

ANÁLISE DO AFUNDAMENTO DE CONDUTAS SUBMARINAS ATRAVÉS DO MÉTODO DE IMERSÃO PROGRESSIVA

Tiago Vasques – Mestre em Engenharia Civil.

Alfredo Afonso – Etermar – Engenharia e Construção, S.A.

António Trigo Teixeira – CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal.

1. Resumo

A instalação de condutas submarinas é uma operação delicada, no domínio da engenharia hidráulica marítima, que ganha importância devido às crescentes necessidades energéticas e preocupações ambientais das sociedades modernas. As condutas submarinas destinam-se à rejeição de efluentes urbanos/industriais, à captação de água para estações de dessalinização e centrais termoeléctricas e à exploração de poços de petróleo e gás offshore.

Os métodos de instalação utilizados (S-Lay, J-Lay, Imersão Progressiva, entre outros) introduzem curvaturas de flexão, devido às configurações adquiridas pela conduta durante a operação, que se não acauteladas conduzem ao colapso da estrutura cujo estado limite é \emptyset por buckling. De modo a reduzir as curvaturas de flexão e consequentemente evitar o buckling, é indispensável traccionar a conduta durante a sua imersão.

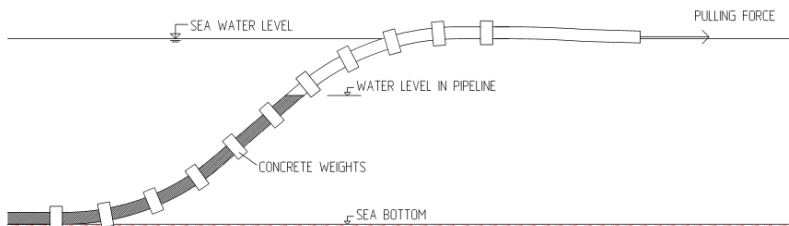


Figura 1 - Esquema do Método de Imersão Progressiva (Pipelife.2011)

O estudo desenvolvido foca-se no fenómeno de buckling e no cálculo da força de tracção necessária à manutenção da integridade estrutural da conduta submarina segundo dois modelos de cálculo analíticos (The Theory of Pure Bending e Chain Link Theory) que não consideram grandezas dinâmicas (ondulação, corrente e vento) e um modelo de cálculo numérico (Orcaflex) que as tem em conta.

O presente estudo foi desenvolvido com a colaboração da empresa Etermar – Engenharia e Construção, S.A. presentemente a construir o Emissário Submarino de Raoued – Tunis, projecto este que serviu como caso de estudo.

A comparação entre os modelos analíticos e o modelo numérico permite concluir que os primeiros fornecem estimativas bastante conservadoras, uma vez que sob as mesmas condições de forçamento produzem um resultado onze vezes superior ao do modelo numérico. Adicionalmente, a comparação entre os resultados do Orcaflex evidencia a importância da consideração das grandezas dinâmicas durante o cálculo da força de tracção, uma vez que os valores obtidos variam entre as 5t e as 15t em função da intensidade e da direcção da ondulação, da corrente e do vento.

O estudo desenvolvido tem por objectivo melhorar as condições de segurança estrutural da operação durante a imersão da conduta.

2. Introdução

O crescimento da população mundial e o aumento das necessidades energéticas conduziram, nas últimas décadas, à instalação de inúmeras condutas submarinas destinadas à rejeição de efluentes urbanos e/ou industriais, à captação de água para estações de dessalinização e centrais termoeléctricas e à exploração de poços de petróleo e gás offshore.

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos diversos métodos de instalação de condutas submarinas (S-lay, J-lay, Imersão Progressiva, entre outros) cujos campos de aplicação são função do equipamento disponível, do seu material constituinte (Polietileno de Alta Densidade ou Aço) e da profundidade de instalação.

Os métodos de instalação desenvolvidos introduzem curvaturas de flexão, devido às configurações adquiridas pela conduta durante o afundamento, que se não acauteladas conduzem à perda de estabilidade da estrutura. O fenómeno de instabilidade da conduta, associado às curvaturas de flexão introduzidas durante o afundamento, é denominado por buckling e o mesmo expressa-se através da ovalização da sua secção transversal.

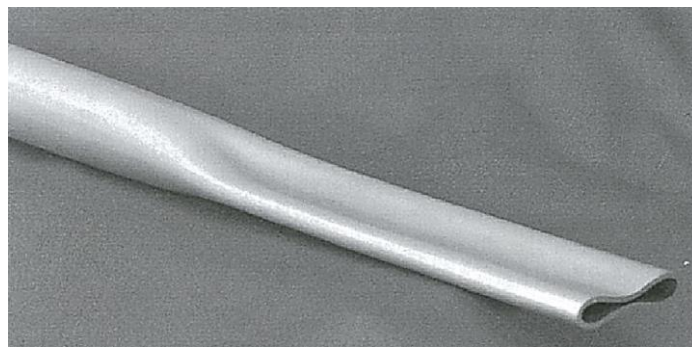


Figura 2 – Ovalização da secção transversal da conduta devido às curvaturas de flexão (Kyriakides, S & Corona, E. 2007.)

De modo a reduzir as curvaturas de flexão introduzidas durante a instalação e consequentemente assegurar a estabilidade da conduta (evitando o fenómeno de buckling), as empresas constructoras traccionam a conduta.

O presente estudo foi desenvolvido com a colaboração da empresa Etermar – Engenharia e Construção, S.A. Trata-se de uma empresa com uma vasta experiência na área das obras marítimas, nomeadamente no afundamento de condutas submarinas através do método de instalação por Imersão Progressiva. Teve uma acção pioneira na instalação de emissários submarinos em Portugal na década de 80 e desde então expandiu a sua actividade a países como Marrocos, Argélia, Guiné Equatorial, Malta, República Dominicana e Tunísia.

O presente estudo foi desenvolvido no âmbito do Emissário Submarino de Tunes, projecto este que a Etermar – Engenharia e Construção, S.A se encontra a realizar na Tunísia.

O estudo desenvolvido tem por objectivos analisar a instalação de condutas submarinas, nomeadamente o fenómeno de buckling, na sua vertente teórica e determinar a força de tracção necessária à instalação do Emissário Submarino de Tunes segundo três modelos de cálculo, dois analíticos que não consideram as acções ambientais (ondulação, corrente e vento), devido à dificuldade em desenvolver soluções analíticas de um fenómeno (buckling) não linear onde intervêm inúmeras variáveis, e um numérico que as considera. Posteriormente, a comparação dos resultados obtidos pelos modelos de cálculo analíticos (The Theory of Pure Bending e Chain Link Theory) com os resultados obtidos pelo modelo de cálculo numérico (Orcaflex) permite avaliar a importância das acções ambientais no cálculo da força de tracção e avaliar o resultado dos três modelos.

3. Métodos de instalação de condutas submarinas

A instalação de condutas submarinas é uma operação marítima delicada e desafiante do ponto de vista da engenharia hidráulica marítima e estrutural.

No que respeita à vida útil das condutas submarinas, a fase de construção / instalação é a fase crítica e de maiores incertezas relativamente à sua segurança estrutural. Durante o afundamento, as condutas são solicitadas estruturalmente devido às curvaturas de flexão impostas pelos métodos de instalação utilizados.

Naturalmente, as curvaturas impostas encontram-se limitadas a um determinado valor, abaixo do qual as condutas flectem sem que a sua integridade estrutural seja comprometida. Assim sendo, os elementos constituintes dos diversos métodos de instalação devem ser dimensionados de modo a que o limite admissível não seja excedido.

Os métodos de instalação de condutas submarinas com particular interesse para a compreensão do estudo desenvolvido são os seguintes:

- Método de instalação S-lay;
- Método de instalação J-lay;
- Método de instalação por Imersão Progressiva;

Os métodos S-lay e J-lay são frequentemente utilizados em instalações offshore e destinam-se à instalação de condutas em aço.

O método por Imersão Progressiva é utilizado pela empresa Etermar – Engenharia e Construção, S.A e destina-se à instalação de condutas em PEAD.

3.1. Método de instalação S-lay

O método de instalação S-lay deve a sua denominação à configuração que a conduta assume durante a operação de afundamento, configuração em “S”, Figura 3.

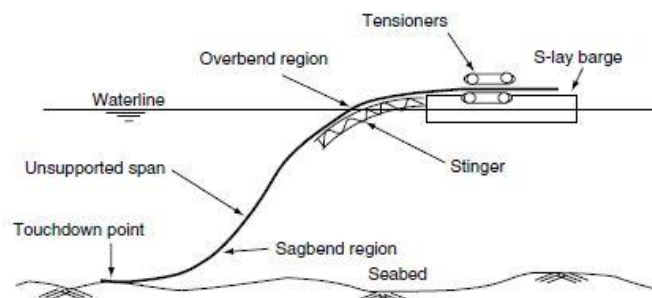


Figura 3 – Configuração em “S” (Bai, Y & Bai, Q. 2005.)

A instalação segundo este método é auxiliada por um conjunto de equipamentos e uma embarcação especializada denominada embarcação S-lay (S-lay barge).

Troços de conduta, previamente armazenados a bordo da embarcação S-lay, são soldados na estação de montagem e conduzidos às máquinas tensoras onde é aplicada a força de tracção necessária à manutenção da integridade estrutural da tubagem.

Assim que a força de tracção é aplicada, a conduta penetra a superfície livre apoiada pelo stinger, estrutura curvilínea onde é disposto um conjunto de rolamentos sobre os quais a tubagem desliza, na popa da embarcação S-lay.

A configuração em “S” que a conduta assume durante o afundamento é passível de ser dividida em duas regiões: overbend e sagbend. A overbend é a parte superior da configuração

compreendida entre as máquinas tensoras e o ponto de inflexão, ponto no qual a conduta inverte o sentido da sua curvatura. A sagbend é a parte inferior da configuração compreendida entre o ponto de inflexão e o ponto de contacto com o fundo marinho.

O controlo das curvaturas de flexão, e consequentemente dos esforços de flexão, é assegurado pela força de tracção aplicada, Figura 4. O seu aumento suaviza a configuração do “S” e reduz as curvaturas impostas.

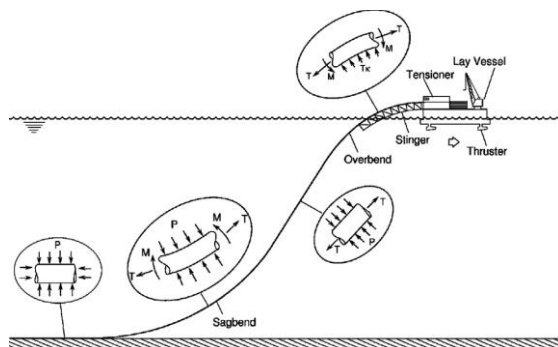


Figura 4 – Esquema dos esforços gerados pela configuração em “S” (Kyriakides, S & Corona, E. 2007.)

3.2. Método de instalação J-lay

O método de instalação J-lay também deve a sua denominação à configuração que a conduta assume durante a operação de afundamento, configuração em “J”, Figura 5.

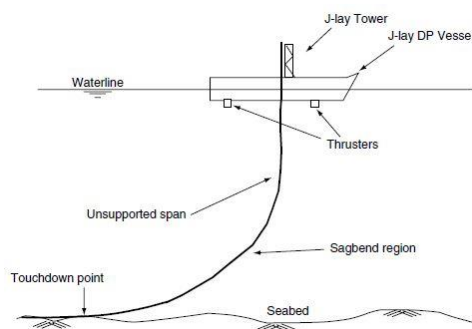


Figura 5 - Configuração em “J” (Bai, Y & Bai, Q. 2005.)

A operação segundo o presente método é apoiada por um conjunto de equipamentos e uma embarcação especializada denominada embarcação J-lay (J-lay DP Vessel). Os troços de conduta são soldados verticalmente na J-lay Tower e conduzidos às máquinas tensoras onde é aplicada a força de tracção.

Assim que a força de tracção é aplicada, a conduta penetra a superfície livre sobre os rolamentos do stinger vertical.

A configuração em “J” assumida durante o afundamento não é passível de ser dividida em duas regiões como a configuração em “S”. A overbend é extinta devido à posição sobre a qual a conduta penetra a superfície livre, posição vertical, e a sagbend é a única região identificável.

O controlo das curvaturas de flexão é assegurado pela força de tracção aplicada, Figura 6. O seu aumento suaviza a configuração do “J” e reduz as curvaturas impostas.

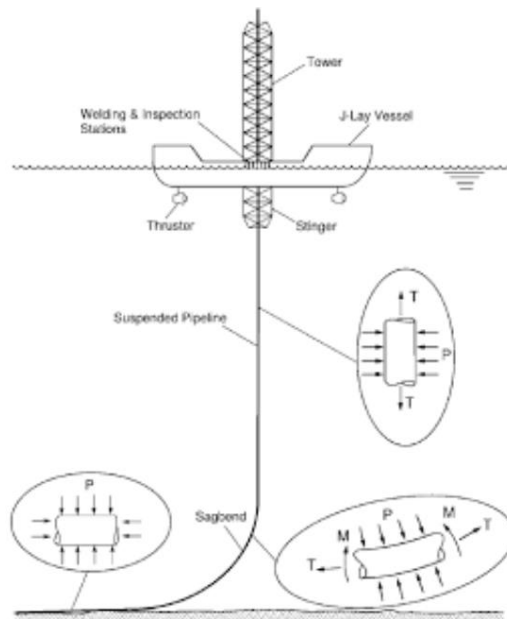


Figura 6 - Esquema dos esforços gerados pela configuração em "J" (Kyriakides, S & Corona, E. 2007.)

3.3. Método de instalação por Imersão Progressiva

O método de instalação por Imersão Progressiva é o método utilizado pela Etermar – Engenharia e Construção, S.A e destina-se à imersão de condutas em PEAD. A densidade do material constituinte, inferior à unidade, obriga à instalação de blocos de lastro que viabilizam o afundamento da tubagem.

O presente método caracteriza-se pela configuração em "S" assumida pela conduta durante a sua imersão, tal como o método S-lay. No entanto, a força de tracção é aplicada por um rebocador a uma extremidade da tubagem e equilibrada por um sistema de ancoragem (blocos de betão e cabos de amarração) ligado à outra, Figura 7.

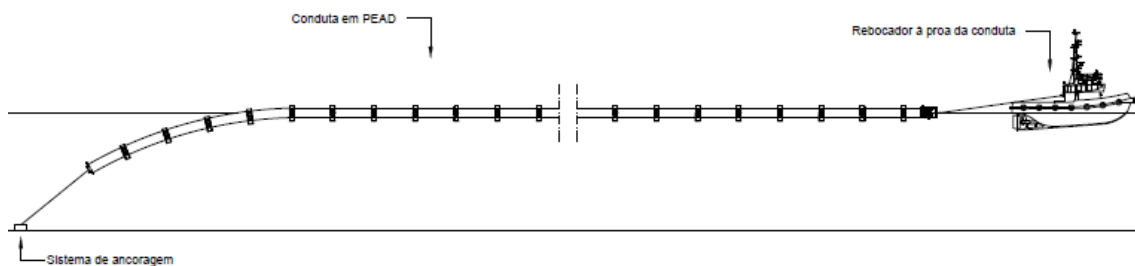


Figura 7 – Esquema de imersão da conduta segundo o método por Imersão Progressiva

Assim que a força de tracção é aplicada, abrem-se as válvulas de entrada de água, na extremidade ligada ao sistema de ancoragem, e de saída de ar, na extremidade tracionada pelo rebocador, de modo a imergir a tubagem sob a configuração em "S" passível de ser dividida nas regiões overbend e sagbend.

Tal como nos métodos anteriores, o controlo das curvaturas de flexão é assegurado pela força de tracção. O seu aumento suaviza a configuração do “S” e reduz as curvaturas impostas.

4. Buckling

Durante a instalação de condutas submarinas, a interacção entre a força de tracção e as curvaturas de flexão controla a estabilidade da estrutura cujo estado limite é denominado por buckling. O buckling representa, genericamente, a perda progressiva de rigidez e expressa-se através da ovalização da secção transversal da tubagem, Figura 2.

Na overbend (parte superior da configuração em “S”) a estabilidade da conduta é controlada pela interacção entre as curvaturas de flexão (esforços de flexão) e a força de tracção aplicada. Na sagbend (parte inferior da configuração em “S”) a estabilidade da estrutura é controlada pelas curvaturas de flexão (esforços de flexão), uma vez que a força de tracção é negligenciável.

4.1. Buckling - Flexão

Os esforços de flexão, devidos às curvaturas impostas, constituem a principal solicitação durante a instalação de condutas submarinas.

A flexão ovaliza a secção transversal da tubagem, Figura 8, e esta estimula a perda de rigidez da estrutura conduzindo-a ao colapso.

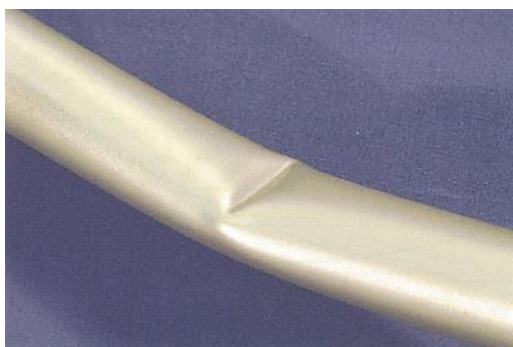


Figura 8 – Ovalização da secção transversal da conduta devida aos esforços de flexão (Kyriakides, S & Corona, E. 2007.)

Estudos experimentais desenvolvidos, (Kyriakides, S & Ju, G.1992.), avaliam a relação entre a ovalização inicial (ovalização da conduta para solicitações nulas), $\Delta\emptyset$, e o colapso da estrutura em função dos esforços de flexão.

Os resultados obtidos, Figura 9, permitem concluir que os momentos flectores de colapso são inferiores ao plástico uma vez que a ovalização inicial estimula o desenvolvimento de ovalizações superiores e estas reduzem a rigidez de flexão da conduta.

Assim que o momento actuante se aproxima do de colapso, a estrutura instabiliza e propaga a ovalização longitudinalmente (passagem da instabilidade local para a instabilidade global). A instabilidade inicia-se nas fibras longitudinais comprimidas e expressa-se através de rugas, Figura 10.

A Figura 9 permite perceber que a ovalização é constante ao longo do comprimento da conduta ensaiada, $2L$, até um determinado valor da curvatura de flexão. Curvaturas superiores

impõem ovalizações consideráveis, no centro da tubagem, indicando elevadas perdas de rigidez.

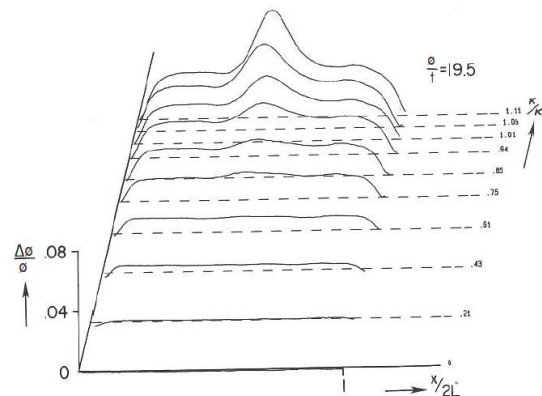


Figura 9 – Resultados dos ensaios desenvolvidos a uma conduta de SDR 19,5, Flexão (Kyriakides, S & Corona, E. 2007.)

Em que:

- x – Coordenada longitudinal da conduta;
- χ – Curvatura de flexão;
- χ_1 – Curvatura de flexão de referência que adimensionaliza a curvatura de flexão;

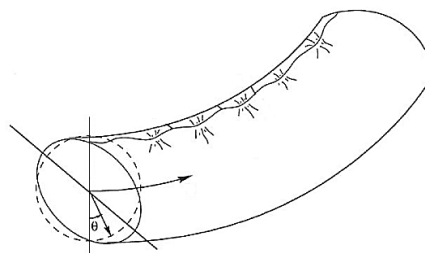


Figura 10 – Rugas longitudinais nas fibras comprimidas (Kyriakides, S & Corona, E. 2007.)

4.2. Buckling – Flexão e Tracção

Tal como referido anteriormente, a interacção entre os esforços de flexão e a força de tracção controla a estabilidade da conduta na overbend.

A força de tracção tem por objectivo reduzir as curvaturas de flexão impostas durante a instalação de condutas submarinas e consequentemente evitar a ocorrência de buckling. No entanto, a mesma introduz esforços de tracção que têm de ser considerados.

Estudos experimentais desenvolvidos, (Kyriakides, S Dyao, J & Corona, E.1994.), avaliam o efeito da interacção entre os esforços de flexão e tracção.

Os ensaios realizados consistem em flectir tubagens até valores de curvatura pré-definidos, fixá-los e gradualmente aumentar a força de tracção até à rotura da estrutura. Note-se que os presentes ensaios não representam a instalação de condutas submarinas na medida em que são incapazes de avaliar a influência da força de tracção no desenvolvimento das

curvaturas de flexão. No entanto, avaliam o efeito da interação entre os esforços de flexão e tracção.

Os resultados obtidos, Figura 11, permitem concluir que o aumento da força de tracção (para a curvatura pré-definida de 0,79m-1) aumenta ligeiramente a ovalização da secção transversal da conduta. No entanto, o aumento é tanto maior quanto maior a curvatura de flexão pré-definida, isto é, a relação entre a ovalização e a força de tracção é função da curvatura de flexão imposta à tubagem.

Por outro lado, a relação entre a ovalização e a força de tracção é também função do *SDR* (Standard Dimensional Ratio) da conduta. Quanto menor o *SDR*, maior a espessura da parede da tubagem e menor o efeito da força de tracção no aumento da ovalização da secção transversal.

$$SDR = \frac{\phi_{ext}}{t}; \quad (1)$$

Em que:

- ϕ_{ext} – Diâmetro exterior da conduta;
- t – Espessura da parede da tubagem;

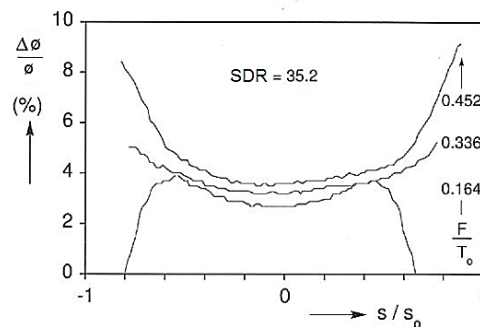


Figura 11 - Resultados dos ensaios desenvolvidos a uma conduta de SDR 35,2, Flexão e Tracção (Kyriakides, S & Corona, E. 2007.)

Em que:

- F – Força de tracção aplicada durante o ensaio;
- T_0 – Esforço de tracção de cedência da conduta;
- s – Coordenada longitudinal da conduta cuja origem se refere ao centro da estrutura;
- s_0 – Variável que adimensionaliza a coordenada s ;

5. Modelos de cálculo da força de tracção

A força de tracção necessária à imersão de condutas submarinas é o parâmetro de maior interesse, durante a operação, e difícil de calcular devido à não linearidade da interacção entre os esforços de flexão e tracção e à aleatoriedade das variáveis ambientais (altura significativa da onda, período de pico, direcção, velocidade da corrente e velocidade do vento).

Os modelos de cálculo da força de tracção utilizados no presente estudo são os seguintes:

- Modelo de cálculo Chain Link Theory;
- Modelo de cálculo The Theory of Pure Bending;
- Modelo de cálculo Orcaflex;

Os modelos de cálculo Chain Link Theory e The Theory of Pure Bending são modelos analíticos e não consideram as grandezas ambientais (ondulação, corrente e vento). O software Orcaflex é um modelo de elementos finitos, amplamente utilizado ao nível da engenharia hidráulica marítima, e considera as grandezas ambientais.

5.1. Modelo de cálculo Orcaflex

O software Orcaflex modela qualquer operação de afundamento considerando seis elementos estruturais (na discretização do sistema físico) e as três grandezas ambientais referidas.

No estudo desenvolvido, o elemento “Line” modela a conduta em PEAD e os cabos de amarração do sistema de ancoragem, enquanto que o elemento “Winch” simula a força de tracção aplicada pelo rebocador.

A “Line” é modelada através de um conjunto de segmentos rectos, rígidos e com um nó em cada uma das suas extremidades, Figura 12. Os segmentos absorvem as propriedades axiais e torsionais e os nós simulam as restantes.

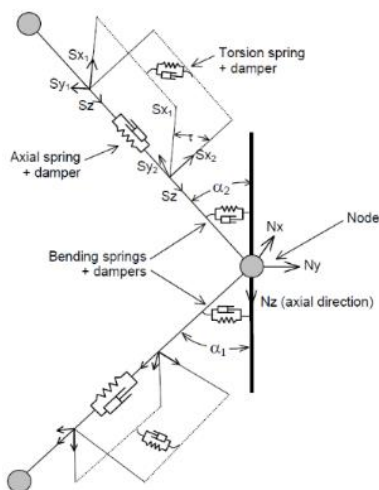


Figura 12 – Modelo estrutural do elemento “Line”, (Orcina.)

Em cada passo de cálculo, os esforços actuantes em cada segmento são calculados em função da posição instantânea dos seus nós e das propriedades consideradas (geométricas e físicas).

$$N = EA\varepsilon - 2v(P_{ext}A_{ext} - p_{int}A_{int}) + (P_{ext}A_{ext} - p_{int}A_{int}); \quad (2)$$

$$M = EI \frac{1}{R}; \quad (3)$$

$$V = \frac{(M_2 - M_1)}{L}; \quad (4)$$

Em que:

- N – Esforço axial;
- E – Módulo de Young do PEAD;
- A – Área efectiva da conduta ($A_{ext} - A_{int}$);
- ε – Deformação axial do segmento recto;
- v – Coeficiente de Poisson do PEAD;
- P_{ext} – Pressão hidrostática exterior exercida pelo líquido onde a conduta é imersa;
- A_{ext} – Área exterior da conduta;
- p_{int} – Pressão hidrostática interior exercida pelo líquido onde a conduta é imersa;
- A_{int} – Área interior da conduta;
- M – Momento flector;
- I – Momento de inércia da secção transversal da conduta;
- R – Raio de curvatura;
- V – Esforço transverso;
- L – Comprimento do segmento recto;

Os efeitos da corrente e do vento são considerados por intermédio das forças de arrasto aerodinâmico e hidrodinâmico. Em cada passo de cálculo, é aplicada a Equação de Morison, (5), aos diversos nós da “Line”.

$$Fd_i = 0,5P\rho(A_{drag})Cd_iV_i|V_i|; \quad (5)$$

Em que:

- Fd_i – Força de arrasto na direcção i ;
- P – Percentagem da “Line” imersa ou emersa caso se calcule a força de arrasto hidrodinâmico ou aerodinâmico, respectivamente;
- Cd_i – Coeficiente de arrasto na direcção i ;
- v_i – Velocidade do fluído na direcção i relativa à conduta;

O “Winch” simula qualquer força exterior, no presente estudo a força de tracção aplicada pelo rebocador, e aplica-a a um determinado nó da “Line”.

O cálculo da força de tracção no software Orcaflex é feito por um processo de tentativa e erro onde são arbitradas forças de tracção até o mínimo raio de curvatura calculado ser superior ao raio de curvatura admissível associado à ocorrência de buckling.

As grandezas ambientais introduzem esforços adicionais que reduzem o mínimo raio de curvatura calculado e conduzem ao aumento da força de tracção. A corrente e o vento são simulados através da sua intensidade e direcção, enquanto que a ondulação segue a teoria de “Dean Stream” e é modelada através da altura significativa da onda, período de pico e direcção.

5.2. Modelos de cálculo The Theory of Pure Bending e Chain Link Theory

Os modelos The Theory of Pure Bending e Chain Link Theory são utilizados conjuntamente e o critério de validade dos mesmos é o seguinte:

$$EI \leq F_t d^2; \quad (6)$$

Em que:

- d – Profundidade média de instalação;
- F_t – Força de tracção necessária à operação de afundamento;

Caso a desigualdade, (6), se verifique, a imersão desenvolve-se em águas profundas e o modelo válido é Chain Link Theory. Caso contrário, a instalação ocorre em águas costeiras e o modelo válido é The Theory of Pure Bending.

A Figura 13 apresenta o sistema estático resolvido pelos modelos analíticos de modo a calcular os raios de curvatura à superfície e no fundo, R_1 e R_2 , e a força de tracção necessária, F_t .

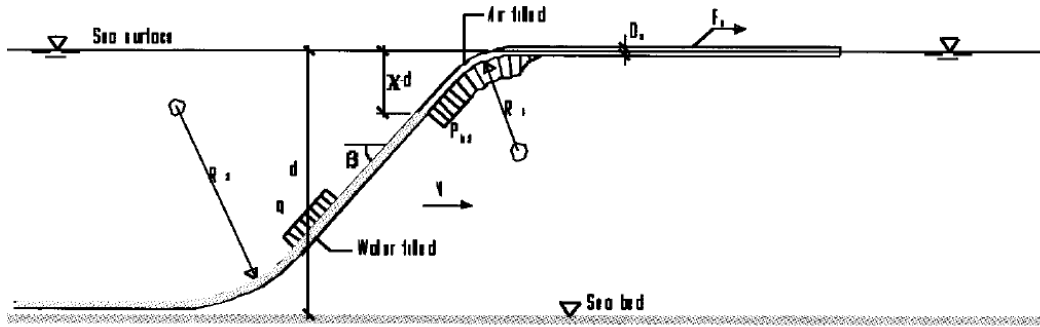


Figura 13 – Sistema estático resolvido pelos modelos de cálculo analíticos (Grann-Meyer, E. 2005.)

O modelo The Theory of Pure Bending assume a força de tracção nula e compara os raios de curvatura à superfície, $R_1 = 2,75\phi_{ext} \sqrt{\frac{E}{d} \sqrt{\left(1 - \left(1 - \frac{2}{SDR}\right)^4\right) \frac{1}{\chi^d(1-\beta_0^1)}}}$, e no fundo, $R_2 = R_1 \frac{(1-\beta_0^1)}{\beta_0^1}$, com o raio de curvatura admissível associado à ocorrência de buckling, (7). Os raios de curvatura à superfície e no fundo são função do factor de pressão interna, $\chi^d = \frac{p_i}{d}$, da pressão interna da conduta, p_i , do diâmetro exterior da conduta, ϕ_{ext} , do módulo de Young, E , do SDR e da percentagem de carregamento efectivo submerso, β_0^1 . A percentagem de carregamento efectivo submerso é a relação entre a altura submersa da conduta cujo peso linear iguala o carregamento no fundo, q , e a sua altura total.

$$R_{adm} = 1,5\phi_{ext} \left(\frac{v(SDR - 1)}{0,56} \right); \quad (7)$$

Caso os raios à superfície e no fundo sejam superiores ao admissível, a força de tracção nula, assumida pelo modelo The Theory of Pure Bending, é válida. Caso contrário, a mesma é calculada com recurso ao modelo Chain Link Theory.

De modo a garantir raios à superfície e no fundo superiores ao admissível, o modelo Chain Link Theory calcula dois valores para a força de tracção necessária, (8) e (9), em função dos carregamentos lineares à superfície e no fundo, P_{b2} e q . Note-se que os carregamentos consideram o peso e espaçamento dos blocos de lastros da conduta, a água no interior do troço inferior (próximo do fundo marinho) e o ar no interior do troço superior (próximo da superfície livre).

$$R_1 = \frac{F_{t1}}{P_{b2}}; \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{F_{t2}}{q}; \quad (9)$$

A força de tracção a aplicar é a maior das calculadas na medida em que a menor impõe raios de curvatura inferiores ao admissível. Como exemplo, caso a menor força esteja associada ao troço inferior (raio no fundo), a aplicação da mesma induz raios de curvatura inferiores ao admissível no troço superior (raio à superfície).

6. Caso de estudo – Emissário Submarino de Tunes

O presente estudo foi desenvolvido com a colaboração da empresa Etermar – Engenharia e Construção, S.A, presentemente a construir o Emissário Submarino de Tunes.

O emissário tem um comprimento total de 6300m e é composto por sete troços com comprimentos compreendidos entre os 232m e os 1093m. O presente estudo avalia o troço de conduta com 1091m de comprimento, que foi instalado em primeiro lugar, e cuja extremidade terra se encontra a 4655m da origem do emissário, Figura 14.

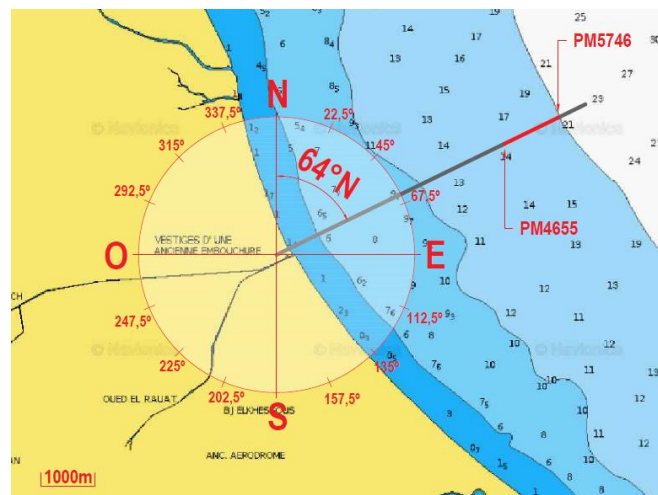


Figura 14 – Emissário Submarino de Tunes. Troço instalado em primeiro lugar com 1091m de comprimento (PM4655 – 5746)

Em que :

- PM – Ponto métrico (distância horizontal ao início do emissário);

As propriedades físicas e geométricas do emissário são as seguintes:

Parâmetro	Unidade	Emissário
Diâmetro Exterior, \varnothing_{ext}	mm	1600
SDR	-	26
Massa Volúmica, ρ_{PEAD}	Kg/m ³	950
Módulo de Young, E	MPa	1100
Coeficiente de Poisson, ν	-	0,5
Orientação	°N	64

Tabela 1 – Emissário Submarino de Tunes. Propriedades da conduta

As propriedades físicas e geométricas dos blocos de lastro, Figura 15, são as seguintes:

Parâmetro	Unidade	Emissário
Massa Volúmica (Betão Armado)	Kg/m ³	2500
Volume	m ³	2,49
Espaçamento, l	m	5

Tabela 2 – Emissário Submarino de Tunes. Propriedades dos blocos de lastro

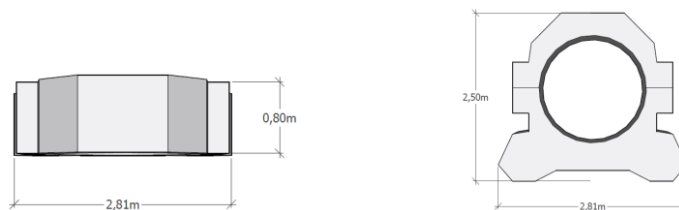


Figura 15 – Emissário Submarino de Tunes. Planta e alçado frontal dos blocos de lastro

As propriedades físicas e geométricas dos cabos de amarração do sistema de ancoragem, Figura 16, são as seguintes:

Parâmetro	Unidade	Cabo 1	Cabo 2
Material	-	Aço	Aço
Diâmetro Exterior	mm	30	30
Comprimento	m	70,8	70,8
Orientação Relativa ao Emissário	°	+30	-30

Tabela 3 – Emissário Submarino de Tunes. Propriedades dos cabos de amarração

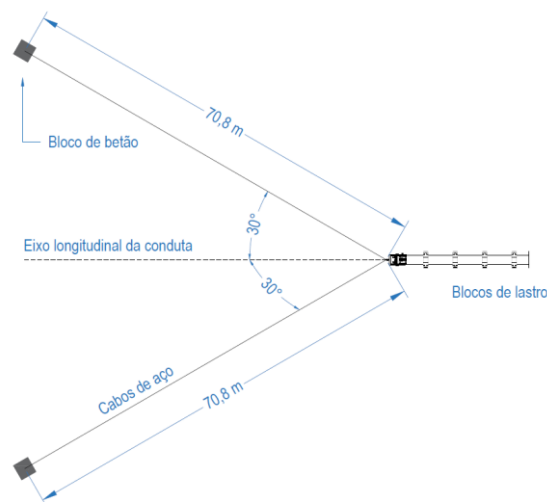


Figura 16 – Emissário Submarino de Tunes. Planta do sistema de ancoragem

As variáveis ambientais (altura significativa da onda, período de pico, direcção, velocidade da corrente e velocidade do vento) são tomadas com base em estudos ambientais anteriores desenvolvidos no âmbito do Emissário Submarino de Tunes (Serah Arteliah. 2014.). Tendo por base os elementos constantes destes relatórios, foram definidos três cenários de instalação, Tabela 4.

Grandeza	Parâmetro	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<u>Água do mar</u>	Densidade	kg/m³	1025		
<u>Ondulação</u>	Altura significativa da onda, H_s	m	0	0,5	1
	Período de pico, T_p	s	0	4	
	Direcção	°N	-	30	
<u>Corrente</u>	Intensidade	m/s	0	0,5	
	Direcção	°N	-	337,5	
<u>Vento</u>	Intensidade	Km/h	0	20	
	Rumo	°N	-	0	
<u>Fundo Marinho</u>	Profundidade de instalação PM4655	m	15,9		
	Profundidade de instalação PM5746	m	19,2		

Tabela 4 – Emissário Submarino de Tunes. Cenários ambientais para o cálculo da força de tracção a aplicar à conduta

Os cenários de instalação são a base da comparação entre as análises estática e dinâmica. O Cenário 1 (cenário estático) é analisado pelos três modelos de cálculo da força de tracção, enquanto que os Cenários 2 e 3 (cenários dinâmicos) são unicamente analisados pelo software Orcaflex uma vez que os modelos analíticos são incapazes de considerar as grandezas ambientais e o carácter dinâmico da operação de afundamento.

7. Cálculo da força de tracção

O presente capítulo tem por objectivo calcular a força de tracção necessária à instalação dos primeiros 1091m do Emissário Submarino de Tunes.

7.1. Modelos de cálculo analíticos – Cenário 1

Segundo o modelo The Theory of Pure Bending, os raios de curvatura à superfície e no fundo, R_1 e R_2 , são função da pressão interna da conduta, p_i , e da percentagem de carregamento efectivo submerso, β_0^1 .

A Etermar aplica à conduta, durante a sua imersão, uma pressão interna de 0,6bar. A empresa sabe por experiência, que este valor impede velocidades de entrada da água na conduta demasiado elevadas, evitando assim impactos consideráveis entre a mesma e o fundo marinho.

O carregamento no fundo, q , (considerando o peso e espaçamento dos blocos de lastro, o peso linear da conduta em PEAD e o peso linear da água no interior da tubagem) é de 712,83Kg/m (↓), valor este que conduz a uma altura submersa de 0,63m e consequentemente a uma percentagem de carregamento efectivo submerso de 0,39 (altura total de 1,6m).

Os raios de curvatura à superfície e no fundo são os seguintes:

$$R_1 = 2,75 * 1600 * \sqrt{\frac{1100}{19,2}} \sqrt{\left(1 - \left(1 - \frac{2}{26}\right)^4\right)} \sqrt{\frac{1}{0,32(1 - 0,39)}} = 39633,89mm; \quad (10)$$

$$R_2 = 39809,07 \frac{(1 - 0,39)}{0,39} = 61192,54mm; \quad (11)$$

O raio de curvatura admissível associado à ocorrência de buckling é o seguinte:

$$R_{adm} = 1,5 * 1600 \left(\frac{0,5(26 - 1)}{0,56} \right) = 53571,43mm; \quad (12)$$

A verificação da inequação $R_1 < R_{adm}$ permite concluir que a assumção do modelo The Theory of Pure Bending ($F_t = 0$) é inválida e a força de tracção é calculada segundo o modelo Chain Link Theory.

O carregamento à superfície (considerando o peso e espaçamento dos blocos de lastro e o peso linear da conduta em PEAD) é de -1043,19Kg/m (↑).

Definidos os carregamentos à superfície e no fundo, as forças de tracção associadas aos raios de curvatura à superfície e no fundo são respectivamente:

$$F_t^1 = R_{adm} * P_{b2} = 53,57 * |-1043,19| = 55885,04Kg \quad (13)$$

$$F_t^2 = R_{adm} * q = 53,57 * |715,81| = 38346,81Kg \quad (14)$$

A força de tracção a aplicar durante a imersão da conduta é, tal como referido anteriormente, a maior das calculadas, 55,89t.

De seguida é verificada a validade do modelo Chain Link Theory segundo o critério (6). A rigidez de flexão da conduta é a seguinte:

$$EI = 1100 * (8,8 * 10^{10}) = 9,70 * 10^{13};$$

O produto $F_t d^2$ é o seguinte:

$$F_t d^2 = 55,89 * 9,8 * 1000 * 19,2^2 = 2,02 * 10^{14};$$

A verificação da inequação $EI < F_t d^2$ permite concluir que o modelo de cálculo analítico Chain Link Theory é válido.

7.2. Modelo de elementos finitos – Cenários 1, 2 e 3

Relembre-se que o cálculo da força de tracção segundo o software Orcaflex é um processo de tentativa e erro onde são arbitradas forças de tracção até o mínimo raio de curvatura calculado ser superior ao raio de curvatura admissível associado à ocorrência de buckling. As forças de tracção arbitradas são de 5t, 10t, 15t, 20t, 25t e 30t.

As seguintes figuras ilustram a modelação da operação de afundamento dos primeiros 1091m do Emissário Submarino de Tunes.

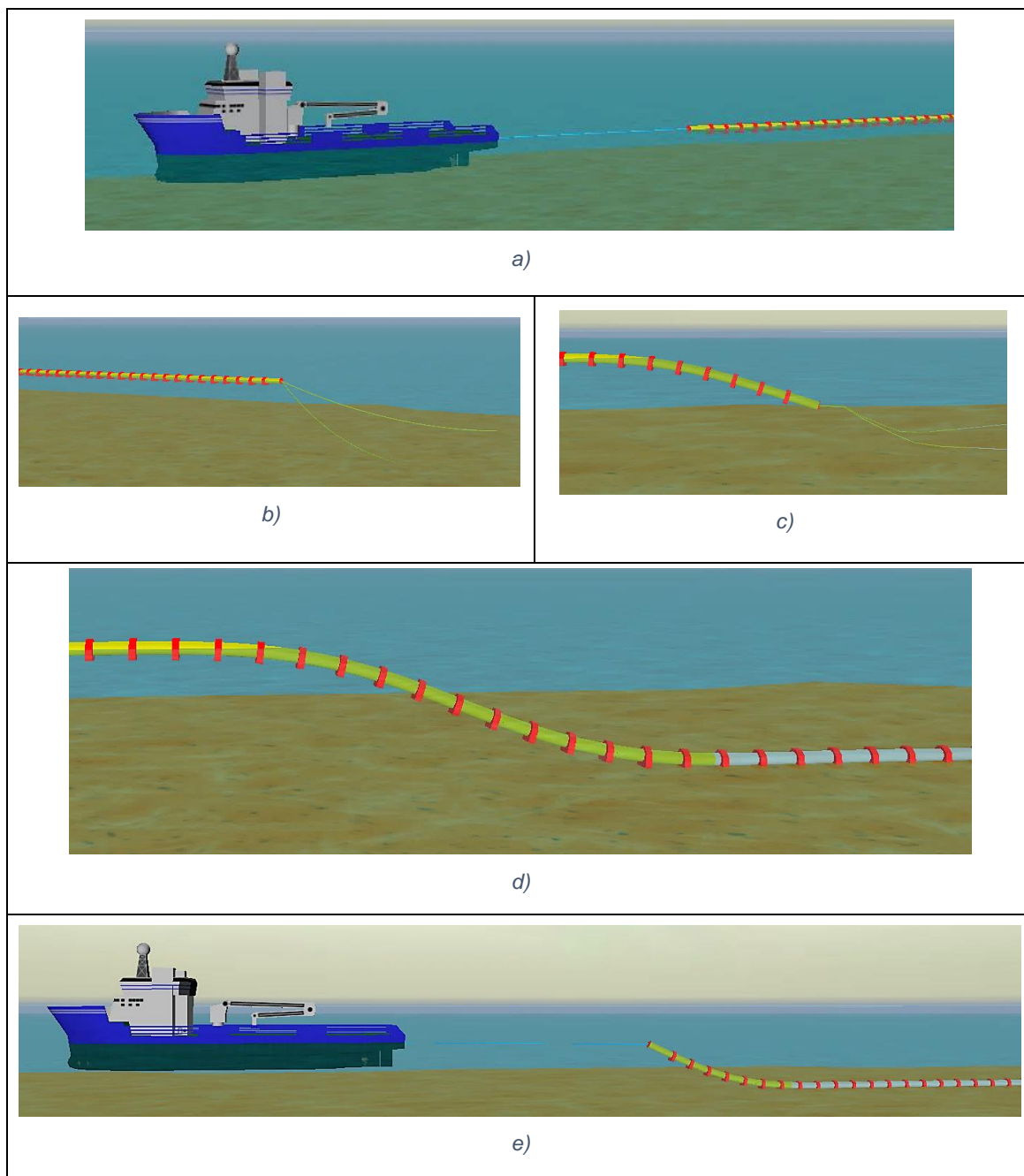


Figura 17 – Emissário de Tunes. Simulações efectuadas com o software Orcaflex: a) Recador tracionando a conduita (PM4655); b) Sistema de ancoragem (PM5746); c) Início da operação de afundamento; d) Configuração em “S” durante a imersão; e) Fim da operação de afundamento

Os resultados (mínimos raios de curvatura calculados) das simulações efectuadas são os seguintes:

Força de Tracção (t)	Mínimo Raio de Curvatura Calculado (m) – Cenário 1	Mínimo Raio de Curvatura Calculado (m) – Cenário 2	Mínimo Raio de Curvatura Calculado (m) – Cenário 3
5	53,7	51,6	47,2
10	59,3	56,7	51,2
15	64,1	59,9	54,1
20	67,9	62,3	57,2
25	71,1	64,8	60,8
30	74,2	66,4	63,4

Tabela 5 – Resultados do software Orcaflex para os três cenários de instalação

As forças de tracção necessárias associadas aos Cenários 1, 2 e 3 são de 5t, 10t e 15t, respectivamente. Relembre-se que o raio de curvatura admissível é de 53,57m.

O Gráfico 1 compara os resultados do software Orcaflex.

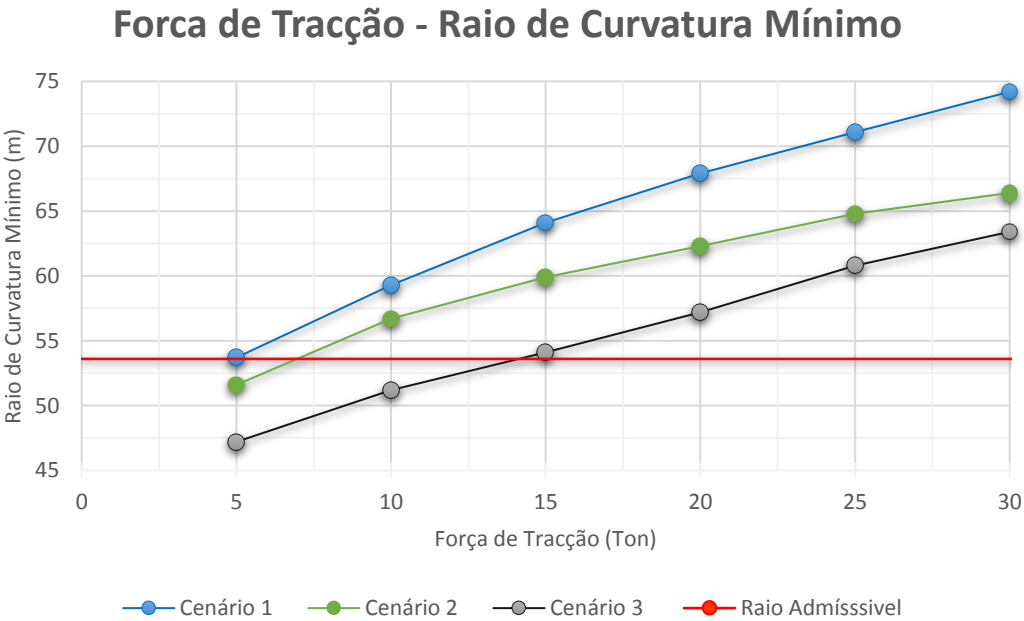


Gráfico 1 – Comparação dos resultados do software Orcaflex

7.3. Análise estática vs Análise dinâmica - Orcaflex

A análise estática (Cenário 1) negligencia as grandezas ambientais (efeitos dinâmicos) e coloca em causa a segurança estrutural da conduta uma vez que a sua força de tracção (5t) conduz a raios de curvatura inferiores ao admissível quando aplicada aos cenários dinâmicos. A força necessária duplica e triplica quando considerados Cenários 2 e 3 (dinâmicos), respectivamente.

A comparação dos resultados relativos aos Cenários 2 e 3 evidencia a importância da altura significativa da onda durante a operação de imersão de condutas submarinas em PEAD. Enquanto a altura de 0,5m conduz a uma força de tracção de 10t, a altura de 1m conduz a uma de 15t, diferença significativa e que evidencia a importância de imergir a conduta quando ocorrem as condições de agitação marítima consideradas no cálculo da força de tracção.

7.4. Modelos analíticos vs Modelo de elementos finitos

A força de tracção calculada pelos modelos analíticos (The Theory of Pure Bending e Chain Link Theory) e associada ao cenário estático (55,89t) é significativamente superior às determinadas pelo modelo de elementos finitos (Orcaflex) e associadas aos três cenários de instalação. A diferença observada deve-se à dificuldade em conceber modelos analíticos capazes de reproduzir o afundamento (operação dinâmica não linear) e determinar a força de tracção necessária à imersão da conduta.

De acordo com a experiência da Etermar – Engenharia e Construção, S.A, o resultado associado aos modelos analíticos constitui uma estimativa por excesso e conservadora da força de tracção necessária à instalação dos primeiros 1091m do Emissário de Tunes, uma vez que a empresa nunca empregou tão elevado valor nos diversos afundamentos que já efectuou. No entanto, os resultados do software Orcaflex estão em concordância com as expectativas da Etermar e permitem simultaneamente analisar a sensibilidade da operação a diversas variáveis ambientais.

8. Conclusão

O estudo desenvolvido permite retirar as seguintes conclusões:

- Os modelos de cálculo analíticos (The Theory of Pure Bending e Chain Link Theory) fornecem estimativas por excesso e conservadoras (55,89t) da força de tracção necessária à instalação do primeiro troço do Emissário Submarino de Tunes, cujo objectivo é evitar a instabilidade da conduta por buckling, e não consideram o carácter dinâmico da operação de afundamento (ondulação, corrente e vento).
- O software Orcaflex (modelo de elementos finitos) fornece resultados da força de tracção necessária à instalação do primeiro troço do Emissário Submarino de Tunes condizentes com a experiência da empresa Etermar – Engenharia e Construção, S.A (5t, 10t e 15t) e considera o carácter dinâmico da operação de afundamento (ondulação, corrente e vento).
- Os resultados obtidos pelo software Orcaflex para os cenários de instalação estático (não considerando qualquer grandeza ambiental) e dinâmicos (considerando a ondulação, a corrente e o vento) evidenciam a importância das grandezas ambientais no cálculo da força de tracção necessária à instalação do primeiro troço do Emissário Submarino de Tunes, uma vez que a mesma duplica e triplica do cenário estático (Cenário 1) para os cenários dinâmicos 2 e 3, respectivamente.
- A comparação dos resultados obtidos pelo software Orcaflex para os Cenários 2 e 3 evidencia a importância da altura significativa da onda durante a operação de instalação do primeiro troço do Emissário Submarino de Tunes. Um aumento de 100% na altura significativa da onda ($H_s = 0,5m \rightarrow H_s = 1m$) conduz a um aumento de 50% na força de tracção necessária ao afundamento ($F_t = 10ton \rightarrow F_t = 15ton$).
- A força de tracção calculada pelos modelos analíticos e associada ao cenário estático (55,89t) é onze vezes superior à calculada pelo software Orcaflex e associada ao mesmo cenário (5t) e quatro vezes superior à calculada pelo software Orcaflex e associada ao Cenário 3, cenário dinâmico mais desfavorável (15t).