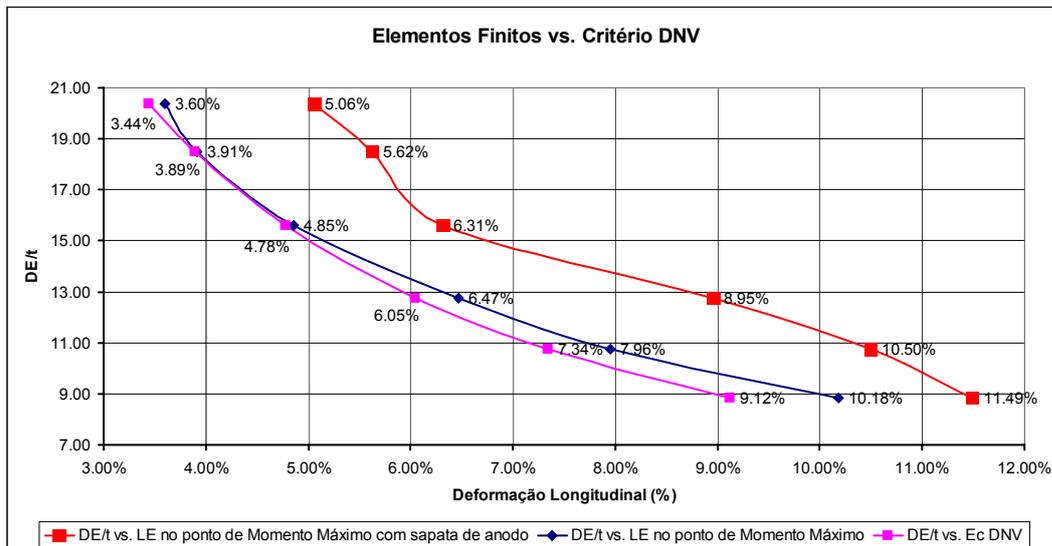


Figura 122 – Gráfico dos resultados das análises de elementos finitos versus o critério DNV (2000)

A Figura 122 apresenta o mesmo gráfico mostrado na Figura 49 com a adição de uma terceira curva onde foram apresentados os valores da deformação limite para o modelo com a inclusão da sapata de anodo. Como pode ser observada, a nova curva apresenta valores limites maiores que os calculados anteriormente. Isto significa que, com a inclusão das sapatas de anodo a deformação limite aumentou, apesar da região ser uma concentradora de deformações. O momento limite permaneceu praticamente inalterado como pode se observado na Tabela 33. Isto significa que um duto sujeito ao

enrolamento pode flambar antes na região sem concentradores de deformação. No entanto, o valor da deformação na região do elemento concentrador cresce a uma taxa mais rápida devido à variação na geometria, e isto explica a razão das deformações críticas “ ϵ_c ” nas regiões de sapatas de anodo serem maiores para um mesmo valor de momento. O aumento da deformação limite pode ser explicado, pois a sapata de anodo funciona no modelo como um aumento de espessura da seção. Se a equação (13) do cálculo de “ ϵ_c ” for observada, aumentando o valor da espessura o valor da deformação característica aumenta, pois são grandezas diretamente proporcionais. O mesmo se aplica às sapatas de anodo conforme a observação dos resultados obtidos.

Conclui-se então que o valor de dimensionamento para regiões com as sapatas deve considerar o aumento da espessura, mesmo tendo o conhecimento que o duto pode flambar antes em uma região longe do concentrador. Se o aumento da deformação nas sapatas for maior que a deformação crítica desta região, a uma taxa de crescimento maior do que a região nominal, então o duto irá flambar no elemento concentrador. Esta análise tem como objetivo avaliar se um elemento concentrador de qualquer natureza realmente produz algum risco dimensional a tubulação. Para continuar utilizando a equação (13) da DNV na verificação destas regiões é sugerido que a equação seja reescrita especificamente para estes elementos como apresentado na equação (50), para uma faixa da relação DE/t variando de 8.83 a 20.37. Desta forma, as deformações longitudinais de um duto sem elementos concentradores devem ser comparadas à equação (13), e é sugerida uma segunda avaliação, quando uma sapata de anodo é adicionada ao duto, utilizando a equação (50) que deve ser empregada com o objetivo de avaliar as deformações na região dos concentradores. A não utilização do valor de deformação crítica para a área do elemento concentrador implica em um cálculo conservador.

$$\epsilon_{csapanodo} = 0.78 \left(\frac{(t + t_{sapanodo})}{DE} - 0.01 \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw} \quad (50)$$

Inserindo esta equação ajustada na Figura 122 foi obtida a Figura 123.

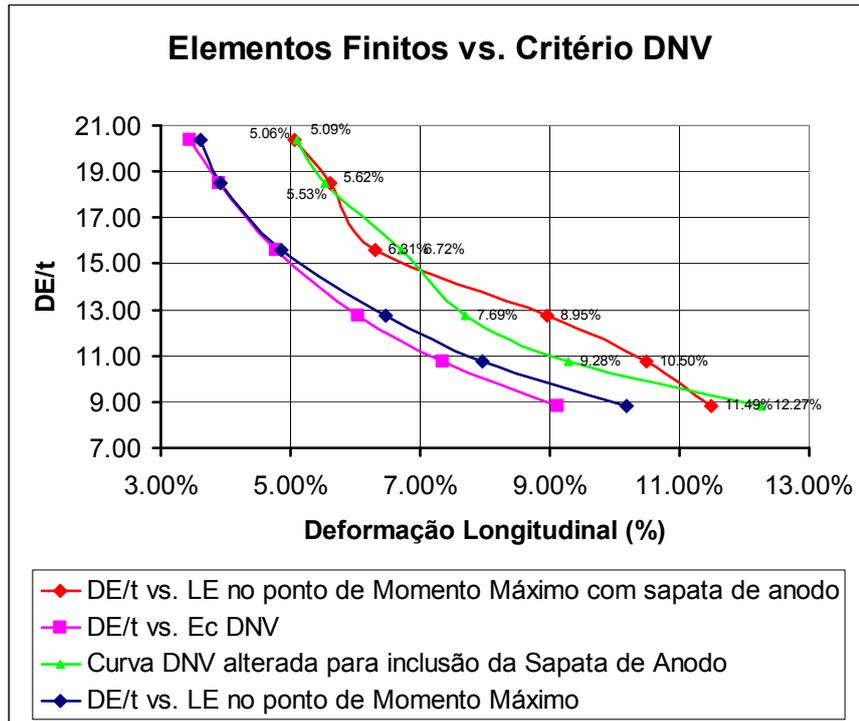


Figura 123 - Gráfico dos resultados das análises de elementos finitos versus o critério DNV (2000) modificado para sapatas de anodo

Como pode ser observado na Figura 123 a nova curva cruza os valores da curva análises em alguns pontos. Um fator de ajuste de 0.9 foi inserido na equação (50) a fim de posicionar todos os pontos desta nova curva à esquerda dos resultados do modelo de elementos finitos com sapata de anodo. Desta forma, a equação (50) é reescrita e apresentada na equação abaixo.

$$\epsilon_{csapanodofator} = 0.9 \cdot 0.78 \left(\frac{(t + t_{sapanodo})}{DE} - 0.01 \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw} \quad (51)$$

A simplificação da equação final das deformações críticas para sapatas de anodo é apresentada abaixo.

$$\epsilon_{csapanodofator} = 0.702 \left(\frac{(t + t_{sapanodo})}{DE} - 0.01 \right) \alpha_h^{-1.5} \alpha_{gw} \quad (52)$$

A Figura 124 apresenta o gráfico relativo à equação (52).

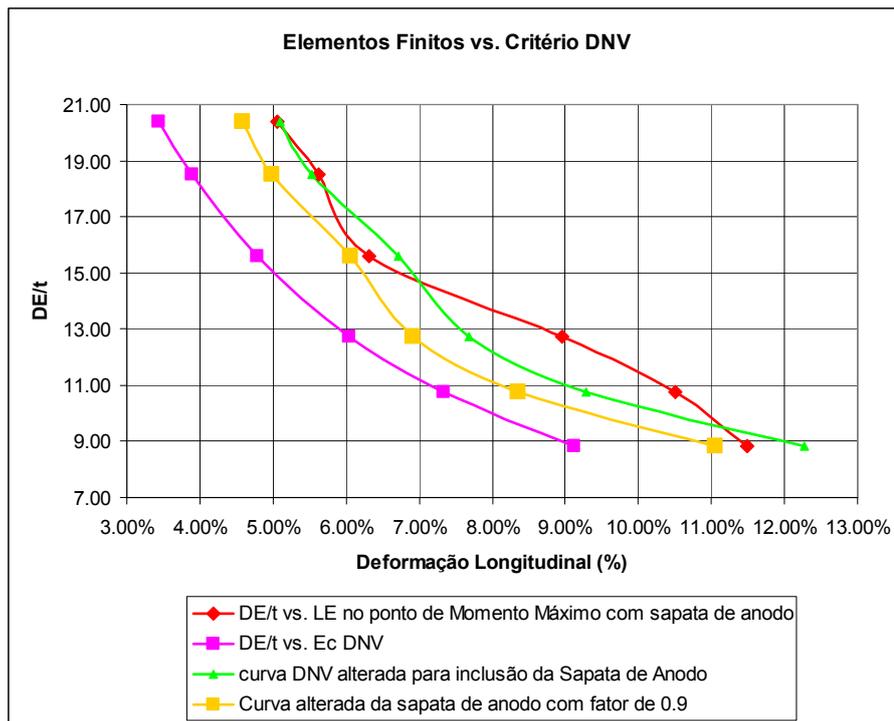


Figura 124 - Gráfico dos resultados das análises de elementos finitos versus o critério DNV (2000) modificado para sapatas de anodo com fator de ajuste de 0.9

DE/t	Momento Máximo Elem. Finitos SEM SAPATA DE ANODO (Nm)	Momento Máximo Elem. Finitos COM SAPATA DE ANODO (Nm)	Diferença percentual
8.83	211980	212960	0.46%
10.75	753772	754972	0.16%
12.75	1071002	1072988	0.19%
15.60	528834	530104	0.24%
18.51	747284	749246	0.26%
20.37	680036	682042	0.29%

Tabela 33 – Comparação dos valores de momento limites obtidos das análises de elementos finitos

Os gráficos de momento aplicado versus deformação longitudinal das análises de elementos finitos desta seção estão representados na Figura 125.

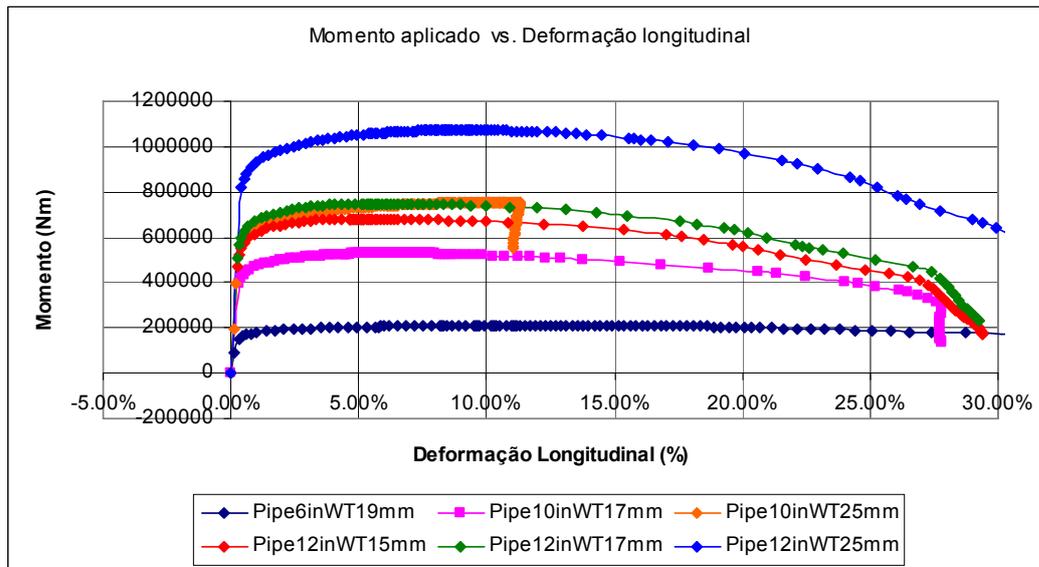


Figura 125 – Gráfico Momento aplicado versus deformação longitudinal

O desenvolvimento da falha por flambagem localizada pode ser observada em quatro instantes diferentes na Figura 126 e na Figura 127 relativas ao duto de 12.75" com espessura de parede de 17.5mm. Os resultados relativos as outras relações DE/t estão apresentados no APÊNDICE VIII – Resultados das análises de elementos finitos para verificação dos critérios da deformação característica com a presença da sapata de anodo. As regiões de deformações longitudinais máximas em cada instante estão marcadas por um "retângulo vermelho". Os instantes apresentados nas figuras estão ordenados no sentido horário das imagens e significam:

- Instante em que o duto atinge a deformação " ϵ_c ", calculada pela DNV (2000);
- Instante em que o duto atinge a deformação limite relativa ao momento limite. Deformação limite de flambagem localizada a partir do modelo de elementos finitos;
- Instante onde a flambagem localizada é visível;
- Instante da configuração final.

As análises desta seção foram realizadas utilizando um diâmetro de sapata de anodos de 80mm. Foi observado a partir dos resultados da Seção 5.7 que a faixa de diâmetro das sapatas utilizadas no mercado, que os valores de SNCFs

variam, porém pouco. Desta forma, a equação (52) apresentada, no momento, somente teria validade para as sapatas de 80mm. No entanto, para outros valores de diâmetro de sapata de anodo, os resultados devem ter pouca variação, uma vez que os SCNFs não foram sensíveis a esta variável.

É concluído então que para análises envolvendo sapatas de anodo, a equação da DNV (2000) não pode ser aplicada diretamente, em virtude das sapatas funcionarem como um aumento de espessura do duto e desta forma atingirem deformações características mais elevadas. Quando um concentrador de deformação está presente no duto, antes de ser concluído que o mesmo não é aceitável em relação ao critério da DNV (2000), este deve ser submetido a uma análise criteriosa adotando a mesma metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho. Em geral, o duto não flamba por causa do SNCF, pois este é muito localizado e as sapatas de anodo “reforçam” a seção. Assim o duto flamba antes na região fora do concentrador de deformação, isto é, quando a região onde ocorre à deformação compressiva nominal atinge seu valor crítico de flambagem

Na Seção 5.7, onde os resultados das relações DE/t de 18.51 e 20.37 foram maiores que os valores admissíveis na região de concentração de deformação, foi observado que com a metodologia apresentada, os valores admissíveis mudariam de 1.88% e 1.67% (Valor admissível DNV) para 2.72% e 2.45% respectivamente. Estes valores foram calculados a partir da equação (19) e estão resumidos na Tabela 34. No entanto, algumas deformações longitudinais para os lados esquerdo e direito da sapata apresentadas na Tabela 22 ainda estão acima do valor admissível. Os valores dos fatores de segurança da DNV (2000) principalmente “ y_ϵ ” com o valor de 2.1 são muito conservadores. Isto pode ser observado nas análises de flambagem realizadas, onde os dutos somente iniciam a flambagem localizada em um valor pouco acima da deformação característica. Em análises deste gênero, caso o valor encontrado esteja acima do admitido, isto não será um ponto de preocupação desde que uma análise de elementos finitos ou teste físico possa ser realizada.

DE/t	$\epsilon_{admFEA} = \epsilon_{cFEA} / (y_{\epsilon} * y_C * y_f)$	$\epsilon_{admDNV} = \epsilon_{cDNV} / (y_{\epsilon} * y_C * y_f)$
8.83	5.56%	4.41%
10.75	5.08%	3.55%
12.75	4.33%	2.93%
15.60	3.05%	2.31%
18.51	2.72%	1.88%
20.37	2.45%	1.67%

Tabela 34 – Resultados das deformações admissíveis calculadas a partir dos valores das análises de elementos finitos e da deformação característica da DNV (2000)

A DNV (2000) na Seção 5 D508 apresenta uma nota informando que para relações DE/t menores que 20, o fator de utilização pode ser aumentado a partir de testes em escala, observações, ou mesmo experiência profissional. Este aumento deve ser embasado por cálculos analíticos. Portanto, com uma justificativa como apresentada neste trabalho, valores menores para o fator de segurança “ y_{ϵ} ” podem ser utilizados e os dutos com fatores de concentração acima do admissível estariam aprovados.

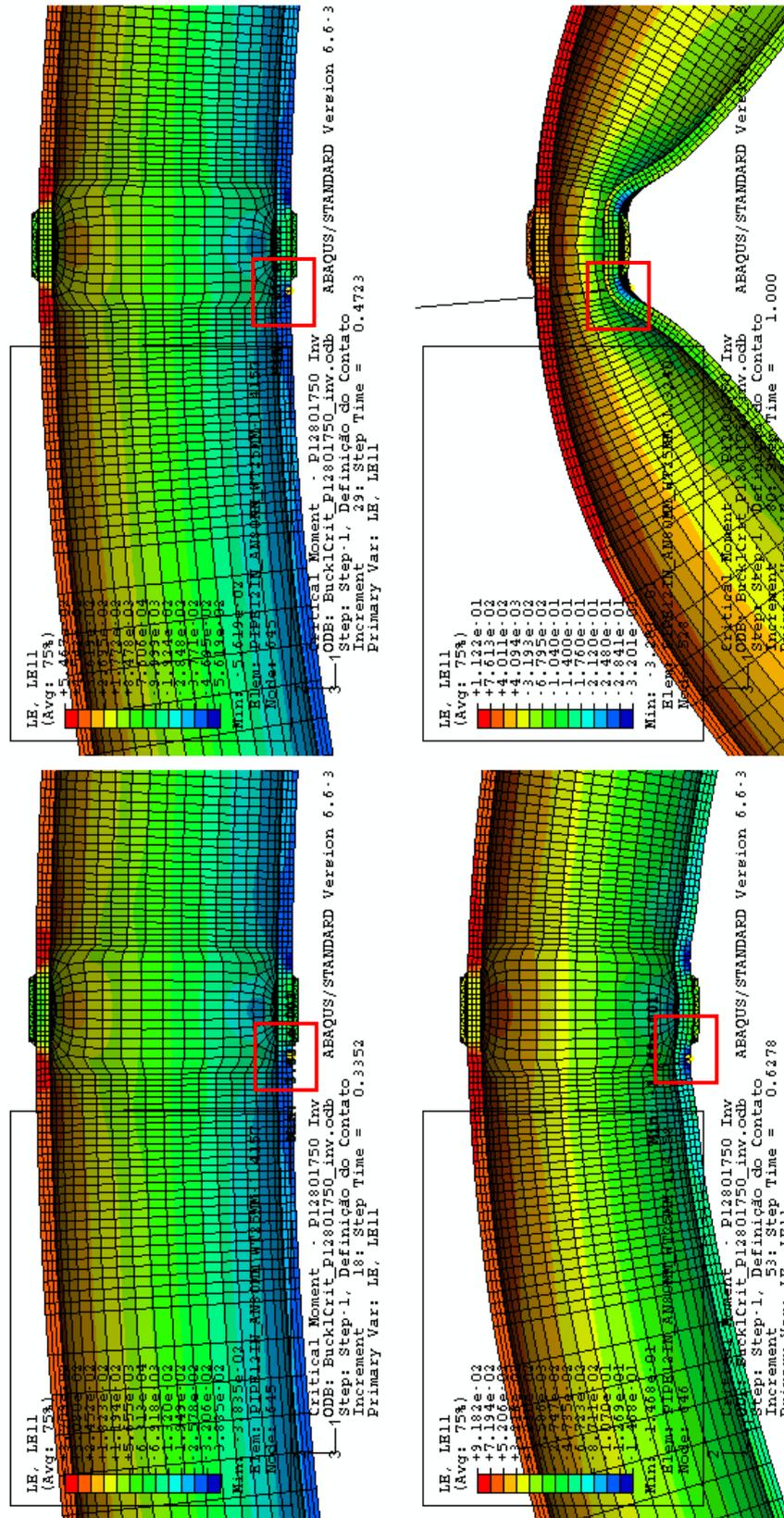


Figura 126 - Evolução da flambagem localizada com sapata de anodo – DE=12.75” e t=17.5mm – Vista lateral

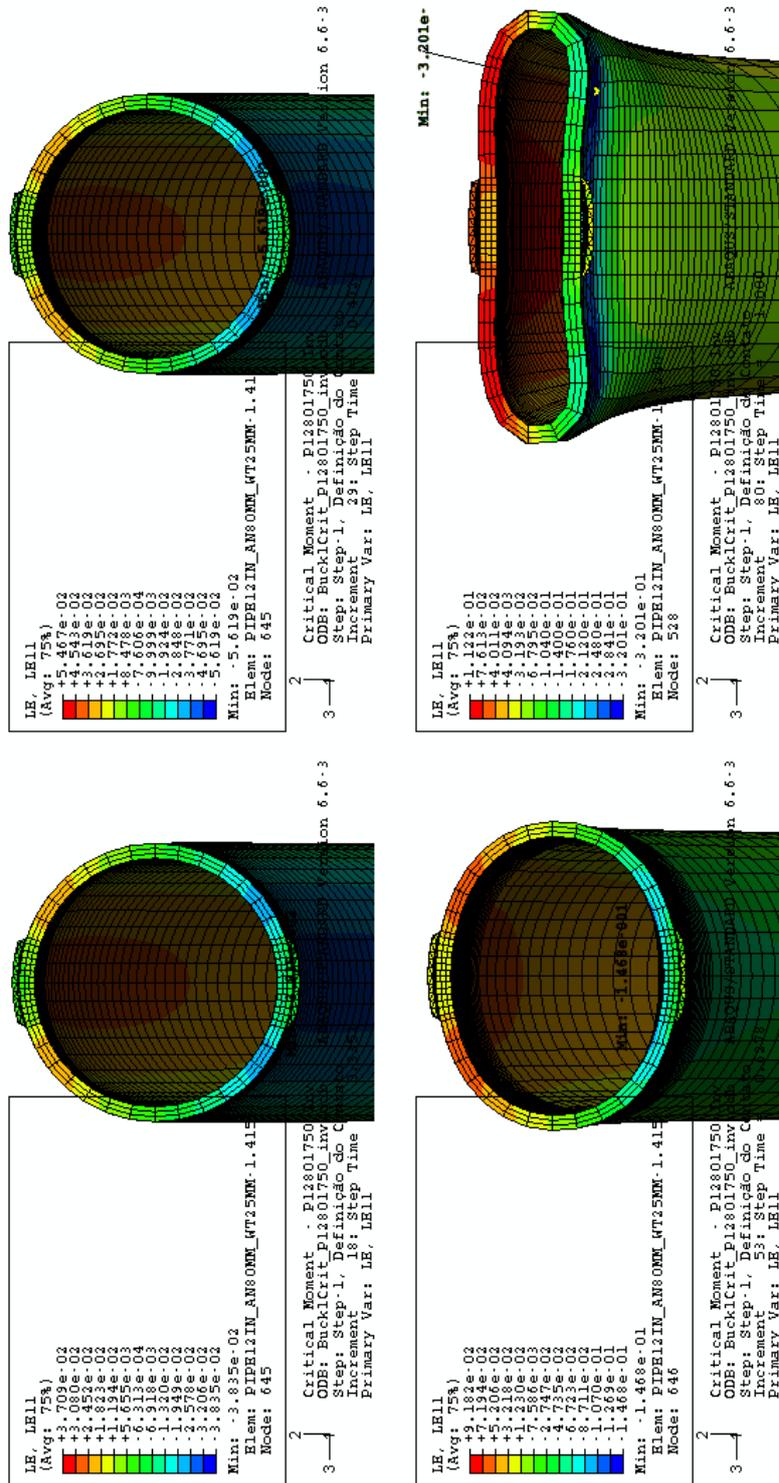


Figura 127 - Evolução da flambagem localizada com sapata de anodo – DE=12.75” e t=17.5mm – Vista corte