

1 Introdução

Dutos (do latim *ductu*; “aquilo que conduz”) são sistemas de canalização utilizados no transporte de fluidos. Originalmente, tinham o objetivo de captar e conduzir água (os chamados aquedutos) de uma região a outra. Diversas civilizações antigas – Assíria, Fenícia, Grécia e Roma – utilizavam tais estruturas no abastecimento de água, algumas constituindo uma rede complexa e extensa, como a que supria Roma no século I (cerca de 440 km). Na China, em 400 a.C., os bambus perfurados eram também empregados na distribuição de gás natural para a iluminação pública de Pequim (HIPPERT, 2004).

Nos dias de hoje, os dutos são amplamente empregados no transporte de gás, petróleo e seus derivados, integrando-se assim a setores econômicos estratégicos, como o setor petroquímico e o energético. Desta maneira, é indispensável que os mesmos operem com eficiência e segurança, atendendo tanto às questões técnicas e econômicas quanto aos aspectos ambientais.

A estrutura de produção e abastecimento de petróleo e derivados interliga, através de várias modalidades de transporte, três pontos distintos: os poços de produção, as refinarias e os centros de consumo. Destes pontos, apenas as refinarias apresentam flexibilidade quanto à definição de sua localização, em face de uma análise sócio-econômico-ambiental. Assim, considerando que a distância entre os centros de consumo e os poços de produção possa ser significativa, é necessário dispor de uma vasta infra-estrutura de distribuição para garantir a eficiência do abastecimento de energia.

A ampla utilização de dutos no transporte de fluidos deve-se a duas características principais: custo e segurança. Apesar do elevado investimento inicial para construção e instalação das linhas, foi constatado por COSHAM (2002) que o transporte de combustíveis fósseis por meio de malhas de dutos é consideravelmente mais barato do que as demais alternativas de modalidades de transporte (avião, navio, trem ou caminhão). O outro aspecto relevante diz respeito à segurança. Dutos se apresentam como o meio de transporte mais seguro, confiável e de maior regularidade para o transporte de grandes quantidades de óleo e gás natural através de vastas extensões territoriais, segundo dados do Gabinete para a Segurança de Dutos do órgão norte-americano *National Transportation Safety Board* (NTSB, 2002). É importante salientar que uma maior segurança nos

sistemas dutoviários acarreta em menor registro de acidentes e, com isso, redução de perda de recursos no transporte, além de menor risco de danos ambientais devido a vazamentos.

Os tubos utilizados na indústria de petróleo são geralmente classificados através do *API (American Petroleum Institute)* conforme sua aplicação, composição química e resistência mecânica (SILVA, 2004). Os aços utilizados na fabricação de tubos para linhas de transmissão, especificamente, seguem a classificação API-5L (*Specification for line pipe steel*), abrangendo tubos adequados para transporte de gás, água e óleo às indústrias de petróleo e gás natural, e levando em consideração a rota de processamento do tubo (tubos sem costura, com costura, com solda em espiral, etc.). Estes tubos são fornecidos em diâmetros externos nominais que variam de 3 a 1.240 mm (1/8 a 49") e são utilizados principalmente no transporte de óleo e gás. Para a classe 5L, os graus de composição química e resistência mecânica variam desde API-5L-A25 até o moderno API-5L-X80. Nas designações compostas pelas letras A ou X, os dois últimos dígitos especificam valores mínimos de limite de escoamento do material, em unidades inglesas ($1.000 \text{ lb/in}^2 = 1 \text{ ksi}$). Desta forma, os tubos classe API-5L-X70 apresentam valor mínimo de tensão limite de escoamento igual a 70 ksi (480 MPa).

Na construção dos novos dutos terrestres, vêm-se empregando tubos de grandes diâmetros e espessura reduzida que operam sob alta pressão, permitindo um ganho de produtividade pelo aumento do volume de fluido transportado. Isto somente se tornou possível com o desenvolvimento contínuo de aços microligados, com elevadas características de soldabilidade, resistência mecânica e tenacidade.

Embora tal configuração de tubos de grandes diâmetros e paredes finas constitua um avanço de projeto em termos de desempenho econômico das linhas, deve-se atentar aos desafios tecnológicos relacionados. O aumento da resistência mecânica do material permite a operação da linha de dutos em pressões mais elevadas sem ocorrência do colapso plástico da estrutura. No entanto, pressões elevadas geram um estado de tensões bastante severo sobre um defeito potencialmente presente no material do tubo, e a extensão estável deste dano sobre uma parede de espessura reduzida pode acarretar em falha da estrutura, uma vez que a margem de propagação é significativa. Assim, no decorrer do tempo, os dutos ficam sujeitos a danos que podem comprometer sua integridade estrutural e suas perfeitas condições operacionais.

O Grupo de Gerenciamento de Oleodutos da *CONservation of Clean Air and Water in Europe* (CONCAWE), organização européia que congrega diversas companhias petrolíferas, elaborou um relatório com estudos estatísticos sobre acidentes em linhas de oleodutos ocorridos entre 1971 e 2000 (CONCAWE, 2002). O referido relatório, relacionado com informações de vinte e um países da Europa Ocidental, em dutos de comprimento superior a 2 km de extensão, excluindo sistemas submarinos, registrou 379 casos neste período, com volume de vazamento superior a 1m³ em cada ocorrência.

Danos em dutos - 1971-2000

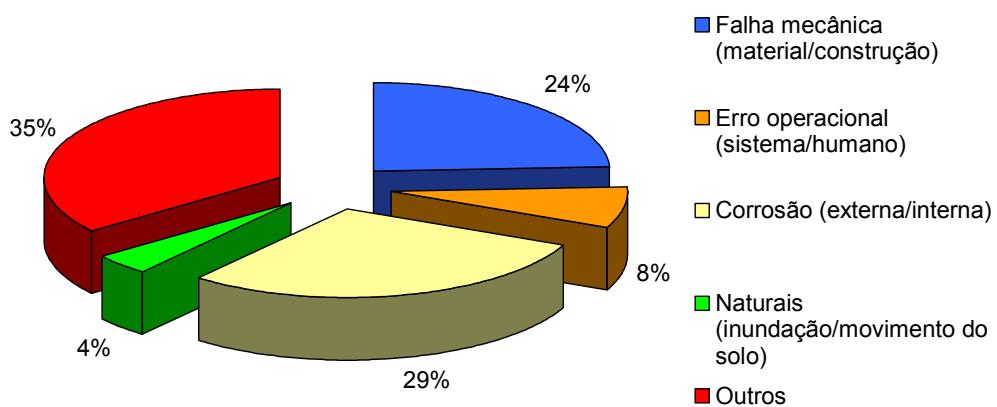


Figura 1-1 – Causas de danos em dutos (CONCAWE, 2002).

Dentre as principais causas de danos, conforme apurado por CONCAWE (2002) em diversas linhas de dutos (Fig. 1-1), destacam-se: a corrosão (29%); falhas mecânicas (24%), como defeitos de fabricação, falhas de projeto; erros operacionais (8%); ações naturais, tal como o movimento do solo (4%); entre outros (35%). A mais freqüente destas em particular – a corrosão – pode ser provocada por falhas na proteção catódica ou por danos no revestimento de proteção ou ainda pela presença de umidade no produto transportado.

Como medida de segurança, realiza-se o monitoramento periódico da integridade das tubulações através de um equipamento chamado *PIG*, com registro dos dados por meio de sensores ou varreduras por ultra-som. Faz-se necessária, além da realização de inspeção instrumentada, a aplicação de um método de

avaliação estrutural, a fim de se obter um diagnóstico da integridade do duto. Em casos onde a pressão admissível verificada num segmento de duto com corrosão é menor do que a pressão de operação, deve-se reforçar o duto ou reduzir a pressão operacional. Desta maneira, a atividade de integridade estrutural de dutos deve consistir do gerenciamento e organização de um conjunto de medidas com o intuito de garantir os níveis satisfatórios de confiabilidade operacional (CORREIA & FERREIRA, 2004).



Figura 1-2 – Registro de danos em linhas de dutos.

Diversas técnicas de recuperação e/ou reforço de dutos foram propostas ao longo dos anos, como os conectores mecânicos, a braçadeira bipartida, a remoção do defeito por trepanação, o corte e a substituição, a dupla calha soldada, a dupla calha com enchimento e, mais recentemente, a aplicação de camadas de uma classe de materiais de excepcionais características, os materiais compósitos.

Os materiais compósitos são provenientes da combinação sinérgica de dois ou mais materiais distintos, com intuito de se obterem propriedades pré-determinadas, diferentes das encontradas nos seus constituintes isoladamente. Uma destas fases, que confere rigidez e resistência ao material, é denominada reforço. Já o segundo material componente, cuja finalidade é unir e proteger o reforço de agentes externos, chama-se matriz.

Dentre os materiais compósitos, destaca-se um grupo singular de características inovadoras, com variação contínua de suas propriedades ao longo de sua espessura, denominado materiais com graduação funcional (*functionally graded materials*, FGM). Tais materiais caracterizam-se pela otimização que conferem à estrutura, podendo resultar em sistemas mais leves e esbeltos, além de apresentarem uma menor incidência de concentração e/ou descontinuidade das tensões.

Como elementos motivadores a este trabalho, destacam-se a manutenção do elevado nível de resistência termo-mecânica exigido numa linha de duto; a reabilitação de dutos danificados em caráter permanente, com intuito de garantir a confiabilidade operacional da estrutura; e a adaptação dos dutos a eventuais mudanças nas solicitações originais.

O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de uma metodologia eficiente para o dimensionamento do reforço e do reparo de dutos com emprego dos materiais compósitos com graduação funcional, além da análise do comportamento estrutural do sistema duto-reforço submetido às condições usuais de carregamento numa linha de duto. O referido sistema estrutural é tratado como um elemento de viga tridimensional com capacidade para tração, compressão e flexão. São incorporados ao modelo matemático os efeitos da não-linearidade geométrica e material na análise das tensões e deformações no duto e no reforço. A formulação proposta foi implementada em um sistema para análise de dutos enterrados desenvolvido no âmbito das dissertações de mestrado de MEJÍA (2003), LÁZARO (2004) e SOUZA (2005).

No capítulo 2 deste trabalho, são tratadas as técnicas usuais de reforço de dutos, em particular a que utiliza os materiais compósitos de fibra de vidro com resina polimérica. São apresentados também os modelos utilizados na previsão das propriedades dos materiais com graduação funcional.

Propõe-se, no Capítulo 3, um critério de dimensionamento de reforço de dutos com emprego de um grupo inovador de materiais compósitos, denominados materiais com graduação funcional.

No capítulo 4, é apresentada a modelagem numérica da estrutura do reforço proposta pela pesquisa, mostrando as hipóteses fundamentais; a descrição cinemática (relações deformação-deslocamento) e do material (relações

constitutivas) para o elemento de viga; o equilíbrio (equação do trabalho virtual); e o elemento finito utilizado.

Os exemplos simulando os casos práticos comumente observados nas linhas de dutos estão contidos no capítulo 5.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para pesquisas futuras.