

6 Conclusões

Esta seção tem como objetivo realizar um retrospecto dos resultados atingidos ao longo deste trabalho e apresentar as principais conclusões a partir do estudo de diferentes modelos de enrolamento de dutos para relações DE/t variando de aproximadamente 8 a 20.

6.1. Retrospectiva e discussão dos resultados

A primeira etapa deste trabalho envolveu a validação dos critérios apresentados na Seção 3 através do método de elementos finitos. Foi concluído que os valores apresentados pela DNV (2000) são válidos para um duto sem elementos concentradores de deformação. A curva gerada a partir do método de elementos finitos apresentou valores pouco maiores que o da deformação característica " ϵ_C ". A equação de momento crítico para dutos sob flexão pura indicada por Bai (2005) a partir do relatório SUPERB (1996) foi também validada a partir dos mesmos modelos.

O estudo do processo de enrolamento foi iniciado a partir das análises de um modelo bidimensional com o objetivo de entender como este processo pode ser simulado com as técnicas de elementos finitos. Os resultados foram satisfatórios e este modelo pode ser rapidamente construído para análises onde é desejado obter os valores de deformações nominais na parede do duto. Estes valores foram validados a partir dos cálculos analíticos apresentados na Seção 4.2.

Com o modelo bidimensional validado, a etapa seguinte foi transferi-lo para o ambiente tridimensional, uma vez que os fatores de concentração de deformação devido às sapatas de anodo somente poderiam ser avaliados caso sua geometria fosse gerada sobre a superfície do duto. O modelo 3D foi comparado com o 2D e os cálculos analíticos não apresentaram diferenças nos resultados. Portanto, o modelo também foi validado. Em relação ao modelo bidimensional, o mesmo aceita ovalizações da seção transversal do duto e é

base para qualquer outro modelo que envolva a medição da geometria das seções no processo de enrolamento.

Com o modelo de base validado foi inserida a sapata de anodo para o estudo dos SNCFs gerados pela mesma. Uma série de análises seguindo as dimensões apresentadas na Tabela 1 foram realizadas com o objetivo de obter um perfil dos SNCFs causado pela variação do diâmetro da sapata e da distância da sapata ao cordão de solda. Com a observação dos resultados foi concluído que o valor destas variáveis pouco influi no SNCF. A distância da sapata ao cordão de solda apresentou influência ao definir qual dos lados esquerdo ou direito de concentração possuía o maior valor.

Os valores de concentração apresentaram uma relação com os valores de DE/t . Quanto maior este valor, maior foi o SNCF obtido. Isto é razoável uma vez que valores altos de DE/t significam espessuras de parede menores e conseqüentemente menor resistência aos momentos aplicados durante a flexão dos dutos. Como as sapatas de anodo funcionam como um aumento de espessura localizada, a diferença de rigidez entre a espessura do duto e a espessura do duto adicionada à espessura da sapata resulta nos SNCF.

Um dos modelos estudados na Seção 5.7 foi submetido à aplicação de cargas de enrolamento na direção longitudinal na Seção 5.8, com o objetivo de reduzir os efeitos de flambagem localizada na superfície inferior do duto. A aplicação de um valor inicial para este carregamento foi definida a partir do cálculo do valor mínimo descrito na Seção 4.3 seguido por valores de 25t, 50t e 100t, escolhidos aleatoriamente. Os valores de carga de enrolamento apresentaram uma redução nos valores de deformação longitudinal compressiva e aumento da trativa, refletindo os resultados esperados. Portanto, do ponto de vista dos efeitos de flambagem localizada, aplicar uma carga trativa longitudinal reduz significativamente os valores de deformação longitudinal reduzindo o risco de problemas durante o enrolamento dos dutos.

O modelo de flexão do duto sobre o carretel demonstrou ser eficiente. Entretanto, os únicos parâmetros comparativos para sua validação seriam os cálculos analíticos. Com o objetivo de introduzir uma outra abordagem em elementos finitos foi desenvolvido um modelo que considera o carretel sendo rotacionado. O resultado deste teste comparativo foi a obtenção de resultados

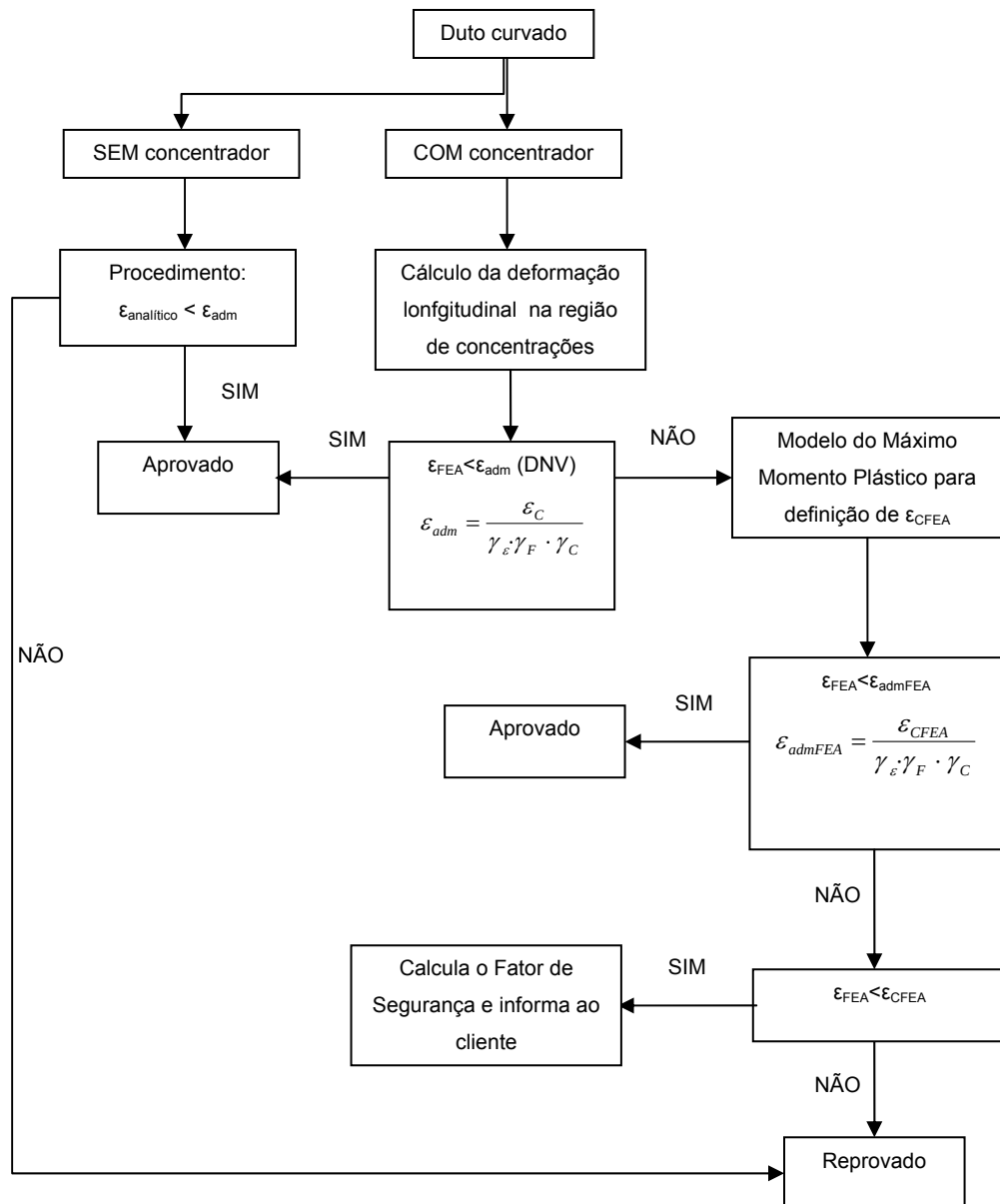
muito próximos aos anteriores, demonstrando que qualquer um dos modelos seria uma boa opção para abordar o problema de enrolamento. Na avaliação final na Seção 5.9 foram citadas algumas vantagens do modelo de rotação do carretel como, por exemplo a medição das deformações ao longo do processo de enrolamento. Foram também citadas algumas desvantagens como, por exemplo, o custo computacional que este modelo demanda.

O único ponto que não havia sido abordado até então neste trabalho era o do comportamento das concentrações de deformação ao longo do ciclo completo ao qual o duto é sujeito durante o enrolamento e desenrolamento na embarcação PLSV. Este tópico foi abordado nas Seções 5.10 e 5.11 através de modelos bidimensionais e tridimensionais respectivamente. Inicialmente foi desenvolvido um modelo bidimensional para o entendimento de todas as etapas envolvidas dos carregamentos de dutos e ao mesmo tempo realizar a equivalência do modelo real com o modelo numérico. Os resultados de deformações obtidas para o ciclo completo deste tipo de análise podem ser integrados como dados de entrada para os relatórios de ECA. O modelo tridimensional, além de prover a mesma base de dados do modelo 2D, permite a avaliação da ovalização após o ciclo completo e a inserção de elementos concentradores de deformação. A avaliação de ovalização realizada resultou em um valor acima do permitido pela DNV (2000) de 3%. No entanto, a partir dos modelos desenvolvidos na Seção 5.4 foi percebido que na deformação limite o duto já havia ovalizado acima do valor de 3%. Portanto o valor admissível apresentado pela DNV (2000) deve ser reavaliado quando necessário a partir da avaliação da deformação limite. Foi concluído a partir desta análise, que o duto avaliado não apresentaria problemas estruturais.

Algumas relações DE/t da Seção 5.7 não seriam aprovadas pela DNV (2000) no critério de falha por flambagem localizada. No caso de DE/t igual a 20.37, o duto não foi aprovado mesmo para as deformações nominais, ou seja, sem fatores de concentração de deformações. Foi observado que os fatores de segurança informados pela DNV (2000) são conservativos em virtude da intenção de aplicação em cálculos analíticos. No entanto, a própria DNV (2000) indica que estes fatores podem ser reduzidos, caso análises e testes sejam realizados. Desta forma, os modelos de momento crítico validados na Seção 5.4 foram reavaliados com a inclusão das sapatas de anodo para observar o efeitos destes elementos sobre o valor das deformações limites dos dutos avaliados. A

conclusão obtida foi que as sapatas de anodo aumentam o valor da deformação característica devido a esta funcionar como um aumento de espessura localizado. Foi sugerido na Seção 5.13 uma nova equação de " ϵ_c " para estudos envolvendo as sapatas de anodo baseada na equação de deformação característica da DNV (2000). Esta modificação permitiu que os valores de deformação calculados para as regiões de concentração fossem aceitas em um critério mais próximo dos resultados reais. Mesmo assim, a flambagem normalmente ocorre na região de deformações nominais antes da região de concentradores como foi observado nos gráficos de respostas. Uma falha na região das sapatas somente seria possível caso as deformações nestas regiões atingissem o valor crítico da equação (52) antes do valor crítico da equação (13), originalmente proposta pela DNV (2000).

Portanto foi concluído que a deformação característica original da DNV (2000) somente é aplicável para dutos sem elementos concentradores. Em uma primeira instância de análise se o projeto do duto passar no critério sugerido, não são necessárias as avaliações utilizadas neste trabalho. Caso contrário, é proposta uma reavaliação dos valores da DNV (2000) para problemas específicos. A equação de momento crítico proposta por Bai (2005) possui relevância, uma vez que esta não altera os resultados em virtude da adição do efeito do concentrador de deformação. Os resultados apresentados analiticamente estavam de acordo com os obtidos numericamente. Portanto, o fluxograma do processo apresentado a seguir é sugerido para avaliação de concentrações de deformações.



6.2. Conclusões finais

Como conclusão final, este trabalho serviu para apresentar diferentes formas de se abordar um problema de enrolamento de dutos utilizando as técnicas mais modernas de elementos finitos. O procedimento adotado para o cálculo dos limites de deformação pode ser adotado em outros problemas relativos ao enrolamento de tubulações. Exemplos de aplicação são juntas de transição e revestimentos com transição de espessura, entre outros.

Em virtude de alguns resultados apresentarem valores maiores que os admissíveis foi proposto um fluxograma que possibilita avaliar o problema de enrolamento de uma forma mais sistematizada, e ao mesmo tempo calcular os reais valores de deformações a serem considerados em pontos específicos de concentrações no duto.