

# 1 Introdução

Fluidos são constantemente transportados do solo marinho para estruturas flutuantes (e.g., *FPSO* e plataformas) por intermédio de dutos rígidos de 0,1 a 1,5 m de diâmetro, compostos de aço revestido interna e externamente, denominados de *SCRs* (*steel catenary risers*). No leito marinho, dutos usados para o transporte de produtos offshore são frequentemente colocados em trincheiras ou enterrados in situ para a proteção de possíveis danos mecânicos e isolamento termal.

Com o avanço da exploração *offshore*, a natureza e tecnologia de infraestrutura de redes de dutos em águas profundas vêm sendo modificada para adaptar-se a profundidades cada vez maiores e mais afastadas da superfície terrestre (e.g., *deep water* e *ultra deep water* são termos geralmente usados para referir-se a profundidades ao redor de 500 m e 1500 m respectivamente). Estas tendências têm levado à instalação de maiores comprimentos de dutos e redes complexas em águas profundas onde a técnica de enterramento torna-se inviável, de modo que usualmente opta-se por colocar os dutos diretamente no leito marinho. Dutos colocados desta forma são denominados *on-bottom pipelines*.

Dutos compridos são frequentemente colocados diretamente na superfície do solo marinho. A exceção de dutos auxiliares relativamente curtos, *on-bottom pipelines* são raramente colocados ao longo de trajetórias retas, ficando conseqüentemente susceptíveis à ocorrência de flambagem. Por outro lado, em funcionamento, repetidos ciclos de operação combinados com a expansão termal causada pelo aquecimento dos produtos transportados podem levar ao duto auto enterrar-se experimentando um aumento de resistência e das condições de restrição.

Areias calcárias são encontradas em muitas regiões petrolíferas no mundo, incluindo o *offshore* do Brasil. A complexa interação solo-duto para o caso de areias calcárias é o tema de maior desafio na análise da estabilidade de dutos *on-bottom*.

No caso de fluidos, que são tecnicamente não compressíveis, repetidos ciclos de operação produzem incrementos de pressão e temperatura. Forças compressivas, provenientes da transferência de calor dos fluidos às paredes interiores do duto,

ocasionam flambagem, uma resposta estrutural que é fortemente influenciada pela resistência do solo ao redor.

A modelagem centrífuga tem se mostrado uma ferramenta de pesquisa confiável que ajuda a esclarecer o comportamento geotécnico de uma ampla variedade de problemas de interação solo-duto. Este entendimento pode ser usado para desenvolver metodologias de desenho simplificado ou para validar previsões obtidas por meio de métodos numéricos.

### **1.1. Motivação e objetivos**

O estudo do comprometimento da integridade do duto no solo marinho frente à ação hidrodinâmica de ondas e correntes, deslizamentos submarinos e *debris flows* torna-se cada vez mais relevante e importante economicamente. É importante ter conhecimento da relação dos movimentos laterais, axiais e de enterramento do duto com sua integridade e servicibilidade (Randolph e Gourvenec, 2011).

Esta pesquisa foi desenvolvida em parceria com as instituições TECHNIP, FINEP e COPPE/UFRJ tendo como principal objetivo a realização de uma campanha de ensaios de modelagem física em Centrífuga Geotécnica da interação solo-*riser*.

O presente estudo teve como objetivo principal abordar a análise da movimentação axial e lateral de dutos assentes em leito marinho arenoso por meio de modelagem centrífuga. Pretendeu-se analisar a resposta do solo ante a movimentação do duto em termos de mobilização das resistências pico (*breakout*), da evolução das forças resistentes durante a formação das bermas, e das trajetórias de forças vertical-lateral/axial combinadas que definem uma possível envoltória de fluência.

### **1.2. Estrutura da dissertação**

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo essa introdução como capítulo 1, referências bibliográficas.

O capítulo 2 apresenta os conceitos básicos, relações fundamentais e teorias interpretativas descrevendo qualitativamente os mecanismos envolvidos na

interação solo-duto. Abordam-se modelos de predição da resposta do solo ante a movimentação de dutos.

O capítulo 3 descreve o planejamento, procedimento e metodologias seguidos para a elaboração dos modelos em escala para os ensaios centrífugos. Apresentam-se também os equipamento e materiais utilizados.

O capítulo 4 é dedicado à apresentação e análise dos ensaios de caracterização do solo e ensaios preliminares. Também são analisados os perfis de resistência obtidos em voo na prévia atuação do duto, dos ensaios de deslocamento lateral cíclico.

O capítulo 5 está voltado para a apresentação e análise dos ensaios de deslocamento lateral cíclico, abrangendo porcentagens de enterramento do duto de 25%, 50% e 75% (w/D). Ao final, apresenta-se uma análise geral dos ensaios laterais.

O capítulo 6 está voltado para a descrição e análise dos resultados obtidos nos ensaios de deslocamento axial cíclico. Apresentando-se no final, também, uma análise geral dos resultados dos ensaios axiais.

Finalmente no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros, seguidas das referências bibliográficas.