

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

Segundo Hampton *et al.* (1996), os escorregamentos submarinos de massa possuem duas feições principais: superfície de ruptura e volume deslocado de solo ou rocha. Escorregamentos rotacionais acontecem em materiais mecanicamente homogêneos, sua superfície de ruptura é normalmente côncava e em forma de concha. Ocorrendo planos de fraqueza que controlam a ruptura, caracterizando um material heterogêneo, a superfície de ruptura é mais ou menos planar e o movimento é translacional. Escorregamentos ocorrendo de forma progressiva talude acima, através de várias superfícies adjacentes de ruptura, são chamados retrogressivos.

Mecanismos retrogressivos de escorregamento de massa podem causar problemas nas instalações localizadas a montante de um talude crítico em um campo submarino. Outras instalações, localizadas a jusante do talude, podem ser prejudicadas pelo impacto da massa deslocada.

Também é sabido que escorregamentos de massa submarinos já iniciaram tsunamis com efeitos devastadores em áreas costeiras adjacentes (Nowacki *et al.*, 2003). Isto porque normalmente os escorregamentos ocorrem em larga escala, mobilizando grandes volumes de material, podendo chegar a 20000 km³, como aconteceu na África do Sul (Dingle, 1977 *apud* Hampton *et al.*, 1996). Kvalstad *et al.* (2001) citam ainda que a extensão em área e os volumes envolvidos em um cenário de ruptura de talude submarino podem variar de escorregamentos locais ou deslocamentos lentos (*creep*) a enormes escorregamentos submarinos envolvendo milhares de metros cúbicos de massa de solo. A figura 2 relaciona a extensão em área com o número de casos de escorregamentos ocorridos na margem atlântica dos EUA, onde se pode notar predominância nos tamanhos entre 1 e 50 km². No Brasil, Figueiredo Jr. *et al.* (1993) pesquisaram a região de Cabo Frio (RJ) e, contrariando antigas

pesquisas na área, detectaram que cicatrizes de pequenos escorregamentos são as feições geológicas predominantes na região.

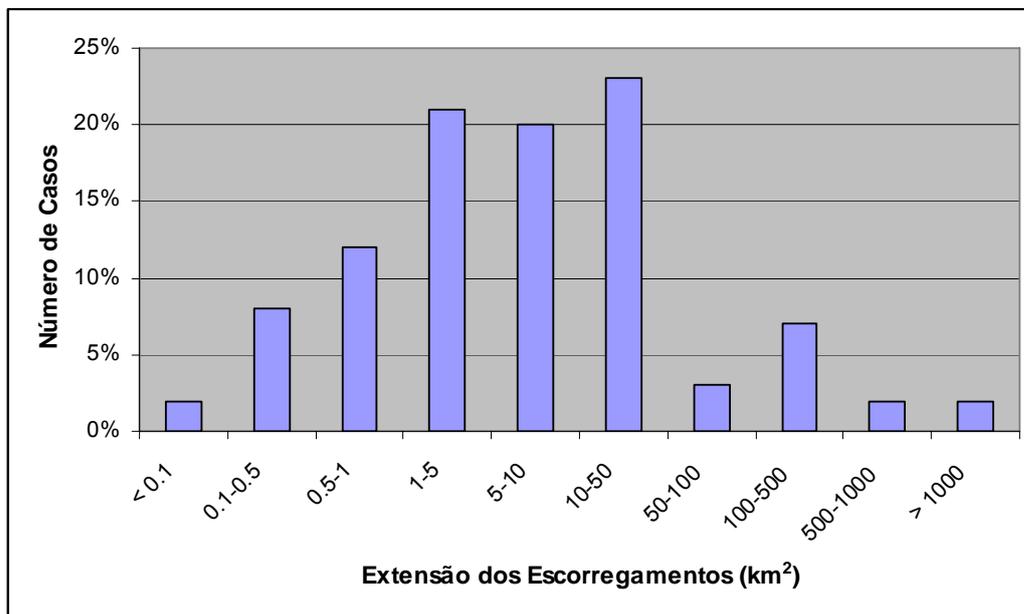


Figura 2 – Extensão em área versus número de casos de escorregamentos submarinos ocorridos na margem atlântica dos EUA (Lee, 2004)

Segundo Hampton *et al.* (1996) escorregamentos de massa são bastante comuns em cinco diferentes tipos de ambientes submarinos: fjords, deltas ativos de rios na margem continental, regiões de cânion, no talude continental e em ilhas oceânicas vulcânicas. A figura 3 totaliza o número de casos de escorregamentos ocorridos na margem atlântica dos Estados Unidos de acordo com o ambiente submarino.

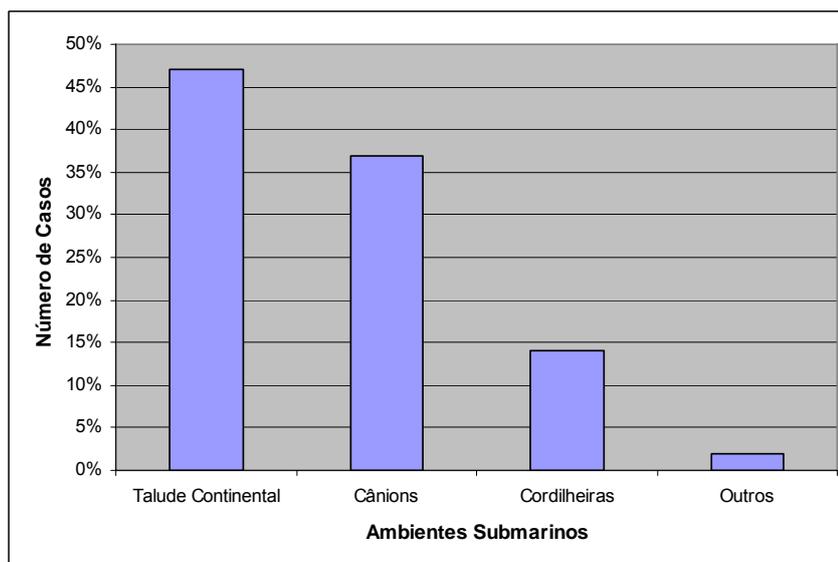


Figura 3 – Ocorrência de movimentos de massa em diferentes tipos de ambientes submarinos na margem atlântica dos EUA (Lee, 2004)

Como será visto adiante, a área de estudo do presente trabalho estende-se pelo talude continental da Bacia de Campos e atravessa um cânion, que, de acordo com a figura 3, são áreas bastante críticas no que diz respeito à ocorrência movimentos de massa submarinos, o que justifica a preocupação no assentamento do duto e outras facilidades na região e a necessidade do atual trabalho.

Grandes escorregamentos de massa foram observados em taludes de muito baixa inclinação (Kvalstad *et al.*, 2001). Isto pode ser observado a partir da figura 4, que mostra a distribuição de escorregamentos submarinos de acordo com a inclinação do talude. Um estudo baseado na teoria do talude infinito realizado por Costa *et al.* (2004) no talude de Marlim (Bacia de Campos) mostrou que os fatores de segurança estáticos diminuem consideravelmente com o aumento da poropressão e que a influência da poropressão no valor do fator de segurança é mais pronunciada em taludes de baixas inclinações.

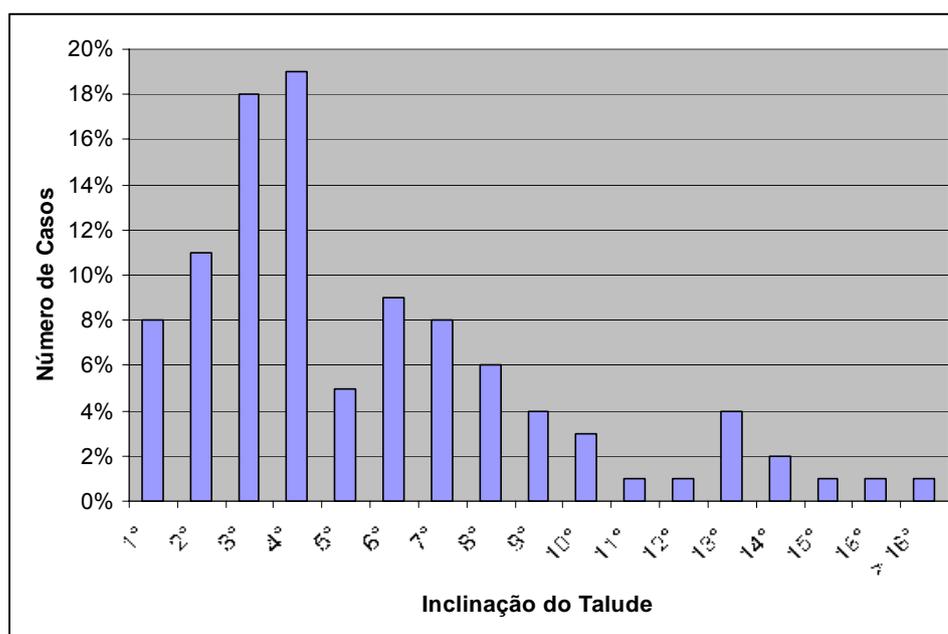


Figura 4 – Inclinação do talude *versus* número de casos de movimentos de massa ocorridos na margem atlântica dos EUA (Lee, 2004)

2.2. Fatores que Influenciam na Estabilidade do Fundo Marinho

Os deslizamentos submarinos são o resultado de uma interação complexa de vários fatores diferentes que atuam simultaneamente com intensidades e escala de tempo diferentes, de acordo com o ambiente geológico em que a área

está inserida. O ambiente geológico-tectônico-oceanográfico é o que regula a ação de cada fator que influencia na estabilidade do solo marinho e cria ou não uma instabilidade potencial no local.

Hampton *et al.* (1996) resumiram as causas de escorregamentos de taludes na tabela 1 que pode ser observada a seguir.

$$FS = \text{Forças resistentes} / \text{Forças atuantes}$$

Tabela 1 – Causas dos movimentos de massa submarinos (modificada de Hampton *et al.*, 1996).

Fatores que influenciam na redução na resistência ao cisalhamento do solo	Fatores que influenciam no aumento das tensões atuantes no talude
Terremotos	Terremotos
Carregamento por ondas	Carregamento por ondas
Mudanças de maré	Mudanças de maré
Intemperismo	Diapirismo ⁵
Sedimentação	Sedimentação
Gás	Erosão

Segundo Costa *et al.* (2004), taludes naturalmente estáveis podem tornar-se instáveis sob a ação de um ou mais mecanismos de diversas naturezas, tais como: mudanças na morfologia que alteram o equilíbrio de forças atuantes, como processos de erosão ou sedimentação; ação de forças externas como atividades sísmicas e efeitos de ondas; aumento da poropressão na massa de solo causado por carregamento ou deformação, diminuição das tensões efetivas devido ao aprisionamento de poropressão causado por variações no nível do mar e decréscimo progressivo da resistência ao cisalhamento do material tanto por intemperismo ou degradação quanto por acumulação de deformações devidas a processos de *creep* ou carregamentos cíclicos.

⁵ Diapirismo (geo) é a designação do processo de formação de diápiros. Diápiros são intrusões dômicas nas quais as camadas sedimentares são perfuradas por um núcleo ascendente de sal ou folhelho. (Fonte: "Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia", Sociedade Brasileira de Geofísica, Edição Preliminar, 1997).

Segundo Lee (2004), os escorregamentos de massa submarinos são iniciados pelo aumento das tensões atuantes, decréscimo da resistência do material ou pela combinação dos dois. Ele cita os seguintes mecanismos disparadores: acúmulo de sedimentação, erosão, terremotos, vulcões, ondas, presença de gás e hidratos de gás, percolação de fluidos, diapirismo e atividades humanas.

2.3. Trabalhos Anteriores

Desde que começaram as descobertas de campos petrolíferos na região do talude continental, diversos estudos têm sido desenvolvidos por especialistas do mundo inteiro com o intuito de compreender melhor as condições geológicas e geotécnicas e a dinâmica dos sedimentos submarinos nestas regiões. Instabilidades geologicamente recentes de taludes devem ser encaradas como um risco potencial para as facilidades de exploração e produção de óleo e gás.

2.3.1. Estudos Qualitativos

Muitos tipos de escorregamentos de taludes submarinos foram identificados no talude continental do Golfo do México. Alguns grandes movimentos se iniciam na quebra da plataforma continental e se estendem por grandes distâncias a jusante do talude (Hooper & Prior, 1989). Muitos destes escorregamentos foram provavelmente iniciados durante períodos de nível de mar baixo, quando sedimentos na borda da plataforma avançaram sobre a parte superior do talude (Suter & Berryhill, 1985, *apud* Hooper & Prior, 1989).

Em 1986, Campbell *et al.* estudaram o talude continental dos estados americanos do Texas e da Louisiana (a nordeste do Golfo do México) com o objetivo de avaliar as condições geológicas e geotécnicas do solo marinho para fins de projetos de fundações. Observou-se que algumas regiões apresentaram feições geológicas complexas, resultado de atividades diapíricas de sal, falhamentos, escorregamentos de massa e outros tipos de movimentos de sedimentos. Concluiu-se que a maioria dos movimentos em larga escala parecem ter acontecido em um passado geológico relativamente distante, porém a possibilidade de movimentos de massa em menores escalas foi questionada. Assim sendo, foram sugeridos levantamentos geofísicos e geotécnicos mais detalhados de forma que toda a região pudesse ser devidamente conhecida.

Estudos desenvolvidos por *Caddah et al.* (1998) e *Kowsmann et al.* (2002) também associaram a períodos de nível de mar baixo alguns depósitos de movimentos de massa e camadas de *debris flow* verificados no talude continental e em regiões de cânions da Bacia de Campos. No Platô de São Paulo foram observadas feições de movimentos de massa ocorridos durante períodos interglaciais, disparados pelo movimento de sal (diapirismo), que ainda é ativo nos dias atuais.

2.3.2. Estudos Quantitativos

Uma análise de estabilidade de taludes a nível regional foi realizada no Golfo do México por Hooper & Prior (1989). Nesta ocasião foram mapeados, além de feições como hidratos de gás e falhamentos, deslizamentos regionais translacionais rasos de solo em flancos de diápiros de sal e em blocos basculados⁶, e locais onde havia a ocorrência de gradientes mais íngremes do fundo marinho. Um dos deslizamentos envolvia a descida de sedimento sobre uma superfície de cisalhamento na base da camada, que coincidia com um plano estratigráfico próximo à superfície. Com base nas evidências reveladas pelas investigações geofísicas e geotécnicas, um método baseado no equilíbrio limite foi desenvolvido para se estimar as condições regionais de estabilidade de talude. Os parâmetros geotécnicos de resistência utilizados nas análises foram medidos *in situ* através de ensaios de palheta. A geometria rasa e alongada do movimento de massa do tipo translacional com controle na base (ou seja, sobre um plano estratigráfico bem definido) caracterizou um problema de estabilidade que pôde ser resolvido por equilíbrio limite, baseado ora na teoria do talude infinito, ora nos métodos do arco circular (Lambe & Whitman, 1969), dependendo da inclinação do talude. Ambas as análises foram realizadas para a região e desta forma foram encontrados valores de fatores de segurança que avaliaram as condições de estabilidade do local, apesar das limitações encontradas, tais como: variáveis geológicas e geotécnicas que não foram medidas com os métodos usados e dados de resistência do sedimento provenientes de um furo

⁶Bloco basculado (geo) consiste em bloco de falha que sofreu um movimento de rotação. (Fonte: “Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia”, Sociedade Brasileira de Geofísica, Edição Preliminar, 1997).

realizado a 5 km do local onde foram observadas as evidências dos deslizamentos.

Há ampla evidência histórica e geológica de que instabilidades de taludes geradas por terremotos são comuns no ambiente marinho. Sabe-se que tremores sísmicos são mecanismos disparadores de escorregamentos submarinos e causadores de ruptura em depósitos de sedimentos em várias regiões sísmicamente ativas. Baraza *et al.* (1992) fizeram um estudo preliminar de estabilidade do sedimento próximo à superfície do talude continental do Mar de Alboran, no Mediterrâneo, levando em conta a solitação dinâmica. Os resultados de vários ensaios geotécnicos *in situ* e de laboratório permitiram estimar a resistência do solo ao cisalhamento e a tensão cisalhante máxima estática ou dinâmica-induzida a que o sedimento poderia ser submetido sem romper. A análise de estabilidade sob carregamento estático mostrou que os sedimentos da região apresentavam baixa probabilidade de ruptura drenada sob carregamento gravitacional estático. Desta forma foram considerados estáveis. Já na análise sob carregamento dinâmico, o estudo mostrou que a probabilidade de ruptura de talude causada por um terremoto deveria ser considerada.

Um estudo parecido foi realizado por Ayres (1994) na região do delta submarino do Rio Amazonas. Em sua pesquisa foi verificado que os mecanismos disparadores de movimentos de massa variam de local para local. Foi realizada uma análise qualitativa de estabilidade através da superposição de todos os fatores e/ou mecanismos disparadores de movimentos de massa submarinos observados na região e o resultado foi a definição de duas áreas onde os fatores ocorrem com maior intensidade e onde um maior número de fatores ocorre concomitantemente. Na análise quantitativa, a metodologia adotada foi a de Booth *et al.* (1985). Foram realizadas ainda retroanálises, com o objetivo de avaliar qual aceleração horizontal gerada por um terremoto e qual altura mínima de onda poderia instabilizar as áreas. Ambos os resultados fizeram com que as áreas fossem consideradas estáveis.

Rizzo *et al.* (1994) estudaram movimentos de massa e fluxos gravitacionais nos campos de Marlim e Albacora na Bacia de Campos. Foram adquiridos dados geológicos, geotécnicos e sísmicos de alta resolução da porção mais rasa da coluna sedimentar de áreas do talude continental e foram verificadas feições de movimentos de massa sob a forma de cicatrizes (remoção

de sedimentos) ou pela presença de depósitos sedimentares, resultado de escorregamentos ou de fluxo de detritos. As feições de remoção de sedimentos foram identificadas a partir da análise dos perfis sísmicos de alta resolução, onde os refletores se apresentaram truncados ou através de mapa fisiográfico, pelas alterações nos contornos isobatimétricos. Estas feições puderam ser comprovadas através da aquisição de testemunhos geológicos, onde foi verificada a presença de discordâncias e ausência de biozonas, e de dados geotécnicos, através do perfil descontínuo de resistência não-drenada (S_u) versus profundidade, evidenciando ausência de seção. No estudo, uma relação bastante clara entre rebaixamentos do nível do mar e a iniciação de movimentos de massa foi estabelecida e como a situação atual é de mar alto e o tempo necessário para ocorrer uma mudança nesse cenário é em muito superior ao tempo de duração dos projetos de produção na Bacia de Campos, os autores concluíram que nos dias atuais não se esperaria a ocorrência de movimentos de massa em larga escala como os registrados na coluna sedimentar do talude de Marlim.

Outro estudo realizado no talude submarino do campo de Marlim foi realizado por *Costa et al.* (2004). Uma análise estática da estabilidade do talude através da teoria do talude infinito reiterou o estudo de *Rizzo et al.* (1994) mencionado acima. A influência do rebaixamento do nível do mar durante o último período glacial influenciou significativamente na ocorrência dos movimentos de massa observados nos sedimentos próximos à superfície do talude submarino da Bacia de Campos.

Um amplo estudo de estabilidade de taludes foi realizado no escarpamento de Sigsbee, junto aos campos de Mad Dog e Atlantis, no Golfo do México. *Nowacki et al.* (2003) propuseram uma análise determinística de estabilidade de taludes com o objetivo de melhor estimar um fator de segurança, estabelecer resultados de referência para análises probabilísticas (serão comentadas adiante) e para, em combinação com as análises probabilísticas, fornecer um melhor entendimento de como o fator de segurança aumenta à medida que a superfície de cisalhamento se afasta da borda do escarpamento. Foram realizadas análises drenadas e não-drenadas que indicaram taludes relativamente estáveis, a não ser que um mecanismo disparador venha rompê-los. Porém o estudo não avaliou de que forma o solo poderá se comportar dependendo do mecanismo disparador, não estabelecendo qual das análises,

drenada ou não-drenada, fornece o fator de segurança mais apropriado em cada caso.

Na análise probabilística, também realizada no Golfo do México, proposta por Nadim *et al.* (2003), foi estabelecido um modelo de frequência de escorregamentos (isto é, a probabilidade anual de ruptura) para avaliar os riscos às facilidades submarinas. Estes autores defendem que a análise probabilística oferece maior precisão pois o problema é conduzido de forma a lidar com as imprecisões, comuns em análises determinísticas, onde muitos parâmetros de resistência do solo são incertos, fazendo com que os engenheiros utilizem valores conservativos. Foram definidos fatores de sensibilidade que quantificam a contribuição de cada variável aleatória na análise global da estabilidade. O estudo mostrou uma grande relação entre altas taxas de sedimentação e escorregamentos rasos de massas de solo.

Uma pesquisa foi desenvolvida por Bohannon & Gardner (2004) no Escarpamento de San Pedro, a sudoeste da cidade de Long Beach (Califórnia) onde feições morfológicas típicas de grandes escorregamentos submarinos foram detectadas, com o objetivo de se avaliar a provável ocorrência de tsunamis. As cicatrizes de escorregamentos e os depósitos de detritos mapeados e estudados constituem amplas evidências de que a região foi fonte de pequenas e grandes rupturas de taludes submarinos. Não se tem certeza de que os escorregamentos resultaram realmente em tsunamis, mas as suas escalas são tais que permitiriam tais eventos. Uma razão teórica para tal afirmação foi obtida através de formulações onde a energia potencial da massa de solo é transformada em energia cinética uma vez detonado o movimento. A altura de onda estimada foi de 12 metros mas os cálculos não levaram em consideração a atenuação de acordo com a distância da fonte.

Biscontin *et al.* (2004) utilizaram elementos finitos para analisar o comportamento de taludes submarinos (depósitos de argila mole) quando dinamicamente solicitados (variação das relações tensão-deformação-resistência assim como geração de poropressão). Concluíram que além de gerar um excesso de poropressão significativa para instabilizar um talude submarino durante o evento, um carregamento dinâmico pode também influenciar a sua estabilidade após ocorrido, devido à redistribuição/processo de dissipação da poropressão no perfil de solo.

Silva *et al.* (2004) apresentaram uma metodologia de investigação de instabilidades de taludes submarinos baseada na integração de ferramentas e métodos geofísicos e geotécnicos, além de avançadas técnicas de datação de sedimentos e aplicaram-na em uma área de estudo localizada no talude continental do Texas-Luisiana, Golfo do México. Os estudos mostraram a ocorrência de várias rupturas de taludes na bacia de Beaumont, localizada no centro da área de estudo. A altura destes taludes varia de 600 a 900 metros e há gradientes localizados superiores a 25°. Análises realizadas através de equilíbrio limite, utilizando-se a geometria conhecida dos taludes e os dados de resistência e densidade dos solos obtidos através de sondagens com um amostrador a pistão de grande diâmetro sugerem que vários taludes encontram-se em um estado de ruptura incipiente sob condições drenadas. Já na bacia de Calcasieu, localizada a noroeste da bacia de Beaumont, a presença de um sedimento holocênico e um pico de densidade foram detectados nas amostragens no talude superior (norte) mas não nas amostragens realizadas ao sul. Desta forma, o pico de densidade foi interpretado como material proveniente de uma deposição de material escorregado e a ausência do sedimento holocênico sugere que o evento ocorreu em um passado geológico recente (< 12600 anos AP).

2.4. Rotas de Dutos: Critérios de Escolha

O processo de seleção de uma rota de duto é bastante complexo e não deve ser realizado sem informações sobre a topografia e geotecnia marinha. A norma API RP 1111 (1999) sugere que estas informações sejam adquiridas em cartas, mapas, outras fontes de informações relevantes e através de levantamentos ambientais, batimétricos e hidrográficos de campo.

Segundo Tootill *et al.* (2004), os fatores envolvidos na escolha de uma rota podem ser divididos em duas categorias principais: primários e secundários. Os fatores primários incluem as locações de partida e chegada do duto e parâmetros de instalação que podem afetar a geometria do duto. Fatores secundários são: batimetria, características do fundo marinho, geologia de sub-superfície, riscos geológicos (taludes íngremes ou instáveis, materiais rígidos na superfície como arenitos de praia por exemplo e outras feições de fundo), questões biológicas e ambientais, além de riscos promovidos pela ação humana,

como estruturas já existentes instaladas na região (dutos, cabos, âncoras, etc) e regulamentos marítimos. Um último fator, não pertencente a nenhum dos dois grupos anteriores é o custo. Quanto menos extenso o duto, menos investimentos serão necessários. Desta forma, o grande desafio para os projetistas é definir uma rota curta porém em conformidade com os requerimentos impostos pelos fatores primários e secundários.

Palmer & King (2004) citam ainda mapas geológicos, cartas de pesca, fotografias aéreas e de satélite, consultas às autoridades de navegação e à marinha, entre outras fontes como forma de realizar um estudo preliminar das condições do local. Estes autores dividem os fatores que influenciam na seleção de uma rota em fatores físicos, de interação com outros usuários do fundo marinho, políticos e ambientais, e serão detalhados a seguir.

2.4.1. Fatores que Influenciam a Escolha de uma Rota

2.4.1.1. Fatores Físicos

Os fatores físicos estão relacionados às condições geológicas e geotécnicas do fundo marinho. Do ponto de vista do duto, o ideal seria que o mesmo fosse assentado em um solo nivelado e liso (de forma que não fossem formados vãos livres), e caracterizado como uma argila marinha média e estável, que permitisse seu assentamento e promovesse o aumento de sua estabilidade. Se o fundo marinho é irregular e rochoso, ocorrem muitos vãos livres (alguns longos o suficiente que necessitam de intervenções) e pontos onde há concentração de esforços que podem danificar seu revestimento externo. Por outro lado, se o solo é muito mole, o duto pode afundar, dificultando o alcance para fins de inspeção e reparos e outras operações como interligações com outras linhas.

Ondas de areia (*sandwaves*⁷) e outras pequenas feições onduladas devem ser evitadas sempre que possível pois estas estruturas movem-se significativamente durante a vida útil de um duto. Os movimentos são irregulares e difíceis de serem previstos. Nos casos onde se torna impossível evitar estes

⁷ Estruturas sedimentares de areia que evidenciam a ação de correntes de fundo. Podem chegar a 15 metros de altura e 100 metros de comprimento. (Fonte: Palmer & King, 2004).

tipos de feições ao longo de uma rota, a solução é cavar trincheiras até o nível mais baixo das ondulações antes do duto ser lançado.

Movimentos de massa também influenciam de forma significativa na escolha de uma rota. Um escorregamento ocorrendo transversalmente a uma linha pode gerar grandes movimentos na estrutura, podendo facilmente induzir tensões trativas suficientes para uma ruptura. Já um movimento longitudinal à linha é menos sério pois as tensões induzidas são menores.

Em mares tropicais, os corais formam montes no fundo marinho e picos que podem ter até 15 metros de altura. São estruturas resistentes e extremamente difíceis de serem escavadas. Além disso, elas não devem ser danificadas por questões ecológicas, fazendo com que sejam evitadas na diretriz de um duto.

Fatores hidrodinâmicos também devem ser levados em consideração em uma escolha de rota. É desejável que altas correntes de fundo sejam evitadas pois arrastam o duto lateralmente e complicam a sua instalação. Em águas rasas deve-se atentar para as correntes de maré. É preferível que estreitos não sejam cruzados mesmo que a solução seja uma rota mais longa, porém com correntes de fundo de menor intensidade.

É desejável ainda que áreas com a ocorrência de altas ondas sejam evitadas devido aos efeitos adversos na estabilidade do duto, que são mais severos em áreas de arrebentação.

2.4.1.2. Fatores de Interação com Outros Usuários do Fundo Marinho

A escolha de uma rota também deve levar em consideração os fatores relacionados aos diversos usuários do fundo marinho. É prudente manter oleodutos e gasodutos longe de plataformas (a não ser quando estes são conectados a elas), devido ao risco dos mesmos serem danificados pelo lançamento de objetos, pelo risco de serem atingidos por âncoras de navios de suporte e pela remota possibilidade de incêndio, explosão ou ruptura estrutural

que poderia a vir atingi-los. Os dutos devem evitar ainda as proximidades de cabeças de poços e manifolds⁸.

Dutos submarinos já existentes caracterizam um problema pois algumas vezes os cruzamentos entre linhas não podem ser evitados. Nestes casos, os cruzamentos devem ser cuidadosamente projetados de forma que um duto não danifique o outro, que não haja o comprometimento de seus sistemas de proteção catódica e que não gere altas tensões nas linhas.

Para minimizar o congestionamento do fundo marinho, usa-se, quando possível, agrupar os dutos ao longo de toda ou parte da extensão, formando corredores onde as linhas são dispostas próximas umas das outras (Carvalho, 2004, em comunicação pessoal).

O mesmo ocorre para cabos submarinos já existentes. A forma usual de cruzar um cabo é rompê-lo no ponto de cruzamento, lançar o duto, unir as partes e lançá-lo por cima do duto. Esta é uma operação cara e deve ser evitada.

Atividades militares utilizam o fundo marinho de diversas maneiras. Minas são lançadas em tempos de guerra e não são retiradas ou desativadas. Este é um grande problema no Mar do Norte e no Golfo Árábico. Por vezes, submarinos navegam muito próximos do fundo para se esconderem de sonares. Algumas áreas são usadas para artilharia e testes de explosões. Vários tipos de sensores magnéticos, elétricos e acústicos são lançados no fundo marinho, e são conectados por cabos.

Áreas de ancoragem de navios próximas a portos também são críticas. Além disso, em casos de naufrágios de navios, os danos aos dutos localizados na região do naufrágio podem ser grandes.

Algumas vezes os sedimentos marinhos são utilizados como jazidas de materiais (principalmente areia e pedregulho) quando as jazidas terrestres

⁸ *Manifold* consiste em um conjunto de tubos que compõem uma estrutura metálica que, através de válvulas e outros instrumentos, direcionam o fluxo e controlam a vazão das linhas conectadas, além de transmitir dados de pressão, temperatura e vazão dos fluidos e da formação. (Fonte: Gonçalves *et al.*, 2003).

escasseiam ou quando não podem ser exploradas devido às restrições ambientais. Os dutos não devem atravessar áreas utilizadas para estes fins.

O uso indiscriminado do solo marinho para lançamento de resíduos nucleares e outros tipos de materiais e objetos constituem um problema no lançamento de um duto.

2.4.1.3. Fatores Ambientais e Políticos

Cada vez mais atenção têm-se dado à questão ambiental. Além da ocorrência de corais em mares tropicais já comentados anteriormente, há ainda o perigo de danos para seres bentônicos e mamíferos marinhos. Em águas rasas, que são biologicamente produtivas, qualquer dano a um duto pode comprometer bactérias, plânctons, plantas, invertebrados, peixes, pássaros e mamíferos marinhos.

Por fim, fatores políticos tais como fronteiras entre países, diferentes regulamentos e organizações políticas e diferentes exploradores de campos em uma determinada bacia devem ser considerados.

2.4.2. Estudos de Caso

Um estudo integrado para avaliação dos riscos geológicos foi realizado em 1990, por Campbell *et al.* para avaliação dos riscos associados às condições complexas do fundo marinho ao longo das rotas dos dutos de Jolliet, no Golfo do México. Foram necessários vários levantamentos geofísicos e geotécnicos para que as condições do local fossem adequadamente definidas e rotas aceitáveis fossem encontradas. Um primeiro levantamento geofísico foi realizado para que as diretrizes preliminares dos dutos fossem traçadas. Novamente foram adquiridos dados geofísicos, desta vez para fornecer mais informações sobre o alinhamento proposto para os dutos, especialmente nas áreas que apresentavam taludes íngremes e relevo acidentado. Foram mapeadas então inúmeras escarpas em falha de grandes dimensões, regiões cujo fundo marinho se apresentava rochoso e irregular, possíveis feições de escorregamento de solo, além de camadas de hidratos de gás e evidências de erosão do fundo marinho. Com estas informações, foi realizada ainda uma análise que detectou vãos livres inaceitáveis. Devido a estas condições, a diretrizes propostas

originalmente para os dutos tiveram que ser revistas, fazendo com que um dos dutos tivesse seu comprimento aumentado, e com que o outro atravessasse a região cujo fundo era rochoso e irregular, pois esta se apresentou a melhor solução. O estudo mostrou que rotas simples e retas, conectando dois pontos, são, na maioria das vezes, inviáveis. Para confirmar as condições do terreno, investigações geotécnicas foram realizadas com um amostrador do tipo pistão e as suas locações foram baseadas na interpretação dos dados geofísicos interpretados a bordo da embarcação que fez os levantamentos. Os furos não foram feitos em intervalos constantes e nem estritamente ao longo da rota dos dutos, mas em locais onde foram percebidas feições geológicas de potencial significativo para os projetos de engenharia dos dutos. As áreas do talude onde foram mapeados possíveis escorregamentos de solo possuíam gradientes locais de mais de 20°, associados ao soerguimento dos diápiros de sal. O estudo sugeriu que alguns escorregamentos e falhamentos podem ter ocorrido na região em um passado recente, porém as informações disponíveis não foram suficientes para que uma análise quantitativa da estabilidade do fundo marinho naquela ocasião fosse determinada.

Em estudo de caso realizado no Golfo do México, para o Sistema de Transporte de Mardi Gras, Tootill *et al.* (2004) identificaram, através de levantamento geofísico de alta resolução realizado com o AUV⁹, alguns fatores que vieram a influenciar na escolha das rotas dos dutos. Em se tratando de fatores secundários, nos casos em que os cruzamentos entre linhas não puderam ser evitados, as novas linhas cruzaram as antigas em um ângulo mais próximo de 90° possível para reduzir o número de colchões de suporte e para minimizar os esforços no *touch down point*¹⁰ durante o lançamento. Corais de águas profundas foram evitados pois no Golfo do México eles são protegidos e as linhas devem ser lançadas a uma distância de no mínimo 75 metros destas comunidades biológicas. Taludes íngremes e possivelmente instáveis também foram evitados assim como áreas com possibilidade de serem afetadas pela

⁹ Autonomous Underwater Vehicle (AUV) é um sistema de aquisição de dados geofísicos não rebocado, capaz de operar em profundidades de água de até 3000 metros, em uma velocidade de 4 nós durante 48 horas até retornar à superfície para descarregar as informações levantadas e para manutenção. (Fonte: Tootill *et al.*, 2004).

¹⁰ Touch down point (TDP) trata-se do ponto de contato da linha com o fundo do mar durante o lançamento. (Fonte: Gonçalves *et al.*, 2003).

deposição de materiais provenientes de escorregamentos de massa. Modelos foram usados para calcular distâncias seguras da base de taludes para a passagem dos dutos. Entretanto, as rotas selecionadas não puderam evitar áreas com topografia de fundo extremamente severa em duas localidades no Green Cânion. Quando evidências de rupturas antigas de taludes nas áreas a serem atravessadas foram verificadas, datações dos sedimentos ajudaram a determinar quantitativamente a frequência de ocorrência desses eventos. As correntes de fundo também influenciaram na escolha de uma rota. Os *risers*¹¹ foram orientados na mesma direção das correntes, para evitar fadiga.

¹¹ Riser é o duto de interligação de uma unidade de produção a um duto submarino ou a uma linha de fluxo. (Fonte: Gonçalves *et al.*, 2003).