

2

Revisão Bibliográfica

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica associada aos mecanismos para evitar o resfriamento da linha. Como mencionado, após a interrupção do bombeio, o processo de transferência de calor por convecção natural torna-se dominante e uma revisão da literatura neste tema também é apresentada.

2.1

Isolamento de Dutos Submarinos de Petróleo

A formação de fases sólidas nos dutos de transporte de hidrocarbonetos é geralmente associada ao resfriamento ou a queda da temperatura do fluido a valores menores de certos valores críticos. Tipicamente, são necessárias de oito a doze horas para o nível de temperatura atingir a temperatura de formação de hidratos, numa condição onde não há escoamento (Dwight J. et al, 2004).

O risco de formação de sólidos poderia ser controlado mantendo a temperatura do produto acima da temperatura crítica. Uma estratégia utilizada para isto é o isolamento térmico dos equipamentos submarinos que permita a operação em regime permanente fora da região crítica de formação de hidratos ou deposição de parafina, e que permita também períodos de resfriamento (*cool-down*) suficientemente longos durante a parada do sistema (*shut down*). Um desafio para os sistemas em águas profundas é a alta pressão ambiental. A pressão hidrostática a 650 m de profundidade é significativa (aproximadamente 60 atm.) e pode reduzir a espessura e portanto a efetividade do material isolante devido à compressão. A seguir, alguns tipos de isolamento de dutos submarinos para resolver este problema são apresentados.

Sistema *Pipe-in-Pipe* é uma alternativa para superar o problema associado às altas pressões hidrostáticas e consta de dois tubos concêntricos (Fig. 2.1). Nuttall e Rogers (1998) analisaram o sistema de isolamento *Pipe-in-Pipe* para o escoamento de hidrocarbonetos. O projeto do sistema *Pipe-in-Pipe* também foi analisado por Hausner e Dixon (2002). O tubo interior tem a função de transportar

fluidos e portanto é projetado para certa pressão interna, o duto é isolado colocando material isolante no anulo entre os dois tubos. O duto portador (*carrier*) protege o material isolante da pressão hidrostática externa e de danos mecânicos.



Figura 2.1 - Arranjo Pipe-in-Pipe

Uma variante do sistema *Pipe-in-Pipe* é o *Pipe-in-Pipe* aquecido (HPIP, *Heated Pipe-in-Pipe*). O aquecimento é utilizado quando o material isolante por si mesmo não pode evitar a formação de parafinas ou hidratos. O princípio de funcionamento consiste em passar uma corrente através do duto. A parede do duto representa uma impedância e quando uma corrente passa por uma resistência, calor é gerado. O aquecimento é utilizado normalmente em uma situação de *shut down* para prolongar o resfriamento, mantendo a temperatura da linha. Este arranjo (Fig. 2.2) também pode contar com um sistema de fibra óptica que fornece dados da temperatura em tempo real da linha que permitam ao operador controlar a potencia elétrica requerida para manter a temperatura da linha.

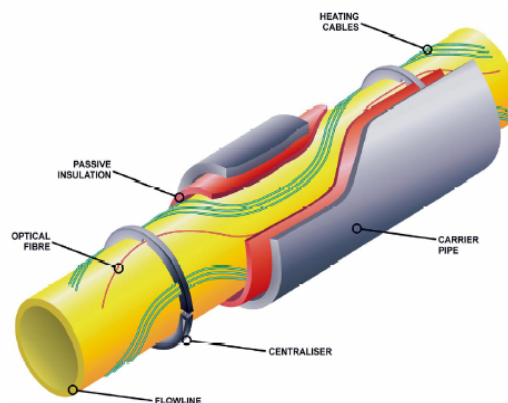
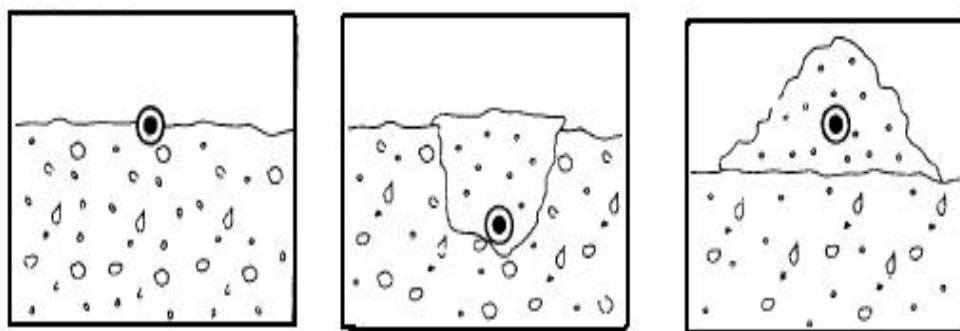


Figura 2.2 - Arranjo Pipe-in-Pipe aquecido eletricamente

A utilização de dutos enterrados é outra solução. Recentes pesquisas têm demonstrado que além dos benefícios de proteção mecânica, como a terra no leito marinho tem baixa condutividade, ocorre uma melhora no desempenho térmico da linha, já que diminui o valor do coeficiente global de troca térmica e adiciona uma massa térmica ao sistema, aumentando assim a retenção de calor. Esta configuração associada a um bom revestimento poderia prover suficiente isolamento térmico e eliminar a necessidade de um sistema *Pipe-in-Pipe*. Esta tecnologia tem sido comprovada no Golfo de México e está sendo utilizada no campo Angus a 623 m de profundidade. As possíveis disposições são mostradas na Fig. 2.3.



(a) meio enterrado (b) enterrado com enchimento (c) recoberto externo

Figura 2.3 - Possíveis configurações de dutos submarinos enterrados

No caso de Sistema *Bundle* utiliza-se um fluido aquecido circulando no espaço anular do *bundle* para manter os tubos operando a temperaturas acima da temperatura de risco. O fluido de aquecimento normalmente flui pelo anular e retorna por uma linha dedicada especialmente para o retorno do fluido quente. Não obstante, a direção do fluxo pode ser revertida durante o escoamento do sistema para melhorar os tempos de pré-aquecimento dos tubos. Um exemplo da configuração *Bundle* é mostrado na Fig. 2.4. Chin et al (2000) estudou a eficiência térmica de um duto com isolamento múltiplo em um sistema tipo *Bundle*.

Uma revisão da literatura mostrou que somente existem alguns artigos tratando do assunto. Brown et al (1996) desenvolveram um modelo computacional, acoplado com o simulador multifásico *OLGA* (Scanpower, 2000), para descrever a troca de calor transiente em arranjos de dutos (*bundles*). As camadas de isolamento e as paredes da tubulação foram consideradas através do

uso de resistências térmicas equivalentes, desprezando os efeitos da capacidade térmica da tubulação.

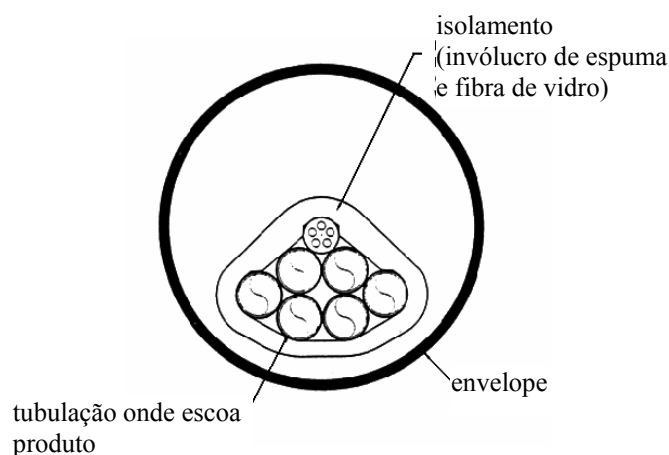


Figura 2.4 - Configuração *Bundle*

Estudos para encontrar coeficientes de transferência de calor globais aproximados para que a temperatura da mistura óleo-gás não chegasse à temperatura de formação de hidrato foram feitos por Rubel e Broussard, (1994), que estudaram também o isolamento adequado para reduzir a quantidade de inibidores químicos necessários para manter a temperatura do fluido acima da temperatura de formação do hidrato.

Zabaras e Zhang (1998) apresentaram um modelo baseado no método de elementos finitos para analisar diferentes configurações do tipo *pipe-in-pipe* e *bundle*. Danielsen e Brown (1999) desenvolveram dois modelos para prescrever o comportamento das linhas com configuração tipo *bundle*. O primeiro modelo foi desenvolvido como uma aproximação do modelo de elementos finitos citado anteriormente. O segundo modelo é uma aproximação analítica, e segundo seus autores, extremamente rápida e fácil de se ajustar.

De acordo com Hight, (2000), as condições nas linhas de escoamento do gás não são afetadas fortemente pelo isolamento. Devido à baixa capacidade térmica dos gases, o índice de calor do fluido que passa pela linha é baixo e a temperatura do fluido é afetada principalmente pelo resfriamento devido à expansão quando a pressão é reduzida. Conseqüentemente, a consideração principal é minimizar perdas de pressão devido ao atrito. Valores de temperatura abaixo da ambiente podem ser evitadas fazendo linhas de escoamento sob medida com capacidade

suficiente para evitar perdas excessivas de pressão. Entretanto, este ponto deve ser questionado para linhas de gás pressurizadas, pois os gases comprimidos apresentam uma difusividade térmica similar à dos líquidos e completamente diferente à dos gases na pressão atmosférica.

Campo (2002) desenvolveu um modelo iterativo simples para determinar a espessura de isolamento em tubulações perdendo calor para o ambiente, considerando tanto convecção natural quanto forçada.

Taxy e Lebreton (2004) utilizaram o código comercial *Fluent* para avaliar o desempenho do isolamento de *risers* do tipo *PIP* e para extrapolar os resultados dos testes de laboratório para *risers* com dimensões reais. De acordo com os autores, a convecção natural dentro do espaço do isolamento induziu altas taxas de transferência de calor.

Janoff et al (2004) analisaram o tempo de resfriamento em linhas submarinas e discutiram sobre o projeto do isolamento das tubulações. Jackson et al. (2005) analisou o projeto de isolamento térmico para sistemas submarinos, destacando a influência da adição de água nas camadas de isolamento, assim como sua compressão após 20 anos de operação, o que afeta suas propriedades.

Osiadacz e Chaczykowski, (2001), estudaram um modelo unidimensional para escoamentos em gasodutos para os casos isotérmicos e não isotérmicos. No caso não isotérmico, a temperatura do gás é função da distância e é calculada utilizando um modelo matemático que inclui a equação de energia. Diferentes modelos foram utilizados e comparados. Os autores concluíram que o resfriamento do gás melhora a eficiência de todo o processo de compressão e que existe uma diferença significativa no perfil de pressão ao longo do duto entre o processo isotérmico e não isotérmico. Essa diferença aumenta, quando a quantidade de gás aumenta.

O comportamento térmico no reinício de uma operação em águas profundas foi analisado por Golczynski et al. (2004). O tempo para aquecer o fluido para temperaturas acima da temperatura de formação de hidratos em longas tubulações, em cenários isolados, pode ser significativamente elevado.

Utilizando um modelo unidimensional na direção radial, as perdas de calor através de um duto submarino foram determinadas resolvendo as equações de condução de calor em regime transiente após a parada do bombeamento do fluido por Barrera et al. (2005).

Barrera et al. (2006a e 2006b) analisaram a influência da capacidade térmica da parede da tubulação no comportamento transiente de linhas submarinas altamente isoladas, para líquidos e gases, respectivamente. Diferentes parâmetros foram utilizados para representar isolamentos térmicos antigos e atuais. O interesse principal do trabalho é ressaltar a importância da energia armazenada nas camadas do duto. As soluções obtidas com os modelos desenvolvidos nesse trabalho, foram comparadas com os softwares comerciais *OLGA* (Scanpower, 2000), e *Pipeline Studio* (*TLNET* e *TGNET*).

2.2 Convecção

A transmissão de calor em dutos, normalmente inclui somente dois mecanismos de transferência de calor: Condução e Convecção.

Para dutos isolados, a condução refere-se ao fluxo de calor entre o produto quente e a região de mais baixa temperatura, ou seja, a água do mar circundando o duto, incluindo o revestimento, o material isolante, o duto portador e a terra (se o duto estiver enterrado). A condução está relacionada à transferência de calor no material isolante e através da parede do duto. A convecção está relacionada ao calor transferido pelo fluido à parede interior do duto, e/ou pelo movimento da corrente de água ao redor do duto portador. Na maioria dos casos, as perdas por radiação em dutos submarinos são desprezíveis comparadas com as perdas por condução e convecção.

Durante o bombeamento do produto a convecção forçada domina. Porém, com a interrupção do bombeamento, a convecção natural passa a dominar.

Mesmo sabendo da ocorrência dos transientes hidrodinâmicos e térmicos na tubulação, a hipótese de transferência de calor em regime permanente é uma boa hipótese a ser utilizada, na etapa de projeto da tubulação, em grande parte dos casos práticos de escoamento. Mas não são todos os problemas de escoamento e resfriamento que podem ser aproximados e resolvidos em regime permanente. Existem vários casos em que a transferência de calor deve ser tratada como transientes, por exemplo: parada de uma linha de produção, processos que envolvem rápidas expansões de gás, descargas de grandes golfadas passando por um *riser* e outros.

Diversos estudos podem ser encontrados na literatura analisando o fenômeno da convecção em geometria cilíndrica. Morcos e Bergles, (1975) apresentaram uma análise experimental considerando a combinação da convecção forçada e livre. Estudos de convecção mista (forçada e natural) na entrada de tubulações horizontais foram desenvolvidos por Hishida et al (1982). Shome e Jensen (1995) realizaram uma análise numérica da convecção mista e do fluxo de calor para escoamentos laminares em dutos circulares horizontais com viscosidade variável. Modelos de convecção natural, em regime permanente com diferentes condições de contorno, em geometria anular vertical e horizontal, têm sido vastamente analisados (Vasseur et al, 1983; Lin e Nansteel, 1987; Ho et al, 1990; Hosseini et al, 2004). Billir e Ate (2003) analisaram a transferência de calor conjugada em dutos com paredes espessas. Convecção mista também tem sido largamente analisada em geometrias cilíndricas, onde podemos citar Nieckele e Patankar, (1983), Ciampi et al, (1987); Kuan-Tzong e Wei-Mon (1996) e Habid e Negm, (2001), entre outros.

Youself e Tarsuk, (1982) estudaram os efeitos da convecção natural na convecção forçada em um tubo horizontal isotérmico, e correlacionaram a troca de calor na região de entrada do tubo horizontal de acordo com a influência da convecção natural. A região de entrada do tubo foi dividida em 3 regiões; região 1 perto da entrada onde a convecção natural é importante; região 2, um pouco mais distante da entrada onde a influência da convecção natural diminui e a convecção forçada torna-se dominante e região 3, longe da região de entrada do tubo, onde o Nusselt médio torna-se constante.

O estudo de convecção natural em geometria cilíndrica tem se concentrado na convecção externa, (Yamamoto e Shin, 2004).

Poucos são os trabalhos que analisam a transferência de calor por convecção no regime transiente. Takeuchi, e Cheng (1976) analisaram a convecção natural transiente, em cilindros horizontais com a temperatura diminuindo a taxa constante. Mahfouz (2003) apresentou uma análise da convecção natural externa transiente em tubulações horizontais. Su e Prasad (2003), desenvolveram uma metodologia experimental para avaliar o coeficiente de transferência de calor em trocadores de calor concêntricos em regime transiente.