

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a exploração dos primeiros poços de petróleo nos Estados Unidos (EUA), no início da segunda metade do século XIX, surgiu a necessidade de transportá-lo do local de extração para o local de processamento e de consumo. O petróleo era acondicionado dentro de barris e transportado em carruagens e posteriormente por barcos. Mas estes tipos de transporte geravam riscos, pois estavam sujeitos a roubo, acidentes, danos ambientais e a interrupções pelo clima e por greves [1].

Os problemas citados podiam ser evitados com a utilização do transporte ferroviário. Entretanto, a sua utilização fez surgir novos problemas como a exclusividade da ferrovia e o sindicato dos condutores [1].

No ano de 1879 foi construído o primeiro grande oleoduto, na Pennsylvania (EUA), com 5” de diâmetro e extensão de 174 quilômetros [2]. Doze anos depois foi construído o primeiro duto de alta pressão reduzindo o custo de transporte do óleo, de US\$3 para US\$1 por milha. Em 1886 foi construído o primeiro gasoduto [3].

Até 1920 utilizava-se união roscada como forma de interligação dos tubos, no início desta década passa a ser aceita internacionalmente a soldagem como forma de união. Esta nova tecnologia permitiu a construção de dutos de grandes diâmetros, altas pressões e sem vazamentos [3].

A malha de dutos mundial expandiu-se rapidamente quando se constatou que esta era uma forma eficiente e econômica de transporte. Uma das contribuições para esta grande expansão foi a descoberta de reservas de petróleo e gás em áreas remotas que possuíam baixa demanda energética [3, 4].

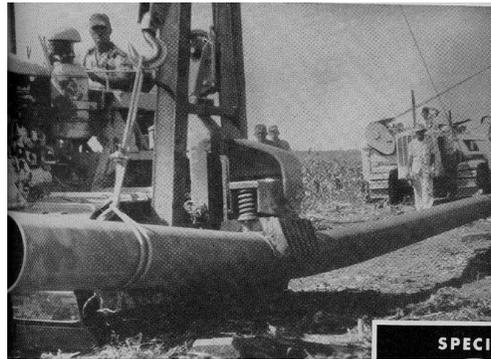
No início do século passado, quando da construção dos primeiros sistemas de transporte por dutos, os projetistas encontraram dificuldades em relação ao traçado, pois quase sempre a disposição em reta era inviável, em virtude de acidentes geográficos, como elevações, declives, lagos, rios e outras de origem econômica. Estas dificuldades impuseram e justificaram o curvamento do duto ou

mesmo, em certas situações, do próprio tubo, sempre em atendimento às condições de posicionamento determinadas pelo projeto de engenharia e aos custos de implantação [5, 6].

Para tornar viável as rotas impostas, diferentes métodos e técnicas foram utilizados ao longo dos anos. Quando apenas pequenas mudanças de direção são exigidas, simplesmente coloca-se o tubo na vala preparada o que acaba permitindo uma deformação elástica por sua natural flexibilidade. Se as mudanças de direção exigidas são maiores, uma curva permanente é necessária. No passado foram utilizadas técnicas tais como a aplicação de uma grande fonte de calor no centro do tubo e a imediata imposição de pesos ou força para curv-lo (técnica de curvamento a quente), como pode ser visto na Figura 1 (a); e a utilização de máquina usada na movimentação do tubo para segurar e aplicar a força necessária ao curvamento com o auxílio de um suporte rígido ao centro (curvamento a frio), Figura 1 (b) [1].



(a)



(b)

Figura 1 – Imagens históricas de processos de curvamento, (a) curvamento a quente e (b) curvamento a frio [1]

A técnica de curvamento a frio, descrita anteriormente, foi abandonada com o desenvolvimento de uma máquina projetada para efetuar o curvamento do tubo, Figura 2 (a). Esta máquina surgiu na década de 1950 e usava o conceito de curvamento em 3 pontos para conformar o tubo sobre a superfície de uma sela [7]. Ela usava um complicado sistema de cabos e guinchos para prover a força necessária ao curvamento. Esta máquina se mostrou bem sucedida para a função que foi concebida, e continua sendo a mais usada ainda hoje. Os fundamentos do

processo de curvamento a frio não mudaram muito desde então, porém as máquinas modernas, apresentada na Figura 2 (b), usam cilindros hidráulicos para prover a força ao curvamento.



(a)



(b)

Figura 2 – (a) primeiras máquinas de curvamento a frio [1] (b) máquina moderna de curvamento a frio [8]

Para o funcionamento das máquinas de curvamento é necessária a intervenção de um operador treinado para a atividade. Este opera as alavancas da máquina que promove a movimentação e o curvamento do tubo. Um operador de curvamento experiente tenta executar cada processo de curvamento, em um mesmo tubo, com o mesmo ângulo e com intervalos aproximados. O ângulo total obtido em cada processo de curvamento e o espaçamento entre ângulos parciais variam de acordo com o ângulo da curva que está especificado no projeto e a geometria do tubo, isto é, diâmetro, espessura e comprimento. O ângulo da curva é medido em graus por diâmetro, isto é, se o tubo possui ângulo de curvatura de  $1^\circ$  (um grau) em cada diâmetro ao longo do tubo então se diz que a curva possui  $1^\circ$  por diâmetro.

Não deve ser esquecido que curvas forjadas a quente e curvas por indução são também usadas na indústria de construção e montagem de dutos para pequenos raios de curvatura, ou seja, menores que o limite do curvamento a frio [9]. Estes tipos de curvamento podem ser utilizados para fabricação de curvas de raio longo, mas não podem ser executados no campo [10], têm custos mais elevados que os do curvamento a frio e, por conseqüência, nunca o substituíram como método tradicional de mudança de direção em construções no campo.

O tubo mais comumente utilizado na construção e montagem de dutos é produzido segundo especificação 5L do *American Petroleum Institute* (API) [11]. Nesta especificação o tubo é graduado de acordo com o Limite de Escoamento Mínimo Especificado (SMYS – *Specified Minimum Yield Stress*), sendo que o sistema americano de unidades é utilizado [11]. De forma geral o tubo é referenciado pelo seu grau API 5L [11], por exemplo, X42 ou X70, onde 42 ou 70 indica que o SMYS do tubo é 42 ou 70 ksi.

Quando as máquinas de curvamento a frio foram desenvolvidas, a maioria dos tubos a serem curvados possuía baixa resistência, grau 42 ou menores e, em geral, possuíam baixa razão diâmetro espessura ( $D/t$ ). Embora alguns problemas tenham ocorrido no curvamento a frio destes tubos, os problemas eram sempre decorrentes de erro do operador ou de preparação da máquina, todos sempre facilmente corrigíveis.

Os dutos são compostos de tubos soldados, que são produzidos a partir de chapas de aços estruturais de alta resistência mecânica, calandrados e com soldas longitudinais ou helicoidais [12]. É tema relevante no desenvolvimento de pesquisas aplicadas o aumento da resistência mecânica dos aços utilizados [13]. Existe particular interesse no aumento da resistência mecânica dos aços, pois permite a elevação da pressão de trabalho do equipamento, redução da espessura ou apenas o aumento da confiabilidade no transporte [14, 15]. Isto se reflete em redução de custos ou aumento de lucros [15, 16].

A tecnologia usada nos aços e nos tubos permitiu o desenvolvimento de tubos com maiores graus, e como consequência maiores valores de  $D/t$ . Na década de 1980 estas melhorias levaram ao eventual problema de formação de enrugamento na face comprimida do tubo durante o processo de curvamento [7]. O problema foi notado inicialmente em conjunto com o processo de revestimento chamado epóxi termicamente curado (FBE – *Fusion Bonded Epoxy*). Neste processo o tubo é aquecido a aproximadamente 240° C, o que pode induzir o envelhecimento (*strain aging*) em alguns aços [7, 17]. Nesta época pensou-se que este envelhecimento poderia ser responsável pela mudança no comportamento (enrugamento), embora nenhum método de compreensão quantificável tenha sido produzido naquele momento [7, 17].

O aumento da resistência mecânica dos materiais usados para construção de dutos terrestres possibilitou a diminuição da espessura sem alteração na pressão de

projeto, havendo assim aumento da razão entre diâmetro e espessura do tubo. Com isto, a já pensada dominada técnica de curvamento a frio passou a enfrentar problemas devido a tendência de formação de rugas (*wrinkle*) no lado compressivo (intrados) da curva, em tubos de aço de grande diâmetro, baixa espessura e alta resistência mecânica, conforme mostrado na Figura 3 [18].

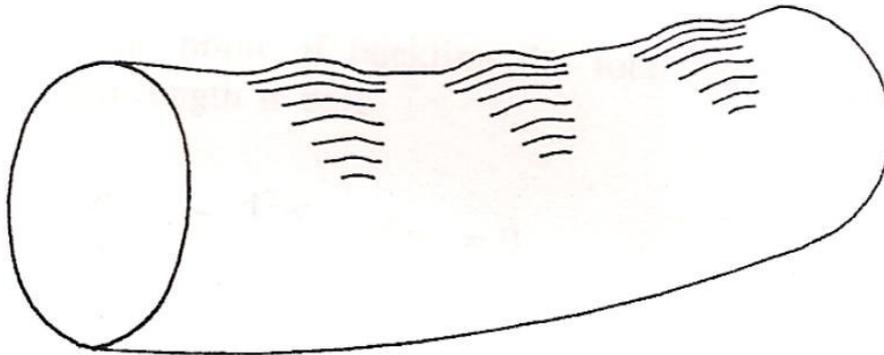


Figura 3 – Desenho Esquemático de Enrugamento em Tubo Curvado [18]

Embora pareça óbvio que a razão  $D/t$  escolhida seja importante na possível ocorrência do enrugamento durante o processo de curvamento, uma verificação dos métodos que quantificam o possível dano atrelado à presença do enrugamento deve ser feita. E é exatamente neste problema que a presente dissertação pretende focar seus esforços. Este estudo irá abordar e analisar o enrugamento em dutos de alta resistência mecânica. A análise será desenvolvida a partir da utilização do método de elementos finitos (FEM – *Finite Element Methods*), procurando apresentar um estudo de formação de enrugamento em dutos de alta resistência e levantamento dos critérios de enrugamento permitidos pelos diferentes códigos estudados.

Dutos operam normalmente a pressões que induzem tensões de até 72% ou 80% do limite de escoamento mínimo especificado, dependendo se para transporte de líquido ou gás respectivamente. Devido a estes elevados níveis de tensão de trabalho há um receio de que o enrugamento possa afetar a integridade do duto.

Outra ocorrência provocada pelo processo de curvamento, que causa receios, é a ovalização. Especula-se que a ovalização possa induzir a tensões locais de momento durante a vida em operação do duto. Apesar de não ser o foco

deste trabalho, o fenômeno ovalização será discutido brevemente nas seções subsequentes.

No Brasil, os problemas causados devido ao aumento da resistência mecânica dos materiais e do aumento da relação  $D/t$  foram detectados com maior intensidade na construção do gasoduto Campinas-Rio de Janeiro com diâmetro do duto de 28” e espessuras de 0,4”, 0,5” e 0,625” [19], e relação  $D/t$  chegando a 70. O traçado deste gasoduto, uma obra da Petrobras, atravessa regiões de terreno acidentado e áreas montanhosas e por isso teve uma grande quantidade de tubos curvados a frio. O processo de curvamento a frio foi qualificado, mas durante o curvamento, no campo, houve grande incidência de enrugamentos no lado compressivo da curva gerada conforme visto na Figura 4.



Figura 4 – Enrugamentos encontrados em tubos curvados

Por ser um problema que tem ocorrido rotineiramente nos últimos anos, os códigos internacionais ainda mostram-se bastante conservadores no que diz respeito à presença de rugas no tubo curvado a frio no campo. Vale ressaltar que os códigos ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) B31.3 [20] e a

norma interna Petrobras [9] não aceitam qualquer tipo de enrugamento no tubo curvado.

A presença do enrugamento nos tubos curvados merece um estudo detalhado, pois a curva é uma região de grande concentração de tensões e o enrugamento é uma mudança geométrica que, em princípio, intensificaria esta concentração de tensões. Além disso, o duto está sujeito à variação de alta tensão, decorrente das mudanças na pressão do fluido durante sua operação, que levam à fadiga de baixo ciclo.

O presente trabalho encontra motivação na extrema necessidade de se conhecer o comportamento de dutos curvados a frio que apresentam rugas, quanto à geometria e vida em fadiga. Inicialmente serão observados os limites geométricos estabelecidos pelos principais códigos internacionais, em seguida, são feitas simulações computacionais utilizando o método de elementos finitos. O programa utilizado para modelagem e simulação é o Abaqus<sup>®</sup>. São modelados tubos de aço estrutural API X70 de alta razão diâmetro espessura, e são avaliados os enrugamentos formados quanto às restrições para os mesmos contidos nos códigos brasileiro (NBR), americano (ASME), australiano e europeu (ISO). Em complemento é realizada uma avaliação de vida em fadiga por diferentes métodos: Markl, inclinações universais de Manson e ASME seção VIII divisão 2. Os cálculos são realizados considerando a proposição de Rosenfeld [21, 22] de um fator de concentração de tensão em função da geometria do enrugamento e o fator de concentração de tensão obtido pelo método dos elementos finitos.

## 1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Durante a última década a construção de dutos apresentou dificuldades em curvar tubos a frio. Estas dificuldades manifestaram-se por uma inabilidade em se atingir curvas de 1 a 1,5 graus por diâmetro do tubo sem que ocorresse a formação de rugas. Muitos destes enrugamentos tiveram origem em práticas pobres de curvamento, como operação incorreta durante o curvamento ou inexperiência do operador. Mesmo quando todo o processo é feito de forma correta e por operador experiente, observa-se que ‘tubos ruins’ continuam a existir. Os códigos

internacionais mostram-se bastante conservadores quanto à presença de rugas nos tubos curvados, o que gera retrabalho e novos custos que podem ser desnecessários.

Apesar dos principais códigos nacionais e internacionais mostrarem-se cautelosos em relação a aceitação de enrugamentos, ainda hoje não está claro se a mera presença de uma ruga visível é suficiente para se rejeitar um tubo curvado, devido à incerteza do comprometimento da integridade estrutural do duto pela sua presença.

O objetivo do estudo é descrever os principais códigos de projeto nacionais e internacionais quanto a presença de rugas provenientes do curvamento a frio de tubos e apresentar uma avaliação de vida em fadiga, por diferentes métodos, de tubos curvados a frio com a presença de enrugamentos. Em complemento é proposto um ângulo para o qual há a formação do enrugamento.

Pretende com isso, fornecer informações mais concretas de apoio para aceitação/rejeição de tubos curvados a frio no campo com a presença de enrugamentos.

### 1.3

#### **ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está organizada em 5 etapas. Na introdução foi apresentado um panorama geral do transporte por dutos, a motivação para curvamento a frio e o enrugamento decorrente deste processo de mudança de direção.

Na seção 2 é feita uma revisão bibliográfica de tópicos relevantes para o estudo. Nesse capítulo são descritos os principais pontos abordados por estudiosos do assunto, citando as principais questões que envolvem o processo de análise de enrugamentos.

A seção 3 descreve a metodologia proposta para análise do enrugamento. A metodologia é dividida em três etapas: verificação do início do enrugamento, resistência à ruptura estática e vida em fadiga.

A seção 4 descreve os resultados encontrados, à luz da metodologia proposta.

Por fim, na seção 5, são destacadas as conclusões e recomendações deste trabalho.