



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

COMPORTAMENTO E QUALIDADE
DE PRUMOS TELESCÓPICOS DE AÇO
ESTUDO ANALÍTICO, NUMÉRICO E EXPERIMENTAL

João Pereira Cabanas Gonçalves André

(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas pela Universidade Técnica
de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o IST e o LNEC

Orientador: Doutor António Manuel dos Santos Baptista

Co-Orientador: Doutor Dinar Reis Zamith Camotim

Júri

Presidente: Doutor Dinar Reis Zamith Camotim

Vogais: Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real

Doutor João Carlos de Oliveira Fernandes de Almeida

Doutor António Manuel dos Santos Baptista

Novembro de 2008

COMPORTAMENTO E QUALIDADE DE PRUMOS TELESCÓPICOS DE AÇO

ESTUDO ANALÍTICO, NUMÉRICO E EXPERIMENTAL

RESUMO

A presente Dissertação consiste no estudo do comportamento estrutural e resistência de prumos telescópicos extensíveis, na análise dos parâmetros que influenciam a qualidade destes elementos e na definição dos instrumentos necessários para garantir a sua qualidade.

Os prumos telescópicos extensíveis são elementos estruturais correntemente utilizados em operações de construção, reabilitação ou reforço de estruturas permanentes, servindo-lhes de suporte. O dimensionamento dos prumos envolve frequentemente níveis de incerteza elevados, devendo-se ao facto do seu comportamento estrutural em situações de serviço não ser ainda bem conhecido – em particular, existe pouca informação disponível sobre a influência na resistência destes elementos da existência de imperfeições geométricas ou excentricidades do carregamento.

No âmbito da presente Dissertação, foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, um projecto de investigação sobre prumos telescópicos extensíveis, no qual se caracterizou a sua resposta estrutural sob a acção de forças axiais e se identificaram os parâmetros mais relevantes na determinação da sua capacidade resistente.

Este projecto envolveu (i) a realização de uma vasta série de ensaios experimentais, de acordo com a correspondente Norma Europeia EN 1065:1998, (ii) e o estudo do seu comportamento através de (ii.1) métodos analíticos aproximados e (ii.2) modelações numéricas por elementos finitos de barra (aproximada) e de casca (mais rigorosa), utilizando dois programas de cálculo diferentes, incluindo os efeitos das não-linearidades física, geométrica e de contacto.

O objectivo final do projecto consistiu em (i) contribuir para a obtenção de um conhecimento mais aprofundado sobre a estabilidade e a capacidade resistente dos prumos telescópicos extensíveis submetidos a compressão axial, e (ii) desenvolver, calibrar e validar uma curva de dimensionamento aplicável a este tipo de elementos estruturais, suprimindo assim uma lacuna da actual regulamentação de construção metálica.

PALAVRAS-CHAVE:

Estruturas provisórias

Prumos telescópicos extensíveis

Estudo analítico

Estudo numérico

Estudo experimental

Qualidade

BEHAVIOUR AND QUALITY OF STEEL TELESCOPIC PROPS

ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION

ABSTRACT

This work concerns the study of the structural behaviour and resistance of adjustable telescopic props, the analysis of the parameters that control the quality of these elements, and the definition of the instruments required to insure their quality.

Telescopic props represent one of the most common temporary structural elements used in the construction, rehabilitation or retrofit of permanent structures, to support the formwork. The design of these elements is frequently associated with high uncertainty levels, due to insufficient information about their real behaviour at the construction site – in particular, little information is available about the influence of geometric imperfections or load eccentricities on their resistance.

In the scope of the present work, a research project about adjustable telescopic props was developed at the Portuguese National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), during which was characterized the structural response of these elements under axial load, and the most relevant parameters determining their strength capacity were identified.

These research project comprises (i) a large set of experimental studies, carried out in accordance with the European Standard EN 1065:1998, (ii) and the study of their behaviour by (ii.1) simple analytical methods and (ii.2) numerical studies performed using two different models based on linear finite elements (approximate) and on shell elements (more thorough), simulating the material, geometrical, and contact non-linearities.

The final objective of this study consisted on (i) a contribution for the increase of the available knowledge about the stability and structural resistance of adjustable telescopic props under axial load, and (ii) to develop, calibrate and validate a buckling curve for the design of these elements, fulfilling a gap of the existing standardisation.

KEYWORDS:

Temporary structures

Adjustable telescopic props

Analytical investigation

Numerical investigation

Experimental investigation

Quality

AGRADECIMENTOS

Ao Presidente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Engenheiro Carlos Matias Ramos, e ao Director do Departamento de Estruturas (DE), Engenheiro João Chaves de Almeida Fernandes, por terem reunido as condições necessárias para a realização da presente Dissertação.

Ao Engenheiro António Manuel dos Santos Baptista, meu orientador científico, por me ter proposto o tema da Dissertação, pelos conhecimentos e saberes transmitidos sem os quais não teria sido possível realizar este trabalho, e acima de tudo pelo apoio e amizade sempre demonstrados.

Ao Professor Dinar Reis Zamith Camotim, meu co-orientador científico, por ter aceite o convite, pelos valiosos ensinamentos prestados durante a realização deste trabalho, e pelo contínuo apoio e amizade desde os tempos da Licenciatura.

Aos Eng.^{os} Salazar Braga e Amin Sultanali por terem disponibilizado os prumos utilizados nos ensaios.

A todos os colegas do Núcleo de Comportamento de Estruturas (NCE) pelo interesse e apoio sempre demonstrados.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios de Componentes de Estruturas (LCE) pela ajuda na realização dos ensaios experimentais.

Aos técnicos das Oficinas de Mecânica do LNEC pela ajuda na preparação dos acessórios de ensaio e dos provetes maquinados.

Aos meus pais por terem tornado possível esta Dissertação por todo o apoio prestado, contínuo empenho e incentivo, crítica positiva ao trabalho realizado e pela paciência e compreensão reveladas ao longo destes meses.

Por último (mas os últimos são sempre os primeiros), à Cláudia pelo afecto, apoio e estímulo transmitidos em todos os momentos da elaboração deste trabalho.

A todos o meu muito obrigado!

COMPORTAMENTO E QUALIDADE DE PRUMOS TELESCÓPICOS DE AÇO

ESTUDO ANALÍTICO, NUMÉRICO E EXPERIMENTAL

ÍNDICE DO TEXTO

Capítulo 1

Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objectivos da Dissertação	1
1.3. Estrutura da Dissertação	2

Capítulo 2

Qualidade de prumos telescópicos extensíveis.....	7
2.1. Introdução	7
2.2. Estruturas provisórias.....	7
2.3. Situação actual do processo de construção de estruturas provisórias	7
2.4. Instrumentos para a garantia da qualidade.....	11
2.4.1. Aprovações técnicas europeias.....	12
2.4.2. Homologação de produtos e sistemas de construção.....	13
2.4.3. A qualidade no processo de construção de estruturas provisórias.....	13
2.5. Prumos telescópicos extensíveis	14
2.5.1. Caracterização dos elementos.....	14
2.5.2. Caracterização das acções verticais aplicadas aos prumos telescópicos extensíveis.....	17
2.5.3. Propostas para a melhoria da qualidade dos prumos telescópicos extensíveis	18
2.5.4. Normalização aplicável aos prumos telescópicos extensíveis	27

Capítulo 3

Estudo experimental do comportamento de prumos telescópicos extensíveis	45
3.1. Introdução	45
3.2. Importância dos ensaios experimentais.....	45
3.3. Resultados de campanhas de ensaios anteriores	46
3.3.1. Campanha de ensaios realizados no CATIM.....	46
3.3.2. Campanha de ensaios realizados na Universidade de Milão	47

3.4.	Ensaio realizado no LNEC.....	47
3.4.1.	Condições iniciais dos ensaios	48
3.4.2.	Equipamento e instrumentação.....	50
3.4.3.	Execução e resultados dos ensaios	54
3.5.	Discussão dos resultados obtidos.....	75
3.6.	Conclusões	81
Capítulo 4		
Estudo analítico e numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis.....		83
4.1.	Introdução	83
4.2.	Estabilidade estrutural.....	83
4.2.1.	Análise de estabilidade	84
4.3.	Modelação pelo método dos elementos finitos	89
4.3.1.	Modelação do comportamento elastoplástico do material.....	89
4.3.2.	Modelação do comportamento geometricamente não-linear	90
4.3.3.	Modelação do contacto	92
4.3.4.	Etapas do método dos elementos finitos.....	94
4.3.5.	Integração numérica	95
4.3.6.	Tipos de elementos finitos	96
4.3.7.	Malha de elementos finitos.....	99
4.3.8.	Tipos de erros	102
4.3.9.	Interpretação, validação e verificação dos resultados.....	103
4.4.	Estudos analíticos e numéricos de prumos telescópicos extensíveis	104
4.4.1.	Análises elásticas dos prumos	104
4.4.2.	Modelos numéricos desenvolvidos para analisar o comportamento de prumos.....	113
4.5.	Conclusões	143
Capítulo 5		
Curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis.....		145
5.1.	Introdução	145
5.2.	Filosofia europeia de dimensionamento de colunas metálicas	145
5.2.1.	Propriedades mecânicas.....	145
5.2.2.	Imperfeições dos elementos.....	147

5.2.3.	Curvas de encurvadura	148
5.3.	Análises de sensibilidade	149
5.4.	Proposta de curva de encurvadura	150
5.5.	Métodos simplificados para a estimativa da resistência de prumos.....	160
5.6.	Conclusões	161
Capítulo 6		
Certificação de prumos telescópicos extensíveis segundo a norma EN 1065:1998		163
6.1.	Introdução	163
6.2.	Análise dos resultados para a classificação dos prumos	163
6.2.1.	Resultados experimentais	163
6.2.2.	Resultados numéricos	168
6.3.	Controlo dimensional dos prumos	170
6.4.	Conclusões	173
Capítulo 7		
Considerações finais		175
7.1.	Conclusões	175
7.1.1.	Qualidade de prumos telescópicos extensíveis.....	175
7.1.2.	Estudo experimental do comportamento de prumos telescópicos extensíveis	176
7.1.3.	Estudo analítico e numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis...	178
7.1.4.	Curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis...	180
7.1.5.	Certificação de prumos telescópicos extensíveis.....	180
7.1.6.	Oportunidades de melhoria da norma EN 1065:1998	181
7.2.	Desenvolvimentos futuros	183
Referências		185
ANEXO A		
Ensaio de prumos telescópicos extensíveis realizados no CATIM		191
A.1.	Resumo dos resultados dos ensaios	191
A.1.1.	Prumo PBB-3000-18-18.....	191
A.1.2.	Prumo PBB-3000-15-15.....	192
A.1.3.	Prumo PBB-4000-18-18.....	193
A.1.4.	Prumo PBB-3000-20-20.....	194
A.1.5.	Prumo PBB-4000-20-20.....	195

ANEXO B

Ensaio de prumos telescópicos extensíveis realizados no LNEC	197
B.1. Ensaio preliminar	197
B.1.1. Ensaio de prumos com a altura máxima ($L=3,5$ m)	197
B.1.2. Ensaio de prumos com a altura mínima ($L=2,0$ m)	206
B.1.3. Ensaio de prumos para as alturas intermédias	208
B.2. Ensaio à rotura de prumos	209
B.2.1. Ensaio de prumos com a altura máxima ($L=3,5$ m)	209
B.2.2. Ensaio de prumos com a altura mínima ($L=2,0$ m)	209
B.2.3. Ensaio de prumos para as alturas intermédias	210

ANEXO C

Modelos numéricos de prumos telescópicos extensíveis.....	215
C.1. Validação dos modelos desenvolvidos no programa ABAQUS	215
C.2. Ficheiros-tipo de dados dos modelos numéricos desenvolvidos no programa ABAQUS ...	217
C.2.1. Modelos N. e E.....	217
C.2.2. Modelo EN 1065	224
C.2.3. Programa fjoin2.....	226
C.2.4. Programa fjoin3.....	230
C.2.5. Programa Mola.....	233

ANEXO D

Resultados numéricos: Análises de sensibilidade	235
--	------------

ANEXO E

Ensaio de tracção de provetes maquinados	239
E.1. Descrição dos ensaios realizados	239
E.2. Resultados dos ensaios realizados.....	241

ANEXO F

Controlo dimensional de prumos telescópicos extensíveis.....	243
---	------------

ANEXO G

Publicações.....	247
-------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS
Capítulo 2

Figura 2.1 – Andaime.....	8
Figura 2.2– Sistema de cofragem móvel.....	8
Figura 2.3 – Cimbre.	8
Figura 2.4 – Viga de lançamento.....	8
Figura 2.5 – Mortalidade no sector da construção.....	10
Figura 2.6 – Acidente numa ponte.	10
Figura 2.7 – Acidente num edifício.....	10
Figura 2.8 – Acidente no cimbre.	10
Figura 2.9 - Prumo telescópico extensível: vista geral e designação dos componentes.....	14
Figura 2.10 – Deficiente acondicionamento dos prumos.	16
Figura 2.11 – Defeitos nas chapas das bases dos prumos.	16
Figura 2.12 – Deficientes condições da fundação (1).	16
Figura 2.13 - Deficientes condições da fundação (2).	16
Figura 2.14 – Curvatura inicial (1).....	16
Figura 2.15 – Curvatura inicial (2).....	16
Figura 2.16 – Transmissão de cargas irregular.....	16
Figura 2.17 – Excentricidades na transmissão de cargas (1).....	16
Figura 2.18 – Excentricidades na transmissão de cargas (2).....	16
Figura 2.19 – Utilização indevida de componentes.....	16
Figura 2.20 – Acidente com prumos (1).....	17
Figura 2.21 – Acidente com prumos (2).....	17
Figura 2.22 – Exemplo de acessório para colocação do prumo em fundações inclinadas.	26
Figura 2.23 – Queda de prumos devido a flexão localizada.....	26
Figura 2.24 – Aplicação da carga de modo satisfatório.	26
Figura 2.25 – Prumo com imperfeição inicial.	26
Figura 2.26 – Prumo com configuração correcta.	26
Figura 2.27 – Pino incorrecto.	26
Figura 2.28 – Pino correcto.	26

Figura 2.29 – Existência de excentricidades da carga.....	27
Figura 2.30 – Posição correcta (centrada).....	27
Figura 2.31 – Condições insuficientes da fundação (1).	27
Figura 2.32 – Fundação adequada (1).	27
Figura 2.33 – Condições insuficientes da fundação (2).	27
Figura 2.34 – Fundação adequada (2).	27
Figura 2.35 – Carga concêntrica.....	29
Figura 2.36 – Carga excêntrica.....	29
Figura 2.37 – Posição de ensaio do prumo.....	35
Figura 2.38 – Flexão do pino, EC3-1-8.....	37
Figura 2.39 – Flexão do pino, adaptação do modelo do EC3-1-8 para o caso de prumos.	37
Figura 2.40 – Resistência da ligação ao esmagamento dada pelo EC3 1-8, EN 1065 e DIN 18800-1.	38
Figura 2.41 – Modelo estrutural proposto pela EN 1065:1998.	38
Figura 2.42 – Simbologia utilizada para identificar parâmetros geométricos dos tubos.....	39
Figura 2.43 – Comportamento não-linear da mola.....	41
 Capítulo 3	
Figura 3.1 - Deslocamentos transversais devidos à folga existente entre os dois tubos.....	49
Figura 3.2 – Transdutor de forças.	51
Figura 3.3 – Máquina de ensaio.	51
Figura 3.4 – Transdutor de forças na posição de ensaio.....	51
Figura 3.5 – Disposição dos transdutores.....	51
Figura 3.6 – Pormenor.....	51
Figura 3.7 – Transdutor de deslocamentos de 200 mm de curso.	52
Figura 3.8 – Transdutor de deslocamentos de 100 mm de curso.	52
Figura 3.9 – Andaime utilizado para a instalação da instrumentação (1).....	52
Figura 3.10 – Andaime utilizado para a instalação da instrumentação (2).....	52
Figura 3.11 – Método de fixação dos transdutores.....	53
Figura 3.12 – Extensómetros.....	54
Figura 3.13 – Vista da colocação dos extensómetros (1).	54
Figura 3.14 – Vista da colocação dos extensómetros (2).	54

Figura 3.15 – Disposição geral do sistema de aquisição de dados.....	54
Figura 3.16 – SPIDER 8.....	54
Figura 3.17 – Acessório inferior.....	55
Figura 3.18 – Clinómetro de bolha de ar.....	55
Figura 3.19 – Fixação da posição do acessório inferior.....	55
Figura 3.20 – Acessório superior.....	55
Figura 3.21 – Disposição do acessório superior.....	55
Figura 3.22 – Calibres de plástico.....	56
Figura 3.23 – Acessório superior (início do ensaio).....	58
Figura 3.24 – Acessório superior (força máxima).....	58
Figura 3.25 - Ensaio à rotura na configuração normal: curvas $P^* - \delta_{T3}^*$ ($L=3,50$ m).....	59
Figura 3.26 - Ensaio à rotura na configuração invertida: curvas $P^* - \delta_{T2}^*$ ($L=3,50$ m).....	60
Figura 3.27 - Curvas $P^* - \delta^*$ das configurações normal e invertida (transdutores T_1 a T_4) ($L=3,50$ m).	61
Figura 3.28- Curvas $P^* - \delta_{axial}^*$ dos prumos com a altura mínima ($L=2,00$ m, configuração normal). 63	63
Figura 3.29- Curvas $P^* - \delta_{T1}^*$ dos prumos com a altura mínima ($L=2,00$ m), configuração normal. ...	64
Figura 3.30 – Curvas $P^* - \delta_{T2}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias).....	66
Figura 3.31 – Curvas $P^* - \delta_{T2}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração invertida (alturas intermédias).....	66
Figura 3.32 – Curvas $P^* - \delta_{T1}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=2,75$ m). 69	69
Figura 3.33 – Curvas $P^* - \delta_{T3}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias, transdutor T_3)......	69
Figura 3.34 – Curvas $P^* - \delta_{T2}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias, transdutor T_2)......	70
Figura 3.35 – Curvas $P^* - \delta_{T1}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias, transdutor T_1)......	70
Figura 3.36 – Curvas $P^* - \delta_{axial}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias).....	71
Figura 3.37 – Curvas $P^* - \delta^*$ relativas a deslocamentos axiais e transversais (T_1) obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=3,50$ m com extensómetros).....	73

Figura 3.38 – Curvas $P^* - \sigma^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=3,50$ m com extensómetros).	73
Figura 3.39 – Curvas P^*-M^* na base inferior obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=3,50$ m com extensómetros).	74
Capítulo 4	
Figura 4.1 – Comportamento bifurcacional.....	85
Figura 4.2 – Comportamento do sistema imperfeito.	85
Figura 4.3 – Barra incompressível.	91
Figura 4.4 - Comportamento de uma barra incompressível utilizando diferentes relações constitutivas	91
Figura 4.5 – Pontos de Gauss: integração completa.....	96
Figura 4.6 – Modos de <i>hourglassing</i> , elementos lineares (em cima) e elementos quadráticos (em baixo).	96
Figura 4.7 – Tipos de distorção.	101
Figura 4.8 – Modelação de superfícies curvas.	102
Figura 4.9 - Modelo estrutural utilizado na análise da estabilidade.	106
Figura 4.10 - Análise de estabilidade dos prumos: influência do parâmetro c	108
Figura 4.11 - Análise de estabilidade dos prumos: influência do aumento (separado) da rigidez da chapa de cada base.	108
Figura 4.12 - Modos de instabilidade críticos do prumo de referência com $L=3,5$ m e várias condições de apoio.	109
Figura 4.13 - Efeito da curvatura inicial,.....	111
Figura 4.14 - Efeito da excentricidade da força,	111
Figura 4.15 - Comportamento inicial de pós-encurvadura.	113
Figura 4.16 – Simulação da mola não-linear da norma EN 1065.....	118
Figura 4.17 – Malha “standard” para elementos quadráticos.....	121
Figura 4.18 – Malha “standard” para elementos lineares.....	121
Figura 4.19 – Diagramas $P^* - \delta_{1/2 \text{vão}}^*$ obtidos para os vários modelos.	121
Figura 4.20 – Diagrama Tensões de Von-Mises vs. Extensão	123
Figura 4.21 - Diagramas $P^* - \delta_{T3}^*$ obtidos para os vários modelos ($L=3,5$ m, configuração normal).	126

Figura 4.22 - Diagramas P^* – δ_{T1} e $T2^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=3,5$ m, configuração normal).	127
Figura 4.23 - Diagramas P^* – δ_{T3} e $T4^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=3,5$ m, configuração normal).	128
Figura 4.24 - Diagramas P^* – M^* obtidos para os vários modelos ($L=3,5$ m, configuração normal).	128
Figura 4.25 - Diagramas da excentricidade do esforço normal na base inferior do prumo em função da rotação da mesma base do prumo, obtidos para os vários modelos ($L=3,5$ m, configuração normal).	129
Figura 4.26 - Diagramas P^* – rotação na base inferior do prumo obtidos para os vários modelos ($L=3,5$ m, configuração normal).	130
Figura 4.27 - Diagramas P^* – δ_{axial}^* obtidos para os vários modelos ($L=2,0$ m, configuração normal).	131
Figura 4.28 - Diagramas P^* – δ^* obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=2,0$ m, configuração normal).	132
Figura 4.29 - Diagramas P^* – δ_{T3}^* obtidos para os vários modelos ($L=2,75$ m, configuração normal).	133
Figura 4.30 - Diagramas P^* – δ^* obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=2,75$ m, configuração normal).	133
Figura 4.31 - Diagramas P^* – δ^* obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=2,25$ m, configuração normal).	134
Figura 4.32 - Diagramas P^* – δ^* obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=2,50$ m, configuração normal).	134
Figura 4.33 - Diagramas P^* – δ^* obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=3,00$ m, configuração normal).	135
Figura 4.34 - Diagramas P^* – δ^* obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=3,25$ m, configuração normal).	135
Figura 4.35 – Sobreposição de deformadas obtidas pelo modelo ABAQUS E.5 e nos ensaios para $L=3,5$ m (à esquerda) e $L=2,75$ m (à direita).	137
Figura 4.36 - Zonas do prumo onde se inicia a cedência e as que se encontram em cedência na força máxima para o modelo ABAQUS E.5 ($L=2,00$ m e $L=3,50$ m, configuração normal).	138
Figura 4.37 - Diagramas de força reduzida <i>versus</i> o deslocamento transversal registado na secção correspondente a uma altura igual a 1,9 m: Ensaios e modelo EN 1065 ($L=2,00$ m, configuração normal).	140
Figura 4.38 – Comportamento não-linear da mola da base inferior do prumo para as várias alturas.	141

Figura 4.39 – Deformada inicial de vários modelos numéricos ($L=3,5$ m, configuração normal).....	141
Figura 4.40 – Influência das imperfeições iniciais no comportamento dos prumos telescópicos extensíveis.....	142
Capítulo 5	
Figura 5.1 – Construção da proposta de curva de encurvadura.....	153
Figura 5.2 – Curva de encurvadura proposta.....	153
Figura 5.3 – Pormenor da curva de encurvadura proposta versus classificação segundo a norma EN 1065:1998 para o prumo da classe A ensaiado.	156
Figura 5.4 – Verificação do pré-dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis.	157
Figura 5.5 – Comparação entre a curva proposta e as curvas da parte 1-1 do Eurocódigo 3.	158
Figura 5.6 – Diferentes métodos de análise do comportamento do prumo.	160
Capítulo 6	
Figura 6.1 – Altura da cabeça do batente.	170
Figura 6.2 – Largura da cabeça do batente.....	170
Figura 6.3 – Diâmetro do pino.	171
Figura 6.4 – Vista do troço roscado do tubo exterior.	171
Figura 6.5 – Altura do batente da porca roscada.	171
Figura 6.6 – Largura do batente da porca roscada.....	171
Figura 6.7 – Comprimento do troço roscado até ao furo de ajuste da altura do prumo (L^*_{rosca}).....	171
Figura 6.8 – Altura do batente.....	171
Figura 6.9 – Base do tubo interior.	171
Figura 6.10 – Base do tubo exterior	171
Figura 6.11 – Diâmetro do furo interior da base do tubo interior.	172
Figura 6.12 – Diâmetro do furo interior da base do tubo exterior.....	172
Figura 6.13 – Espessura da base do tubo interior.....	172
Figura 6.14 – Espessura da base do tubo exterior.	172
Figura 6.15 – Largura da base do tubo interior.	172
Figura 6.16 – Largura da base do tubo exterior.....	172
Figura 6.17 – Configuração concêntrica dos dois tubos.....	172
Figura 6.18 – Configuração excêntrica dos dois tubos.....	172

Anexo B

Figura B.1 – Curvas $P-\delta_{T3}$ obtidas nos ensaios 1 a 6 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, <i>inc1</i>).....	200
Figura B.2 – Curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios 12 a 30 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m).....	201
Figura B.3 – Curvas $P-\delta_{T3}$ obtidas nos ensaios 31 a 39 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, <i>inc5</i>).....	202
Figura B.4 – Curvas $P-\delta_{T3}$ obtidas nos ensaios 50 a 54 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, <i>inc6</i>).....	202
Figura B.5 – Curvas $P-\delta_{T3}$ obtidas nos ensaios 72 a 77 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m).....	203
Figura B.6 – Curvas $P-\delta_{T3}$ obtidas nos ensaios 81 a 92 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, <i>inc10</i>).....	204
Figura B.7 – Curvas $P-\delta_{T2}$ obtidas nos ensaios 107 a 122 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, configuração invertida, <i>inc10</i>).....	206
Figura B.8 – Curvas $P-\delta_{T1}$ (ensaios preliminares, $L=2,0$ m + 1cm, configuração normal, <i>inc13+1°</i>).....	207
Figura B.9 – Curvas $P-\delta_{T1}$ (ensaios preliminares, $L=2,0$ m, configuração normal, <i>inc13+1°</i>).....	208
Figura B.10 – Deformação do pino, $L=2,25$ m (configuração normal).....	212
Figura B.11 – Ovalização do furo do tubo interior, $L=2,25$ m (configuração normal).....	212
Figura B.12 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,50$ m (config. normal).....	213
Figura B.13 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,50$ m (config. invertida).....	213
Figura B.14 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,75$ m (config. normal).....	213
Figura B.15 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,75$ m (config. invertida).....	213
Figura B.16 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,00$ m (config. normal).....	213
Figura B.17 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,00$ m (config. invertida).....	213
Figura B.18 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,25$ m (config. normal).....	214
Figura B.19 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,25$ m (config. invertida).....	214

Anexo C

Figura C.1 – Tensões de Von-Misses (elementos lineares).....	215
Figura C.2 – Tensões de Von-Misses (elementos quadráticos).....	215
Figura C.3 – Extensões E22 (extensões na direcção longitudinal do prumo) – elementos lineares....	216
Figura C.4 – Extensões E22 (extensões na direcção longitudinal do prumo) – elementos quadráticos.	216
Figura C.5 – Extensões plásticas equivalentes (escalar de todas as componentes do vector extensões plásticas) - elementos lineares.....	217

Figura C.6 – Extensões plásticas equivalentes (escalar de todas as componentes do vector extensões plásticas) - elementos quadráticos. 217

Anexo D

Figura D.1 – Variação da resistência em função da variação da espessura dos tubos. 235

Figura D.2 – Variação da resistência em função da variação do comprimento dos tubos. 235

Figura D.3 – Variação da resistência em função da variação das características dos furos. 236

Figura D.4 – Variação da resistência em função da variação das características das chapas das bases. 236

Figura D.5 – Variação da resistência em função da variação da qualidade do aço. 237

Anexo E

Figura E.1 – Aspecto geral e dimensões dos provetes maquinados. 240

Figura E.2 – Máquina de ensaio. 240

Figura E.3 – Proвете em posição de ensaio. 240

Figura E.4 – Diagrama força-deformação. 242

ÍNDICE DE TABELAS
Capítulo 2

Tabela 2.1 – Tipos de prumos segundo a BS4074:1982 29

Tabela 2.2 – Comparação aproximada entre as normas britânicas e europeias..... 43

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Informação geométrica do prumo PBB-3000-18-18. 46

Tabela 3.2 – Resumo dos resultados obtidos para o prumo PBB-3000-18-18..... 46

Tabela 3.3 - Resultados experimentais e numéricos obtidos pela Universidade de Milão..... 47

Tabela 3.4 - Dimensões nominais das secções transversais dos tubos..... 47

Tabela 3.5 – Ângulos na base inferior de modo a existirem duas zonas de contacto entre os tubos..... 50

Tabela 3.6 – Ângulos de rotação na base inferior do prumo para os tubos entrarem em contacto em dois pontos..... 57

Tabela 3.7 – Variáveis reduzidas. 58

Tabela 3.8 - Força máxima registada, $L=3,50$ m. 60Tabela 3.9 – Influência dos calibres de plástico na resistência dos prumos ($L=3,50$ m)..... 62

Tabela 3.10 – Alturas intermédias..... 65

Tabela 3.11 - Valores da força máxima registados nos ensaios à rotura realizados para as alturas intermédias. 67

Tabela 3.12 – Espessura da parede do tubo exterior e interior..... 75

Tabela 3.13 – Comprimentos dos tubos exteriores e interior..... 75

Tabela 3.14 – Espessura das chapas das bases dos tubos exterior e interior..... 75

Tabela 3.15 – Largura das chapas das bases dos tubos exterior e interior. 75

Tabela 3.16 – Resumo dos resultados dos ensaios de tracção..... 77

Tabela 3.17 – Esforços resistentes, efectivos e nominais, dos tubos..... 77

Tabela 3.18 – Resumo dos resultados obtidos..... 79

Tabela 3.19 – Resumo dos resultados obtidos (continuação)..... 80

Tabela 3.20 – Verificação da ligação entre os dois tubos, segundo a norma EN 1065 e a parte 1-8 do EC3..... 80

Tabela 3.21 – Verificação da ligação entre os dois tubos, segundo a norma EN 1065 e a parte 1-8 do EC3 (modificada). 81

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Erros no campo de tensões em função dos vários tipos de distorções.....	101
Tabela 4.2 - Características nominais do prumo de referência.	106
Tabela 4.3 – Validação dos modelos alterando o tipo de elementos	117
Tabela 4.4 - Dimensões das secções transversais dos tubos.	125
Tabela 4.5 – Submodelos considerados do Modelo 2.....	125
Tabela 4.6 – Variáveis reduzidas	126
Tabela 4.7 – Resistências e mecanismos de rotura a partir do modelo ABAQUS E.5.....	138

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Dimensões mínimas dos prumos segundo a norma EN 1065:1998	153
Tabela 5.2 – Valor de cálculo da resistência dos prumos obtido pela curva de encurvadura proposta, em comparação com o valor de cálculo da resistência determinado pelas normas EN 1065 e EN 12812.	155
Tabela 5.3 – Proposta de pré-dimensionamento de prumos para as Classes A, B e C segundo a norma EN 1065:1998, $L_{max}=3,5$ m.	158
Tabela 5.4 – Resistência característica nominal para cada classe do prumo em função da sua altura máxima.	159
Tabela 5.5 – Resultados obtidos com métodos aproximados (configuração normal): Análise plástica de 2ª ordem.....	161
Tabela 5.6 – Resultados obtidos com métodos aproximados (configuração normal): Merchant-Rankine.	161

Capítulo 6

Tabela 6.1 – Determinação do comprimento condicionante segundo a norma EN 1065:1998.....	164
Tabela 6.2 – Tensões de cedência obtidas a partir de ensaios de tracção.....	165
Tabela 6.3 – Tratamento dos resultados (configuração normal).	166
Tabela 6.4 – Tratamento dos resultados (configuração invertida).	166
Tabela 6.5 – Comparação entre os valores de resistência dos prumos utilizando valores médios e nominais da tensão de cedência do material dos tubos (continua).	167
Tabela 6.6 – Classificação do prumo a partir dos resultados numéricos.....	169

Anexo A

Tabela A.1 – Características do prumo PBB-3000-18-18.....	191
Tabela A.2 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-18-18.....	191

Tabela A.3 – Características do prumo PBB-3000-15-15.....	192
Tabela A.4 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-15-15.....	192
Tabela A.5 – Características do prumo PBB-4000-18-18.....	193
Tabela A.6 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-4000-18-18.....	193
Tabela A.7 – Características do prumo PBB-3000-20-20.....	194
Tabela A.8 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-20-20.....	194
Tabela A.9 – Características do prumo PBB-4000-20-20.....	195
Tabela A.10 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-20-20.....	195

Anexo B

Tabela B.1 – Estudo inicial (1) realizado para $L=3,5$ m.....	198
Tabela B.2 – Ângulos medidos através do clinómetro.....	199
Tabela B.3 – Resumo das condições do estudo inicial (2), $L=3,5$ m.....	205
Tabela B.4 – Resumo das condições do estudo inicial, $L=2,0$ m.	207
Tabela B.5 – Resumo dos ensaios realizados para as alturas intermédias.	208
Tabela B.6 – Resumo dos ensaios à rotura para $L=3,5$ m.	209
Tabela B.7 – Posicionamento dos transdutores utilizados nos ensaios para a altura máxima.....	209
Tabela B.8 – Resumo dos ensaios realizados para $L=2,0$ m.	210
Tabela B.9 – Posicionamento dos transdutores utilizados nos ensaios para a altura mínima.	210
Tabela B.10 – Resumo dos ensaios realizados para as alturas intermédias.	211
Tabela B.11 – Posicionamento dos transdutores utilizados nos ensaios para as alturas intermédias..	212

Anexo E

Tabela E.1 – Requisitos mínimos do aço 43C segundo a norma BS 4360:1990.....	240
Tabela E.2 – Resultados dos ensaios de tracção.....	241
Tabela E.3 – Conversão dos valores de extensão.....	241
Tabela E.4 – Médias e desvios-padrão dos resultados obtidos.....	242
Tabela E.5 – Esforços resistentes, efectivos e nominais, dos tubos.	242

Anexo F

Tabela F.1 – Controlo dimensional dos prumos (continua).	243
Tabela F.2 – Resumo das verificações realizadas durante o controlo dimensional dos prumos (continua).	244

SIMBOLOGIA

Capítulo 2

$R_{y,k}$	Resistência característica do prumo da classe k de acordo com a norma EN 1065:1998
l_{\max}	Comprimento máximo do prumo.
l ou L	Comprimento do prumo.
$R_{y,\text{ensaio}}$	Resistência experimental do prumo para uma dada altura.
$R_{s,p}$	Resistência ao corte do pino.
$R_{b,t}$	Resistência ao esmagamento do tubo interior.
$f_{u,p}$	Tensão de rotura à tracção do material do pino.
A_s	Área transversal do pino.
$f_{y,t}$	Tensão de cedência do material do tubo interior.
t	Espessura da parede do tubo interior.
d_p	Diâmetro do pino.
$f_{y,p}$	Tensão de cedência do material do tubo interior.
$M_{rd,p}$	Momento resistente do pino.
$M_{sd,p}$	Momento actuante no pino.
a, b e c	Parâmetros que dependem das dimensões da ligação.
d	Diâmetro dos furos do tubo interior.
R	Raio exterior do tubo interior.
r	Raio interior do tubo interior.
φ_R	Menor ângulo (em graus) entre o raio dos contornos externo do tubo interior, tangentes ao bordo de um furo e o eixo de menor inércia da secção transversal do tubo.
φ_r	Menor ângulo (em graus) entre o raio dos contornos interno do tubo interior, tangentes ao bordo de um furo e o eixo de menor inércia da secção transversal do tubo.
A_n	Área da secção transversal útil do tubo
I_{gr}	Momento de inércia segundo o eixo de menor inércia da secção bruta do tubo.
I_n	Momento de inércia segundo o eixo de menor inércia da secção útil do tubo.
I_i	Momento de inércia segundo o eixo de menor inércia da secção ideal do tubo.
W_n^{el}	Módulo de flexão elástico.
W_n^{pl}	Módulo de flexão plástico.
R_{eq}	Raio exterior equivalente do tubo interior.
r_{eq}	Raio interior equivalente do tubo interior.
e	Excentricidade do ponto de aplicação das forças verticais.
e_{bo}	Excentricidade no apoio da base inferior do prumo.
D_1	Diâmetro exterior do tubo inferior.
a_o	Amplitude da configuração sinusoidal.
N	Valor do esforço axial.
N_{pl}	Esforço normal resistente da secção.

M_{pl}	Momento-flector plástico da secção.
$M_{pl,N}$	Momento-flector plástico da secção tendo em conta a interacção com o esforço normal.
γ_{M1}	Coefficiente parcial de segurança do material.

Capítulo 3

T_{int}	Tubo interior.
T_{ext}	Tubo exterior.
D_{ext}	Diâmetro exterior.
t	Espessura da parede da secção tubular.
θ	Ângulo de rotação relativa entre os dois tubos, interior e exterior.
L_o	Comprimento de sobreposição entre os dois tubos.
$D_{int,Text}$	Diâmetro interior do tubo exterior.
$D_{ext,Tint}$	Diâmetro exterior do tubo interior.
L_1	Comprimento do tubo exterior.
L_2	Comprimento útil do tubo interior.
$P_{ced, Tint}$	Esforço normal resistente da secção útil do tubo interior.
$P_{ced, Text}$	Esforço normal resistente da secção transversal do tubo exterior.
$P_{ced, min}$	Esforço normal resistente mínimo.
P^*	Esforço normal normalizado.
δ	Deslocamento medido.
δ^*	Deslocamento medido normalizado.
$M_{ced, Tint}$	Momento-flector de cedência da secção útil do tubo interior, segundo o eixo de menor inércia.
$M_{ced, Text}$	Momento-flector de cedência da secção transversal do tubo exterior, segundo o eixo de menor inércia.
M_{min}	Momento-flector de cedência mínimo, segundo o eixo de menor inércia.
M^*	Momento-flector normalizado.
σ	Tensão.
$f_{y, Tint}$	Tensão de cedência do material do tubo interior.
$f_{y, Text}$	Tensão de cedência do material do tubo exterior.
$f_{y, min}$	Tensão de cedência mínima.
σ^*	Tensão normalizada.
σ_{cr}	Tensão crítica de uma casca.
E	Módulo de elasticidade.
r_{ext}	Raio exterior.
L_{eq}	Comprimento de encurvadura.

Capítulo 4

E	Energia total do sistema.
T	Energia cinética do meio contínuo.

V	Energia potencial total do sistema.
U	Energia de deformação elástica interna.
H	Energia potencial.
A_o	Área da secção transversal inicial.
A	Área da secção transversal.
L_o	Comprimento inicial.
L	Comprimento.
e	Alongamento.
E	Módulo de elasticidade.
g	Componente normal da separação entre as duas superfícies a partir da superfície mestra.
c	Componente normal da força que actua na superfície mestra no ponto de contacto.
n	Normal à superfície mestra.
ϕ	Remanescente da resistência ao deslizamento em relação à componente tangencial da força de contacto.
$\dot{\gamma}$	Valor absoluto da velocidade relativa de deslizamento entre os pontos em contacto.
R	Raio exterior do tubo.
r	Raio interior do tubo.
D_{ext}	Diâmetro exterior.
$f_{y,média}$	Tensão de cedência média.
d	Diâmetro dos furos do tubo interior.
t	Espessura da parede do tubo interior.

Capítulo 5

L_{eq}	Comprimento de encurvadura equivalente.
P_{cr}	Carga crítica.
I_{eq}	Momento de inércia equivalente segundo o eixo de menor inércia.
L_{ext}	Comprimento do tubo exterior.
L_{int}	Comprimento útil do tubo interior.
i_{eq}	Raio de giração equivalente.
λ_{eq}	Esbelteza equivalente.
$\bar{\lambda}_{eq}$	Esbelteza normalizada equivalente.
λ_1	Esbelteza de referência para determinar a esbelteza normalizada.
χ	Coefficiente de redução

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

Os prumos telescópicos extensíveis inserem-se no grupo de estruturas designado por estruturas provisórias. Por estrutura provisória de apoio à construção, entende-se qualquer estrutura de carácter temporário que actua como suporte da estrutura permanente durante a sua fase construtiva, até esta desenvolver a resistência suficiente para suportar as acções a que se encontra submetida. Incluem-se ainda neste grupo, as estruturas de suporte ou de protecção dos trabalhadores envolvidos em trabalhos de construção, manutenção ou reabilitação de estruturas.

No panorama normativo português, não existem normas ou recomendações actualizadas sobre a verificação da segurança, montagem e desmontagem deste tipo de estruturas.

Acresce que grande parte dos agentes envolvidos no sector da construção entende que a utilização das estruturas provisórias não necessita de um planeamento cuidado. Na prática, o projecto de estruturas provisórias limita-se a cálculos simplificados, sem análise do risco associado a cada utilização específica e sem estipular as condições exigidas para a avaliação da sua qualidade.

Como consequência desta realidade registam-se anualmente em Portugal dezenas de acidentes, muitos deles fatais, resultantes do colapso total ou parcial de estruturas provisórias, ou das próprias estruturas permanentes em fase de construção, relacionados com deficiências de concepção, projecto, fabrico, montagem ou controlo da qualidade de estruturas provisórias, ou com a sua utilização indevida.

Estes acidentes, que dão lugar a elevados prejuízos sociais e económicos, afectam igualmente, em maior ou menor grau, o sector da construção noutros países, nomeadamente na União Europeia. Por este motivo, têm sido recentemente desenvolvidas iniciativas com o objectivo de diminuir a sua ocorrência, designadamente ao nível da elaboração de directivas e de normas europeias cobrindo a concepção, o controlo da qualidade e a utilização deste tipo de estruturas.

1.2. Objectivos da Dissertação

A presente Dissertação pretende contribuir para um melhor conhecimento do comportamento estrutural dos prumos telescópicos extensíveis, que constituem um dos elementos estruturais mais frequentemente utilizados no apoio à construção de edifícios, por um lado e, por outro, para o desenvolvimento de recursos que permitam assegurar o seu controlo da qualidade.

A presente Dissertação envolve por isso duas linhas de investigação, que se complementam entre si.

Uma destas linhas compreende os estudos desenvolvidos no âmbito da qualidade dos prumos telescópicos, incluindo as diferentes vertentes de normalização e certificação deste produto, tendo em vista a acreditação dos recursos laboratoriais necessários ao seu controlo.

Os estudos de apoio à normalização incluem o exame das normas europeias recentemente publicadas sobre estes elementos estruturais, e uma análise crítica de algumas das suas exigências, relativamente às características geométricas e mecânicas dos prumos.

No que se refere à sua certificação, é proposta uma solução para o controlo da qualidade dos prumos, de modo a harmonizar os interesses dos fabricantes, dos utilizadores e da entidade certificadora, no âmbito das exigências colocadas pela normalização europeia.

Finalmente, a nível dos recursos laboratoriais necessários ao estudo experimental dos prumos e, em particular, à realização dos ensaios previstos para o seu controlo da qualidade e certificação de acordo com as respectivas normas, pretende-se cobrir diferentes vertentes, incluindo a concepção de acessórios, utilização do equipamento, definição de procedimentos de ensaio, elaboração de folhas de cálculo para apoio ao registo e tratamento dos resultados, e concepção de relatórios de apreciação global do produto, com base nos quais a entidade certificadora decidirá sobre a concessão da marca de qualidade ao produto analisado.

A elaboração dos procedimentos de ensaio inclui uma componente de investigação importante, no que se refere aos aspectos insuficientemente cobertos ou omissos na norma de ensaio, e que podem afectar a repetibilidade e reprodutibilidade dos ensaios ou limitar a informação que deles pode ser retirada. Com base nestes estudos, poderão ser tomadas decisões sobre a melhor forma de realização do ensaio.

A outra linha de investigação da Dissertação prende-se com o estudo do comportamento estrutural dos prumos telescópicos. Este estudo envolve duas vertentes, experimental e numérica, e tem como objectivo melhorar o conhecimento da resposta destes elementos às acções impostas, e da forma como esta é influenciada pelas imperfeições geométricas destes elementos, pelas características do material constituinte e pelas condições da sua montagem em obra.

Com base nos resultados destes estudos, efectuar-se-á uma análise crítica das regras de cálculo habitualmente seguidas na verificação da segurança dos prumos, com base na qual serão propostos métodos alternativos para o dimensionamento destes elementos estruturais.

1.3. Estrutura da Dissertação

A diversidade dos temas estudados na presente Dissertação implicou que fossem abordados de modo autónomo, apresentando-se no início de cada capítulo a revisão bibliográfica correspondente.

Assim, a presente Dissertação está estruturada em sete capítulos e em sete anexos:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Qualidade de prumos telescópicos extensíveis

Capítulo 3 – Estudo experimental do comportamento de prumos telescópicos extensíveis
Capítulo 4 – Estudo analítico e numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis
Capítulo 5 – Curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis
Capítulo 6 – Certificação de prumos telescópicos extensíveis segundo a norma EN 1065:1998
Capítulo 7 – Considerações finais
Anexo A – Ensaios de prumos telescópicos extensíveis realizados no CATIM
Anexo B – Ensaios de prumos telescópicos extensíveis realizados no LNEC
Anexo C – Modelos numéricos de prumos telescópicos extensíveis
Anexo D – Resultados numéricos: Análises de sensibilidade
Anexo E – Ensaios de tracção de provetes maquinados
Anexo F – Controlo dimensional de prumos telescópicos extensíveis
Anexo G – Publicações

O Capítulo 2 pretende introduzir a temática da qualidade dos prumos telescópicos extensíveis, descrevendo nomeadamente o contexto em que se inserem estes elementos estruturais no sector da construção civil. São igualmente apresentados os instrumentos actualmente ao dispor dos vários agentes do sector para controlar a qualidade destes elementos.

Como tal, em primeiro lugar é caracterizada a classe das estruturas provisórias na qual se inserem os prumos telescópicos extensíveis, e o panorama actual da construção de estruturas provisórias. Apresenta-se ainda a revisão bibliográfica sobre os problemas de segurança deste sector associados à utilização deste tipo de estruturas, e os instrumentos disponíveis para garantir a sua qualidade.

Após uma descrição das estruturas provisórias, são caracterizados os elementos objecto da presente Dissertação, os prumos telescópicos extensíveis. Depois de apresentada a revisão bibliográfica sobre a segurança na utilização destes elementos, e sobre as acções verticais a que estão sujeitos, são delineadas várias propostas para aumentar a qualidade destes elementos, desde o projecto até à sua utilização.

Por fim, é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais aspectos da normalização europeia aplicável aos prumos telescópicos extensíveis, em particular sobre (i) a realização de ensaios de prumos, (ii) modelos estruturais de análise numérica de prumos e (iii) esquemas de certificação da qualidade de prumos indicados na norma EN 1065:1998.

O Capítulo 2 trata de uma matéria relativa ao estudo dos prumos telescópicos extensíveis diferente da abordada nos seguintes três capítulos (Capítulos 3 a 5). No entanto, apresenta conceitos e contém informações importantes para uma melhor análise e compreensão do comportamento destes elementos, razão pela qual se optou por apresentá-las em primeiro lugar.

Deste modo, partindo de uma base sólida sobre os principais conceitos e sobre a problemática da utilização dos prumos, apresentam-se nos Capítulos 3 e 4 os estudos experimentais e numéricos do comportamento de prumos telescópicos extensíveis.

Apresenta-se em primeiro lugar o estudo experimental de prumos telescópicos extensíveis, realizado de acordo com a já referida norma EN 1065:1998, utilizando-se posteriormente os resultados experimentais obtidos na verificação dos modelos numéricos desenvolvidos. De facto, antes de serem efectuados os primeiros ensaios de prumos já tinham sido iniciados estudos analíticos e numéricos simplificados do comportamento destes elementos, de forma a constituir uma base de dados para a definição do sistema de ensaio, em particular o nível de valores de forças e de deslocamentos envolvidos.

No entanto, no decurso dos ensaios percebeu-se que os resultados analíticos e numéricos iniciais apenas constituíam uma aproximação do comportamento observado durante os ensaios dos prumos, dado que este último apresenta especificidades não contabilizadas nos modelos numéricos inicialmente desenvolvidos.

Assim, no Capítulo 3 apresenta-se o estudo experimental do comportamento de prumos telescópicos extensíveis desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Após a apresentação da revisão bibliográfica sobre ensaios de prumos anteriormente realizados em Portugal (ver igualmente o Anexo A) e em Itália, são caracterizados os prumos ensaiados, definidas as condições iniciais dos ensaios (em particular as imperfeições geométricas a impor no início do ensaio), e o equipamento (incluindo acessórios de ensaio) e tipo de instrumentação utilizada.

Previamente à realização dos ensaios à rotura dos prumos, foi desenvolvido um estudo preliminar (resumido no Anexo B.1) no qual se pretendeu (i) detectar e mitigar a influência de possíveis variáveis exógenas ao ensaio que pudessem afectar os resultados dos ensaios à rotura dos prumos, bem como (ii) definir de forma justificada o sistema de ensaio.

De seguida são apresentados os principais resultados obtidos na campanha de ensaios realizada (o Anexo B.2 contém informações complementares aos resultados apresentados no Capítulo 3), começando pelas alturas extremas (máxima e mínima) do tipo de prumos ensaiado, prosseguindo depois com as cinco alturas intermédias ensaiadas. Por fim, são apresentados os resultados dos ensaios de prumos instrumentados com extensómetros – estes ensaios têm como objectivo caracterizar a influência de algumas particularidades destes elementos estruturais no comportamento registado durante os ensaios, como a evolução das condições de apoio, por exemplo.

Finalmente, são discutidos os resultados apresentados e tecidas as principais conclusões.

No Capítulo 4 são apresentados os estudos analíticos e numéricos do comportamento de prumos telescópicos extensíveis.

Em primeiro lugar, é apresentada uma revisão bibliográfica dos dois métodos de análise utilizados: (i) análise da estabilidade e do comportamento de elementos estruturais por métodos analíticos, e

(ii) análise do comportamento e resistência de elementos estruturais por modelação através do Método dos Elementos Finitos.

Na primeira parte da revisão bibliográfica, são apresentados os conceitos básicos necessários para desenvolver uma análise linear de estabilidade, e de pós-encurvadura inicial de elementos ideais, bem como o estudo do comportamento elástico de elementos reais, i.e. introduzindo imperfeições geométricas iniciais.

Na segunda parte da revisão bibliográfica, são descritos os parâmetros principais que influenciam os resultados de uma modelação de uma estrutura/elemento pelo Método dos Elementos Finitos, desde a modelação do comportamento do material, das não linearidades geométricas e de contacto, e da escolha do tipo de elementos e da densidade da malha a utilizar, até ao processo de validação e verificação dos resultados obtidos.

Posteriormente, é apresentada a aplicação prática dos métodos de análise referidos no estudo da estabilidade, comportamento e resistência de prumos telescópicos extensíveis. Os estudos preliminares analíticos e numéricos foram realizados antes de os ensaios dos prumos serem iniciados, com base num tipo de prumo diferente daquele que veio a estar disponível para a realização dos ensaios.

São assim, apresentados os resultados das análises lineares de estabilidade de prumos telescópicos extensíveis, bem como a análise elástica da influência de vários tipos de imperfeições geométricas no comportamento dos prumos. Por fim, é apresentada e caracterizada a trajectória inicial de pós-encurvadura destes elementos. Estas análises foram realizadas a partir de um modelo estrutural simplificado, igualmente apresentado no capítulo 4.

De modo a melhor simular o comportamento dos prumos obtido nos ensaios realizados foram desenvolvidos modelos numéricos através de dois programas distintos: um programa já existente no LNEC e o programa comercial ABAQUS.

A norma EN 1065:1998, para além de definir as condições de ensaio dos prumos (incluindo vários tipos de imperfeições iniciais), especifica um modelo estrutural para determinar a resistência dos prumos (com tipos de imperfeições iniciais diferentes dos impostos no início dos ensaios).

No âmbito da presente Dissertação foram desenvolvidos modelos numéricos (recorrendo ao programa ABAQUS) que procuram simular o comportamento dos prumos (i) a partir dos modelos estruturais propostos na norma EN 1065:1998 e (ii) a partir das condições de ensaio definidas na mesma norma. O Anexo C contém os ficheiros-tipo de dados dos vários modelos desenvolvidos.

Foram ainda desenvolvidos modelos (recorrendo ao programa existente no LNEC) para simular numericamente o comportamento dos prumos a partir do modelo estrutural simplificado apresentado no Capítulo 4.

Para modelar correctamente o comportamento elastoplástico do material dos prumos foi necessário caracterizá-lo através de ensaios de tracção de provetes maquinados retirados das paredes dos tubos exterior e interior dos prumos. Os ensaios de tracção, bem como os resultados obtidos, estão descritos no Anexo E.

Após serem descritos os vários modelos numéricos desenvolvidos, são apresentados os resultados dos processos implementados de validação, verificação e comparação dos vários modelos, culminando com a selecção do modelo cujos resultados melhor se aproximam do comportamento dos prumos obtido a partir dos ensaios.

É ainda analisado o modelo estrutural proposto pela norma EN 1065:1998 para o estudo numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis, sendo identificadas as principais insuficiências do modelo e propostas alterações para melhorar o seu desempenho.

Por fim, são apresentados os resultados de simulações numéricas do comportamento dos prumos para várias magnitudes de imperfeições iniciais, e as principais conclusões a retirar do Capítulo 4.

No Capítulo 5 é apresentada uma proposta de curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis. O capítulo começa com a revisão bibliográfica sobre a filosofia europeia de dimensionamento de colunas metálicas, prosseguindo com a apresentação dos resultados de uma análise de sensibilidade da resistência dos prumos a vários parâmetros, entre os quais as dimensões (i) da secção transversal dos tubos e (ii) das chapas das bases dos prumos. Os resultados completos da análise de sensibilidade encontram-se descritos no Anexo D.

Seguidamente é apresentada a metodologia da construção da curva de encurvadura proposta para o dimensionamento dos prumos, bem como a determinação, de acordo com o método proposto no Eurocódigo 0 (EN 1990), do coeficiente de segurança a aplicar ao valor obtido pela curva para obter o valor de cálculo da resistência dos prumos. A curva de encurvadura proposta é baseada nos resultados experimentais e nos resultados numéricos obtidos com o modelo numérico seleccionado no final do Capítulo 4.

Por fim, são apresentados dois métodos simplificados alternativos à curva de encurvadura proposta para estimar a resistência dos prumos.

No Capítulo 6 apresenta-se um exemplo do processo de certificação de prumos telescópicos extensíveis segundo a norma EN 1065:1998, a partir dos resultados dos ensaios experimentais e dos resultados numéricos obtidos a partir do modelo proposto na mesma norma. Por fim, é descrita a campanha de medições para o controlo dimensional dos prumos, tal como definida na norma EN 1065:1998, e apresentadas as principais conclusões. Os resultados desta campanha são apresentados no Anexo F.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos trabalhos elaborados no âmbito da presente Dissertação, e apontadas perspectivas de desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

QUALIDADE DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS

2.1. Introdução

Apresenta-se neste Capítulo a definição de estruturas provisórias e de prumos telescópicos extensíveis, e a problemática da qualidade deste tipo de estruturas e elementos. Finaliza-se o Capítulo com a apresentação de propostas para a garantia da qualidade destes elementos e com um resumo comentado da principal normalização existente aplicável aos prumos telescópicos extensíveis.

2.2. Estruturas provisórias

Os prumos telescópicos extensíveis inserem-se num grupo de estruturas denominado por “estruturas provisórias”. Por estrutura provisória de apoio à construção entende-se “qualquer estrutura de carácter temporário que actua como suporte da estrutura permanente durante a sua fase construtiva, até esta desenvolver a resistência suficiente para suportar as acções a que se encontra submetida” [2.1-2.3]. Incluem-se ainda neste grupo as estruturas de suporte ou de protecção dos trabalhadores envolvidos em trabalhos de construção, manutenção ou reabilitação de estruturas. As figuras 2.1 a 2.4 ilustram diferentes tipos de estruturas provisórias, nomeadamente andaimes, cimbres, sistemas de cofragem móvel e vigas de lançamento.

2.3. Situação actual do processo de construção de estruturas provisórias

Vários agentes têm responsabilidades directas ou indirectas no projecto de estruturas provisórias, desde comerciantes de materiais e componentes, projectistas e consultores, passando por empreiteiros e subempreiteiros, pela fiscalização, pela seguradora até pelos operários da construção civil [2.4]. Neste contexto, as estruturas provisórias são habitualmente realizadas por pequenas empresas (montadores/instaladores) subcontratadas pelo empreiteiro geral. Os subempreiteiros asseguram a montagem, a manutenção e a desmontagem das referidas estruturas provisórias, em conformidade com um projecto-tipo ou com um projecto especialmente desenvolvido para o efeito, em função da complexidade da obra.

No entanto, estes agentes menosprezam frequentemente esta fase do processo de construção, muito embora as estruturas provisórias tenham uma influência capital na qualidade, segurança, velocidade e rentabilidade da maioria dos projectos de construção.

Grande parte dos agentes envolvidos no sector da construção entende que a utilização das estruturas provisórias não necessita de um planeamento cuidado [2.4]. Na prática, o projecto de estruturas provisórias limita-se a cálculos simplificados, sem a análise do risco associado a cada utilização específica e sem estipular as condições exigidas para a avaliação da sua qualidade.



Figura 2.1 – Andaime.



Figura 2.2– Sistema de cofragem móvel



Figura 2.3 – Címbre.



Figura 2.4 – Viga de lançamento.

As estruturas provisórias de apoio à construção são habitualmente utilizadas sem terem sido objecto de qualquer estudo prévio, relativamente à sua segurança estrutural [2.4]. O estado de conservação dos materiais e produtos empregues é frequentemente insatisfatório, e a sua manipulação é efectuada por pessoal sem formação específica para o efeito [2.4]. Acresce, serem escassas as informações existentes, quer em documentos normativos quer em manuais dos fabricantes, sobre a verificação da segurança, montagem e desmontagem deste tipo de estruturas [2.4]. Este facto leva a que não haja uma uniformidade nos critérios de verificação da segurança em projecto e na execução em obra. Os critérios actuais baseiam-se em concepções predefinidas, fundamentadas em juízos subjectivos que advêm da experiência pessoal de quem faz o projecto. No entanto, este tipo de estruturas pode apresentar problemas eventualmente tão complexos como os das próprias construções principais [2.4].

A mudança de atitude dos agentes da construção passa também pelos sectores da educação e da formação profissional, para que passe a existir o suporte necessário ao longo das várias fases do processo construtivo: apoio ao projecto, construção, manutenção e remoção de estruturas provisórias.

Uma comunicação da *Standing Committee on Structural Safety (SCOSS)* [2.5] indica algumas das razões pelas quais os vários agentes do sector da construção não dão a devida importância à qualidade em obra:

- A globalização trouxe avanços tecnológicos, novos materiais, metodologias de optimização e racionalização do dimensionamento, mas trouxe igualmente a necessidade de se realizarem estruturas cada vez mais ousadas e, simultaneamente, com custos e prazos de construção tão baixos quanto possível. O aumento da concorrência teve, nalguns casos, o efeito perverso de incentivar o descumprimento de medidas de segurança e da qualidade das construções. Neste contexto, o sector da construção possui um mercado competitivo baseado na execução pelo prazo mais curto e ao preço mais baixo, o que promove as empresas menos diligentes no que toca ao planeamento e à gestão do risco – entende-se por risco como a relação entre a probabilidade de um evento ocorrer e as suas consequências nas várias vertentes do problema;
- A generalização dos sistemas de certificação da qualidade dos processos produtivos teve a virtude de introduzir novos paradigmas de exigência nas empresas. No entanto, a taxa de sucesso na concretização prática destes novos conceitos ainda não se faz sentir totalmente, devido ao facto de que algumas das empresas entenderem que se trata de um exercício meramente burocrático e sem vantagens práticas;
- A subcontratação acarreta, em geral, a perda da cadeia de responsabilidades, a falta de supervisão, o fraco envolvimento nos projectos e a utilização de materiais e equipamentos não adequados. A falta de mão-de-obra especializada leva à necessidade de recrutamento de pessoal não habilitado, a quem são exigidas longas horas de trabalho diário.

Adicionalmente, muitos dos problemas da qualidade na construção resultam de deficiências do projecto, nomeadamente de pormenorização incompleta, mal concebida ou deixada à iniciativa dos executantes, de concepção geral deficiente, de erros de cálculo e da escolha de materiais inadequados [2.4]. No caso particular das estruturas provisórias, também os desenhos se apresentam mal executados, frequentemente omissos e/ou incompletos, não especificando, por exemplo, as tolerâncias a respeitar na montagem dos diversos componentes. Os cálculos de análise estrutural e de verificação da segurança dos elementos são frequentemente inadequados ou incompletos, por negligência ou desconhecimento das características específicas do comportamento deste tipo de estruturas, e por vezes, estão até em desrespeito pela legislação existente [2.4].

Como consequência desta realidade, registam-se anualmente em Portugal numerosos acidentes, muitos deles fatais, resultantes do colapso total ou parcial de estruturas provisórias, ou das próprias estruturas permanentes em fase de construção, relacionados com deficiências na concepção, no projecto, no fabrico, na montagem ou no controlo da qualidade de estruturas provisórias, ou ainda com a sua utilização indevida. É de referir o facto de este tipo de acidentes ser muito frequente, sendo responsável por uma importante fracção da elevada sinistralidade que se verifica na indústria da construção em Portugal.

Em Portugal, o sector da Construção Civil e Obras Públicas (CC&OP) registou uma diminuição de 1466 acidentes de trabalho entre os anos de 2001 e 1989 [2.6-2.9]. Contudo, aumentou o peso relativo do sector, o qual contabilizou cerca de 23% do total de acidentes em Portugal, o que representa um aumento

de 4%, novamente comparando os anos de 2001 e 1989. Acresce, que em 1993 o sector da CC&OP contribuía já com uma elevada percentagem, de cerca de 35%, para o total de acidentes mortais, tendo-se elevado em 2001 para cerca de 56% dos acidentes deste tipo ocorridos no país (ver a Figura 2.5). Desde então, registou-se uma diminuição até se chegar a 46% em 2007. É possível concluir que, apesar das campanhas de sensibilização levadas a cabo com o objectivo de diminuir a sua ocorrência, as quedas em altura e o esmagamento têm constituído a principal causa das mortes verificadas neste sector, representando cerca de 40% e 18%, respectivamente, do total de fatalidades [2.6-2.9].

Estes acidentes, ilustrados nas figuras 2.6 a 2.8, dão lugar a elevados prejuízos sociais e económicos e afectam igualmente, em maior ou menor grau, o sector da construção de outros países, nomeadamente países da União Europeia.

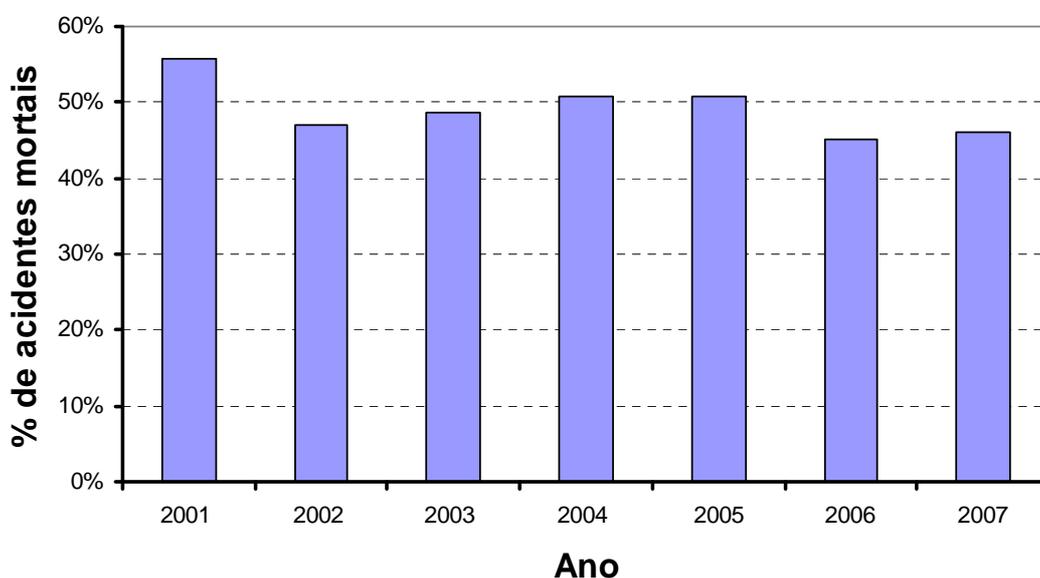


Figura 2.5 – Mortalidade no sector da construção



Figura 2.6 – Acidente numa ponte.



Figura 2.7 – Acidente num edifício.



Figura 2.8 – Acidente no cimbre.

Por exemplo, em Inglaterra, durante o período 1998/99-2000/01, o sector da CC&OP contabilizou um terço do número total de fatalidades registadas no sector industrial [2.10]. No ano de 2000 registou-se a maior taxa de mortalidade dos últimos dez anos. No ano de 2006 registou-se uma diminuição acentuada do número de fatalidades [2.11]. Foi possível constatar que as quedas em altura e o esmagamento têm constituído a principal causa das mortes verificadas neste sector, apesar das campanhas de sensibilização levadas a cabo com o objectivo de diminuir a sua ocorrência. Em quase 30% dos acidentes verificou-se a existência de falta de adequação e qualidade dos materiais e componentes utilizados [2.10].

Na União Europeia (UE) quase 10% de todos os acidentes de trabalho envolvem quedas em altura e um em dez resulta na invalidez permanente ou na morte do trabalhador. Todos os anos se registam cerca de 500.000 quedas em altura no local de trabalho, das quais 300.000 estão na origem de ausências do trabalho por mais de três dias, 40.000 provocam ferimentos graves e 1.000 são fatais [2.12].

Os acidentes não mortais provocam dias de ausência, perda de produtividade e aumento dos custos de produção [2.13], sendo que, no sector da construção se perdem, em média, 38 dias por acidente de trabalho não mortal [2.14].

Por este motivo, têm sido recentemente desenvolvidas iniciativas com o objectivo de diminuir a sua ocorrência, designadamente ao nível da elaboração de directivas e de normas europeias cobrindo a concepção, o controlo da qualidade e a utilização deste tipo de estruturas.

2.4. Instrumentos para a garantia da qualidade

A garantia da qualidade constitui um elemento essencial em qualquer indústria ou processo produtivo, já que estabelece um vínculo entre as intenções (definição de níveis da qualidade baseados em critérios de segurança, normas, regulamentos, etc.) e a sua materialização. Correntemente, a definição de qualidade encontra-se associada à conformidade com os requisitos, à adequação ao uso, e à aptidão para a finalidade ou à satisfação do cliente.

A qualidade de qualquer processo construtivo passa por uma boa definição das exigências conceptuais do projecto e pela sua transposição para a fase de execução, na selecção de processos e técnicas, na qualidade intrínseca dos materiais e dos componentes a incorporar na obra e na adequada qualificação dos diversos intervenientes [2.4].

A indústria da construção dispõe de vários instrumentos de apoio à implementação de acções de garantia da qualidade, nomeadamente: a legislação de base, que abrange os regulamentos e as directivas comunitárias, a actividade de normalização, a actividade de homologação de sistemas e produtos da construção, a actividade de certificação de produtos e de sistemas da qualidade de empresas, e a actividade de revisão do projecto [2.4].

Assim, importa salientar a importância da Directiva dos Produtos para a Construção (DPC) [2.15], a qual introduziu novos deveres para os clientes e projectistas. O conceito que enforma a Directiva baseia-se na cooperação concertada entre equipas multi-disciplinares do sector da construção, de modo

a produzir e disponibilizar informação detalhada, bem como a elevar os padrões de segurança e saúde em cada projecto, estando subjacente a este conceito que sejam disponibilizados os recursos apropriados para atingir os fins propostos.

As oportunidades criadas a partir da Directiva surgem assim de modo relevante, porquanto se baseiam num projecto de gestão sólido e numa filosofia holística da gestão do risco.

Todavia, as regulamentações foram, em geral, interpretadas pela indústria de um modo simplista, frequentemente não aplicadas ou aplicadas de modo isolado, esvaziando-se assim o objectivo para que foram criadas. Acresce que nem sempre as regulamentações da Directiva foram transpostas para o direito nacional do modo mais óbvio e prático, deixando margem para diferentes interpretações e considerandos [2.16].

2.4.1. Aprovações técnicas europeias

A Directiva sobre os Produtos da Construção estabelece um mecanismo através do qual é atribuída uma marcação CE aos produtos considerados aptos a serem usados, assinalando a sua conformidade com as especificações técnicas aplicáveis e a presunção da sua aptidão ao uso.

Sendo obrigatório que um produto posto à venda na UE respeite as Directivas que se lhe aplicam, um fabricante dispõe de três tipos de especificações técnicas que lhe permitem demonstrar a conformidade do produto com os requisitos essenciais estabelecidos [2.4]:

- Normas nacionais correspondentes à transposição de normas europeias harmonizadas;
- Aprovações técnicas europeias (apreciações técnicas favoráveis de aptidão ao uso dos produtos não normalizados, estabelecidas com base na satisfação das exigências essenciais das obras onde esses produtos sejam incorporados);
- Especificações técnicas nacionais reconhecidas a nível comunitário, desde que não existam normas harmonizadas.

As Aprovações Técnicas Europeias (ATE) podem ser concedidas nos casos em não existam ainda normas europeias harmonizadas sobre o produto em questão, se a Comissão Europeia considerar que não existem ainda condições para o desenvolvimento destas normas, ou se o produto apresentar desvios importantes relativamente às normas harmonizadas existentes. As ATE são concedidas por organismos designados para o efeito pelos respectivos estados membros, os quais se agrupam na Organização Europeia de Aprovação Técnica (EOTA – *European Organisation for Technical Approvals*), criada em 1990 em cumprimento da DPC.

Portugal encontra-se representado na EOTA através do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). As Aprovações Técnicas Europeias são válidas para todos os países da União Europeia por um período de cinco anos, que pode ser posteriormente renovado.

2.4.2. Homologação de produtos e sistemas de construção

As origens da homologação de produtos, sistemas ou processos de construção fundamentam-se no Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU), de 1951, que no seu artigo 17º condiciona a um parecer do LNEC a aplicação de novos materiais de construção, para os quais não existam especificações oficiais nem suficiente prática de utilização.

O documento de homologação (DH) de um produto ou sistema inclui, para além da decisão de homologação, uma descrição geral, a enumeração das suas características, a apreciação, o campo de aplicação, regras para o seu armazenamento, transporte e aplicação em obra, e as características e respectivas tolerâncias a avaliar no âmbito da realização de ensaios de recepção [2.4]. Os DH são, em geral, válidos por três anos.

O LNEC concede também homologações com certificação. Neste caso, a produção dos materiais, produtos ou sistemas é submetida a controlo interno permanente, da responsabilidade do fabricante. O LNEC, por sua vez, realiza um controlo externo, que inclui a realização de visitas anuais, sem aviso prévio, às instalações de fabrico, para auditar as condições de produção e os resultados do controlo da qualidade do fabricante, e para proceder à eventual recolha de amostras para posterior ensaio no LNEC. Neste caso, o Documento de Homologação não tem limite de validade previamente definido, considerando-se válido enquanto se mantiverem as condições de produção e forem satisfatórios os resultados dos ensaios e verificações promovidos pelo LNEC no âmbito da certificação [2.4].

2.4.3. A qualidade no processo de construção de estruturas provisórias

Os requisitos da qualidade que se colocam na execução de projectos de estruturas provisórias são, no mínimo, os aplicáveis ao projecto de qualquer estrutura de engenharia civil. A definição de níveis da qualidade é de grande importância, pois permite fazer uma quantificação e avaliação técnica precisas da qualidade pretendida e dos objectivos definidos para cada situação [2.4]. Em particular, referem-se os requisitos de resistência mecânica e estabilidade, estipulados na Directiva sobre os Produtos da Construção [2.15], segundo os quais qualquer obra deve ser concebida e construída de modo que as forças susceptíveis de agir, durante a sua construção e a sua utilização, não produzam nenhum dos acontecimentos seguintes: (i) desabamento total ou parcial da obra, (ii) deformações de grau inadmissível, (iii) danos noutras partes da obra, das instalações ou do equipamento instalado, como resultado de deformações importantes dos elementos resistentes, e (iv) danos desproporcionados relativamente à sua causa primeira, resultantes de acontecimentos acidentais. A obra deve ser concebida e construída de modo a não apresentar riscos inaceitáveis de acidentes durante a sua utilização ou funcionamento, nomeadamente riscos de escorregamento e de queda de materiais ou pessoas.

Correntemente, é no caderno de encargos que se encontram expressos pelo projectista, de uma forma técnica e quantificável, os níveis da qualidade exigidos pelo cliente. É neste documento que se encontra condensada toda a informação relativa à selecção de materiais, às exigências que têm de satisfazer e à forma da sua verificação, através de planos de inspecção e ensaio, com definição de regras para a sua

aceitação e rejeição. É ainda neste documento que se definem as formas de executar os trabalhos, visando o cumprimento dos objectivos consignados nas peças desenhadas dos projectos. Porém, apesar da reconhecida importância dos cadernos de encargos, verifica-se que a sua elaboração é muitas vezes pouco ajustada à obra em questão, por falta de tempo ou por ignorância [2.4].

Ao nível do empreiteiro e, em particular, da direcção da obra, a qualidade da construção depende muito da sua capacidade técnica e da organização do trabalho, utilizando de forma inteligente todo o potencial de recursos humanos envolvidos e responsabilizando o pessoal pelos resultados da sua actividade.

A escassa formação do pessoal operário constitui uma das causas da falta de qualidade das estruturas provisórias.

2.5. Prumos telescópicos extensíveis

2.5.1. Caracterização dos elementos

Os prumos são elementos estruturais utilizados em operações de construção, reforço ou reabilitação de estruturas permanentes, servindo de suporte a estas estruturas, por insuficiente capacidade resistente ou de rigidez das mesmas.

Os prumos telescópicos extensíveis, ver a Figura 2.9, são elementos estruturais constituídos por dois tubos, exterior e interior, de secção tubular circular. A transmissão das forças entre o tubo exterior e o tubo interior é efectuada através de um sistema constituído por uma cavilha e uma porca roscada. A cavilha é introduzida num dos orifícios existentes no tubo interior (tubo de menor diâmetro exterior), e através do aperto da porca roscada contra o sistema da cavilha, materializa-se a fixação da posição dos dois tubos e, conseqüentemente, a altura desejada do prumo. Cada tubo possui duas bases, superior (plana ou em garfo) e inferior, pelas quais as tensões são introduzidas no elemento e transmitidas do prumo à fundação, respectivamente.

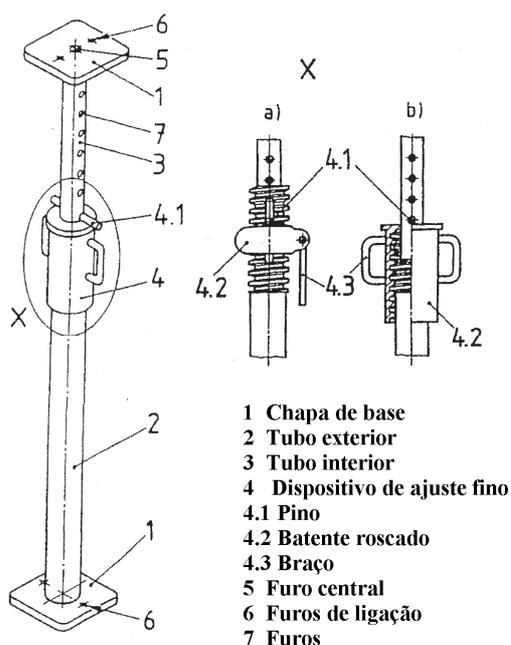


Figura 2.9 - Prumo telescópico extensível: vista geral e designação dos componentes.

Os materiais utilizados na produção dos prumos são, na maioria dos casos, o aço ou o alumínio, cujas propriedades devem estar em conformidade com as normas europeias. Na presente Dissertação, abordam-se apenas os prumos de aço – claramente os mais correntemente utilizados em Portugal. Os tubos são, em geral, constituídos por aço laminado a quente e a secção verifica os requisitos da classe 1 ou 2 de acordo com o Eurocódigo 3: Parte 1-1 [2.17].

Estes elementos devem ser dimensionados de forma a garantir o bom funcionamento durante o seu período de vida útil, isto é, não devem condicionar o modo de colapso ou a conformidade com a regulamentação por parte de qualquer elemento da estrutura permanente.

No entanto, registam-se diversos acidentes no sector da construção directamente ligados à qualidade e utilização deste tipo de elementos estruturais.

Enquadram-se nas anomalias mais comuns, as deficientes condições de transmissão de tensões para a fundação (devido a falta de resistência da fundação, a instabilidade da base ou a assentamentos do solo de fundação), a falta de verticalidade do prumo, a existência de excentricidades nos pontos de aplicação das forças, a existência de danos nos prumos, a insuficiente materialização das ligações existentes, e ainda a deficiente colocação e distribuição das cargas, devido a:

- Má distribuição das forças aplicadas ao prumo, devida a colocação inadequada do betão ou armazenamento de equipamentos;
- Má distribuição das forças aplicadas ao prumo, devida a colocação inadequada destes elementos. Como por exemplo, no caso de lajes aligeiradas quando se coloca os prumos sobre a zona dos cocos e não sobre a grelha de vigas.

A quantificação e contabilização das acções a que este tipo de elementos estruturais está sujeito constituem outro problema. As acções são essencialmente verticais (ver 2.5.2), sendo as mais importantes as transmitidas pela estrutura permanente e as acções variáveis a que esta está sujeita. No entanto os prumos também estão sujeitos a forças horizontais, na maior parte das vezes mal contabilizadas, provocadas por:

- Acção do vento nos prumos;
- Existência de imperfeições geométricas (excentricidades dos pontos de aplicação das forças, curvatura inicial);
- Impacto de máquinas ou pessoas com os prumos;
- Assentamentos diferenciais do terreno de fundação;
- Existência de defeitos na chapa das bases dos prumos, que as tornam não complanares com a fundação/superfície de transmissão das cargas.

O panorama geral em que se insere a utilização deste tipo de elementos, aliado ao recurso à subcontratação de empresas e aluguer de equipamentos, leva a que muitas vezes se utilizem prumos já

com um nível significativo de corrosão e exibindo danos visíveis que obviamente diminuem significativamente a sua capacidade resistente, facto este muitas vezes subavaliado.

As operações de montagem e desmontagem dos prumos são fases críticas do processo de implementação da solução estrutural provisória. Se as fases de montagem e desmontagem forem realizadas de modo adequado, evitam-se possíveis problemas que podem pôr em perigo a integridade de elementos ou mesmo da própria estrutura permanente, durante a fase construtiva ou em operações de reforço e reabilitação de estruturas.

As figuras 2.10 a 2.19 ilustram algumas das anomalias que afectam o comportamento destes elementos.



Figura 2.10 – Deficiente acondicionamento dos prumos.



Figura 2.11 – Defeitos nas chapas das bases dos prumos.



Figura 2.12 – Deficientes condições da fundação (1).



Figura 2.13 - Deficientes condições da fundação (2).



Figura 2.14 – Curvatura inicial (1).



Figura 2.15 – Curvatura inicial (2).



Figura 2.16 – Transmissão de cargas irregular.



Figura 2.17 – Excentricidades na transmissão de cargas (1).



Figura 2.18 – Excentricidades na transmissão de cargas (2).



Figura 2.19 – Utilização indevida de componentes.

É evidente que destes factores podem resultar imperfeições de valor superior ao previsto na norma de dimensionamento, colocando vidas e a integridade das estruturas em perigo. Num estudo da *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA) [2.18], estimou-se que cerca de 16% dos prumos apresentavam desvios maiores ou iguais a $1,5^\circ$ da vertical. Burrows [2.19] classificou 30% das obras analisadas na sua Tese de Doutoramento como inadequadas por não respeitarem as tolerâncias normativas.

Todas estas anomalias e omissões contribuem, em maior ou menor grau, para que no sector da construção sejam reportados múltiplos acidentes de trabalho, ver as figuras 2.20 e 2.21, alguns deles fatais.



Figura 2.20 – Acidente com prumos (1).



Figura 2.21 – Acidente com prumos (2).

2.5.2. Caracterização das acções verticais aplicadas aos prumos telescópicos extensíveis

Vários autores concluíram, dos estudos efectuados, que a fase construtiva é aquela onde existe maior probabilidade de ocorrer uma anomalia que pode implicar a perda de funcionalidade da estrutura ou mesmo o seu colapso. No caso particular de estruturas de betão a rotura das estruturas provisórias, por insuficiente resistência dos elementos que as compõem ou devida a valores excessivos das cargas aplicadas, é uma das causas mais comuns do colapso das estruturas permanentes.

Os tipos de cargas verticais a que os prumos telescópicos estão sujeitos podem ser resumidos a:

- (i) acções permanentes – (i.1) peso próprio do betão, armaduras e cofragem, e
- (ii) acções variáveis – (ii.1) devidas à acção dos trabalhadores e da maquinaria utilizada durante a fase de betonagem, e (ii.2) forças dinâmicas devidas à projecção do betão.

O tipo e a magnitude das cargas consideradas durante o projecto de estruturas provisórias, e em particular no caso de prumos telescópicos extensíveis, variam não só internacionalmente mas também a nível nacional.

Enquanto que as acções permanentes são fáceis de quantificar, as acções variáveis encontram-se caracterizadas em códigos nacionais e internacionais de modo muito diverso. Acresce que, contrastando com a abundância de informação disponível na fase de projecto da estrutura permanente para o período de vida útil regulamentar, existe pouca informação sobre o projecto de estruturas provisórias durante a sua fase construtiva.

Muitos autores apontam falhas aos métodos existentes, utilizados na quantificação destas acções, ou criticam a falta deles, nomeadamente pela falta de uma análise de fiabilidade na avaliação da sua magnitude e na sua distribuição pelos vários elementos.

Um grande número de acidentes e colapsos ocorrem durante a betonagem, sendo uma das causas o excesso de carga aplicada sobre os prumos, representando mais de 60% do total de acidentes no sector da construção, segundo Hadipriono [2.20].

Recentemente têm sido desenvolvidos esforços por vários investigadores para superar estas falhas.

Ikaheimonen [2.21] estudou a variação das forças aplicadas a vários prumos fazendo variar a espessura das lajes, a rigidez dos prumos e das fundações, as imperfeições existentes nos prumos e o tipo de carregamentos considerados. Este autor nota que as forças aplicadas aos prumos durante a fase construtiva são em média iguais às forças devidas às acções permanentes. No entanto, existe uma grande dispersão com picos elevados que podem ultrapassar largamente esses valores, em particular durante a betonagem do betão, podendo ser superiores em 30% ao valor da carga estática devido ao peso próprio do betão. Aponta várias razões que justificam a elevada dispersão de valores, como a força inicial nos prumos, o seu espaçamento e a rigidez da fundação. Destes estudos, o autor conclui que no caso de lajes espessas, os códigos existentes impõem um valor para as acções variáveis que subestima o valor real, sugerindo que se adopte um factor de segurança parcial de 1,5 aplicado às acções permanentes, valor igualmente recomendado por Duan et al [2.22].

Ferguson [2.23], apresenta um resumo da influência de diferentes factores na variabilidade e na não-uniformidade da distribuição das cargas pelos prumos, nomeadamente, (i) método de betonagem, (ii) apoio insuficiente, devido a folgas no sistema de transmissão de forças entre a cofragem e os prumos, (iii) assentamentos diferenciais, (iv) rigidez dos elementos.

Têm sido igualmente desenvolvidos e propostos métodos numéricos que pretendem simular a acção das diferentes cargas na laje e nos prumos, conseguindo-se deste modo obter os esforços correspondentes, e avaliar a influência de vários parâmetros. As referências [2.24-2.27] apresentam os resultados de vários estudos realizados por via de métodos numéricos.

2.5.3. Propostas para a melhoria da qualidade dos prumos telescópicos extensíveis

2.5.3.1. Requisitos gerais

De modo a atingir-se uma redução significativa no número de feridos e de fatalidades resultantes de acidentes de trabalho, exigir-se-á do sector da construção que se regule pelas melhores práticas de segurança e organização.

No entanto, a regulação e a fiscalização, embora tenham um papel importante na estratégia a implementar, não são ferramentas que por si só permitam alcançar a mudança fundamental. Para que o objectivo de reduzir o número de acidentes no trabalho seja alcançado, é necessário concertar todos os

agentes envolvidos no sector da construção, incluindo os que produzem, os que projectam, e os que montam e utilizam sistemas de prumos telescópicos extensíveis.

Torna-se evidente para as melhores empresas e gestores que a existência de regulação na segurança e na saúde são indicadores credíveis da performance global do seu negócio, dado que os princípios gerais que estão na sua génese, isto é, o planeamento, a organização, o controlo da qualidade, monitorização, avaliação e revisão dos processos, podem ser aplicados a outros ramos onde a gestão do risco esteja presente.

Todavia, no sector da construção existe falta de pessoal qualificado, o que torna de capital urgência a aposta no investimento nos recursos humanos, seja através da contratação de novos quadros, ou na valorização dos existentes promovendo a formação, planeamento e gestão eficiente dos recursos e meios tecnológicos existentes e futuros, assim como investindo na inovação através da investigação e desenvolvimento.

No caso particular dos prumos telescópicos é necessário realizar *a priori* uma avaliação dos riscos existentes associados a cada utilização, de modo a que se conheça o melhor possível o tipo de acidentes que podem resultar e de seguida delinear e implementar as medidas preventivas necessárias para minorar ou eliminar o risco. Deve igualmente ser promovida uma gestão dos riscos remanescentes. Esta abordagem ao problema permite que os trabalhos possam ser devidamente planeados e que os métodos de trabalho e equipamentos seleccionados sejam mais eficazes.

A cadeia de responsabilidades deve ser directa e precisa, delineando de modo claro quais os deveres de cada um dos agentes. Nomeadamente no caso de sistemas de prumos telescópicos fornecidos por empresas especializadas, deve ter-se em muita atenção se os sistemas fornecidos requerem, ou não, um projecto adicional para cada utilização específica, e se os desenhos técnicos contêm a informação necessária. O utilizador final deve possuir toda a informação necessária para confirmar se o processo de montagem, utilização, desmontagem e armazenamento dos prumos é efectuado de forma segura. Para isso recomenda-se que exista uma cooperação concertada entre os vários agentes.

Desde a publicação das primeiras normas e estudos sobre estruturas provisórias muitas coisas mudaram, registando-se actualmente uma maior atenção dada ao processo das estruturas provisórias, em grande parte devido às normas que entretanto foram sendo publicadas, que reforçaram a responsabilidade dos vários agentes envolvidos. Este ponto é ainda mais importante dado se ter caminhado para a subcontratação da execução das estruturas provisórias, cada vez mais complexas e com utilização de cada vez mais produtos (elementos) específicos, fornecidos por empresas especializadas. As vantagens da especialização nem sempre incluíram o aumento da qualidade e quantidade da informação/serviços prestados, facto que levanta várias inquietações, postas a nu por um relatório da *Health and Safety Executive* (HSE) [2.28] onde após um estudo das práticas actuais de projecto e execução das estruturas provisórias, em particular de prumos telescópicos extensíveis, se conclui que:

- Existe uma falta de conhecimento dos fundamentos da estabilidade dos prumos e dos princípios básicos envolvidos;
- A acção do vento raramente é contabilizada e, quando tal acontece, é tida em conta através de métodos diferentes dos especificados nas normas;
- Não existe na fase de projecto a preocupação de contrapor novos cenários aos estimados inicialmente. Deste modo diferentes condições em obra (qualidade das fundações, por exemplo) do que as admitidas em projecto não são consideradas;
- As hipóteses simplificativas assumidas muitas vezes não têm tradução em obra, como por exemplo a existência de contraventamentos;
- Faltam especialistas e por esse facto não existe uma cadeia de revisão dos projectos e inspecção aos locais das obras;
- O cumprimento em obra dos limites das tolerâncias na execução dos projectos é insatisfatório.

Face a este panorama é urgente rever os métodos que na prática são utilizados no fornecimento, projecto, execução e inspecção deste tipo de estruturas, cujos pontos-chave são:

- A competência do projectista;
- A gama de informação disponibilizada;
- A qualidade da supervisão e inspecção;
- A competência daqueles que executam as estruturas provisórias.

Deste modo, o projecto e inspecção dos prumos devem ser realizados por pessoal competente e com experiência neste tipo de trabalho de acordo com as normas e manuais aplicáveis. Os prumos devem ser igualmente erigidos por pessoal qualificado. Os trabalhadores envolvidos na construção e manutenção de prumos devem estar informados sobre o método de construção, através de desenhos e pormenores do projecto, dos princípios e principais simplificações do projecto e das suas tolerâncias máximas.

As novas normas já disponibilizam melhores metodologias de dimensionamento e quantificação das acções e resistências. No caso das acções, é dado maior relevo às forças horizontais que podem surgir durante a fase de serviço destes elementos. A sua inclusão no processo de dimensionamento dos prumos vai, em geral, diminuir a carga máxima admissível destes elementos. Uma das soluções para não inviabilizar o seu uso é a adopção de contraventamentos de forma a conferir rigidez e aumentar a resistência do sistema.

Todos os materiais e componentes utilizados na concepção dos prumos devem ser os adequados e estar em conformidade com as especificações apropriadas. Os materiais e componentes devem assim ser fabricados de acordo com as normas regulamentares vigentes e produzidos por métodos que possuam sistemas de controlo da qualidade, o que deve ser evidenciado pela existência de certificados emitidos por entidades externas competentes e independentes.

Na obra, os materiais e componentes devem ser identificados correctamente e inspeccionados para averiguar a existência de danos, corrosão e outros defeitos que possam afectar a resistência dos prumos. A utilização de elementos danificados deve depender de parecer de um engenheiro qualificado. Prumos que exibam os seguintes defeitos não devem ser utilizados:

- Prumo com uma curvatura visível;
- Prumo com corrosão severa;
- Chapa da base danificada;
- Pino danificado ou inexistente;
- Dispositivo de ligação dos tubos ineficaz.

Os prumos devem ser acondicionados em locais próprios e adequados, e erigidos segundo o plano de construção apropriado. Antes de qualquer fase do processo de construção (colocação dos prumos na estrutura, início do carregamento, desmontagem), os prumos devem ser inspeccionados tendo em conta o plano de inspecção seguinte:

- Verificar o estado das chapas das bases. No caso destas apresentarem defeitos de forma, deve proceder-se ao seu nivelamento para assegurar uma distribuição uniforme de tensões à fundação e condições de estabilidade do elemento durante o carregamento;
- Verificar o estado da protecção anticorrosiva do elemento;
- Limpar e lubrificar a zona de ajuste do comprimento dos prumos;
- Verificar o estado das zonas de soldadura;
- Remover o betão acumulado ao longo do elemento;
- Verificar o estado das fundações;
- Verificar se o prumo exhibe imperfeições fora das tolerâncias recomendadas no projecto;
- Substituir qualquer peça defeituosa.

As fundações devem ter as condições adequadas para suportar as tensões transmitidas por estes elementos, sem prejudicar o comportamento da estrutura permanente. O solo superficial deve ser removido e, no caso do solo da fundação possuir fraca resistência, devem ser realizadas medidas correctivas como, por exemplo, a melhoria da resistência do terreno por compactação. A fundação deve ser plana e horizontal. Se as condições da fundação forem inclinadas, este requisito deve ser igualmente respeitado. A possibilidade de assentamentos do solo da fundação deve ser prevista no projecto deste tipo de estruturas.

No caso de elementos que suportam a cofragem de uma obra em betão, deve ser controlada a taxa de betonagem, evitar a realização da betonagem a grandes alturas, assim como acumulações localizadas de betão.

Os elementos devem ser desmontados de uma forma correcta, de modo a não serem danificados e facilitar a sua recolocação em obra.

2.5.3.2. Dono de obra

As decisões inicialmente tomadas pelo dono de obra que contrata os trabalhos condicionam desde logo o nível de segurança e saúde do projecto de construção. Sendo esta a fase de determinação de todo o ambiente de segurança e saúde do projecto, os contratos deverão ser adjudicados em função dos princípios da boa gestão financeira, ou seja, da realização de uma obra em conformidade com os objectivos fixados, que satisfaça as necessidades do utilizador e proporcione, a longo prazo, um equilíbrio entre a qualidade e os custos.

No entanto, a questão da qualidade da construção é igualmente de extrema importância, já que influencia os aspectos financeiros, mas mais importante, é decisiva para salvaguardar a segurança de vidas humanas e da própria estrutura. Ao seleccionar os contratantes e todos os outros intervenientes, é fundamental assegurar que estejam aptos a realizar eficazmente os trabalhos e a gerir as questões de segurança e saúde no trabalho. Para tal, é indispensável a realização de um caderno de encargos completo e de qualidade.

O dono da obra ou o director/fiscal da obra deve nomear um ou vários coordenadores em matéria de segurança e de saúde, assim como assegurar que, antes da abertura do estaleiro, seja estabelecido um plano específico de segurança e de saúde.

Durante a fase de concepção do projecto, o director/fiscal e, eventualmente, o dono da obra devem ter em consideração os princípios gerais de prevenção em matéria de segurança e saúde previstos na Directiva 92/57/CEE (Decreto-Lei n.º 273/2003) [2.29], que trata das prescrições mínimas de segurança e de saúde a aplicar no sector da construção onde os trabalhadores se encontram expostos a riscos particularmente elevados [2.51].

A fiscalização deve ainda zelar pelo respeito em obra das disposições constantes nos projectos de especialidades, não só em relação aos materiais aplicados mas também ao processo construtivo.

Devem ser agendadas reuniões periódicas de coordenação intersectorial e interdisciplinar (fiscalização, projectistas e empreiteiros) para a avaliação das questões de projecto e execução da obra, como instrumento de garantia da qualidade de qualquer construção de Engenharia Civil.

2.5.3.3. Fabricante

Uma solução altamente desejável consiste na elaboração de manuais de utilização, onde seja feita referência aos documentos legislativos e normativos observados na produção do sistema, aos instrumentos de controlo da qualidade utilizados, e ao campo de aplicação, em geral, do sistema [2.4]. Os métodos de cálculo utilizados na determinação das resistências devem ser explicitados o mais detalhadamente possível, fornecendo-se a informação necessária para posteriores análises de soluções estruturais diferentes das soluções-tipo indicadas pelo fabricante. No caso de existir uma base de dados experimental, esta deve ser disponibilizada de modo a que o projectista tenha noção da “margem de segurança” existente entre os valores de cálculo e os valores experimentais.

Deverá ainda ser fornecida informação pormenorizada sobre as condições de armazenamento, inspecção e manipulação dos elementos, bem como sobre as condições e procedimentos de montagem, de modo a poder assegurar-se a resistência indicada. Estes manuais poderão constituir uma ferramenta extremamente útil para os utilizadores do sistema construtivo, nomeadamente para os projectistas, fiscalização e directores de obra, facilitando a elaboração de novos projectos ou de manuais para a respectiva montagem e inspecção [2.4].

Aos fabricantes é exigido um controlo da qualidade realizado por uma entidade competente e independente, que emitirá certificados de conformidade com as normas aplicáveis. O controlo da qualidade deve incidir sobretudo nos requisitos técnicos e deve avaliar as características geométricas e a capacidade de carga admissível de um qualquer tipo de prumos, recorrendo, nomeadamente à realização de ensaios. A existência dos manuais pode facilitar e acelerar os processos de apreciação técnica, necessários à concessão de homologações, certificações ou aprovações técnicas.

2.5.3.4. Projectista

Um relatório do *Health and Safety Executive* (HSE) [2.16] refere que existe uma opinião geral no sector da construção, e suportada pela normalização existente, que confere um relevo importante ao projectista enquanto garante da segurança de uma estrutura. Assim pretende-se que os projectistas dimensionem estruturas mais seguras e de construção, manutenção e demolição mais sustentáveis. Uma das conclusões mais importantes deste relatório refere-nos que metade dos acidentes podiam ter sido evitados pela intervenção do projectista, e um sexto dos acidentes é parcialmente da responsabilidade dos projectistas envolvidos no dimensionamento da estrutura provisória. Todavia, não nos podemos esquecer da relevância dos aspectos operacionais dado que influem de modo marcante no potencial das estruturas.

Em geral, os projectistas são ensinados a optar por uma perspectiva conservativa sobre cada projecto e a sua envolvente, dependentes de códigos e regulamentos e da experiência adquirida com a revisão de projectos similares bem sucedidos. Enfatiza-se contudo, a existência de algumas excepções a este procedimento, embora limitadas pela assunção dos riscos que a inovação acarreta, verificando-se que a maioria dos donos da obra prefere as soluções tradicionais às inovações tecnológicas.

Deste modo, muitos projectistas desconhecem, ou não estão informados de modo actualizado, sobre os novos processos e técnicas de construção, pelo que muitos projectos não patrocinam as melhores práticas de segurança e saúde no trabalho.

Todos os projectos devem ser de qualidade, sobretudo no respeito pelos regulamentos técnicos aplicáveis e com as melhores práticas da profissão de Engenheiro Civil, mas também na vertente relacionada com a conformidade com os requisitos e com o uso especificado pelo dono de obra.

Nenhum projecto deve ser realizado com base em dados insuficientes. Deve estar claro quem é que tem a responsabilidade de obter os dados essenciais para garantir um projecto de qualidade. Aspectos relacionados

com as condições do solo, disponibilidade e estado de conservação do material (para contraventamentos, por exemplo) e o método escolhido pelo empreiteiro para realizar a estrutura permanente são pontos-chave.

No processo de desenvolvimento de um projecto de qualidade, o projectista deve procurar a melhoria contínua através da confrontação sistemática da solução obtida com simples regras de cálculo e sobretudo bom senso, de modo a aferir a validade das hipóteses admitidas.

Na informação disponibilizada pelo projectista devem constar quais foram as hipóteses de dimensionamento que admitiu, as normas que seguiu, as acções consideradas, as forças de cálculo obtidas e os vários passos da verificação da segurança realizada. Devem ainda fazer parte desenhos claros da solução estrutural escolhida, pormenorizando aspectos locais de relevante importância para o correcto funcionamento da estrutura.

Não obstante o respeito por estas directrizes, os projectistas especializados neste campo devem procurar ir ao terreno antes e após a execução do projecto para conferir se as hipóteses assumidas respeitam as condições em obra (propriedades do solo, tolerâncias na montagem, por exemplo).

Um dos instrumentos relevantes para o controlo da qualidade dos projectos reside na sua revisão por outros projectistas, com experiência compatível com a dimensão e complexidade do projecto em questão [2.4]. A revisão de um projecto consiste na verificação da sua adequação às exigências funcionais, da sua conformidade com os regulamentos em vigor e com as regras de prudência aconselháveis para o tipo de obra em questão, passando pela verificação completa dos cálculos, desenhos, especificações e medições. O caderno de encargos deve também ser revisto e, se tal se justificar, ser alterado para verificar os requisitos gerais.

2.5.3.5. Empreiteiro

Quando um empreiteiro concorre à construção de uma dada estrutura, está a afirmar que é capaz de a fazer, isto é, diz-se competente. Depreende-se desta afirmação que se assume competente para gerir os riscos para a segurança e saúde dos seus trabalhadores. Como tal, deve possuir e utilizar todos os meios e conhecimentos técnicos indispensáveis para executar a estrutura de modo seguro e em total respeito pelas disposições técnicas contidas nos projectos de especialidades.

Ao nível do empreiteiro e, em particular, da direcção da obra, a qualidade da construção depende muito da sua capacidade técnica e de organização do trabalho, utilizando de forma inteligente todo o potencial de recursos humanos envolvidos e responsabilizando o pessoal pelos resultados da sua actividade. Um instrumento para a garantia da qualidade na construção seria a obrigatoriedade da certificação dos empreiteiros em relação a normas internacionais sobre sistemas da qualidade, segurança e higiene no trabalho.

Salienta-se novamente a necessidade de existir coordenação entre os vários intervenientes de modo a garantir a correcta execução da estrutura, respeitando o previsto nos projectos de especialidades.

2.5.3.6. Subempreiteiro

Recomenda-se que na subcontratação se privilegiem empresas especializadas na área das estruturas provisórias, que evidenciem o respeito dos seus produtos e procedimentos de acordo com as melhores práticas e normas aplicáveis. Estas empresas devem ter a capacidade de proceder a uma avaliação e gestão do risco associado a este tipo de estruturas. Este processo deve incluir:

- Identificação do nível de risco de acidentes;
- Avaliação das consequências provocadas pelos acidentes;
- Decisão sobre medidas preventivas ou medidas que reduzam o nível de risco;
- Implementação de um sistema de controlo, monitorização e correcção das mesmas.

2.5.3.7. Trabalhadores

Todas as pessoas na área de trabalho deverão possuir formação e competência, sendo por isso vantajoso consultar os trabalhadores em matéria de segurança e saúde no trabalho.

No entanto a escassa formação do pessoal operário constitui uma das principais causas da falta de qualidade em estruturas provisórias. A solução aconselhável para este problema consiste na promoção de cursos de formação profissional de curta duração, e na preparação de documentos escritos, descrevendo de uma forma simples e clara os procedimentos a respeitar [2.4].

2.5.3.8. Recomendações para uma correcta utilização

Apresentam-se nas Figuras 2.22 a 2.34 algumas soluções construtivas com aplicabilidade prática, que permitem resolver situações, que não sendo corrigidas, podem pôr em perigo a segurança da construção.

2.5.3.9. Outras propostas

Deve ser constituída uma equipa que integre elementos da fiscalização, projectista e subempreiteiro, com a função de desempenhar um papel activo na acção de prevenção e inspecção do processo de construção de estruturas provisórias. Além disso, deve ser claramente definido que tipo de informação deve estar disponível e quem é responsável pela mesma. Esta equipa ficaria também com o ónus da responsabilidade sobre qualquer acidente que viesse a ocorrer, devendo existir uma hierarquia bem definida de responsabilidades e ser iniciada uma investigação que permita identificar a causa, e apresentar medidas correctivas para evitar a eventualidade de novo acidente no futuro, ou minimizar as suas consequências.

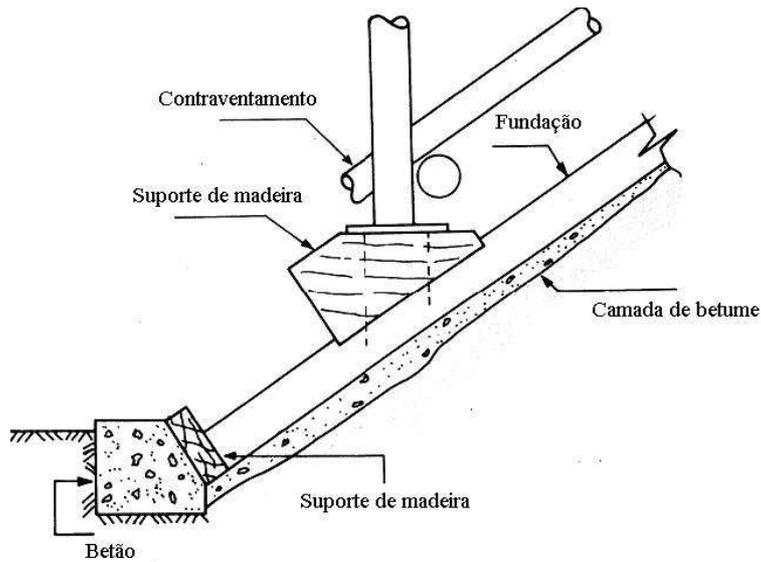


Figura 2.22 – Exemplo de acessório para colocação do prumo em fundações inclinadas.

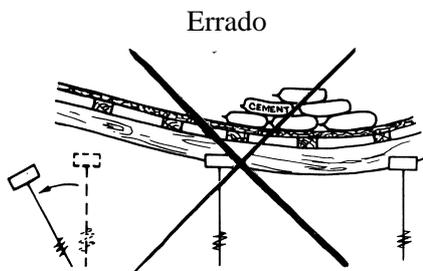


Figura 2.23 – Queda de prumos devido a flexão localizada.

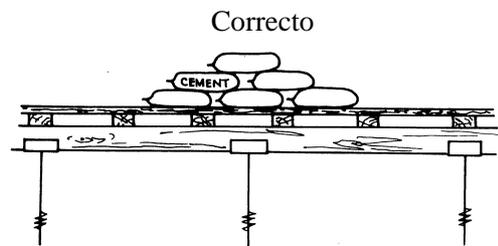


Figura 2.24 – Aplicação da carga de modo satisfatório.

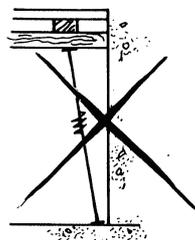


Figura 2.25 – Prumo com imperfeição inicial.

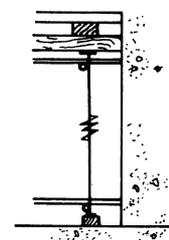


Figura 2.26 – Prumo com configuração correcta.

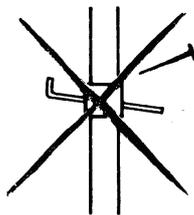


Figura 2.27 – Pino incorrecto.



Figura 2.28 – Pino correcto.

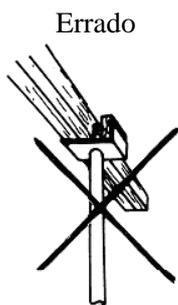


Figura 2.29 – Existência de excentricidades da carga.

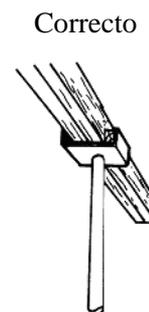


Figura 2.30 – Posição correcta (centrada).

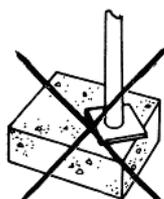


Figura 2.31 – Condições insuficientes da fundação (1).

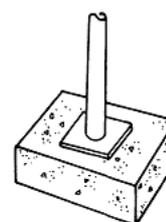


Figura 2.32 – Fundação adequada (1).

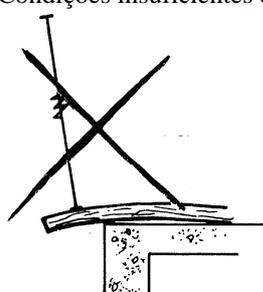


Figura 2.33 – Condições insuficientes da fundação (2).

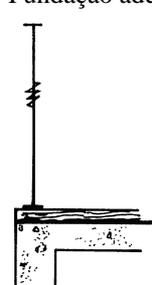


Figura 2.34 – Fundação adequada (2).

2.5.4. Normalização aplicável aos prumos telescópicos extensíveis

Só no começo dos anos 70, data em que ocorreu um grave acidente na Inglaterra provocado pelo deficiente desempenho da estrutura provisória utilizada na construção de uma ponte, é que foram criados os primeiros organismos com o objectivo de investigar esta área da engenharia civil e foram publicados os primeiros guias ou recomendações sobre o projecto, execução e utilização de estruturas provisórias.

De facto, o final da década de 60, princípios da década de 70, foi um período de grande actividade e inovação no sector da construção, depois dos tempos austeros do pós segunda guerra mundial. Novas fronteiras eram atingidas em todas as direcções, (i) nos projectos, (ii) materiais e (iii) escala das construções. Projectos de uma escala nunca antes tentada acarretavam riscos acrescidos, em particular na utilização de sistemas provisórios complexos. Como consequência dos acidentes com origem no colapso de estruturas provisórias ocorridos no Reino Unido nos anos 70, e em resultado de uma opinião pública cada vez mais interveniente e exigente, foi criado um comité de peritos sobre a presidência de S.L. Bragg para investigar o campo destas estruturas. Dos trabalhos deste comité resultou um documento muito importante para o sector, o *Bragg Report* [2.30].

Destacam-se algumas das recomendações apontadas neste relatório:

- Devem ser elaboradas normas que implementem os métodos de dimensionamento prescritos no relatório;
- Os projectos devem ser revistos, aprovados e assinados por um revisor competente;
- Deve ser dada oportunidade aos engenheiros especializados no campo das estruturas provisórias de intervir no processo de elaboração das normas;
- Deve ser nomeado um indivíduo com as qualificações apropriadas como Coordenador dos Trabalhos Temporários – *Temporary Works Coordinator* (TWC), em inglês – a quem deve ser dada a responsabilidade e a autoridade adequadas;
- Os fabricantes e fornecedores devem providenciar aos clientes uma base de dados experimental que suporte os valores das cargas (resistências dos elementos) apresentadas.

De acordo com uma das recomendações desse relatório, foram produzidas normas britânicas (nomeadamente a BS 5975:1982 [2.31]) que pretenderam estabelecer os princípios gerais para o fabrico, projecto, utilização e manutenção deste tipo de estruturas.

Desde esse período até os dias de hoje, fundamentalmente com a fundação do Comité Europeu de Normalização (CEN), foram sendo publicadas normas europeias sobre esta área, nomeadamente,

- BS 5975:1996, Code of practice for falsework [2.32];
- EN 1065:1998, Adjustable telescopic steel props [2.33];
- EN 12812:2004, Falsework – Performance requirements and general design [2.34].

2.5.4.1. Normas BS 5975:1996, BS 4074:1982, BS 5507 – Parte 3:1982

Na Grã-Bretanha, desde o relatório de Bragg [2.30] que têm sido desenvolvidos e divulgados estudos e normas sobre estruturas provisórias. Em particular a norma britânica BS 5975:1996 [2.32] fornece recomendações para o dimensionamento e o uso de estruturas provisórias. A norma inclui “soluções standard” para alguns tipos de elementos provisórios. A norma BS 4074:1982 [2.35] enuncia dois métodos para a obtenção da resistência característica de prumos, e a norma BS 5507 – Parte 3:1982 [2.36] descreve a metodologia a seguir na execução de ensaios de prumos telescópicos extensíveis.

2.5.4.1.1. Norma BS 4074:1982

No caso dos prumos telescópicos extensíveis, as dimensões geométricas e os critérios de utilização devem estar de acordo com o especificado nesta norma. A norma BS 4074:1982 indica as regras segundo as quais as características dos materiais utilizados nas várias componentes dos prumos se devem reger.

A norma estabelece duas vias para dimensionar os prumos, (i) através de gráficos que relacionam a força máxima admissível com o comprimento dos elementos, e (ii) através da realização de ensaios.

A norma define cinco prumos típicos e os comprimentos máximos e mínimos correspondentes (ver a Tabela 2.1). As dimensões das chapas de base e dos tubos, bem como a descrição das características geométricas das componentes dos cinco prumos estão incluídas nesta norma.

A norma britânica BS 4074:1982 apresenta dois gráficos (reproduzidos nas figuras 2.35 e 2.36), um para condições de forças concêntricas e outro no caso de existir excentricidade da força, nos quais o valor da resistência dos prumos é dado em função da altura do elemento. No entanto, estes valores apenas são válidos quando certas condições e tolerâncias dimensionais especificadas são verificadas: (i) os prumos não devem estar danificados, (ii) os prumos podem apresentar imperfeições, nomeadamente excentricidades da carga e curvaturas iniciais desde que os valores não ultrapassem certos limites - 25 mm para a excentricidade e curvatura inicial correspondente a um desvio máximo de 1,5 ° na base inferior.

Tabela 2.1 – Tipos de prumos segundo a BS4074:1982

Nº do prumo	Altura mínima do prumo (mm)	Altura máxima do prumo (mm)
1	1070	1820
2	1750	3120
3	1980	3350
4	2590	3960
5	3200	4870

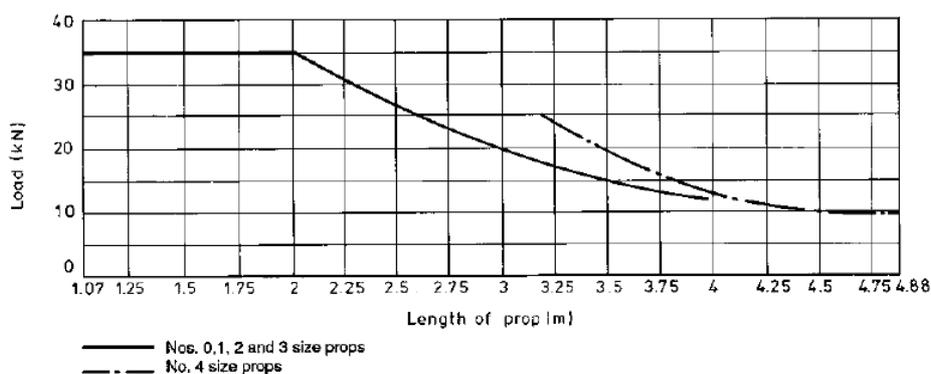


Figura 2.35 – Carga concêntrica.

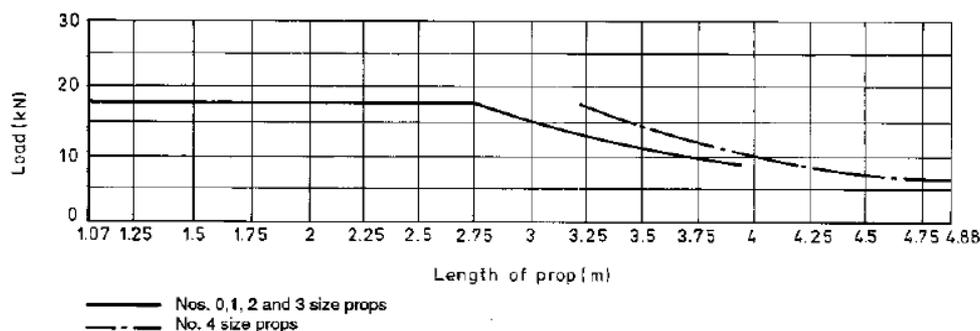


Figura 2.36 – Carga excêntrica.

No caso de se determinar a resistência dos prumos por via experimental, a norma indica que devem ser ensaiados no total 32 prumos, 16 prumos por cada altura (mínima e máxima) de acordo com o procedimento de ensaio indicado na norma BS 5507 – Parte 3:1982. Se o desvio padrão de cada série de 16 ensaios for menor a 0,18 então a resistência característica do prumo será dada por $F_K = \bar{X} - 1,75 \cdot s$, onde \bar{X} representa o valor médio obtido na série de 16 ensaios e s o respectivo desvio padrão.

2.5.4.1.2. Norma BS 5507 – Parte 3:1982

Na eventualidade de existir dúvida sobre a qualidade, composição ou condição do material ou elemento, ou quando a análise estrutural do elemento ou estrutura não for prática, e ainda quando não existir informação disponível sobre o comportamento do elemento (por exemplo, por estar em fase de desenvolvimento), deve proceder-se a ensaios de acordo com esta norma.

O ensaio deve cumprir os seguintes requisitos gerais:

- O ensaio deve, na medida do possível, tentar simular as condições e o modo como o elemento é utilizado em obra;
- O ensaio e as condições de ensaio devem ser facilmente reproduzíveis;
- Os ensaios devem ser realizados ou supervisionados por uma identidade independente.

O equipamento necessário, o procedimento a seguir nos ensaios bem como a estrutura do relatório dos ensaios é descrito na norma. A norma BS 5507 – Parte 3:1982 apenas especifica um tipo de imperfeição inicial a considerar no ensaio, sendo dada por uma curvatura inicial correspondente a uma rotação na base inferior de 1,5°. A velocidade do ensaio não deve exceder os 5 kN/min.

2.5.4.1.3. Norma BS 5975:1996

Todos os materiais utilizados no fabrico de elementos de estruturas provisórias devem respeitar as normas britânicas apropriadas. No caso do aço a norma relevante é a BS EN 10025:2004 [2.37]. Recomenda-se que a classe do aço utilizado não ultrapasse a classe S 275JR conforme a norma BS EN 10025:2004.

Elementos já utilizados devem ser sujeitos a acções de inspecção, para verificar possíveis defeitos. Se durante a inspecção forem detectadas imperfeições no elemento, estas devem ser corrigidas ou os elementos defeituosos removidos se for essa a melhor solução.

A norma indica ainda que é obrigação do fabricante fornecer ao cliente informação sobre o âmbito da sua utilização, as propriedades dos materiais que constituem cada componente/elemento (nomeadamente a entrega de certificados de conformidade com as normas relevantes), pormenores/esquemas de montagem, e valores máximos de força aplicada para diferentes condições de uso, por exemplo diferentes comprimentos do prumo, excentricidades da força, etc.

A norma BS 5975:1996 refere que os prumos telescópicos extensíveis devem satisfazer as exigências da norma BS 4074:1982. Refere que as chapas das bases dos prumos são em geral quadradas com 150 mm de

lado. A transmissão de forças entre os dois tubos é materializada através de uma ligação constituída por um pino e uma porca roscada com batente. O pino deve ser constituído por um aço de alta resistência.

Quando for necessário recorrer a ensaios de prumos telescópicos extensíveis para avaliar a sua resistência deve-se seguir o especificado na norma BS 5507 – Parte 3:1982.

A norma indica as acções e a combinação de acções a considerar no dimensionamento de prumos. Em particular deve considerar-se a existência de uma força horizontal total de magnitude igual ao máximo valor de:

- 1% do valor do somatório das forças verticais aplicadas, mais as restantes acções que possam produzir forças horizontais;
- 2,5% do valor do somatório das forças verticais aplicadas.

A norma prevê que se contravente os prumos para melhorar o seu comportamento sob a acção destas forças laterais.

A referida norma BS 5975:1996 recomenda também que as forças verticais de cálculo não excedam os 35 kN.

O Anexo A desta norma especifica ainda valores admissíveis máximos para a tensão em qualquer secção do prumo, quando sujeito a esforços de tracção, compressão, flexão ou a uma combinação destes.

2.5.4.2. Norma EN 1065:1998

Esta norma foi elaborada pelo grupo de trabalho WG8 do Comité Científico CEN/TC53 do Comité Europeu de Normalização (*CEN*), cujo Secretariado Central era suportado pela DIN.

A norma EN 1065:1998 foi concebida como norma de produto para os fabricantes de prumos telescópicos extensíveis – um produto que até então ainda não tinha sido regulado pela Comissão Europeia. Trata-se de uma norma europeia não harmonizada, i.e. sem o Anexo ZA, pelo que a certificação deste tipo de produtos é voluntária e não obrigatória, excepto se o Estado Membro legislar nesse sentido.

A norma aplica-se exclusivamente a prumos telescópicos extensíveis feitos de aço, e não contempla o dimensionamento de sistemas de suporte de cofragens em que existam restrições aos deslocamentos do prumo, como por exemplo prumos interligados por contraventamentos.

A norma estipula requisitos acerca dos materiais, concepção, protecção contra a corrosão, métodos de cálculo teórico e ensaio laboratorial. Especifica cinco classes (A, B, C, D e E) de resistências características de prumos telescópicos extensíveis, existindo para cada classe, uma série de comprimentos máximos dos prumos. Não indica desta feita valores de resistência de cálculo, i.e. afectados de um coeficiente de segurança [2.38].

Assim, um tipo de prumo deve satisfazer os seguintes requisitos:

2.5.4.2.1. Classificação

Como já foi referido a norma EN 1065:1998 estabelece que os prumos são classificados de acordo com cinco classes diferentes (A, B, C, D e E). Enquanto os prumos das classes A, B e C possuem uma

resistência característica $R_{y,k}$ que depende do seu comprimento máximo (l_{\max}) e do seu comprimento l , os elementos das classes E e D apresentam uma resistência característica constante, ver a equação (2.1).

Estas duas últimas classes foram introduzidas com o argumento de que seria mais simples para os agentes da construção terem de lidar apenas com um valor para resistência característica do prumo, embora este dependa do comprimento do prumo. A norma estipula para cada classe os comprimentos máximos admissíveis para os prumos, definidos por patamares de 50 cm. Para a classe A os prumos podem ser classificados para comprimentos máximos entre 2,50 m e 4,0 m, por exemplo.

$$\begin{aligned}
 \text{Classe A: } R_{A,k} &= 51,0 \cdot \frac{l_{\max}}{l^2} \leq 44,0 \text{ kN} \\
 \text{Classe B: } R_{B,k} &= 68,0 \cdot \frac{l_{\max}}{l^2} \leq 51,0 \text{ kN} \\
 \text{Classe C: } R_{C,k} &= 102,0 \cdot \frac{l_{\max}}{l^2} \leq 59,5 \text{ kN} \\
 \text{Classe D: } R_{D,k} &= 34,0 \text{ kN} \\
 \text{Classe E: } R_{E,k} &= 51,0 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

2.5.4.2.2. Designação e marcação do produto

A designação dos prumos telescópicos extensíveis deve conter toda a informação necessária para o utilizador final saber que produto está a utilizar e quais as suas características funcionais e resistentes, de modo a tornar a sua utilização mais eficiente e segura. A seguinte designação, por exemplo:

Prumo EN 1065:1998 – B25/13 – SH0 – DO – F4 – 3 – M

indica que (i) o prumo é da classe B, com 2,5 m de altura máxima e 1,3 m de altura mínima; (ii) possui bases simples não quadradas; (iii) com um mecanismo de ajuste fino da posição aberto; (iv) foi aplicada uma protecção contra a corrosão do tipo F4; (v) indicação de compatibilidade com a norma EN 74 [2.39] e EN 39 [2.40]; e (vi) o produto possui um controlo da qualidade do tipo M.

Todos os prumos devem conter marcação, que deve ser impressa no elemento. A marcação deve conter a designação do prumo, o nome do fabricante, o ano de produção e o nome da empresa responsável pela certificação.

2.5.4.2.3. Materiais e protecção anti-corrosão

A norma EN 1065:1998 especifica que os materiais, métodos de laminagem utilizados, tubos, chapas de base e soldaduras devem verificar os requisitos das normas europeias apropriadas. Foi entretanto publicado pelo CEN, um conjunto de normas sobre estruturas provisórias, em particular a norma EN 12811 [2.41] que inclui várias partes entre as quais uma sobre os requisitos a cumprir pelos materiais utilizados neste tipo de elementos.

A norma EN 1065:1998 define cinco níveis de protecção (F1, F2, F3, F4 e F5) contra a corrosão.

2.5.4.2.4. Características geométricas e requisitos funcionais

A norma requer que o fabricante controle as dimensões e as tolerâncias dos principais parâmetros geométricos dos prumos, chapa das bases, soldaduras e tubos, por exemplo.

A norma estabelece uma série de valores (mínimos ou máximos conforme os vários parâmetros), alguns definidos em função da classe do prumo, que as várias componentes do prumo devem verificar. Reserva aliás uma parte substancial do seu corpo para este assunto, que ocupa todo o capítulo 7. Estas verificações são importantes porque representam o cumprimento de requisitos funcionais necessários para o adequado comportamento do prumo.

As dimensões e características dos prumos, dos tubos, da cavilha, da porca e das chapas de base são controladas através de um conjunto de cerca de 20 parâmetros. No entanto, a norma não indica quantas medições por parâmetro, e quantos prumos devem ser controlados. Existem na bibliografia disponível vários métodos para determinar os valores de cada um dos parâmetros [2.42].

Para a verificação do dispositivo de ajuste fino da posição do prumo, a norma prevê duas possibilidades: (i) o dispositivo e a parte roscada do tubo exterior cumprem os requisitos funcionais descritos, definidos com base na experiência adquirida ao longo das últimas décadas de estudo deste tipo de elementos, ou (ii) é necessário proceder a ensaios complementares.

A norma também requer que se avalie a susceptibilidade de os dois tubos se separarem de modo não intencional, algo que foi contestado pela indústria por não se poderem responsabilizar pelo que sucede em obra [2.43].

A Tabela F.1 do Anexo F resume as verificações a realizar.

2.5.4.2.5. Verificação da resistência dos prumos telescópicos extensíveis

A resistência característica de qualquer tipo de prumo pode ser determinada por cálculos teóricos ou por ensaios. O facto de não ser possível obter pelos dois métodos o mesmo valor de resistência, e de no caso particular da análise numérica ser possível obter valores não conservativos pode ser considerado uma desvantagem [2.50].

De forma a comparar o comportamento real com o comportamento teórico obtido através de modelos numéricos ou analíticos é necessário que, entre outras condições, seja caracterizado o material do prumo, sendo para tal recolhidos provetes dos tubos dos prumos - embora fosse desejável que fossem igualmente recolhidos provetes de material das bases dos prumos e do pino. A norma define, por cada tipo de prumo, que do número total de prumos a ensaiar sejam utilizados seis para caracterizar o material de que é feito cada tubo, num total de 12 provetes. Os provetes devem estar de acordo com o Anexo E da norma EN 10002 - 1:2006 [2.44], e devem ser ensaiados de acordo com a mesma norma.

Os prumos devem ser ensaiados em duas configurações, (i) normal e (ii) invertida. No entanto, no caso de a chapa de base soldada ao tubo interior ser em garfo, apenas é exigida a realização de ensaios na configuração normal. Segundo a norma EN 1065:1998, prumos das classes A, B e C devem ser ensaiados, para cada configuração, em dois comprimentos diferentes, (i) comprimento mínimo e (ii)

comprimento máximo, sendo que para as outras classes a exigência é alargada e os prumos devem também ser ensaiados numa terceira posição, (iii), definida por um comprimento intermédio. Voelkel [2.43] sugere que esta exigência seja alargada também para os prumos das classes A, B e C já que a experiência evidencia que a resistência mínima ocorre por vezes para um comprimento intermédio.

O comprimento intermédio é dado pela menor razão entre a resistência experimental do prumo ($R_{y,ensaio}$) e a resistência característica do prumo dada pela norma EN 1065:1998, i.e. $R_{y,ensaio} / R_{y,k}$.

Para todos os comprimentos ensaiados, a resistência obtida deve ser sempre superior à correspondente resistência característica, em função da classe do prumo em análise.

No final do processo deve ser elaborado um relatório do estudo experimental que contenha toda a informação relevante, nomeadamente a caracterização dos elementos, tipos de ensaios e cálculos realizados, principais resultados e conclusões do estudo.

2.5.4.2.6. Verificação da resistência dos prumos por via experimental

Como já se fez referência, o prumo deve ser testado em três posições, (i) comprimento máximo, (ii) comprimento mínimo e (iii) comprimento intermédio. O comprimento intermédio é determinado a partir da realização de uma série de ensaios preliminares, até ao máximo de sete ensaios em sete diferentes comprimentos, adoptando um incremento de altura constante. Para cada tipo de prumo a ensaiar devem ser realizadas três séries de oito ensaios, uma por cada comprimento.

A norma assume que os prumos em obra possuem imperfeições geométricas inevitáveis. Assim, requer que se considerem três tipos de imperfeições, adoptando valores que, em geral, são conservativos:

- Excentricidade do ponto de aplicação das forças verticais: 10 mm no plano de flexão de menor inércia;
- Curvatura inicial do prumo devido à folga existente entre os dois tubos na zona de intersecção: rotação nas bases de modo a existirem duas zonas de contacto entre os dois tubos;
- Curvatura inicial do prumo devida a desvios na forma dos tubos: rotação de 1° na base inferior.

O ensaio inicia-se com a colocação do prumo na posição correcta de ensaio, ver a Figura 2.37. O prumo é colocado de modo que a excentricidade da força seja aplicada no plano de flexão de menor inércia. As curvaturas iniciais são materializadas pela existência na base inferior de um apoio que permita o ajuste do ângulo de rotação para o valor necessário. Na base superior a ligação deve ser rotulada, pelo que o dispositivo de materialização da excentricidade da carga deve permitir a rotação livre da chapa da base superior do prumo.

A mesma norma requer que todos os prumos a ensaiar sejam instrumentados com dispositivos de medição que possibilitem obter, durante o carregamento, os deslocamentos transversais a meia altura do prumo e a meio do dispositivo de ajustamento do comprimento do prumo. Estes dados são importantes para caracterizar o comportamento do elemento ao longo do carregamento, e para comparar o comportamento real com o comportamento teórico obtido através de modelos numéricos ou analíticos.

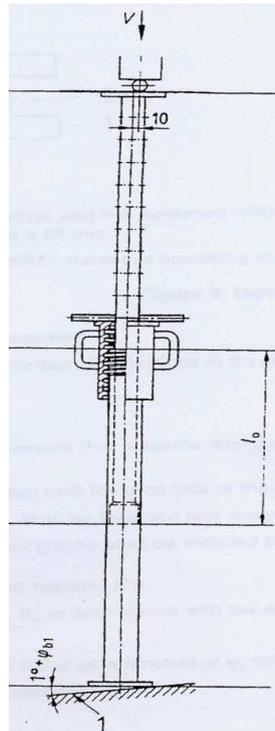


Figura 2.37 – Posição de ensaio do prumo.

O ensaio deve ser controlado em deslocamento. A norma prevê duas possibilidades para a aplicação da força: por patamares (não excedendo cada um 20% da força máxima esperada do prumo), ou aumento uniforme (não ultrapassando, por minuto, 20% da força máxima esperada do prumo).

Os resultados dos ensaios de tracção servem para caracterizar o material dos tubos do prumo, i.e. determina-se a tensão de cedência, tensão máxima e alongamento do material. Os valores da tensão de cedência são utilizados na redução dos valores da resistência obtidos em cada ensaio. No caso de o desvio padrão da amostra de valores da tensão de cedência ser inferior a 10% pode utilizar-se o valor médio dos valores, caso contrário a norma exige que se realizem novos ensaios de tracção para caracterizar o material de cada prumo, sendo o valor obtido da tensão de cedência utilizado no método de redução. O método de redução consiste em diminuir os valores das resistências obtidas experimentalmente para contabilizar a diferença entre os valores reais e os valores nominais da tensão de cedência do material, i.e. a influência da tensão de cedência no modo de colapso do prumo.

Posteriormente, os resultados reduzidos de cada uma das séries de ensaios são alvo de um tratamento estatístico, após o qual é determinado o valor característico (com um nível de confiança de 75% e assumindo uma distribuição normal ou log-normal) da resistência do prumo para esse comprimento.

No final, estes valores são comparados com os correspondentes valores da resistência característica em função da classe do prumo, não podendo os primeiros ser inferiores a estes últimos.

2.5.4.2.7. Verificação da resistência dos prumos por via numérica

A norma prevê igualmente a verificação da resistência dos prumos por via numérica.

A resistência do prumo é condicionada por um ou vários fenómenos combinados:

- Instabilidade em regime elástico ou elastoplástico;
- Plastificação da secção transversal de um dos tubos;
- Instabilidade devido à perda de contacto entre a base inferior e o apoio inferior;
- Rotura da ligação entre os dois tubos.

A resistência do pino ao corte, $R_{s,p}$, e a resistência do tubo interior ao esmagamento, $R_{b,t}$, são dadas pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$R_{s,p} = 0,6 \times A_s \times f_{u,p} \quad (2.2)$$

$$R_{b,t} = 2,12 \times f_{y,t} \times t \times d_p \quad (2.3)$$

Com:

$f_{u,p}$ - Tensão de rotura à tracção do material do pino;

A_s - Área transversal do pino;

$f_{y,t}$ - Tensão de cedência do material do tubo interior;

t - Espessura da parede do tubo interior;

d_p - Diâmetro do pino.

A norma admite, de modo simplificado, que o valor do esforço axial actuante máximo, por cada plano da ligação, equivale a metade do valor da resistência característica da classe do prumo ($R_{y,k}$, ver a equação (2.1)) majorado por um coeficiente igual a 1,14, que tem em conta os diferentes valores dos coeficientes parciais de segurança especificados no Eurocódigo 3 [2.17] para o material do pino (1,25) e dos tubos (1,1).

A verificação da ligação traduz-se então no cumprimento da seguinte equação:

$$1,14 \times \frac{R_{y,k}}{2} \leq (R_{s,p}; R_{b,t}) \quad (2.4)$$

A parte 1-8 do Eurocódigo 3 [2.45] possui uma secção dedicada à resistência de ligações compostas por pinos. Na referida norma, a verificação ao esmagamento da ligação é dada pela seguinte formula:

$$R_{b,t} = 1,5 \times f_y \times t \times d_p \quad (2.5)$$

em que f_y representa o menor dos seguintes valores: tensão de cedência do material do tubo interior e tensão de cedência do material do pino.

Esta parte do Eurocódigo 3 especifica ainda outras verificações no caso de ligações compostas por pinos:

Verificação à flexão do pino, $M_{sd,p} \leq M_{rd,p}$ (ver as figuras 2.38 e 2.39)	$M_{rd,p} = 1,5 \times W_{el,p} \times f_{y,p} \quad (2.6)$
	$M_{sd,p} = \frac{F_{sd}}{2} \times \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{4} + c \right) \quad (2.7)$
	em que a , b e c são parâmetros que dependem das dimensões da ligação (ver a Figura 2.38).

Verificação do pino à
interacção corte-momento

$$\left(\frac{N_{sd,p}}{R_{s,p}}\right)^2 + \left(\frac{M_{sd,p}}{M_{rd,p}}\right)^2 \leq 1 \quad (2.8)$$

A norma EN 1065:1998 não prevê a verificação da ligação por flexão do pino ou por interacção das forças de corte com os momentos-flectores actuantes no pino.

A parte 1 da norma alemã DIN 18800 [2.46] especifica para a resistência ao esmagamento de ligações que utilizem pinos a seguinte formula:

$$R_{b,t} = 2,40 \times f_{y,p} \times t \times d_p \quad (2.9)$$

A justificação para o coeficiente 2,12 na equação (2.3), que fornece a resistência ao esmagamento da parede do tubo interior, não é fácil de entender. No entanto constata-se que se situa entre o factor 1,5 proposto pela parte 1-8 do EC3 e o factor 2,4 proposto pela norma DIN 18800-1.

A Figura 2.40 ilustra a resistência da ligação ao esmagamento dada pelas três normas (DIN 18800-1, EN 1993-1-8 e EN 1065).

É possível observar que a equação (2.5), proposta na nova versão da parte 1-8 do Eurocódigo, devolve sempre valores menores do que as equações (2.3) e (2.9), propostas pela norma EN 1065:1998 e pela parte 1 da norma DIN 18800, respectivamente, que se traduzem num aumento da resistência ao esmagamento dum ligação composta por um pino. Comparando as equações (2.3) e (2.9) constata-se que a recta que representa a resistência ao esmagamento da ligação dada pela norma alemã DIN 18800-1 divide o gráfico em dois domínios distintos: (i) acima da recta a equação (2.9) é condicionante (i.e. devolve menores valores) e (ii) abaixo da recta a equação (2.3) é condicionante.

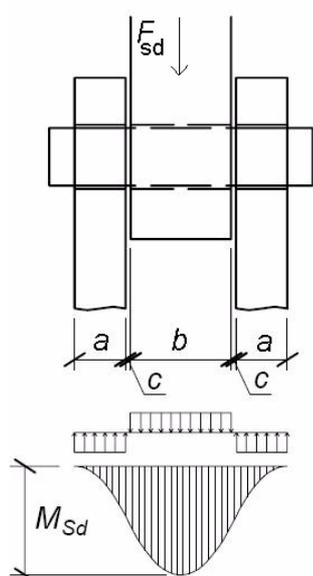


Figura 2.38 – Flexão do pino, EC3-1-8.

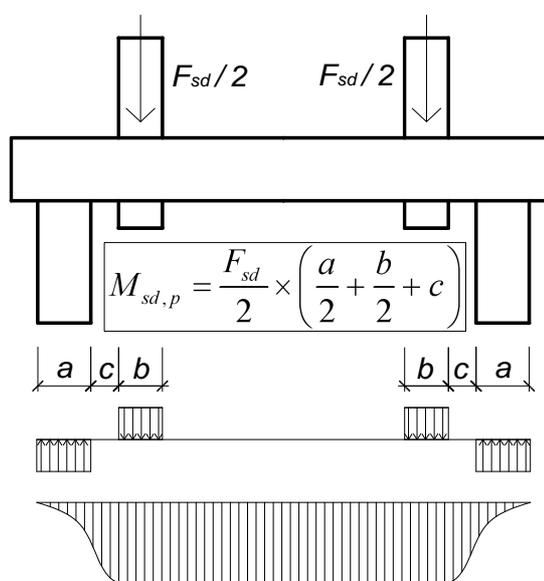


Figura 2.39 – Flexão do pino, adaptação do modelo do EC3-1-8 para o caso de prumos.

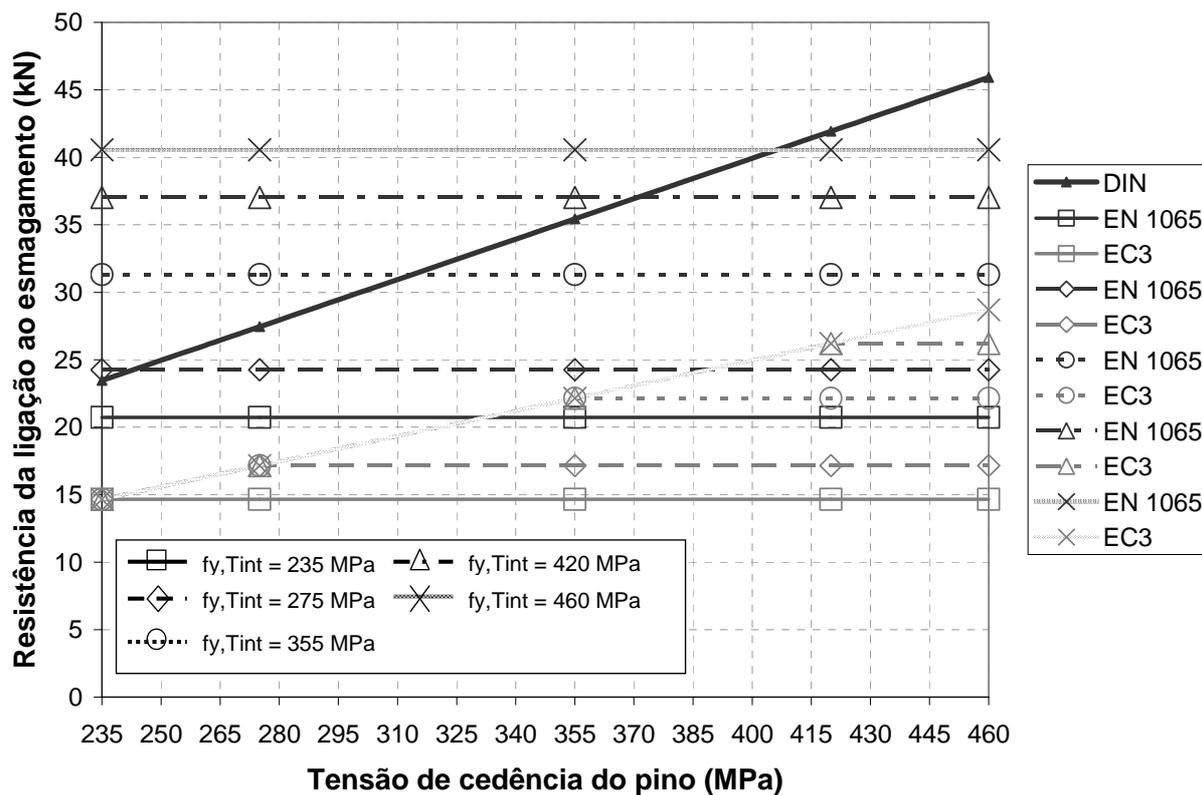


Figura 2.40 – Resistência da ligação ao esmagamento dada pelo EC3 1-8, EN 1065 e DIN 18800-1.

A resistência do prumo é determinada a partir do modelo estrutural proposto pela norma, representado na Figura 2.41.

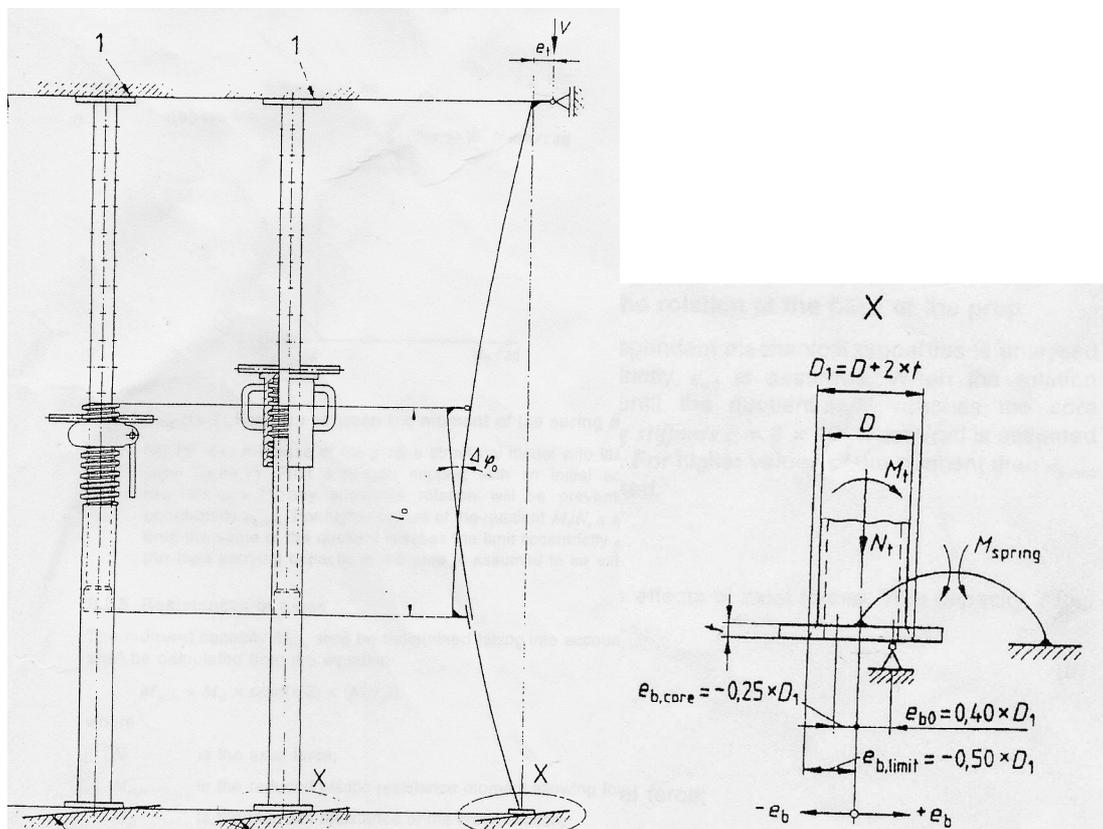


Figura 2.41 – Modelo estrutural proposto pela EN 1065:1998.

As propriedades geométricas dos tubos (área da secção transversal, inércia e módulo de flexão elástico/plástico) são determinadas pelo Anexo A da norma EN 1065:1998. Em particular, para o tubo interior tem-se:

Para o cálculo da área (A_n), momento de inércia segundo o eixo de menor inércia (I_{gr} , I_n , I_i), módulo de flexão elástico (W_n^{el}) e módulo de flexão plástico (W_n^{pl}), em que os índices gr , n , i dizem respeito às propriedades geométricas da secção bruta (sem furos), da secção útil (rasgo contínuo ao longo do comprimento do tubo segundo o centro dos furos) e da secção ideal (compromisso entre a secção bruta e a secção útil de modo a representar a secção real do tubo interior), respectivamente, apresentam-se as fórmulas seguintes:

$$A_n = 2(\varphi_R R^2 - \varphi_r r^2) - d(R \sin \varphi_R - r \sin \varphi_r) \quad (2.10)$$

Com:

$$\varphi_R = \arccos\left(\frac{d}{2R}\right) \quad \varphi_r = \arccos\left(\frac{d}{2r}\right) \quad (2.11)$$

onde (i) d é o diâmetro dos furos em milímetros, (ii) R e r são o raio exterior e o raio interior do tubo interior, respectivamente (ver a Figura 2.42), e (iii) φ_R e φ_r são os menores ângulos (em graus) entre os raios dos contornos externo e interno do tubo interior, tangentes ao bordo de um furo, e o eixo de menor inércia da secção transversal do tubo na zona dos furos (ver a Figura 2.42).

$$I_{gr} = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4) \quad (2.12)$$

$$I_n = \frac{R^3}{2} \left[\varphi_R R - \frac{d}{6} \sin \varphi_R (3 + 2 \sin^2 \varphi_R) \right] - \frac{r^3}{2} \left[\varphi_r r - \frac{d}{6} \sin \varphi_r (3 + 2 \sin^2 \varphi_r) \right] \quad (2.13)$$

$$I_i = I_{gr} \frac{1}{1 + 2 \frac{d}{a} \left(\frac{I_{gr}}{I_n} - 1 \right)} \quad (2.14)$$

onde a representa a distância, constante ao longo do tubo, entre o centro de gravidade de dois furos consecutivos.

$$W_n^{el} = \frac{I_n}{R \sin \varphi_R} \quad (2.15)$$

$$W_n^{pl} = \frac{4}{3} \left[R^3 (1 - \cos \varphi_R) - r^3 (1 - \cos \varphi_r) \right] - \frac{1}{3} d \left[R^2 \sin^2 \varphi_R - r^2 \sin^2 \varphi_r \right] \quad (2.16)$$

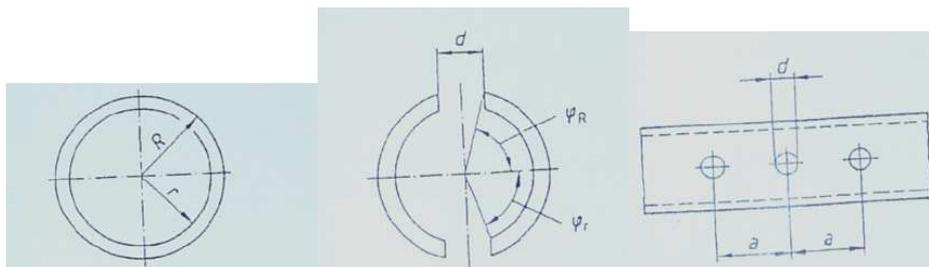


Figura 2.42 – Simbologia utilizada para identificar parâmetros geométricos dos tubos.

Como se pode observar, não é fornecida qualquer equação para a área média equivalente da secção transversal do tubo interior que tome em consideração o efeito dos furos, pelo que este valor deverá ser, idealmente, determinado pela relação do peso volúmico, do comprimento e da massa do tubo. No entanto, admitiu-se, como simplificação, que o tubo interior pode ser analisado através da consideração de um tubo equivalente, sem furos, com um raio exterior R_{eq} e um raio interior r_{eq} que correspondem a uma área e a um momento de inércia iguais aos da secção real, e são dados por:

$$r_{eq} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{4I_i}{A_n} - \frac{A_n}{\pi} \right) \right]^{1/2} \quad R_{eq} = \left(\frac{4I_i}{A_n} - r^2 \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

A norma EN 1065:1998 admite que os prumos em obra possuem imperfeições geométricas inevitáveis, requerendo por isso que se considerem os 3 tipos de imperfeições seguintes, para cujas amplitudes propõe valores que, em geral, são conservativos:

- Excentricidade (e) do ponto de aplicação das forças verticais: 10 mm no plano relativo à flexão de menor inércia;
- Excentricidade (e_{bo}) no apoio da base inferior dado pela seguinte expressão:

$$e_{bo} = 0,40 \times D_1 \quad (2.18)$$

em que D_1 representa o diâmetro exterior do tubo inferior, sendo que no caso de bases planas se deve adicionar duas vezes a espessura da chapa da base inferior;

- Curvatura inicial do prumo devida a desvios na forma dos tubos: configuração sinusoidal com amplitude igual a $a_o = L/500$;
- Curvatura inicial do prumo, devida à folga que ocorre na zona de intersecção entre os dois tubos que o constituem: rotação nas bases, de modo a existirem duas zonas de contacto entre os tubos.

A base superior é rotulada, e a rigidez da base inferior é simulada por uma mola trilinear com o comportamento ilustrado na Figura 2.43.

A base inferior é rotulada até a rotação na base inferior atingir 1° , sendo que quaisquer rotações subsequentes, são impedidas até que a excentricidade do esforço axial na secção da base inferior seja igual a $0,65 \times D_1$, passando a existir uma mola de rotação com uma rigidez elástica igual a 3×10^7 N.mm/rad até a excentricidade igualar $0,90 \times D_1$, após o que a base passa novamente a comportar-se como um apoio rotulado. Uma aparente justificação para o coeficiente 0,65, ou 0,25 se subtrairmos a excentricidade inicial do apoio, reside no facto de a partir desta excentricidade a secção do tubo exterior junto à base começar a ficar traccionada devido ao esforço axial passar a estar fora do núcleo central da secção [2.47]. No entanto, este valor é o resultado de um compromisso para detectar a perda de contacto entre a chapa da base inferior do prumo e o respectivo apoio.

A resistência máxima do prumo, $R_{y,act}$, é atingida quando o momento-flector em qualquer secção atingir o momento de colapso da secção, dado por:

$$M_{pl,N} = M_{pl} \times \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{N}{N_{pl}} \right) \quad (2.19)$$

Com:

N - Valor do esforço axial;

N_{pl} - Esforço normal resistente da secção;

M_{pl} - Momento-flector plástico da secção;

$M_{pl,N}$ - Momento-flector plástico da secção tendo em conta a interacção com o esforço normal.

O valor da resistência de cálculo do prumo deve ser superior ao valor da resistência característica correspondente à classe do prumo, $R_{y,k}$.

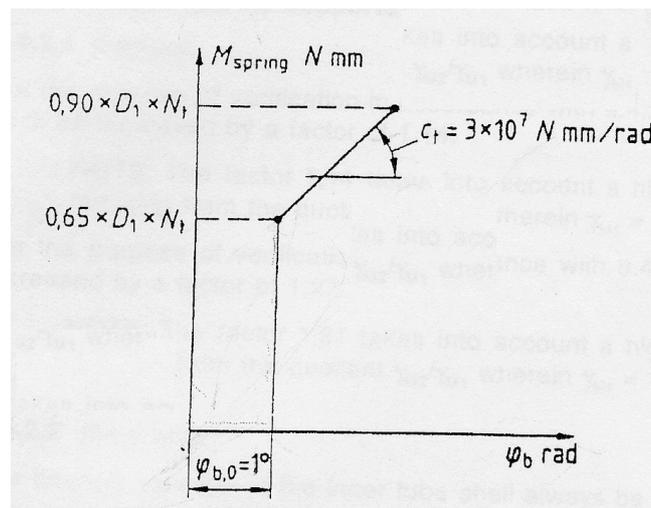


Figura 2.43 – Comportamento não-linear da mola.

2.5.4.2.8. Controlo da qualidade

O fabricante de qualquer modelo de prumo que ainda não tenha sido controlado, de acordo com os critérios dispostos na norma EN 1065:1998, deverá contratar uma entidade competente e independente para avaliar o protótipo, a qual deve verificar se os requisitos de desempenho estabelecidos nesta norma são satisfeitos.

Após a avaliação dos prumos, esta entidade emite um certificado onde deve constar a designação do tipo de prumo avaliado e o número de referência do relatório dos ensaios. O certificado deve assegurar que o tipo de prumo avaliado foi examinado de acordo com as secções apropriadas da norma EN 1065:1998 e que cumpre o que nela se determina.

Para além do controlo inicial do desempenho do protótipo, o fabricante deverá possuir um programa de inspeção e controlo da qualidade da produção de prumos telescópicos extensíveis, de acordo com um dos seguintes métodos:

— Inspeção de nível L

O controlo da qualidade da produção é efectuado pelo fabricante, desde que devidamente certificado pela norma EN ISO 9001 [2.48] ou EN ISO 9002 [2.49].

— Inspeção de nível M

O controlo da qualidade da produção é certificado por uma entidade competente e independente.

A norma EN 1065:1998 estabelece como critérios mínimos, para os materiais e componentes do prumo, a existência de certificados do “tipo 2.1” de acordo com a norma EN 10204-1 [2.50], nos quais o fabricante, ou a entidade certificadora, declara que o produto fornecido cumpre as exigências das normas europeias aplicáveis.

A norma recomenda que, numa inspeção de nível L, pelo menos um prumo ou 0,1% dos prumos produzidos por dia, o que for maior, devem ser submetidos a um controlo da qualidade interno.

No nível de inspeção M a entidade independente deve efectuar duas visitas por ano à fábrica, durante as quais deve recolher 3 amostras de cada tipo de prumo para posterior controlo da qualidade.

2.5.4.3. Norma EN 12812:2004

Esta norma especifica os requisitos e os critérios de dimensionamento de estruturas provisórias segundo a teoria dos estados limites. A norma define duas classes de estruturas provisórias, (i) classe A e (ii) classe B. Os prumos enquadram-se, em geral, na classe A, em que se incorporam as estruturas mais simples, sendo possível analisar o elemento individualmente. A resistência de cálculo dos prumos deve ser obtida dividindo a resistência característica, determinada a partir da norma EN 1065:1988, por um coeficiente parcial de segurança do material, $\gamma_M = 1,1$.

2.5.4.4. Comparação das normas

As normas britânicas especificam cinco tipos de prumos, N° 0, 1, 2, 3 e 4, e as respectivas resistências características, que podem ser determinadas consultando dois gráficos, função do tipo de imperfeições presentes, desde que se cumpram as tolerâncias máximas.

Em 1998 foi publicada a norma europeia EN 1065:1998 que define cinco classes de prumos em função da sua resistência e comprimento máximo. Esta norma especifica critérios de verificação dos prumos por via experimental e numérica.

A norma europeia EN 12812:2004 introduz o conceito dos estados limites na verificação dos prumos, enquanto que a norma britânica BS 5975:1996 baseia a verificação dos prumos no conceito de tensões admissíveis.

A norma EN 1065:1998 dá especial atenção às características geométricas das componentes do prumo. As normas britânicas estabelecem um conjunto de boas práticas, incluindo desenhos ilustrativos.

Em relação aos ensaios de prumos, as normas europeias e britânicas contemplam requisitos específicos para a sua realização. A norma europeia EN 1065:1998 recomenda e define métodos de controlo da qualidade da produção de prumos, ao passo que a norma britânica BS 5975:1996 apenas menciona a necessidade de existir um controlo da qualidade.

A Tabela 2.2 exemplifica uma possível equivalência entre as normas. Com excepção do prumo de menor comprimento, em geral observa-se que a norma EN 1065:1998 conduz a maiores valores para a resistência máxima dos prumos do que a norma BS 5975:1996.

Um estudo recente da *Health and Safety Executive* [2.28] comparou a utilização da BS 5975:1996 e a EN 12812 no que toca às tolerâncias em relação à verticalidade de prumos telescópicos, tendo concluído que a EN 12812 (0% de obras classificadas como inadequadas) é menos exigente que a BS 5975:1996 (18% de obras classificadas como inadequadas).

Tabela 2.2 – Comparação aproximada entre as normas britânicas e europeias.

Classificação de acordo com a norma BS 4074			Equivalência aproximada segundo a norma EN 1065		
Prumo Nº	Comp. min. – Comp. max	Resistência máxima (kN)	Classe	Comp. min. – Comp. max	Resistência máxima (kN)
0	1070 - 1820 mm	50,8	C25	1500 – 2500 mm	40,8
1	1075 - 3120 mm	25,4	C30	2000 – 3000 mm	34,0
2	1980 – 3350 mm	23,2	C35	2500 – 3500 mm	29,1
3	2590 – 3960 mm	16,7	C40	3000 - -4000 mm	25,5
4	3200 – 4870 mm	13,0	C50	4000 – 5000 mm	20,4

CAPÍTULO 3

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS

3.1. Introdução

Neste Capítulo apresentam-se os aspectos mais importantes do desenvolvimento do procedimento de ensaio adoptado e um resumo dos principais resultados experimentais dos ensaios de prumos telescópicos extensíveis realizados.

3.2. Importância dos ensaios experimentais

A análise estrutural é a disciplina de engenharia cujos propósitos são a determinação do comportamento e da resistência das estruturas. Para tal existem duas vias complementares entre si, a teoria das estruturas e a mecânica experimental. A ideia, muitas vezes referida, de que os ensaios experimentais apenas têm o objectivo de comprovar resultados teóricos é redutora, porque a contribuição essencial da experimentação é orientar o desenvolvimento da teoria através da consolidação de uma base fundamental para um melhor entendimento do mundo físico real.

Como tal, a avaliação experimental de estruturas inovadoras ou de análise complexa é essencial para orientar e fundamentar quaisquer resultados numéricos subsequentes.

Deve-se exigir precisão e rigor não só aos modelos numéricos utilizados mas também aos modelos experimentais. Hoje em dia os avanços na tecnologia da instrumentação permitiram expandir as capacidades e melhorar a precisão dos ensaios para novas áreas. Contudo, tanto na teoria como na experimentação, é o pensamento e planeamento prévio a qualquer estudo que permite a optimização da orientação e do controlo das capacidades actualmente ao dispor da investigação.

No caso dos prumos telescópicos extensíveis, os ensaios justificam-se por várias razões:

- Comportamento da zona de ligação entre os dois tubos e a sua influência na resistência do elemento;
- Influência dos furos existentes no tubo interior no comportamento global do elemento;
- Comportamento das chapas de base do prumo e, conseqüentemente, a evolução das condições de apoio do prumo ao longo do carregamento;
- Influência das imperfeições geométricas (ao nível do elemento, da secção e da aplicação da força);
- Influência das imperfeições mecânicas (tensões residuais, variação das propriedades do material) no comportamento global do elemento;
- Percepção de pontos fracos dos prumos e elaboração de medidas correctivas;

- Optimização dos prumos (material, dimensões, etc.);
- Determinação da força máxima admissível para uma dada configuração do prumo;
- Constituição de uma base de resultados experimentais que serão utilizados para testar modelos teóricos, que por sua vez formam a base para o desenvolvimento de regras de dimensionamento específicas e adequadas para os prumos telescópicos extensíveis (como curvas de encurvadura, por exemplo).

3.3. Resultados de campanhas de ensaios anteriores

Foi possível ter acesso a resultados experimentais de ensaios de prumos telescópicos extensíveis, realizados noutros laboratórios de acordo com a norma EN 1065:1998 [3.1].

3.3.1. Campanha de ensaios realizados no CATIM

Este conjunto de ensaios foi efectuado pelo Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (CATIM) no Porto [3.2]. Apenas foi avaliada a resistência dos prumos por via experimental. O controlo dimensional dos prumos não foi efectuado. No entanto, durante a análise dos resultados constatou-se que os valores nominais da espessura dos tubos e as dimensões das chapas das bases dos prumos não cumprem os requisitos mínimos especificados na norma EN 1065:1998.

A Tabela 3.1 contém a informação geométrica dos prumos facultada pelo fabricante ao CATIM para um dos três tipos de prumos ensaiados. A Tabela 3.2 contém um resumo dos resultados obtidos para este tipo de prumo. A informação sobre os restantes tipos de prumos bem como os resultados dos outros ensaios realizados no CATIM encontra-se no Anexo A.

Tabela 3.1 – Informação geométrica do prumo PBB-3000-18-18.

Ref. da amostra	L_{max} (mm)	L_{min} (mm)	Tubo interior		Tubo exterior		Bases	
			Diâm.exterior (mm)	Esp. (mm)	Diâm. exterior (mm)	Esp. (mm)	Largura (mm)	Esp. (mm)
PBB-3000-18-18	3000	1620	40	1,8	48	1,8	115x 115	3

Tabela 3.2 – Resumo dos resultados obtidos para o prumo PBB-3000-18-18

Comprimento do prumo (m)	Força Máxima (kN)		Mecanismo de rotura
	Por prumo	Média	
2,94	9,2	10,7	Dobragem do tubo interior
	12,2		
	10,6		
2,75	17,0	16,4	Dobragem do tubo interior
	15,9		
	16,4		
2,50	25,3	26,2	Deformação da cavilha, porca roscada, e furos do tubo interior na zona da porca roscada
	26,1		
	27,2		

3.3.2. Campanha de ensaios realizados na Universidade de Milão

Na Universidade de Milão foram ensaiados 12 prumos de um certo tipo [3.3]. As chapas das bases dos prumos eram quadradas com 12 cm de lado. O prumo foi ensaiado para a extensão máxima, 3,6 m, e para 3,0 m de altura. Foram efectuados cálculos numéricos utilizando o modelo proposto pela norma EN 1065:1998. Por fim, foram realizados ensaios de tracção sobre doze provetes de material retirado dos prumos ensaiados, tendo a informação extraída dos mesmos sido utilizada para determinar os valores das resistências experimentais características dos prumos de acordo com o procedimento especificado na norma EN 1065:1998. A Tabela 3.3 resume os resultados experimentais e numéricos obtidos. Observa-se que os resultados obtidos por via numérica são conservativos face aos valores médios da resistência obtida por via experimental, mas que deixam de o ser quando comparados com os valores da resistência experimental característica. Este facto advém do reduzido número de ensaios realizados e também da diferença significativa entre os valores nominais e médios da tensão de cedência do aço dos tubos dos prumos [3.3].

Tabela 3.3 - Resultados experimentais e numéricos obtidos pela Universidade de Milão.

Comprimento (m)	Resistência obtida por via numérica (kN)	Resistência experimental Valores médios (kN)	Resistência experimental característica (kN)
3,0	27,0	29,9	20,1
3,6	17,2	19,1	16,4

3.4. Ensaio realizados no LNEC

No âmbito da presente Dissertação foram utilizados prumos disponibilizados por uma empresa portuguesa do ramo das estruturas provisórias. No total, foram facultados 44 prumos com as seguintes características nominais: (i) tubos interior (T_{int}) e exterior (T_{ext}) com 2000 mm e 1900 mm de comprimento, constituídos por aço 43C de acordo com a norma BS 4360:1990 [3.4] (corresponde ao aço S275 da norma EN 10025-1:2004), (ii) T_{int} possui furos com 15 mm de diâmetro espaçados de 80 mm (centro a centro), (iii) as chapas da base de T_{int} e T_{ext} são iguais e quadradas, com 110 mm de lado e 6 mm de espessura, (iv) os valores máximo e mínimo da altura total máxima de um prumo (*i.e.*, dos dois tubos) são 3,5 e 2,0 metros, e (v) as dimensões das secções transversais dos tubos são as indicadas na Tabela 3.4.

O pino tem um diâmetro nominal de 13 mm sendo constituído por um aço EN32B de acordo com a norma BS 970:1955 [3.5]. O material das chapas das bases é um aço macio, EN2A, de acordo com a norma BS 970:1955.

Tabela 3.4 - Dimensões nominais das secções transversais dos tubos.

Tubo	Interior (T_{int})	Exterior (T_{ext})
Diâmetro exterior, D_{ext} , (mm)	48,3	60,0
Espessura, t , (mm)	3,2	2,5

Inicialmente, foi decidido reservar 34 prumos para a fase de caracterização experimental do comportamento do prumo, de acordo com a norma EN 1065:1998 – estes prumos foram repartidos da seguinte forma: (i) 10 prumos para determinar a posição intermédia condicionante em cada configuração (5 prumos na configuração normal e 5 prumos na configuração invertida), ensaiados para alturas igualmente espaçadas de 250 mm compreendidas entre a altura mínima e máxima do prumo, e (ii) 24 prumos para realizar os ensaios em três posições diferentes (nas alturas máxima, intermédia e mínima). Dos restantes 10 prumos, 6 foram utilizados para realizar ensaios preliminares, 3 para realizar o controlo geométrico das várias componentes do prumo e 1 foi adicionado ao conjunto de dois prumos anteriormente ensaiados para determinar as características mecânicas dos materiais dos tubos do prumo (no total utilizaram-se três prumos para este fim).

Apresenta-se de seguida a metodologia seguida e os principais resultados obtidos na campanha de ensaios realizada. Nos Anexos B.1 e B.2 encontra-se a informação complementar referente aos ensaios preliminares e aos ensaios à rotura, respectivamente.

3.4.1. Condições iniciais dos ensaios

O procedimento de ensaio dos prumos foi definido pelo LNEC em conformidade com o estabelecido na norma EN 1065:1998 (ver 2.5.4.2.6).

A norma assume que os prumos em obra possuem imperfeições geométricas inevitáveis. Assim, a norma requer que se considerem 3 tipos de imperfeições, adoptando valores que, em geral, são conservativos:

- Excentricidade do ponto de aplicação das forças verticais: 10 mm no plano de flexão de menor inércia;
- Curvatura inicial do prumo devida a desvios na forma dos tubos: rotação de 1° na base inferior.
- Curvatura inicial do prumo, devida à folga que ocorre na zona de intersecção entre os dois tubos que o constituem: rotação nas bases, de modo a existirem duas zonas de contacto entre os tubos, conforme mostra a Figura 3.1.

Designando θ o ângulo de rotação relativa entre os dois tubos, tem-se:

$$\theta = \frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{L_o} = \theta_1 + \theta_2 = (\theta_{1,1} + \theta_{2,1}) + \theta_2 \quad (3.1)$$

onde (i) L_o representa o comprimento de sobreposição entre os dois tubos, (ii) $D_{int,Text}$ é o diâmetro interior do tubo exterior, (iii) $D_{ext,Tint}$ é o diâmetro exterior do tubo interior e (iv) θ_1 e θ_2 são as rotações na base inferior e superior do prumo, respectivamente. Na hipótese de não existir, à partida, qualquer contacto entre os dois tubos, θ_1 pode ser decomposta em duas componentes, $\theta_{1,1}$ e $\theta_{2,1}$. A primeira componente, $\theta_{1,1}$, corresponde ao deslocamento δ_l na extremidade superior do tubo exterior, necessário para garantir um ponto de contacto entre os dois tubos. Assim, tem-se:

$$\delta_1 = \frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{2} \qquad \theta_{1,1} = \frac{\delta_1}{L_1} = \frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{2 \cdot L_1} \quad (3.2)$$

A partir desta posição qualquer rotação na base inferior do prumo produzirá uma rotação na base superior do prumo. A componente $\theta_{2,1}$ e a rotação θ_2 , estão associadas ao deslocamento, δ_2 , necessário para existir contacto entre os dois tubos, em dois pontos no comprimento de intersecção dos dois tubos – assim, tem-se:

$$\delta_2 = \frac{L_1 \cdot L_2}{(L_1 + L_2)} \left(\frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{L_o} - \frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{2 \cdot L_1} \right) \qquad \theta_{2,1} = \frac{\delta_2}{L_1} \qquad \theta_2 = \frac{\delta_2}{L_2} \quad (3.3)$$

Reescrevendo (3.1) tem-se:

$$\frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{L_o} = \frac{\delta_1}{L_1} + \frac{\delta_2}{L_1} + \frac{\delta_2}{L_2} \quad (3.4)$$

E,

$$\theta_1 = \theta_{1,1} + \theta_{2,1} = \frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{2 \cdot L_1} + \frac{L_2}{(L_1 + L_2)} \left(\frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{L_o} - \frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{2 \cdot L_1} \right) \quad (3.5)$$

$$\theta_2 = \frac{L_1}{(L_1 + L_2)} \left(\frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{L_o} - \frac{D_{int,Text} - D_{ext,Tint}}{2 \cdot L_1} \right) \quad (3.6)$$

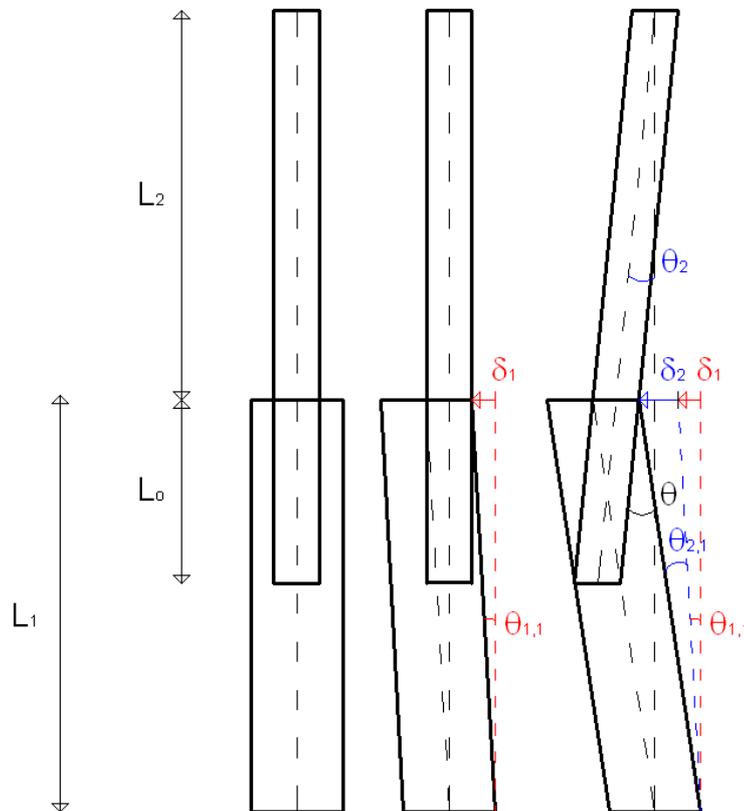


Figura 3.1 - Deslocamentos transversais devidos à folga existente entre os dois tubos.

De acordo com estas fórmulas, o valor do ângulo nas bases inferior e superior é fortemente influenciado pelo (i) valor da folga entre os dois tubos e, em menor escala, pelo (ii) comprimento do tubo interior e exterior, aumentando, nos dois casos com o incremento de cada um dos parâmetros.

Na Tabela 3.5 são dados os ângulos que devem ser aplicados na base inferior do prumo de modo a existirem duas zonas de contacto entre os tubos.

Tabela 3.5 – Ângulos na base inferior de modo a existirem duas zonas de contacto entre os tubos.

Comprimento do prumo, L , (m)	Graus (°)
2,00	0,11
2,25	0,12
2,50	0,14
2,75	0,17
3,00	0,22
3,25	0,30
3,50	0,50

3.4.2. Equipamento e instrumentação

Os ensaios decorreram no Laboratório de Ensaios de Componentes de Estruturas (LCE) do Núcleo de Comportamento de Estruturas (NCE), parte integrante do Departamento de Estruturas (DE) do LNEC. Os prumos foram ensaiados numa máquina de ensaios da marca Servosis/MFL, servo-controlada e com capacidade para ensaiar prumos com alturas até 4,40 m (ver a Figura 3.3).

A máquina de ensaio permite a aplicação de forças de compressão até 5000 kN. As células de pressão da máquina, através das quais se pode determinar a força aplicada, não permitem obter valores de força com a precisão requerida para estes ensaios, devido ao facto de a gama de forças em que estão compreendidas as forças máximas dos prumos ser bastante inferior à gama mínima de forças de trabalho para as quais as células de pressão estão calibradas (10% da força máxima, i.e. 500 kN, ver ISO 7500 [3.6]). Como tal, para medir a força recorreu-se a um transdutor de forças com 100 kN de alcance máximo (ver a Figura 3.2), que foi instalado no êmbolo da máquina de ensaios através de um dispositivo especialmente concebido para este efeito e executado no LNEC (ver a Figura 3.4).

Para caracterizar o comportamento do prumo ao longo do carregamento, e para comparar o comportamento obtido nos ensaios com o comportamento teórico estimado através de modelos numéricos ou analíticos, é fundamental medir os deslocamentos e rotações mais importantes.

Foram definidas as seguintes posições para a medição dos deslocamentos laterais, ver as figuras 3.5 e 3.6: (i) meia altura do prumo ou secção do tubo interior que corresponde ao início do comprimento de sobreposição dos dois tubos (junto à ligação ente os dois tubos), (ii) secção do tubo exterior que corresponde ao final do comprimento de sobreposição dos dois tubos e (iii) quartos de vão.



Figura 3.3 – Máquina de ensaio.



Figura 3.2 – Transdutor de forças.



Figura 3.4 – Transdutor de forças na posição de ensaio

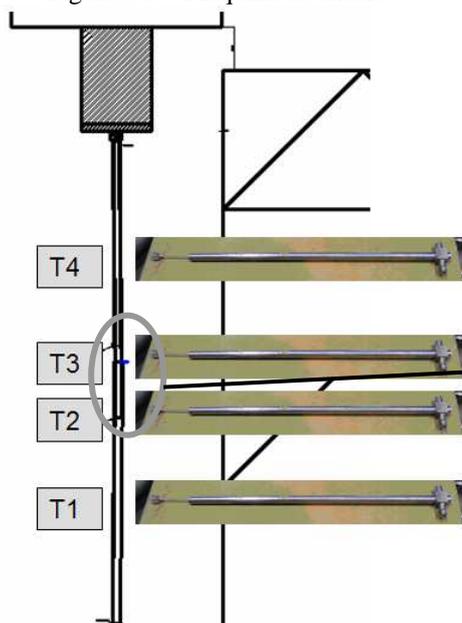


Figura 3.5 – Disposição dos transdutores.

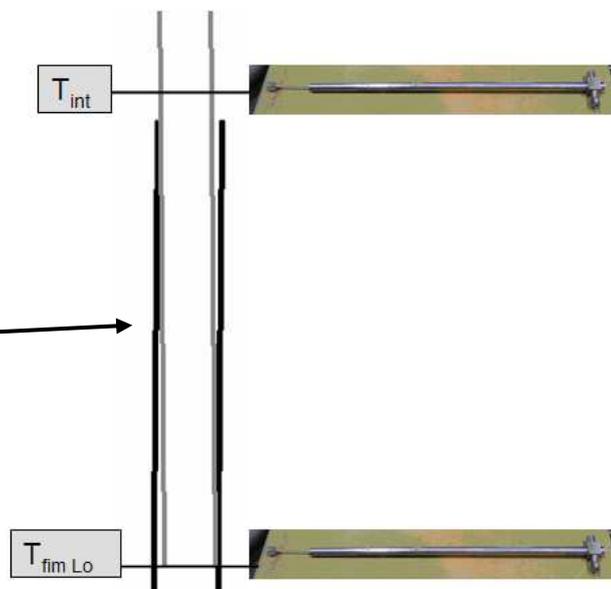


Figura 3.6 – Pormenor.

Os deslocamentos foram medidos através de transdutores de deslocamentos [3.7] (ver as figuras 3.7 e 3.8), tendo sido utilizados inicialmente quatro transdutores da HBM (T_1 a T_4 , numerados por ordem ascendente da altura a que estão colocados), dois de 200 mm de curso e dois de 100 mm de curso. As tabelas B.7, B.9 e B.11 do Anexo B indicam as posições dos transdutores de deslocamentos nos prumos ensaiados para as diferentes alturas consideradas no estudo experimental.

A força de ensaio foi medida pelo transdutor de forças já referido, e o encurtamento axial do prumo foi medido pelo transdutor de deslocamentos da máquina de ensaios.



Figura 3.7 – Transdutor de deslocamentos de 200 mm de curso.



Figura 3.8 – Transdutor de deslocamentos de 100 mm de curso.

As rotações nas bases, em particular a rotação na base inferior do prumo, poderiam ser medidas por clinómetros eléctricos [3.7], que permitem o seu registo em contínuo. No entanto, os equipamentos que o LNEC dispõe são maiores que o espaço livre entre as extremidades da chapa da base do prumo e a face exterior dos tubos pelo que as rotações nas bases do prumo não foram registadas em contínuo. No entanto, no início e final de cada ensaio utilizou-se uma craveira digital para medir, respectivamente, a folga inicial e os deslocamentos verticais que ocorrem na extremidade da chapa da base inferior, cuja flexão do prumo a afasta do prato do dispositivo utilizado para impor a rotação inicial.

Todos os equipamentos utilizados estavam calibrados segundo as normas internacionais aplicáveis. Os certificados de calibração de todos os equipamentos utilizados eram válidos para o ano de 2007.

De modo a montar os transdutores de deslocamento nas posições definidas para a medição dos deslocamentos transversais ao longo do ensaio instalou-se uma estrutura de andaime junto à máquina de ensaio (ver as figuras 3.9 e 3.10). O andaime possui rigidez lateral suficiente para se desprezar a sua contribuição na deformação registada pelos transdutores de deslocamento durante os ensaios.



Figura 3.9 – Andaime utilizado para a instalação da instrumentação (1).



Figura 3.10 – Andaime utilizado para a instalação da instrumentação (2).

De modo a minimizar o risco de os transdutores se deslocarem para fora do prumo ao longo do ensaio, i.e. perderem contacto com o ponto correspondente à posição inicial de medição, foram fixos ao andaime através de fita adesiva. Foi também colocada uma fita autocolante em cada posição medida no prumo (ver a Figura 3.11), de modo a assegurar o contacto permanente da extremidade da haste do transdutor de deslocamentos com um único “ponto” do prumo, ao longo de toda a duração do ensaio.

Em dois dos prumos colocaram-se extensómetros eléctrico-resistivos [3.7] em faces diametralmente opostas dos tubos em três zonas: (i) na parede externa do tubo exterior na secção onde a extremidade inferior do tubo interior entra em contacto com o tubo exterior, (ii) junto à base inferior e (iii) entre dois furos do tubo interior na zona da ligação entre os dois tubos. A instrumentação destas zonas tornou possível (i) a análise ao longo do ensaio da evolução das extensões do material, (ii) estimar a evolução dos momentos flectores junto à base inferior e (iii) estudar a influência da concentração de tensões na envolvente dos furos no comportamento do prumo.

Porque as paredes dos tubos estavam polidas, foi dada particular atenção à colocação dos extensómetros para evitar escorregamentos que pudessem enviesar os resultados obtidos. Apenas foram instrumentados com extensómetros prumos a ensaiar no comprimento máximo, i.e. $L=3,5$ m. Os extensómetros utilizados (figuras 3.12 a 3.14) possuíam um *gauge factor*¹ de 1,97 e foram ligados ao sistema de aquisição por ligações de meia-ponte (*bridge factor* igual a 2). Utilizaram-se compensadores, i.e. extensómetros instalados noutra prumo, para se poder ter em consideração os efeitos da temperatura nos valores de extensão medidos.

Para a aquisição dos dados recolhidos pela instrumentação, utilizou-se um sistema SPIDER 8 (com 8 canais) da HBM, o qual se encontrava ligado a um computador com o software CATMAN instalado – este software permite (i) configurar os canais e os ganhos dos equipamentos, e ainda (ii) visualizar, em tempo real, os resultados do ensaio (nomeadamente os diagramas força-deslocamento), ver as figuras 3.15 e 3.16.



Figura 3.11 – Método de fixação dos transdutores.

¹ Designa-se por *gauge factor* (*GF*) a sensibilidade, ou o *output* produzido por um extensómetro resistivo, sendo definido por $GF = (\Delta R / R_o) / (\Delta l / l_o)$, em que R_o representa a resistência inicial e l_o o comprimento de base do extensómetro.

3.4.3. Execução e resultados dos ensaios

A fase de montagem do ensaio inicia-se com a colocação do prumo na posição correcta. O prumo é colocado de modo a que a excentricidade da força dê lugar a uma flexão do prumo segundo o seu eixo de menor inércia. As curvaturas iniciais são materializadas através de um acessório, colocado sob a base inferior do prumo, que permite o ajuste do ângulo de rotação inicial da base para o valor necessário (ver a Figura 3.17).

A chapa da base superior do prumo foi unida por ligações aparafusadas a um acessório que permite fixar o valor da excentricidade da força ao longo do ensaio. A rótula do transdutor de forças permite a rotação livre da ligação superior, ver a Figura 3.21.



Figura 3.12 – Extensómetros.



Figura 3.13 – Vista da colocação dos extensómetros (1).

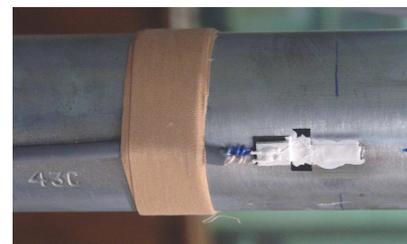


Figura 3.14 – Vista da colocação dos extensómetros (2).



Figura 3.15 – Disposição geral do sistema de aquisição de dados.



Figura 3.16 – SPIDER 8.



Figura 3.17 – Acessório inferior.



Figura 3.18 – Clinómetro de bolha de ar.

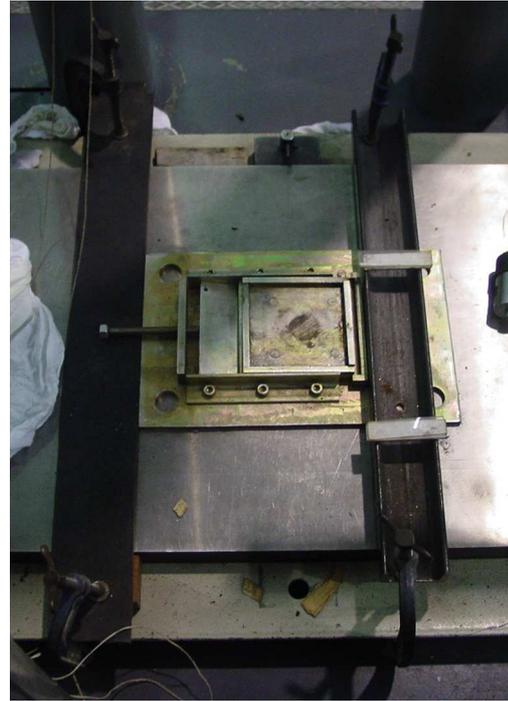


Figura 3.19 – Fixação da posição do acessório inferior.

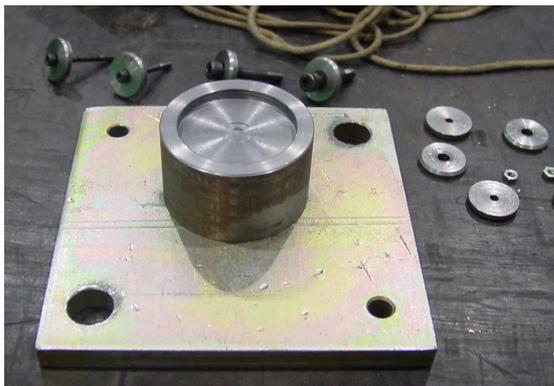


Figura 3.20 – Acessório superior.



Figura 3.21 – Disposição do acessório superior.

Estes acessórios tinham já sido anteriormente projectados para este efeito pelo Eng.º António Baptista e executados nas oficinas de mecânica do LNEC.

O acessório inferior funciona do seguinte modo: a base inferior do prumo é colocada sobre um prato metálico que assenta numa cunha que desliza sobre uma base plana quando empurrada por um parafuso apoiado numa das suas extremidades (ver a Figura 3.17). O ângulo de rotação é imposto roscando o parafuso na direcção que provoca o deslizamento da cunha sob o prato. O ângulo de rotação é lido através de um clinómetro de bolha de ar (ver a Figura 3.18).

A chapa da base inferior do prumo é centrada no prato através da utilização de calibres de plástico, cuja interposição permite uma fixação expedita do prumo na posição correcta de ensaio, ver a Figura 3.22.

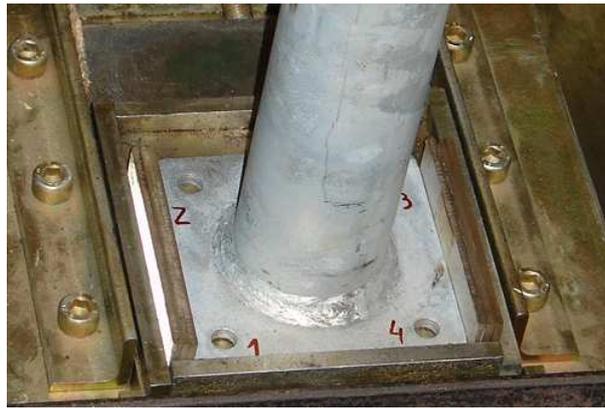


Figura 3.22 – Calibres de plástico.

Foram efectuadas marcas no parafuso, em lados diametralmente opostos, utilizando cores diferentes, de forma a sistematizar o processo de definição do ângulo de rotação. Foi definido o zero do clinómetro como sendo o ângulo da chapa da base da máquina de ensaio (ver a Figura 3.19).

A rótula utilizada para materializar a excentricidade do carregamento, consiste numa caixa metálica onde encaixa a calote esférica do transdutor de forças. A caixa é acoplada a uma chapa metálica, através de um parafuso, a qual é ligada, por sua vez, à chapa da base superior do prumo (ver a Figura 3.20 e 3.21). Deste modo consegue-se garantir que o valor da excentricidade da carga aplicada na base superior do prumo se mantém constante ao longo do ensaio.

A base inferior do prumo foi centrada recorrendo-se a um fio-de-prumo introduzido num molde de cartão da chapa da base superior do prumo que, por sua vez, foi ajustado à calote esférica do transdutor de forças, permitindo assim ter um alinhamento aceitável entre as duas chapas. Esta posição manteve-se fixa durante todos os ensaios realizados até à rotura dos prumos.

Foi definido que se ensaiariam em primeiro lugar os prumos com a altura máxima (3,50 m), depois os prumos com a altura mínima (2,00 m) e, finalmente, os prumos com as cinco alturas intermédias - para determinar a altura mais desfavorável, a considerar na realização da terceira série de 8 ensaios. Após a instalação dos acessórios de ensaio, e depois de o prumo ter sido colocado na posição correcta e instrumentado, toda a instrumentação e meios de aquisição de dados foram verificados.

Foi também decidido aplicar um aumento uniforme da carga de ensaio a uma velocidade baixa, em controlo de deslocamento – deste modo, o ensaio simula um carregamento estático, evitando-se o aumento de rigidez do material provocado por uma aplicação rápida da carga.

3.4.3.1. Ensaios preliminares

Previamente à realização dos ensaios à rotura dos prumos, foi desenvolvido um estudo preliminar (resumido no Anexo B.1) no qual se pretendeu (i) detectar e mitigar a influência de possíveis variáveis exógenas ao ensaio que pudessem afectar os resultados dos ensaios à rotura dos prumos, bem como (ii) definir de forma justificada o sistema de ensaio.

Os estudos preliminares iniciais realizaram-se, numa primeira fase, em prumos na sua extensão máxima, na qual o comportamento dos prumos é mais influenciado pelas imperfeições iniciais, correspondendo à posição para a qual já se dispunha de resultados numéricos para comparação e aferição com os resultados experimentais.

Assim, aproveitando o facto de se dispor de resultados numéricos antes da realização dos ensaios começou-se por realizar um estudo experimental com o objectivo de caracterizar o comportamento dos prumos, em regime elástico nas condições de ensaio previstas pela norma EN 1065:1998 – em particular, determinou-se o valor da rigidez inicial, o qual foi comparado com o obtido através de métodos numéricos.

Foram igualmente realizados ensaios preliminares para o comprimento mínimo e nas cinco alturas intermédias, embora não tão exaustivos como os realizados para a altura máxima.

Este estudo permitiu aumentar a informação disponível sobre o ensaio e sobre aspectos que podem afectar o comportamento estrutural dos prumos – por exemplo, os aspectos relacionados (i) com as anomalias de funcionamento dos dispositivos de ensaio utilizados, (ii) com o posicionamento incorrecto do prumo ou (iii) com a posição em que se efectua o ensaio (*e.g.*, a influência de rodar os tubos do prumo em torno do seu eixo longitudinal).

O estudo inicial permitiu concluir que o comportamento do prumo não é influenciado, de forma significativa, pela alteração da posição dos tubos através de uma rotação de 180° em torno do seu eixo – por esse motivo, os ensaios levados à rotura foram realizados sem tomar em consideração esse aspecto.

Em simultâneo, realizou-se um estudo de repetibilidade e de reprodutibilidade do ensaio com o dispositivo utilizado para impor o ângulo de rotação inicial do prumo, colocado na respectiva base inferior. Com base neste estudo foram definidos, para os vários comprimentos ensaiados, os valores do ângulo de rotação inicial na base inferior necessária para que as extremidades do comprimento de sobreposição entrem em contacto nas paredes dos dois tubos. Estes ângulos são indicados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Ângulos de rotação na base inferior do prumo para os tubos entrarem em contacto em dois pontos.

Comprimento (m)	Ângulo (°) determinado pela equação (3.5)	Ângulo (°) medido pelo clinómetro relativo à chapa da máquina de ensaio	Identificação do ângulo
2,00	0,11	0,15	inc13
2,25	0,12	0,15	inc13
2,50	0,14	0,15	inc13
2,75	0,17	0,15	inc13
3,00	0,22	0,23	inc14
3,25	0,30	0,30	inc7
3,50	0,49	0,51	inc15

Nesta fase, verificou-se que a ligação superior do prumo (*i.e.*, o dispositivo que impõe a excentricidade e a calote esférica da célula de carga) permite que a base superior do prumo possa rodar livremente, podendo assim admitir-se que funciona como rotulada, ver as figuras 3.23 e 3.24.

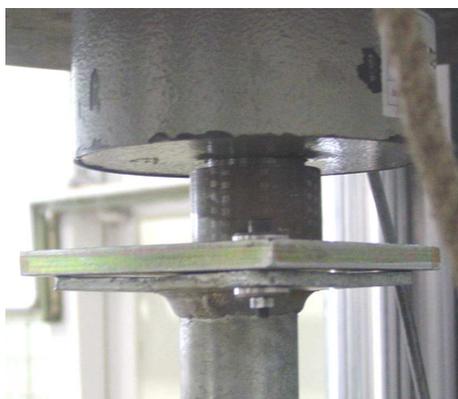


Figura 3.23 – Acessório superior (início do ensaio).



Figura 3.24 – Acessório superior (força máxima).

3.4.3.2. Ensaios à rotura

Ao longo da próxima secção são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de prumos até à rotura, para as diferentes alturas ensaiadas. Os ensaios e as suas características estão resumidos no Anexo B.2.

As grandezas consideradas são representadas por variáveis reduzidas (adimensionalizadas), como se indica na Tabela 3.7, salvo indicação em contrário. No cálculo dos factores de escala são utilizados os valores nominais das características geométricas dos tubos e das características mecânicas do material dos tubos do prumo.

Tabela 3.7 – Variáveis reduzidas.

Variável	Símbolo	Factor de escala	Variável reduzida
Força	P	$P_{ced, min} = \min(P_{ced, Tint}, P_{ced, Text})$ ¹⁾	$P^* = P / P_{ced, min}$
Deslocamentos	δ	L = altura do prumo considerado	$\delta^* = \delta / L$
Momento-flector	M	$M_{min} = \min(M_{ced, Tint}, M_{ced, Text})$ ¹⁾	$M^* = M / M_{min}$
Tensão	σ	$f_{y, min} = \min(f_{y, Tint}, f_{y, Text})$	$\sigma^* = \sigma / f_{y, min}$

¹⁾ $P_{ced, Tint} = 97,77 \text{ kN}$; $P_{ced, Text} = 124,19 \text{ kN}$; $M_{ced, Tint} = 1,04 \text{ kN.m}$; $M_{ced, Text} = 1,71 \text{ kN.m}$

3.4.3.2.1. Ensaios de prumos com a altura máxima (L=3,50 m)

Nos ensaios levados à rotura alterou-se a velocidade de ensaio de 0,1 mm/s (utilizada nos ensaios preliminares) para 0,2 mm/s, continuando a cumprir-se o limite mínimo de tempo de ensaio imposto pela norma EN 1065:1998, *i.e.* cerca de quatro minutos para se atingir a força máxima do prumo.

Como se mostra na Figura 3.25, os resultados experimentais relativos à configuração normal são muito semelhantes, no que respeita (i) à rigidez inicial, (ii) à rigidez depois de a chapa da base inferior do prumo estar em contacto total com a face superior da chapa do dispositivo inferior e (iii) ao valor da resistência última dos prumos. Note-se que o ensaio 123 exhibe um comportamento diferente dos restantes no que respeita ao deslocamento transversal necessário para o contacto total das chapas, o que se deveu a imperfeições na geometria da chapa de base inferior do prumo. Não obstante, o valor da força máxima obtida neste ensaio é muito semelhante à resistência obtida nos restantes ensaios.

Os resultados apresentados na Figura 3.26, relativos à configuração invertida do prumo, são também muito semelhantes em termos da rigidez inicial. No entanto, observam-se diferenças no que diz respeito (i) à rigidez após o contacto total entre a chapa da base do prumo e a chapa do dispositivo inferior, e (ii) ao valor da resistência última – as resistências obtidas nos ensaios 119 e 120 são ligeiramente menores que as obtidas nos ensaios 121 e 122. Como as condições iniciais dos ensaios foram as mesmas, estas diferenças podem ser devidas a imperfeições na geometria das bases, as quais condicionam a evolução da rigidez na base inferior do prumo e, conseqüentemente, o valor da sua resistência última.

As forças máximas e os diagramas obtidos para os ensaios realizados na altura máxima dos prumos estão resumidos na Tabela 3.8 e na Figura 3.27, respectivamente.

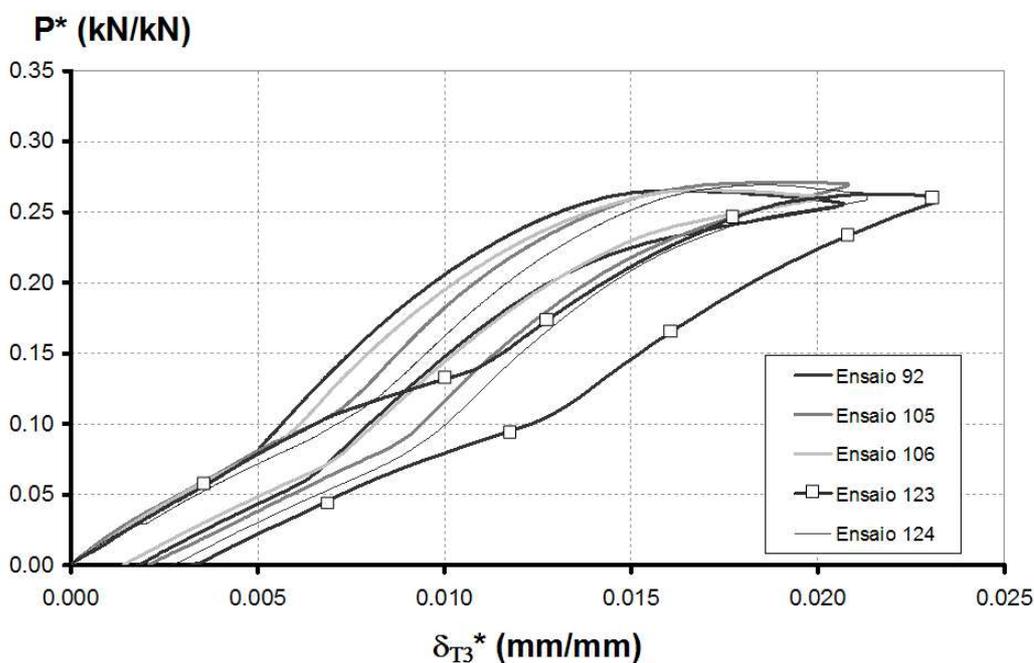


Figura 3.25 - Ensaio à rotura na configuração normal: curvas P^* - δ_{T3}^* ($L=3,50$ m).

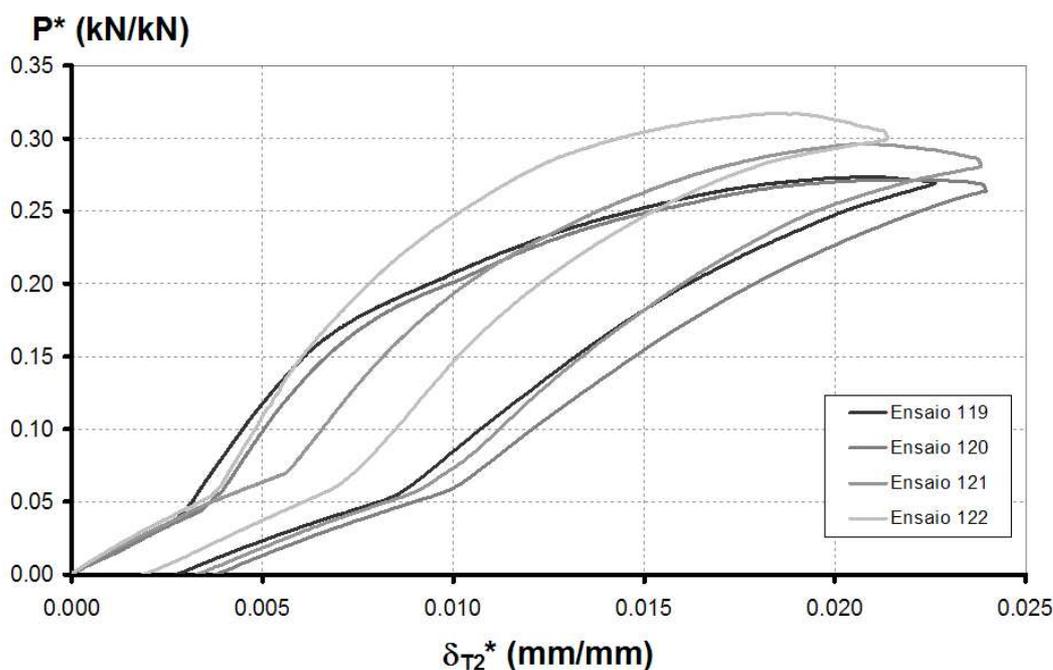


Figura 3.26 - Ensaios à rotura na configuração invertida: curvas $P^* - \delta_{T2}^*$ ($L=3,50$ m).

Tabela 3.8 - Força máxima registada, $L=3,50$ m.

	Configuração	
	Normal	Invertida
$P_{\text{máx}}$ (kN)	25,95	26,75
	26,50	26,56
	25,95	28,98
	25,71	31,01
	26,37	-
Média (kN)	26,10	28,32

Em termos médios, a resistência última obtida nos ensaios dos prumos na configuração invertida é cerca de 2 kN superior à obtida na configuração normal. Esta diferença parece dever-se à ocorrência, no primeiro caso, de menores deslocamentos transversais para a mesma carga (ver a Figura 3.27), o que se deve à maior rigidez global do prumo na configuração invertida devido à posição do tubo exterior (tubo de maior inércia) – assim, os efeitos de 2ª ordem são mais relevantes na configuração normal e conduzem a cargas de colapso inferiores. Registam-se, quando ocorre o colapso, maiores deslocamentos transversais na zona central do prumo na sua configuração invertida do que na sua configuração normal (*i.e.*, $T_{2,I} > T_{3,N}$ e $T_{3,I} > T_{2,N}$), como se pode ver na Figura 3.27.

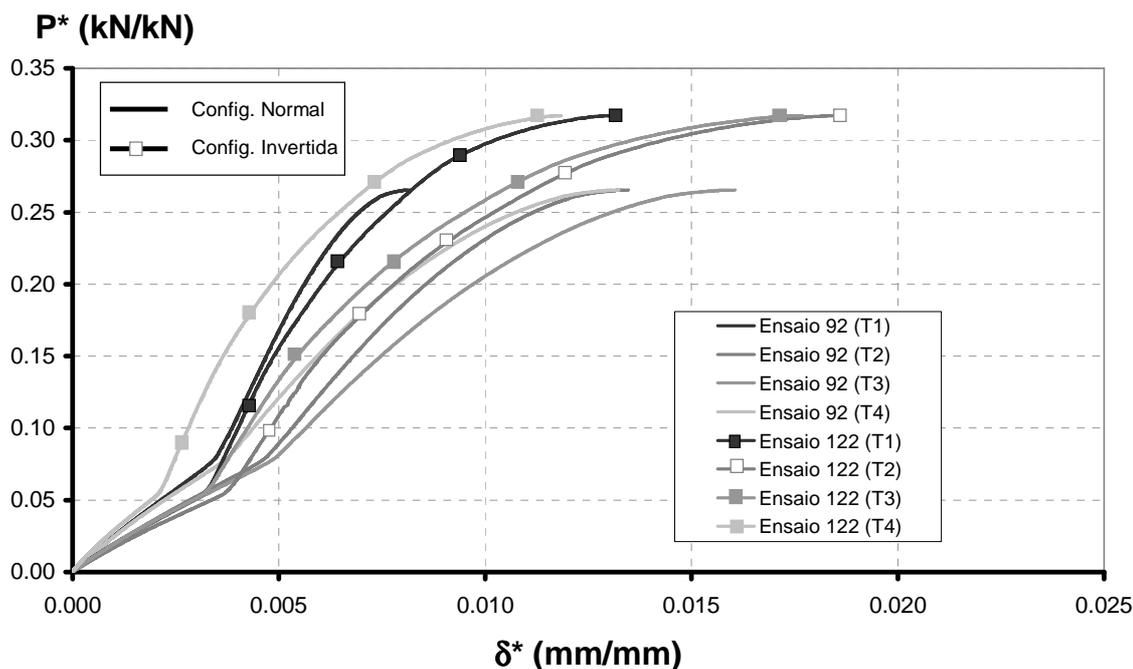


Figura 3.27 - Curvas $P^* - \delta^*$ das configurações normal e invertida (transdutores T_1 a T_4) ($L=3,50$ m).

Observa-se ainda que a rotação na base inferior do prumo é maior na configuração invertida do que na configuração normal (*i.e.*, $T_{1,I} > T_{1,N}$), o que se deve à menor inércia do tubo interior. Pode também verificar-se que, ao contrário do que tinha sucedido no estudo inicial (efectuado com forças de ensaio que não excediam os 10 kN – até se vencer a folga inicial existente entre a chapa da base inferior do prumo e a face superior da chapa do acessório inferior), os deslocamentos transversais das extremidades do troço de sobreposição deixam de ser iguais na configuração normal (*i.e.*, $T_{3,N} \neq T_{2,N}$) quando o prumo se encontra submetido a forças mais elevadas.

Foi igualmente analisada a influência, no comportamento do prumo, dos calibres de plástico (ver a Figura 3.22) que servem de fixação da posição da chapa da base inferior do prumo, retirando as peças, nos ensaios 120 e 122 a 124, após as chapas da base inferior do prumo e do prato do acessório inferior estarem totalmente em contacto. A Tabela 3.9 e a Figura 3.27 permitem verificar que a sua influência no comportamento do prumo não é perceptível, pelo que não parece existir qualquer efeito significativo de restrição da rotação da chapa da base inferior do prumo por acção dos calibres de plástico.

Este facto é corroborado pelas medições, realizadas no início do ensaio e para a força máxima do prumo, da folga existente entre as chapas da base inferior do prumo e do prato do acessório inferior, ver a Tabela 3.9.

As medições da folga existente entre a chapa de base inferior do prumo e a chapa do prato do dispositivo inferior, efectuadas no início do ensaio e na iminência do colapso (*i.e.*, sob a força máxima), permitiram concluir que ocorre uma separação entre estas duas chapas – no entanto, esta separação, que se deve à flexão da chapa de base inferior do prumo, tem um valor diminuto (o seu máximo é de 0,80 mm).

Tabela 3.9 – Influência dos calibres de plástico na resistência dos prumos ($L=3,50$ m).

Configuração	Ensaio	Medição no lado 2, 3 (mm) ²		Separação (mm)	Média (mm)
		Início do ensaio	Força máxima		
Normal	105 (c/ calibres de plástico)	6,70	7,30	0,60	0,60
	106 (c/ calibres de plástico)	6,40	7,00	0,60	
	123 (s/ calibres de plástico)	6,10	6,50	0,40	0,45
	124 (s/ calibres de plástico)	6,00	6,50	0,50	
Invertida	119 (c/ calibres de plástico)	6,20	6,80	0,60	0,70
	121 (c/ calibres de plástico)	6,40	7,20	0,80	
	120 (s/ calibres de plástico)	6,00	6,50	0,50	0,65
	122 (s/ calibres de plástico)	5,70	6,50	0,80	

3.4.3.2.2. Ensaio de prumos com a altura mínima ($L=2,00$ m)

O comprimento analisado em seguida corresponde à altura mínima do prumo, i.e., dois metros de altura.

Para esta altura apenas se utilizaram três transdutores de deslocamento, um de 100 mm de curso e dois de 200 mm colocados, na configuração normal, (i) a meia altura do prumo (T_1), (ii) a três quartos da altura do prumo (T_2), e (iii) no tubo interior acima da ligação entre os dois tubos (T_3) ou colocados, na configuração invertida, (i) no tubo interior abaixo da ligação entre os dois tubos (T_1), (ii) a um quarto da altura do prumo (T_2) e (iii) a meia altura do prumo (T_3).

A altura mínima do prumo é igual ao comprimento do tubo interior, pelo que a extremidade deste tubo está em contacto com a fundação, i.e., o tubo interior irá receber a carga e transmiti-la, em grande parte, directamente para a fundação – ensaios 155 e 175. Para simular o comportamento do prumo incluindo a ligação entre os dois tubos, foi decidido ensaiar outra posição que consiste em subir um centímetro o tubo interior e fixar a sua posição com o pino e a porca roscada – ensaios 156-157 e 176-177.

Ao longo da presente secção são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios levados à rotura para a altura mínima do prumo (2,00 m). As grandezas consideradas são representadas por variáveis reduzidas (adimensionais), como se indica na Tabela 3.7. Nos ensaios 155 e 175 não se

² A chapa da base soldada ao tubo exterior do prumo possui 4 furos, um em cada canto, enquanto que a chapa da base soldada ao tubo interior possui 8 furos, 1 em cada canto e 1 furo a meio de cada lado. Os furos de cada canto da chapa da base inferior (pertencente ao tubo exterior ou interior, conforme a configuração do prumo) foram identificados com os números 1 a 4, durante a preparação de cada ensaio. Com o prumo flectido, o lado que mais comprime a chapa do prato do acessório corresponde aos furos 1 e 4. O lado oposto, correspondente aos furos 2 e 3, tende a separar-se da chapa do prato, uma vez iniciado o carregamento.

chegou até à rotura do prumo – por esse motivo, as correspondentes curvas força-deslocamento, representadas na Figura 3.28, (i) não exibem o “patamar” que antecede o colapso nem o troço descendente (pós-colapso) e (ii) têm ramos de carga e descarga quase coincidentes, o que traduz pequenas deformações plásticas. Este facto deveu-se à circunstância de o transdutor utilizado para medir a força axial ter um alcance máximo de 100 kN, valor inferior à carga de colapso do prumo para esta posição. No entanto, quando se elevou a posição do tubo interior em 1 cm, deixando a sua secção extrema de se apoiar na chapa de base da máquina de ensaio, passa a ocorrer a rotura do pino que se traduz na existência de um “patamar”: encurtamento sob força constante nas curvas relativas aos ensaios 156-157 e 176-177. Note-se, no entanto, que não existe um verdadeiro colapso (as curvas não têm troço descendente), o que deriva do grande aumento da rigidez do prumo provocado pelo novo contacto da extremidade inferior do tubo interior com a chapa da base da máquina de ensaio, o que explica os pequenos troços muito inclinados que se seguem aos “patamares” – de qualquer modo, admite-se que a resistência última do prumo corresponde à plastificação do pino.

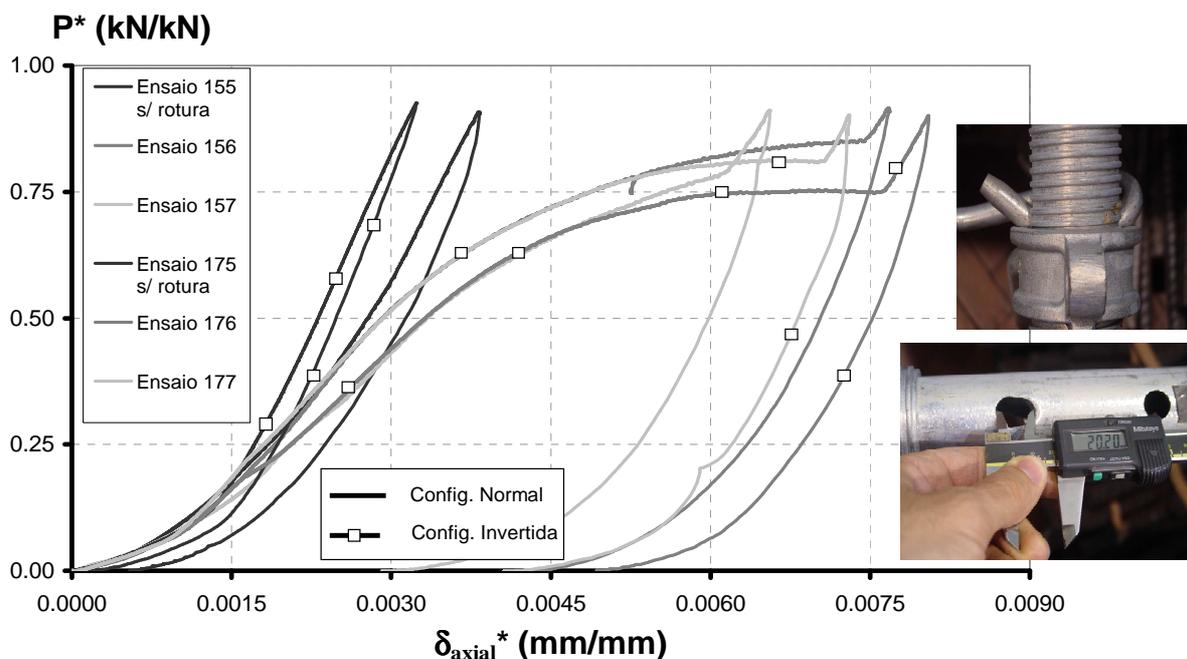


Figura 3.28- Curvas P^* – δ_{axial}^* dos prumos com a altura mínima ($L=2,00$ m, configuração normal).

A análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados com prumos na altura mínima ($L=2,00$ m) permite concluir que:

- Os maiores deslocamentos ocorrem a meia altura do prumo, tanto na configuração normal como na invertida, ver a Figura 3.29;
- Na configuração normal do prumo, até a chapa da base inferior do prumo estar totalmente em contacto com a face superior da chapa do acessório inferior, observa-se (ver a Figura 3.29) que o comportamento estrutural do prumo (tendo como referência o comportamento do tubo interior) é “artificialmente rigidificado”, pelo facto de a extremidade do tubo interior se

encontrar apoiada na chapa da base da máquina de ensaio – este fenómeno deixa de ocorrer quando o tubo interior é elevado 1 cm, através do pino e da porca roscada. No entanto, é curioso observar (ver a Figura 3.29) que, após o contacto total entre as duas chapas, o comportamento do prumo altera-se e passa a ser mais rígido nesta última posição (tubo interior elevado 1 cm) – a justificação para este aparente paradoxo reside no facto de, nesta posição, os dois tubos passarem a contribuir para a rigidez global de flexão do prumo (agora também existe a contribuição do tubo exterior).

- O pino sofre deformações plásticas muito consideráveis por interacção de tensões de corte com tensões de flexão. Os furos onde o pino é inserido sofrem deformações plásticas significativas, as quais se traduzem por uma ovalização da sua secção, tanto no lado mais comprimido como no lado menos comprimido, passando o diâmetro mais deformado (d direcção vertical) de 15 mm para cerca de 20 mm no lado menos comprimido e de 15 mm para cerca de 18 mm no lado mais comprimido. Este facto deve-se à flexão do pino que assume maior relevância no lado menos comprimido do prumo. Na direcção horizontal do prumo regista-se uma ligeira diminuição do diâmetro dos furos de 15 mm para cerca de 14,5 mm.
- Finalmente, as medições da folga existente entre a chapa de base inferior do prumo e a chapa do prato do dispositivo inferior, efectuadas (v_1) no início do ensaio e (v_2) na eminência da rotura (*i.e.*, sob a força máxima registada), mostraram que estas chapas permanecem sempre em contacto total, *i.e.*, não ocorre qualquer flexão significativa na chapa da base inferior do prumo.

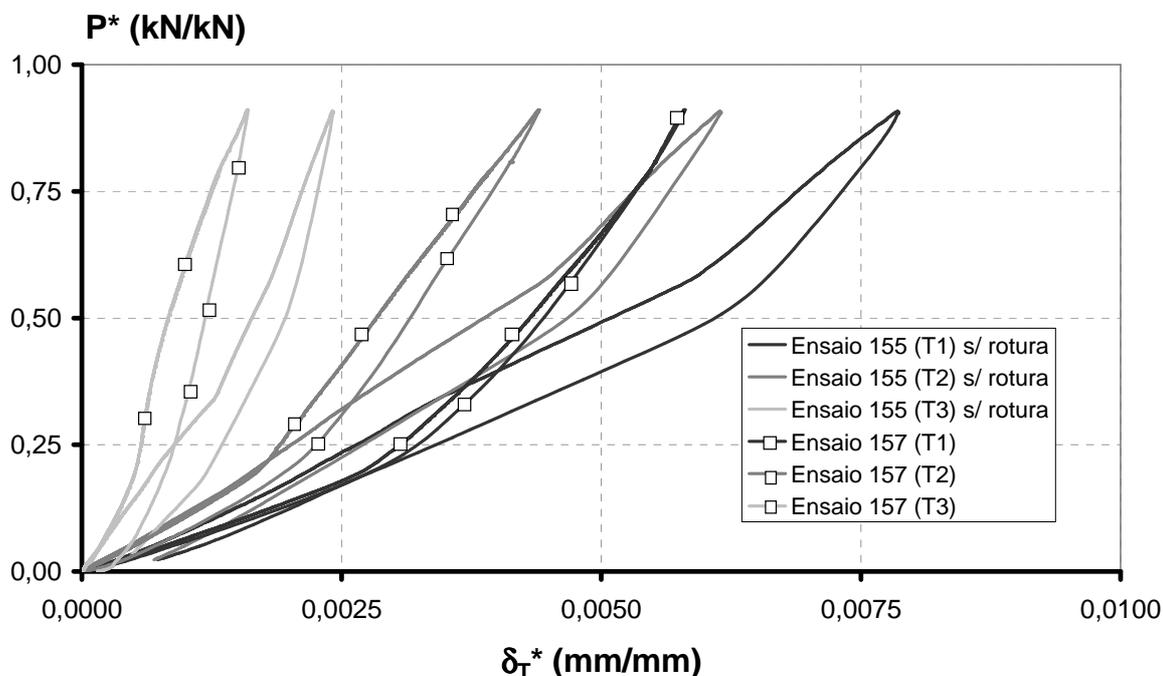


Figura 3.29- Curvas $P^* - \delta_T^*$ dos prumos com a altura mínima ($L=2,00$ m), configuração normal.

3.4.3.2.3. Ensaio de prumos para alturas intermédias

Na presente secção são resumidos os resultados obtidos durante o estudo realizado para determinar a altura intermédia condicionante.

Foram realizados ensaios em prumos com cinco alturas intermédias, espaçadas entre si por intervalos de 0,25 metros, conforme o disposto na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Alturas intermédias.

ID	L (m)
L_4	2,25
L_5	2,50
L_6	2,75
L_7	3,00
L_8	3,25

Devido ao número limitado de prumos disponíveis, foi inicialmente definido que este estudo, realizado para determinar a altura intermédia condicionante, apenas incluiria um ensaio por cada configuração, normal e invertida, em cada comprimento intermédio. Ainda assim, o número de ensaios realizado para este fim é superior ao requerido pela norma EN 1065:1998, que é de sete ensaios.

As figuras 3.30 e 3.31 representam o comportamento obtido para as várias alturas na configuração normal e invertida, respectivamente.

A Tabela 3.11 resume os valores máximos de força obtidos nos ensaios dos prumos para as alturas intermédias.

Em todos os ensaios obtiveram-se resistências últimas mais elevadas nos prumos com a configuração invertida – este facto resulta de, sob uma mesma carga aplicada ao prumo, as secções críticas (localizadas no tubo interior) estarem sujeitas a menores esforços na configuração invertida que na configuração normal, o que faz com que lhes seja possível suportar cargas axiais e deslocamentos transversais mais elevados. Esta observação, explica-se por na configuração invertida as condições de fronteira terem sido trocadas (excentricidade da força aplicada na extremidade do tubo exterior e rotação aplicada na extremidade do tubo interior). Este facto, aliado à maior inércia da secção transversal do tubo exterior em relação à do tubo interior, leva à existência de menores efeitos P-Delta globais na configuração invertida do que na configuração normal. Deste modo, na configuração invertida, as secções sujeitas a maiores esforços, para a mesma carga, pertencem ao tubo exterior e não ao tubo interior como acontece na configuração normal. A soma destes factos aliados à maior resistência e ductilidade da secção transversal do tubo exterior face à do tubo interior (ver o Anexo E e a Tabela 3.16), conduz a uma resistência mais elevada do prumo na configuração invertida.

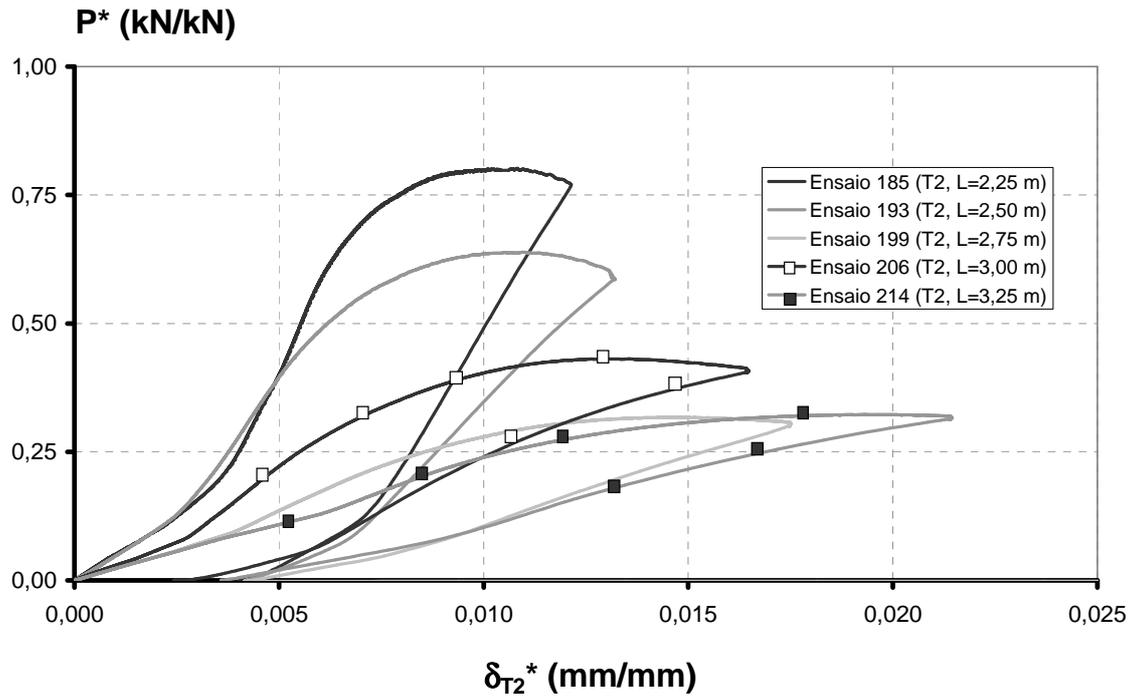


Figura 3.30 – Curvas $P^* - \delta_{T2}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias).

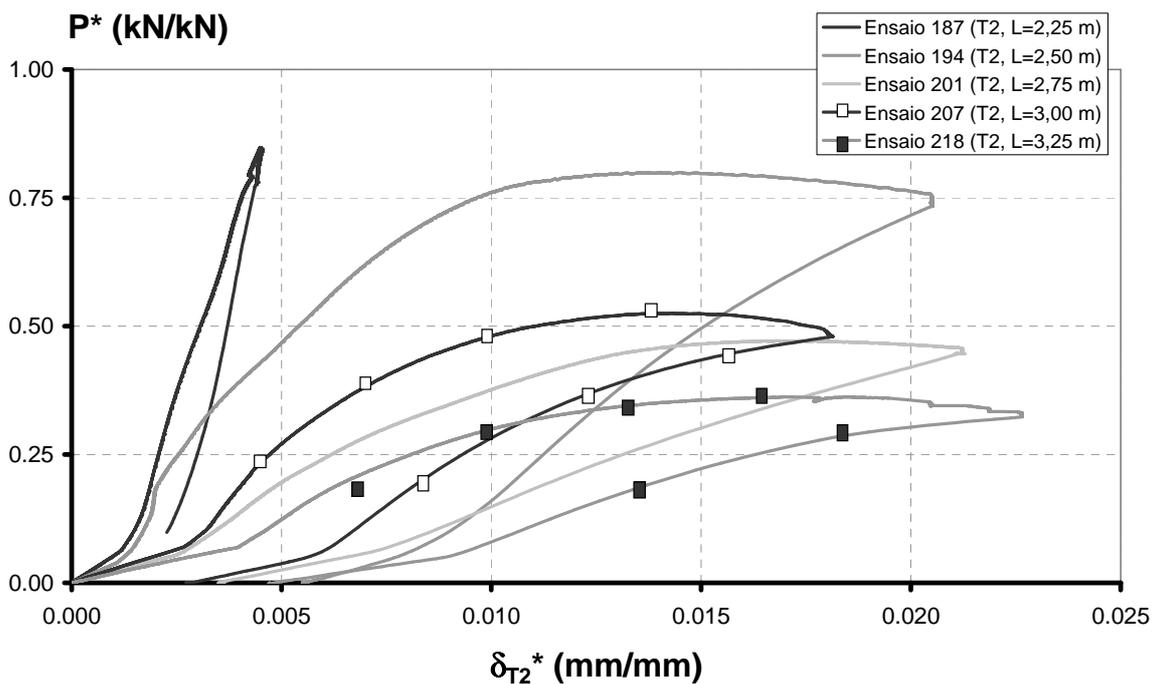


Figura 3.31 – Curvas $P^* - \delta_{T2}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração invertida (alturas intermédias).

Para 2,25 m de comprimento, na configuração normal a rotura do prumo caracteriza-se pela plastificação do pino e da parede do tubo interior na zona do furo de ligação. Como o deslocamento vertical devido à cedência do pino não provoca que o tubo interior assente na fundação, não se verifica um aumento da rigidez após a cedência do pino.

Tabela 3.11 - Valores da força máxima registados nos ensaios à rotura realizados para as alturas intermédias.

Comprimento (m)	Configuração normal			Configuração invertida		
	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)
2,25	185	78,39	78,39	187	82,90	82,90
2,50	193	62,44	62,44	194	78,15	78,15
2,75	199	31,04	32,94	201	46,08	46,08
	200	34,84				
3,00	205	41,61	41,88	207	51,32	51,32
	206	42,14				
3,25	211	31,45	31,72	215	39,26	37,84
	212	32,92		216	35,67	
	213	30,97		217	41,01	
	214	31,55		218	35,44	
	105	26,50		120	26,56	
	106	25,95		121	28,98	
	123	25,71		122	31,01	
	124	26,37				

A curva força-deslocamento obtida para o ensaio 187 difere das restantes devido ao transdutor de deslocamentos ter saído da sua posição. Por sua vez, na configuração invertida do prumo a rotura caracteriza-se pela à plastificação do pino e possivelmente da parede dos dois tubos, interior e exterior. Para 2,50 m de comprimento, na configuração normal a rotura do prumo parece caracterizar-se pela cedência da parede do tubo interior na zona dos furos, registando-se ovalização ligeira dos furos do tubo interior. Na configuração invertida a rotura do prumo parece caracterizar-se pela cedência da parede do tubo interior e agora também do tubo exterior, com ovalização dos furos e deformações plásticas significativas na zona do pino.

A resistência da ligação não parece condicionar a resistência do prumo nas restantes alturas ensaiadas. Obteve-se para 3,25 m de comprimento a menor resistência do prumo, em termos absolutos, para as cinco alturas intermédias.

Observou-se, com alguma surpresa, que ocorre uma diminuição acentuada na resistência última do prumo quando a sua altura aumenta de $L=2,50$ m para $L=2,75$ m. Face ao inesperado desta situação, procuraram-se as causas para esta mudança de comportamento: (i) em primeiro lugar, verificaram-se as condições iniciais do ensaio, nomeadamente a excentricidade da carga, o ângulo de rotação e a altura do prumo – como todos estes parâmetros estavam devidamente definidos, concluiu-se que o comportamento registado não foi provocado por qualquer incorrecção na preparação do ensaio (para além disso, nenhuma anomalia foi observada durante a sua realização).

Com o objectivo de verificar se a mudança de comportamento descrita no parágrafo anterior se devia a variações das propriedades mecânicas do material e/ou das imperfeições geométricas iniciais dos

tubos, realizaram-se dois ensaios adicionais, até à rotura, de prumos na configuração normal e alturas iguais a 2,75 e 3,00 m. Os resultados obtidos mostraram que estas características podem ser responsáveis pela referida mudança de comportamento – deve mencionar-se que, no início dos ensaios dos prumos com 2,75 m de altura, foi medida uma folga, entre a chapa de base inferior do prumo e a chapa do prato do dispositivo, de valor superior à registada nos restantes prumos ensaiados.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados em prumos com alturas intermédias foi possível extrair as seguintes conclusões (apenas para $L=2,50$ m, $L=2,75$ m e $L=3,00$ m):

- Face aos valores da rigidez inicial obtidos nos ensaios dos prumos de altura igual a 2,75 m, as diferenças entre as resistências últimas obtidas nesta altura podem estar relacionadas com a sensibilidade do comportamento do prumo às imperfeições geométricas iniciais dos tubos e da chapa das bases, ver a Figura 3.32.
- É nos prumos com $L=2,75$ m, quando submetidos à força máxima (de rotura), que ocorre o maior deslocamento na secção do tubo interior situada acima da ligação entre os dois tubos, a qual corresponde à posição do transdutor de deslocamentos T_3 , ver a Figura 3.33.
- É também nos prumos com $L=2,75$ m, submetidos à força máxima, que se verifica o maior deslocamento na secção de meia altura do tubo exterior, a qual corresponde à posição do transdutor de deslocamentos T_2 , ver a Figura 3.34.
- É nos prumos com $L=3,00$ m, sob a acção da força máxima, que ocorre o maior deslocamento na secção do tubo exterior, situada no final do comprimento de sobreposição entre os dois tubos, a qual corresponde à posição do transdutor de deslocamentos T_1 , ver a Figura 3.35.
- O maior encurtamento na rotura (*i.e.*, quando actua a força máxima) foi registado nos prumos com altura $L=2,75$ m, ver a Figura 3.36.
- As deformações residuais (*i.e.*, após o ciclo carga-descarga), axiais e transversais, registadas nos prumos com altura $L=2,75$ m são superiores às dos prumos com $L=3,00$ m e próximas das obtidas para $L=2,50$ m.

Estes resultados permitem concluir que os prumos com $L=2,75$ m são sensíveis a deformações iniciais da chapa da base inferior do prumo. A existência de maiores deformações iniciais nesta chapa no ensaio 199 originou uma menor rigidez inicial da ligação inferior estando esta associada a uma redução da resistência. Do mesmo modo, é lícito afirmar que depois das chapas da base inferior do prumo e do prato do dispositivo acessório entrarem em completo contacto, os prumos com $L=2,75$ m são menos rígidos que os restantes prumos com alturas intermédias ensaiados (excepto para $L=3,25$ m) – no entanto, não se registou flexão significativa da chapa da base inferior do prumo ensaiado nesta altura (observação extensível para as restantes alturas intermédias).

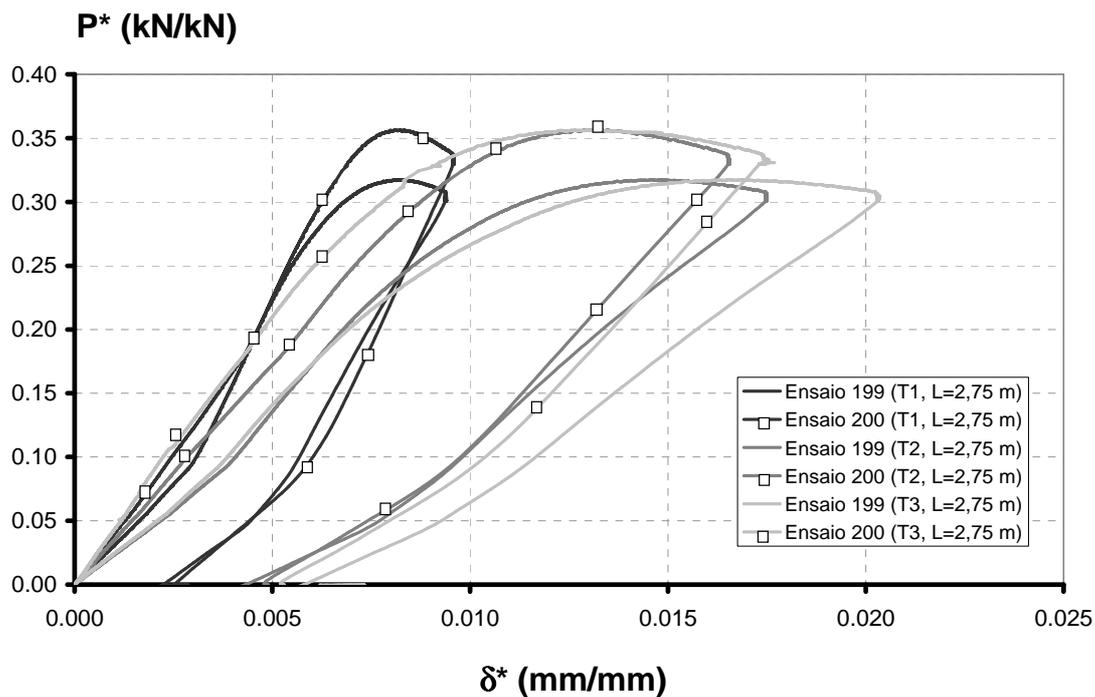


Figura 3.32 – Curvas $P^* - \delta_1^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=2,75$ m).

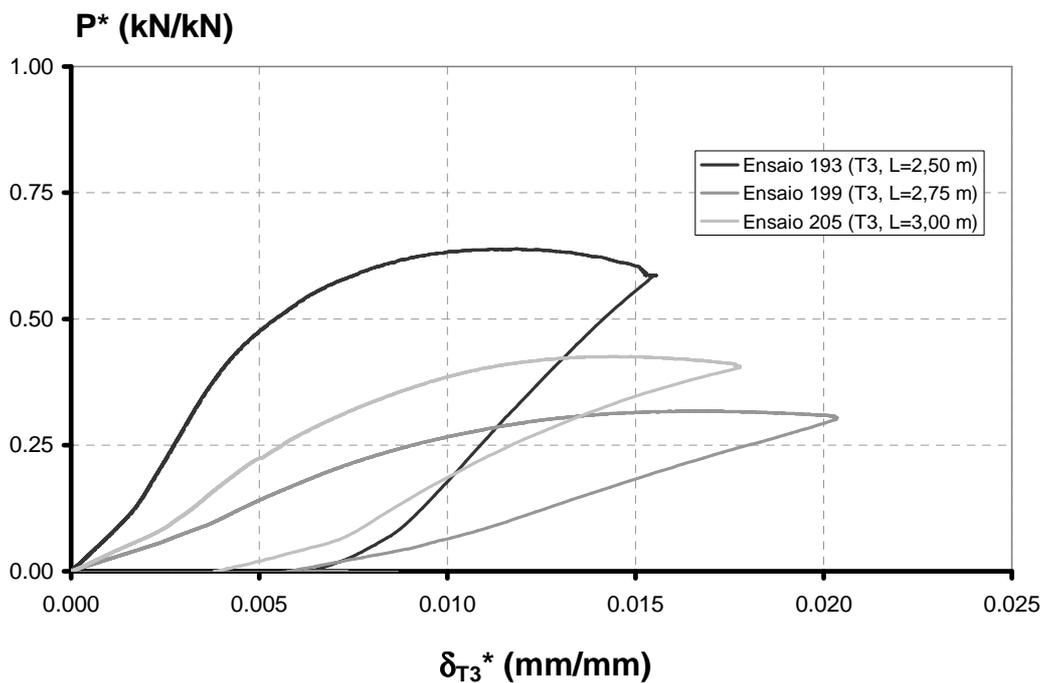


Figura 3.33 – Curvas $P^* - \delta_{T_3}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias, transdutor T_3).

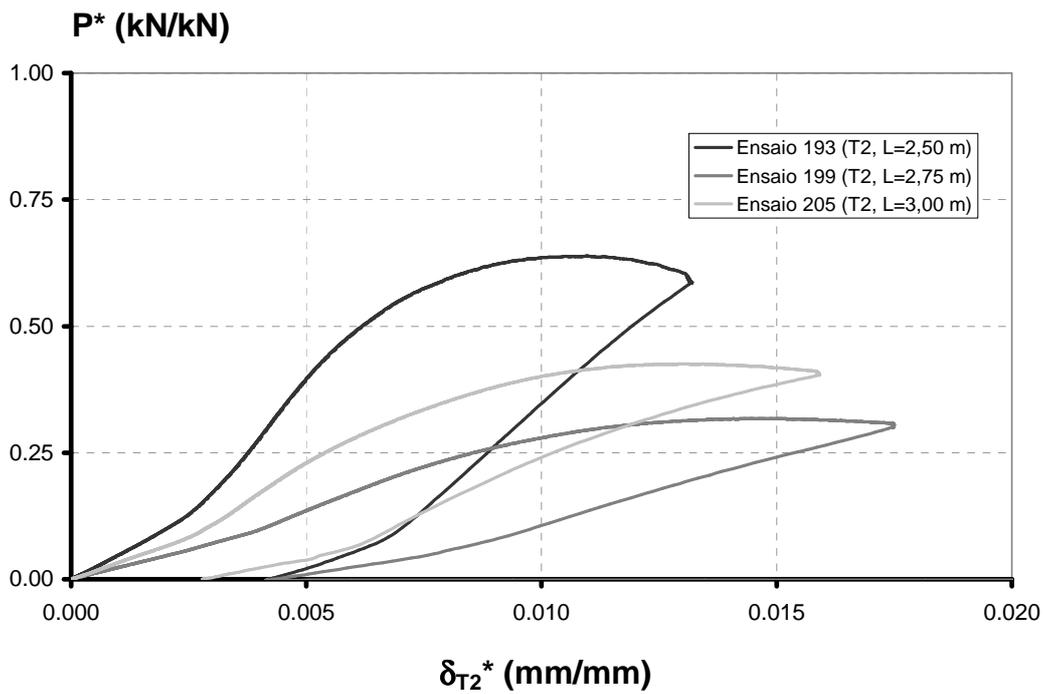


Figura 3.34 – Curvas $P^* - \delta_{T_2}^*$ obtidas nos ensaios à ruptura para a configuração normal (alturas intermédias, transdutor T_2).

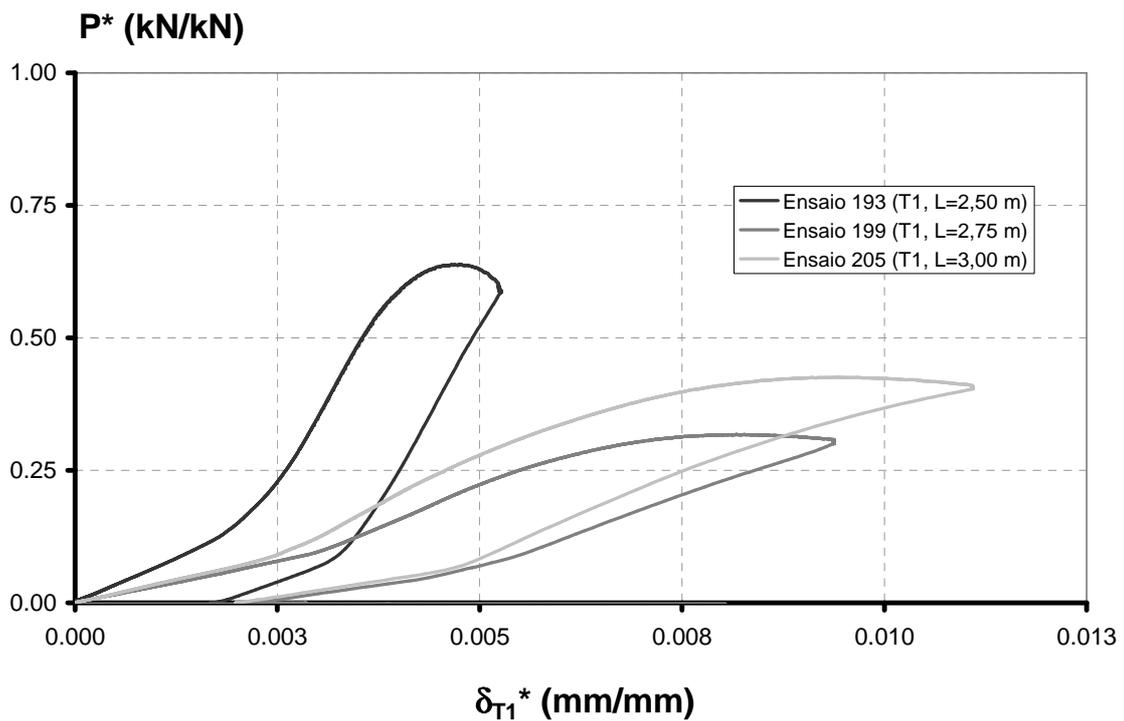


Figura 3.35 – Curvas $P^* - \delta_{T_1}^*$ obtidas nos ensaios à ruptura para a configuração normal (alturas intermédias, transdutor T_1).

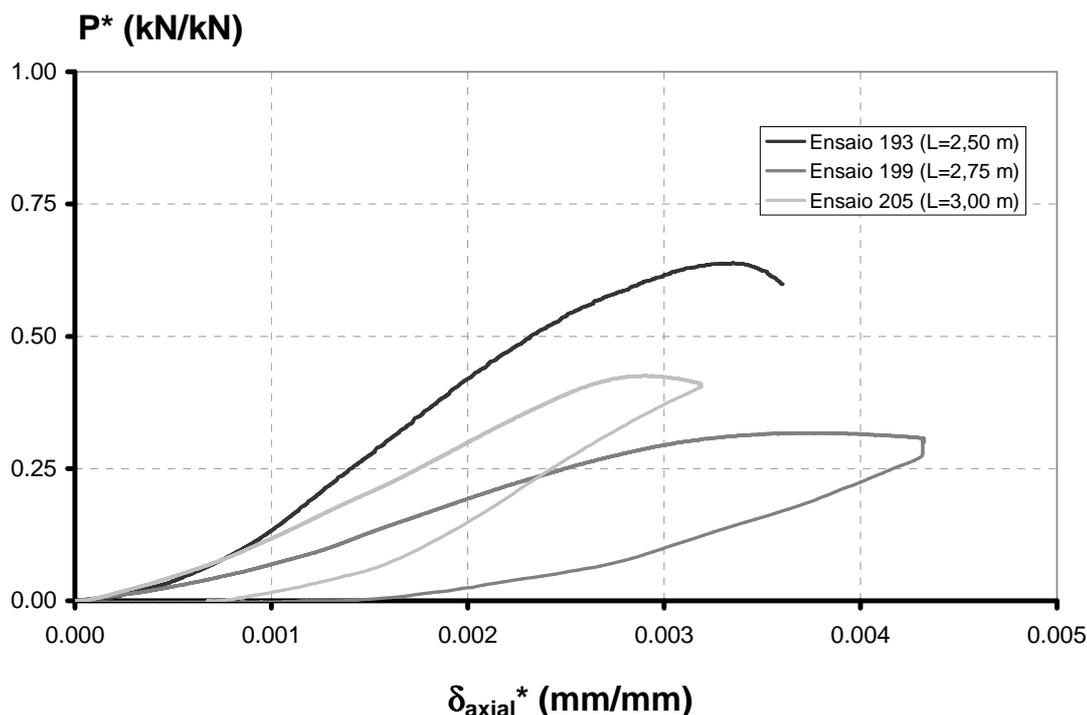


Figura 3.36 – Curvas $P^* - \delta_{axial}^*$ obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal (alturas intermédias).

Deste modo, pode-se afirmar que a menor resistência última obtida nos prumos com $L=2,75$ m se deve a uma perda de rigidez que teve lugar durante o ensaio, devido à ocorrência de deformações plásticas mais elevadas nas paredes dos tubos exterior e (sobretudo) interior – *i.e.*, a configuração inicial imposta ao prumo no início do ensaio é mais condicionante para $L=2,75$ m que para $L=2,50$ m ou $L=3,00$ m (para uma mesma carga, os dois últimos prumos ficam submetidos a menores esforços).

Analisando as figuras 3.29 e 3.30 e a Tabela 3.11 observa-se que a altura intermédia a que corresponde a menor resistência do prumo é a altura L_8 correspondente a 3,25 m.

No entanto, a norma EN 1065:1998 especifica que a altura intermédia mais condicionante corresponde à menor relação entre a resistência última do prumo obtida experimentalmente ($R_{y,ensaio}$) e a respectiva resistência característica nominal ($R_{y,classe}$) – para a classe A, tem-se:

$$\text{Classe A: } R_{y,A} = 51,0 \cdot \frac{l_{\max}}{l^2} \leq 44,0 \text{ kN} \quad (3.7)$$

Resume-se no Capítulo 6 o processo de determinação da posição intermédia de acordo com a EN 1065:1998. Observa-se que o comprimento intermédio condicionante é 2,75 m, e não 3,25 m - o que conduz a menores resistências.

3.4.3.2.4. Ensaio de prumos instrumentados com extensómetros

Os prumos instrumentados com extensómetros tinham a altura máxima ($L=3,50$ m) e foram ensaiados na configuração normal (a que corresponde à menor resistência última). Em cada prumo instrumentaram-se três secções: (i) a secção do tubo exterior situada junto à base inferior do prumo

(secção 1), a qual permite avaliar o momento flector que aí actua, (ii) a secção do tubo exterior que corresponde ao final do comprimento de intersecção dos dois tubos (secção 2), que permite caracterizar o efeito de contacto entre os dois tubos e detectar uma possível plastificação localizada, e (iii) uma secção do tubo interior situada entre dois furos na zona onde ocorrem os maiores deslocamentos (secção 3 – junto à ligação entre os dois tubos). Em cada secção utilizaram-se dois extensómetros, os quais foram colocados nas paredes dos tubos e em faces diametralmente opostas (perpendicular ao eixo de flexão do prumo).

Posteriormente à realização dos ensaios, procedeu-se à validação dos extensómetros. A validação foi feita realizando um ensaio de tracção de uma chapa de aço instrumentada com um extensómetro eléctrico, e comparando o valor da força aplicada ao provete, medida através da célula de carga da máquina de ensaio, com o esforço axial determinado a partir da deformação registada pelo extensómetro, para vários ciclos carga-descarga (utilizando para o valor do módulo de elasticidade cálculo neste ensaio). Obtiveram-se valores de força semelhantes pelos dois processos de medição.

Os extensómetros identificados por X-1 (em que X simboliza a secção do prumo onde estão colocados) correspondem à face convexa da configuração deformada do prumo. Realizaram-se dois ensaios até à rotura do prumo. No primeiro ensaio, denominado por *Ext1*, registaram-se as deformações na base inferior do prumo (extensómetros 1-1 e 1-2) e na zona de maiores deslocamentos (extensómetros 3-1 e 3-2). No segundo ensaio, denominado por *Ext2*, registaram-se as deformações na base inferior do prumo (extensómetros 1-1 e 1-2) e na secção 2 (extensómetros 2-1 e 2-2). Em todos os ensaios registou-se adicionalmente o encurtamento axial do prumo e os deslocamentos transversais acima do dispositivo de ligação dos tubos.

Os resultados dos ensaios estão resumidos na Figura 3.37.

Os valores obtidos para a resistência (25,66 kN e 26,82 kN para os ensaios *Ext1* e *Ext2*, respectivamente) dos prumos são muito semelhantes aos já apresentados para esta altura. O comportamento registado é igualmente similar.

Como os extensómetros não registaram valores de extensão acima do valor efectivo de cedência ($2,51 \times 10^{-3}$ mm/mm e $2,02 \times 10^{-3}$ mm/mm para o tubo interior e exterior, respectivamente), é possível utilizar sem restrições a Lei de Hooke [3.13] no cálculo de tensões nas paredes dos tubos através das extensões medidas pelos extensómetros, ver a Figura 3.38.

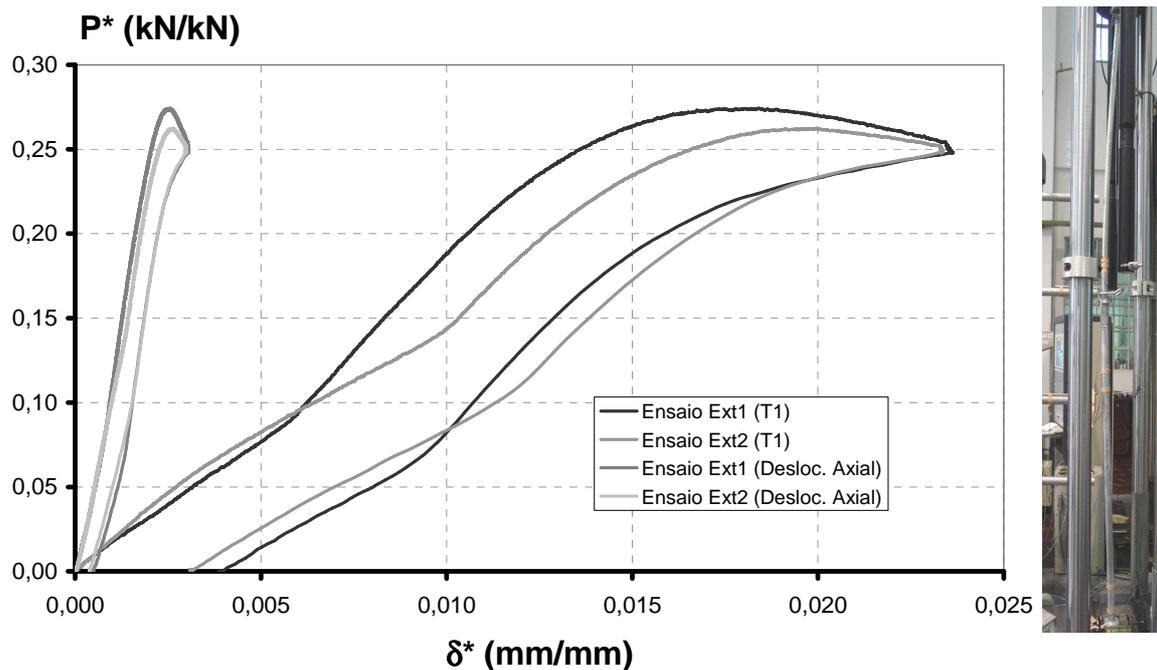


Figura 3.37 – Curvas P^* - δ^* relativas a deslocamentos axiais e transversais (T_1) obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=3,50$ m com extensómetros).

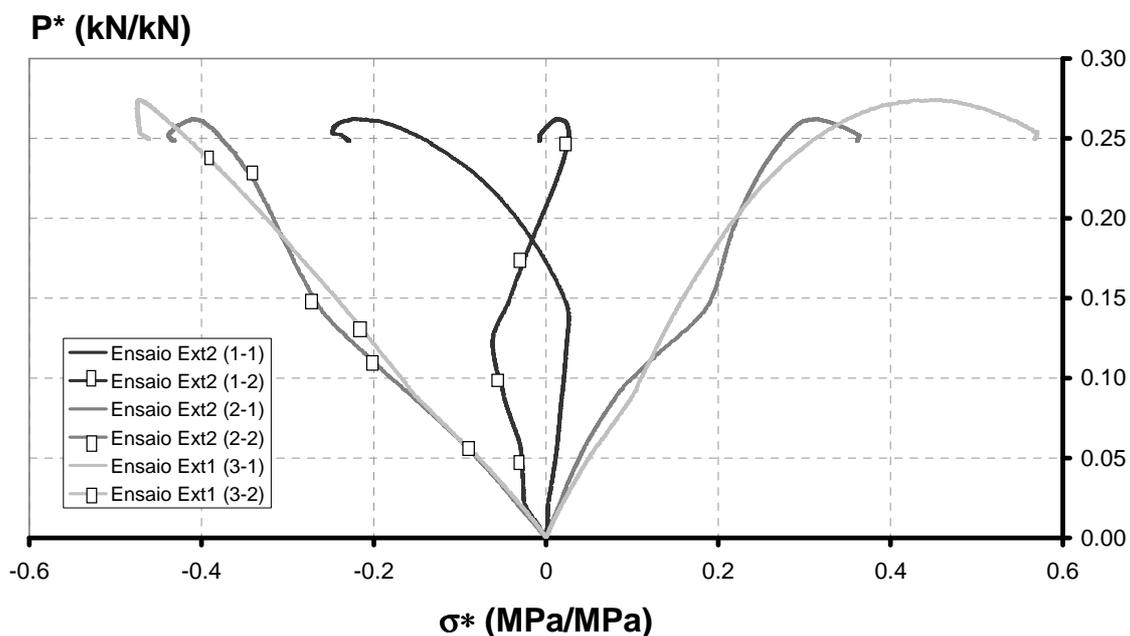


Figura 3.38 – Curvas P^* – σ^* obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=3,50$ m com extensómetros).

Acompanhou-se também a evolução das condições de apoio na base inferior do prumo à medida que o ensaio progride, ver a Figura 3.39³. Inicialmente, o facto de não existir contacto total entre a chapa da

³ As variáveis adimensionais P^* e M^* são relativas ao esforço normal de cedência e momento-flector de cedência do tubo exterior.

base inferior do prumo e a chapa do prato do dispositivo inferior (devido às folgas provocadas pela rotação inicial da base inferior), a chapa de base trabalha em consola, o que gera o aparecimento de um momento flector de extremidade que introduz trações na face longitudinal convexa do tubo inferior (face 1) e compressões na face côncava (face 2) – foi possível constatar este facto através das medições dos extensómetros colados na secção 1. Posteriormente, ocorre o contacto total entre as duas chapas, o que causa uma restrição à rotação na base inferior, a qual passa a estar submetida a um momento flector típico de um encastramento (de sinal oposto ao existente antes do contacto) – este facto foi confirmado através da medição, na secção 1, de extensões negativas (de compressão) na face 1 e positivas (de tração) na face 2. Conforme foi já referido, não se observaram deslocamentos verticais significativos nas chapas inferiores dos prumos, provocados pela flexão dessas mesmas chapas, o que está de acordo com os registos dos extensómetros. Finalmente, note-se que não foi detectado qualquer efeito localizado na extremidade do comprimento de intersecção dos tubos interior e exterior – medições dos extensómetros colocados na secção 2, onde os tubos estão em contacto.

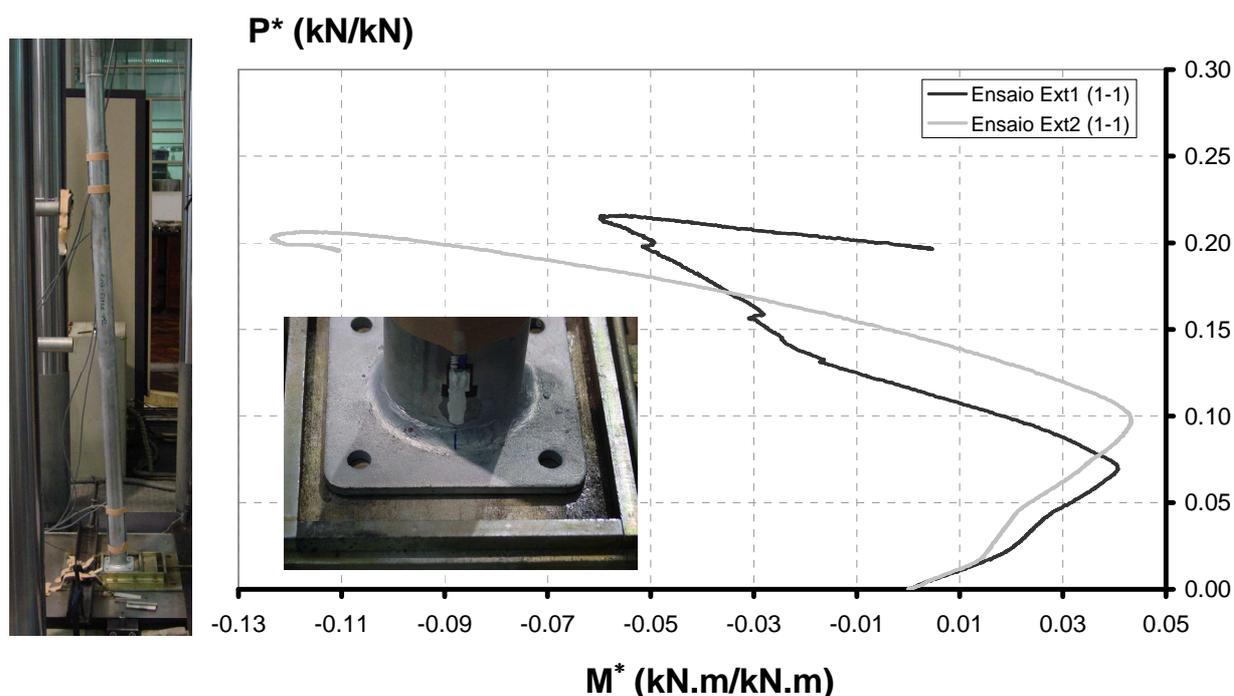


Figura 3.39 – Curvas P*-M* na base inferior obtidas nos ensaios à rotura para a configuração normal ($L=3,50$ m com extensómetros).

3.4.3.2.5. Medição dos principais parâmetros geométricos dos prumos

Por fim, para avaliar se as dimensões reais das principais componentes do prumo se desviavam muito dos respectivos valores nominais foi realizada uma série de medições, ver igualmente o Capítulo 6.

As tabelas 3.12 a 3.15 contêm o valor médio e o desvio padrão obtido para os parâmetros mais relevantes. Foram controladas as dimensões das secções transversais dos tubos, o comprimento dos tubos e ainda as dimensões das bases.

Como se pode verificar não existe grande variabilidade nos resultados, comparando os valores médios com os nominais, apenas se regista uma ligeira diferença (superior) em relação ao valor nominal para a espessura média da chapa do tubo interior (3,2 mm).

Tabela 3.12 – Espessura da parede do tubo exterior e interior.

Média, Tubo Exterior (mm)	2,55
Desvio padrão, Tubo Exterior (mm)	0,05
Média, Tubo Interior (mm)	3,32
Desvio padrão, Tubo Interior (mm)	0,09

Tabela 3.13 – Comprimentos dos tubos exteriores e interior

Média, Tubo Exterior (mm)	1900,75
Desvio padrão, Tubo Exterior (mm)	0,22
Média, Tubo Interior (mm)	2000,62
Desvio padrão, Tubo Interior (mm)	0,22

Tabela 3.14 – Espessura das chapas das bases dos tubos exterior e interior.

Média, Tubo Exterior (mm)	6,05
Desvio padrão, Tubo Exterior (mm)	0,02
Média, Tubo Interior (mm)	6,06
Desvio padrão, Tubo Interior (mm)	0,02

Tabela 3.15 – Largura das chapas das bases dos tubos exterior e interior.

Média, Tubo Exterior (mm)	109,71
Desvio padrão, Tubo Exterior (mm)	0,06
Média, Tubo Interior (mm)	109,62
Desvio padrão, Tubo Interior (mm)	0,10

3.5. Discussão dos resultados obtidos

Na medida em que não se detectou qualquer plastificação nas secções instrumentadas (secções críticas) quando actua a força máxima, pode pensar-se que os prumos com $L=3,50$ m instabilizam em regime elástico, o que confirmaria a ideia inicial que o prumo para esta altura instabiliza em regime elástico, baseada na fórmula proposta por Singer [3.12] para o cálculo da tensão crítica de um cilindro longo dada por:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eq}}{A_{eq} L_{eq}^2} \quad (3.8)$$

Para um prumo equivalente (ver o Capítulo 5), encastrado na extremidade inferior e rotulado na extremidade superior, obtém-se uma tensão crítica de 107 MPa, valor muito inferior ao valor da tensão de cedência efectivo, e nominal, do material dos tubos do prumo.

No entanto, este resultado deve ser entendido como aproximado. De facto, a rotura de um prumo (que se considera ocorrer no instante em que é atingida a força máxima) é sempre devida à soma dos efeitos da instabilidade elástica e da plasticidade do material. Dos resultados experimentais pode concluir-se

que o comportamento do prumo para $L=3,5$ m é influenciado de modo significativo pelos efeitos de segunda ordem em regime elástico, i.e. apresenta uma trajectória de equilíbrio estável, em regime elástico, até à proximidade do ponto limite (coincidente com a força máxima registada nos ensaios) da trajectória de equilíbrio, após o qual passa a apresentar uma trajectória de equilíbrio instável devido à cedência do material (regime inelástico) ao longo do prumo.

Observou-se, com alguma surpresa, que ocorre uma diminuição acentuada da resistência última do prumo quando a sua altura diminui de $L=3,00$ m para $L=2,75$ m. A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a menor resistência última obtida nos prumos com $L=2,75$ m se deve a uma perda de rigidez que teve lugar durante o ensaio, devido à ocorrência de deformações plásticas mais elevadas nas paredes dos tubos exterior e (sobretudo) interior – i.e., a configuração imposta ao prumo no início do ensaio é mais condicionante para $L=2,75$ m que para $L=2,50$ m ou $L=3,00$ m (para uma mesma carga, os dois últimos prumos ficam submetidos a menores esforços).

A redução de resistência registada pode ser justificada por a configuração imposta no início do ensaio tornar o prumo susceptível a instabilizar por combinação de dois modos de encurvadura, sendo o valor da carga crítica deste modo conjunto de instabilidade menor do que as cargas críticas dos modos quando considerados independentemente. Neste caso o prumo instabiliza em regime elástico exibindo uma trajectória de pós-encurvadura instável. Por outro lado, a redução de resistência pode advir da sensibilidade do prumo às imperfeições iniciais, em especial as imperfeições geométricas detectadas no início dos ensaios na forma da chapa da base inferior.

A dispersão dos resultados pode ser igualmente explicada com base nessa sensibilidade, mas também pela variação das propriedades mecânicas do material dos prumos. A influência destes dois factores no comportamento deste tipo de elementos pode ser justificada à luz da teoria da instabilidade elastoplástica [3.8]. Com base nesta teoria demonstrou-se, para o intervalo de valores de esbeltezas intermédias, que a configuração e magnitude das imperfeições iniciais, e a variação das propriedades mecânicas do material, condicionam de forma significativa o comportamento e a resistência deste tipo de elementos [3.9 – 3.11]. Não esquecer igualmente, que para este intervalo de esbeltezas o efeito das tensões residuais contribui igualmente para justificar a dispersão verificada dos valores de resistência.

Por fim, constata-se que, segundo o critério de determinação do comprimento intermédio condicionante especificado na norma EN 1065:1998, este corresponde a 2,75 m, e não a 3,25 m – o comprimento que conduz a menores resistências em valor absoluto.

Para avaliar o modo de rotura dos prumos para as várias alturas de ensaio é necessário conhecer as características do material recolhido dos dois tubos, tubo interior e tubo exterior. Para tal realizaram-se ensaios de tracção de provetes de material recolhido dos dois tubos. Os ensaios de tracção e os seus resultados estão descritos no Anexo E. A Tabela 3.16 e a Tabela 3.17 resumem os principais resultados destes ensaios.

Tabela 3.16 – Resumo dos resultados dos ensaios de tracção.

		R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	A _{5√S₀} (%)
T _{int}	Média	515	541	14,7%
	Desvio padrão	35	40	2,8%
T _{ext}	Média	415	487	29,8%
	Desvio padrão	12	14	2,4%

Tabela 3.17 – Esforços resistentes, efectivos e nominais, dos tubos.

Tubo	Reais (Resultados médios)		Nominais	
	N _{pl,rk} (kN)	M _{y,el} (kN.m)	N _{pl,rk} (kN)	M _{y,el} (kN.m)
T _{int}	182,99	1,95	97,77	1,04
T _{ext}	187,43	2,59	124,19	1,71

É possível constatar que existe uma diferença considerável entre os valores nominais (275 MPa) e os valores efectivos da tensão de cedência do material dos dois tubos, e que a dispersão (desvio padrão) dos resultados é maior no tubo interior (7% vs. 3% no tubo exterior). A primeira observação conduz a esforços resistentes (esforço normal e momento-flector) efectivos muito superiores aos nominais. Verifica-se deste modo que os valores do esforço normal resistente efectivo dos dois tubos passam a ser bastante próximos. Do mesmo modo, observa-se que o momento-flector resistente efectivo da secção do tubo exterior continua a ser superior ao respectivo esforço resistente do tubo interior. A extensão de cedência é semelhante nos dois tubos, e a extensão após rotura (A_{5√S₀}) é cerca de 15% e 30% nos tubos interior e exterior, respectivamente.

Tendo em conta estes dados, a configuração deformada das várias componentes dos prumos registada nos ensaios, e a informação extraída dos modelos numéricos que simulam os ensaios, é possível avaliar o modo de rotura dos prumos para as várias alturas de ensaio.

Para comprimentos até $L=2,25$ m, o comportamento do prumo é condicionado pela rotura do pino:

- Para 2,00 m (+ 1 cm), o colapso do prumo é caracterizado pela rotura da ligação por plastificação do pino, interacção corte e flexão, registando-se igualmente ovalização significativa dos furos do tubo interior na zona da ligação;
- Para 2,25 m de comprimento, na configuração normal a rotura do prumo caracteriza-se pela plastificação do pino e da parede do tubo interior na zona do furo de ligação. Como o deslocamento vertical devido à cedência do pino não provoca que o tubo interior assente na fundação, não se verifica um aumento da rigidez após a cedência do pino. Por sua vez, na configuração invertida do prumo a rotura caracteriza-se pela à plastificação do pino e possivelmente da parede do tubos interior.

Para 2,50 m de comprimento, na configuração normal a rotura do prumo parece caracterizar-se pela cedência da parede do tubo interior na zona dos furos, registando-se ovalização ligeira dos furos do

tubo interior. Na configuração invertida a rotura do prumo parece caracterizar-se pela cedência da parede do tubo interior, com ovalização dos furos e deformações plásticas significativas na zona do pino.

A partir de 2,75 m de comprimento, na configuração normal a rotura do prumo parece caracterizar-se pela cedência da parede do tubo interior, não se registando ovalização dos furos do tubo interior, nem cedência do pino. Na configuração invertida a rotura do prumo parece caracterizar-se igualmente pela cedência da parede do tubo interior, não se registando ovalização dos furos do tubo interior, nem plastificação do pino.

As tabelas 3.18 e 3.19 mostram um resumo dos resultados obtidos durante a campanha de ensaios efectuada. A análise dos valores aí apresentados ilustra que, em geral, a resistência última dos prumos diminui com o aumento da sua altura. Para todas as alturas ensaiadas, obtiveram-se maiores resistências últimas quando os prumos foram ensaiados na sua configuração invertida – este facto resulta de, sob uma mesma carga aplicada ao prumo, as secções críticas (localizadas no tubo interior) estarem sujeitas a menores esforços na configuração invertida que na configuração normal, o que faz com que lhes seja possível suportar cargas axiais e deslocamentos transversais mais elevados. Esta observação, explica-se por na configuração invertida as condições de fronteira terem sido trocadas (excentricidade da força aplicada na extremidade do tubo exterior e rotação aplicada na extremidade do tubo interior). Este facto, aliado à maior inércia da secção transversal do tubo exterior em relação à do tubo interior, leva à existência de menores efeitos P-Delta globais na configuração invertida do que na configuração normal. Deste modo, na configuração invertida, as secções sujeitas a maiores esforços, para a mesma carga, pertencem ao tubo exterior e não ao tubo interior como acontece na configuração normal. A soma destes factos aliados à maior resistência e ductilidade da secção transversal do tubo exterior face à do tubo interior (ver o Anexo E e a Tabela 3.16), conduz a uma resistência mais elevada do prumo na configuração invertida.

Para além disso, observa-se também que a diferença entre os dois valores da resistência última, na configuração normal e na configuração invertida, aumenta à medida que decresce a altura do prumo, até $L=2,50$ m, já que para alturas menores a rotura é condicionada pela resistência da ligação entre os dois tubos. O aumento da diferença deve-se ao papel mais preponderante - com a diminuição da altura de ensaio - que a maior rigidez, resistência e ductilidade da secção do tubo exterior face ao tubo interior desempenham no comportamento global dos prumos.

Com base na informação contida na Tabela 3.17 e Tabela 3.18 é possível concluir que (i) as tensões de membrana (responsáveis pelo encurtamento axial) são dominantes no caso dos prumos com a altura mínima ($L=2,00$ m), que (ii) os prumos de alturas $L=2,25$ m e $L=2,50$ m exibem, na sua configuração invertida, um comportamento misto membrana-placa, e que (iii) nos prumos com as restantes alturas, as tensões devidas à flexão da placa são dominantes e condicionam o comportamento global.

Tabela 3.18 – Resumo dos resultados obtidos.

Comprimento (m)	Configuração normal				Configuração invertida			
	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)	Mecanismo de rotura	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)	Mecanismo de rotura
2,00 ⁴	155	-	80,45	Cedência do pino	175	-	76,40	Cedência do pino
	156	83,10			176	73,60		
	157	77,80			177	79,20		
2,25	185	78,39	78,39	Cedência do pino e da parede do tubo interior	187	82,90	82,90	Cedência do pino e da parede do tubo interior
2,50	193	62,44	62,44	Cedência da parede do tubo interior	194	78,15	78,15	Cedência da parede do tubo interior
2,75	199	31,04	32,94		201	46,08	46,08	
	200	34,84			207	51,32	51,32	
3,00	205	41,61	41,88		215	39,26	37,84	
	206	42,14			216	35,67		
3,25	211	31,45	31,72	217	41,01			
	212	32,92		218	35,44			
	213	30,97		Instabilidade do prumo em regime elástico	28,32	Instabilidade do prumo em regime elástico		
	214	31,55						
3,50	92	25,95	26,10	119	26,75			
	105	26,50		120	26,56			
	106	25,95		121	28,98			
	123	25,71		122	31,005			
	124	26,37						

Em geral, a um aumento da altura do prumo correspondem maiores valores dos deslocamentos transversais e encurtamentos axiais, ver a Tabela 3.19. No entanto, esta regra não se verifica quando se comparam os prumos com $L=2,75$ m e com $L=3,00$ m, em virtude do primeiro destes comprimentos corresponder à altura intermédia condicionante, *i.e.*, aquela para a qual a configuração geométrica inicial imposta provoca uma maior diminuição na resistência última do prumo.

Destaca-se igualmente o facto das medições da folga existente entre a chapa de base inferior do prumo e a chapa do prato do dispositivo inferior, realizadas na iminência da rotura (*i.e.*, quando actua a força máxima registada), terem mostrado que apenas existe separação entre estas duas chapas (devida à flexão da chapa de base inferior do prumo) nos prumos de alturas $L=2,75$ m, $L=3,25$ m e $L=3,50$ m – mas, mesmo nestes casos, essa separação é diminuta, pois nunca excede os 0,80 mm.

Através da Tabela 3.20 é possível realizar uma análise crítica das fórmulas propostas pela norma EN 1065:1998 e pela parte 1-8 do Eurocódigo 3 para a verificação da ligação entre os dois tubos. Admitiu-se que a tensão de cedência e a tensão última do material do pino correspondem a 450 MPa e a 550 MPa, respectivamente.

⁴ Não foi possível levar à rotura os prumos ensaiados na extensão mínima. Os resultados indicados para os ensaios 156-157 e 176-177 correspondem à força de rotura do pino.

Tabela 3.19 – Resumo dos resultados obtidos (continuação).

Comprimento (m)	Configuração normal						Configuração invertida					
	F _{max} , média (kN)	Deslocamentos adimensionais na força máxima					F _{max} , média (kN)	Deslocamentos adimensionais na força máxima				
		T1* _{,média} (mm/mm)	T2* _{,média} (mm/mm)	T3* _{,média} (mm/mm)	T4* _{,média} (mm/mm)	Axial* _{, média} (mm/mm)		T1* _{,média} (mm/mm)	T2* _{,média} (mm/mm)	T3* _{,média} (mm/mm)	T4* _{,média} (mm/mm)	Axial* _{, média} (mm/mm)
2,00 ⁵	80,45	0,0066	0,0051	0,0020	-	0,0060	76,40	0,0010	0,0039	0,0055	-	0,0062
2,25 ⁶	78,39	0,0027	0,0108	0,0112	0,0090	0,0090	82,90	0,0032	-	-	-	0,0070
2,50	62,44	0,0048	0,0110	0,0118	-	0,0033	78,15	0,0094	0,0145	0,0097	-	0,0063
2,75	32,94	0,0083	0,0142	0,0159	-	0,0037	46,08	0,0131	0,0169	0,0142	-	0,0042
3,00	41,88	0,0094	0,0130	0,0144	-	0,0027	51,32	0,0141	0,0143	0,0119	-	0,0031
3,25	31,72	0,0126	0,0178	0,0147	-	0,0027	37,84	0,0123	0,0165	0,0142	-	0,0025
3,50	26,10	0,0095	0,0156	0,0185	0,0146	0,0025	28,32	0,0146	0,0205	0,0193	0,0128	0,0027

Tabela 3.20 – Verificação da ligação entre os dois tubos, segundo a norma EN 1065 e a parte 1-8 do EC3.

Altura (m)	Esforço, F _s (kN)	Corte do pino, R _{s,p} (kN)	Esmagamento tubo interior EC3, R _{b,t} (kN)	Esmagamento tubo interior EN 1065, R _{b,t} (kN)	Momento actuante na ligação, M _{sd,EC3} (kN.m)	Momento resistente da ligação, M _{rd,EC3} (kN.m)	Interacção Corte+Flexão do pino, EC3
2,00	40,2	43,8	28,1	45,4	0,25	0,15	3,8
2,25	39,2				0,24		3,6
2,50	31,2				0,19		2,3
2,75	16,5				0,10		0,6
3,00	20,9				0,13		1,0
3,25	15,9				0,10		0,6
3,50	13,0				0,08		0,4

É possível observar que a fórmula prevista na parte 1-8 do Eurocódigo 3 para a verificação ao esmagamento da secção do tubo interior é conservativa, e que as fórmulas indicadas na mesma norma para a verificação da interacção corte-flexão na ligação subestimam consideravelmente a resistência da ligação.

⁵ Não foi possível levar à rotura os prumos ensaiados na extensão mínima. Os resultados indicados correspondem à média da força de rotura do pino.

⁶ Na configuração invertida, os transdutores T₂ a T₄ saíram da posição inicial durante o ensaio, pelo que não são apresentados os resultados obtidos.

No entanto, se considerarmos que o momento-flector resistente do pino é dado por $M_{rd,p} = W_{pl,p} \times f_{y,p}$, em vez da equação (2.6), em que $W_{pl,p}$, representa o módulo plástico da secção transversal do pino, chega-se a resultados que traduzem de forma mais satisfatória a realidade, ver a Tabela 3.21.

Não obstante, considera-se necessária a revisão da fórmula para obter a resistência ao corte do pino, e o desenvolvimento de fórmulas simples, adequadas ao caso dos prumos, para determinação do momento actuante no pino e o momento resistente deste.

Tabela 3.21 – Verificação da ligação entre os dois tubos, segundo a norma EN 1065 e a parte 1-8 do EC3 (modificada).

Altura (m)	Esforço, F_s (kN)	Corte do pino, $R_{s,p}$ (kN)	Esmagamento tubo interior EC3, $R_{b,t}$ (kN)	Esmagamento tubo interior EN 1065, $R_{b,t}$ (kN)	Momento actuante na ligação, $M_{sd,EC3}$ (kN.m)	Momento resistente da ligação, M_{rd} (kN.m)	Interacção Corte+Flexão do pino
2,00	40,2	43,8	28,1	45,4	0,25	0,16	3,1
2,25	39,2				0,24		3,0
2,50	31,2				0,19		1,9
2,75	16,5				0,10		0,5
3,00	20,9				0,13		0,8
3,25	15,9				0,10		0,5
3,50	13,0				0,08		0,3

3.6. Conclusões

Neste capítulo apresentou-se o estudo experimental de prumos telescópicos extensíveis desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), realizado de acordo com a norma EN 1065:1998.

Após a apresentação da revisão bibliográfica sobre ensaios de prumos anteriormente realizados em Portugal (ver igualmente o Anexo A) e em Itália, foram caracterizados os prumos ensaiados, definidas as condições iniciais dos ensaios (em particular as imperfeições geométricas a impor de início), e o equipamento (incluindo acessórios de ensaio) e tipo de instrumentação utilizada.

Previamente à realização dos ensaios à rotura dos prumos, foi desenvolvido um estudo preliminar, resumido no Anexo B.1. Este estudo permitiu aumentar a informação disponível sobre o ensaio e sobre aspectos que podem afectar o comportamento estrutural dos prumos – por exemplo, os aspectos relacionados (i) com as anomalias de funcionamento dos dispositivos de ensaio utilizados, (ii) com o posicionamento incorrecto do prumo ou (iii) com a posição em que se efectua o ensaio (*e.g.*, a influência de rodar os tubos do prumo em torno do seu eixo longitudinal).

O estudo inicial possibilitou concluir que o comportamento do prumo não é influenciado, de forma significativa, pela alteração da posição dos tubos através de uma rotação de 180° em torno do seu eixo – por esse motivo, os ensaios levados à rotura foram realizados sem tomar em consideração esse aspecto.

De seguida foram apresentados os principais resultados obtidos na campanha de ensaios realizada (os restantes resultados encontram-se descritos no Anexo B.2), começando pelas alturas extremas, máxima e mínima, do tipo de prumos ensaiado, e depois pelas cinco alturas intermédias ensaiadas.

Conclui-se que, em geral a resistência dos prumos diminui com o aumento do comprimento dos prumos, sendo a única excepção o comprimento de 2,75 m, no qual se registou uma queda brusca da resistência. Conclui-se igualmente que para a mesma altura se obtém uma maior resistência na configuração invertida do que na configuração normal.

Observou-se que para 2,25 m e 2,00 m de altura (correspondentes aos valores de extensão mais reduzidos do tubo interior) o comportamento e a resistência dos prumos são condicionados pela plastificação do material do pino que fixa o comprimento do prumo. Para as alturas mais elevadas os efeitos de segunda ordem são dominantes, sendo que o modo de rotura parece caracterizar-se pela plastificação do material do tubo interior.

Por fim, para o instante em que actua a força máxima registada no ensaio, registou-se uma separação diminuta entre a chapa da base inferior do prumo e a chapa do acessório inferior, indicando que após as duas chapas entrarem em contacto total, existe uma restrição elevada à rotação da base inferior do prumo, facto confirmado a partir dos resultados obtidos a partir dos extensómetros colocados junto à base inferior do prumo.

CAPÍTULO 4

ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS

4.1. Introdução

Hoje em dia, graças aos progressos na velocidade de processamento dos computadores e no aumento do espaço de armazenamento de dados, assiste-se a um acréscimo significativo da capacidade de computação disponível. Este facto, aliado ao desenvolvimento de novas ferramentas de cálculo automático, e à integração nestes programas, de modelos de comportamento cada vez mais complexos permite actualmente simular num computador um vasto conjunto de modelos físicos que até há pouco tempo não seria possível analisar sem recorrer a ensaios experimentais.

Em geral, para sistemas físicos complexos é inviável, ou impossível mesmo, obter uma solução por métodos analíticos. Nestes casos, recorre-se a métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos, Método das Diferenças Finitas ou outros métodos [4.1].

Na presente Dissertação apenas se vai abordar o primeiro dos métodos mencionados, o Método dos Elementos Finitos (MEF). Não ser abordados aspectos técnicos de aplicação prática. Não se procura demonstrar a fundamentação do método, dado que para esse fim existem diversas fontes bibliográficas [4.1-4.3].

Em primeiro lugar irá ser apresentado o problema da estabilidade de sistemas físicos. Não sendo exaustiva a abordagem ao tema, remete-se uma leitura mais interessada para a bibliografia a que se recorreu [4.4-4.12]. De seguida vão ser abordados aspectos técnicos de aplicação prática do MEF e por fim será apresentada a metodologia, os resultados e a discussão dos resultados obtidos a partir do estudo analítico e numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis.

4.2. Estabilidade estrutural

A estabilidade de um corpo pode ser definida como a medida da sua tendência em persistir num dado estado, quando sofre uma influência perturbadora externa que encoraja o corpo a abandonar o seu estado actual. Pelo contrário, pode definir-se instabilidade de um corpo como a medida da sua tendência em abandonar um dado estado quando uma situação interna o permite.

A acção perturbadora externa pode ir desde um impulso aleatório a desvios em relação a condições geométricas ideais ou propriedades do material que desviam o corpo do seu comportamento perfeito.

Vai ser abordada uma classe de problemas, que envolvem a análise da estabilidade estrutural, com as seguintes características [4.10]:

- As estruturas exibem um comportamento elástico linear;
- Os problemas são estáticos;

- As forças aplicadas são conservativas;
- As estruturas estão sujeitas a pequenas deformações;
- As estruturas podem apresentar imperfeições iniciais.

Enquadram-se nesta classe de problemas dois tipos de instabilidade, (i) instabilidade bifurcacional, e (ii) instabilidade por ponto limite.

Os tipos de instabilidade que vão ser estudados são do tipo bifurcacionais, i.e. existe uma bifurcação de equilíbrio. Um problema de instabilidade bifurcacional é caracterizado pela existência de [4.11]:

- Uma trajectória de equilíbrio (linear ou não-linear), que se inicia na origem do diagrama força-deslocamento;
- Uma trajectória de equilíbrio de pós-encurvadura, que não passa pela origem do diagrama força-deslocamento;
- Existência de um ponto de bifurcação, que corresponde à intersecção das duas trajectórias de equilíbrio e no qual a trajectória fundamental passa de estável a instável (se o material for elastoplástico pode-se atingir um ponto de bifurcação sem perda de estabilidade [4.7]).

O comportamento bifurcacional pode ser classificado como (a) assimétrico, (b) simétrico estável ou (c) simétrico instável, ver a Figura 4.1.

No entanto para sistemas reais, i.e. estruturas com imperfeições geométricas iniciais, deixa de ocorrer bifurcação de equilíbrio, passando a existir uma única trajectória de equilíbrio [4.12]. Na Figura 4.2 ilustram-se, a tracejado, as trajectórias de equilíbrio de sistemas imperfeitos. De salientar que para o caso assimétrico existem duas trajectórias, uma natural e outra complementar.

4.2.1. Análise de estabilidade

A análise de um problema de estabilidade envolve a determinação (i) das coordenadas do ponto de bifurcação (carga crítica ou de bifurcação), (ii) da configuração deformada exibida pela estrutura quando ocorre a bifurcação (modo de instabilidade) e (iii) das propriedades da trajectória de pós-encurvadura. As trajectórias de equilíbrio de um sistema, perfeito ou imperfeito, podem ser analisadas directamente a partir das equações de equilíbrio ou indirectamente com a ajuda de métodos energéticos, por exemplo. Nesta secção apenas irão ser abordados estes últimos uma vez que permitem analisar ao mesmo tempo a estabilidade do sistema.

4.2.1.1. Métodos Energéticos e Variacionais

Sistemas mecânicos conservativos são governados pelo Princípio da Conservação da Energia Total, E , entre dois estados consecutivos, I e II, do sistema. A conservação de energia estipula que a variação da energia total entre dois estados seja nula. Esta condição é expressa por [4.13]:

$$\Delta E_{II-I} = \Delta(T + V)_{II-I} = \Delta T_{II-I} + \Delta V_{II-I} = 0 \quad (4.1)$$

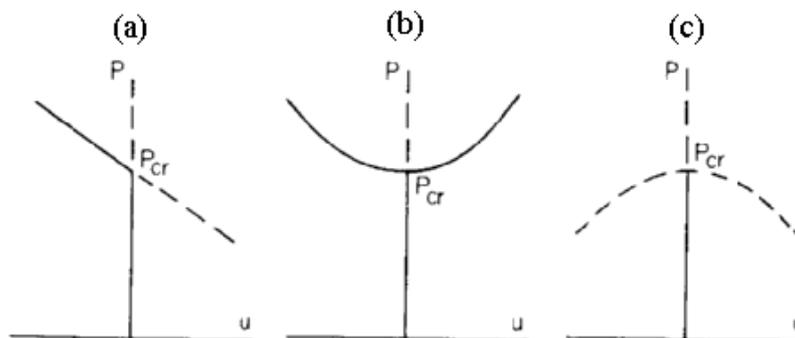


Figura 4.1 – Comportamento bifurcacional.

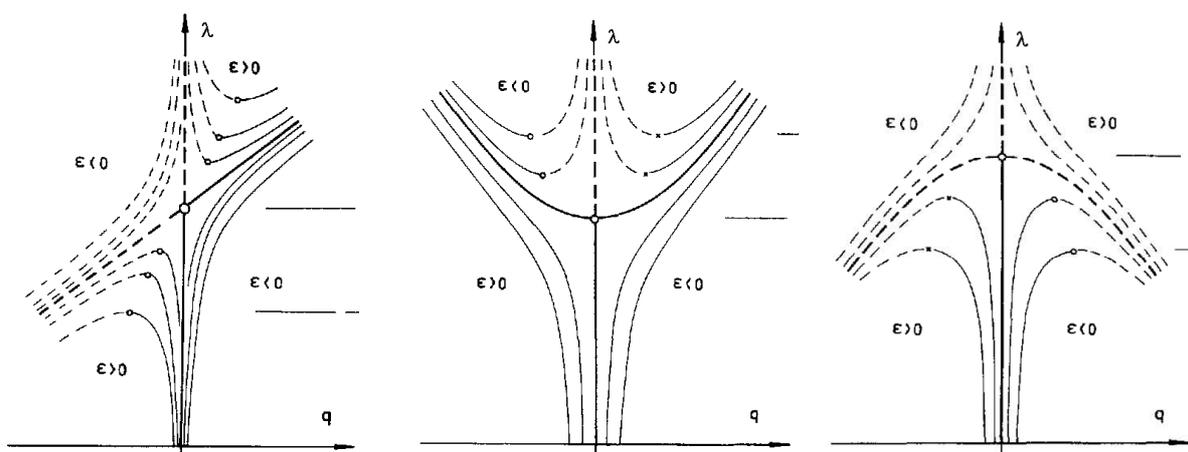


Figura 4.2 – Comportamento do sistema imperfeito.

Onde:

$$\Delta V = \Delta U - \Delta H \tag{4.2}$$

Em que:

E , representa a energia total do sistema;

T , representa a energia cinética do meio contínuo;

V , representa a energia potencial total do sistema;

U , representa a energia de deformação elástica interna;

H , representa a energia potencial;

A energia potencial, H , pode ser dividida em duas partes, i.e. $H = H_1 + H_2$, uma devida às forças de massa X_i , e outra devido às forças de fronteira F_i .

A energia potencial total, V , pode ser também expressa através do princípio dos trabalhos virtuais. Um trabalho virtual é o trabalho realizado sobre uma partícula ou um corpo deformável por forças (externas e/ou internas) que deslocam a partícula ou o corpo através de um hipotético deslocamento consistente com as restrições geométricas do sistema. As forças são mantidas constantes durante o

deslocamento virtual. O princípio dos trabalhos virtuais estipula que o trabalho virtual realizado por um sistema de forças durante um deslocamento virtual é nulo se o corpo estiver em equilíbrio, i.e. $\delta W = 0$. A mesma conclusão poderia ser obtida se tivermos em consideração o seguinte: se o sistema estiver inicialmente em equilíbrio estático, numa aproximação de primeira ordem, a variação de energia cinética é nula, e conseqüentemente a variação de energia potencial também o é, o que traduz o princípio da estacionariedade da energia potencial.

É importante caracterizar o equilíbrio, estável ou instável, de um estado na vizinhança do ponto crítico por este determinar o comportamento do sistema imediatamente após a encurvadura [4.14].

Se a interacção de um corpo elástico com um campo de forças ocorrer em condições conservativas, então a estabilidade desse corpo pode ser analisada a partir da soma da sua energia de deformação elástica e energia potencial. Qualquer diminuição desta soma é equivalente a um aumento da energia cinética por via de um movimento correspondente definido no espaço local; e a um aumento desta soma corresponde uma diminuição da energia cinética, se o corpo estiver inicialmente em movimento. Se uma alteração na energia potencial total do sistema a partir de um estado de equilíbrio estático for negativa, então em função de uma perturbação infinitesimal, só será possível uma diminuição da energia potencial total, conduzindo a um aumento da energia cinética e por via disso a um movimento instável desde a configuração de equilíbrio.

Este princípio de estudo sobre a estabilidade de um dado sistema pode ser aplicado a qualquer sistema desde que se conheça o funcional da energia potencial total.

No caso de sistemas discretos, Lyapunov [4.15] provou que é possível avaliar a estabilidade, a partir do estudo variacional da Energia Potencial Total, de um dado sistema actuado por um campo de forças conservativo. Nestes sistemas as deformações e, conseqüentemente, a energia interna são completamente definidas por um número finito de coordenadas generalizadas da deformação elástica. Se por outro lado, o campo de forças for conhecido, a função de energia total do sistema pode ser representada na forma de séries de Taylor com um número finito de variáveis ou coordenadas. Os coeficientes destas séries representam casos particulares do sistema discreto e podem ser determinados investigando as relações entre eles e as propriedades físicas do sistema [4.5].

No caso de sistemas contínuos, a sua configuração deformada só pode ser totalmente definida recorrendo a funções, isto é, a um número infinito de parâmetros.

A caracterização da configuração deformada de um sistema estrutural contínuo faz-se através de $U(X)$, onde U é o vector do campo de deslocamentos e X é o vector posição, referido ao referencial cartesiano da configuração indeformada do sistema. Admita-se que um dado sistema é actuado apenas por um único parâmetro de força λ .

Designe-se $U_f = U_f(\lambda)$ a trajectória fundamental de equilíbrio do sistema estrutural e por $U(\lambda) = U_f(\lambda) + u$ o campo de deslocamentos numa configuração adjacente, representando u o vector dos deslocamentos desde um ponto da trajectória fundamental até um outro estado do sistema.

A energia potencial total do sistema é dada por um funcional do campo de deslocamentos U e uma função de λ .

Tal como nos sistemas discretos, é possível desenvolver a energia potencial em série de Taylor em torno de uma configuração de equilíbrio da trajectória fundamental:

$$V[U_f + u, \lambda] = V[U_f, \lambda] + V_1[u, \lambda] + V_2[u, \lambda] + V_3[u, \lambda] + \dots \quad (4.3)$$

Tendo em consideração o princípio da estacionariedade da energia potencial tem-se $V_1[u, \lambda] = 0$.

Sabendo que para uma função diferenciável $f(x), a < x < b$ ter um extremo num ponto x_0

compreendido no intervalo $]a, b[$ é condição necessária que $\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = 0$, então a condição necessária

para um funcional I ser estacionário é que a sua primeira variação seja nula.

Considere-se o caso de um sistema com apenas uma variável independente x , e uma variável dependente y tal que (como exemplo apenas se consideram os termos até à segunda ordem):

$$I[y(x)] = I(y) = \int_{x_0}^{x_1} F(x, y, y_{,x}, y_{,xx}) dx \quad (4.4)$$

Resolvendo a primeira variação do integral [4.11] tem-se:

Condições de fronteira

$$\left[\frac{\partial F}{\partial y_{,xx}} \delta y_{,x} \right]_{x_0}^{x_1} + \left[\left(\frac{\partial F}{\partial y_{,x}} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y_{,xx}} \right) \delta y \right]_{x_0}^{x_1} = 0 \quad (4.5)$$

Domínio

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y_{,x}} + \frac{d^2}{dx^2} \frac{\partial F}{\partial y_{,xx}} = 0 \quad \Leftarrow \quad \text{Equações de Euler-Lagrange} \quad (4.6)$$

Qualquer função $\bar{y}(x)$ que satisfaça a equação diferencial no domínio e respeite as condições de fronteira torna o valor de $I(y)$ estacionário. A resolução da equação diferencial permite obter as cargas críticas e os respectivos modos de instabilidade do sistema.

Considerando na definição do funcional termos de ordem superior, obtém-se igualmente o comportamento de pós-encurvadura.

Da análise subsequente, consegue-se determinar a partir do funcional da energia potencial total as trajectórias de estados de equilíbrio possíveis no sistema em consideração. Acrescente-se que a função da

energia potencial total, também permite avaliar a estabilidade ou instabilidade dessas trajectórias ou estados de equilíbrio. Conclui-se que é possível analisar analiticamente a estabilidade de um dado sistema.

Um dado estado de equilíbrio I do sistema é então estável se num estado adjacente a energia potencial total de um sistema conservativo não puder ser convertida em energia cinética, mantendo-se a energia total do sistema constante. Esta condição tem de ser cumprida em todos os estados adjacentes fisicamente possíveis. Por outras palavras, uma variação positiva da energia cinética não pode advir de uma diminuição de energia potencial de um estado adjacente. Esta condição requer que a energia potencial seja positiva definida na totalidade da vizinhança do estado I .

O teorema da estabilidade de um estado em sistemas contínuos foi definido do seguinte modo por Koiter [4.15]: “A existência de um mínimo da energia potencial do sistema na configuração de equilíbrio representa uma condição necessária e suficiente para a estabilidade da configuração.”

4.2.1.2. Análise linear de estabilidade

Assume-se que a resposta da estrutura é linear, i.e. em regime elástico linear e que as forças e os deslocamentos são proporcionais (para pequenos deslocamentos na trajectória fundamental). A partir desta hipótese é possível determinar exactamente os valores das cargas de bifurcação e as configurações dos respectivos modos de instabilidade. Neste tipo de análise, estabelecem-se as equações de equilíbrio na configuração deformada, mas “linearizam-se” essas equações relativamente aos deslocamentos envolvidos, i.e. apenas se contabilizam os termos de primeira ordem o que é equivalente a reter apenas os termos quadráticos na expressão da energia potencial associada a essa configuração.

Os modos e as cargas críticas de um dado sistema podem ser calculados a partir de um problema de valores e vectores próprios, que para estados lineares de pré-encurvadura (relação linear entre força e deslocamentos) toma a seguinte forma, $V_c^{(2)} u_c \delta u = 0$.

No caso de existirem imperfeições iniciais é possível com base numa análise linear de estabilidade obter as trajectórias de equilíbrio que tendem assintoticamente para o valor da carga crítica do sistema [4.11].

Salvo raras excepções, correspondentes a problemas relativamente simples, não existem soluções analíticas (exactas) para as equações diferenciais de equilíbrio que regem os fenómenos de instabilidade em sistemas estruturais contínuos. Para resolver este tipo de problemas, é então necessário recorrer a métodos aproximados, os quais essencialmente discretizam os sistemas contínuos, isto é, substituem-nos por sistemas discretos aproximadamente equivalentes. A resolução exacta do problema de estabilidade no sistema discreto fornece uma solução aproximada para o sistema contínuo original.

Os métodos aproximados disponíveis podem dividir-se em dois grandes grupos. No primeiro grupo, impõe que a estrutura real se deforme de acordo com um conjunto de curvas previamente definidas e cujas amplitudes representam as coordenadas generalizadas do sistema. No segundo grupo, a estrutura real é simplificada dividindo-a em elementos. A deformação da estrutura simplificada é definida através dos deslocamentos nos nós de junção dos vários elementos.

Enquadram-se no primeiro grupo o método de Rayleigh-Ritz [4.11], e no segundo grupo o método dos elementos finitos [4.16] ou o método de Engesser-Newmark [4.17].

No entanto para casos simples a resolução da equação diferencial de equilíbrio também deve ser considerada. A equação de equilíbrio pode ser determinada através do equilíbrio na configuração deformada da barra.

4.2.1.3. Análise não linear de estabilidade

Quando se pretende determinar o comportamento de pós-encurvadura de um sistema estrutural, é necessário considerar termos não lineares nas equações de equilíbrio (estabelecidas na configuração deformada) [4.8-4.9, 4.18] Este tipo de análises são muito úteis pois permitem prever o comportamento pós-crítico de estruturas reais (imperfeitas), já que a trajectória de equilíbrio de uma estrutura imperfeita tende assintoticamente para a trajectória pós-crítica de uma estrutura perfeita.

4.3. Modelação pelo método dos elementos finitos

A exactidão de uma análise de elementos finitos pode ser afectada por:

- Linearização do problema;
- Modelação das propriedades dos materiais;
- Simplificações da geometria da estrutura;
- Densidade da malha de elementos finitos;
- Modelação do carregamento;
- Tipo de elementos finitos utilizados;
- Erros numéricos.

Nesta secção vão ser descritos os cuidados a ter na modelação de cada uma destas fontes de incerteza.

4.3.1. Modelação do comportamento elastoplástico do material

Este tipo de comportamento é típico dos metais. A extensão total pode ser decomposta numa parcela linear (recuperável) e numa parcela plástica (não recuperável), ocorrendo esta última para tensões superiores à tensão de cedência do material.

Em geral, utiliza-se o conceito de superfície de cedência, definida em coordenadas principais, para avaliar se um dado ponto entrou, ou não, na cedência. Nesta Dissertação utilizou-se o critério de plasticidade de Von-Misses [4.19], incorporando endurecimento isotrópico do material válido para incrementos de carga monotónicos e sem inversão do sentido da carga. Considerou-se que o comportamento do material é independente do gradiente de deformações aplicado à estrutura.

4.3.2. Modelação do comportamento geometricamente não-linear

A simulação de fenómenos físicos tais como problemas de estabilidade de pós-encurvadura requer a modelação do comportamento geometricamente não-linear.

Existem duas situações a considerar [4.20]:

- Deslocamentos grandes com deformações pequenas. Este tipo de comportamento ocorre quando uma estrutura se desloca embora as deformações sejam pequenas. Para avaliar este comportamento apenas tem de se aplicar uma transformação à matriz de rigidez que contemple as rotações verificadas. É comum utilizar-se a matriz de deformações de Green, embora também se possa recorrer ao conceito de deformação clássica. Em termos de tensões, utiliza-se o segundo tensor de tensões Piola-Kirchhoff, já que consiste numa boa aproximação das componentes do tensor de tensões de Cauchy (tensões verdadeiras) multiplicados pelo vector das rotações.
- Deformações grandes. Neste caso, a forma dos elementos altera-se e como tal a matriz de rigidez também se modifica, não sendo suficiente a transformação através do vector rotacional. É comum utilizar-se a matriz de deformações logarítmicas. Como a área transversal se modifica, deve exprimir-se a tensão, não em função da área inicial (tensão nominal), mas em função da área actual. Neste caso a resposta do material deixa de ser linear, apesar da Lei de Hooke se manter válida, já que para grandes deformações, o campo de deformações deixa de ser linear.

Em qualquer dos casos, a matriz de rigidez da estrutura depende do campo de deslocamentos, e como tal o problema é não-linear. Crocombe [4.21] indica 10% de extensão como uma primeira estimativa do valor da fronteira entre pequenas e grandes deformações, ao passo que Hinton [4.20] considera que se deve considerar 4% para este valor. No entanto adoptou-se nesta Dissertação um valor mais conservativo de apenas 2%. Para problemas estruturais nos quais são utilizados elementos de casca ou de viga, a aproximação de pequenas deformações é eficiente porque a pequena espessura ou a esbelteza dos elementos permitem que ocorram grandes deslocamentos associados a pequenas deformações. Analisando graficamente a relação deformações de Green vs. tensões nominais (ou 2º tensor de tensões Piola-Kirchhoff) e deformações logarítmicas vs. tensões de Cauchy (tensões verdadeiras) é possível concluir até que ponto é válida a hipótese de pequenas deformações.

Um exemplo [4.20] ilustrativo da importância de se conhecer a influência de se utilizarem diferentes relações constitutivas é apresentado de seguida: Considere-se uma barra incompressível (volume constante) sujeita a uma força axial de tracção, representada na Figura 4.3.

Supondo uma relação constitutiva do material linear tem-se:

$$\sigma = E\varepsilon \Leftrightarrow \frac{P}{A} = E \frac{e}{L_0} \quad (4.7)$$

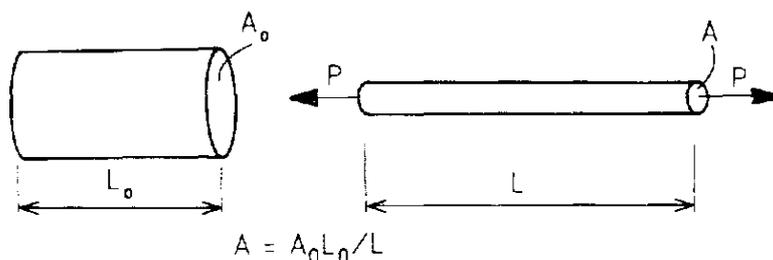


Figura 4.3 – Barra incompressível.

Com $e = L - L_0$. Sabendo que $AL = A_0 L_0$ tem-se:

$$P = \frac{EA_0}{(e/L_0 + 1)} \frac{e}{L_0} \tag{4.8}$$

Utilizando agora a representação Euleriana (espacial) tem-se:

$$P = \frac{EA_0}{(e/L_0 + 1)} \ln(e/L_0 + 1) \tag{4.9}$$

A Figura 4.4 ilustra os resultados obtidos utilizando as duas relações constitutivas.

É possível observar para deformações pequenas, que as duas teorias estão de acordo. À medida que a deformação vai aumentando a teoria clássica afasta-se da realidade, obtendo-se valores de tensão superiores aos que na realidade existem.

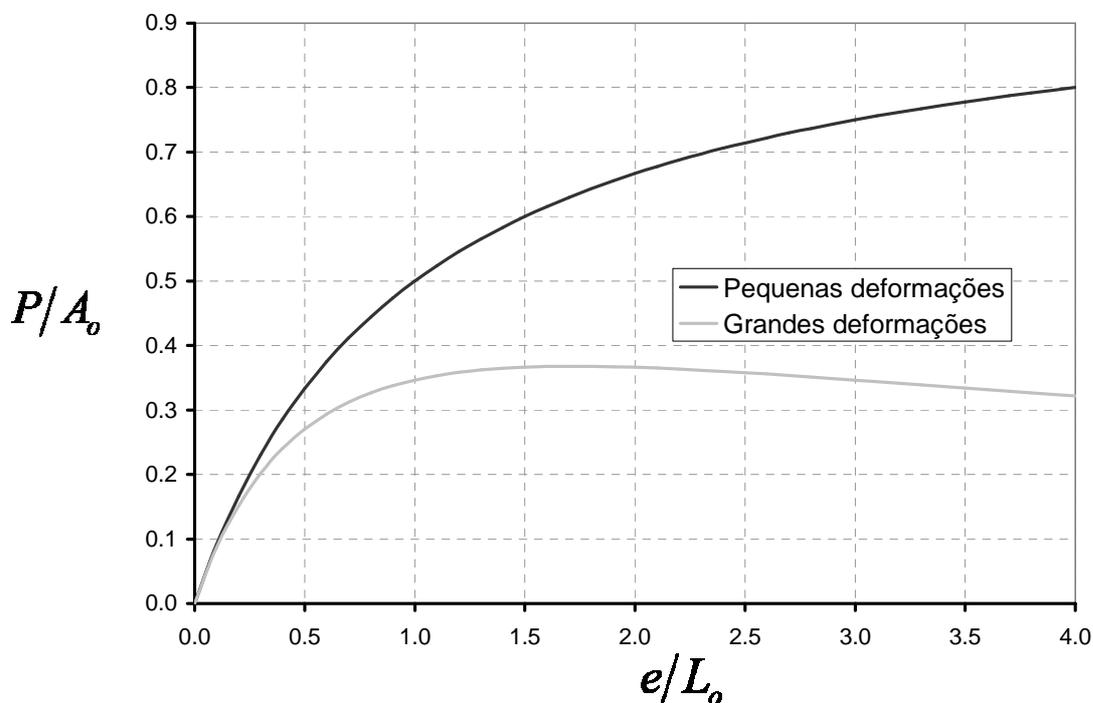


Figura 4.4 - Comportamento de uma barra incompressível utilizando diferentes relações constitutivas.

4.3.3. Modelação do contacto

Não existe nenhum sistema físico real que contenha ligações rígidas; a sua consideração resulta de idealizações, existindo sempre interfaces entre as várias partes do sistema. No entanto a importância da modelação do contacto entre interfaces é relativa, havendo sistemas físicos que requerem que a interacção mecânica entre interfaces tenha de ser considerada para que a análise seja bem sucedida. Os problemas de contacto são difíceis de resolver por serem fortemente não-lineares e descontínuos.

Em muitos problemas em que o contacto é simulado, mesmo em regime elástico linear, podem ocorrer não-linearidades durante um incremento, através da modificação das condições de contacto impostas inicialmente. Este facto requer, mesmo em regime elástico linear, que o processo de resolução numérica seja iterativo.

Em geral, o contacto é imposto entre pares de superfícies em contacto, em que uma das superfícies serve de referência (em geral a mais rígida), a superfície mestra, denominando-se a outra por superfície escrava [4.22]. Existem vários esquemas para impor as condições de contacto, nomeadamente, (i) contacto nó-superfície e (ii) contacto superfície-superfície [4.23]. No primeiro caso, o contacto é estabelecido entre um nó da superfície escrava e o segmento (faceta) da superfície mestra normal ao nó da superfície escrava. Apresenta como desvantagens a necessidade de a superfície escrava ter uma discretização apertada. No contacto superfície-superfície o contacto é estabelecido entre o nó da superfície escrava e um conjunto de facetas da superfície mestra, sendo mais preciso.

A evolução das condições de contacto depende do tipo de algoritmo de procura de contacto, (i) deslizamento finito e (ii) deslizamento pequeno [4.23]. O primeiro método é mais geral que o segundo, permitindo que um ponto qualquer da superfície escrava possa entrar em contacto ao longo de toda a superfície mestra.

No início de cada incremento são estabelecidas as hipóteses de contacto, i.e., quais os nós em contacto. Com base nestas hipóteses é calculada a matriz de rigidez, e no final de cada iteração, a geometria do sistema é actualizada e as hipóteses iniciais são verificadas, i.e. não podem existir tensões de tracção ao longo da superfície de contacto - apenas tensões de compressão - e não podem ocorrer penetrações entre as superfícies em contacto. Nos nós em que as condições de contacto não são cumpridas, estas são forçadas, e se necessário as hipóteses iniciais são reformuladas, iniciando-se uma nova iteração de contacto. De salientar que as forças de atrito devem também ser verificadas. A cada nova iteração corresponde um novo cálculo da matriz de rigidez [4.23].

Diz-se que houve convergência quando no final da iteração forem satisfeitas as condições iniciais, e os critérios de convergência de equilíbrio forem cumpridos (habitualmente forças residuais e incrementos de deslocamentos).

Numa análise computacional com contacto, vários aspectos têm de ser considerados, nomeadamente a detecção de contacto, normal e/ou tangencial, e o comportamento das superfícies em contacto, em particular os modelos de atrito.

A detecção do contacto efectua-se, em geral, em função dos deslocamentos nodais dos nós, ou segmentos das superfícies em contacto, que se traduz nas condições de Kuhn-Tucker dadas pelas seguintes equações [4.24]:

Contacto na direcção normal da superfície mestra

Impossibilidade de existir penetração entre os dois corpos, A e B (corpo de referência) em contacto	$g = (x_B - x_A) \cdot n \geq 0$	(4.10)
Impossibilidade de existirem forças de tracção	$c \leq 0$	(4.11)
Condição mutuamente exclusiva	$gc = 0$	(4.12)

Em que:

g é a componente normal do campo de deslocamento relativo entre as duas superfícies a partir da superfície mestra;

c é a componente normal da força que actua na superfície mestra no ponto de contacto;

n é a normal à superfície mestra.

Contacto na direcção tangencial da superfície mestra

Lei do atrito	$\phi \leq 0$	(4.13)
Deslocamento tangencial	$\dot{\gamma} \leq 0$	(4.14)
Condição mutuamente exclusiva	$\phi\dot{\gamma} = 0$	(4.15)

Em que:

ϕ representa o remanescente da resistência ao deslizamento em relação à componente tangencial da força de contacto;

$\dot{\gamma}$ é o valor absoluto da velocidade relativa de deslizamento entre os pontos em contacto.

A implementação das condições de contacto e deslizamento pode ser vista como um problema variacional (de minimização) de um sistema de equações, sendo comum recorrer-se a multiplicadores de Lagrange e a métodos de penalização para a sua resolução [4.25].

Em certos casos, que exibem grandes deslocamentos e/ou deformações, é importante simular as condições de contacto na direcção tangencial. Quanto maior for o deslocamento tangencial mais complexo se torna o processo de detectar quais os nós que estão em contacto com segmentos específicos. A complexidade pode ainda aumentar se forem introduzidos modelos de atrito. É comum adoptar-se um modelo do tipo Mohr-Coulomb para simular o atrito [4.23]. Por vezes, faz-se diferença entre o coeficiente de atrito estático e dinâmico [4.23]. O atrito é um fenómeno extremamente não-linear, não conservativo e que origina uma matriz de rigidez não-simétrica, fazendo com que, a partir da iteração em que as superfícies começam a deslizar, o estado de equilíbrio anteriormente

determinado deixe de ser válido, implicando que o algoritmo consiga prever o novo estado de equilíbrio durante o processo de resolução do problema.

Este novo estado de equilíbrio pode ser obtido, se existir convergência, através de uma aproximação por simetrização da matriz de rigidez não-simétrica, ou determinando a solução de um problema $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$, em que \mathbf{A} é uma matriz não-simétrica, através de permutações de colunas e factorização da matriz \mathbf{A} .

Chama-se ainda a atenção, que não devem ser utilizados elementos de segunda ordem para modelar superfícies em contacto, já que para certos casos de carregamento, o sentido de algumas das forças nodais pode diferir do sentido do carregamento, por ser necessário impor neste tipo de elementos uma distribuição de forças cinematicamente equivalente para obter a solução de um problema que é estaticamente indeterminado. Este facto, leva a que nós em contacto possam apresentar forças de tracção, o que implica não convergência. Como a distribuição de forças nodais nos elementos lineares é única, por ser um problema estaticamente determinado, esta dificuldade não se coloca.

4.3.4. Etapas do método dos elementos finitos

Podem definir-se quatro etapas no processo de resolução de um modelo de elementos finitos [4.21]:

- Formação da geometria e da malha de elementos finitos;
- Factorização da matriz de rigidez global;
- Cálculo dos deslocamentos nodais;
- Cálculo das tensões.

O tempo requerido para a definição da malha de elementos finitos depende do tipo de elemento, mas em geral é proporcional ao número de elementos. O tempo para a factorização da matriz de rigidez é proporcional ao número de nós vezes a raiz quadrada da largura da semi-banda da matriz de rigidez [4.21]. O tempo de cálculo dos deslocamentos nodais é proporcional ao número de nós vezes a largura da semi-banda da matriz de rigidez multiplicada pelo número de casos de carga. Por fim, o tempo de cálculo das tensões é proporcional ao número de elementos vezes o número de casos de carga [4.21].

Tipicamente, num modelo simples, a segunda e terceira etapas podem representar metade do tempo total, enquanto que para análises complexas podem chegar a 90% do tempo dispendido para encontrar a solução [4.21].

Em geral, é mais fácil diminuir o tempo de cálculo de uma análise por via da optimização da largura da banda da matriz de rigidez, entendida como o número de termos não-nulos, ao longo de uma linha da matriz entre o termo da diagonal e o último termo não nulo [4.21].

Em termos de optimização do processo de solução do problema existem algumas regras que devem ser respeitadas, nomeadamente [4.21]:

- Ordenar em primeiro lugar os nós e os elementos, segundo a menor direcção da estrutura;
- Reduzir a diferença da numeração utilizada entre nós de elementos adjacentes.

Da solução do Método dos Elementos Finitos conseguem-se obter variáveis de campo em cada ponto de referência da estrutura, usualmente nos nós ou em pontos internos dos elementos. Podem ser definidos dois tipos de variáveis de campo, primárias e secundárias. No caso de análises estáticas, as variáveis de campo primárias são os deslocamentos. A principal etapa da análise de uma estrutura é o cálculo das variáveis de campo primárias nodais, a partir das quais são calculadas as deformações e as tensões. As deformações determinam-se a partir da derivada dos deslocamentos, pelo que a aproximação das deformações e das tensões é, pelo menos, um grau abaixo do grau da função de aproximação, i.e. da aproximação ao campo de deslocamentos. Por este motivo, a convergência da solução, dependendo apenas da discretização, é mais rápida no campo de deslocamentos do que no campo de tensões [4.26].

Todavia, em elementos 2D e 3D com funções de forma quadráticas, as variáveis de campo secundárias dizem-se quase-lineares, já que alguns termos de segunda ordem permanecem após a derivação das variáveis de campo primárias devido aos termos cruzados das funções de forma utilizadas [4.26].

4.3.5. Integração numérica

Em geral a matriz de rigidez de um elemento só pode ser obtida por integração numérica. Existem vários métodos, sendo o método da quadratura de Gauss o mais utilizado. Este método é preciso se a relação $2n-1 \geq N$ for respeitada, em que n representa o número de pontos de Gauss e N a ordem dos polinómios das funções de forma. Esta regra designa-se por integração completa [4.26], ver a Figura 4.5.

Existe ainda outro método, denominado por integração reduzida [4.26] no qual se utiliza uma ordem de integração inferior, i.e. $n-1$. No entanto apenas se deve recorrer a este último método se duas condições forem satisfeitas, (i) uma malha de elementos finitos fina, e (ii) cujos elementos não apresentem distorções de forma. Se tal ocorrer, o determinante da matriz do Jacobiano utilizado na transformação de coordenadas é constante ao longo do elemento pelo que o número necessário de pontos de Gauss, coincidentes com os pontos de Barlow⁷, é menor. Uma vez verificadas estas condições, o método de integração reduzida fornece em geral, uma convergência mais rápida para resultados igualmente precisos.

Este tipo de integração pode apresentar problemas de *hourglassing*, ver a Figura 4.6. Este fenómeno caracteriza-se por deslocamentos nodais de corpo rígido, sem deformações, e como tal sem contribuição para a formação da matriz de rigidez total. É particularmente relevante nos elementos de primeira ordem, onde é mais fácil a propagação do fenómeno de elemento para elemento.

⁷ Pontos onde o campo de tensões se anula.

Em análises não-lineares deve optar-se por ter, pelo menos, 5 pontos de integração ao longo da espessura, já que a distribuição não-linear das deformações pode ter variações significativas.

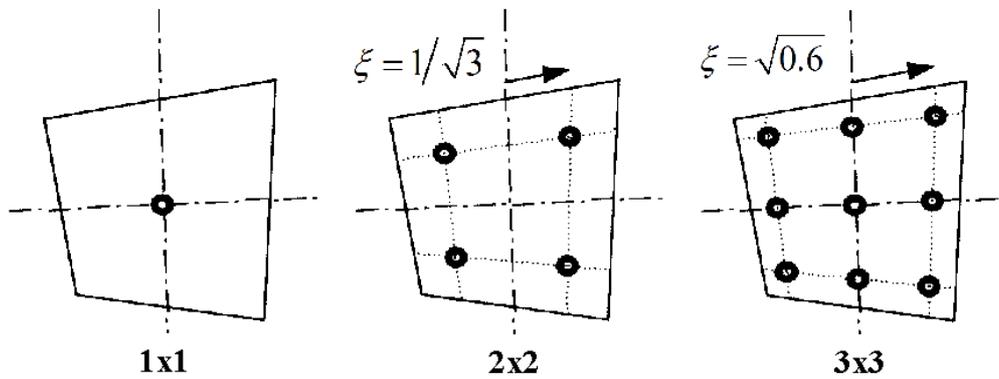


Figura 4.5 – Pontos de Gauss: integração completa.

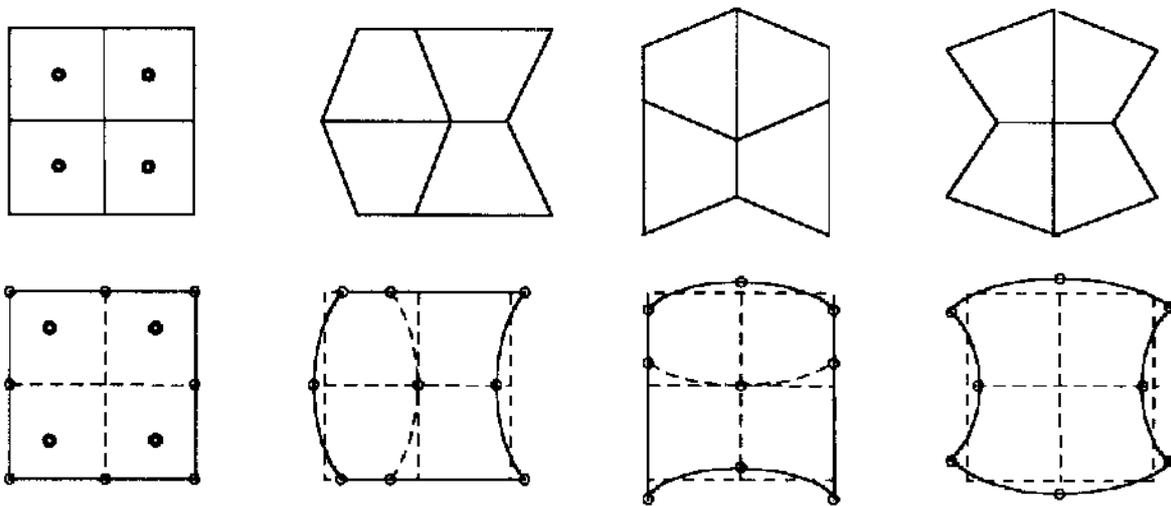


Figura 4.6 – Modos de *hourglassing*, elementos lineares (em cima) e elementos quadráticos (em baixo).

4.3.6. Tipos de elementos finitos

Existem vários tipos de elementos finitos; de uma forma simplificada, temos elementos finitos (i) de viga, (ii) de placa, (iii) de casca e (iv) sólidos [4.29]. Os três primeiros tipos são elementos 2D, enquanto que o último é 3D, adequado quando se pretende realizar uma análise estrutural mais geral, podendo ser tetraédricos ou hexagonais, por exemplo. Nos últimos anos, tem-se registado um progresso assinalável no desempenho deste último tipo de elementos, embora a definição de uma malha de elementos finitos com qualidade se mantenha como um dos principais obstáculos à sua utilização, não obstante o recurso a programas de geração de malhas que entretanto foram desenvolvidos. Este problema coloca em questão a exactidão dos resultados obtidos com estes elementos. Adicionalmente, para correr uma análise estrutural utilizando este tipo de elementos finitos, são necessários poderosos recursos informáticos implicando igualmente extenso tempo de cálculo do modelo. Por fim, a análise dos resultados é difícil dado o enorme volume de informação que se obtém do modelo.

Como tal, em geral, deverá optar-se por construir modelos simplificados utilizando outro tipo de elementos finitos ou a combinação de vários (incluindo elementos 3D), significando uma poupança em termos de recursos informáticos, tempo de cálculo e de interpretação dos resultados obtidos.

Todavia, a teoria (formulação) por detrás de cada um deles é nalguns casos complexa, em particular no caso dos elementos de casca, já que as simplificações geométricas implicam a formulação de hipóteses analíticas ou semi-analíticas para representar o estado e comportamento de uma estrutura em particular [4.29].

A família de elementos 3D apresenta vantagens nas seguintes situações [4.29]:

- (i) superfícies curvas, (ii) singularidades geométricas ou de carregamento, ou (iii) problemas que envolvam grandes deformações e grandes rotações.

Enumera-se do seguinte modo as vantagens de utilizar elementos de viga, placa ou casca [4.29]:

- Malhas de elementos finitos mais eficientes, no sentido em que os graus de liberdade existentes são dominantes, i.e. permitem obter a evolução campo de deslocamentos de modo satisfatório;
- Em geral, necessitam de menos tempo de computador, e recursos informáticos;
- Os dados de saída de cada modelo, correspondem a dados que não necessitam de tratamento de forma a obter os resultados pretendidos.

Elementos finitos distintos possuem na sua formulação diferentes funções de aproximação (linear, quadrática, cúbica) a partir das quais são obtidas aproximações dos deslocamentos da estrutura. Em geral os elementos de ordem superior possuem as seguintes vantagens [4.26]:

- Maior exactidão na modelação de fronteiras curvas;
- Maior tolerância à distorção da malha de elementos finitos;
- Modelos com menos elementos finitos, tornando-os mais claros graficamente;
- Menos susceptíveis a modos de energia nulos;
- Mais económicos na representação de geometrias complexas com muitas singularidades.

Quando se pretende comparar o desempenho de vários tipos de elementos, deve analisar-se a distribuição de tensões ao longo dos elementos do modelo. O número de elementos necessário para a solução convergir para os resultados exactos, é fortemente dependente da distribuição de tensões ao longo da estrutura. Quanto maior for o número de termos dos polinómios, a partir dos quais se obtêm as componentes do tensor das tensões, melhor a aproximação (constante, linear, quadrática, etc.) [4.26].

É evidente que existem ganhos de tempo e precisão quando se utilizam elementos de ordem superior, no entanto, os ganhos de desempenho diminuem quando se passa de aproximação constante para linear, de linear para quadrática, etc. A experiência revela que elementos de aproximação linear são os mais eficientes [4.26].

4.3.6.1. Elementos de casca

Como já foi referido, o desenvolvimento de elementos de viga, placa e casca baseia-se nas vantagens que se podem alcançar com cada um deles. No entanto, para cada tipo de elemento existem diferentes formulações teóricas incluindo a forma do elemento, número de graus de liberdade, e o método de integração numérica, do que resultam diferentes capacidades de desempenho dos elementos, pelo que é conveniente fazer uma selecção antes de utilizar um certo tipo de elemento finito numa dada modelação.

No contexto da presente Dissertação de Mestrado apenas será abordado o grupo de elementos de casca isoparamétricos. Diz-se que um elemento é isoparamétrico quando a função de forma utilizada para obter as variáveis de campo primárias, é igualmente utilizada para definir a forma geométrica do elemento. Este tipo de elementos é o mais divulgado e utilizado por apresentarem diversas vantagens entre as quais a sua versatilidade e possuírem maiores limites para a distorção [4.20].

Pertencem a esta família os elementos Serendipicos, os elementos Lagrangianos e os elementos triangulares. Os elementos Lagrangianos utilizam funções de forma baseadas em polinómios de Lagrange, pelo que é necessário definir nós extra, em regra no interior do elemento. No caso do elemento quadrilátero de nove nós, QUAD9, existe um nó interior [4.26].

Cada nó dos elementos de casca tradicionais possui 6 graus de liberdade, correspondentes a 3 translações e a 3 rotações. Nestes elementos a determinação do comportamento ao longo da espessura envolve a formulação de hipóteses semi-analíticas. A grande complexidade da teoria destes elementos advém da formulação teórica do comportamento fora do plano, já que o comportamento de membrana do plano médio destes elementos é semelhante ao dos elementos 2D de estado plano de tensão [4.29].

Uma etapa importante do processo de idealização de um dado sistema estrutural consiste na escolha do(s) tipo(s) de elemento(s) a utilizar, já que implica a consideração de hipóteses sobre o comportamento da estrutura bem como sobre a sua representação geométrica. Os elementos de casca são muito úteis para modelar estruturas de parede fina, em particular estruturas com espessura constante em grandes superfícies.

Os elementos de casca só devem ser utilizados em estruturas, ou em parte de estruturas, que apresentem uma espessura pequena em relação às outras duas dimensões. Esta relação não é quantificável mas deve respeitar as hipóteses da teoria de Kirchhoff ou de Mindlin [4.20].

Os elementos de casca podem ser subdivididos em dois tipos principais, elementos finos e espessos. Nos elementos espessos o efeito do esforço transversal está incluído na formulação, ao passo que é ignorado nos elementos finos.

Os elementos de primeira ordem podem apresentar fraco desempenho em certos casos, em particular nos casos em que o esforço dominante é a flexão. Nestes casos pode ocorrer o fenómeno *shear locking*. Este produz deformações de corte parasitas que rigidificam o elemento [4.26]. Os elementos

quadráticos também são afectados por este efeito, embora em menor grau, o qual pode ser anulado através do uso de integração reduzida [4.26].

Finalmente, existem problemas nos quais é possível utilizar elementos de casca em que ao grau de liberdade associado à rotação no plano do elemento não é atribuída nenhuma rigidez [4.29]. Superfícies contínuas sem singularidades são exemplos nos quais é admissível recorrer a esta simplificação. Nestes casos a rotação no plano do elemento é determinada pelos deslocamentos no plano do elemento. No entanto, é necessário prevenir a ocorrência de mecanismos. Estes podem surgir no caso de estar ligado a outros elementos complanares [4.28]. Nestes casos alguns programas introduzem uma rigidez artificial na matriz de rigidez global para ultrapassar este problema. Este problema não se coloca quando existe um ângulo entre elementos, desde que este não seja muito pequeno já que pode conduzir a soluções menos fiáveis devido a imprecisões numéricas. No caso de se pretender simular uma superfície curva ou qualquer superfície com derivada contínua, com elementos de primeira ordem, pode ocorrer este problema se for adoptada uma malha muito fina, já que os elementos são complanares em todos os nós. Numa malha mais grosseira, existem imperfeições geométricas inerentes à representação menos precisa da superfície curva o que permite eliminar este problema.

4.3.6.2. Elementos rígidos

Quando existem diferenças significativas de rigidez entre partes do modelo deve-se simular as partes mais rígidas com elementos rígidos, já que reduzem o número de graus de liberdade do modelo estrutural e minimizam possíveis imprecisões numéricas que podem afectar os resultados.

4.3.7. Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos é o conjunto dos elementos finitos resultantes da discretização do modelo geométrico da estrutura.

A exactidão de um modelo de elementos finitos, depende do tipo de malha de elementos finitos, que por sua vez depende da geometria da estrutura, do tipo de carregamento, e do refinamento da malha, a nível local e global. No entanto, na modelação de parte de uma estrutura com a finalidade de simular apenas a sua rigidez correctamente, de modo a não afectar a precisão da solução obtida na área de interesse, é suficiente uma malha de elementos finitos menos refinada, já que a apenas é importante uma boa aproximação do campo de deslocamentos e não do campo de tensões [4.27].

Existem diferentes tipos de elementos, cada um apresentando vantagens e desvantagens para cada utilização específica. Em geral, quanto maior for o número de elementos, maior será a exactidão dos resultados. Contudo, a este potencial está associado um aumento elevado do custo de meios e tempo necessários para concluir a análise. Como tal, para cada malha de elementos finitos é necessário encontrar um compromisso entre o número de nós (elementos), de forma a obter a exactidão pretendida, e os recursos computacionais necessários, que devem ser realistas [4.28].

Diz-se que os resultados de um dado modelo de elementos finitos convergem para os correctos quando (i) é aumentado o número de elementos finitos – *h-convergence*, (ii) é aumentado o número de graus de liberdade – *p-convergence*.

As variáveis de campo secundárias constituem um bom indicador da qualidade da malha e assim da fiabilidade dos resultados obtidos, por exemplo: a comparação dos valores das tensões ao longo da fronteira entre dois elementos, se forem valores muito próximos, então a malha cumpre o requisito de convergência uniforme [4.26, 4.28].

Um meio prático de reconhecer áreas no modelo que necessitam de uma malha mais fina é identificar as zonas onde as variáveis primárias e secundárias variam mais rapidamente. Considera-se que a melhor malha de elementos finitos é aquela que apresenta um erro de discretização uniforme em toda a malha. No entanto não é comum que este valor seja parte das variáveis de saída de um programa, pelo que o utilizador deve ser experiente e possuir conhecimentos para interpretar os resultados com cuidado.

4.3.7.1. Imperfeições na malha

Os elementos utilizados devem por um lado permitir simular os requisitos geométricos do modelo e devolver resultados precisos. A malha de elementos deverá então reflectir a evolução da distribuição (gradiente) do campo de tensões (deslocamentos), sendo mais fina nas zonas de maior variação e mais espaçada nos restantes locais. Este ajuste leva a que seja inevitável a existência de distorções na malha de elementos finitos, o que pode introduzir, embora nem sempre, erros de discretização.

A qualidade de uma malha depende assim não só do tipo e número de elementos mas também da sua configuração, i.e. sensibilidade à forma, já que existe a possibilidade de os elementos distorcidos puderem introduzir erros adicionais no processo de resolução do problema. Estes erros dependem do tipo de elementos, da variação do campo de tensões e da natureza e magnitude das distorções. Em geral, a influência das distorções (i) diminui com o aumento da ordem dos elementos, e.g. os elementos do tipo QUAD9 (aproximação quadrática dos deslocamentos e pseudo-quadrática das tensões) utilizando integração reduzida são menos sensíveis aos efeitos de distorções; e (ii) diminui com a redução do tamanho dos elementos [4.26].

Não existem regras gerais mas apenas o bom senso e conhecimento do tipo de elementos utilizados para avaliar se a distorção da configuração inicial desse elemento é aceitável ou não. Para elementos quadriláteros de 1ª ordem, é recomendado que os ângulos nos cantos estejam compreendidos entre os 45° e os 135°, e que a relação maior lado/menor lado não ultrapasse 2.

Existem vários tipos de imperfeições na geometria do elemento os quais configuram tipos de distorção. Os elementos 2D, triangulares e quadrangulares, possuem como forma base o triângulo equilátero e o quadrado, designando-se por distorção qualquer alteração geométrica destas formas.

A Figura 4.7 [4.26] exemplifica os vários tipos de distorção para os elementos quadráticos 2D agrupados em 4 grupos. Na prática a distorção da forma de um elemento, será o resultado da

combinação das várias imperfeições possíveis. Em geral, quanto maior for o número do grupo a que pertence a imperfeição dominante, mais influência terá a distorção na precisão dos resultados. No entanto, as consequências das distorções dependem igualmente do valor de d (Figura 4.7) e da natureza do campo de deformações imposto ao elemento.

Existem ainda distorções extremas, resultado de singularidades que fazem com que o determinante do Jacobiano se anule em um ou mais pontos [4.26].

Estudos publicados (Barlow [4.26]), resumidos na Tabela 4.1, permitem comparar o grau de influência na precisão dos resultados (campo de tensões) de cada grupo de imperfeições na geometria de elementos quadráticos 2D para diferentes distribuições do campo de deformações. Pode constatar-se que uma distribuição quadrática de deformações ao longo do elemento conduz a erros elevados. Uma boa prática é limitar a variação do campo de deformações de modo a que as parcelas linear e constante sejam predominantes.

Outro meio de avaliar *a priori* o nível de distorção de um elemento é analisar o determinante do Jacobiano do elemento. Para os grupos 1 e 2 este é constante em todo o elemento, para os grupos 3 e 4 é variável e nestes casos deve refinar-se a malha.

O elemento QUAD9 tem um desempenho superior ao elemento QUAD8 para níveis de distorção elevados. Em ambos os elementos deve adoptar-se uma malha de elementos na qual a variação do campo de deformações linear seja predominante, apenas com uma pequena parte de variação quadrática.

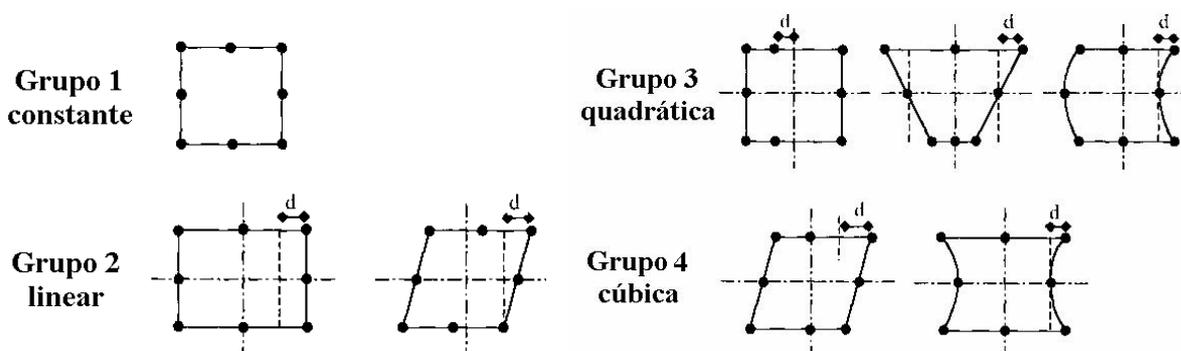


Figura 4.7 – Tipos de distorção.

Tabela 4.1 – Erros no campo de tensões em função dos vários tipos de distorções.

Ordem da variação da deformação	Integração completa			Integração reduzida		
	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
constante	0	0	0	0	0	0
linear	0	d	d	0	d^2	d
quadrática	1	1	1	0	d	d

0 – erro desprezável; d – erro da mesma ordem da distorção ($d^2 \ll d$); 1 – erro significativo.

A ideia chave a reter, é que o importante é desenhar malhas de elementos finitos compatíveis com os gradientes de tensões e limitar a variação do campo de deformações no elemento. Se tal for realizado as distorções que existam não introduzem em geral imprecisões nos resultados.

4.3.7.2. Superfícies curvas

Na modelação de superfícies curvas com elementos quadrangulares de 1ª ordem, devem utilizar-se muitos elementos de modo a produzir uma relação pequena entre o comprimento do elemento e o raio de curvatura. Com poucos elementos, como estes estão colocados na superfície média da estrutura, reduz-se o perímetro da circunferência, aumentando a rigidez de flexão e diminuindo a rigidez axial, o que pode ter influência nos resultados obtidos, ver a Figura 4.8.

Em superfícies curvas é ainda necessário ter em consideração a definição da normal de cada nó de cada elemento. Como existe uma singularidade na fronteira entre dois elementos, já que um arco de círculo é representado por um segmento parabólico (elementos quadráticos), as normais são definidas como a média das normais de elementos contíguos pelo que a normal em cada nó não corresponde à verdadeira normal, podendo este facto afectar a exactidão do resultado.

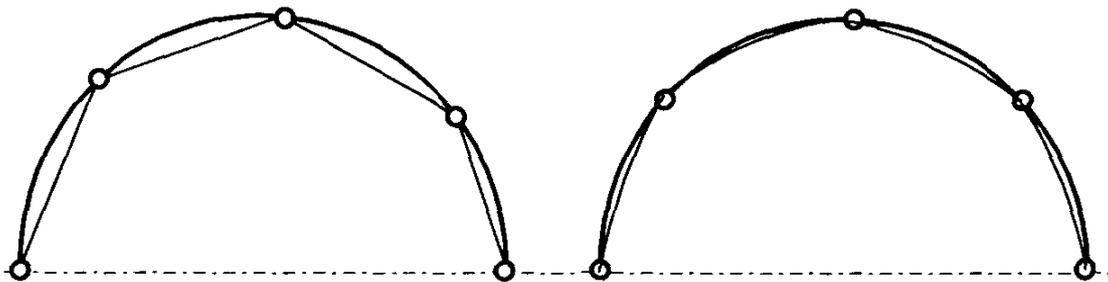


Figura 4.8 – Modelação de superfícies curvas.

4.3.8. Tipos de erros

Para além de possíveis erros na definição das condições de fronteira, carregamento e nos modelos de comportamento dos materiais, existem outros tipos de erros.

Existem limites práticos no número de elementos utilizados, pois um grande número de elementos pode conduzir a erros de arredondamento e perda de precisão do processo de resolução numérico.

Existem outros tipos de erros que podem ocorrer durante a resolução de um modelo de elementos finitos, (a) erros de discretização, devido a insuficiências da malha adoptada por terem poucos elementos ou por estes apresentarem grandes distorções, e (b) erros devido ao comportamento dos elementos, podendo ser (b.1) de integração numérica, quando a ordem do polinómio das funções de forma é superior ao permitido pela regra de integração (*hourglassing*); ou (b.2) resultantes de insuficiências na formulação do elemento, em particular na aproximação do comportamento da estrutura.

Os erros (a) devem ser os únicos a existir e a sua magnitude controlada e mantida a níveis aceitáveis conforme o tipo e propósito do modelo. Os erros (b.1) só existem para alguns tipos de elementos, são

influenciados pela regularidade da malha e pela diferença de rigidez entre elementos e, em geral, diminuem com o aumento do número de elementos e a irregularidade da malha. Os erros (b.2) dependem do tipo de análise, mas em geral, diminuem com o aumento do grau dos elementos utilizados e com o aumento da densidade da malha de elementos finitos.

4.3.9. Interpretação, validação e verificação dos resultados

Uma boa prática consiste em ter uma estimativa sobre o comportamento da estrutura antes de se iniciar o desenvolvimento de um modelo complexo de elementos finitos não-lineares. Este conhecimento pode advir da experiência adquirida na modelação de estruturas semelhantes e/ou dos resultados obtidos através de modelos estruturais simples com comportamento elástico linear. Deste modo é possível ter uma opinião crítica sobre os resultados obtidos através de modelos complexos, apontando razões sobre a discrepância entre os resultados obtidos e os esperados, permitindo deste modo o aumento do conhecimento do comportamento da estrutura [4.20].

Após a resolução do processo numérico inicia-se a fase de pós-processamento dos resultados. Nesta fase é conveniente dispor de gráficos que relacionem (representem) as principais grandezas e variáveis em jogo. Deste modo, é possível perceber como o modelo está a funcionar. No entanto, convém não esquecer que estes resultados são obtidos através de um modelo matemático, e para atingir os propósitos da análise, é necessário traduzi-los para o comportamento real da estrutura. Este processo é denominado por interpretação dos resultados [4.27].

Em geral, existe a possibilidade de desenvolver modelos diferentes com a finalidade de modelar a mesma estrutura. O processo de selecção do modelo mais adequado para os propósitos da análise designa-se por validação dos modelos. O que se pretende com a validação do modelo é responder à pergunta: é este o modelo correcto? Identificam-se as grandezas que influenciam mais os resultados, e o impacto que as simplificações e hipóteses introduzidas têm nessas grandezas através de análises de sensibilidade.

O processo de detectar, corrigir as incorrecções e insuficiências do modelo numérico, designa-se por verificação. Nesta fase, comparam-se os resultados obtidos para as principais variáveis que dominam o comportamento da estrutura, com os resultados já conhecidos ou com as melhores estimativas possíveis. É natural que haja diferenças entre o modelo numérico e a realidade, devido às hipóteses e aproximações inerentes ao método dos elementos finitos, ou em relação às condições de fronteira, na conceptualização e aplicação das acções. O que se pretende com a verificação do modelo é responder à pergunta: o modelo está certo?

Todos os aspectos do modelo que afectem de algum modo a exactidão devem ser escrutinados como parte do processo de validação. Nesta etapa pode chegar-se à conclusão que será necessário modificar o âmbito e a geometria do modelo, alterar o tipo de elementos finitos, ou melhorar a malha de elementos finitos.

No entanto, existem casos onde apenas é necessário refinar a malha numa pequena zona do modelo muito tensionada. Nestes casos não se justifica correr de novo todo o modelo, deve recorrer-se a técnicas de *adaptive remeshing* ou de *sub-modelling* [4.28].

Existem três aspectos principais no processo de validação dos resultados de uma análise que deverão ser verificados [4.27]:

- A qualidade dos dados, de modo a garantir que o modelo simula o protótipo adequadamente;
- Se a exactidão pretendida foi alcançada;
- A validade das hipóteses admitidas no início do processo.

O nível de validação apropriado para uma dada análise é ditado pelos riscos que envolve o uso dos resultados. Uma ajuda será o recurso a ensaios experimentais, ou ainda a análises de sensibilidade a variáveis do modelo, como sejam as propriedades geométricas dos elementos condicionantes ou o tipo de condições de fronteira adoptadas para a estrutura.

4.4. Estudos analíticos e numéricos de prumos telescópicos extensíveis

No âmbito da presente Dissertação de Mestrado, foram efectuados estudos analíticos e numéricos.

Em primeiro lugar, utilizou-se um modelo estrutural simplificado para analisar a influência que é exercida na carga crítica do prumo, através de um análise bifurcacional em regime elástico, por várias das suas características geométricas e materiais, nomeadamente (i) a rigidez das bases, (ii) a altura máxima, (iii) a possível existência de uma secção reforçada no tubo exterior ou (iv) uma possível inversão da configuração do prumo, i.e., o tubo interior na posição inferior e tubo exterior na posição superior. Através de uma análise elástica de segunda-ordem analisou-se o efeito da existência de imperfeições geométricas no comportamento do prumo, – é importante referir que este modelo permite também obter estimativas aproximadas da carga de colapso do prumo. Em seguida, investigou-se o comportamento inicial de pós-encurvadura (em regime elástico) dos prumos, adoptando uma abordagem analítica aproximada, baseada no método de Rayleigh-Ritz.

A introdução da não-linearidade física e de contacto levou à necessidade de desenvolver modelos mais completos, através do Método dos Elementos Finitos. Foram utilizados dois programas de cálculo diferentes, que se distinguem entre si devido ao: (i) tipo de elementos finitos utilizados, de barra e de casca (ABAQUS); (ii) fontes de não-linearidade incorporadas, utilizando-se um modelação geométrica simplificada (análise aproximada) no programa de elementos de barra, e explorando-se os algoritmos de contacto (análise mais rigorosa) do programa ABAQUS.

Em seguida, são apresentados os principais resultados destes estudos.

4.4.1. Análises elásticas dos prumos

Em primeiro lugar, certifica-se que o prumo não instabiliza localmente. Para isso recorreu-se à esbelteza dos tubos, medida pela relação R_{ext}/t [4.30], cujo máximo valor, dado pelo tubo exterior, é igual a 12, permitindo excluir a hipótese de ocorrer instabilidade local pelo que os prumos instabilizam globalmente. O mesmo se pode concluir recorrendo à expressão utilizada no Eurocódigo 3 parte 1-1

[4.31] para classificar as secções transversais. A esbelteza neste caso é dada pela relação D_{ext}/t sendo igual a 15 para o tubo interior e 24 para o tubo exterior. Estes valores são inferiores ao valor limite especificado para a classificação de uma secção na classe 1, o qual é dado pela expressão $50\sqrt{235/f_{y,média}}$, cujo valor é igual a 33,8 e a 37,6, para o tubo interior e para o tubo exterior respectivamente.

A existência de furos na parede do tubo interior pode ser considerada como uma imperfeição, pelo que foi também analisada a possibilidade de o prumo exibir um modo de instabilidade local junto aos furos. Para tal foi determinado o parâmetro $\bar{d} = d/\sqrt{Rt}$ [4.30]. Para os prumos estudados o valor deste parâmetro não ultrapassa a unidade, concluindo-se [4.30] que a presença dos furos apenas influencia o valor da tensão crítica (instabilidade global) dos tubos, não introduzindo nenhum modo de instabilidade local.

4.4.1.1. Modelo estrutural simplificado utilizado para analisar o comportamento de prumos

O modelo que se apresenta constitui uma primeira aproximação do comportamento do prumo quando sujeito a forças axiais. De forma simplificada foram (i) simuladas as chapas das bases através de molas⁸ com comportamento elástico, ou elastoplástico, consoante o tipo de análise efectuada; (ii) simulada a ligação entre os tubos através de uma ligação rígida, (iii) simulados os furos existentes na parede do tubo interior através de um tubo sem furos com uma rigidez equivalente, e (iv) simulada a ligação superior com uma rigidez elástica ou elastoplástica ou passo que o modelo experimental e numérico previsto na norma EN 1065:1998 prevê uma rótula na ligação superior. O modelo estrutural simplificado é ilustrado na Figura 4.9.

Na análise da estabilidade e do comportamento elástico do prumo, foi utilizado um prumo de referência, com as características nominais indicadas na Tabela 4.2. As chapas das bases existentes nas extremidades dos tubos T_1 e T_3 são quadradas e iguais, tendo 125 mm de lado e 6 mm de espessura.

A altura do prumo de referência foi fixada em 3,5 m, correspondente à sua altura máxima. A parede do tubo T_3 (tubo interior) possui furos, de modo a permitir acertar, através de um pino que é inserido nos furos, a altura pretendida para o prumo, a qual é em seguida ajustada por uma porca roscada, ver a Figura 2.9.

O Anexo A da norma EN 1065:1998 [4.32] propõe um conjunto de equações para a determinação das propriedades geométricas dos tubos, ver o Capítulo 2. No entanto, não é fornecida qualquer equação para a área média equivalente da secção transversal do tubo interior que tome em consideração o efeito dos furos. Como tal, admitiu-se que o tubo interior pode ser analisado através da consideração de um tubo equivalente, sem furos, com um raio exterior R_{eq} e um raio interior r_{eq} que correspondem a uma área e a um momento de inércia iguais aos da secção real, e são dados por:

⁸ As rigidezes das molas são materializadas através da rigidez de elementos de barra e das suas condições de apoio nas extremidades.

$$r_{eq} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{4I_i}{A_n} - \frac{A_n}{\pi} \right) \right]^{1/2} \quad R_{eq} = \left(\frac{4I_i}{A_n} - r^2 \right)^{1/2} \quad (4.16)$$

A modelação da rigidez da chapa das bases foi executada por meio de duas molas de rotação com comportamento elástico linear, representadas pelas constantes de rigidez C_1 (base do prumo) e C_2 (topo do prumo), cujos valores são:

$$C_1 = \frac{EI_{chapa\ da\ base,1}}{L_1}; \quad C_2 = \frac{EI_{chapa\ da\ base,2}}{L_2} \quad (4.17)$$

Em que L_1 e L_2 representam o *comprimento livre* da chapa da base inferior e superior, respectivamente. O *comprimento livre* da chapa é a distância entre a extremidade da chapa da base e a superfície da parede exterior do tubo, medida a meio da chapa da base na direcção normal do bordo da chapa.

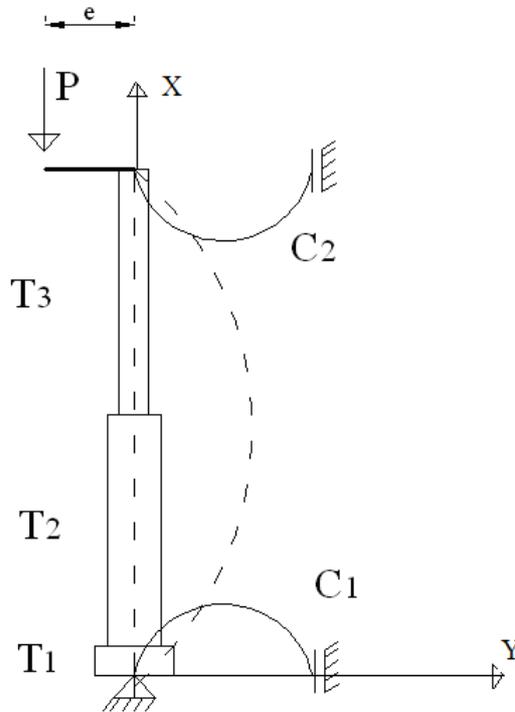


Figura 4.9 - Modelo estrutural utilizado na análise da estabilidade.

Tabela 4.2 - Características nominais do prumo de referência.

Tubo	T ₁	T ₂	T ₃
D_{ext} (mm)	65	60	50
Espessura (mm)	2	2,7	2,7
Comprimento (mm)	200	1600	1700
f_y (N.mm ⁻²)	235	235	355
E (N.mm ⁻²)	205000	205000	205000

4.4.1.2. Análise linear de estabilidade de prumos

Utilizando as funções de estabilidade exactas para elementos de viga, apresentadas em [4.11], pode analisar-se a variação do valor da carga crítica em função de uma série de parâmetros. Para tal, é útil

recorrer a variáveis reduzidas (adimensionais), tais como a rigidez da chapa da base em relação às suas dimensões mínimas nominais [4.32], a saber 110 mm de lado e 6 mm de espessura, no caso de um prumo da classe A (admite-se que o prumo de referência pertence à classe A). Deste modo, torna-se possível avaliar a carga crítica do prumo em função de dois parâmetros reduzidos, c_1 e c_2 , os quais exprimem o aumento da rigidez de cada chapa de base e valem:

$$c_1 = \frac{I_{\text{chapa da base,1}} L_{1,\text{min}}}{L_1 I_{\text{min}}} = \bar{I}_1 \cdot \bar{L}_1 \quad c_2 = \frac{I_{\text{chapa da base,2}} L_{2,\text{min}}}{L_2 I_{\text{min}}} = \bar{I}_2 \cdot \bar{L}_2 \quad (4.18)$$

Em que (i) $L_{i,\text{min}}$ representa o *comprimento livre mínimo* da chapa da base inferior ($i=1$) ou superior ($i=2$) e (ii) I_{min} representa o momento de inércia no plano da chapa da base de uma chapa com as dimensões mínimas. O *comprimento livre mínimo* da chapa é determinado considerando os tubos com as dimensões indicadas na Tabela 4.2 e as dimensões mínimas da chapa da base.

Numa primeira fase deste estudo, considerou-se que as variáveis reduzidas c_1 e c_2 são iguais, pelo que a análise foi efectuada em função de um único parâmetro c :

$$c_1 = c_2 = c \quad (4.19)$$

Apresenta-se na Figura 4.10 a variação da carga crítica com o parâmetro c , para o caso de um prumo perfeito. Nesta figura, a carga crítica é dividida pela carga crítica de referência, obtida para um prumo com as seguintes características: (i) altura de 3,5 m, (ii) dimensões dos tubos indicadas na Tabela 4.2, (iii) dimensões mínimas das chapas das bases (110 mm x 110 mm x 6 mm). Nestas condições a carga crítica é igual a 34,59 kN. São apresentados dois casos: enquanto (i) o Caso 1 corresponde a um prumo com os 3 tipos de tubos, T_1 a T_3 , e furos na parede do tubo T_3 , (ii) o Caso 2 apenas difere do anterior no facto de não existirem furos na parede do tubo T_3 .

Não se ilustram casos em que se suprimiu o tubo T_1 ou se considerou um prumo invertido, na medida em que essas alterações não produziram resultados significativamente diferentes dos apresentados na Figura 4.10— esta figura evidencia que a existência de furos na parede do tubo interior, conduz a uma redução da carga crítica do prumo. Pode igualmente observar-se, quando o valor do parâmetro c é baixo, que um aumento deste provoca um forte aumento da carga crítica do prumo (por exemplo, duplicar a espessura das chapas das bases conduz a $c=8$, o que faz com que a carga crítica relativa ao Caso 1 praticamente duplique também). Quando se excede um certo valor do parâmetro c , o aumento na carga crítica é diminuto, podendo considerar-se, em termos práticos, que o prumo se encontra encastrado em ambas as extremidades.

No entanto, conforme ilustra a Figura 4.11, um aumento de rigidez apenas na chapa da base superior (Caso 3) produz um efeito distinto do provocado por um aumento de rigidez apenas na chapa da base inferior (Caso 4) — esta diferença resulta de os diâmetros dos tubos T_1 e T_3 serem diferentes. Foram analisados estes dois casos, mantendo as dimensões de uma das chapas de base constantes e iguais aos valores mínimos normativos (espessura igual a 6 mm e 110 mm de lado), e aumentando as dimensões da

outra chapa de base, pelo que o parâmetro c indica o aumento relativo de rigidez devido apenas a este aumento. Verificou-se que um determinado aumento na rigidez da chapa da base superior conduz a um aumento da carga crítica superior ao resultante do mesmo aumento na rigidez da chapa da base inferior.

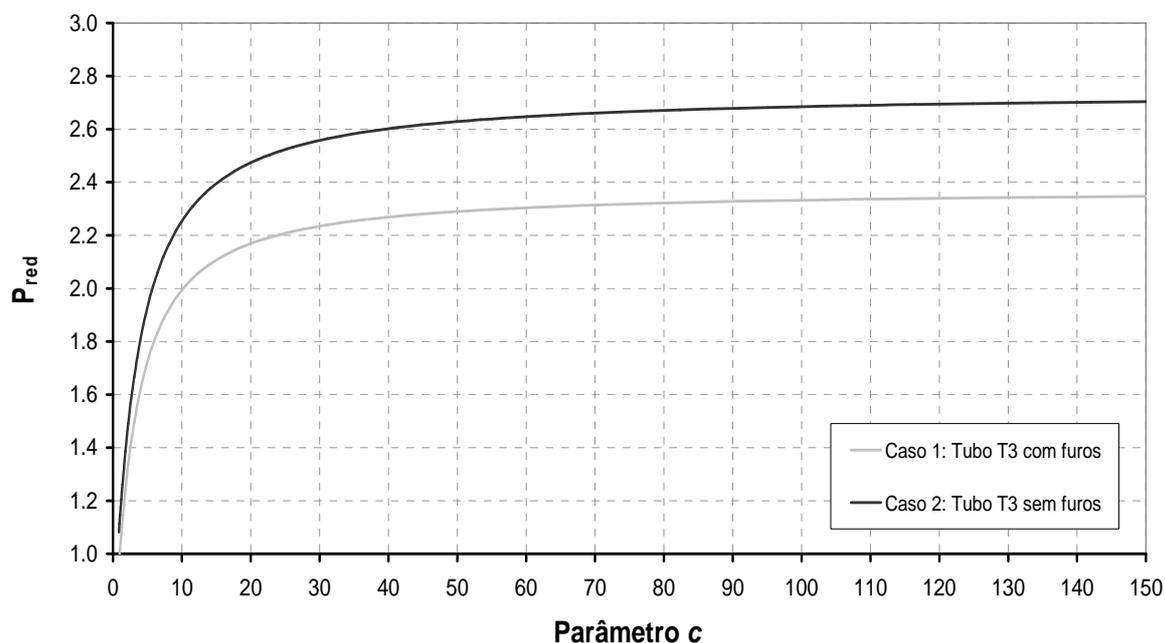


Figura 4.10 - Análise de estabilidade dos prumos: influência do parâmetro c .

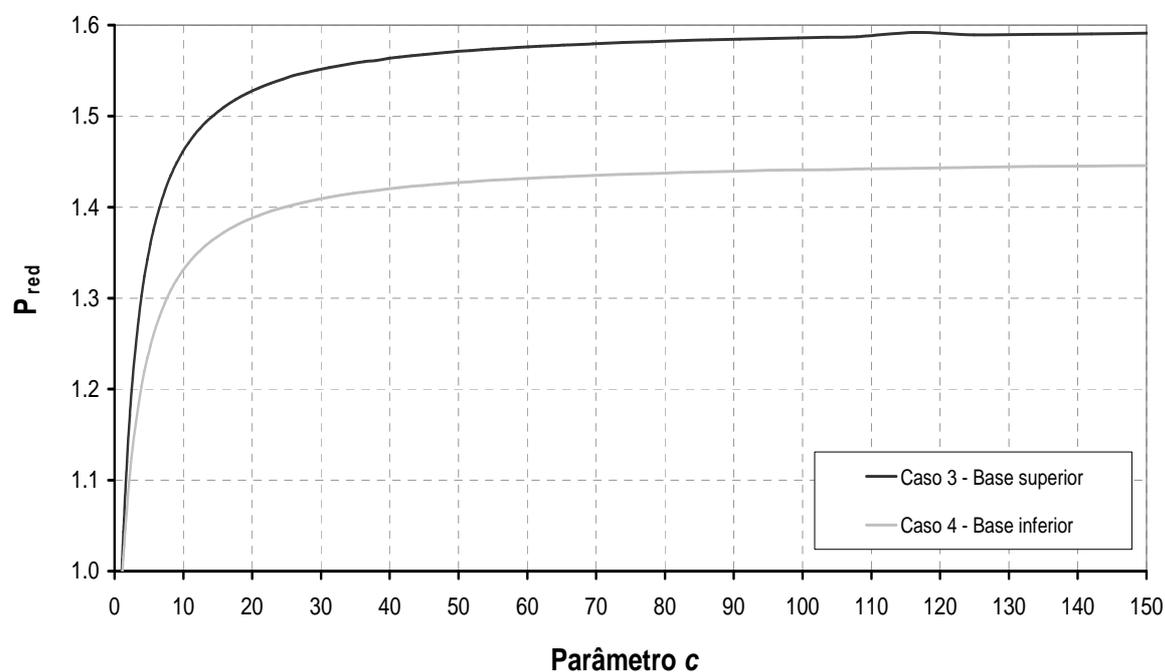


Figura 4.11 - Análise de estabilidade dos prumos: influência do aumento (separado) da rigidez da chapa de cada base.

Em relação à variação da carga crítica com a altura do prumo, refira-se que (i) a carga crítica do prumo de referência com a altura máxima ($L=3,5$ m), determinado através da matriz de estabilidade exacta para elementos finitos de barra [4.11] é igual a 33,3 kN e que (ii) essa carga crítica sobe para 77,3 kN quando o

prumo passa a ter a altura mínima ($L=2,5$ m). No que diz respeito ao modo de instabilidade do prumo, pode calcular-se através do método proposto por Newmark [4.17], sendo-se conduzido a um valor da carga crítica, do prumo de referência com $L=3,5$ m, igual a 33,2 kN, isto é, bastante próximo do valor atrás referido.

A Figura 4.12 mostra a forma do modo crítico de instabilidade crítico do prumo de referência com $L=3,5$ m e várias condições de apoio – observa-se que não existem diferenças muito significativas entre as formas dos vários modos (pelo menos para as dimensões das chapas das bases consideradas).

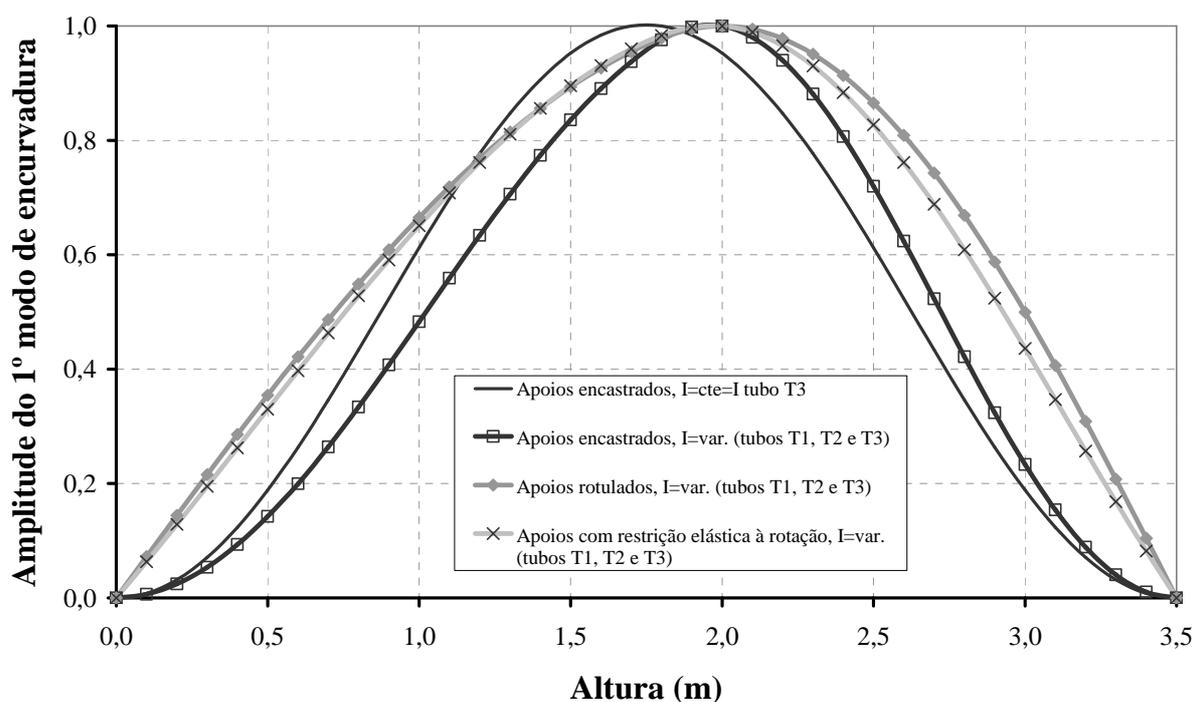


Figura 4.12 - Modos de instabilidade críticos do prumo de referência com $L=3,5$ m e várias condições de apoio.

4.4.1.2.1. Influência das imperfeições geométricas

Os efeitos das imperfeições geométricas podem ser analisados através da resolução da equação diferencial, que provém do estabelecimento das equações de equilíbrio na configuração deformada do prumo. A norma EN 1065:1998 admite que os prumos em obra possuem imperfeições geométricas inevitáveis, requerendo por isso que se considerem 3 tipos de imperfeições, ver o Capítulo 2.

Nesta secção apenas serão analisados os efeitos da excentricidade do ponto de aplicação da força e da curvatura inicial do prumo, expressa por uma função sinusoidal. A partir da condição de equilíbrio, $M(x) = P \cdot w_{tot}(x)$, é possível obter-se a equação de Euler e as respectivas condições de fronteira [4.11].

A equação de equilíbrio pode reescrever-se em (i) função do deslocamento transversal total, $w_{tot}(x) = w_o(x) + w(x)$, que engloba a curvatura inicial, $w_o(x)$, e a deformada, $w(x)$

$$-EI_i(x) \frac{d^2 w_{tot}(x)}{dx^2} = P \cdot w_{tot} - EI_i(x) \frac{d^2 w_o(x)}{dx^2} \quad (4.20)$$

ou (ii) em função apenas da deformada $w(x)$

$$-EI_i(x) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = P \cdot [w(x) + w_o(x)] \quad (4.21)$$

Sabendo que:

$$w_{tot}(x) = w(x) + w_o(x) = w(x) + a_o \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (4.22)$$

E resolvendo a equação diferencial não-homogénea (4.45) para cada um dos tubos (i , com $i = 1,2,3$), tem-se:

$$w_i(x) = A_i \cdot \sin(k_i \cdot x_i) + B_i \cdot \cos(k_i \cdot x_i) + C_i \cdot x + D_i + \frac{a_o \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right)}{\left(\frac{N_E}{P} - 1\right)} \quad (4.23)$$

A construção de um sistema de equações que permite encontrar os valores das 12 incógnitas provém do estabelecimento das equações de Lagrange, i.e. das condições de fronteira e das equações de compatibilidade entre os deslocamentos das extremidades dos tubos. Definindo $w_{i,x}$, $w_{i,xx}$ e $w_{i,xxx}$ como a primeira, a segunda e a terceira derivadas em ordem a x , e l_i ($i=1,2,3$) o comprimento dos tubos T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente, pode-se então escrever:

Condições de fronteira

$$x = 0: \quad w_1(0) = 0 \quad M_1(0) + C_1 \cdot w_{1,x}(0) = 0 \quad (4.24)$$

$$x = l_3: \quad w_3(l_3) = 0 \quad M_3(l_3) - [P \cdot e + C_2 \cdot w_{3,x}(l_3)] = 0 \quad (4.25)$$

Continuidade entre o tubo T_1 e T_2

$$w_1(l_1) = w_2(0) \quad w_{1,x}(l_1) = w_{2,x}(0) \quad (4.26)$$

$$M_1(l_1) = M_2(0) \quad V_1(l_1) = V_2(0) \quad (4.27)$$

Continuidade entre o tubo T_2 e T_3

$$w_2(l_2) = w_3(0) \quad w_{2,x}(l_2) = w_{3,x}(0) \quad (4.28)$$

$$M_2(l_2) = M_3(0) \quad V_2(l_2) = V_3(0) \quad (4.29)$$

Com $M_i(x_i) = -EI_i w_{i,xx}(x_i)$ e $V_i(x_i) = -EI_i w_{i,xxx}(x_i) - P w_{i,x}(x_i)$.

Resolvendo este sistema linear de equações para diferentes valores de e , mantendo a_o constante, ou vice-versa, pode avaliar-se a influência de cada um destes parâmetros no comportamento do prumo, ver a Figura 4.13 e a Figura 4.14.

Nestas figuras representa-se, no eixo das abcissas, o deslocamento transversal a meio-vão, dividido pela altura do prumo ($L=3,5$ m), e no eixo das ordenadas, a força axial, dividida pela carga crítica do prumo de referência, i.e. 33,3 kN.

É possível observar que ambas as imperfeições provocam deslocamentos transversais significativos para forças, nalguns casos, muito inferiores à carga crítica.

Com base nestes resultados conclui-se que é necessário ter em especial atenção estes efeitos no dimensionamento destes elementos, já que as tolerâncias de construção em obra, especificadas no caderno de encargos, são frequentemente violadas.

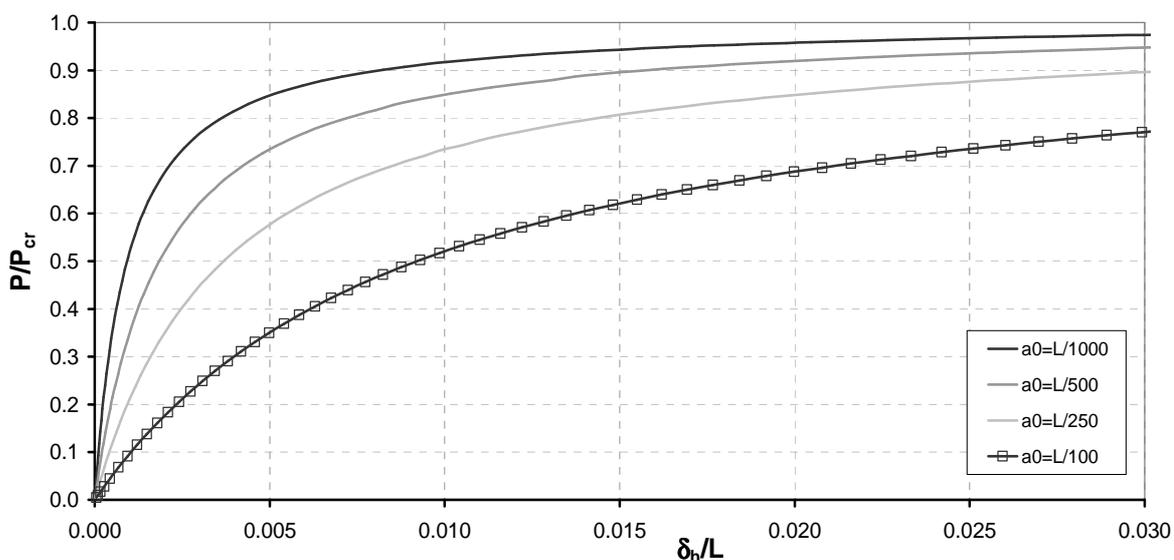


Figura 4.13 - Efeito da curvatura inicial, no deslocamento transversal de uma secção do prumo à altura $x=1800$ mm.

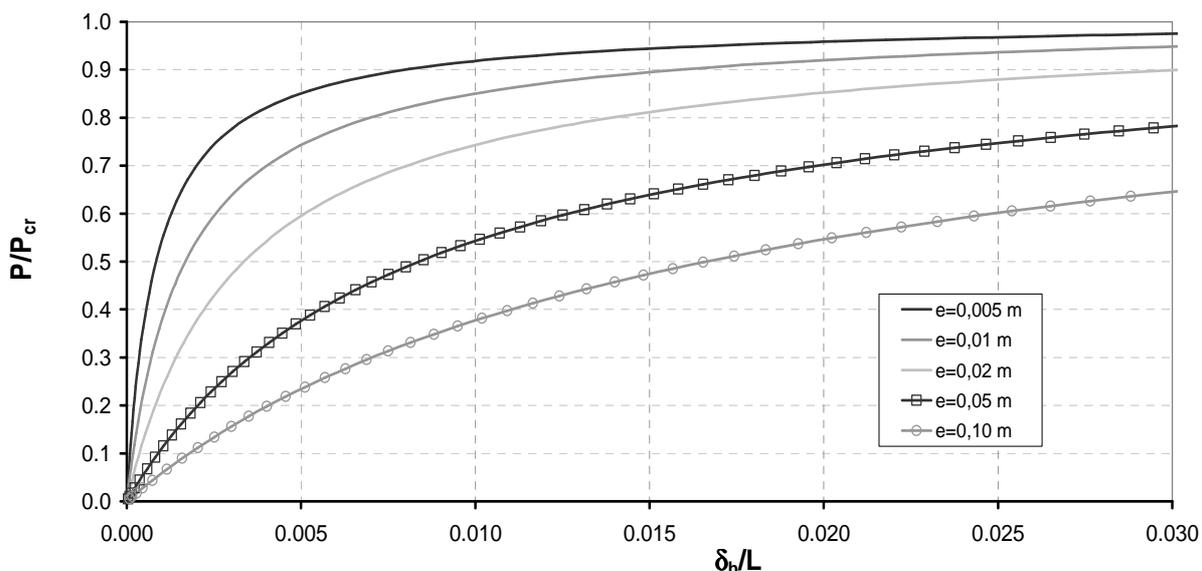


Figura 4.14 - Efeito da excentricidade da força, no deslocamento transversal de uma secção do prumo à altura $x=1800$ mm.

4.4.1.3. Comportamento inicial de pós-encurvadura de prumos

Admitindo a hipótese da incompressibilidade do elemento e não desprezando os termos de ordem superior na expressão da energia potencial total do sistema tem-se [4.11]:

$$V = \sum \int_{L_{1,j}}^{L_{2,i}} \left[\frac{1}{2} EI_i \left(w_{,xx}^2 + w_{,xx}^2 w_{,x}^2 + \frac{1}{4} w_{,xx}^2 w_{,x}^4 \right) - \frac{P}{2} \left(w_{,xx}^2 + \frac{1}{4} w_{,x}^4 \right) \right] dx + \frac{1}{2} C_1 w_{,x}^2 \Big|_{x=0} + \frac{1}{2} C_2 w_{,x}^2 \Big|_{x=L} \quad (4.30)$$

As equações diferenciais não-lineares, resultantes da resolução do funcional, são equações muito complexas e não possuem soluções analíticas. Por esta razão, recorre-se a métodos aproximados que possibilitam a resolução do problema não-linear.

É apresentada a resolução deste problema através do método de Rayleigh-Ritz [4.33, 4.34], procurando obter-se uma função aproximada que descreva o caminho pós-crítico inicial do elemento.

Este método consiste basicamente na substituição da solução analítica por uma função de aproximação no funcional de energia. A função de aproximação possui, usualmente, a forma de uma série onde cada termo deve respeitar as condições de fronteira cinemáticas do problema.

As funções de aproximação utilizadas têm a seguinte forma:

$$w(x) = \sum_n A_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (4.31)$$

Demonstra-se [4.34] que este método devolve o declive e a curvatura inicial do caminho pós-crítico de qualquer sistema simétrico, se for utilizado o modo crítico de encurvadura como função de aproximação. Para o modelo estrutural estudado, foram considerados os quatro primeiros termos da série, equação (4.31), o suficiente para se obter uma solução aproximada do caminho pós-crítico na vizinhança do ponto crítico.

Neste problema, devido à presença das molas que tornam transcendental a resolução do problema de valores próprios de 1ª ordem, os coeficientes das funções de aproximação utilizadas foram obtidos por ajuste numérico [4.35] com o modo obtido através do método de Newmark.

Pelo método de Rayleigh-Ritz, em seguida, multiplica-se a expressão (4.31) por uma constante, aqui denominada por η , que será o deslocamento transversal máximo do elemento, já que o modo crítico foi normalizado para que a amplitude máxima seja unitária:

$$w_1(x) = \eta \times w(x) \quad (4.32)$$

De seguida, substitui-se a expressão (4.32) no funcional de energia não-linear e procedeu-se à integração deste funcional. Diferenciando a equação resultante em ordem a η e igualando-a a zero, obtém-se de acordo com o princípio da Estacionaridade da Energia Potencial, a equação de equilíbrio não-linear:

$$P(\eta) = 0 \quad (4.33)$$

Da resolução da equação (4.33) obtém-se o comportamento inicial de pós-encurvadura do elemento.

A Figura 4.15 ilustra os resultados obtidos por este método para o modelo estrutural estudado, considerando as bases com restrição de rotação elástica ou encastradas. Ilustra-se igualmente os resultados obtidos a partir do programa ABAQUS [4.36]. Este programa não possibilita a resolução de problemas pós-críticos bifurcacionais, pelo que os resultados apresentados foram obtidos introduzindo uma pequena imperfeição (excentricidade da carga ou curvatura inicial correspondente à configuração do primeiro modo de encurvadura) no sistema perfeito.

Pode-se observar que os prumos apresentam uma trajectória de equilíbrio estável em regime elástico, associada a uma pequena resistência de pós-encurvadura.

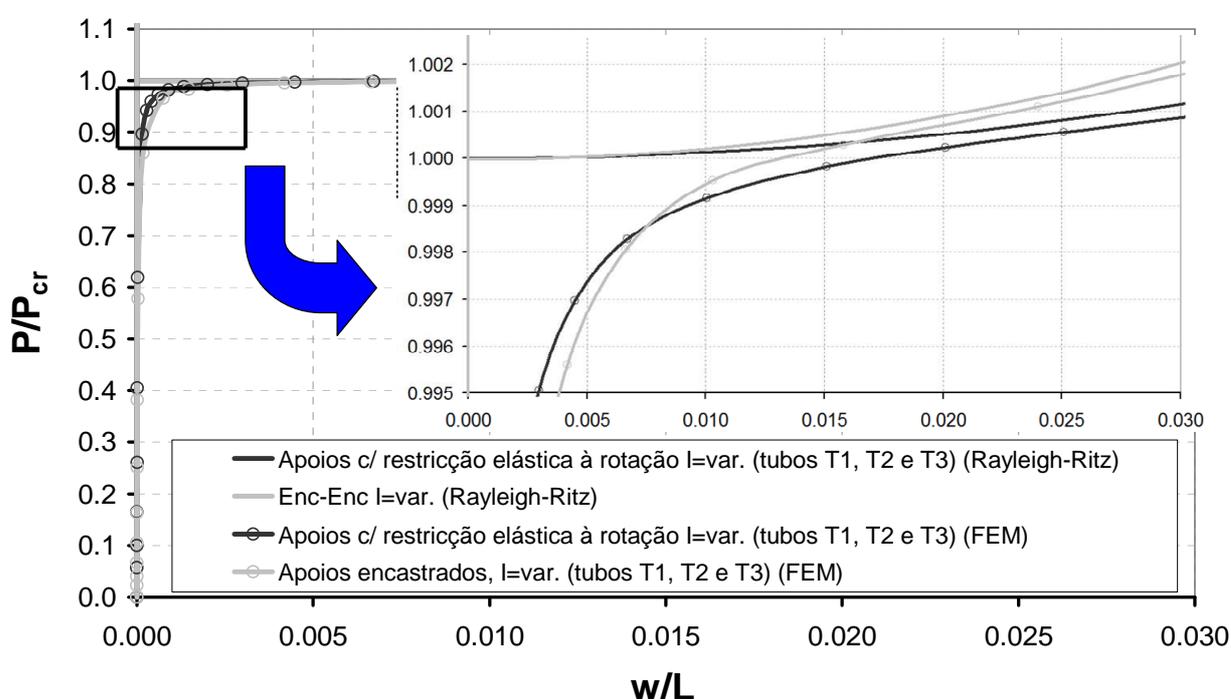


Figura 4.15 - Comportamento inicial de pós-encurvadura.

4.4.2. Modelos numéricos desenvolvidos para analisar o comportamento de prumos

Foram desenvolvidos vários modelos numéricos utilizando dois programas diferentes. O comportamento do prumo foi simulado através (i) do modelo simplificado apresentado em 4.4.1.1, (ii) do modelo numérico proposto pela norma EN 1065:1998 [4.32] (ver o Capítulo 2) e (iii) através de modelos mais completos do prumo simulando (a) mais correctamente as condições de apoio do prumo ao longo do ensaio, e (b) modelando os tubos através de elementos de casca.

4.4.2.1. Modelação do comportamento dos prumos através do programa ABAQUS

Numa primeira fase da presente Dissertação, foram realizados estudos analíticos com base em modelos de comportamento elástico linear simplificados, que permitiram avaliar a sensibilidade destes elementos à amplitude da curvatura inicial e da excentricidade da carga. Estes modelos constituíram

uma forma de aumentar a informação sobre o comportamento dos prumos antes de se desenvolverem modelos mais complexos, possibilitando a formação de uma base conhecimento crítica dos resultados obtidos a partir destes últimos modelos.

Os resultados dos estudos analíticos são no entanto aproximados. De facto, a resposta da estrutura apenas pode ser considerada linear enquanto as suas deformações e deslocamentos permanecerem pequenos, e as propriedades do material ou as condições de fronteira não se alterarem ao longo do carregamento. A resposta da estrutura pode, entretanto, tornar-se não-linear em consequência da influência de diversos factores:

- Geometria: ocorrência de grandes deformações, rotações ou deslocamentos;
- Material: existência de fenómenos de elasticidade não-linear, plasticidade, rotura, etc.;
- Fronteira: existência de problemas de contacto, fricção, etc.

No caso particular da análise dos prumos estão presentes estes três tipos de não-linearidades.

O programa ABAQUS é um programa comercial de cálculo, com base em elementos finitos, de carácter generalista. Disponibiliza dois módulos de análise, um implícito (*ABAQUS Standard*) e outro explícito (*ABAQUS Explicit*). Qualquer um dos módulos dispõe de uma biblioteca de elementos finitos e de elementos especiais que permitem simular um grande número de fenómenos físicos. Apenas vão ser apresentados os modelos desenvolvidos através do módulo *ABAQUS Standard*.

Pretende-se com o desenvolvimento destes modelos simular numericamente o comportamento real dos prumos. Uma vez validados e verificados, o objectivo final destes modelos consiste em, por um lado, (i) contribuir para a obtenção de um conhecimento mais aprofundado sobre a estabilidade e a capacidade resistente dos prumos telescópicos extensíveis comprimidos axialmente, e, por outro lado, (ii) aumentar a base de informação utilizada na construção de uma curva de dimensionamento para prumos de aço extensíveis, suprimindo assim uma lacuna da actual normalização de construção metálica sobre a verificação da segurança deste tipo de elementos estruturais.

Foram ainda desenvolvidos modelos numéricos que procuram validar o modelo numérico proposto pela norma EN 1065:1998.

4.4.2.1.1. Simulação das não-linearidades

Considerou-se que o comportamento do material (aço) das várias componentes do prumo pode ser simulado correctamente a partir de um modelo elastoplástico perfeito. Salienta-se o facto de se ter considerado, por motivos de resolução numérica do problema, que a tensão de rotura do material é 0,1% superior à respectiva tensão de cedência. Admitiu-se que os aços considerados possuem um factor de ductilidade de 100 (relação entre a extensão de rotura e a extensão de cedência). A informação adoptada para as características do material, i.e. tensão de cedência nominal, foi a indicada no manual de utilização

dos prumos. O módulo de elasticidade considerado foi de 205 GPa, um pouco inferior ao definido na parte 1-1 do Eurocódigo 3 (210 GPa). Considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,3.

Foi activada a opção para contabilizar a não-linearidade geométrica, tendo sido considerados os vários tipos de imperfeições iniciais especificadas na norma EN 1065:1998.

Devido às folgas iniciais existentes entre os acessórios de ensaio e a chapa da base inferior do prumo, e da possibilidade de ocorrer separação entre estas duas componentes durante o ensaio, foi necessário modelar as condições de interface entre as duas peças. Em todos os modelos foi simulado o contacto entre a chapa da base do tubo interior do prumo e a superfície de aplicação da carga, e entre a chapa da base do tubo exterior do prumo e a respectiva fundação. Esta simulação foi realizada através da imposição de condições de contacto entre duas superfícies, superfície-escrava e superfície-mestra [4.23].

Nos modelos utilizados, estas superfícies correspondem a faces de elementos deformáveis (no caso das bases do prumo) ou rígidos (nos casos da fundação e da superfície de aplicação da carga). As superfícies-mestras correspondem às superfícies formadas pelas faces dos elementos rígidos.

O módulo ABAQUS *Standard* é capaz de simular esta fonte de não-linearidade adoptando um método de contacto “duro” (“*Hard*” *contact*, em inglês). Neste método existe uma mudança abrupta entre a condição de existência de contacto e a condição de inexistência de contacto. A principal desvantagem deste método é que exige um esforço computacional elevado. Para obviar este facto, foram aliviadas as condições de contacto, permitindo uma pequena penetração entre superfícies e a existência de pequenas forças de tracção em nós da superfície escrava em contacto [4.23].

Diz-se que existe convergência de contacto, quando não existe penetração de nós da superfície escrava na superfície-mestra e não existem forças de tracção entre nós em contacto. Quando pelo menos uma destas condições é violada, procede-se à realização de iterações de contacto, denominadas “Iteração de Descontinuidade Severa (IDS)” [4.23], num máximo de 25 IDS.

Foi também considerada a existência de fricção entre as superfícies em contacto; admitido um coeficiente de atrito estático (μ_e) de 0,7, um coeficiente de atrito dinâmico (μ_d) de 0,5 e um coeficiente de redução de 0,1 [4.38, 4.39]. Foi admitido que o coeficiente de atrito diminui de acordo com a seguinte função exponencial [4.23]:

$$\mu = \mu_e + (\mu_d - \mu_e) e^{-d_c \dot{\gamma}_{eq}} \quad (4.34)$$

Em que:

d_c é um coeficiente de redução;

$\dot{\gamma}_{eq}$ é a taxa de deslizamento.

O módulo ABAQUS *Standard* utiliza o método de *penalty* no seu algoritmo de fricção, que assegura a não existência de deslocamentos relativos tangenciais entre as duas superfícies em contacto antes de se atingir a tensão tangencial crítica.

Foi também utilizada a opção *FINITE SLIDING* [4.23], a qual permite a consideração de grandes deslizamentos, rotações e deformações das superfícies em contacto. Esta opção implica que, para cada nova iteração, o programa ABAQUS determine quais as faces em contacto entre as duas superfícies.

Um dos aspectos mais difíceis de ultrapassar na resolução dos problemas de contacto, é a possibilidade de ocorrerem deslocamentos de corpo rígido antes de se efectivar o contacto. Tal é o caso dos modelos desenvolvidos, já que nas direcções do plano de contacto não existe nenhum impedimento, no primeiro incremento, de existirem deslocamentos de corpo rígido. O módulo ABAQUS *Standard* disponibiliza um método de estabilização automático para resolver estes problemas [4.24]. Este método introduz um coeficiente de amortecimento (igual a 2×10^{-8}), associado a uma matriz de massa unitária, na equação de equilíbrio estático. A energia viscosa dissipada deve no entanto ser pequena em relação à energia interna do sistema.

4.4.2.1.2. Resolução do problema numérico

Uma das soluções correntes na resolução de problemas não-lineares reside no recurso a modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos. A modelação realizada com base no programa ABAQUS [4.37] é apresentada seguidamente.

Para resolver os problemas não-lineares foi utilizado o conhecido método de Newton-Raphson (MNR) [4.2], com um máximo de 25 iterações de equilíbrio em cada incremento de carga, sendo utilizado um critério de convergência local [4.37]. Foi também activada a opção de recorrer, em todos os modelos desenvolvidos, ao algoritmo *line-search*. Este algoritmo pretende aumentar a robustez do método de Newton-Raphson em problemas fortemente não-lineares, sendo activado somente nestas situações [4.1]. Quando os resíduos são grandes e a solução aparenta divergir durante as iterações de contacto e/ou de equilíbrio, o algoritmo *line-search* aplica um factor de escala à correcção da solução. Este factor de escala, diferente para cada grau de liberdade do sistema, é calculado através de um processo iterativo que minimiza o vector dos resíduos [4.1].

A força foi imposta através de incrementos de deslocamento axial. Deste modo consegue-se obter convergência com o MNR após o ponto limite.

4.4.2.1.3. Modelação das várias componentes do prumo

O prumo é constituído por várias componentes, sendo as principais, (i) os tubos (exterior e interior); (ii) a chapa das bases superior e inferior; e (iii) o dispositivo de ajuste fino e fixação da posição do prumo.

As duas primeiras componentes foram modeladas com rigor através de elementos finitos. A terceira componente foi considerada de modo simplificado através da introdução de relações entre deslocamentos de duas secções do prumo.

Adoptaram-se os valores nominais, indicados no manual de utilização dos prumos, para as dimensões das várias componentes dos prumos.

O prumo foi modelado através de elementos de casca, quadriláteros, tendo-se considerado dois tipos diferentes de modelação:

- No primeiro caso, foram adoptados elementos do tipo S9R5 – elementos de segunda ordem, de nove nós, com cinco graus de liberdade por nó (3 translações e 2 rotações) – para os tubos, e elementos do tipo S4R – elementos de primeira ordem, de quatro nós, com seis graus de liberdade por nó – para as bases dos tubos.
- No segundo caso, foram adoptados elementos 2D lineares do tipo S4, S4R e ainda S4R5 para os tubos e para as respectivas bases.

No total foram desenvolvidos nesta fase seis modelos diferentes (Modelo 1 a Modelo 6), ver a Tabela 4.3.

A discretização adoptada na zona envolvente aos furos do tubo interior segue a proposta de Schafer [4.40]. Para o caso analisado (placa rectangular com um furo circular a meio sujeita a compressão axial) é referido por aquele autor, que bastam quatro camadas de elementos S9R5 para a solução convergir. No modelo adoptado foram utilizadas no mínimo 5 camadas em cada direcção numa envolvente quadrada à volta do furo.

A discretização adoptada para a chapa das bases baseou-se na apresentada por Schafer [4.40]. Utilizaram-se apenas elementos finitos lineares para modelar as superfícies de contacto, pois estes elementos apresentam vantagens em relação aos elementos de segunda ordem.

Os elementos S9R5 são muito eficazes para modelos nos quais a hipótese de pequenas deformações é válida. O seu desempenho não é afectado pela presença de distorções significativas (ângulos entre 40° a 130°) e relações entre o maior e o menor comprimento expressivas (pelo menos 1 para 8 [4.40]). Apresentam modos de deformação de energia nula. No entanto, é mais fácil preveni-los do que nos elementos de primeira ordem. São elementos de casca que seguem a teoria de Kirchhoff, i.e. para cascas finas nas quais as deformações por corte são desprezadas, assumindo-se que as secções planas permanecem planas e normais à secção do elemento após deformadas.

Tabela 4.3 – Validação dos modelos alterando o tipo de elementos

Identificação do modelo	Elementos utilizados nos tubos	Tipo de malha
Modelo 1	S9R5	Menos fina
Modelo 2	S9R5	Malha standard
Modelo 3	S8R	Malha standard
Modelo 4	S4R5	Malha standard
Modelo 5	S4R	Malha standard
Modelo 6	S4	Malha standard

Os elementos de casca baseados na teoria das pequenas deformações, como é o caso do elemento S9R5, utilizam uma formulação Lagrangeana total, i.e. as grandezas referem-se sempre ao estado inicial. Os elementos de casca baseados na teoria das grandes deformações, como é o caso do elemento S4, utilizam uma formulação Lagrangeana actualizada, i.e. as grandezas referem-se sempre ao último estado conhecido.

Nos elementos S9R5 e S4R, a letra R significa que se adoptou uma integração de Gauss reduzida. Nestes elementos, o programa ABAQUS introduz uma rigidez artificial para evitar o efeito de *hourglassing*, que no final da simulação não deve originar uma energia artificial maior do que 1% da energia interna do sistema. A adopção de uma malha de elementos mais fina pode também melhorar os resultados.

A fundação e a superfície de aplicação da carga foram modeladas através de dois corpos rígidos, definidos a partir da união de elementos rígidos. Cada corpo rígido possui um nó de referência. Todos os deslocamentos dos restantes nós do corpo rígido são função linear do deslocamento do nó de referência.

A zona de ligação entre os dois tubos (interior e exterior) foi modelada de modo simplificado, tornando dependentes, na secção do prumo correspondente ao fim do comprimento do tubo exterior, os deslocamentos do tubo exterior aos deslocamentos do tubo interior. Esta condição apenas foi imposta para rotações na base inferior superiores à necessária para os dois tubos entrarem em contacto em dois pontos. Antes desta verificação ser satisfeita os tubos rodam independentemente.

4.4.2.1.4. Desenvolvimento do modelo proposto pela norma EN 1065

A norma EN 1065:1998 define um modelo estrutural que pode ser utilizado para determinar a resistência dos prumos. O modelo é descrito no Capítulo 2.

Para simular o comportamento não-linear da mola que descreve a evolução das condições de apoio na base inferior do prumo, recorreu-se a duas subrotinas do programa ABAQUS, a USDFL e URDFIL [4.43]. Através destas subrotinas, conseguiu-se simular o comportamento não-linear da mola modificando-se a sua rigidez, através da alteração do módulo de elasticidade do material de uma barra que está ligada ao apoio inferior. Foram testadas várias condições de fronteira e várias soluções para simular a rigidez da mola. No final deste processo o modelo que deu melhores resultados é o que se representa na Figura 4.16.

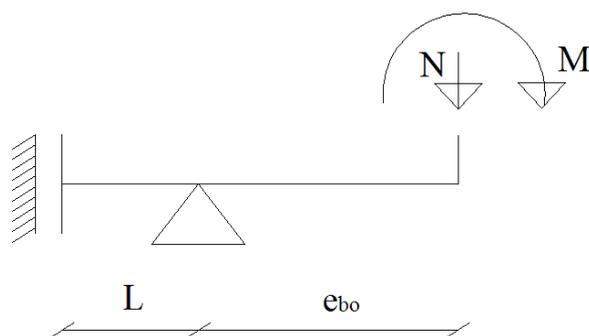


Figura 4.16 – Simulação da mola não-linear da norma EN 1065.

Este modelo, designado por Modelo EN 1065, apenas contém elementos de viga, em que as dimensões da secção transversal do tubo interior são dadas pela equação 4.16. Apresenta-se no Anexo C o ficheiro de dados tipo executado para simular o prumo para o Modelo EN 1065.

4.4.2.1.5. Modelação das imperfeições iniciais e condições de apoio

A norma EN 1065:1998 assume que os prumos em obra possuem imperfeições geométricas inevitáveis, pelo que requer que se considerem vários tipos de imperfeições, adoptando valores que, em geral, são conservativos. A norma distingue o tipo de imperfeições a considerar, consoante se verifique o prumo através de ensaios ou por via numérica:

(i) Via Experimental

- (i.1) Excentricidade do ponto de aplicação das forças verticais: 10 mm no plano de flexão de menor inércia;
- (i.2) Curvatura inicial do prumo devido à folga existente entre os dois tubos na zona de intersecção: rotação nas bases de modo a existirem duas zonas de contacto entre os dois tubos;
- (i.3) Curvatura inicial do prumo devida a desvios na forma dos tubos: rotação de 1° na base inferior.

(ii) Via Numérica

- (ii.1) Excentricidade (e) do ponto de aplicação das forças verticais: 10 mm no plano relativo à flexão de menor inércia;
- (ii.2) Excentricidade (e_{bo}) no apoio da base inferior dado pela seguinte expressão:

$$e_{bo} = 0,40 \times D_1 \quad \dots(4.35)$$

Com:

D_1 - diâmetro exterior do tubo inferior, ao qual, no caso de bases planas, se deve adicionar duas vezes a espessura da chapa da base inferior;

(ii.3) Curvatura inicial do prumo devida a desvios na forma dos tubos: configuração sinusoidal com amplitude igual a $a_o=L/500$;

(ii.4) Curvatura inicial do prumo, devida à folga que ocorre na zona de intersecção entre os dois tubos que o constituem: rotação nas bases, de modo a existirem duas zonas de contacto entre os tubos.

Para simular a configuração deformada inicial foi necessário distinguir os dois casos. No primeiro caso, foi criada uma rotina em FORTRAN, designada por *fjoin3* que adiciona os tipos de imperfeição (i.2) e (i.3). A indispensabilidade de separar estes dois tipos reside na necessidade de se obter uma configuração deformada sinusoidal no cálculo da resistência do prumo por via numérica. Esta foi obtida por analogia com a configuração do primeiro modo de encurvadura dos modelos, Modelo 1 a Modelo 6 e Modelo EN 1065, em que as condições de apoio foram alteradas para permitir a rotação livre nas extremidades do modelo de elementos finitos do prumo. No segundo caso foi criada uma rotina em FORTRAN, designada por *fjoin2* que adiciona os tipos de imperfeição (ii.3) e (ii.4).

As imperfeições (i.1) e (ii.1) nos Modelo 1 a Modelo 6 foram simuladas a partir das coordenadas do nó de referência da superfície rígida que serve para aplicação da carga. As imperfeições (i.1), (ii.1) e (ii.2) no Modelo EN 1065 foram definidas a partir de troços rígidos. A imperfeição (ii.2) não foi simulada nos Modelo 1 a Modelo 6.

4.4.2.1.6. Interpretação e validação dos modelos

No início dos trabalhos para esta Dissertação, estava prevista a realização do estudo de prumos de um dado tipo, facultados por uma empresa portuguesa do ramo das estruturas provisórias. No entanto, por razões alheias ao LNEC, esta empresa desistiu do processo de estudo. Não obstante foram inicialmente realizados estudos numéricos com este tipo de prumos, que se designaram por PRUMOSO.

Os resultados apresentados para as análises elásticas foram determinados para aquele tipo de prumo. Os modelos numéricos desenvolvidos previamente para os PRUMOSO, permitiram efectuar uma interpretação preliminar dos resultados e validar os vários modelos desenvolvidos, e seleccionar o modelo mais correcto.

Os vários modelos desenvolvidos são apresentados na Tabela 4.3.

Apresenta-se no Anexo C o ficheiro de dados tipo executado para simular o prumo para o Modelo 2.

Os resultados obtidos a partir destes modelos foram apresentados em [4.41] – incorporando (i) as imperfeições iniciais (ii.1), (ii.3), (ii.4) e (ii) o contacto entre as chapas das bases e as fundações. Foi também analisado o comportamento dos prumos para diferentes alturas, permitindo estudar as diferenças de comportamento obtidas. Os modelos com elementos diferentes contêm o mesmo número de nós, e não o mesmo número de elementos, para ser possível efectuar uma comparação de resultados a partir das mesmas condições iniciais.

A malha “standard” de elementos finitos, no caso dos elementos quadráticos é ilustrada na Figura 4.17, e no caso dos elementos lineares na Figura 4.18.

Ao analisar a Figura 4.19, pode concluir-se que a utilização de uma malha menos fina (4/5 dos elementos finitos em relação à malha standard) não tem um efeito significativo no valor obtido para a resistência máxima do elemento, sendo esta 3% maior do que o valor obtido no caso de se utilizar a malha standard.

Em relação ao tipo de elementos, verificou-se que o valor da resistência máxima obtido através do recurso a elementos de segunda ordem é 8% superior ao valor da resistência máxima obtido através do recurso a elementos de primeira ordem. Esta diferença pode dever-se a um ou à combinação dos seguintes factores, (i) erros de discretização na malha, i.e. existem elementos distorcidos cuja contribuição para a matriz de rigidez global não é contabilizada; (ii) diferenças devido a diferentes formulações, i.e. consideração de pequenas ou grandes deformações.

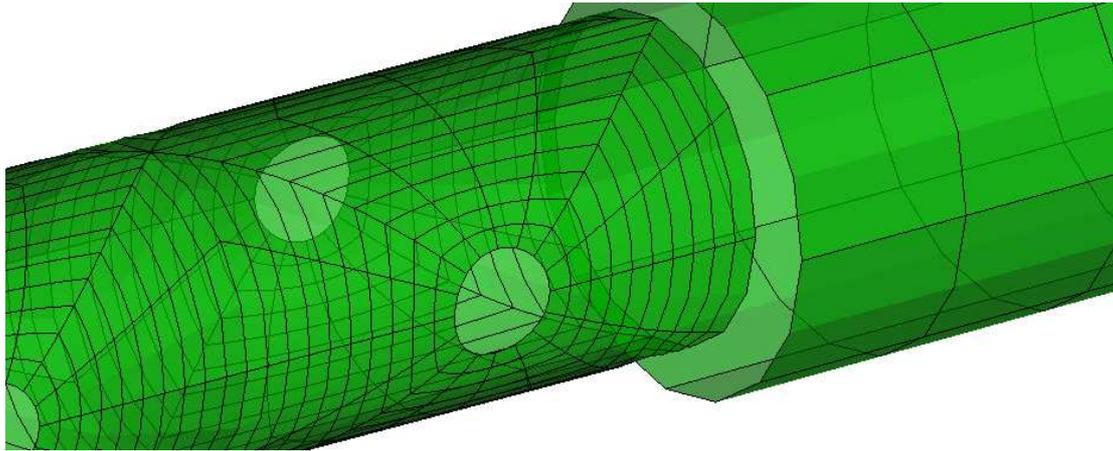


Figura 4.17 – Malha “standard” para elementos quadráticos.

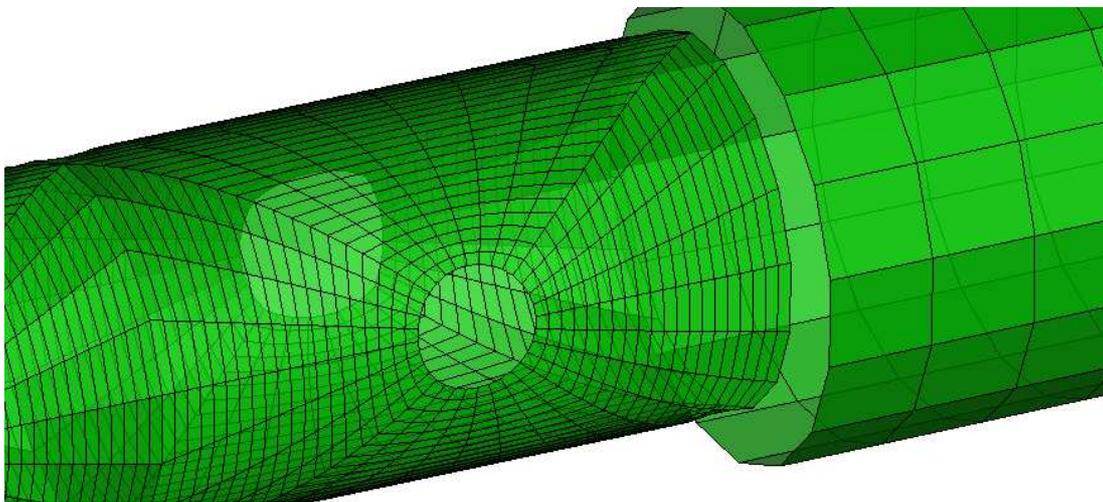


Figura 4.18 – Malha “standard” para elementos lineares.

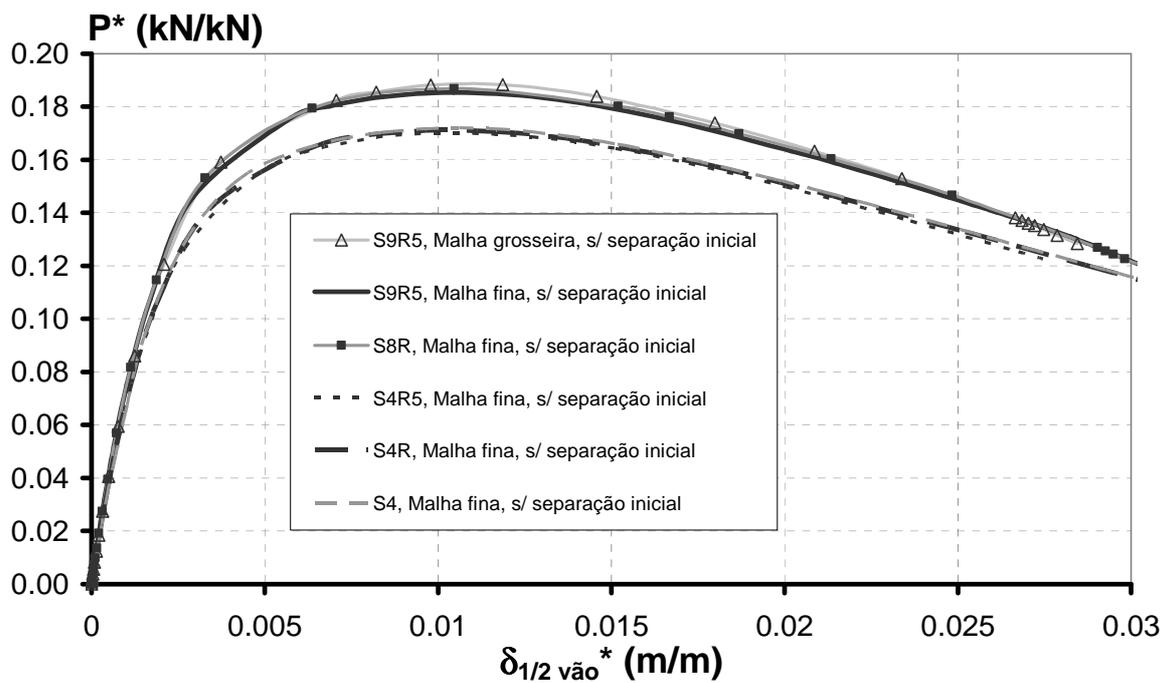


Figura 4.19 – Diagramas $P^* - \delta_{1/2 \text{vão}}^*$ obtidos para os vários modelos.

Em relação à densidade da malha de elementos finitos utilizada, visto que se obtiveram diferenças de apenas 3% no valor da resistência máxima, pode concluir-se que a *p-convergence* foi satisfeita.

Sabendo-se que através da *h-convergence*, i.e. aumento da ordem dos elementos, em geral se obtém melhor convergência, pode argumentar-se que os resultados obtidos a partir dos modelos com elementos finitos quadráticos são melhores que os obtidos através de elementos finitos lineares.

Este facto é verdade se não existirem imperfeições na malha de elementos finitos. Em geral, ver 4.1, os elementos quadráticos são menos sensíveis a distorções do que os elementos de primeira ordem. O programa emite alertas sobre a qualidade da malha de elementos finitos, baseados nos critérios para elementos finitos 2D lineares. Em relação ao modelo 2 e 3, o programa emite uma grande quantidade de alertas. No entanto, as distorções presentes têm valores dentro dos limites admissíveis para este tipo de elementos, quer para o ângulo mínimo, igual a 45°, e máximo, igual a 125°, entre arestas do elemento, quer para o rácio máximo entre as dimensões do elemento, igual a 6. Em relação aos modelos 4 a 6 o programa emite menos mensagens de alerta. Contudo o modelo exhibe uma relação média entre as dimensões do elemento igual a 3,25, um ângulo mínimo médio de 64° e um ângulo máximo médio de 114°, entre arestas do elemento. Conclui-se assim que as distorções presentes na malha de elementos finitos lineares, violam as tolerâncias máximas para este tipo de elementos, pelo que os resultados devem ser interpretados tendo este facto em mente, já que o nível de distorção existente pode afectar a qualidade da solução obtida.

É de referir que a hipótese de existirem modos de energia nula nos modelos de elementos finitos lineares com integração reduzida não se confirmou, visto que os resultados dos Modelos 4 a 6 são muito semelhantes.

Em relação à possibilidade de as diferenças registadas se deverem a diferentes formulações dos elementos, não será este o caso, dado que a extensão registada no final do incremento para a resistência máxima é inferior a 1,3% no caso do modelo de elementos finitos quadráticos. Não obstante, comparou-se as extensões registadas em cada incremento para os modelos 2 e 6, no elemento em que se registam maiores valores de deformação (numa zona do tubo interior junto a um furo, onde se inicia o colapso do prumo), ver a Figura 4.20.

Verifica-se que existem diferenças consideráveis no valor das extensões registadas nos dois modelos. Como seria expectável, as extensões determinadas pela formulação das pequenas deformações sobrestima o valor mais correcto fornecido pela formulação das grandes deformações. No entanto, não é claro o seu efeito na diferença de valores da força máxima obtida para os diferentes modelos.

As figuras do Anexo C ilustram os diagramas de tensão de Von-Mises, deformação no plano dos elementos segundo a direcção de maiores deformações e deformações plásticas para os modelos 2 e 6.

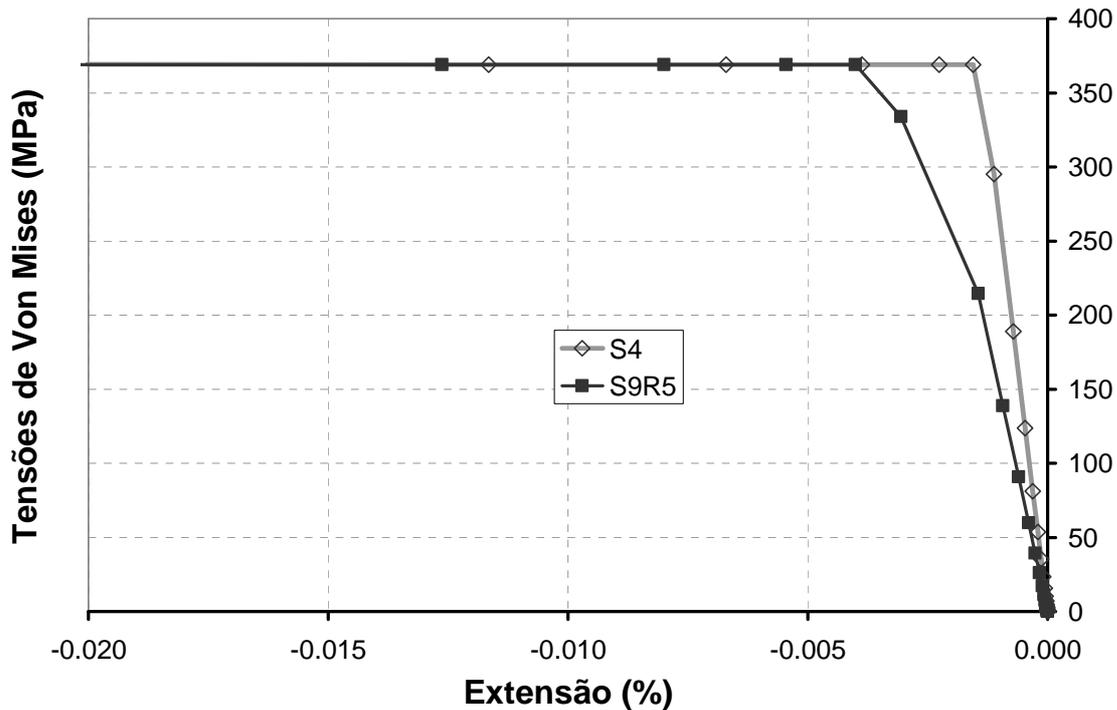


Figura 4.20 – Diagrama Tensões de Von-Mises vs. Extensão

Pode observar-se que existe uma concordância, em termos de configuração de todos os parâmetros. Em nenhum diagrama se registam indícios de problemas numéricos, caracterizados por ramificações em vez de contornos esféricos.

Finalmente, discute-se a validade da hipótese assumida para simular o troço de intersecção entre os dois tubos. Recorde-se que este foi simulado apenas considerando uma dependência entre os deslocamentos dos dois tubos na secção correspondente ao fim do comprimento do tubo exterior, de forma a existir continuidade de deslocamentos nessa secção entre os dois tubos. Esta simulação permite rotações entre as duas secções em contacto, impondo portanto uma ligação flexível, como sugere M. El-Sheikh et al [4.42].

Todos os modelos apresentam valores de energia artificial e viscosa muito baixos, menos de 1% da energia de deformação interna do sistema, pelo que não introduzem incertezas nos resultados obtidos.

Em conclusão, dos diferentes modelos desenvolvidos foi seleccionado o Modelo 2 como sendo o melhor, e foi o escolhido para posteriores análises numéricas.

A pretensão inicial de, com base no Modelo 2 validar o Modelo EN 1065, não foi totalmente conseguida uma vez que o Modelo 2 não considera todos os tipos de imperfeições especificadas na norma para a verificação por via numérica. Ainda assim vão ser ilustrados os resultados obtidos pelos dois modelos.

4.4.2.2. Outros programas utilizados

Foi utilizado outro programa de análise estrutural para analisar o comportamento dos prumos. Este programa baseia-se num modelo elastoplástico descrito em [4.45-4.48], e permite o cálculo

elastoplástico de estruturas reticuladas considerando os efeitos da evolução progressiva da plastificação, ao longo das secções transversais e do comprimento dos elementos estruturais, sobre a perda gradual da sua rigidez e, conseqüentemente, sobre o cálculo dos respectivos deslocamentos. O programa utiliza um conjunto de expressões analíticas que estabelecem a relação entre os esforços e as deformações globais das secções transversais, em regime elástico e elastoplástico.

Os modelos numéricos desenvolvidos, designados por Modelo AMB, baseiam-se no modelo estrutural simplificado utilizado para realizar as análises elásticas, descrito em 4.4.1.1.

Assume-se que os elementos estruturais se encontram isentos de quaisquer fenómenos de instabilidade fora do plano de carregamento e deformação transversal que possam limitar a sua capacidade de deformação em regime elástico ou elastoplástico. Nos estudos realizados admitiu-se a hipótese de o material constituinte dos prumos (tubos e chapa das bases) apresentar um comportamento elastoplástico perfeito (sem endurecimento), simétrico em tracção e em compressão.

Nos modelos desenvolvidos não foi considerada a imperfeição (ii.2), especificada na norma EN 1065:1998, ver 4.4.2.1.5.

Estes modelos apenas contêm elementos de viga, em que as dimensões da secção transversal do tubo interior são dadas pela equação (2.17). A validação destas equações foi realizada em duas fases: (i) em regime elástico linear comparando os valores das cargas críticas dados através das matrizes de rigidez exactas e os valores correspondentes dados pelo Modelo 2 (alterando as condições de fronteira de forma a serem as mesmas nos dois métodos); e (ii) em regime elastoplástico comparando os diagramas carga vs. deslocamento transversal obtidos pelo Modelo AMB e pelo Modelo 2 (alterando as condições de fronteira de forma a serem as mesmas nos dois métodos). Estes estudos foram apresentados em [4.44] e permitiram concluir que as expressões propostas pelo Modelo AMB podem ser utilizadas com confiança, i.e. os resultados obtidos são muito semelhantes.

No que respeita à validação das simplificações assumidas no Modelo AMB, descritas em 4.2.1.1, os resultados fornecidos por este modelo foram comparados com os resultados obtidos para o Modelo 2 [4.41] permitindo verificar que, em termos de resistência se obtêm resultados semelhantes; o mesmo não se passa quando se analisa o comportamento do prumo obtido por cada um dos modelos. Este último facto deve-se à modelação do contacto nas bases do prumo, que só é realizada no Modelo 2.

4.4.2.3. Verificação dos modelos numéricos desenvolvidos

Nesta secção são apresentados os principais resultados obtidos através dos modelos numéricos atrás referidos, i.e. Modelo 2, Modelo EN 1065 e Modelo AMB.

Os prumos considerados nestes estudos foram os analisados experimentalmente (e não os prumos PRUMOS0 utilizados na validação dos modelos numéricos). Os prumos possuem as seguintes características, (i) tubos interior (T_{int}) e exterior (T_{ext}) com 2000 mm e 1900 mm de comprimento, constituídos por aço 43C de acordo com a norma BS 4360 [3.4] (corresponde ao aço S275 da norma

EN 10025-1), (ii) T_{int} possui furos com 15 mm de diâmetro espaçados de 80 mm (centro a centro), (iii) as chapas de base de T_{int} e T_{ext} são iguais e quadradas, com 110 mm de lado e 6 mm de espessura, (iv) os valores máximo e mínimo da altura total máxima de um prumo (*i.e.*, dos dois tubos) são 3,5 e 2,0 metros, e (v) as dimensões das secções transversais dos tubos estão indicadas na Tabela 4.4.

Para o Modelo 2 foram considerados os submodelos que constam da Tabela 4.5.

Ao longo desta secção são apresentados os resultados principais obtidos através dos modelos numéricos atrás referidos. As grandezas consideradas são representadas por variáveis reduzidas (adimensionais), como se indica na Tabela 4.6, salvo indicação em contrário. Tal como no Capítulo 3, no cálculo dos factores de escala são utilizados os valores nominais das características geométricas dos tubos e das características mecânicas do material dos tubos do prumo.

Tabela 4.4 - Dimensões das secções transversais dos tubos.

Tubo	Interior (T_{int})	Exterior (T_{ext})
Diâmetro exterior, D_{exts} (mm)	48,3	60,0
Espessura, t , (mm)	3,2	2,5

Tabela 4.5 – Submodelos considerados do Modelo 2.

ID modelo	Comprimento (m)	Simulação do contacto?	Considerando a folga inicial na base inferior?	Imperfeições consideradas	Características dos materiais	Outras
ABAQUS N.1	2,00 a 3,50	Sim	Não	(ii.1), (ii.3) e (ii.4)	Valores nominais	-
ABAQUS N.2	2,00 a 3,50	Sim ²⁾	Não	(ii.1), (ii.3) e (ii.4)	Valores nominais	-
ABAQUS N.3	3,50	Sim	Não	(ii.1), (ii.3) e (ii.4)	Valores nominais	Consideração de uma ligação rígida no troço de intersecção dos tubos
ABAQUS E.1	2,00 a 3,50	Sim	Não	(i.1) a (i.3)	Valores nominais	-
ABAQUS E.2	2,00 a 3,50	Sim ²⁾	Não	(i.1) a (i.3)	Valores nominais	-
ABAQUS E.3	2,00 a 3,50	Sim ²⁾	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores nominais	-
ABAQUS E.4	2,00 a 3,50	Sim ²⁾	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores reais ³⁾	-
ABAQUS E.5	2,00 a 3,50	Sim ²⁾	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores reais ^{3), 4)}	-
ABAQUS E.6	2,00 ¹⁾	Sim ²⁾	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores reais ^{3), 4)}	Excentricidade da carga, (e), igual a 5 mm
ABAQUS E.7	3,50 ¹⁾	Sim	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores nominais	-
ABAQUS E.8	3,50 ¹⁾	Sim	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores reais ³⁾	-
ABAQUS E.9	3,50 ¹⁾	Sim	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores reais ^{3), 4)}	-
ABAQUS E.10	2,75 ¹⁾	Sim	Sim	(i.1) a (i.3)	Valores reais ^{3), 4)}	-

1) Apenas para a configuração normal.

2) Sem separação das superfícies em contacto.

3) Obtidos a partir dos resultados dos ensaios de tracção realizados, ver o Capítulo 6.

4) Utilizando o valor nominal do módulo de elasticidade, *i.e.*, $E=205$ GPa.

Com o objectivo de verificar os resultados obtidos, incluem-se igualmente nos gráficos os resultados experimentais. Não se apresentam os resultados obtidos através dos modelos ABAQUS N.1, ABAQUS N.3, ABAQUS E.1-E.2 e ABAQUS E.7-E.8, por não incorporarem na modelação aspectos essenciais do comportamento real do prumo, i.e. por não considerarem a inexistência de separação entre as superfícies em contacto (todos os casos, excepto o quarto caso), por não considerarem a folga inicial entre a chapa da base inferior do prumo e a fundação (no quarto caso) e devido à modelação incorrecta das características mecânicas do material do prumo (quinto e sexto casos). Adicionalmente, o modelo ABAQUS N.3 foi descartado dado que dos resultados experimentais não foram obtidas evidências que suportassem a hipótese admitida.

Tabela 4.6 – Variáveis reduzidas

Variável	Símbolo	Factor de escala	Variável reduzida
Força	P	$P_{ced, min} = \min(P_{ced, Tint}, P_{ced, Text})$ ¹⁾	$P^* = P / P_{ced, min}$
Deslocamentos	δ	$L = \text{comprimento do prumo}$	$\delta^* = \delta / L$
Momento-flector	M	$M_{min} = \min(M_{ced, Tint} \text{ ou } M_{ced, Text})$ ¹⁾	$M^* = M / M_{min}$
Tensão	σ	f_y do material do tubo	$\sigma^* = \sigma / f_y$

¹⁾ $P_{ced, Tint} = 97,77 \text{ kN}$; $P_{ced, Text} = 124,19 \text{ kN}$; $M_{ced, Tint} = 1,04 \text{ kN.m}$; $M_{ced, Text} = 1,71 \text{ kN.m}$

4.4.2.3.1. *Altura máxima (L=3,50 m) dos prumos*

Os resultados obtidos para o prumo de 3,50 m de altura, na configuração normal, são apresentados na Figura 4.21.

Comparando os resultados obtidos com os modelos ABAQUS N.2, EN 1065:1998 e AMB, pode analisar-se a influência de diferentes técnicas de simulação das condições de fronteira no comportamento do prumo obtido numericamente.

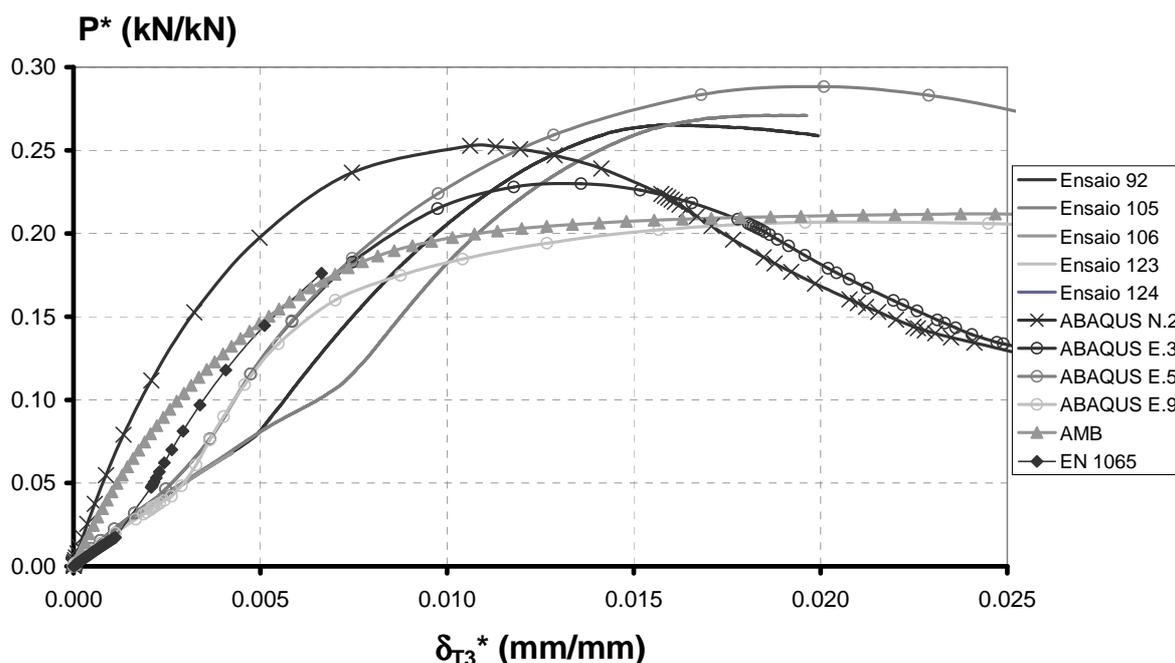


Figura 4.21 - Diagramas $P^* - \delta_{T3}^*$ obtidos para os vários modelos ($L=3,5 \text{ m}$, configuração normal).

O modelo EN 1065 é desenvolvido a partir do modelo estrutural proposto pela norma EN 1065:1998 que introduz uma mola não-linear de comportamento complexo, e consegue simular de modo aproximado (mas bastante conservativo) o comportamento real do prumo. No modelo ABAQUS N.2 não foi considerada a folga inicial entre a chapa da base inferior do prumo e a fundação, pelo que a aproximação do campo de deslocamentos não é satisfatória. O modelo AMB parte do modelo estrutural simplificado exposto em 4.4.1.1, que simula de modo aproximado as condições de fronteira do prumo a partir de molas devido à falta de informação prévia sobre a lei de comportamento das molas. Como tal, a evolução da rigidez das condições de fronteira depende apenas da possível plastificação do material das bases. Este facto não permite simular a evolução da rigidez das bases em regime elástico. Como tal a resistência obtida constitui uma aproximação conservativa.

O modelo ABAQUS E.5 é o modelo que consegue simular de modo mais satisfatório o comportamento real do prumo. No modelo ABAQUS E.9 não foi eliminada a possibilidade de separação por flexão da extremidade da chapa da base inferior e a fundação, tendo-se obtido na força máxima uma separação na extremidade da chapa de cerca de 2,5 mm. Nos ensaios o valor máximo registado foi de 0,8 mm.

As figuras 4.22 e 4.23 ilustram os resultados obtidos pelo modelo numérico ABAQUS E.5 para os níveis de medição de deslocamentos controlados durante os ensaios de prumos realizados a esta altura.

À excepção dos deslocamentos obtidos para o transdutor T_2 (situado no tubo exterior na secção final do troço de intersecção dos dois tubos), os deslocamentos obtidos pelo modelo ABAQUS E.5 estão razoavelmente de acordo com os obtidos experimentalmente. O mesmo se verifica na configuração invertida.

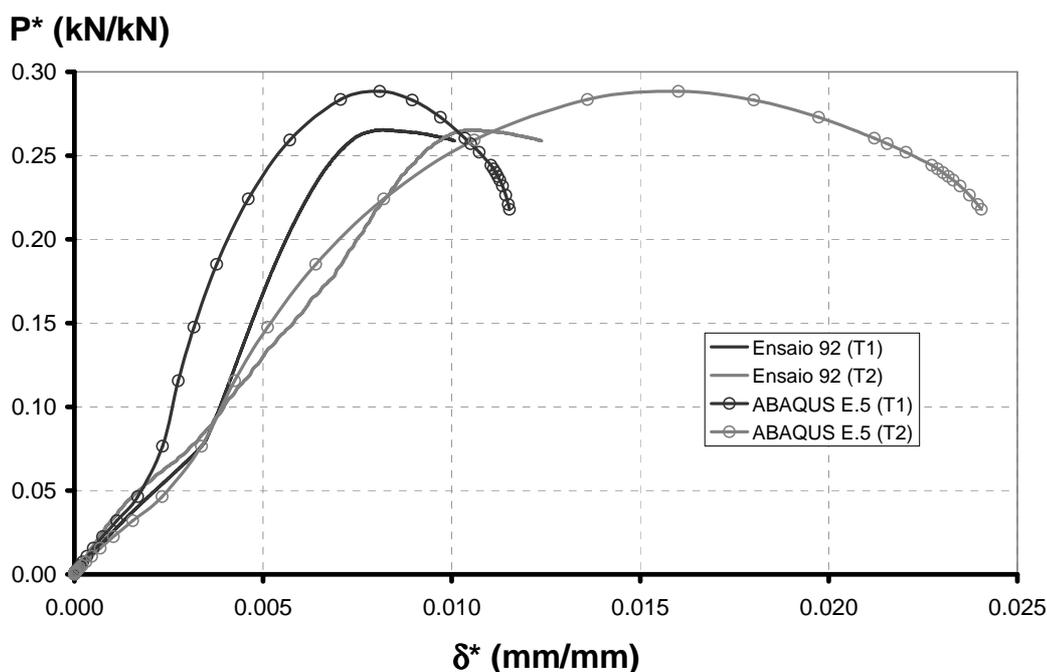


Figura 4.22 - Diagramas $P^* - \delta_{T1 e T2}^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=3,5$ m, configuração normal).

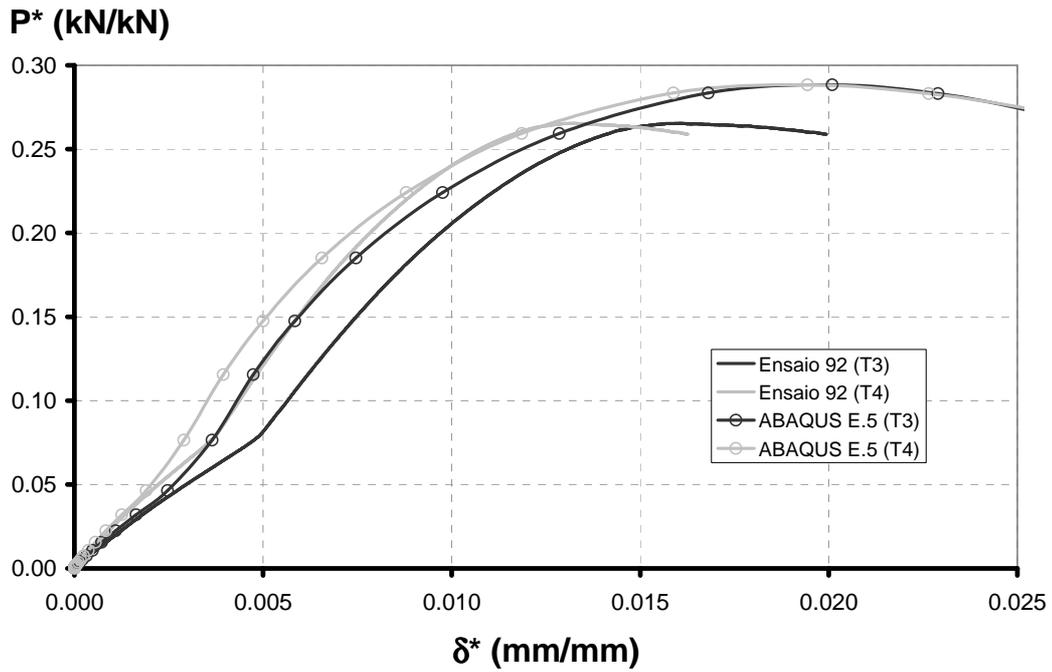


Figura 4.23 - Diagramas $P^* - \delta_{T3}^*$ e $T4^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=3,5$ m, configuração normal).

Recorrendo a extensómetros eléctricos não foram registadas extensões plásticas na base inferior do prumo (na configuração normal), sendo possível obter a partir dos valores de extensão registados os valores dos momentos flectores nesta secção. Os diagramas de força versus momentos na base para os vários modelos estão ilustrados na Figura 4.24⁹.

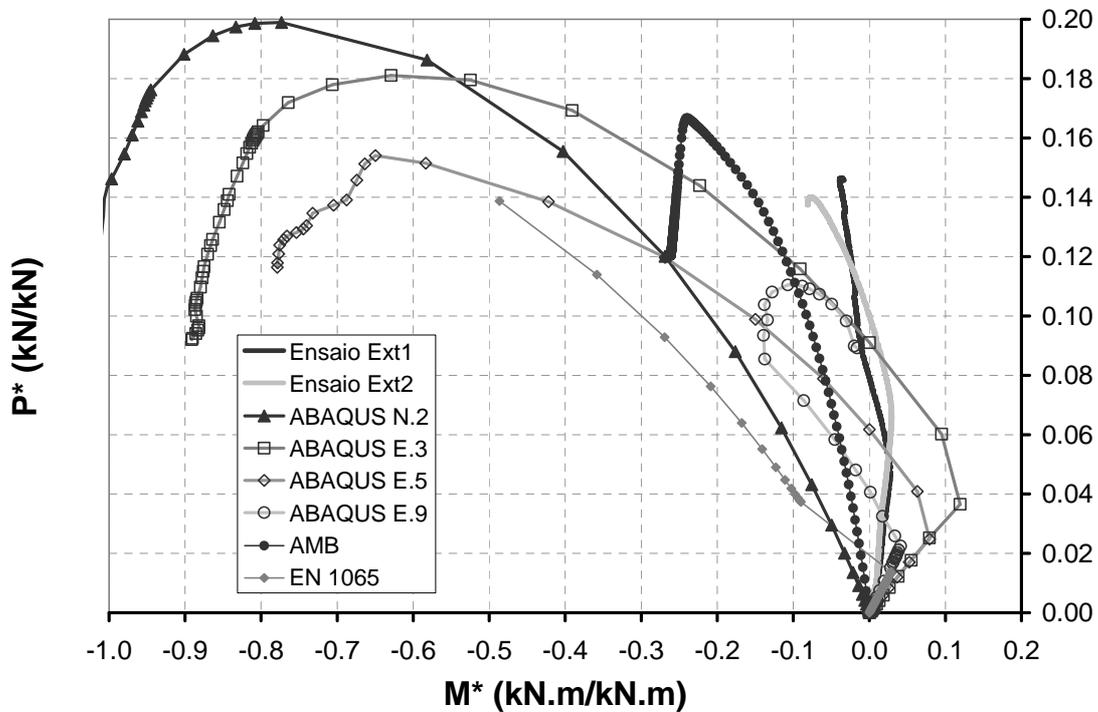


Figura 4.24 - Diagramas $P^* - M^*$ obtidos para os vários modelos ($L=3,5$ m, configuração normal).

⁹ As variáveis adimensionais P^* e M^* são relativas ao esforço normal de cedência e momento-flector de cedência do tubo exterior.

É possível observar que apenas se registam cedências ($P^*+M^*\geq 1$) para os modelos ABAQUS N.2, e ABAQUS E.3. Os momentos-flectores experimentais são muito baixos. Este facto pode ser devido a uma avaria dos extensómetros utilizados, dado o máximo esforço normal obtido a partir das extensões registadas ser muito menor (cerca de 8 kN) do que o registado pelo transdutor de forças (cujo valor máximo foi cerca de 27 kN).

Ainda assim é possível analisar a configuração dos diagramas. O comportamento registado experimentalmente é simulado de modo satisfatório pelos modelos ABAQUS E.3-E.5-E.9 e EN 1065, dado que conseguem simular a mudança de sinal dos momentos-flectores quando a folga inicial entre a chapa da base inferior e a fundação é vencida.

A Figura 4.25 ilustra os diagramas excentricidade da força na base inferior do prumo versus a rotação nessa secção. Estes diagramas são interessantes, pois permitem comparar directamente os resultados obtidos com o modelo estrutural proposto na norma EN 1065:1998 para a rigidez de rotação da base inferior do prumo.

Os resultados experimentais ilustrados, baseiam-se nos momentos flectores determinados a partir das extensões extensométricas e na rotação determinada a partir das medições da folga inicial e do deslocamento vertical, na força máxima, entre a extremidade da chapa da base inferior do prumo e a sua fundação.

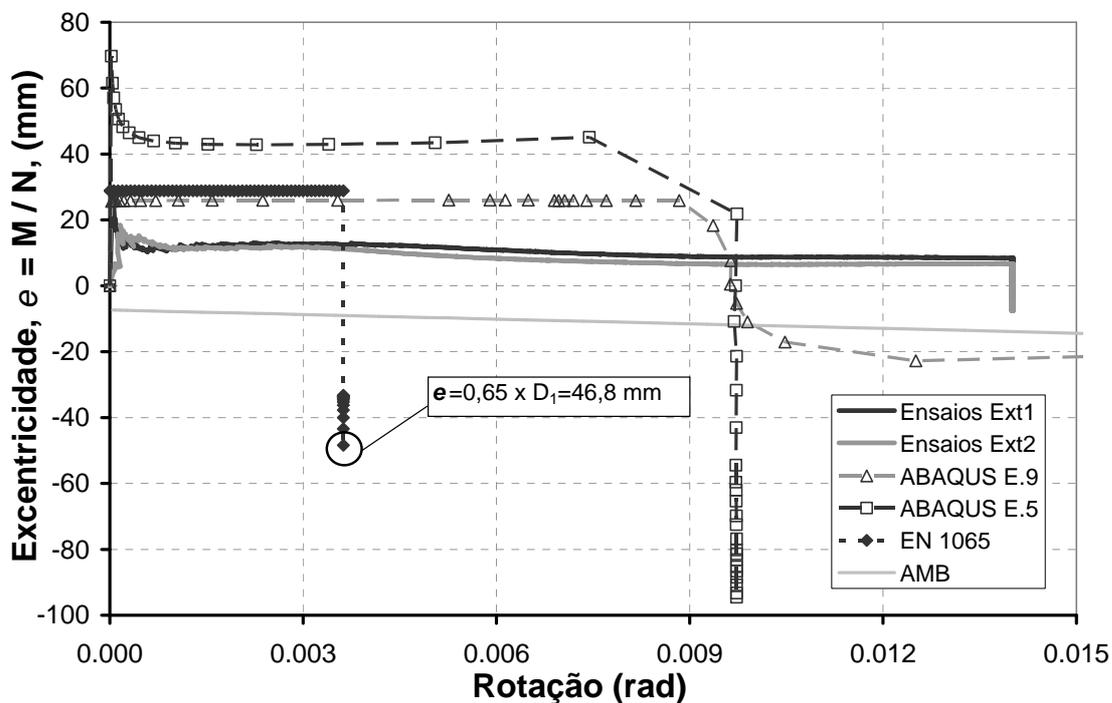


Figura 4.25 - Diagramas da excentricidade do esforço normal na base inferior do prumo em função da rotação da mesma base do prumo, obtidos para os vários modelos ($L=3,5$ m, configuração normal).

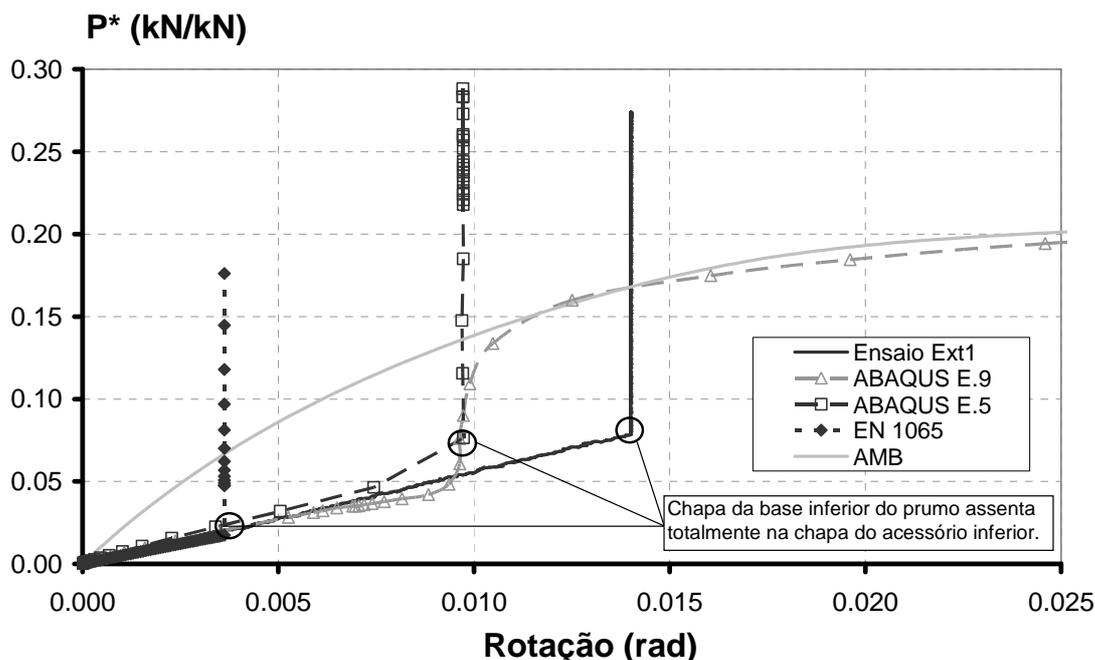


Figura 4.26 - Diagramas P^* – rotação na base inferior do prumo obtidos para os vários modelos ($L=3,5$ m, configuração normal).

Considerando estes valores obtêm-se más correlações entre os resultados numéricos e os experimentais. Inicialmente, registaram-se experimentalmente excentricidades da força devido à folga inicial entre as superfícies inferior e superior das chapas da base inferior e do acessório, respectivamente, que se mantêm constantes até a folga ser vencida. A partir do instante em que a folga é vencida passa a existir uma restrição à rotação na base inferior do prumo, e são registados momentos negativos.

Este comportamento é simulado de modo aproximado por todos os modelos à excepção do modelo AMB.

Convém ressaltar que os valores da excentricidade da força na base inferior, e , determinados experimentalmente são dependentes dos valores dos momentos flectores obtidos (M) a partir das extensões extensométricas, que podem não estar correctas por defeito. Se os valores de M fossem mais elevados, o comportamento obtido através dos ensaios aproximar-se-ia do obtido pelos modelos numéricos.

4.4.2.3.2. Altura mínima ($L=2,00$ m) dos prumos

A Figura 4.27 ilustra os resultados obtidos do deslocamento axial para o prumo com comprimento igual a 2,0 m, na configuração normal.

Pode observar-se que existe uma diferença significativa entre os resultados experimentais e os numéricos. A diferença entre os deslocamentos axiais obtidos deve-se ao facto de não se ter considerado em nenhum dos modelos a modelação do pino (a sua consideração é feita à parte através da verificação de um conjunto de fórmulas indicadas na norma EN 1065:1998) e do modo de rotura do prumo obtido experimentalmente ser caracterizado pela plastificação do pino.

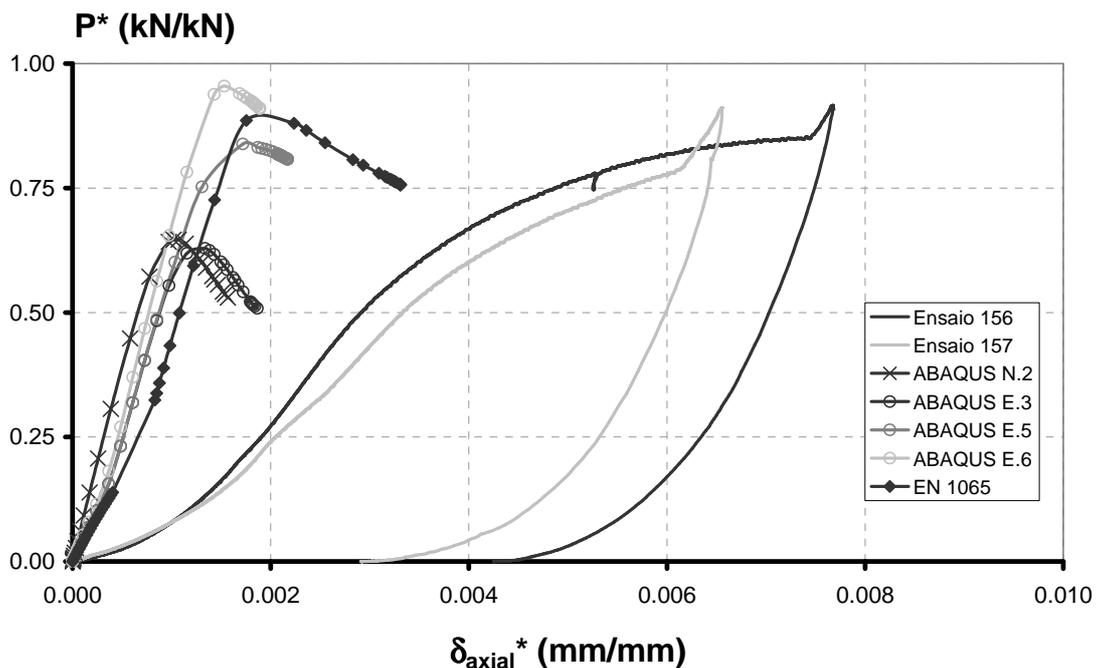


Figura 4.27 - Diagramas $P^* - \delta_{axial}^*$ obtidos para os vários modelos ($L=2,0$ m, configuração normal).

A diferença entre as forças registadas nos ensaios e obtidos nos modelos numéricos pode advir de variações das propriedades dos materiais dos tubos. Descartada está a possibilidade de a diferença resultar da imposição de diferentes condições iniciais no modelo numérico e no ensaio, já que a rigidez inicial registada em ambos os casos é semelhante.

Adicionalmente, foi verificado outro factor: o valor da excentricidade da carga aplicada durante o ensaio. Assumindo que este valor pode não ser ter sido os 10 mm que a norma EN 1065:1998 especifica e simulando uma excentricidade de 5 mm no modelo ABAQUS E.5, i.e. o modelo ABAQUS E.6, obtém-se uma resistência mais elevada, ainda assim menor que o valor da força máxima que foi registado experimentalmente. Este resultado evidencia que a influência do valor da excentricidade na diferença entre resultados é muito reduzida, mesmo quando simulando um valor 50% inferior ao aplicado durante os ensaios.

Para além das possíveis razões já apresentadas, para justificar a diferença verificada, existe outra que consiste no facto de quando o pino se deforma 1 cm a extremidade do tubo interior entrar em contacto com a fundação, passando deste modo a ensaiar-se à compressão o tubo interior. Este comportamento não foi considerado nos modelos numéricos pelo que não só a plastificação do pino não foi captada, mas também a força máxima obtida numericamente é inferior à que foi obtida experimentalmente.

Observando a Figura 4.28 constata-se que o modelo ABAQUS E.5 não consegue simular de modo satisfatório os deslocamentos transversais experimentais nos diferentes níveis de registo. Uma possível justificação para diferença entre a resistência obtida nos ensaios e nos modelos numéricos reside no facto de se terem registado deformações plásticas significativas no pino, promovendo deste modo

menores deslocamentos transversais do que os obtidos nos modelos numéricos. Este comportamento diminui os efeitos P-Delta e como tal aumenta a resistência do prumo para esta altura.

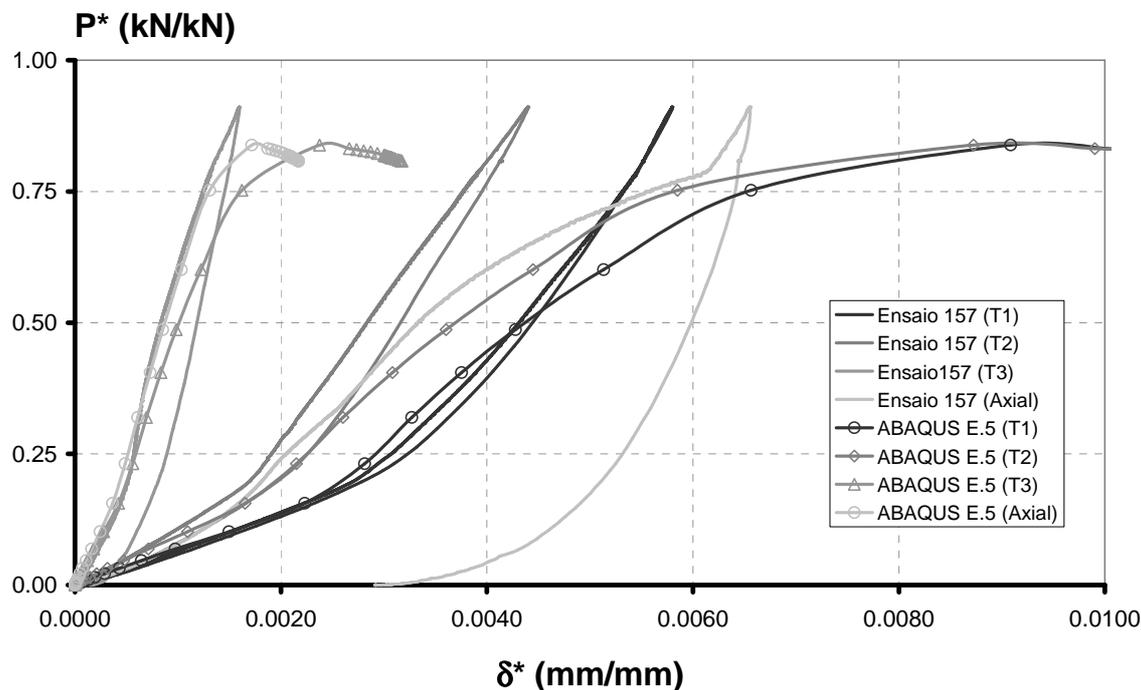


Figura 4.28 - Diagramas $P^* - \delta^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=2,0$ m, configuração normal).

4.4.2.3.3. Altura intermédia condicionante ($L=2,75$ m) dos prumos

A Figura 4.29 ilustra os resultados obtidos do deslocamento transversal (transdutor T_3) para o prumo com comprimento igual 2,75 m, na configuração normal. Este comprimento corresponde à altura intermédia condicionante determinada a partir dos ensaios laboratoriais.

Existe uma diferença significativa entre os resultados experimentais e os numéricos. Em geral, a estimativa do valor da força máxima é melhor que a dos deslocamentos registados no ensaio. Este facto, deve-se aos modelos numéricos não conseguirem simular a perda progressiva de rigidez ao longo do ensaio, o que é compensado em alguns modelos com a consideração simplificada de outras variáveis: (i) o modelo AMB consegue devolver valores para a resistência do prumo muito satisfatórios à custa de simular de forma conservativa as condições de fronteira; (ii) os modelos ABAQUS N.2 e E.3 à custa da consideração de materiais com características inferiores.

Os melhores resultados obtêm-se com o modelo ABAQUS E.10. Neste modelo não foi eliminada a possibilidade de separação por flexão da extremidade da chapa da base inferior e a fundação, tendo-se obtido na força máxima uma separação na extremidade da chapa de cerca de 0,9 mm. Nos ensaios o valor máximo registado foi de cerca de 0,6 mm. Este modelo (e os outros) não considera explicitamente as deformações na chapa da base inferior do prumo (variável não contabilizada pela norma EN 1065:1998) detectadas nos ensaios de prumos para $L=2,75$ m e que condicionam a rigidez inicial do comportamento do prumo. No entanto, é possível considerar que o modelo ABAQUS E.10

simula de forma aproximada este tipo de imperfeição inicial, e como tal devolve valores de resistência próximos aos obtidos experimentalmente.

Por fim, o modelo ABAQUS E.5 não consegue simular de forma satisfatória o comportamento do prumo nesta posição, ver a Figura 4.30.

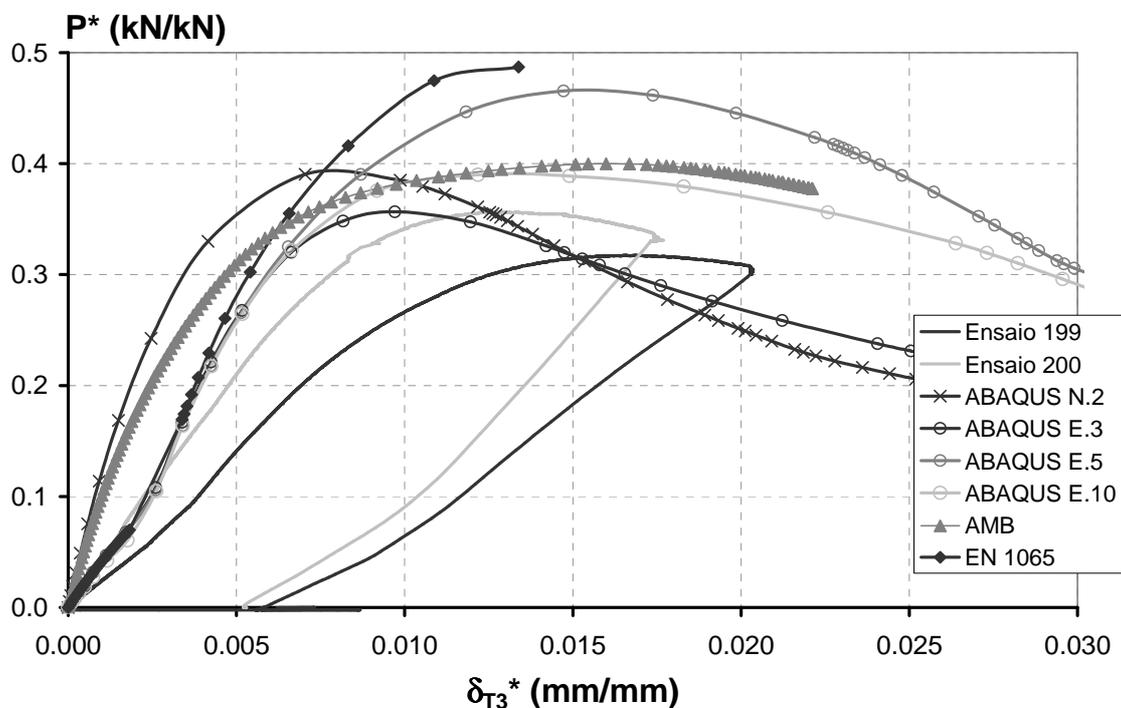


Figura 4.29 - Diagramas $P^* - \delta_{T3}^*$ obtidos para os vários modelos ($L=2,75$ m, configuração normal).

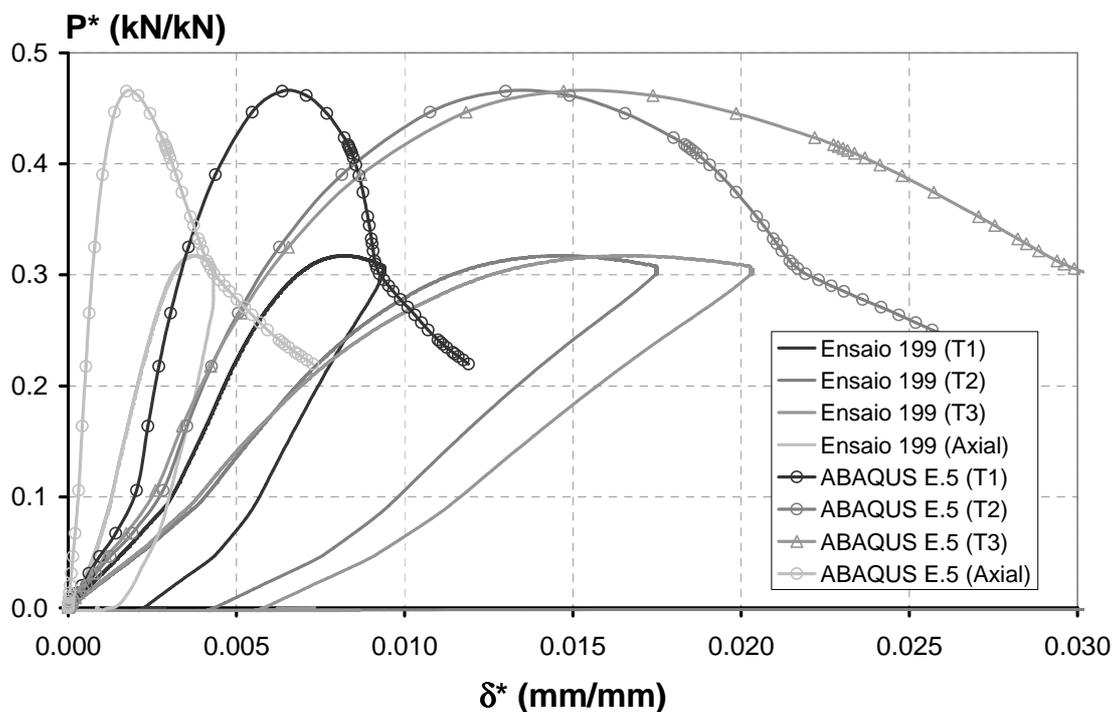


Figura 4.30 - Diagramas $P^* - \delta^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 ($L=2,75$ m, configuração normal).

4.4.2.3.4. Restantes alturas intermédias dos prumos

Apresentam-se nas figuras seguintes a comparação entre os resultados numéricos, obtidos com o modelo ABAQUS E.5, e os resultados experimentais para as restantes alturas intermédias, na configuração normal.

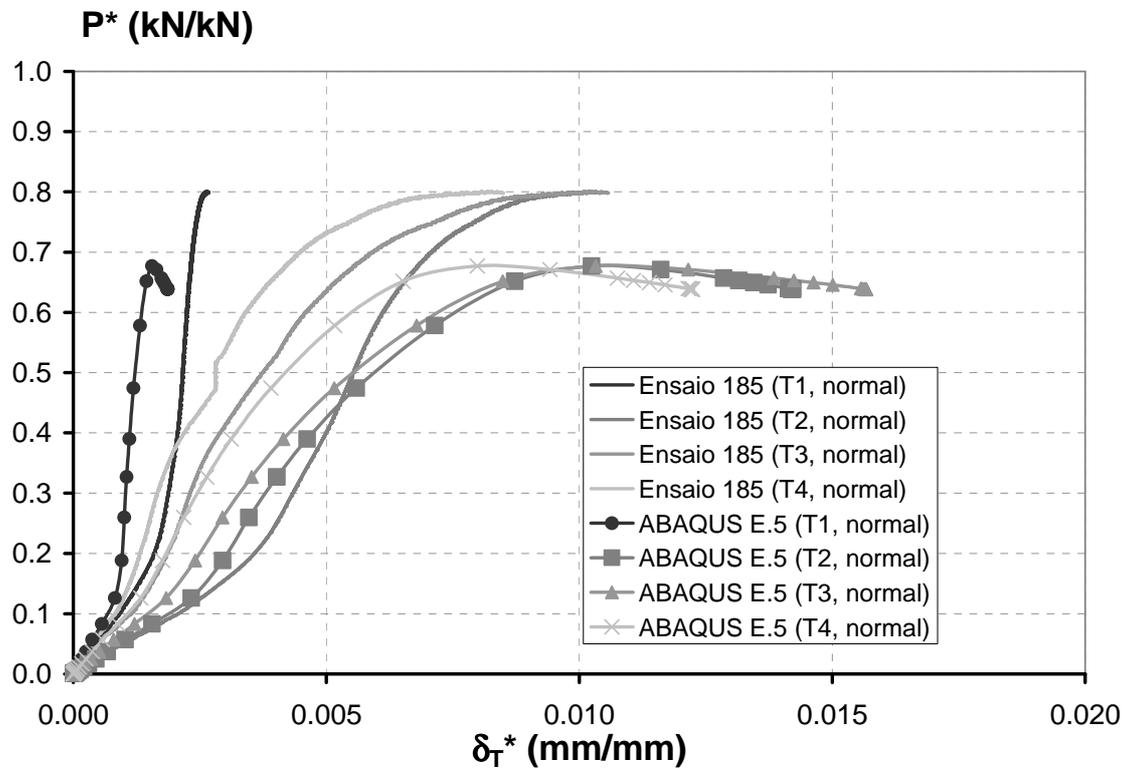


Figura 4.31 - Diagramas $P^* - \delta_T^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=2,25$ m, configuração normal).

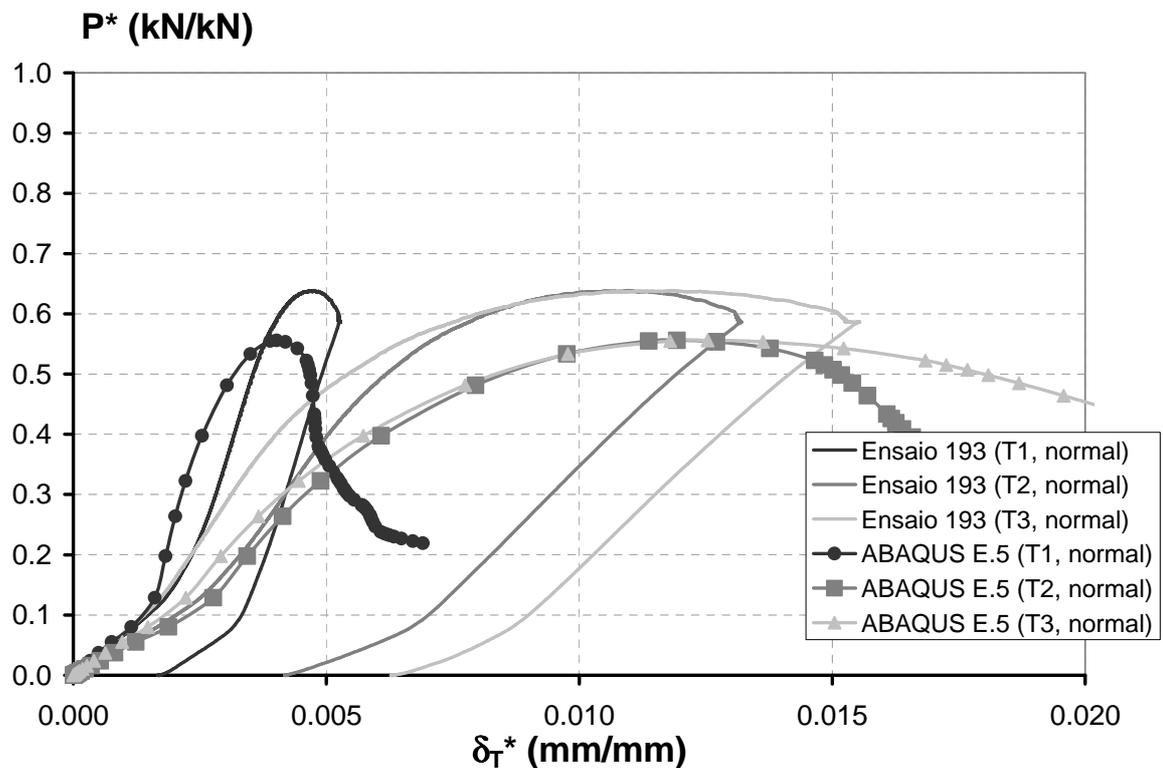


Figura 4.32 - Diagramas $P^* - \delta_T^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=2,50$ m, configuração normal).

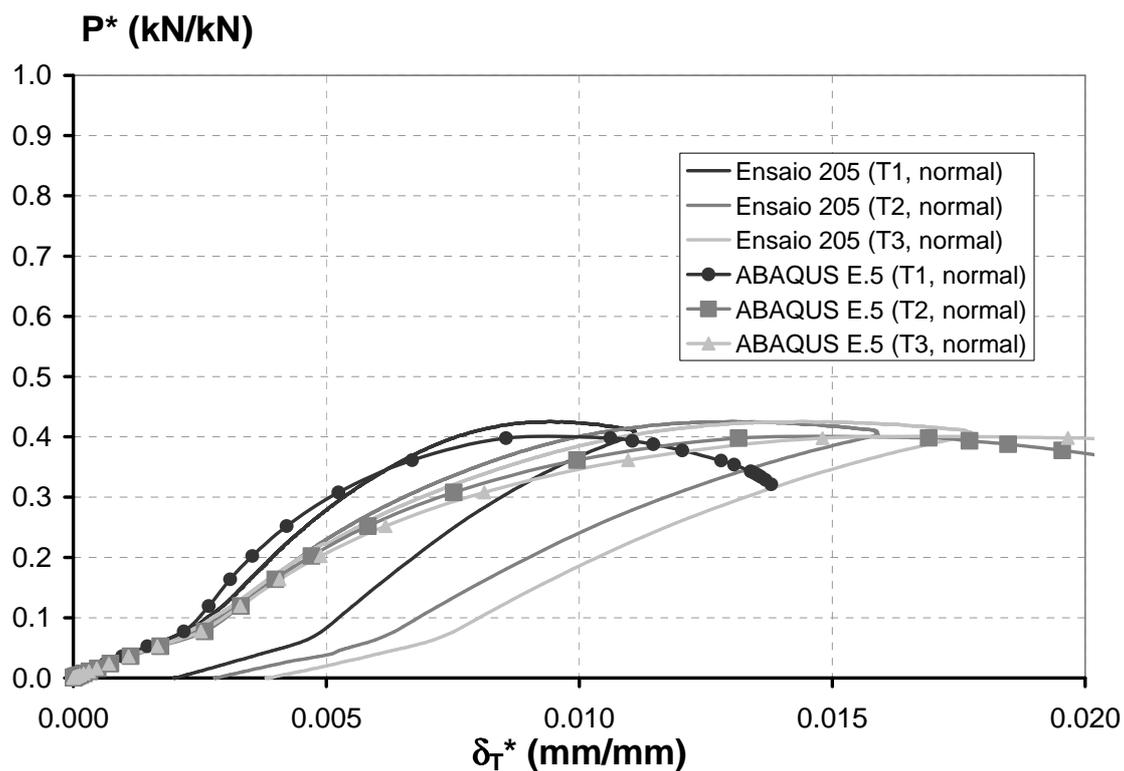


Figura 4.33 - Diagramas $P^* - \delta^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=3,00$ m, configuração normal).

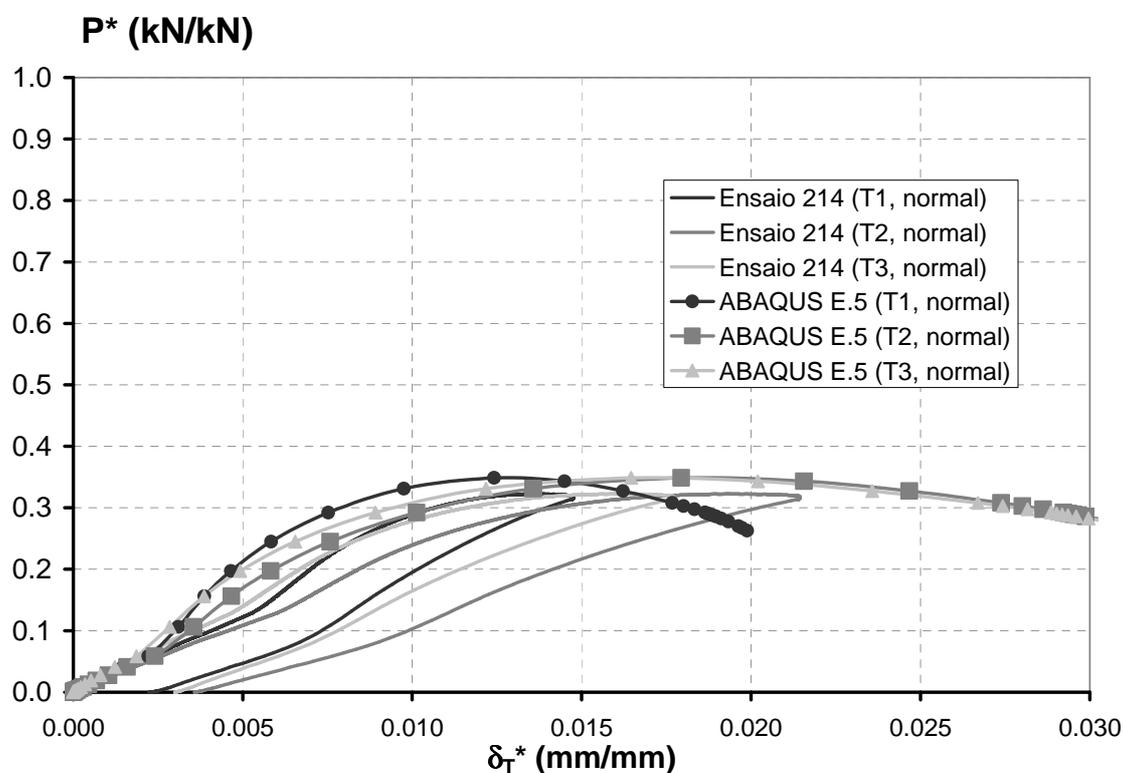


Figura 4.34 - Diagramas $P^* - \delta^*$ obtidos para o modelo ABAQUS E.5 e ensaios ($L=3,25$ m, configuração normal).

É possível observar que os resultados numéricos se aproximam dos resultados experimentais para os valores de comprimento mais elevados. A má aproximação dos resultados numéricos para $L=2,25$ m justifica-se porque nos modelos não foi tido em conta o pino, pelo que o modo de rotura experimental não foi captado. Para $L=2,50$ m a diferença pode residir na variação das características mecânicas do material do tubo interior dado que o modo de colapso para esta altura é condicionado pela resistência do tubo interior. Esta causa também é aplicável para $L=2,25$ m. À medida que a plasticidade deixa de dominar o comportamento e a resistência dos prumos os resultados numéricos e experimentais convergem.

4.4.2.3.5. Selecção do melhor modelo numérico

Foram apresentados os resultados obtidos de diferentes modelos dos prumos, simulados através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Através da análise dos resultados obtidos pelos vários modelos numéricos, comparando-os com os resultados obtidos do estudo experimental de prumos telescópicos extensíveis, é possível determinar qual é o modelo numérico que simula de modo mais completo o comportamento destes elementos. O modelo numérico seleccionado será utilizado em análises futuras, em particular no desenvolvimento de uma curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis.

Analisando os vários resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo ABAQUS E.5 é aquele que simula de modo mais satisfatório o comportamento dos prumos obtido experimentalmente. Regista-se uma diferença média de apenas 13,0% na força máxima registada (maioritariamente a favor da segurança), e 17,2%, 13,0%, 8,5%, e 6,9% no valor do deslocamento obtido para o transdutor T_1 , T_2 , T_3 e T_4 para a força máxima, na configuração normal, respectivamente. No entanto as diferenças descem para 8,9%, 7,0%, 2,0%, e 5,8% no valor da força máxima registada, e no valor do deslocamento obtido para os transdutores T_1 , T_2 e T_3 respectivamente, se não contabilizarmos os resultados obtidos para as alturas de 2,25 e 2,00 m, devido ao modelo numérico não incorporar o pino, e para a altura de 2,75 m, neste caso devido à excepcionalidade do comportamento do prumo observado experimentalmente e que não encontra tradução nos resultados numéricos.

Em relação à configuração invertida, registam-se diferenças médias de 12,1%, 15,6%, 6,3%, 21,7%, e 44,6% na força máxima registada, e no valor do deslocamento obtido para os transdutores T_1 , T_2 , T_3 e T_4 respectivamente. Em geral este modelo devolve sempre valores de deslocamento inferiores aos obtidos experimentalmente para prumos esbeltos e deslocamentos superiores para prumos pouco esbeltos. Novamente não contabilizando as alturas 2,75, 2,25 e 2,00 m, as diferenças descem para 9,9%, 12,3%, 5,7%, e 14,2% na força máxima registada, e no valor do deslocamento obtido para os transdutores T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente.

A Figura 4.35 ilustra a deformada obtida pelo modelo ABAQUS E.5 e a deformada experimental para $L=3,5$ m e $L=2,75$ m respectivamente. É possível observar uma concordância perfeita para a altura máxima. Para a altura intermédia condicionante os deslocamentos do tubo interior são maiores no ensaio, indicando que a perda de rigidez obtida nos ensaios se deve a deformações maiores no tubo interior.

A Figura 4.36 ilustra, para a altura de ensaio mínima e máxima (configuração normal), as zonas do prumo onde se inicia a cedência e as que se encontram em cedência na força máxima, a partir do modelo ABAQUS E.5. Tendo em conta que a rotura de um prumo (que se considera ocorrer no instante em que é atingida a força máxima) é sempre devida à soma dos efeitos da instabilidade elástica e da plasticidade do material, é possível observar que:

- Na altura mínima a resistência do prumo é condicionada pela plastificação da secção dos dois tubos (faz-se notar que os modelos desenvolvidos com o programa ABAQUS não tomam em consideração o comportamento do pino) – a primeira cedência ocorre para metade da força máxima, o que indica que para este comprimento é possível explorar a resistência pós-cedência do material (dúctil) dos tubos;
- Na altura máxima pode considerar-se que a resistência do prumo é condicionada pelos efeitos de segunda ordem em regime elástico, a força máxima é 20% superior à força para a qual se regista a primeira cedência. Na força máxima registam-se plastificações significativas apenas no tubo interior.

A Tabela 4.7 resume estas observações para os vários comprimentos e configurações do prumo. É possível observar que a rotura (obtida pelo modelo ABAQUS E.5) é condicionada pela plastificação da parede do tubo interior na zona dos furos junto à ligação dos dois tubos, excepto para o comprimento mínimo no qual a rotura é condicionada pela plastificação do material dos dois tubos.



Figura 4.35 – Sobreposição de deformadas obtidas pelo modelo ABAQUS E.5 e nos ensaios para $L=3,5$ m (à esquerda) e $L=2,75$ m (à direita).

Estas conclusões estão em geral de acordo com o observado experimentalmente (ver a Tabela 3.18 e a Tabela 4.7), excepto quando a rotura envolve a plastificação do pino.

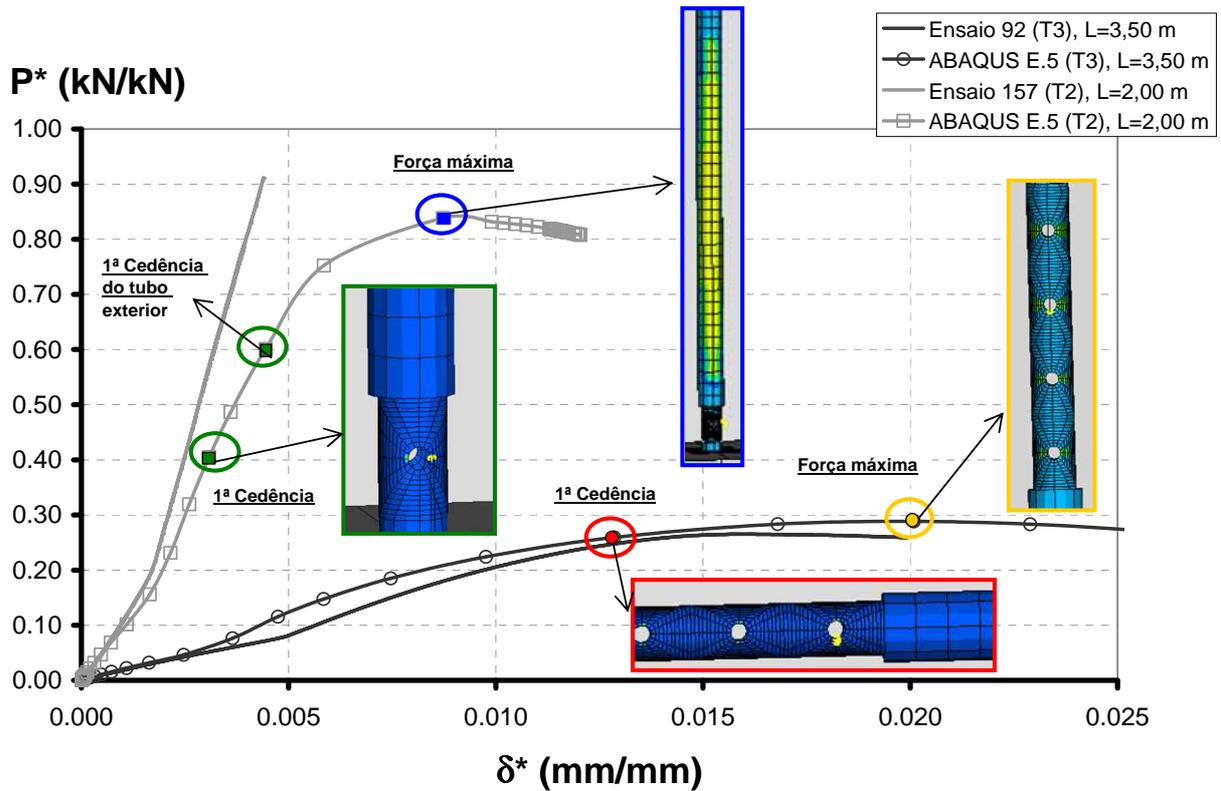


Figura 4.36 - Zonas do prumo onde se inicia a cedência e as que se encontram em cedência na força máxima para o modelo ABAQUS E.5 ($L=2,00$ m e $L=3,50$ m, configuração normal).

Tabela 4.7 – Resistências e mecanismos de rotura a partir do modelo ABAQUS E.5.

Comprimento (m)	Configuração Normal		Configuração Invertida	
	Resistência (kN)	Mecanismo de rotura	Resistência (kN)	Mecanismo de rotura
2,00	69,08	Cedência da parede do tubo interior e do tubo exterior	78,36	Cedência da parede do tubo interior e do tubo exterior
2,25	58,06	Cedência da parede do tubo interior	69,22	Cedência da parede do tubo interior
2,50	50,06		59,50	
2,75	43,99		50,26	
3,00	38,55		42,06	
3,25	33,65		35,93	
3,50	27,77	Instabilidade do prumo em regime elástico	30,00	Instabilidade do prumo em regime elástico

Analisando igualmente estas duas tabelas (Tabela 3.18 e Tabela 4.7) pode-se observar que o modelo numérico subestima a resistência dos prumos para comprimentos inferiores ou iguais a 2,50 m. Para a altura mínima, esta diferença deve-se a três factores: (i) simulação de modo aproximado da ligação entre os dois tubos – por este facto o modo de rotura registado experimentalmente não foi captado; (ii) à não contabilização no modelo numérico da possibilidade do tubo interior assentar na base durante o ensaio; e (iii) à variação das propriedades mecânicas do material dos tubos. Para as outras alturas ($L=2,25$ m e $L=2,50$ m) a diferença deve-se ao primeiro e ao último factor.

Por fim, para clarificar uma possível justificação das diferenças registadas, foi feito um levantamento dos principais parâmetros geométricos dos prumos. Os resultados deste levantamento estão resumidos nos Capítulos 3 e 6. Pode observar-se que não existe grande variabilidade dos valores das grandezas geométricas controladas; comparando os valores médios com os nominais, apenas se regista uma ligeira diferença em relação ao valor nominal para a espessura média da chapa do tubo interior (3,32 mm e 3,2 mm respectivamente). Com base neste levantamento pode concluir-se que as dimensões reais dos prumos não diferem significativamente das dimensões nominais, pelo que a diferença entre os seus valores não terá afectado significativamente o comportamento estimado numericamente.

Concluindo, pode afirmar-se que o modelo ABAQUS E.5 (ou ABAQUS E.3) permite obter uma boa aproximação do comportamento obtido através do estudo experimental dos prumos, e como tal é o modelo seleccionado para desenvolver a curva de encurvadura para o dimensionamento destes elementos.

4.4.2.3.6. Verificação do modelo EN 1065

Através do modelo proposto pela norma EN 1065:1998, registam-se diferenças médias de 19,3%, 38,2%, 47,4%, 45,3%, e 44,0% no valor da força máxima registada, e no valor do deslocamento obtido para os transdutores T_1 , T_2 , T_3 e T_4 para a força máxima, na configuração normal, respectivamente. A Figura 4.37 ilustra os diagramas de força reduzida *versus* o deslocamento transversal registado na secção correspondente a uma altura igual a 1,9 m (tubo exterior do prumo), obtidos pelo modelo EN 1065 e através dos ensaios.

Na configuração invertida regista-se uma diferença média de 14,3%, para a força máxima na configuração normal. Adicionalmente, o modelo não simula de modo satisfatório o campo de deslocamentos do prumo, tanto na configuração normal como na invertida.

É possível verificar que em geral, através do modelo proposto pela norma EN 1065:1998, conseguem-se obter valores semelhantes da resistência dos prumos registada experimentalmente. Contudo, para as alturas acima de 2,75 m (inclusive) registam-se maiores diferenças entre os resultados experimentais e os devolvidos por este modelo.

Estas diferenças podem ser justificadas pelo comportamento excepcional do prumo para as alturas 2,75 m e 3,00 m, e também pelas limitações do modelo estrutural previsto na norma EN 1065:1998.

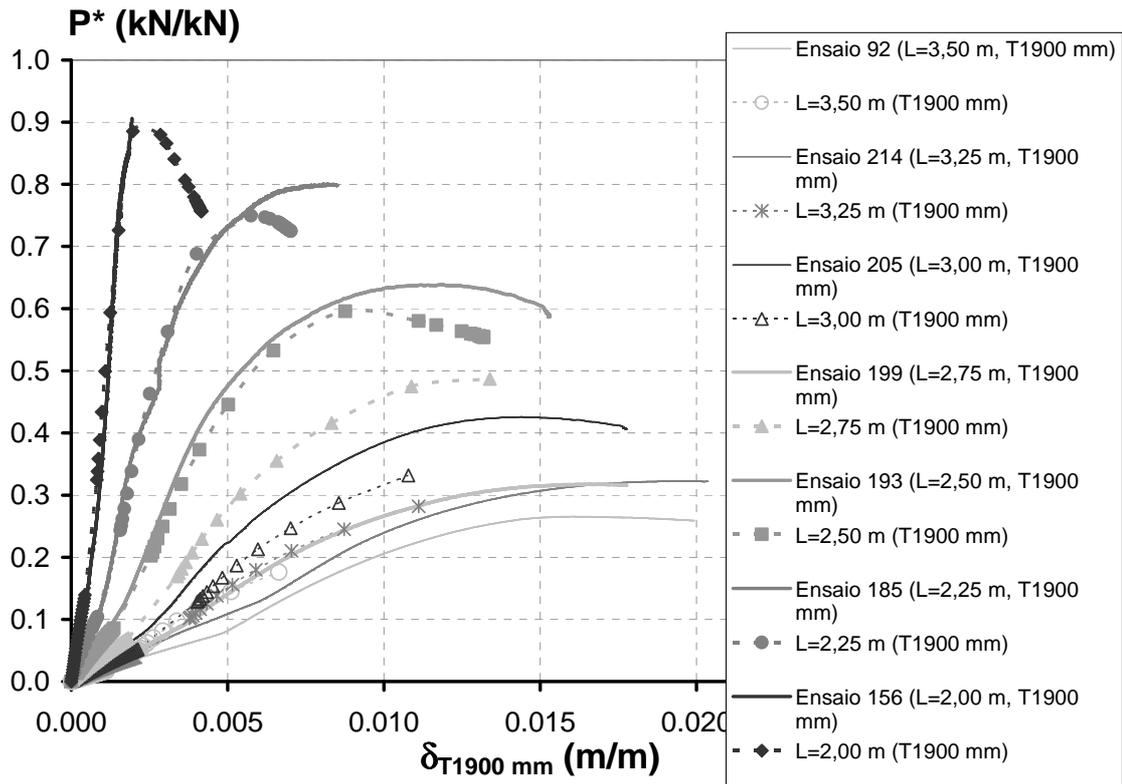


Figura 4.37 - Diagramas de força reduzida *versus* o deslocamento transversal registado na secção correspondente a uma altura igual a 1,9 m: Ensaios e modelo EN 1065 ($L=2,00$ m, configuração normal).

De facto o comportamento não-linear da mola que simula a evolução da rigidez no apoio inferior do prumo, ver a Figura 2.43, não permite numericamente explorar totalmente a resistência dos prumos, dado que o modelo não converge na mudança do segundo para o terceiro patamar de rigidez (de encastramento para mola elástica com rigidez igual a 3×10^7 N.mm/rad), por o valor da força registada ultrapassar o valor de um modo de instabilidade do prumo para as novas condições de rigidez do sistema.

A Figura 4.38 permite constatar que para nenhuma altura foi possível obter convergência numérica para esta transição de rigidez (excentricidade, e , menor do que 46,8 mm – $0,65 \times D_1$). Não obstante, foram obtidos os valores máximos da força para as alturas inferiores a 2,75 m.

Finalmente, comparou-se a configuração da deformada inicial do modelo estipulado na EN 1065:1998 com a configuração imposta nos modelos ABAQUS E.5 (ou ABAQUS E.3) que simulam os prumos nas condições de ensaio, ver a Figura 4.39. É possível observar que para $L=3,5$ m, a deformada especificada na norma EN 1065:1998 é caracterizada por uma amplitude máxima semelhante ao modelo ABAQUS E.5, mas com maiores deslocamentos iniciais nos tubos, em particular no tubo interior – o tubo condicionante. Para $L=2,0$ m, tendo a deformada imposta de acordo com o modelo da norma EN 1065:1998 uma componente de forma sinusoidal ($L/500 \sin(\pi x/L)$), a configuração deformada do prumo possui, para este comprimento, um máximo a meia altura do prumo (no tubo exterior), o que não se verifica na deformada inicial imposta no modelo ABAQUS E.5 (e nos ensaios).

Acresce que o comportamento dos prumos, para maiores comprimentos de extensão, é fortemente influenciado pelo nível de imperfeições iniciais.

Como tal, propõe-se a revisão das condições iniciais do modelo estrutural proposto na norma EN 1065:1998 para o estudo numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis, sugerindo-se (i) que se aumente de 0,65 para 0,9 o valor da excentricidade da força na base inferior do prumo, entre o segundo e o terceiro patamar de rigidez, ou se aumente o valor da rigidez do terceiro patamar; e (ii) que se diminua a amplitude máxima da deformada sinusoidal imposta inicialmente.

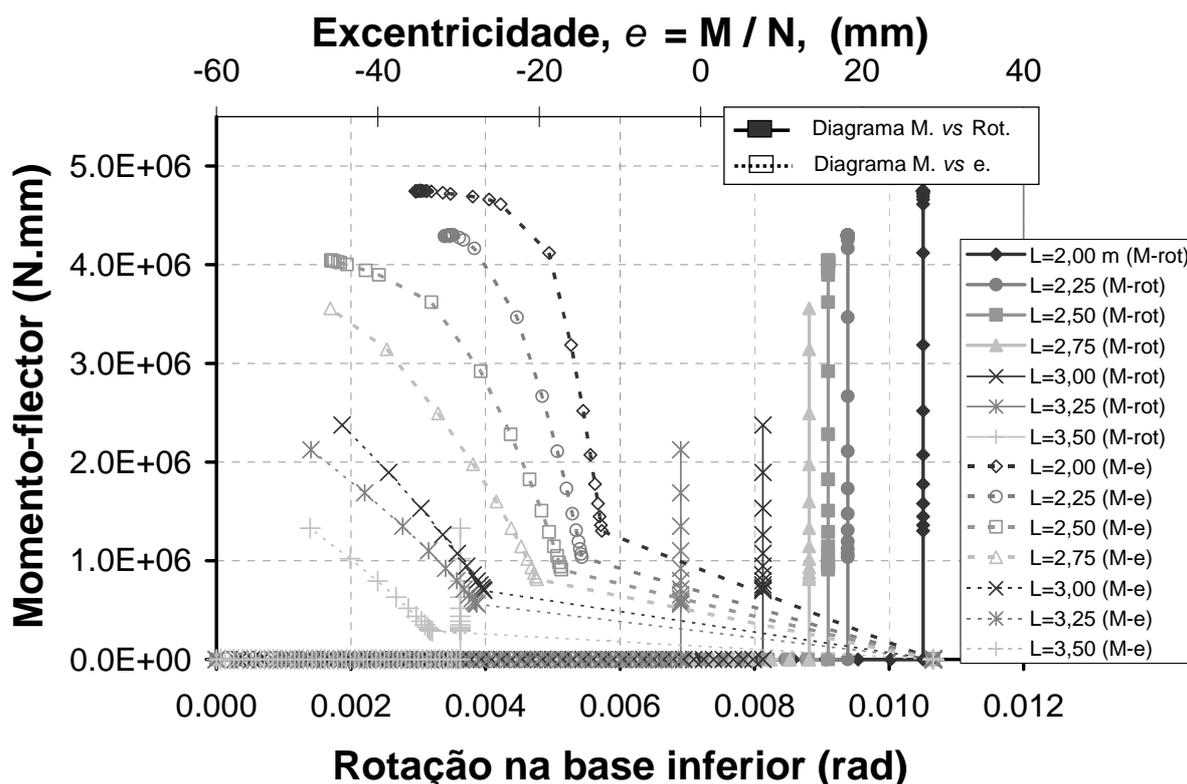


Figura 4.38 – Comportamento não-linear da mola da base inferior do prumo para as várias alturas.

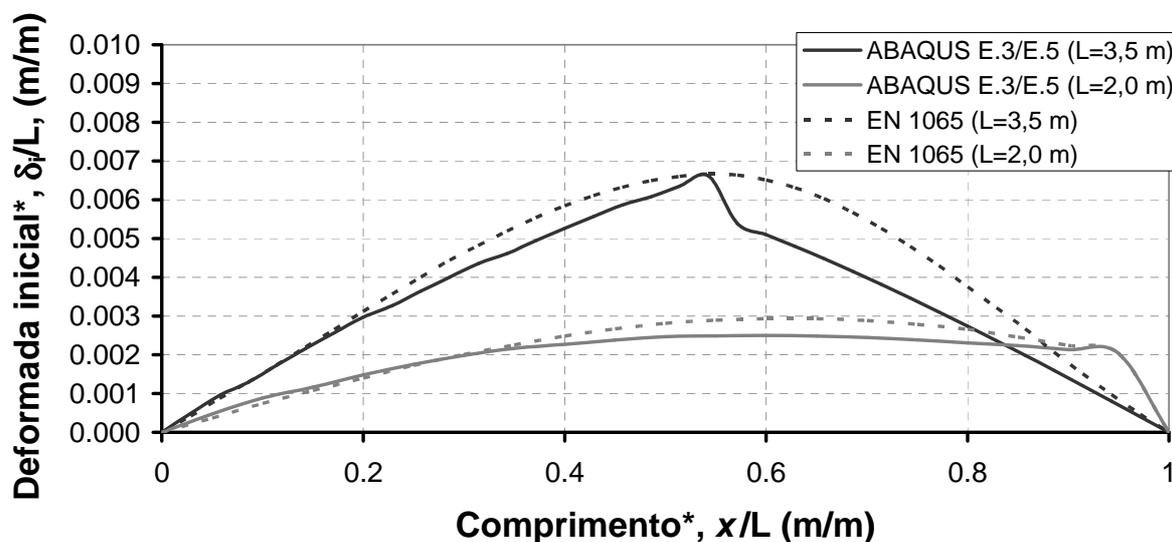


Figura 4.39 – Deformada inicial de vários modelos numéricos ($L=3,5$ m, configuração normal).

4.4.2.4. Análise da influência da amplitude das imperfeições iniciais no comportamento dos prumos telescópicos extensíveis

Por fim, é apresentada a análise da influência da amplitude de vários tipos de imperfeições iniciais, no comportamento dos prumos telescópicos extensíveis.

É utilizado o modelo ABAQUS E.3, prumos com 3,5 m de altura (configuração normal), e são considerados três tipos de imperfeições iniciais:

- Configuração deformada inicial: imposição de um ângulo na base inferior do prumo de 0° , $0,5^\circ$ e $1,5^\circ$. O ângulo de rotação imposto nos ensaios foi igual a $1,0^\circ$, a adicionar à configuração deformada devida à folga existente entre os dois tubos;
- Excentricidade inicial da força aplicada: 10 mm, 0 mm, e -20 mm. A excentricidade considerada nos ensaios foi igual a -10 mm. O sinal negativo está associado a uma flexão do prumo no mesmo sentido da deformada imposta pela rotação na base inferior do prumo;
- Defeito na chapa da base inferior dos prumos, através da permissão de ocorrer separação entre as chapas da base inferior do prumo e do acessório inferior.

A Figura 4.40 ilustra os resultados obtidos. É possível observar que (i) as imperfeições iniciais diminuem significativamente a resistência dos prumos, (ii) a influência da rotação na base inferior do prumo na resistência dos prumos é ligeiramente superior à influência do valor e sentido da excentricidade da força. É igualmente possível constatar que a imposição de uma excentricidade da força de sentido contrário à deformada imposta pela rotação na base inferior do prumo permite aumentar a resistência do prumo.

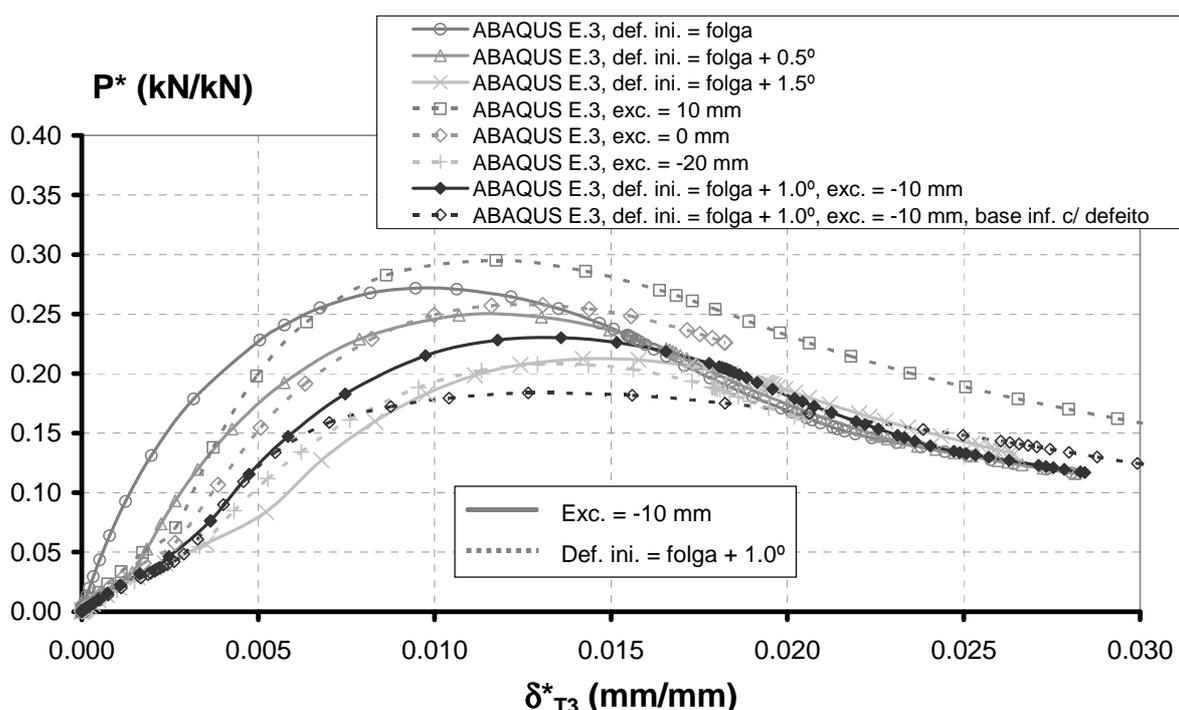


Figura 4.40 – Influência das imperfeições iniciais no comportamento dos prumos telescópicos extensíveis.

Por fim, a presença de defeitos na chapa da base inferior do prumo, de configuração tal que não seja possível o contacto total com a fundação após ser vencida a folga inicial, é o tipo de imperfeição mais gravoso, já que se obtém a menor resistência. Como tal, é extremamente importante que previamente à utilização dos prumos seja verificado o estado das chapas das bases dos prumos, e se forem detectados defeitos, estes devem ser corrigidos, ou na sua impossibilidade, os prumos não devem ser utilizados.

4.5. Conclusões

Neste capítulo, apresentaram-se e discutiram-se resultados numéricos relativos à estabilidade, ao comportamento inicial de pós-encurvadura e à resistência última de prumos de aço telescópicos extensíveis. Em particular apresentou-se um modelo estrutural simplificado (ver 4.4.1.1.) destes elementos que permitiu realizar (i) uma análise linear de estabilidade, (ii) e estudar o comportamento inicial de pós-encurvadura utilizando métodos analíticos aproximados (a partir do método de Rayleigh-Ritz). De seguida apresentaram-se resultados, obtidos a partir da modelação numérica destes elementos pelo Método dos Elementos Finitos, recorrendo a dois programas de cálculo distintos que diferem no tipo de elementos finitos utilizados: (i) modelação numérica por elementos finitos de barra (análise aproximada) e (ii) elementos finitos de casca (análise mais rigorosa). A comparação destes resultados com os obtidos experimentalmente, permitiu apresentar conclusões sobre os efeitos das não-linearidades física, geométrica e de contacto no comportamento e resistência última destes elementos.

Foram escolhidos os modelos numéricos mais rigorosos, ABAQUS E.3 e E.5, que permitiram estabelecer as bases para alcançar um dos objectivos finais deste projecto que pretende, por um lado, (i) contribuir para a obtenção de um conhecimento mais aprofundado sobre a estabilidade e a capacidade resistente de prumos telescópicos extensíveis submetidos a compressão axial, e, por outro lado, (ii) desenvolver uma curva de dimensionamento para este tipo de elementos estruturais, suprimindo assim uma lacuna das disposições normativas sobre o cálculo destes elementos estruturais.

Foi ainda analisado o modelo estrutural proposto pela norma EN 1065:1998 para o estudo numérico do comportamento dos prumos, tendo sido apontadas insuficiências do modelo, em particular para as maiores alturas dos prumos, e apresentadas sugestões de melhoria.

Finalmente, foi analisada a influência da amplitude das imperfeições iniciais no comportamento dos prumos telescópicos extensíveis, tendo-se concluído que os prumos são sensíveis aos vários tipos de imperfeições indicados na norma EN 1065:1998, mas também a possíveis defeitos das chapas das bases inferiores dos prumos.

CAPÍTULO 5

CURVA DE ENCURVADURA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS

5.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se a metodologia adoptada para desenvolver uma curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis, com base em resultados numéricos e experimentais.

Em primeiro lugar é feita uma breve revisão bibliográfica sobre a filosofia europeia de dimensionamento de colunas metálicas.

5.2. Filosofia europeia de dimensionamento de colunas metálicas

O dimensionamento de estruturas é frequentemente baseado em considerações sobre a sua resistência e a sua rigidez. A resistência pode ser definida como a capacidade de uma estrutura suportar o carregamento aplicado, ao passo que a rigidez pode ser definida como a resistência à deformação. Contudo uma estrutura pode apresentar um comportamento instável muito antes dos critérios de resistência e rigidez serem ultrapassados. Nestas estruturas a verificação à encurvadura é condicionante.

Os parâmetros que afectam a resistência de elementos metálicos são, basicamente, as propriedades mecânicas (tensão de cedência, ductilidade e tensões residuais) e o efeito das imperfeições geométricas e excentricidades das cargas.

5.2.1. Propriedades mecânicas

Do ponto de vista da resistência de colunas metálicas (reais, i.e. imperfeitas), as principais propriedades mecânicas são o valor da tensão de cedência e o valor do módulo de elasticidade. A primeira variável controla a resistência da secção e a segunda a rigidez do elemento.

No caso de colunas perfeitas, a existência de variações no valor da tensão de cedência do material, na secção transversal e ao longo do comprimento do elemento, podem levar ao aparecimento de esforços de flexão, devido à configuração assimétrica do campo de tensões após o início da cedência da secção do elemento.

O valor da tensão de cedência do aço pode ser obtido a partir de ensaios de compressão e de tracção. Os primeiros apresentam algumas desvantagens em relação aos ensaios de tracção já que, para evitar a sua instabilização, os provetes não podem ser muito esbeltos (a sua esbelteza deverá estar compreendida entre 10 a 15); e por outro lado, o seu reduzido comprimento dificulta a imposição de um estado de tensões uniforme

no elemento (efeito de Saint Venant), devido à concentração de tensões junto aos apoios. Os ensaios de tracção aproveitam o facto de os metais exibirem um comportamento semelhante quando solicitados quer à tracção quer à compressão. No planeamento destes ensaios deve ter-se cuidado na preparação das amostras devido ao processo de corte do provete poder introduzir deformações plásticas no material.

Chama-se ainda a atenção para o facto de o valor da tensão de cedência depender do procedimento de ensaio considerado, podendo haver diferenças até 60% entre o valor determinado a partir de um ensaio a uma velocidade baixa e a uma velocidade elevada. O parâmetro que mais influencia o valor da tensão de cedência é a espessura da peça. A tensão de cedência varia $\pm 10\%$, no interior e ao longo de cada componente da secção [5.1].

O valor do módulo de elasticidade do aço de construção não é muito sensível aos diferentes processos de fabrico, mantendo-se relativamente próximo do valor nominal de 210 GPa [5.2], pelo que a influência da sua variação na estabilidade das colunas reais não é preponderante.

A ductilidade é um factor importante porque, na ausência de instabilidade local, controla o comportamento de pós-encurvadura.

A presença de tensões residuais, provenientes do processo de fabrico influencia a resistência à encurvadura das colunas. As tensões residuais conduzem a que a secção apresente um comportamento inelástico para níveis médios de tensão inferiores à tensão de cedência. Daqui resulta que a secção equivalente elástica irá possuir uma rigidez menor (devido à cedência da secção).

Elementos soldados tendem a exibir maiores tensões residuais que os elementos laminados. A sua magnitude depende do tipo de secção: peças em secção fechada (tubulares) são menos susceptíveis que peças de secção aberta, por exemplo. Em peças laminadas a quente, a importância relativa da influência da magnitude das tensões residuais diminui com o aumento da tensão de cedência nominal, e aumenta com o aumento da espessura da peça. Para colunas com esbeltezas intermédias o efeito da variação da magnitude das tensões residuais é mais significativo que o efeito da variação do valor das imperfeições geométricas iniciais, supondo uma variação moderada dos dois efeitos [5.1]. De facto, é no caso de colunas de esbelteza intermédia que o efeito das tensões residuais é mais significativo. No caso de colunas pouco esbeltas, nas quais o comportamento do material em regime pós-cedência (efeito do endurecimento valor da tensão de rotura, e ductilidade) é condicionante, o efeito das tensões residuais é compensado, em geral, pelo endurecimento do material. Por sua vez, para colunas muito esbeltas, o efeito dominante é o fenómeno da instabilidade em regime elástico, condicionado pela rigidez (módulo de elasticidade, inércia da secção transversal) do elemento, i.e. a força máxima corresponde a um ponto limite da trajectória de equilíbrio em regime elástico.

O guia do *Structural Stability Research Council* (SSRC) [5.3] documenta vários métodos que podem ser utilizados para determinar a distribuição e a magnitude do campo de tensões residuais.

5.2.2. Imperfeições dos elementos

Definem-se como imperfeições geométricas todos os desvios em relação à configuração geométrica ideal da estrutura, elemento ou secção que advêm do processo de fabrico ou do processo de montagem. Este tipo de imperfeições pode inclusive dar origem a excentricidades no ponto de aplicação das forças ao elemento.

As secções transversais dos elementos soldados tendem a possuir maiores imperfeições geométricas iniciais quando comparadas com as de elementos laminados. No entanto, um estudo realizado pela *European Convention for Constructional Steelwork* (ECCS) nos anos 70, no âmbito do desenvolvimento das curvas de encurvadura europeias para colunas, concluiu que a influência das imperfeições geométricas da secção na resistência de colunas é menor do que a influência da variação das propriedades mecânicas do material da secção [5.1].

As imperfeições ao longo do elemento resultantes do processo de fabrico também tendem a ser superiores nos elementos soldados do que nos elementos laminados, dado que, em geral, para não produzir níveis elevados de tensões residuais é permitido que os elementos soldados se deformem livremente.

Os mesmos estudos da ECCS permitiram concluir que as imperfeições geométricas do elemento podem ser aproximadas pelo primeiro termo duma série de Fourier, e.g. para uma curvatura inicial com uma amplitude máxima igual a $L/650$ a quartos de vão (em que L representa o comprimento total da coluna), pode ser simulada utilizando uma curva sinusoidal com uma amplitude máxima a meio-vão igual a $L/1000$ [5.1]. Outros tipos de imperfeições como excentricidades das cargas, ou mesmo estados de tensão iniciais não nulos (tensões residuais por exemplo), podem ser modelados utilizando uma curvatura inicial equivalente semelhante. No entanto, não se recomenda que se incorporem na configuração inicial os valores máximos de cada tipo de imperfeição, já que traduziria uma combinação muito conservativa.

No caso dos prumos, as imperfeições expressam-se através da existência de excentricidades no ponto de aplicação das forças em relação ao eixo de um elemento ideal, e da existência de uma curvatura inicial com uma determinada configuração.

S. Toma et al [5.4, 5.5], analisaram o efeito da variação do valor da amplitude máxima, a , de uma curvatura sinusoidal inicial no comportamento de prumos, utilizando um modelo simplificado (*assumed deflection method*), tendo concluído que existe uma diminuição significativa da resistência dos elementos com o aumento do valor do parâmetro de imperfeição inicial (para $a=L/1000$ estes autores obtiveram uma redução de resistência de 20% em relação ao elemento ideal).

J.L. Peng et al [5.6] analisaram algumas das variáveis que influenciam o comportamento de prumos, como (i) a influência das condições de fronteira no comprimento de encurvadura dos prumos através de um factor K , (ii) e a influência das imperfeições iniciais: (ii.1) excentricidade da carga e (ii.2) curvatura inicial. Aumentando a relação e/L (e representa o valor da excentricidade da carga) de $1/1000$ para $1/100$ estes autores registaram uma diminuição de 70% do valor da carga máxima suportada pelo elemento.

5.2.3. Curvas de encurvadura

O prumo pode ser visto, de modo simplificado, como uma coluna. O dimensionamento de colunas é habitualmente efectuado a partir da utilização de curvas de encurvadura, as quais fornecem o valor da tensão média associada ao colapso da coluna em função da respectiva esbelteza. O estabelecimento dessas curvas, envolve sempre a definição de um modelo estrutural de comportamento e a calibração dos parâmetros do modelo, através da comparação com resultados experimentais e/ou numéricos.

As várias curvas definidas na regulamentação europeia, consideram os efeitos da variabilidade da tensão de cedência, a presença de tensões residuais e de imperfeições geométricas.

Estes efeitos foram determinados através de análises estatísticas de cada uma das variáveis. Provou-se que o efeito gerado pela variação da tensão de cedência na secção não é significativo, mas torna-se mais expressivo no intervalo de esbeltezas onde os efeitos das tensões residuais são maiores. Juntando todos os resultados experimentais e numéricos utilizados para desenvolver a curva de encurvadura europeia, observou-se uma grande dispersão de resultados, pelo que se optou por desenvolver várias curvas. Cada uma delas é aplicável a certo tipo de condições iniciais do elemento, dependendo do tipo de secção e do processo de fabrico, i.e. distribuição de tensões residuais, por exemplo.

As curvas são definidas em função de grandezas reduzidas adimensionais, que permitem descrever no mesmo gráfico a influência de diversas variáveis na resistência de colunas sujeitas a compressão simples para vários tipos de aços e secções. Nas abcissas encontra-se o parâmetro de esbelteza normalizada $\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_1$, em que λ representa a esbelteza do elemento e λ_1 uma esbelteza adimensional dada por $\lambda_1 = \pi\sqrt{E/f_y}$. As ordenadas estão em função do coeficiente de redução $\chi = P/P_y$, que relaciona a resistência com o valor da carga de plastificação da secção da coluna. O efeito benéfico do endurecimento dos aços presente nos resultados que suportaram o desenvolvimento das curvas de encurvadura traduz-se num factor de redução superior à unidade. No entanto, em geral, não se considera este efeito no dimensionamento de colunas pelo que se limitou o factor de redução à unidade para esbeltezas normalizadas inferiores ou iguais 0,2.

Descrevem-se de seguida as regras de dimensionamento contidas no Eurocódigo 3 – Parte 1: Regras Gerais para Edifícios [5.2].

O dimensionamento de colunas baseia-se nas já referidas curvas de encurvadura. Para a instabilidade por flexão, existem cinco curvas, a_0, a, b, c e d . A equação de cada curva é dada pela fórmula de Maquoi-Rondal [5.7]:

$$\begin{aligned}\chi &\equiv \bar{N} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \\ \phi &= 0,5 \cdot (\bar{\lambda}^2 + \Theta + 1) \\ \Theta &= \alpha(\bar{\lambda} - 0,2)\end{aligned}\tag{5.1}$$

Em que α representa um factor de imperfeição generalizado definido para cada tipo de curva [5.2].

O esforço axial resistente da coluna é dado em função do tipo de classe da secção. A classificação da secção tenta contabilizar os fenómenos de instabilidade local, os quais reduzem a área da secção resistente [5.2]:

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} \quad - \text{Classe 1, 2 e 3}$$

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad - \text{Classe 4}$$
(5.2)

O parâmetro γ_{M1} representa o factor parcial de segurança para fenómenos de instabilidade de elementos metálicos.

A verificação de colunas-viga à encurvadura é efectuada recorrendo a equações de interacção [5.8].

5.3. Análises de sensibilidade

A partir dos resultados experimentais foi possível validar e verificar um modelo numérico. Com base no modelo numérico escolhido, ABAQUS E.3/E.5 (ver o Capítulo 4), foram realizadas análises de sensibilidade da resistência do prumo (apenas para $L=3,5$ m e para a configuração normal) variando:

- A espessura dos tubos, interior e/ou exterior, mantendo o diâmetro interior ou exterior constante;
- O comprimento dos tubos;
- As dimensões dos furos da parede do tubo exterior;
- O afastamento centro a centro entre furos consecutivos;
- As dimensões das chapas das bases dos tubos (lado e espessura);
- O tipo de aço dos tubos, interior e/ou exterior.

No Anexo D são apresentados vários gráficos que relacionam a variação relativa de resistência em função da variação relativa do volume de material metálico utilizado nos prumos. Utilizou-se como valor de referência da resistência o valor médio obtido nos ensaios de prumos para $L=3,5$ m, na configuração normal. As características geométricas de referência são as dos prumos ensaiados. Com base neste estudo, foi possível concluir que¹⁰:

- Para aumentar a resistência dos prumos é mais eficiente aumentar a espessura do tubo interior, mantendo o diâmetro interior constante. No entanto, registam-se ganhos de optimização se for igualmente aumentada a espessura do tubo exterior, mantendo o diâmetro interior constante. Um aumento de 25% na espessura de ambos os tubos permite obter um aumento da resistência de cerca de 31%, por exemplo.

¹⁰ Salienta-se que estas observações apenas são válidas se a ligação entre os tubos não passar a ser a componente condicionante da resistência do prumo.

- A função da variação de resistência do prumo com a variação do comprimento dos tubos (expressa em termos de variação do volume total do prumo - mantendo o comprimento total do prumo constante e igual a $L=3,5$ m) parece possuir um valor mínimo entre os limites de comprimento considerados na análise, i.e. obteve-se um aumento da resistência, com base no prumo de referência, incrementando ou diminuindo o comprimento do tubo exterior (ou do tubo interior).
- Este estudo parece apontar no sentido de a dimensão e o afastamento dos furos do tubo interior, serem as variáveis mais condicionantes das analisadas por forma a aumentar a resistência dos prumos, i.e. com as quais se consegue um maior aumento de resistência à custa da menor variação de volume. Sendo que de entre as duas é preferível diminuir o diâmetro dos furos - uma diminuição do diâmetro dos furos de 18 mm para 13 mm implica um acréscimo de resistência de 13% na resistência, por exemplo. Salienta-se que estas observações apenas são válidas se a resistência ao corte do pino e a resistência ao esmagamento da parede do tubo interior não condicionarem a resistência do prumo.
- Em relação às dimensões das bases, para aumentar a resistência dos prumos deve-se optar por aumentar a sua espessura em vez da largura. Este aspecto é particularmente relevante dado que em obra se observam frequentemente defeitos importantes nas chapas das bases dos prumos. Como demonstrado no Capítulo 4, estes defeitos têm como consequência uma diminuição significativa da resistência dos prumos. Deste modo, o aumento da rigidez das chapas das bases, por via do incremento da sua espessura, tem um efeito duplamente benéfico: (i) por um lado eleva a resistência dos prumos e (ii) por outro reduz a susceptibilidade das chapas das bases sofrerem deformações durante a utilização dos prumos;
- Em relação ao tipo de aço do material dos tubos interior e exterior, observa-se que para aumentar a resistência dos prumos se deve optar por um aço de maior resistência no tubo interior.

5.4. Proposta de curva de encurvadura

Com base nos resultados experimentais e numéricos, obtidos a partir dos modelos ABAQUS E.3 e ABAQUS E.5, foi possível colectar um conjunto de dados para a elaboração de uma curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis. Recorrendo ao modelo estrutural simplificado apresentado no Capítulo 4 e ao conceito de comprimento de encurvadura equivalente, foram determinadas as características geométricas de um prumo equivalente, i.e. área da secção transversal, inércia, raio de giração:

$$A_{eq} = \frac{L}{\frac{L_{int}}{A_{n,int}} + \frac{L_{ext}}{A_{gr,ext}}} \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{I_{eq}} = \frac{L_{int}}{I_{i,int}} + \frac{L_{ext}}{I_{gr,ext}} \quad (5.4)$$

$$i_{eq} = \sqrt{\frac{I_{eq}}{A_{eq}}} \quad (5.5)$$

Sendo que o comprimento de encurvadura equivalente é dado por:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_{eq}}{P_{cr}}} \quad (5.6)$$

Em que a carga crítica equivalente pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$P_{cr} = \frac{(\lambda_1 + 0,4)(\lambda_2 + 0,4)}{(\lambda_1 + 0,2)(\lambda_2 + 0,2)} \frac{\pi^2 EI_{eq}}{L^2} \quad (5.7)$$

Com:

$$\lambda_1 = \frac{EI_{eq}}{C_1 L}, \quad \lambda_2 = \frac{EI_{eq}}{C_2 L},$$

C_i ($i=1, 2$) representam as rigidezes das molas que simulam as bases do prumo, ver 4.4.1.1.

Esta expressão aproximada para o cálculo da carga crítica do prumo foi obtida através da utilização de expressões apresentadas nas referências [5.9 e 5.10], e foi validada tanto por resultados obtidos por via analítica como por via numérica.

A partir destes dados é possível calcular a esbelteza equivalente:

$$\lambda_{eq} = \frac{L_{eq}}{i_{eq}} \quad (5.8)$$

E a esbelteza normalizada por:

$$\bar{\lambda}_{eq} = \frac{\lambda_{eq}}{\lambda_1} \quad (5.9)$$

Com $\lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_{y,\min}}$.

A resistência do prumo é dada por:

$$P = \chi \times P_{ced,\min} \quad (5.10)$$

Na qual $P_{ced,\min}$ corresponde ao menor esforço axial resistente dos dois tubos.

O coeficiente de redução é dado por:

$$\chi = \frac{\beta_1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{eq}^2}}, \text{ mas } \chi \leq 1,0 \quad (5.11)$$

Com:

$$\phi = \beta_2 \times (\bar{\lambda}_{eq}^2 + \Theta + 1) \quad (5.12)$$

$$\Theta = \alpha_1 \times (\bar{\lambda}_{eq}^2 - \alpha_2) \quad (5.13)$$

Os coeficientes $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$ representam factores de imperfeição.

A proposta de curva de encurvadura foi construída com base nos resultados dos 34 ensaios de prumos realizados no LNEC e nas 79 simulações numéricas. Os resultados numéricos foram obtidos através (i) dos modelos ABAQUS E.5 desenvolvidos para simular numericamente o comportamento dos prumos obtido experimentalmente, (ii) dos modelos utilizados na análise de sensibilidade realizada, e (iii) ainda dos modelos utilizados para definir uma proposta para o pré-dimensionamento dos prumos para cada uma das classes indicadas na norma EN 1065:1998. Estes últimos modelos partem das dimensões dos tubos dos prumos ensaiados, com $L_{max}=3,5$ m, com a excepção das dimensões mínimas especificadas na norma EN 1065:1998 [5.11] para (i) a espessura dos tubos (mantendo o diâmetro exterior constante) e (ii) para a espessura e largura das bases, para cada uma das classes de acordo com a Tabela 5.1. Considerou-se que o material dos dois tubos, interior e exterior, pertencia à qualidade S235.

A partir dos 34 resultados experimentais e dos 79 resultados numéricos foi possível construir uma curva auxiliar, determinada impondo um valor nulo para a média da distribuição estatística das diferenças entre a amostra de resultados e o valor correspondente obtido por esta curva auxiliar. Esta curva auxiliar é por isso designada doravante por curva média.

A partir da curva média é possível determinar a curva correspondente a um qualquer quantilho. Pretende-se que a curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis proposta na presente Dissertação corresponda ao quantilho de 5%¹¹, i.e. exista 95% de probabilidade de o valor da resistência de um prumo, determinado a partir da curva proposta, ser inferior ou igual ao valor da resistência desse prumo obtido por via experimental ou numérica. A curva média e a curva de encurvadura correspondente ao percentil 5%, bem como os resultados experimentais e numéricos utilizados na sua construção, são ilustrados na Figura 5.1.

Adoptando os valores 0,75, 0,5, 0,5 e 0,85, respectivamente para os coeficientes $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$, obtém-se a curva de encurvadura proposta na presente Dissertação para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis, que se ajusta à curva de encurvadura correspondente ao percentil 5%. Estas duas curvas são ilustradas na Figura 5.2.

Os dois valores experimentais que estão abaixo da curva proposta correspondem ao comprimento condicionante dos prumos ensaiados. Salienta-se que o valor de resistência obtido no ensaio, para este comprimento, foi condicionado pela existência de deformações da chapa da base inferior do prumo, variável a que não é feita referência na norma EN 1065:1998.

¹¹ Admitiu-se simplificarmente, que o valor do desvio padrão da distribuição estatística das diferenças entre a amostra de resultados e o valor correspondente obtido pela curva média, representa o valor do desvio padrão das diferenças determinado para cada valor de esbelteza normalizada.

Tabela 5.1 – Dimensões mínimas dos prumos segundo a norma EN 1065:1998

Classe	Espessura mínima dos tubos (mm)	Largura mínima das chapas das bases (mm)	Espessura mínima das chapas das bases (mm)
A	2,3	110	6
B, D	2,6	120	6
C, E	2,6	120	8

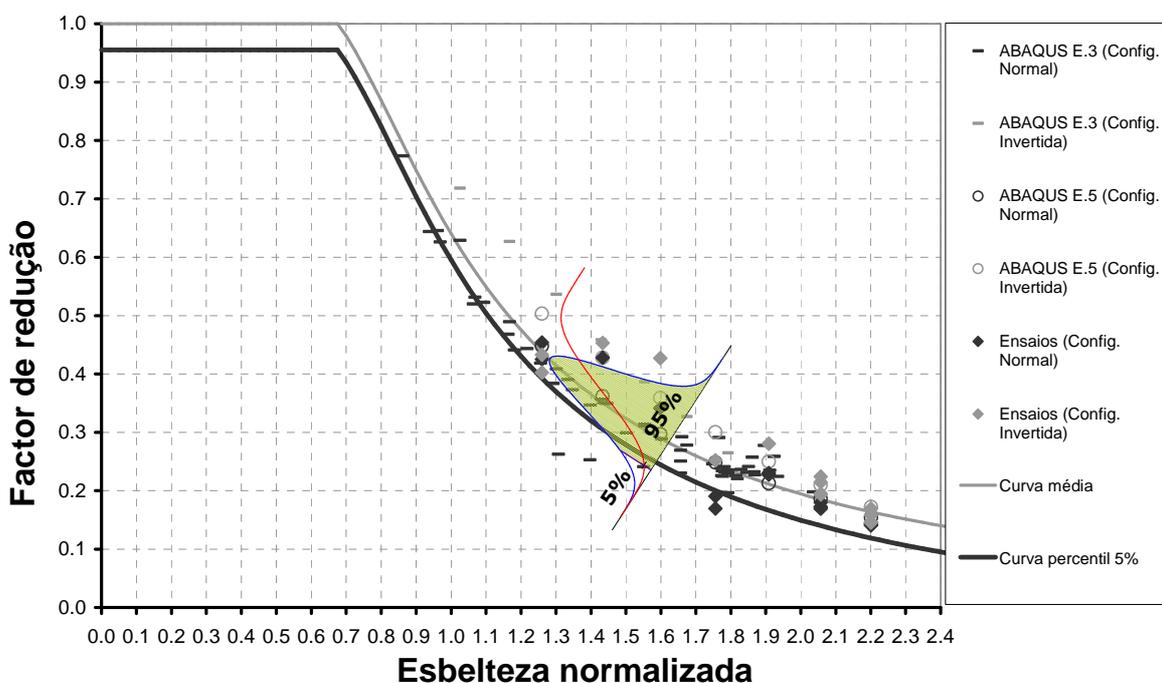


Figura 5.1 – Construção da proposta de curva de encurvadura.

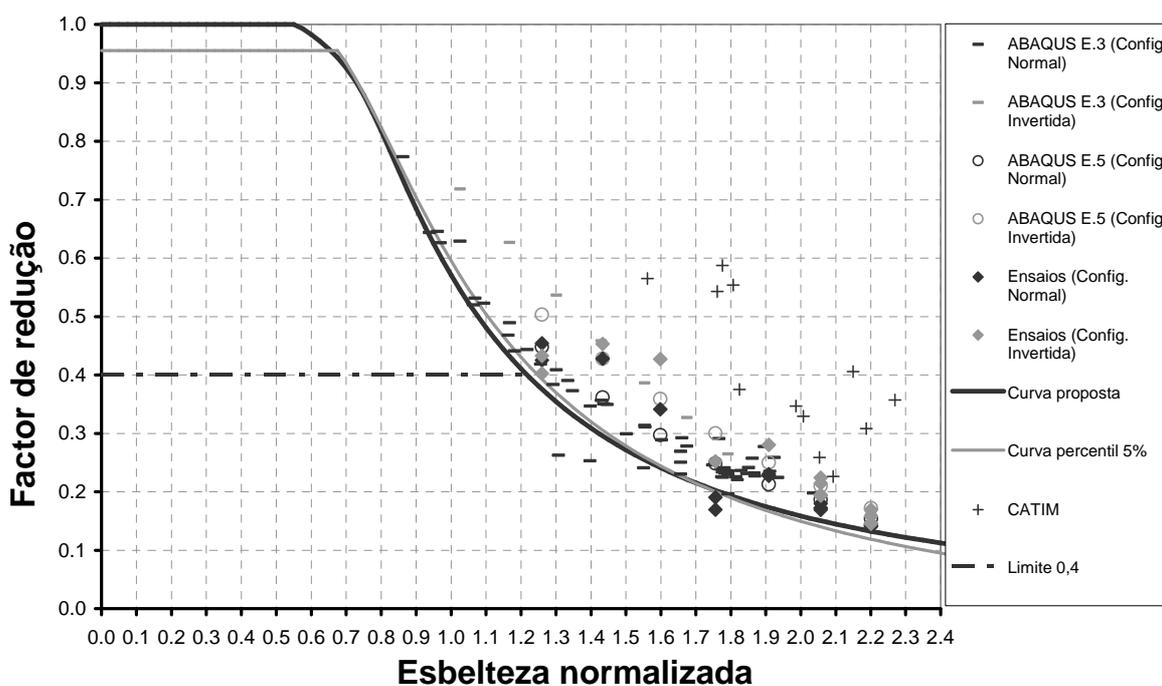


Figura 5.2 – Curva de encurvadura proposta.

A partir do Anexo D do Eurocódigo 0 (EN 1990) [5.12] determinou-se valor para o coeficiente de segurança a aplicar ao valor resistente dado pela curva de encurvadura proposta. Com base na distribuição estatística (que se admite normal) dos desvios entre os valores experimentais (e numéricos) e os valores dados pela curva, tem-se:

$$\gamma = \frac{1}{b_d} = \frac{1}{b_m e^{(-k_{\infty,d} Q - 0,5Q)}} \quad (5.14)$$

$$Q = \sqrt{\ln(V_\delta + 1)}$$

Em que b_m representa o declive da recta da regressão linear do gráfico formado pelos pares de valores (X_{ensaio} , X_{curva}) e V_δ representa a variância da distribuição normal dos desvios entre a resistência experimental (e numérica) e a resistência determinada a partir da curva de encurvadura proposta. Neste caso $b_m = 1,219$, $V_\delta = 0,104$ e $Q = 0,104$.

O Eurocódigo 1990 define um valor de $k_{\infty,d} = 3,04$ (definido a partir da multiplicação do valor do coeficientes de sensibilidade para a resistência do FORM – *First Order Reliability Method*, igual a 0,8, e o índice de fiabilidade, β , igual a 3,8 para um período de vida útil de 50 anos¹²) pelo que se obtém um coeficiente de segurança igual a 1,15, valor superior ao definido na norma EN 12812:2004 [13], que corresponde a 1,10.

No entanto, com base na curva proposta é possível aumentar o valor de cálculo da resistência dos prumos ensaiados em comparação com o valor de cálculo da resistência obtido a partir das normas EN 1065:1998 e EN 12812:2004, para as classes de prumos A e B (ver a Tabela 5.2).

Refira-se no entanto, que tanto o valor do coeficiente de segurança especificado na norma EN 12812:2004, como o proposto na presente Dissertação, a aplicar ao valor característico da resistência dos prumos, apenas se aplicam a prumos novos em condições de serem utilizados, i.e. sem defeitos. Como foi evidenciado nos Capítulos 3 e 4, a existência de defeitos na forma das bases das chapas dos prumos provoca diminuições acentuadas dos valores de resistência dos prumos – ver os resultados obtidos para $L=2,75$ m. Nestes casos, sugere-se que para estimar o valor da resistência de um prumo já utilizado, e que exiba defeitos – pouco expressivos, de modo a que não obrigue a sua rejeição imediata – seja aplicado um coeficiente de segurança superior ou igual a 1,5 (em função do estado de conservação do prumo). O valor 1,5 foi determinado multiplicando por 1,3 o coeficiente de segurança proposto para prumos novos (1,15). Por sua vez, o valor 1,3 foi determinado ajustando a curva proposta à resistência obtida nos ensaios para $L=2,75$ m.

¹² O Eurocódigo 0 (EN 1990) explicita que as estruturas ou componentes estruturais que podem ser desmontados, tendo em vista a sua reutilização, não deverão ser considerados como temporários. Como tal, os prumos telescópicos extensíveis estão incluídos na categoria 4 do tempo de vida útil de projecto, i.e 50 anos.

Tabela 5.2 – Valor de cálculo da resistência dos prumos obtido pela curva de encurvadura proposta, em comparação com o valor de cálculo da resistência determinado pelas normas EN 1065 e EN 12812.

Curva proposta			Classe A			Classe B		
L (m)	R _{,Curva} (kN)	R _{d, Curva} (kN)	R _{A,k, EN 1065} (kN)	R _{A,d, EN 12812} (kN)	Ganho relativo	R _{B,k, EN 1065} (kN)	R _{B,d, EN 12812} (kN)	Ganho relativo
2,00	68,73	59,77	44,00	40,00	49,42%	51,00	46,36	28,91%
2,25	54,11	47,05	35,26	32,05	46,78%	47,01	42,74	10,09%
2,50	44,18	38,42	28,56	25,96	47,98%	38,08	34,62	10,98%
2,75	37,05	32,21	23,60	21,46	50,13%	31,47	28,61	12,60%
3,00	31,69	27,56	19,83	18,03	52,83%	26,44	24,04	14,62%
3,25	27,53	23,94	16,90	15,36	55,84%	22,53	20,48	16,88%
3,50	24,23	21,07	14,57	13,25	59,03%	19,43	17,66	19,27%

Os resultados obtidos nos ensaios de prumos realizados no CATIM são apresentados na Figura 5.2, verificando-se que estes estão muito acima da curva de encurvadura proposta. A título de exemplo, a força máxima obtida no ensaio do prumo PBB-3000-20-20 na sua extensão máxima, i.e. $L=3,0$ m, foi de 16,1 kN. Com base na curva de encurvadura proposta obtém-se uma resistência de apenas 7 kN. No entanto salienta-se que foram utilizadas as características nominais do material para determinar as coordenadas dos pontos da curva, o que contribui para explicar o desvio tão acentuado observado. Não obstante, a magnitude do desvio leva-nos a questionar se as condições iniciais dos ensaios realizados no CATIM respeitaram na íntegra o especificado na norma EN 1065:1998.

Como ilustrado na Figura 5.2, pensou-se em limitar o valor do coeficiente de redução a 0,40, para se ter em conta a limitação da resistência dos prumos pouco esbeltos em consequência da rotura da ligação entre os dois tubos – por plastificação do pino, por exemplo.

O valor proposto para este limite foi baseado a partir dos resultados experimentais. As dimensões do pino dos prumos ensaiados correspondem às dimensões mínimas exigidas pela norma EN 1065:1998. Como tal, no que se refere à influência das dimensões do pino na sua resistência, o limite a ser adoptado estaria sempre do lado da segurança. Todavia, a norma é omissa em relação aos tipos de aço do material do pino e do tubo interior, e em relação a algumas dimensões do tubo interior (diâmetro do tubo interior e tipos de aço, por exemplo). Como tal, a fixação de um limite constituiria o aspecto com maior componente de incerteza da curva proposta (i.e. possibilidade de se obterem resultados não conservativos), já que a rotura da ligação também pode ser condicionada pela resistência ao esmagamento da parede do tubo interior. Por outro lado, o modo de rotura da ligação detectado envolveu principalmente o pino, não tendo sido detectado a rotura da ligação por esmagamento da

parede do tubo interior. Por fim, ao impor-se um limite podia-se correr o risco de estar a subestimar de modo significativo a resistência destes elementos.

Em conclusão, para minimizar a possibilidade de se obterem resultados não conservativos, ou muito conservativos, não se considerou o limite referido e propõe-se que o valor característico da resistência do prumo seja obtido através do menor dos valores fornecidos pela curva de encurvadura proposta e pelas equações (2.2) e (2.3), que contabilizam a resistência da ligação.

Ilustram-se na Figura 5.3 as curvas correspondentes às classes A a E indicadas na norma EN 1065:1998, determinadas a partir dos prumos ensaiados. Como se pode observar existe uma boa correlação entre a curva de encurvadura proposta no presente trabalho e a curva da Classe B, apesar do prumo utilizado nestes estudos ser classificável apenas na Classe A, pelo facto de não satisfazer os requisitos geométricos especificados na norma EN 1065:1998 para a Classe B, conforme indicado no Capítulo 6 e Anexo F.

Ilustram-se na Figura 5.4 as curvas correspondentes às classes A a E indicadas na norma EN 1065:1998, determinadas a partir de prumos com (i) as dimensões mínimas especificadas na norma EN 1065:1998 para (a) a espessura dos tubos (mantendo o diâmetro exterior constante) e (b) para a espessura e largura das bases, para cada uma das classes de acordo com a Tabela 5.1; (ii) as restantes dimensões iguais às dos prumos ensaiados, e (iii) $L_{max}=3,5$ m. Considerou-se que o material dos dois tubos, interior e exterior, pertencia à qualidade S235. Ilustram-se igualmente os resultados numéricos obtidos para esses prumos.

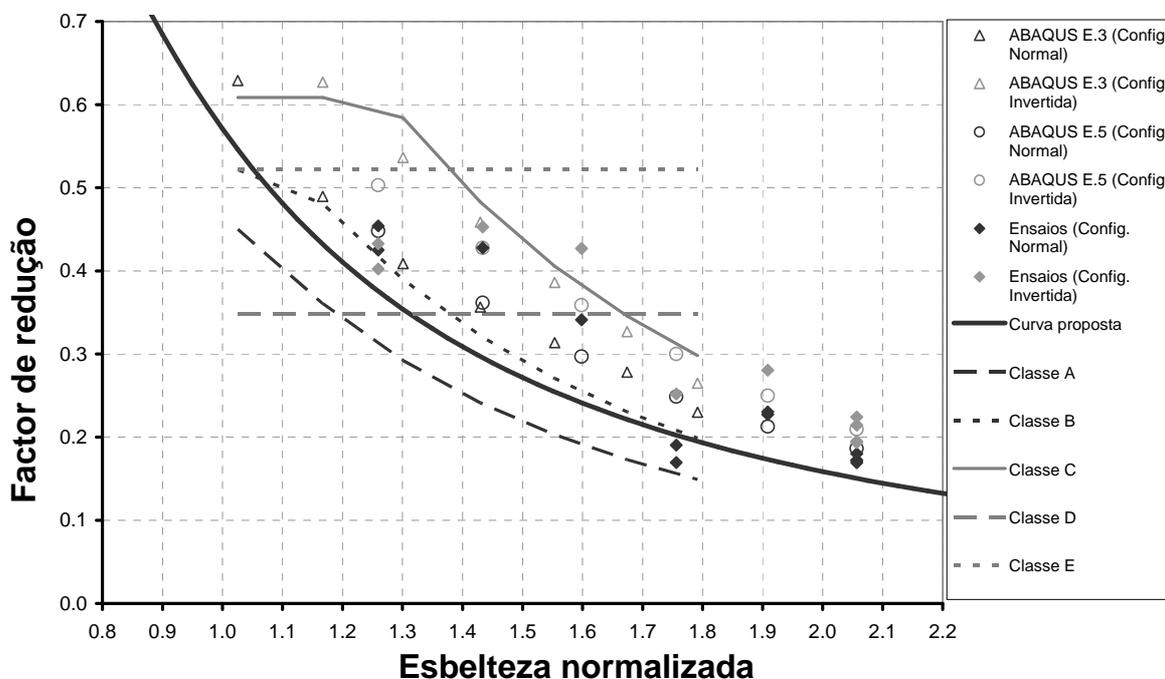


Figura 5.3 – Pormenor da curva de encurvadura proposta versus classificação segundo a norma EN 1065:1998 para o prumo da classe A ensaiado.

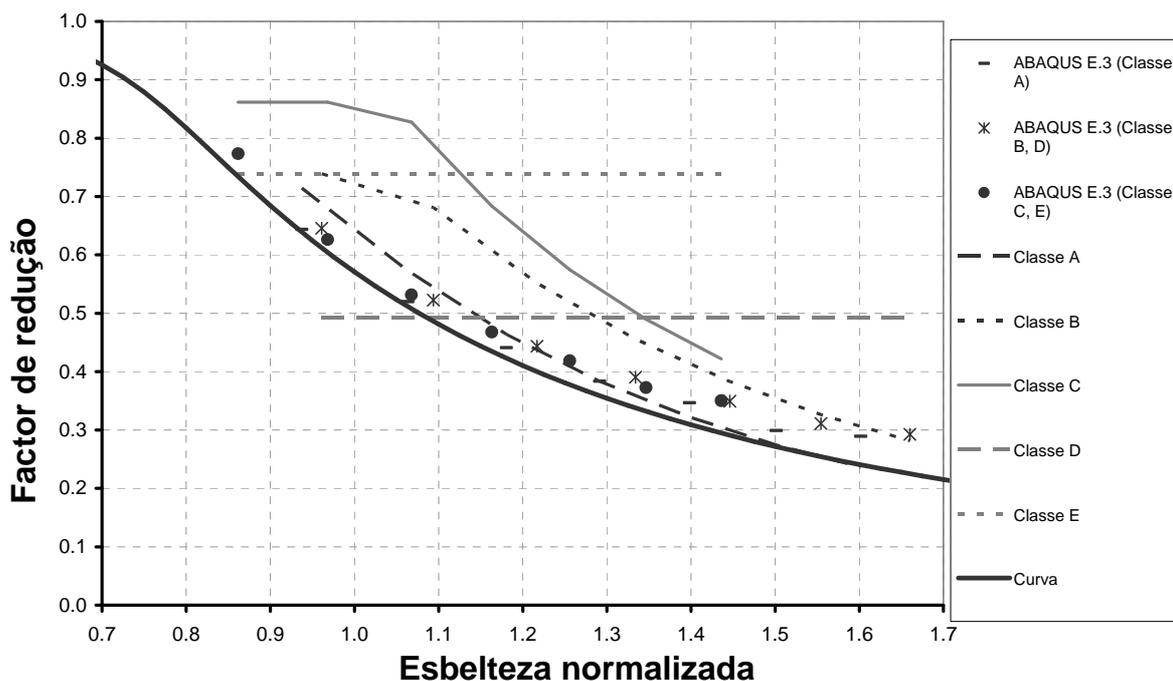


Figura 5.4 – Verificação do pré-dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis.

É possível observar que com base nas dimensões dos tubos e características dos materiais dos tubos admitidas, se obtém uma razoável correlação entre os resultados obtidos e a curva da Classe A. Para as restantes classes a correlação é insatisfatória, o que indica que prumos utilizados nos cálculos não possuem as características suficientes para atingir a classe de resistência. No entanto, sem alterar as dimensões mínimas dos tubos especificadas na norma EN 1065:1998, i.e. variando apenas o diâmetro interior e exterior dos tubos, e o tipo de aço dos tubos, é possível redefinir o pré-dimensionamento de modo a se atingirem os valores de resistência correspondentes a cada uma das classes representadas na Tabela 5.3.

A Tabela 5.4 apresenta os valores característicos mínimos das resistências para cada classe (A, B, e C) para todas as alturas máximas admitidas pela norma EN 1065:1998. No caso das classes D e E os valores característicos mínimos das resistências são constantes, sendo iguais a 34 kN e 51 kN, respectivamente. Os valores de cálculo correspondentes são obtidos através da divisão do valor característico pelo coeficiente de segurança igual a 1,10, conforme previsto na norma EN 12812:2004.

É possível observar que para as classes B e C a norma permite prumos com alturas máximas até 5,5 m, pelo que os critérios de pré-dimensionamento apresentados na Tabela 5.3 devem ser revistos para prumos com comprimentos máximos superiores a 3,5 m, propondo-se que se considere um aumento do afastamento entre furos e da espessura dos tubos exterior e interior, por exemplo.

Por fim, realizou-se uma comparação entre as curvas de encurvadura propostas na parte 1-1 Eurocódigo 3 para a verificação à encurvadura de colunas, com a curva proposta na presente Dissertação para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis.

A Figura 5.5 ilustra as várias curvas de encurvadura. É possível observar que todas as curvas propostas na parte 1-1 Eurocódigo 3 se situam acima da curva proposta, como seria de esperar já que não são aplicáveis a prumos, pois a amplitude das imperfeições geométricas iniciais utilizadas na construção das curvas propostas nesta parte do Eurocódigo 3 são inferiores às impostas para o dimensionamento dos prumos.

Tabela 5.3 – Proposta de pré-dimensionamento de prumos para as Classes A, B e C segundo a norma EN 1065:1998, $L_{max}=3,5$ m.

Classe	Diâmetro exterior do tubo exterior (mm)	Diâmetro exterior do tubo interior (mm)	Diâmetro do pino (mm)	Qualidade do aço dos tubos
A	50	60	13	235
B	55	65	14	275
C	60	70	15	275

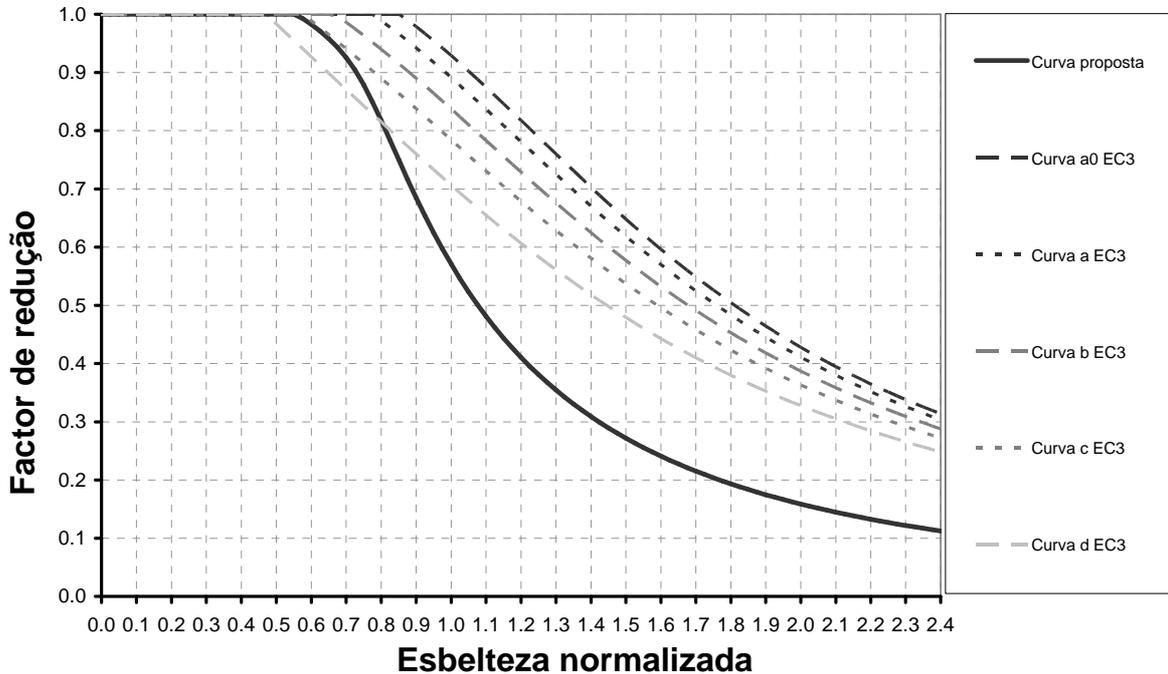


Figura 5.5 – Comparação entre a curva proposta e as curvas da parte 1-1 do Eurocódigo 3.

Tabela 5.4 – Resistência característica nominal para cada classe do prumo em função da sua altura máxima.

Classe A	A40		A35		A30		A25							
	$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=4,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=3,5\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=3,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=2,5\text{ m}$							
	Altura (m)	Resistência (kN)	Altura (m)	Resistência (kN)	Altura (m)	Resistência (kN)	Altura (m)	Resistência (kN)						
2,00	44,0	2,00	44,0	2,00	38,3	2,00	31,9							
2,25	40,3	2,25	35,3	2,25	30,2	2,25	25,2							
2,50	32,6	2,50	28,6	2,50	24,5	2,50	20,4							
2,75	27,0	2,75	23,6	2,75	20,2									
3,00	22,7	3,00	19,8	3,00	17,0									
3,25	19,3	3,25	16,9											
3,50	16,7	3,50	14,6											
3,75	14,5													
4,00	12,8													
Classe B	B55		B50		B45		B40		B35		B30		B25	
	$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=5,5\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=5,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=4,5\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=4,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=3,5\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=3,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=2,5\text{ m}$	
	Altura (m)	Resistência (kN)												
	2,00	51,0	2,00	51,0	2,00	51,0	2,00	51,0	2,00	51,0	2,00	51,0	2,00	42,5
	2,25	51,0	2,25	51,0	2,25	51,0	2,25	51,0	2,25	47,0	2,25	40,3	2,25	33,6
	2,50	51,0	2,50	51,0	2,50	49,0	2,50	43,5	2,50	38,1	2,50	32,6	2,50	27,2
	2,75	49,5	2,75	45,0	2,75	40,5	2,75	36,0	2,75	31,5	2,75	27,0		
	3,00	41,6	3,00	37,8	3,00	34,0	3,00	30,2	3,00	26,4	3,00	22,7		
	3,25	35,4	3,25	32,2	3,25	29,0	3,25	25,8	3,25	22,5				
	3,50	30,5	3,50	27,8	3,50	25,0	3,50	22,2	3,50	19,4				
	3,75	26,6	3,75	24,2	3,75	21,8	3,75	19,3						
	4,00	23,4	4,00	21,3	4,00	19,1	4,00	17,0						
	4,25	20,7	4,25	18,8	4,25	16,9								
	4,50	18,5	4,50	16,8	4,50	15,1								
	4,75	16,6	4,75	15,1										
	5,00	15,0	5,00	13,6										
	5,25	13,6												
5,50	12,4													
Classe C	C55		C50		C45		C40		C35		C30		C25	
	$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=5,5\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=5,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=4,5\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=4,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=3,5\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=3,0\text{ m}$		$L_{\min}=2,0\text{ m};$ $L_{\max}=2,5\text{ m}$	
	Altura (m)	Resistência (kN)												
	2,00	59,5	2,00	59,5	2,00	59,5	2,00	59,5	2,00	59,5	2,00	59,5	2,00	59,5
	2,25	59,5	2,25	59,5	2,25	59,5	2,25	59,5	2,25	59,5	2,25	59,5	2,25	50,4
	2,50	59,5	2,50	59,5	2,50	59,5	2,50	59,5	2,50	57,1	2,50	49,0	2,50	40,8
	2,75	59,5	2,75	59,5	2,75	59,5	2,75	54,0	2,75	47,2	2,75	40,5		
	3,00	59,5	3,00	56,7	3,00	51,0	3,00	45,3	3,00	39,7	3,00	34,0		
	3,25	53,1	3,25	48,3	3,25	43,5	3,25	38,6	3,25	33,8				
	3,50	45,8	3,50	41,6	3,50	37,5	3,50	33,3	3,50	29,1				
	3,75	39,9	3,75	36,3	3,75	32,6	3,75	29,0						
	4,00	35,1	4,00	31,9	4,00	28,7	4,00	25,5						
	4,25	31,1	4,25	28,2	4,25	25,4								
	4,50	27,7	4,50	25,2	4,50	22,7								
	4,75	24,9	4,75	22,6										
	5,00	22,4	5,00	20,4										
	5,25	20,4												
5,50	18,5													

5.5. Métodos simplificados para a estimativa da resistência de prumos

A partir das equações (4.21) e (4.23) é também possível estimar a carga de colapso do prumo, admitindo que a ruína é atingida quando o momento actuante é igual ao momento último, cujo valor é reduzido em função da sua interacção com o esforço normal, de acordo com as expressões exactas¹³ apresentadas em [5.14] ou com a expressão aproximada indicada na norma EN 1065:1998 [5.11].

Por este método obtém-se uma estimativa por excesso (P_s) da resistência do prumo (ver a Figura 5.6), determinada a partir da intersecção de uma análise plástica de segunda ordem com uma análise elástica não-linear. O valor estimado deverá ser dividido por um coeficiente de redução apropriado, para ter em conta os efeitos não-lineares que não foram considerados.

Outro método simplificado consiste em aplicar a fórmula de Merchant-Rankine, que permite calcular o valor da carga de colapso do prumo (P_u) através da expressão:

$$P_u \approx \frac{P_{ced,min}}{1 + \frac{P_{ced,min}}{P_{cr}}} \quad (5.15)$$

onde P_{cr} é dada pela equação (5.7).

A Tabela 5.5 e a Tabela 5.6 resumem os resultados obtidos por estes dois métodos, para o caso particular do prumo ensaiado.

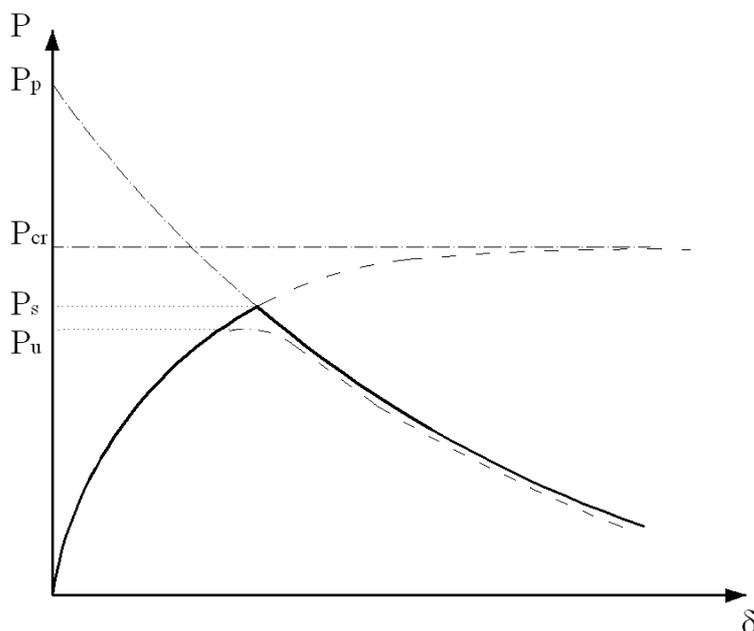


Figura 5.6 – Diferentes métodos de análise do comportamento do prumo.

¹³ As expressões são exactas para secções tubulares circulares sem furos. A contabilização da existência dos furos na parede do tubo T_3 é realizada introduzindo nas expressões [5.14] a área e a inércia da secção transversal do tubo interior dadas pelas equações (2.11) e (2.14).

Tabela 5.5 – Resultados obtidos com métodos aproximados (configuração normal): Análise plástica de 2ª ordem.

Modelo	Comprimento (m)	Resistência (kN)	Resistência (kN) (Ensaio)	Diferença (AP-Ens)/Ens
Análise plástica de segunda ordem (AP)	2,00	81,31	80,45	1,07%
	2,25	71,81	78,26	-8,25%
	2,50	61,22	62,44	-1,95%
	2,75	49,12	32,94	49,13%
	3,00	41,34	41,88	-1,28%
	3,25	35,09	31,72	10,62%
	3,50	26,61	26,10	1,97%
				Diferença média

Tabela 5.6 – Resultados obtidos com métodos aproximados (configuração normal): Merchant-Rankine.

Modelo	Comprimento (m)	Resistência (kN)	Resistência (kN) (Ensaio)	Diferença (MR-Ens)/Ens
Merchant-Rankine (MR)	2,00	71,21	80,45	-11,49%
	2,25	59,21	78,26	-24,35%
	2,50	50,06	62,44	-19,83%
	2,75	42,93	32,94	30,33%
	3,00	37,28	41,88	-10,99%
	3,25	32,72	31,72	3,14%
	3,50	28,98	26,10	11,06%
				Diferença média

5.6. Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a metodologia adoptada para desenvolver uma curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis, com base em resultados numéricos e experimentais.

A curva de encurvadura proposta permite obter uma estimativa da resistência dos prumos ensaiados que corresponde aproximadamente ao quantilho de 5%. Propõe-se que os valores fornecidos por esta

curva sejam divididos por um coeficiente de segurança igual a 1,15, determinado de acordo com o EN 1990.

A partir da curva de encurvadura e do coeficiente de segurança propostos é possível aumentar o valor de cálculo da resistência dos prumos ensaiados, em relação ao valor obtido pelas normas EN 1065:1998 e EN 12812:2004.

Propõe-se ainda a aplicação de um coeficiente de segurança adicional no caso de serem utilizados prumos com imperfeições adicionais, ou superiores, às consideradas neste estudo.

CAPÍTULO 6

CERTIFICAÇÃO DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS SEGUNDO A NORMA EN 1065:1998

6.1. Introdução

Uma das etapas necessárias para certificar um tipo de prumo é a sua classificação. A classificação de um prumo de acordo com a norma EN 1065:1998 envolve dois passos: (i) a determinação da sua capacidade resistente, e (ii) a verificação de certos requisitos geométricos. Para o primeiro passo a norma EN 1065:1998 indica duas vias alternativas: através de ensaios experimentais ou de estudos numéricos.

É igualmente necessário verificar a conformidade em relação a outras dimensões, e definir o tipo de controlo interno e externo a realizar, conforme descrito no Capítulo 2.

Neste capítulo são descritos os passos necessários para certificar um tipo de prumo de acordo com a norma EN 1065:1998 [6.1], utilizando o tipo de prumo ensaiado como exemplo de aplicação prática. Sabendo de antemão que os prumos ensaiados pertencem à classe A, apenas irá ser verificada a conformidade do tipo de prumo em relação a esta classe. Ao longo deste capítulo são ainda apresentados os critérios utilizados nas situações em que a norma EN 1065:1998 é omissa.

6.2. Análise dos resultados para a classificação dos prumos

6.2.1. Resultados experimentais

A partir dos resultados dos ensaios experimentais, é possível enquadrar o prumo numa dada classe.

A norma EN 1065:1998 não define o número exacto de ensaios necessários para classificar um dado tipo de prumo. Como tal estabeleceu-se um critério no qual foi definido que para cada tipo de prumo a classificar, devem ser realizadas 3 séries de 8 ensaios (4 ensaios por cada configuração), para cada comprimento do prumo especificado na norma (máximo, mínimo e intermédio condicionante). Para determinar o comprimento intermédio condicionante, devem ser realizados 8 ensaios, 4 em cada configuração, aumentando-se progressivamente o comprimento dos prumos, entre o valor mínimo (l_{min}) e máximo (l_{max}), através de incrementos correspondentes a 1/5 da diferença entre l_{max} e l_{min} . No total, para classificar um dado tipo de prumo são necessários 32 ensaios.

Os resultados destes ensaios são resumidos no Capítulo 3, ver a Tabela 3.18.

A norma EN 1065:1998 especifica que a altura intermédia condicionante, corresponde à menor relação entre a resistência do prumo obtida experimentalmente e a resistência nominal $R_{y,k}$, indicada na norma em função da classe do prumo (A, B, C, D e E), pelas seguintes expressões:

$$\text{Classe A: } R_{A,k} = 51,0 \cdot \frac{l_{\max}}{l^2} \leq 44,0 \text{ kN}$$

$$\text{Classe B: } R_{B,k} = 68,0 \cdot \frac{l_{\max}}{l^2} \leq 51,0 \text{ kN}$$

$$\text{Classe C: } R_{C,k} = 102,0 \cdot \frac{l_{\max}}{l^2} \leq 59,5 \text{ kN}$$

$$\text{Classe D: } R_{D,k} = 34,0 \text{ kN}$$

$$\text{Classe E: } R_{E,k} = 51,0 \text{ kN}$$

A Tabela 6.1 resume o processo de determinação da posição intermédia condicionante, de acordo com a EN 1065:1998.

Tabela 6.1 – Determinação do comprimento condicionante segundo a norma EN 1065:1998.

Comprimento (m)	Configuração normal						Configuração invertida							
	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)	R _{y,A} (kN)	R _{y,A} / F _{max}	Média	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)	R _{y,A} (kN)	R _{y,A} / F _{max}	Média		
2,00	155	-	80,45	44,00	-	1,83	175	-	76,40	44,00	-	1,74		
	156	83,10			1,89		176	73,60			1,67			
	157	77,80			1,77		177	79,20			1,80			
2,25	185, 186	78,39	78,39	35,26	2,22	2,22	187, 188	82,90	82,90	35,26	2,35	2,35		
2,50	193	62,44	62,44	28,56	2,19	2,19	194, 195	78,15	78,15	28,56	2,74	2,74		
2,75	199	31,04	32,94	23,60	1,31	1,40	201	46,08	46,08	23,60	1,95	1,95		
	200	34,84			1,48									
3,00	205	41,61	41,88	19,83	2,10	2,11	207	51,32	51,32	19,83	2,59	2,59		
	206	42,14			2,12									
3,25	211	31,45	31,72	16,90	1,86	1,88	215	39,26	37,84	16,90	2,32	2,24		
	212	32,92			1,95						216		35,67	2,11
	213	30,97			1,83						217		41,01	2,43
	214	31,55			1,87						218		35,44	2,10
3,50	92	25,95	26,10	14,57	1,78	1,79	119	26,75	28,32	14,57	1,84	1,94		
	105	26,50			1,82						120		26,56	1,82
	106	25,95			1,78						121		28,98	1,99
	123	25,71			1,76						122		31,005	2,13
	124	26,37			1,81									

Observa-se que o comprimento intermédio condicionante é 2,75 m, e não aquele que conduz a menores resistências, i.e. 3,25 m. No entanto, este facto apenas veio a ser determinado posteriormente à realização dos ensaios, pelo que quando foi determinado já não havia prumos para realizar os 5 ensaios adicionais, de forma a completar 8 ensaios nessa altura.

6.1.1.1. Tratamento de resultados

Os resultados de cada uma das séries de ensaios são alvo de uma análise e de um tratamento estatístico, após o qual é determinado o valor característico da resistência do prumo (com um nível de confiança de 75% e assumindo uma distribuição normal ou log-normal), para esse comprimento. De seguida o prumo é enquadrado numa classe.

O resultado de cada um dos 8 ensaios é afectado de um factor de redução, ψ – função da relação entre a tensão de cedência do material do prumo obtida através de ensaios de tracção e o valor nominal da tensão de cedência. No caso dos valores das tensões de cedência dos dois tubos serem diferentes, aplica-se o factor de redução obtido a partir da tensão de cedência do tubo condicionante.

Os valores da tensão de cedência dos tubos foram determinados a partir da realização de 12 ensaios de tracção de provetes de material retirado dos tubos, de acordo com a norma EN 10002-1:2006 [6.2], resumidos na Tabela 6.2. Os resultados dos ensaios de tracção encontram-se no Anexo E.

Observa-se uma significativa diferença entre os valores nominais (275 MPa) e os valores médios.

O desvio padrão é inferior a 10% do valor médio pelo que a norma EN 1065:1998 permite utilizar o valor médio da tensão de cedência no método proposto, pela mesma norma, para reflectir a diferença entre os valores efectivos e nominais da tensão de cedência do material dos tubos na resistência dos prumos.

Este processo é resumido nas tabelas 6.3 e 6.4 para a configuração normal e invertida, respectivamente.

Observando as tabelas, verifica-se que existe uma diminuição de no máximo 33% da resistência experimental devido ao desvio entre os valores da tensão de cedência nominal e real do tubo interior.

Verifica-se igualmente que o valor característico da resistência é afectado significativamente pelo número de ensaios realizados, não só devido ao número de graus de liberdade mas também devido ao valor do desvio padrão obtido.

Tabela 6.2 – Tensões de cedência obtidas a partir de ensaios de tracção.

T_{int}	Média (MPa)	514,71
	Desvio padrão (MPa)	35,25
T_{ext}	Média (MPa)	324,24
	Desvio padrão (MPa)	9,10

Tabela 6.3 – Tratamento dos resultados (configuração normal).

Comp. (m)	Configuração normal																				
	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)	φ _{y, interior}	N _{pl, nom, interior} (kN)	N _{c, interior} (kN)	$\bar{\lambda}$	ψ _{interior}	F' _{max} (kN)	Média (kN)	Ln(F' _{max})	Média	Desvio padrão	k _s	Ln(F' _{max}) 5%	F _{max, 5%} (kN)	R _{y,A} (kN)				
2,00	155	-	80,45	1,87	97,77	96,84	1,00	1,33 ¹⁴	-	60,40	-	4,10	0,05	3,15	3,95	52,12	44,00				
	156	83,10							62,38		4,13										
	157	77,80							58,41		4,07										
2,25	185	78,39	78,39			76,52	1,13	1,25 ¹⁴	62,82	62,82	4,14	-	-	-	-	-	-	-	35,26		
2,50	193	62,44	62,44			61,98	1,26	1,16	53,66	53,66	3,98	-	-	-	-	-	-	-	-	28,56	
2,75	199	31,04	32,94			51,22	1,38	1,08	28,75	30,52	3,36	-	-	-	-	-	-	-	-	23,60	
	200	34,84				32,28	3,47														
3,00	205	41,61	41,88			43,04	1,51	1,00	41,61	41,88	3,73	-	-	-	-	-	-	-	-	19,83	
	206	42,14				42,14	3,74														
3,25	211	31,45	31,72			31,45	36,67	1,63	1,00	31,45	31,72	3,45	3,46	0,03	2,68	3,39	-	-	-	-	16,90
	212	32,92				32,92				3,49											
	213	30,97				30,97				3,43											
	214	31,55				31,55				3,45											
3,50	92	25,95	26,10			25,95	31,62	1,76	1,00	25,95	26,10	3,26	3,26	0,01	2,68	3,23	-	-	-	-	14,57
	105	26,50				26,50				3,28											
	106	25,95				25,95				3,26											
	123	25,71		25,71	3,25																
	124	26,37		26,37	3,27																

Tabela 6.4 – Tratamento dos resultados (configuração invertida).

Comp. (m)	Configuração invertida																				
	Ensaio	F _{max} (kN)	Média (kN)	φ _{y, interior}	N _{pl, nom, interior} (kN)	N _{c, interior} (kN)	$\bar{\lambda}$	ψ _{interior}	F' _{max} (kN)	Média (kN)	Ln(F' _{max})	Média	Desvio padrão	k _s	Ln(F' _{max}) 5%	F _{max, 5%} (kN)	R _{y,A} (kN)				
2,00	175	-	76,40	1,87	97,77	96,84	1,00	1,33 ¹⁴	-	57,36	-	4,05	0,05	3,15	3,89	48,68	44,00				
	176	73,60							55,25		4,01										
	177	79,20							59,46		4,09										
2,25	187	82,90	82,90			76,52	1,13	1,25 ¹⁴	66,43	66,43	-	-	-	-	-	-	-	-	35,26		
2,50	194	78,15	78,15			61,98	1,26	1,16	67,16	67,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28,56	
2,75	201	46,08	46,08			51,22	1,38	1,08	42,69	42,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,60	
						-	-	-	-		-	-									
3,00	207	51,32	51,32			43,04	1,51	1,00	51,32	51,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,83	
						-	-	-	-		-	-									
3,25	215	39,26	37,84			39,26	36,67	1,63	1,00	39,26	37,84	3,67	3,63	0,07	2,68	3,44	-	-	-	-	16,90
	216	35,67				35,67				3,57											
	217	41,01				41,01				3,71											
	218	35,44				35,44				3,57											
3,50	119	26,75	28,32			26,75	31,62	1,76	1,00	26,75	28,32	3,29	3,34	0,07	2,68	3,15	-	-	-	-	14,57
	120	26,56				26,56				3,28											
	121	28,98				28,98				3,37											
	122	31,01		31,01	3,43																

¹⁴ O valor da resistência do prumo ensaiado para esta altura (L=2,00 m) foi condicionado pela resistência do pino, pelo que ao aplicar o factor de redução neste caso subestima-se o valor da força máxima que se obteria se o valor efectivo da tensão de cedência do material dos tubos fosse igual ao valor nominal.

Apresenta-se ainda na Tabela 6.5 a comparação entre os resultados numéricos obtidos a partir dos vários modelos desenvolvidos, considerando as propriedades médias e nominais dos materiais dos tubos do prumo, e o método de redução proposto na norma EN 1065:1998.

Fazendo referência ao Capítulo 4, onde se menciona que o modelo EN 1065 possui insuficiências que limitam o valor obtido da resistência dos prumos ensaiados para comprimentos superiores a 3,00 m, os valores de redução obtidos (1,00 a 1,09) deveriam ser superiores, tal como se obteve com os modelos realizados com o programa ABAQUS (1,25 a 1,27). Deste modo, é possível constatar que o método de redução proposto na norma EN 1065:1998 parece ser não conservativo para estes comprimentos. Apenas para os dois comprimentos mais reduzidos ($L=2,00$ m e $L=2,25$ m) existe uma razoável concordância entre os valores obtidos – chama-se à atenção que os valores experimentais obtidos para a resistência dos prumos, para estes comprimentos, são condicionados pela plastificação do pino, caso contrário a concordância seria ainda superior.

Tabela 6.5 – Comparação entre os valores de resistência dos prumos utilizando valores médios e nominais da tensão de cedência do material dos tubos (continua).

Modelo	Comprimento (m)	Resistência (Tensão de cedência média)	Resistência (Tensão de cedência nominal)	Redução
ABAQUS	2,00	81,98	61,48	1,33
	2,25	66,19	47,85	1,38
	2,50	54,35	39,96	1,36
	2,75	45,50	34,86	1,31
	3,00	38,94	30,67	1,27
	3,25	34,11	27,19	1,25
	3,50	28,19	22,49	1,25
EN 1065	2,00	86,57	58,99	1,47
	2,25	73,28	49,77	1,47
	2,50	58,23	41,86	1,39
	2,75	47,62	35,74	1,33
	3,00	32,43	29,64	1,09
	3,25	27,56	27,04	1,02
	3,50	17,23	17,23	1,00

Tabela 6.5 – Comparação entre os valores de resistência dos prumos utilizando valores médios e nominais da tensão de cedência do material dos tubos.

Método de redução	Comprimento (m)	Resistência, kN (Tensão de cedência média)	Resistência, kN (Tensão de cedência nominal)	Redução
Método estipulado na norma EN 1065	2,00	80,45	60,40	1,33
	2,25	78,26	62,72	1,25
	2,50	62,44	53,66	1,16
	2,75	32,94	30,52	1,08
	3,00	41,88	41,88	1,00
	3,25	31,72	31,72	1,00
	3,50	26,10	26,10	1,00

Os valores da resistência característica determinados devem ser maiores ou iguais que o valor mínimo especificado pela norma EN 1065:1998 para a classe do prumo. Para $L=2,75$ m não foram realizados, por motivos expostos anteriormente, o número de ensaios requeridos pela norma EN 1065:1998, pelo que não foi efectuado o tratamento estatístico dos resultados.

Salienta-se que nas posições extremas, comprimento mínimo e máximo, os valores da resistência característica obtidos são superiores aos valores requeridos pela norma para prumos da Classe A. Por este motivo, considera-se que por via experimental o prumo cumpre as exigências definidas na norma EN 1065:1998 para a classe A.

6.2.2. Resultados numéricos

A norma também permite a classificação de um dado tipo de prumo através de resultados numéricos.

Para o tipo de prumo a classificar foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 6.6 (considerando as propriedades nominais do material dos tubos do prumo).

Observa-se que o comprimento intermédio condicionante determinado numericamente é $L=2,25$ m, e que o prumo respeita a condição de classificação para a Classe A, i.e. os valores da resistência característica assim determinados são maiores ou iguais que o valor mínimo especificado pela norma EN 1065:1998 para a classe do prumo.

No entanto, para que o prumo cumpra o especificado na norma EN 1065:1998 é necessário adicionalmente que a ligação entre os dois tubos cumpra a seguinte verificação:

$$1,14 \times \frac{R_{y,k}}{2} \leq (R_{s,p}; R_{b,t}) \quad (6.1)$$

Tabela 6.6 – Classificação do prumo a partir dos resultados numéricos.

Modelo	Comprimento (m)	Resistência nominal	Configuração normal		Configuração invertida	
		$R_{y,A}$ (kN)	Resistência (kN)	$R_{y,A} / F_{\max}$	Resistência (kN)	$R_{y,A} / F_{\max}$
EN 1065	2,00	44,00	59,01	1,34	64,83	1,47
	2,25	35,26	50,05	1,42	57,70	1,64
	2,50	28,56	41,86	1,47	51,74	1,81
	2,75	23,60	35,71	1,51	45,74	1,94
	3,00	19,83	31,48	1,59	39,58	2,00
	3,25	16,90	27,02	1,60	33,02	1,95
	3,50	14,57	22,89	1,57	26,61	1,83

Onde, $R_{s,p}$ representa a resistência do pino ao corte, $R_{b,t}$ e a resistência do tubo interior ao esmagamento, dadas pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$R_{s,p} = 0,6 \times A_s \times f_{u,p} \quad (6.2)$$

$$R_{b,t} = 2,12 \times f_{y,t} \times 2t \times d \quad (6.3)$$

Com:

$f_{u,p}$ - Tensão de rotura à tracção do material do pino;

A_s - Área transversal do pino;

$f_{y,t}$ - Tensão de cedência do material do tubo interior;

t - Espessura da parede do tubo interior;

d - Diâmetro do pino.

No caso do prumo em análise, tem-se $f_{u,p,nominal}=550$ MPa, $f_{y,t,nominal}=275$ MPa, $t_{nominal}=3,2$ mm, $d_{nominal}=13$ mm, $A_{s,nominal}=132,73$ mm², obtendo-se a partir das equações (6.2) e (6.3), $R_{s,p}=43,8$ kN e $R_{b,t}=48,5$ kN, respectivamente, valores baseados em dados nominais. Como no máximo $R_{y,A}$ toma o valor de 44 kN, tem-se que a máxima força actuante admissível vale 25,1 kN ($=1,14 \times 44/2$), e como tal conclui-se que o prumo cumpre o especificado na norma EN 1065:1998.

No entanto, como foi referido no Capítulo 2, a norma EN 1065:1998 é omissa quanto à verificação da ligação por flexão do pino e interacção flexão-corte. Este último foi o tipo de rotura, em combinação com a ovalização dos furos do tubo interior, detectado nos resultados dos ensaios para os prumos menos esbeltos, i.e. $L=2,00$ m e $L=2,25$ m. Como tal, propõe-se que numa revisão futura da norma EN 1065:1998 seja adoptada a verificação da ligação por flexão do pino e por interacção flexão-corte.

6.3. Controlo dimensional dos prumos

O controlo dimensional é utilizado no processo de classificação e certificação de prumos. A norma EN 1065:1998 prevê a realização do controlo dimensional dos prumos através da medição (ou observação) de cerca de vinte parâmetros. No entanto, a norma não indica quantas medições por parâmetro, e quantos prumos devem ser controlados. De modo a tornar expedito o processo de avaliação dos resultados das medições realizadas e de verificação do cumprimento dos requisitos definidos na norma EN 1065:1998 foram desenvolvidas folhas de cálculo em Excel.

Como já foi referido, a norma EN 1065:1998 não define no entanto o número mínimo de medições a realizar por parâmetro, pelo que na presente Dissertação foi definido como sendo razoável proceder-se ao controlo de 18 parâmetros em três prumos, perfazendo um total de 327 medições de características dos prumos e componentes. Consta da Tabela F.1 do Anexo F a identificação dos parâmetros medidos e o número de medições. Os dois parâmetros sobrantes foram verificados por via experimental.

Dos resultados obtidos, ver a Tabela F.2, conclui-se que dada a pequena dispersão dos resultados de cada parâmetro, obtida para diferentes posições de medição, é possível reduzir o número de secções a controlar: recomenda-se que apenas sejam controladas duas secções, por tubo, com três posições de medição, na determinação da espessura dos tubos, por exemplo – na campanha realizada foram controladas seis secções por tubo com três posições de medição. Deste modo o número de medições de características dos prumos e componentes pode ser racionalizado e reduzir-se para 171.

De modo a aumentar a confiança nos resultados obtidos através da análise estatística da amostra, recorre-se ao método *Bootstrap*, que permite obter uma amostragem com 1000 resultados por parâmetro.

As figuras 6.1 a 6.18 ilustram a realização das diversas medições.

A Tabela F.2 do Anexo F resume as verificações efectuadas. Apenas para a largura das chapas das bases os resultados médios das medições são menores que o valor mínimo especificado (110 mm). No entanto como os valores são muito próximos do valor mínimo (109,71 mm e 109,62 mm para a base do tubo exterior e interior, respectivamente) considera-se que o prumo cumpre o disposto na norma EN 1065:1998, em particular os requisitos exigidos para prumos da Classe A. Como o tipo de prumo verifica igualmente os requisitos de resistência para esta classe, pode concluir-se que este tipo de prumo pertence à Classe A.



Figura 6.1 – Altura da cabeça do batente.



Figura 6.2 – Largura da cabeça do batente.



Figura 6.3 – Diâmetro do pino.

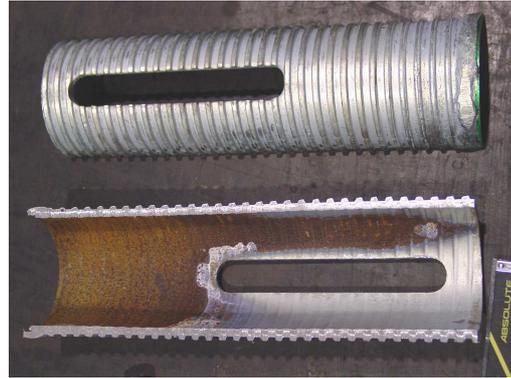


Figura 6.4 – Vista do troço roscado do tubo exterior.



Figura 6.5 – Altura do batente da porca roscada.



Figura 6.6 – Largura do batente da porca roscada.



Figura 6.7 – Comprimento do troço roscado até ao furo de ajuste da altura do prumo (L^*_{rosca})



Figura 6.8 – Altura do batente



Figura 6.9 – Base do tubo interior.



Figura 6.10 – Base do tubo exterior



Figura 6.11 – Diâmetro do furo interior da base do tubo interior.



Figura 6.12 – Diâmetro do furo interior da base do tubo exterior.



Figura 6.13 – Espessura da base do tubo interior.



Figura 6.14 – Espessura da base do tubo exterior.



Figura 6.15 – Largura da base do tubo interior.



Figura 6.16 – Largura da base do tubo exterior.



Figura 6.17 – Configuração concêntrica dos dois tubos.

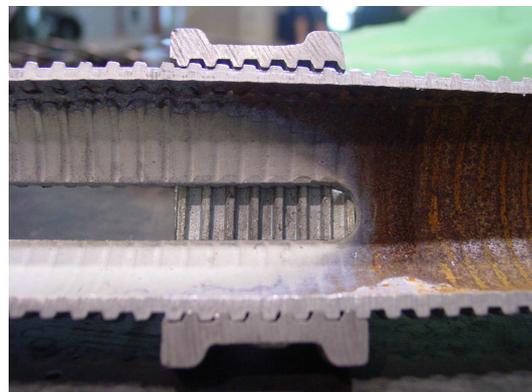


Figura 6.18 – Configuração excêntrica dos dois tubos.

6.4. Conclusões

Neste capítulo foi apresentado e aplicado o processo de classificação de prumos especificado na norma EN 1065:1998, recorrendo-se aos prumos utilizados no estudo experimental como exemplo de aplicação prática.

O processo de classificação consiste em duas etapas distintas: (i) determinação da capacidade resistente dos prumos, e (ii) controlo dimensional do tipo de prumo.

A determinação da capacidade resistente dos prumos pode ser efectuada a partir de resultados experimentais ou numéricos. Ambas as hipóteses foram aplicadas, tendo sido apontadas soluções de compromisso nos pontos em que a norma é omissa ou incompleta.

A norma EN 1065:1998 não define o número exacto de ensaios necessários para classificar um dado tipo de prumo. Como tal estabeleceu-se um critério no qual foi definido que para cada tipo de prumo a classificar, devem ser realizadas 3 séries de 8 ensaios (4 ensaios por cada configuração), para cada comprimento do prumo especificado na norma (máximo, mínimo e intermédio condicionante).

Para determinar o comprimento intermédio condicionante, devem ser realizados 8 ensaios, 4 em cada configuração, aumentando-se progressivamente o comprimento dos prumos, entre o valor mínimo (l_{min}) e máximo (l_{max}), através de incrementos correspondentes a 1/5 da diferença entre l_{max} e l_{min} . No total, para classificar um dado tipo de prumo são necessários 32 ensaios.

Foi igualmente analisado o método de redução dos valores de resistência obtidos a partir dos ensaios experimentais para contabilizar a diferença entre as propriedades médias e nominais dos materiais dos tubos dos prumos, tendo-se concluído que o método estipulado na norma EN 1065:1998 conduz a valores de resistência superiores aos obtidos numericamente, para alturas do prumo próximas do comprimento máximo.

Finalmente, em relação ao processo de controlo dimensional dos prumos, concluiu-se que é possível diminuir o número de secções a controlar, face à reduzida dispersão dos resultados, pelo que se propõe que apenas sejam controladas duas secções por tubo, com três posições de medição, na determinação da espessura dos tubos, por exemplo. Deste modo o número de medições de características dos prumos e componentes pode ser racionalizado e reduzir-se de 327 para 171.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. Conclusões

Na presente Dissertação foi realizado um estudo sobre o comportamento estrutural de prumos telescópicos extensíveis, e sobre as exigências de qualidade aplicáveis a estes elementos e sobre os instrumentos existentes para o respectivo controlo.

No âmbito de um projecto de investigação programada do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no contexto do qual esta Dissertação foi desenvolvida, caracterizou-se a resposta estrutural de prumos telescópicos extensíveis à acção de forças axiais e identificaram-se os parâmetros mais relevantes na determinação da sua capacidade resistente.

Este projecto envolveu (i) a realização de uma vasta série de ensaios, de acordo com a correspondente norma europeia EN 1065:1998 e (ii) a simulação teórica do seu comportamento através de (ii.1) métodos analíticos aproximados e de (ii.2) modelações numéricas por elementos finitos de barra (aproximada) e de casca (rigorosa), utilizando dois programas de cálculo diferentes, incluindo os efeitos das não-linearidades física, geométrica e de contacto.

O objectivo final do projecto consistiu em (i) contribuir para um conhecimento mais aprofundado sobre a estabilidade e a capacidade resistente dos prumos telescópicos extensíveis submetidos a compressão axial e (ii) desenvolver, calibrar e validar uma curva de dimensionamento aplicável a este tipo de elementos estruturais, suprimindo assim uma lacuna da actual regulamentação de construção metálica.

Finalmente, foram criados no LNEC os mecanismos que permitem assegurar o controlo da qualidade de prumos telescópicos extensíveis em Portugal, no quadro do processo de certificação especificado na norma EN 1065:1998.

A diversidade dos temas estudados na presente Dissertação implicou que fossem abordados de modo autónomo, estruturados em sete capítulos (e em sete anexos), dos quais se retiram as considerações e conclusões que a seguir se apresentam.

7.1.1. Qualidade de prumos telescópicos extensíveis

O Capítulo 2 apresenta conceitos e contém informações importantes para uma melhor análise e compreensão do comportamento destes elementos, constituindo deste modo um ponto de partida sólido para os estudos experimentais e numéricos de prumos, desenvolvidos no âmbito da presente Dissertação, e apresentados nos capítulos seguintes.

Neste capítulo foi abordada a qualidade de estruturas provisórias, e em particular de prumos telescópicos extensíveis. Foram descritos os principais problemas existentes na sua utilização,

propostos instrumentos específicos para cada nível de actuação dos diversos intervenientes na sua concepção, fabrico e utilização, de forma a melhorar o panorama actual, e apresentado um resumo da norma de produto europeia EN 1065:1998 aplicável a este tipo de elementos estruturais.

7.1.2. Estudo experimental do comportamento de prumos telescópicos extensíveis

No Capítulo 3 foi apresentado o estudo experimental do comportamento de prumos telescópicos extensíveis realizado no âmbito da elaboração da presente Dissertação.

Em primeiro lugar foram descritos a instrumentação e os equipamentos utilizados, e o procedimento de ensaio adoptado.

Previamente à realização dos ensaios à rotura dos prumos, foi desenvolvido um estudo preliminar (resumido no Anexo B.1) o qual permitiu (i) detectar e eliminar a influência de variáveis exógenas ao ensaio nos resultados dos ensaios à rotura dos prumos, bem como (ii) definir de forma justificada o sistema de ensaio.

Em particular, o estudo preliminar permitiu aumentar a informação disponível sobre o ensaio e sobre aspectos que afectam o comportamento estrutural dos prumos – por exemplo, os aspectos relacionados (i) com as anomalias de funcionamento dos dispositivos de ensaio utilizados, (ii) com o posicionamento incorrecto do prumo ou (iii) com a posição em que se efectua o ensaio (*e.g.*, a influência de rodar os tubos do prumo em torno do seu eixo longitudinal). Concluiu-se que o comportamento do prumo não é influenciado, de forma significativa, pela alteração da posição dos tubos através de uma rotação de 180° em torno do seu eixo – por esse motivo, os ensaios levados à rotura foram realizados sem tomar em consideração esse aspecto.

Em simultâneo, realizou-se um estudo de repetibilidade e de reprodutibilidade do ensaio com o dispositivo utilizado para impor o ângulo de rotação inicial do prumo colocado na respectiva base inferior, a partir do qual foram determinados os valores dos ângulos.

Após a apresentação do estudo preliminar, foram apresentados os principais resultados obtidos a partir dos ensaios à rotura dos prumos para 7 níveis de altura (de 2,00 m até 3,50 m com incrementos de 0,25 m), concluindo-se que:

- Confirmou-se a existência, prevista na norma EN 1065:1998, de um comprimento intermédio em que o prumo apresenta uma diminuição brusca da resistência, devida a uma maior sensibilidade deste tipo de elementos à interacção dos efeitos das imperfeições geométricas iniciais – em especial imperfeições de forma das chapas das bases dos prumos. No caso dos prumos ensaiados, este comprimento intermédio corresponde à altura 2,75 m.
- A resistência do prumo, ensaiado na sua altura mínima, pode ser condicionada pela rotura da ligação entre os dois tubos, nomeadamente pela plastificação por interacção flexão-corte do pino. No caso dos prumos ensaiados para a altura mínima ($L=2,0$ m), os furos onde o pino é

inserido sofreram deformações plásticas significativas, as quais se traduzem por uma ovalização da sua secção, tanto no lado mais comprimido como no lado menos comprimido, passando o diâmetro mais deformado (direcção vertical) de 15 mm para cerca de 20 mm no lado menos comprimido e de 15 mm para cerca de 18 mm no lado mais comprimido. Este facto deve-se à flexão do pino que assume maior relevância no lado menos comprimido do prumo. Na direcção horizontal do prumo regista-se uma ligeira diminuição do diâmetro dos furos de 15 mm para cerca de 14,5 mm.

- O comportamento do prumo, ensaiado na sua altura máxima ($L=3,5$ m), é influenciado de modo significativo pelos efeitos de segunda ordem em regime elástico, i.e. apresenta uma trajectória de equilíbrio estável, em regime elástico, até à proximidade do ponto limite (coincidente com a força máxima registada nos ensaios) da trajectória de equilíbrio, após o qual passa a apresentar uma trajectória de equilíbrio instável devido à cedência do material (regime inelástico) ao longo do prumo.
- Em todos os ensaios obtiveram-se resistências últimas mais elevadas nos prumos com a configuração invertida – este facto resulta de, sob uma mesma carga aplicada ao prumo, as secções críticas (localizadas no tubo interior) estarem sujeitas a menores esforços na configuração invertida que na configuração normal, o que faz com que lhes seja possível suportar cargas axiais e deslocamentos transversais mais elevados. Esta observação, explica-se por na configuração invertida as condições de fronteira terem sido trocadas (excentricidade da força aplicada na extremidade do tubo exterior e rotação aplicada na extremidade do tubo interior). Este facto, aliado à maior inércia da secção transversal do tubo exterior em relação à do tubo interior, leva à existência de menores efeitos P-Delta globais na configuração invertida do que na configuração normal. Deste modo, na configuração invertida, as secções sujeitas a maiores esforços, para a mesma carga, pertencem ao tubo exterior e não ao tubo interior como acontece na configuração normal. A soma destes factos, aliados à maior resistência e ductilidade da secção transversal do tubo exterior face à do tubo interior, conduz a uma resistência mais elevada do prumo na configuração invertida.
- Em geral, a um aumento da altura do prumo correspondem incrementos nos deslocamentos transversais e encurtamentos axiais menores.
- Só foi registada uma separação entre a chapa da base inferior do prumo e a chapa do acessório inferior (devida à flexão da chapa de base inferior do prumo) nos prumos de alturas $L=2,75$ m, $L=3,25$ m e $L=3,50$ m – mas, mesmo nestes casos, essa separação é diminuta, pois nunca excede os 0,80 mm.
- A partir dos ensaios de prumos instrumentados com extensómetros, verificou-se que inicialmente a chapa da base inferior do prumo trabalha em consola, pelo facto de não existir

contacto total entre esta e a chapa do prato do dispositivo inferior (devido às folgas provocadas pela rotação inicial da base inferior), o que gera o aparecimento de um momento flector positivo na extremidade do tubo inferior. Posteriormente, ocorre o contacto total entre as duas chapas, o que causa uma restrição à rotação na base inferior, a qual passa a estar submetida a um momento flector típico de um encastramento.

- Nos ensaios de prumos instrumentados com extensómetros não foi detectado qualquer efeito localizado na parede do tubo exterior na zona em contacto com a extremidade do tubo interior.
- A fórmula prevista na parte 1-8 do Eurocódigo 3 para a verificação ao esmagamento da secção do tubo interior é excessivamente conservativa, pelo que se propõe a sua revisão. Do mesmo modo, as fórmulas indicadas na mesma norma para a verificação da interacção corte-flexão na ligação traduzem apenas de modo aproximado a realidade, i.e. o tipo de rotura observado para $L=2,00$ m e $L=2,25$ m. Por este motivo propõe-se o desenvolvimento de expressões que permitam a verificação da interacção corte-flexão na ligação entre os dois tubos, numa futura revisão da norma EN 1065:1998.

7.1.3. Estudo analítico e numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis

No Capítulo 4 foi apresentado o estudo analítico e numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis desenvolvido no âmbito da elaboração da presente Dissertação.

Em primeiro lugar, aplicando os conceitos apresentados na revisão bibliográfica são apresentados os resultados obtidos por métodos analíticos a partir de um modelo estrutural simplificado, igualmente apresentado neste capítulo, nomeadamente através de análises lineares de estabilidade, pós-encurvadura inicial e análises elásticas de 2ª ordem.

As principais conclusões a retirar destes resultados são:

- A existência de furos na parede do tubo interior conduz a uma redução da carga crítica do prumo. Pode igualmente concluir-se que quando se duplica a espessura das chapas das bases se duplica também o valor da carga crítica do prumo. No entanto, a partir de uma certa espessura, o aumento na carga crítica é diminuto, podendo considerar-se, em termos práticos, que o prumo se encontra encastrado em ambas as extremidades.
- Um aumento de rigidez apenas na chapa da base superior produz um efeito distinto do provocado por um aumento de rigidez apenas na chapa da base inferior – esta diferença resulta de os diâmetros dos tubos interior e exterior serem diferentes. Verificou-se que um determinado aumento na rigidez da chapa da base superior (tubo interior) conduz a um aumento da carga crítica superior ao resultante do mesmo aumento na rigidez da chapa da base inferior (tubo exterior), pois no primeiro caso a aba a em consola da base superior é mais longa do que a aba em consola da base inferior.

-
- A partir das análises elásticas de 2ª ordem é possível concluir que as imperfeições consideradas (excentricidades da carga aplicada e configurações deformadas iniciais) provocam deslocamentos transversais significativos para forças, nalguns casos, muito inferiores à carga crítica. Com base nestes resultados, conclui-se que é necessário ter em especial atenção estes efeitos no dimensionamento destes elementos, já que as tolerâncias de construção em obra, especificadas no caderno de encargos, são frequentemente violadas.
 - Por fim, a partir de uma análise de pós-encurvadura, desenvolvida através do método de Rayleigh-Ritz, conclui-se que os prumos apresentam uma trajectória de equilíbrio estável em regime elástico, associada a uma pequena resistência de pós-encurvadura.

De seguida foi descrito o processo de validação e verificação dos modelos numéricos desenvolvidos através de dois programas diferentes: o programa comercial ABAQUS e um programa disponível no LNEC. O culminar deste processo foi a selecção justificada do modelo que melhor simula o comportamento dos prumos obtido experimentalmente. Foram igualmente apresentados os principais resultados obtidos a partir do modelo numérico proposto pela norma EN 1065:1998.

As principais conclusões deste estudo são:

- O modelo numérico seleccionado (desenvolvido no programa ABAQUS, e designado ABAQUS E.3/E.5), subestima em apenas cerca de 13% a resistência obtida através dos ensaios e os deslocamentos transversais medidos. Constata-se que os resultados numéricos se aproximam melhor dos resultados experimentais para os valores de comprimento mais elevados (maiores que 2,75 m). A má aproximação dos resultados numéricos para $L=2,00$ e $2,25$ m justifica-se porque nos modelos não foi tido em conta o pino, pelo que o modo de rotura experimental não foi captado. Para $L=2,50$ m a diferença pode residir na variação das características mecânicas do material do tubo interior dado que o modo de colapso para esta altura é condicionado pela resistência do tubo interior. À medida que a plasticidade deixa de dominar o comportamento e a resistência dos prumos, os resultados numéricos e experimentais convergem - a altura $L=2,75$ m representa a excepção. No entanto, o modelo numérico seleccionado não contabiliza a imperfeição de forma das chapas das bases identificada no início dos ensaios para esta altura. Foi desenvolvido em paralelo um modelo (ABAQUS E.10) que procura simular de forma aproximada essa imperfeição, sendo os resultados obtidos satisfatórios.
- O modelo numérico proposto pela norma EN 1065:1998 permite obter uma boa aproximação da resistência dos prumos, subestimando em apenas 20% a resistência obtida através dos ensaios, mas não consegue acompanhar o comportamento obtido nos ensaios dos prumos, subestimando em cerca de 45% os deslocamentos transversais medidos.

Por fim, foi analisada a influência de diferentes tipos de imperfeições iniciais no comportamento e resistência dos prumos, tendo-se concluído que:

- As imperfeições iniciais diminuem significativamente a resistência dos prumos, sendo que a influência da rotação na base inferior do prumo na resistência dos prumos é ligeiramente superior à influência do valor e sentido da excentricidade da força. É igualmente possível constatar que a imposição de uma excentricidade da força de sentido contrário à deformada imposta pela rotação na base inferior do prumo, permite aumentar a resistência do prumo.
- A presença de defeitos na chapa da base inferior do prumo, de configuração tal que não seja possível o contacto total com a fundação após ser vencida a folga inicial, é o tipo de imperfeição mais gravoso, já que se obtém a menor resistência. Como tal, é extremamente importante que previamente à utilização dos prumos seja verificado o estado das chapas das bases dos prumos, e se forem detectados defeitos, estes devem ser corrigidos, ou na sua impossibilidade, os prumos não devem ser utilizados.

7.1.4. Curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis

No Capítulo 5 foi apresentada uma proposta de curva de encurvadura para o dimensionamento de prumos telescópicos extensíveis. Esta curva baseou-se nos 34 resultados experimentais e em 79 resultados numéricos.

Os resultados numéricos incluem os modelos utilizados para realizar uma análise de sensibilidade dos prumos na qual se concluiu que (i) é preferível diminuir o diâmetro dos furos, ou se tal não for possível aumentar o afastamento entre furos, (ii) se deve optar por escolher para o tubo interior um aço de resistência superior à do aço do tubo exterior. Salienta-se que estas observações apenas são válidas se a ligação entre os tubos não passar a ser a componente condicionante da resistência do prumo.

Os 79 resultados numéricos referidos, incluem igualmente os obtidos através dos modelos desenvolvidos para efectuar o pré-dimensionamento dos prumos, para as diferentes classes e comprimentos máximos definidos na norma EN 1065:1998.

A curva proposta devolve valores da resistência dos prumos que correspondem ao quantilho de cerca de 5% quando comparados com os valores experimentais e numéricos. Foi igualmente determinado o coeficiente de segurança a aplicar aos valores de resistência obtidos a partir da curva, através do método especificado no Eurocódigo 0. Com base nestes dois dados é possível aumentar consideravelmente (cerca de 50%) a resistência de cálculo dos prumos ensaiados (Classe A) em comparação com a resistência dada pelas normas EN 1065:1998 e EN 12812:2004.

Foi ainda sugerido a introdução de um coeficiente de segurança adicional no caso de serem utilizados prumos com imperfeições adicionais, ou superiores, às consideradas neste estudo.

7.1.5. Certificação de prumos telescópicos extensíveis

No Capítulo 6 foi apresentado e exemplificada a aplicação do processo de certificação de prumos especificado na norma EN 1065:1998, recorrendo aos prumos utilizados no estudo experimental.

O processo de certificação consiste em duas etapas distintas: (i) classificação do tipo de prumo, e (ii) controlo dimensional do tipo de prumo.

A classificação do prumo pode ser efectuada a partir de resultados experimentais ou numéricos. Ambas as hipóteses foram aplicadas, tendo sido apontadas soluções de compromisso nos pontos em que a norma é omissa ou incompleta.

A norma EN 1065:1998 não define o número exacto de ensaios necessários para classificar um dado tipo de prumo. Como tal estabeleceu-se um critério no qual foi definido que para cada tipo de prumo a classificar, devem ser realizadas 3 séries de 8 ensaios (4 ensaios por cada configuração), para cada comprimento do prumo especificado na norma (máximo, mínimo e intermédio condicionante).

Para determinar o comprimento intermédio condicionante, devem ser realizados 8 ensaios, 4 em cada configuração, aumentando-se progressivamente o comprimento dos prumos, entre o valor mínimo (l_{min}) e máximo (l_{max}), através de incrementos correspondentes a 1/5 da diferença entre l_{max} e l_{min} . No total, para classificar um dado tipo de prumo são necessários 32 ensaios.

Analisou-se o método de redução dos valores de resistência obtidos a partir dos ensaios experimentais para contabilizar a diferença entre as propriedades médias e nominais dos materiais dos tubos dos prumos, tendo-se concluído que o método estipulado na norma EN 1065:1998 conduz a valores de resistência superiores aos obtidos numericamente, para alturas do prumo próximas do comprimento máximo de extensão.

Finalmente, em relação ao processo de controlo dimensional dos prumos, concluiu-se que é possível diminuir o número de secções a controlar, face à reduzida dispersão dos resultados, pelo que se propõe que apenas sejam controladas duas secções por tubo, com três posições de medição, na determinação da espessura dos tubos, por exemplo.

7.1.6. Oportunidades de melhoria da norma EN 1065:1998

Ao longo da presente Dissertação foram identificadas várias oportunidades de melhoria da norma EN 1065:1998, apresentando-se inclusive para alguns desses casos soluções para aperfeiçoar a norma. De seguida são apresentadas as principais oportunidades de melhoria identificadas:

- No Capítulo 3 foi apresentada a equação para determinar a área equivalente do tubo interior do prumo, parâmetro necessário para analisar numericamente o comportamento do prumo a partir do modelo previsto na norma EN 1065:1998, e que esta não indica.
- Ainda no Capítulo 3 foram apontadas outras insuficiências da norma EN 1065:1998, já que a força máxima registada nos ensaios de prumos para as menores alturas foi condicionada pela rotura do pino por interacção corte-flexão, omitindo a norma a verificação da segurança do pino para este modo de rotura.

- Já no Capítulo 4, foi analisado o comportamento dos prumos obtido através do modelo estrutural proposto pela norma EN 1065:1998. As principais observações obtidas são:
 - O comportamento não-linear da mola que simula a evolução da rigidez no apoio inferior do prumo, não permite a detecção numérica da resistência máxima dos prumos, dado o modelo não convergir na mudança do segundo para o terceiro patamar de rigidez (de encastramento para mola elástica com rigidez igual a 3×10^7 N.mm/rad), por o valor da força registada ultrapassar o valor de um modo de instabilidade do prumo para as novas condições de rigidez do sistema.
 - Adicionalmente, comparou-se a configuração da deformada inicial do modelo estipulada na norma EN 1065:1998 com a configuração imposta nos modelos numéricos que simulam os prumos nas condições de ensaio. É possível constatar que, para a altura máxima do prumo ($L=3,5$ m), a deformada especificada na norma EN 1065:1998 é caracterizada por uma amplitude máxima semelhante à imposta no ensaio, mas com maiores deslocamentos iniciais nos tubos, em particular no tubo interior – o tubo condicionante. Para $L=2,0$ m, tendo a deformada imposta de acordo com o modelo da norma EN 1065:1998 uma componente de forma sinusoidal ($L/500 \sin(\pi x/L)$), a configuração deformada do prumo possui, para este comprimento, um máximo a meia altura do prumo (no tubo exterior), o que não se verifica na deformada inicial imposta no modelo ABAQUS E.5 (e nos ensaios).

Como tal, propõe-se a revisão das condições iniciais do modelo estrutural proposto pela norma EN 1065:1998 para o estudo numérico do comportamento de prumos telescópicos extensíveis, sugerindo-se que (i) se aumente de 0,65 para 0,9 o valor da excentricidade da força na base inferior do prumo entre o segundo e o terceiro patamar de rigidez, ou se aumente o valor da rigidez do terceiro patamar, e que (ii) se diminua a amplitude máxima da deformada sinusoidal imposta inicialmente.

- De forma a simplificar o processo de dimensionamento do tipo de prumos previstos na norma EN 1065:1998, propõe-se a adopção da curva de encurvadura apresentada, e de um coeficiente de segurança a aplicar aos valores por ela fornecidos.
- No Capítulo 6, constatou-se que o método proposto na norma, de redução dos valores de resistência obtidos a partir dos ensaios experimentais para contabilizar a diferença entre as propriedades médias e nominais dos materiais dos tubos dos prumos, conduz a valores de resistência superiores aos obtidos numericamente, para alturas do prumo próximas do comprimento máximo.
- Por fim, propõe-se a redução do número de secções a verificar durante o controlo dimensional dos prumos, de modo a se otimizar este procedimento.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Para aprofundar o conhecimento sobre este tipo de elementos, é necessário realizar mais campanhas de ensaios de prumos telescópicos extensíveis com outros tipos de prumos, de modo a aumentar a base de dados experimentais disponível, consolidando assim a curva de encurvadura e os coeficientes de segurança propostos. Sugere-se igualmente o desenvolvimento de um estudo de prumos telescópicos de alumínio.

Seria igualmente interessante estudar o comportamento de prumos com várias utilizações em obra para avaliar a diminuição da resistência deste tipo de elementos em função do seu estado de conservação.

Por fim, sugere-se o estudo de soluções de escoramentos compostas por prumos de grande altura, incluindo a introdução de sistemas de contraventamento adequados.

REFERÊNCIAS

Capítulo 2

- 2.1 *Formwork - A guide to good practice*, 2ª Edição, Concrete Society, 1995, 232 pp.
- 2.2 Hardie, G.M.: *Building construction: Principles, practices, and materials*, Prentice Hall, 1995, 700 pp.
- 2.3 *Guide to flat slab formwork and falsework*, CONSTRUCT, Concrete Society, 2003, 160 pp.
- 2.4 Baptista, AM; Costa e Silva, S.: “Fomento da qualidade na realização de estruturas provisórias de apoio à construção”, *Congresso Nacional da Engenharia de Estruturas*, LNEC, Lisboa, 2002, p 583-594.
- 2.5 SCOSS Topic Paper, "Falsework: Full circle?", *Standing Committee on Structural Safety*, 2002, 8 pp.
- 2.6 Siteo na internet da Inspeção Geral do Trabalho, <http://www.igt.gov.pt/>
- 2.7 *Relatório anual de actividades de 2004*, Inspeção-geral do Trabalho.
- 2.8 *Relatório anual de actividades de 2006*, Inspeção-geral do Trabalho.
- 2.9 *Acidentes de Trabalho*, Direcção Geral de Estudos, Estatística e Planeamento, Ministério do Trabalho e da Solidariedade Social, 2003.
- 2.10 *Causal factors in construction accidents*, Loughborough University and UMIST, Health and Safety Executive, 2003, 202 pp.
- 2.11 *Work-related injuries and ill health in construction*, Health and Safety Executive, 2006.
- 2.12 Documento de trabalho sobre a proposta da Comissão de uma directiva do Conselho que altera a Directiva 89/655/CEE (equipamentos de trabalho no trabalho) , Parlamento Europeu, 2000.
- 2.13 *Improving quality and productivity at work: Community strategy 2007-2012 on health and safety at work*, Comissão Europeia, 2007, 16 pp.
- 2.14 *Statistical analysis of socio-economic costs of accidents at work in the European Union*, Eurostat, Comissão Europeia, 2004, 115 pp.
- 2.15 *Directiva dos produtos da construção (DPC)*, Directiva 89/106/EEC, Comissão Europeia, 1989.
- 2.16 *Peer review of analysis of specialist group reports on causes of construction accidents*, Habilis Ltd, Health and Safety Executive, 2004, 113 pp.
- 2.17 EN 1993 – Eurocode: Design of steel structures – Part 1-1: *General rules and rules for buildings*, Comité Europeu de Normalização, 2003, 91 pp.
- 2.18 Birch, N.; Walker, M.B.A; Lee, C.T.: “Safe working loads for adjustable steel props; the influence of prop conditions and site workmanship”, *Construction Industry Research and Information Association*, CIRIA Technical Note 79. London, 1977, 32 pp.
- 2.19 Burrows, B.: *The organisation and quality of falsework construction - A socio economic study*, Tese de Doutoramento, Universidade de Warwick, UK, 1989.
- 2.20 Hadipriono, F.; Wang, H.: “Analysis of causes of falsework failures in concrete structures”, *Journal of Constructional Engineering and Management*, **112**/1, 1986, p 112-121.
- 2.21 Ikäheimonen, J.: *Construction loads on shores and stability of horizontal formworks*, Tese de Doutoramento, KTH - Royal Institute of Technology, 1997.
- 2.22 Duan, M.Z.; Chen, W.F.: *Effects of nonuniform and impact loading on slab-shores in concrete placing and shore removal during construction*, CE-STR-95-20, Purdue University, 1995, 39 pp.
- 2.23 Ferguson, S.: “Formwork shore design loads: an evaluation of current practice”, *Concrete*, Concrete Society, **35**/5, 2001, p 28-30.
- 2.24 Grundy, P.; Kabaila, A.: “Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings”, *ACI Journal Proceedings*, **60**/12, 1963, p 1729-1738.
- 2.25 Liu, X.; Chen, W.F., Bowman, M.: “Shore-slab interaction in concrete buildings”, *Journal of Constructional Engineering and Management*, **112**/2, 1986, p 227-244.
- 2.26 El-Sheikh, M.; Chen, W.F.: “Maximum probabilistic shore load in multistorey RC buildings”, *Computers and Structures*, **32**/6, 1989, p 1347-1357.
- 2.27 Mossallam, K.; Chen, W.F.: “Determining shoring loads for reinforced concrete construction”, *ACI Structural Journal*, **88**/3, 1991, p 340-350.

- 2.28 *Investigation into aspects of falsework*, School of Civil Engineering, University of Birmingham, Health and Safety Executive, 2001, 211 pp.
- 2.29 Decreto-Lei n.º 273/2003 de 29 de Outubro de 2003, Ministério da Segurança Social e do Trabalho, 2003.
- 2.30 Bragg, S.L.: *Final Report of the Advisory Committee on Falsework*, London, HMSO, 1975, 151 pp.
- 2.31 BS 5975:1982, *Code of practice for falsework*, British Standards, 1982.
- 2.32 BS 5975:1996, *Code of practice for falsework*, British Standards, 1996, 150 pp.
- 2.33 EN 1065:1998, *Adjustable telescopic steel props*, Comité Européu de Normalização, 1998, 23 pp.
- 2.34 EN 12812:2004, *Falsework – Performance requirements and general design*, Comité Européu de Normalização, 2004, 43 pp.
- 2.35 BS 4074:1982, *Specification for metal props and strut*, British Standards, 1982, 12 pp.
- 2.36 BS 5507 – Parte 3:1982, *Methods of test for falsework equipment. Props*, British Standards, 1982, 8 pp.
- 2.37 BS EN 10025-1:2004, *Hot rolled products of non-alloy structural steels. General delivery conditions*, British Standards, 2004, 42 pp.
- 2.38 Ferry Borges, J.; Castanheta M.: *Structural safety*, Course 101, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985, 338 pp.
- 2.39 EN 74-1:2005, *Couplers, spigot pins and baseplates for use in falsework and scaffolds. Couplers for tubes. Requirements and test procedures*, Comité Européu de Normalização, 2005, 48 pp.
- 2.40 EN 39:2001 *Loose steel tube for tube and coupler scaffolds*, Comité Européu de Normalização, 2001, 18 pp.
- 2.41 EN 12811, *Temporary works equipment (Partes 1, 2 e 3)*, Comité Européu de Normalização.
- 2.42 Webster, J.G.: *The measurement, instrumentation and sensors handbook*, Springer, 1999, 2822 pp.
- 2.43 Voelkel, G.E.: “Kommentar zur neuen Norm DIN EN 1065;baustützen aus stahl mit ausziehvorrichtung”, *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen*, Verlag, 1999, p 362-276.
- 2.44 NP EN 10002-1:2006, *Materiais metálicos-Ensaio de tracção, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*, Comité Européu de Normalização, 2006, 60 pp.
- 2.45 EN 1993 – Eurocode: Design of steel structures – Part 1-8: *Design of joints*, Comité Européu de Normalização, 2005, 135 pp.
- 2.46 DIN 18800, *Structural steelwork (Partes 1 a 7)*, Deutsches Institut für Normung.
- 2.47 <http://www.mspc.eng.br/matr/resmat0740.shtml>
- 2.48 EN ISO 9001:2000, *Quality management systems - Requirements*, Comité Européu de Normalização, 2000, 23 pp.
- 2.49 EN ISO 9002:1994, *Quality systems - Model for quality assurance in production, installation and servicing*, Comité Européu de Normalização, 1994, 10 pp.
- 2.50 EN 10204-1:2004, *Metallic products - Types of inspection documents*, Comité Européu de Normalização, 2004, 12 pp.
- 2.51 Baptista, A.M.: “Disposições legislativas europeias aplicáveis às estruturas provisórias de apoio à construção”, *Actas do IV Congresso de Construção Metálica e Mista*, Lisboa, 2003, p 419-428.

Capítulo 3

- 3.1 EN 1065:1998, *Adjustable telescopic steel props*, Comité Européu de Normalização, 1998, 23 pp.
- 3.2 Relatório do CATIM sobre ensaios de prumos telescópicos extensíveis.
- 3.3 Panzeri, N.; Poggi, C.: “Analisi numeriche e sperimentali per la determinazione della capacità portante di puntelli metallici in accordo alla norma UNI EN 1065”, *Costruzioni Metalliche*, **5**, 2002, p 29-39.
- 3.4 BS 4360:1990, *Specification for weldable structural steels*, British Standards, 1990, 46 pp.
- 3.5 BS 970:1955, *Specification for wrought steels for mechanical and allied engineering purposes. General inspection and testing procedures and specific requirements for carbon, carbon manganese, alloy and stainless steels*, British Standards, 1955, 54 pp.

- 3.6 ISO 7500-1:2004, *Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system*, Organização Internacional de Certificação, 2004, 17 pp.
- 3.7 Webster, J.G.: *The measurement, instrumentation and sensors handbook*, Springer, 1999, 2822 pp.
- 3.8 Hutchinson, J.W.; Koiter, W.T.: “Postbuckling theory”, *Applied Mechanics Reviews*, **23/12**, 1970, p 1353-1366.
- 3.9 Horton, W.H.; Durham, S.C.: “Imperfections, a main contributor to scatter in experimental values of buckling load”, *International Journal of Solids and Structures*, **1/1**, 1965, p 59-72.
- 3.10 Batterman, S.C.: “Plastic buckling of axially compressed cylindrical shells”, *AIAA Journal*, **3/2**, 1964, p 316-325.
- 3.11 Arbocz, J.; Babcock, C.: “The effect of general imperfections on the buckling of cylindrical shells”, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, **36/1**, 1969, p 28-38.
- 3.12 Singer, J.; Arbocz, J.; Weller, T.: *Buckling experiments, experimental methods in buckling of thin-walled structures*, Volumes 1 e 2, Wiley, 2002.
- 3.13 Arantes e Oliveira, E.R.: *Elementos da teoria da elasticidade*, IST Press - Instituto Superior Técnico, 1999, 176 pp.

Capítulo 4

- 4.1 Taylor R.L., Zienkiewicz, O.C.: *The finite element method*, Elsevier, 2006, 384 pp.
- 4.2 Crisfield, M.A.: *Non-linear finite element analysis of solids and structures*, Wiley, 1991, 362 pp.
- 4.3 Bathe, K.J.: *Finite element procedures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995, 1037 pp.
- 4.4 Timoshenko, S.P.; Gere, J.: *Theory of elastic stability*, McGraw-Hill, 1961, 541 pp.
- 4.5 Britvec, S.J.: *The stability of elastic systems*, Pergamon Unified Eng. Series, vol. 12, 1973, 460 pp.
- 4.6 Thompson, J.M.T.; Hunt, G.W.: *Elastic instability phenomena*, J. Wiley and Sons, New York, 1984, 222 pp.
- 4.7 Koiter W.T.: “Current trends in the theory of buckling”, *Buckling of Structures*, IUTAM Symposium, Springer-Verlag, 1974, p 1-16.
- 4.8 Budiansky, B.: “Theory of buckling and post-buckling behavior of elastic structures”, *Advances in Applied Mechanics*, **14**, 1974, p 1-65.
- 4.9 Hutchinson, J.: “Plastic buckling”, *Advances in Applied Mechanics*, **14**, 1974, p 67-144.
- 4.10 Chilver, A.: “Elastic stability of structures”, *Stability – Fourteen special lectures*, University of Waterloo, 1972, p 41-62.
- 4.11 Reis A.; Camotim, D.: *Estabilidade estrutural*, McGraw-Hill, 2001, 470 pp.
- 4.12 Allen H.G.; Bulson, P.S.: *Background to buckling*, McGraw Hill, London, 1980, 532 pp.
- 4.13 Langhaar, H.L.: *Energy methods in applied mechanics*, Krieger Pub Co., 1989, 364 pp.
- 4.14 Huseyin, K.: *Nonlinear theory of elastic stability*, Noordhoff Int., 1975, 242 pp.
- 4.15 Dym, C.L.: *Stability theory and its applications to structural mechanics*, Noordhoff Int. Publishing, Leyden, 1974, 208 pp.
- 4.16 Waszczyszyn, Z.; Cichon, C.; Radwanska, M.: *Stability of structures by finite element methods*, Elsevier, 1994, 482 pp.
- 4.17 Newmark, N.M.: “Numerical procedure for computing deflections, moments and buckling loads”, *ASCE Transactions*, **108**, 1943, p 1161-1234.
- 4.18 Pignataro, M.; Rizzi, N.; Luongo, A.: *Stability, bifurcation and postcritical behavior of elastic structures*, Series: Developments in Civil Engineering, **39**, Elsevier, 1991, 358 pp.
- 4.19 Prinja, N.K.; Puri, A.K.: *An introduction to the use of material models in FE*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 2005, 88 pp.
- 4.20 Hinton, E.: *Introduction to non-linear finite element analysis*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 1992, 260 pp.
- 4.21 Crocombe, A.D.: *How to tackle non-linear finite element analysis*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 2002, 90 pp.

- 4.22 Konter, A.: *How to undertake contact & friction analysis*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 2000, 63 pp.
- 4.23 *Contact lecture notes*, SIMULIA, 2006.
- 4.24 Laursen, T.A.: *Computational contact and impact mechanics*, Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis, Springer, 2003, 454 pp.
- 4.25 Wriggers, P.: *Computational contact mechanics*, Springer, 2006, 464 pp.
- 4.26 Hellen, T.: *How to use elements effectively*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 2003, 120 pp.
- 4.27 Baguley, D; Hose, D.R.: *How to interpret finite element results*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 1997, 66 pp.
- 4.28 Baguley, D; Hose, D.R.: *How to model with finite elements*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 1997, 147 pp.
- 4.29 Hellen, T.: *How to use beam, plate and shell elements*, National Agency for Finite Element Methods and Standards, 2007, 104 pp.
- 4.30 Singer, J.; Arbocz, J.; Weller, T.: *Buckling experiments, experimental methods in buckling of thin-walled structures*, Volumes 1 e 2, Wiley, 2002.
- 4.31 EN 1993 – Eurocode: Design of steel structures – Part 1-1: *General rules and rules for buildings*, Comité Européen de Normalização, 2003, 91 pp.
- 4.32 EN 1065:1998, *Adjustable telescopic steel props*, Comité Européen de Normalização, 1998, 23 pp.
- 4.33 Serebrenick, G.: *Análise da estabilidade de colunas esbeltas parcialmente enterradas em uma fundação elástica não-linear*, Tese de Mestrado, Pontificia Universidade Católica (PUC), Rio de Janeiro, 2005, 115 pp.
- 4.34 Thompson, J.M.: *Eigenvalue branching configurations and the Rayleigh-Ritz procedure*, NASA Technical Report 8, 1963.
- 4.35 TableCurve 2D (versão 5.01), Systat Software Inc., 2006.
- 4.36 Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., ABAQUS Standard (versão 6.6.1), 2006.
- 4.37 *Convergence lecture notes*, SIMULIA, 2006.
- 4.38 <http://hypertextbook.com/facts/2005/steel.shtml>
- 4.39 Gorst, N.J.S.: *Friction in temporary works*, University of Birmingham, 2003, 62 pp.
- 4.40 Moen, C.; Schafer, B.: *Direct strength design for cold-formed steel members with perforations*, Progress Report No. 1, John Hopkins University.
- 4.41 André, J.; Baptista, A.M.: “Simulação numérica do comportamento de prumos telescópicos extensíveis”, *Actas das 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (JPEE2006)*, A.M. Baptista et.al. (eds.), Lisboa, 2006. (artigo completo em cd-rom Proceedings).
- 4.42 El-Sheikh, M.; Chen, W.F.: *Behavior and strength of telescopic steel shores*, CE-STR-88-7, Purdue University, 1988, 27 pp.
- 4.43 *Subroutines lecture notes*, SIMULIA, 2006.
- 4.44 André, J.; Baptista, A.M.: “Stability of telescopic props for temporary structures”, *Book of Abstracts of III European Conference on Computational Mechanics: Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering (III ECCM)*, C.A.M. Soares et al. (eds.), Springer, 681, Lisboa, 2006. (artigo completo em cd-rom Proceedings).
- 4.45 Baptista, A.M.: *Modèle non linéaire géométrique et matériel fondé sur l'analyse des déformations globales des sections*, Tese de doutoramento da Universidade Blaise Pascal, Clermont-Ferrand (França), 1994, 480 pp.
- 4.46 Baptista, A.M.; Muzeau, J.P.: “Modèle de comportement non-linéaire matériel d’une section rectangulaire fondé sur une analyse des déformations”, *Construction Métallique*, **1**, 1992.
- 4.47 Baptista, A.M.: “Formulação analítica do cálculo de secções de elementos estruturais metálicos em regime elastoplástico”, *VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional*, Évora, 2003.
- 4.48 Baptista, A.M.; Muzeau, J.P.: “Modèle analytique en déformations globales pour l’étude élastique non linéaire de sections industrielles”, *Construction Métallique*, **4**, 1996.

Capítulo 5

- 5.1 *Manual on stability of steel structures*, European Convention for Constructional Steelwork, 1976, 333 pp.
- 5.2 EN 1993 – Eurocode: Design of steel structures – Part 1-1: *General rules and rules for buildings*, Comité Européen para a Normalização (CEN), 2003, 91 pp.
- 5.3 Galambos, T.V.: *Guide to stability design criteria for metal structures*, Wiley, 1998, 944 pp.
- 5.4 Toma, S.; Chen, W.F.: “Post-buckling behavior of tubular beam-columns”, *Journal of Structural Engineering*, **109**/8, 1983, p 1073-1090.
- 5.5 Toma, S.; Honda, Y.; Chen, W.F.: *Effect of initial deflection and residual stress on tubular column strength*, CE-STR-89-11, Purdue University, 1989, 10 pp.
- 5.6 Peng, J.L.; Pan, A.D.; Chen, W.F.; Yen, T.; Chan, S.L.: “Structural modeling and analysis of modular falsework systems”, *Journal of Structural Engineering*, **123**/9, 1997, p 1245-1251.
- 5.7 Maquoi, R.; Rondal, J.: “Mise en équation des nouvelles courbes européennes de flambement”, *Revue Construction Métallique*, **1**, 1978.
- 5.8 *Rules for member stability in EN 1993-1-1*, European Convention for Constructional Steelwork, 2006, 119 pp.
- 5.9 Brush, D.O.; Almroth, B.O.: *Buckling of bars, plates and shells*, McGraw Hill, New York, 1975, 416 pp.
- 5.10 Yoo, C.H.; Siegel, C.R.: “Column loadings on telescopic power cylinders”, *Computers & Structures*, **22**/3, 1986, p 245-251.
- 5.11 EN 1065:1998, *Adjustable telescopic steel props*, Comité Européen de Normalização, 1998, 23 pp.
- 5.12 NP EN 1990:2006, *Eurocódigo: Bases para o projecto de estruturas*, Instituto Português da Qualidade, 2006, 89 pp.
- 5.13 EN 12812:2004, *Falsework – Performance requirements and general design*, Comité Européen de Normalização, 2004, 43 pp.
- 5.14 Baptista, A.M.; Muzeau, J.P.: “Formulação analítica do cálculo de secções tubulares circulares em regime elastoplástico”, *Actas do III Congresso de Construção Metálica e Mista*, Aveiro, 2001, p 513-522.

Capítulo 6

- 6.1 EN 1065:1998, *Adjustable telescopic steel props*, Comité Européen de Normalização, 1998, 23 pp.
- 6.2 NP EN 10002-1:2006, *Materiais metálicos-Ensaio de tracção, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*, Comité Européen de Normalização, 2006, 60 pp.

ANEXO A

ENSAIOS DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS REALIZADOS NO CATIM

A.1. Resumo dos resultados dos ensaios

Neste Anexo é apresentado um resumo dos resultados obtidos a partir dos ensaios de prumos telescópicos extensíveis, realizados no Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (CATIM), segundo a norma EN 1065:1998.

No total foram ensaiados cinco tipos de prumos, tendo sido realizados para cada um deles três ensaios para cada uma das três alturas testadas. De notar que algumas dimensões dos prumos, como sejam a espessura das paredes dos tubos e as dimensões das chapas das bases, não satisfazem os requisitos mínimos especificados na norma EN 1065:1998 para qualquer das cinco classes.

Finalmente, considerou-se que os prumos são constituídos por aço do tipo S275 de acordo com a norma EN 10025, dado que esta informação não foi facultada.

As tabelas seguintes resumem as características dos prumos e os resultados dos ensaios realizados no CATIM.

A.1.1. Prumo PBB-3000-18-18

Tabela A.1 – Características do prumo PBB-3000-18-18.

Comprimento máximo de regulação (mm)	Comprimento mínimo de regulação (mm)	Tubo interior		Tubo Exterior		Base		Cavilha
		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Dimensões (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
3000	1620	40	1,8	48	1,8	115 x 115	3	10

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-18-18.

Comprimento regulado (mm)	Força Máxima (kN)		Modo de rotura
	Por prumo	Média	
2,94	9,2	10,7	Dobragem do tubo interior
	12,2		
	10,6		
2,75	17,0	16,4	Dobragem do tubo interior
	15,9		
	16,4		
2,50	25,3	26,2	Deformação da cavilha, anilha, e furos do tubo interior na zona da cavilha
	26,1		
	27,2		

A.1.2. Prumo PBB-3000-15-15

Tabela A.3 – Características do prumo PBB-3000-15-15.

Comprimento máximo de regulação (mm)	Comprimento mínimo de regulação (mm)	Tubo interior		Tubo Exterior		Base		Cavilha
		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Dimensões (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
3000	1620	40	1,5	48	1,5	115x 115	3	10

Tabela A.4 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-15-15.

Comprimento regulado (m)	Força Máxima (kN)		Modo de rotura
	Por prumo	Média	
2,94	9,1	10,3	Dobragem do tubo interior
	10,2		
	11,5		
2,50	24,4	23,4	Deformação da cavilha, anilha, e furos do tubo interior na zona da cavilha
	22,0		Dobragem do tubo interior
	23,8		
2,20	21,3	22,5	Deformação da cavilha, anilha, e furos do tubo interior na zona da cavilha
	23,4		
	22,9		

A.1.3. Prumo PBB-4000-18-18

Tabela A.5 – Características do prumo PBB-4000-18-18.

Comprimento máximo de regulação (mm)	Comprimento mínimo de regulação (mm)	Tubo interior		Tubo Exterior		Base		Cavilha
		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Dimensões (mm)	Espessura (mm)	
4000	2160	40	1,8	48	1,8	115x 115	3	10

Tabela A.6 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-4000-18-18.

Comprimento regulado (m)	Força Máxima (kN)		Modo de rotura
	Por prumo	Média	
3,90	7,9	7,6	Dobragem do tubo interior
	7,3		
	7,6		
3,20	16,8	16,9	Dobragem do tubo interior
	14,5		
	19,5		
2,50	23,7	25,7	Deformação da cavilha, anilha, e furos do tubo interior na zona da cavilha
	26,7		
	26,8		

A.1.4. Prumo PBB-3000-20-20

Tabela A.7 – Características do prumo PBB-3000-20-20.

Comprimento máximo de regulação (m)	Comprimento mínimo de regulação (m)	Tubo interior		Tubo Exterior		Base		Cavilha
		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Dimensões (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
3,00	1,62	40	2,0	48	2,0	115x 115	3	10

Tabela A.8 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-20-20.

Comprimento regulado (m)	Força Máxima (kN)		Modo de rotura
	Por prumo	Média	
3,00	16,3	16,1	Dobragem do tubo interior
	14,4		
	17,5		
2,75	15,7	17,2	Dobragem do tubo interior
	17,4		
	18,5		
2,50	19,2	19,6	Deformação da cavilha, anilha, e furos do tubo interior na zona da cavilha
	20,8		
	18,7		

A.1.5. Prumo PBB-4000-20-20

Tabela A.9 – Características do prumo PBB-4000-20-20.

Comprimento máximo de regulação (m)	Comprimento mínimo de regulação (m)	Tubo interior		Tubo Exterior		Base		Cavilha
		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Dimensões (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
4,00	2,16	40	2,0	48	2,0	115x 115	3	10

Tabela A.10 – Resultados dos ensaios do prumo PBB-3000-20-20.

Comprimento regulado (m)	Força Máxima (kN)		Modo de rotura
	Por prumo	Média	
3,90	11,7	10,1	Dobragem do tubo interior
	8,3		
	10,3		
3,50	16,6	15,6	Dobragem do tubo interior
	14,7		
	15,4		
3,00	21,6	21,2	Deformação da cavilha, anilha, e furos do tubo interior na zona da cavilha
	20,3		
	21,7		

ANEXO B

ENSAIOS DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS REALIZADOS NO LNEC

B.1. Ensaio preliminares

Antes do início de cada série de ensaios, i.e. previamente aos ensaios à rotura de prumos em cada uma das alturas, foi realizado uma análise sobre o comportamento do prumo em regime elástico, levando a força de ensaio a cerca de 20% da força máxima teórica obtida através de modelos numéricos.

Durante estes estudos preliminares foi (i) analisado o funcionamento do dispositivo de ensaio, em particular o acessório onde assenta a chapa da base inferior do prumo; (ii) verificada a correcta aplicação das condições iniciais de ensaio; e (iii) definido o procedimento de ensaio a seguir para cada uma das alturas ensaiadas de modo a determinar a resistência máxima dos elementos nas condições de ensaio indicadas na norma EN 1065:1998.

A primeira altura ensaiada foi a correspondente à extensão máxima do prumo, i.e. $L=3,5$ m, depois a altura mínima, i.e. $L=2,0$ m, e finalmente as cinco posições intermédias.

B.1.1. Ensaio de prumos com a altura máxima ($L=3,5$ m)

A Tabela B.1 caracteriza uma parte dos ensaios realizados durante o estudo preliminar para $L=3,5$ m. A coluna “Posição N^o” diz respeito à alteração da posição de ensaio devido à rotação do prumo em relação ao seu eixo longitudinal, de modo a realizar ensaios em duas posições segundo o eixo de menor e maior inércia do tubo interior. Assim as posições 1 e 3 correspondem à posição de ensaio especificada pela norma EN 1065:1998, enquanto que as posições 2 e 4 referem-se à posição em que prumo flecte segundo o eixo de maior inércia do tubo interior. Na coluna “Configuração”, “N” diz respeito à configuração normal e “I” à configuração invertida do prumo. Finalmente, na coluna “Comprimento” são representadas as identificações das alturas de ensaio dos prumos: (i) altura mínima (L_1), (ii) altura crítica intermédia (L_2), (iii) altura máxima (L_3) e (iv) alturas intermédias (L_4 a L_8).

Os ensaios foram realizados até metade da carga máxima (20 kN) prevista pelos modelos numéricos desenvolvidos anteriormente. Até ao valor da carga máxima aplicada, 10 kN, não se registaram deformações plásticas, pelo que estes ensaios caracterizaram uma grande parte do comportamento elástico do prumo nas condições de ensaio previstas na norma EN 1065:1998.

Para o comprimento em análise, foi definida a seguinte posição dos transdutores: (T_1) a um quarto de vão; (T_2) secção do tubo exterior correspondente ao final do comprimento de intersecção entre os dois tubos; (T_3) secção do tubo interior correspondente ao início do comprimento de intersecção entre os dois tubos, e (T_4) a três quartos de vão. Os transdutores T_1 e T_4 possuíam um curso máximo de 100 mm, enquanto que os transdutores T_2 e T_3 possuíam um curso máximo de 200 mm.

Tabela B.1 – Estudo inicial (1) realizado para $L=3,5$ m.

Ensaio N°	Prumo N°	Posição N°	Configuração	Comprimento	Identificação da inclinação
1 a 3	1	1	N	L_3	inc1
4 a 6	2	1	N	L_3	inc1
7 a 11	2	1	N	L_3	inc0
12	2	1	N	L_3	inc1
13	2	1	N	L_3	inc2
14 a 20	2	1	N	L_3	inc3
21 a 25	2	1	N	L_3	inc4
26 a 30	2	1	N	L_3	inc5
31 a 39	3	1	N	L_3	inc5
40 a 45	3	1	N	L_3	inc6
46 a 49	3	3	N	L_3	inc6
50 a 54	4	1	N	L_3	inc6
55 a 58	4	1	N	L_3	inc7
59 a 64	4	3	N	L_3	inc7
65 a 67	4	2	N	L_3	inc7
68 a 70	4	4	N	L_3	inc7
71	4	1	N	L_3	inc7

No início deste estudo pretendeu-se simular o comportamento do prumo (na posição de máxima extensão) nas condições de ensaio previstas na norma EN 1065:1998, i.e., rotação na base inferior correspondente a $1,5^\circ$, equivalente à soma da rotação devida à folga entre os dois tubos, e 1° (curvatura inicial do prumo).

Nesta fase, o zero do clinómetro de bolha de ar foi medido ao nível da chapa da base do acessório utilizado para impor o ângulo de rotação na base inferior. Como tal, e observando a Tabela B.2, a inclinação (*inc1*) utilizada nos seis primeiros ensaios corresponderia aproximadamente a $1,5^\circ$. No entanto, veio a verificar-se posteriormente (a partir do ensaio 40), que o mais correcto seria considerar o zero do clinómetro de bolha de ar ao nível da chapa da base da máquina, já que o acessório assenta nesta peça. Em conclusão, a inclinação imposta nos seis primeiros ensaios foi menor do que $1,5^\circ$.

Tabela B.2 – Ângulos medidos através do clinómetro.

Ângulo medido em graus (°)	Ângulo relativo à chapa do acessório inferior (°)	Ângulo relativo à chapa da máquina de ensaio (°)	Identificação do ângulo
2,417	-	-	zero (máquina ensaio)
2,000	-	-	zero (chapa acessório)
2,000	-	-	inc0
2,308	0,308	-0,108	inc12
2,442	0,442	0,025	inc11
2,567	0,567	0,150	inc13
2,650	0,650	0,233	inc14
2,717	0,717	0,300	inc7
2,800	0,800	0,383	inc5
2,842	0,842	0,425	inc4
2,883	0,883	0,467	inc6 / inc9
2,967	0,967	0,550	inc8
3,000	1,000	0,583	inc3
3,150	1,150	0,733	inc2
3,482	1,482	1,065	inc1
3,925	1,925	1,508	inc10

Contudo, os seis primeiros ensaios permitiram a definição da velocidade de ensaio, 0,01 mm/s, para caracterizar o comportamento dos prumos em regime elástico. Os ensaios foram realizados sem a aplicação de qualquer ciclo de pré-carga-descarga.

Pode observar-se (ver¹⁵ Figura B.1) que existe alguma dispersão entre os resultados experimentais, e uma mudança do declive das curvas devido à evolução do ajuste da chapa da base inferior do prumo com a chapa do prato do acessório. Para corroborar esta conclusão a partir da interpretação do gráfico, foi medida, em todos os ensaios (com o objectivo de caracterizar o comportamento elástico dos prumos), em vários patamares de força, a folga entre as duas chapas com recurso a uma craveira digital, permitindo identificar o intervalo de forças em que as duas chapas entram em contacto total. Comparando as várias

¹⁵ Ao longo deste anexo irão ser apresentadas figuras com resultados experimentais. Em geral, apenas irão ser ilustrados resultados de medições obtidos por um dos transdutores de deslocamento, para mais fácil interpretação do conteúdo da figura. Assim, o transdutor seleccionado será aquele que possui maiores valores de deslocamento transversal.

curvas com a curva obtida pelo modelo numérico ABAQUS N.2 (ver o Capítulo 4), verifica-se que existe uma diferença considerável na rigidez inicial obtida pelos dois métodos: numérico e experimental.

Com base nesta evidência, foi decidido diminuir o ângulo imposto na base inferior até igualar o valor, dado pela equação (3.5), do ângulo de rotação na base inferior do prumo permitido pela folga existente entre os dois tubos, para verificar a sua validade.

Ao impor-se este ângulo de rotação, é de esperar um melhor ajuste entre a rigidez inicial determinada pelos dois métodos – numérico e experimental – já que, (i) não implica deformações dos tubos; (ii) a influência no comportamento do prumo, das folgas existentes na base inferior é menor.

Foram então efectuados os ensaios 7 a 30. A Figura B.2 ilustra os resultados dos ensaios 12 a 30. Dado o elevado número de curvas semelhantes, apenas se ilustra uma curva por cada conjunto de ensaios.

É possível observar um comportamento inesperado, caracterizado por um troço em que se regista uma diminuição de deslocamentos transversais quando a carga aplicada aumenta. De referir que nas curvas obtidas com os transdutores T_1 e T_4 este efeito não é tão significativo, não se registando uma diminuição do deslocamento que permanece constante durante o mesmo troço.

Este comportamento é justificado por:

- (i) A chapa do prato do acessório utilizado para aplicar o ângulo, não estava bem nivelada com a chapa da cunha do acessório, devido a um ligeiro empenamento resultante do seu fabrico, pelo que existiam folgas que alteravam a rigidez do sistema;
- (ii) A posição do acessório inferior não era o correcto, provocando uma excentricidade que contrariava o sentido da flexão da peça.

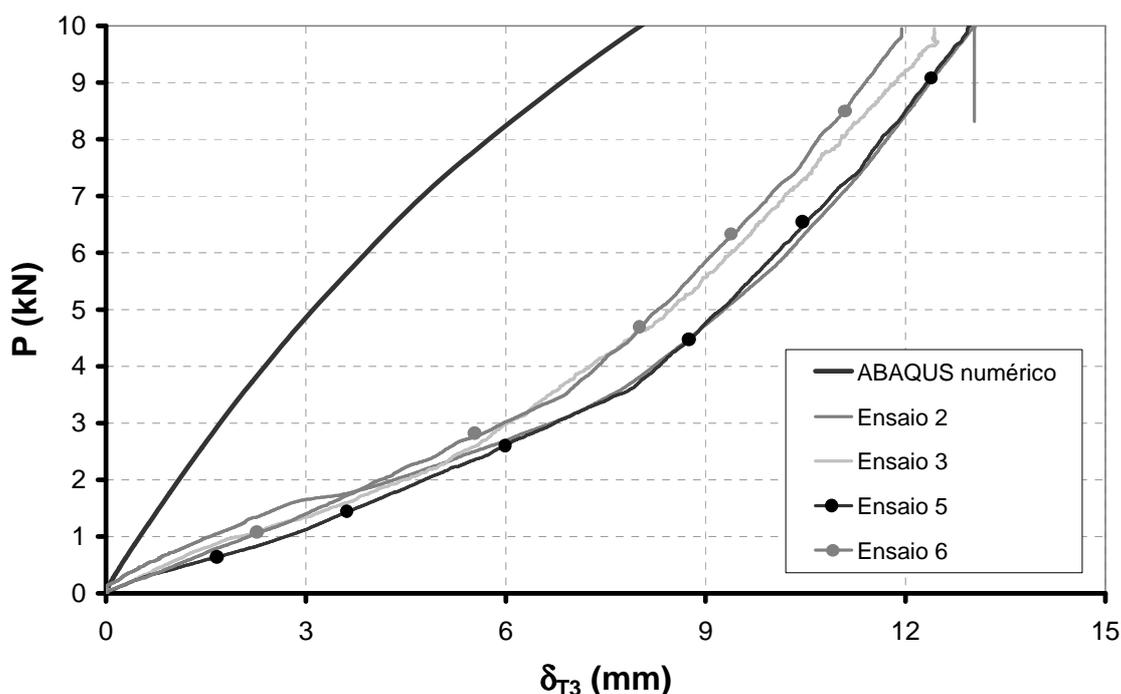


Figura B.1 – Curvas P - δ_{T3} obtidas nos ensaios 1 a 6 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, $incl$).

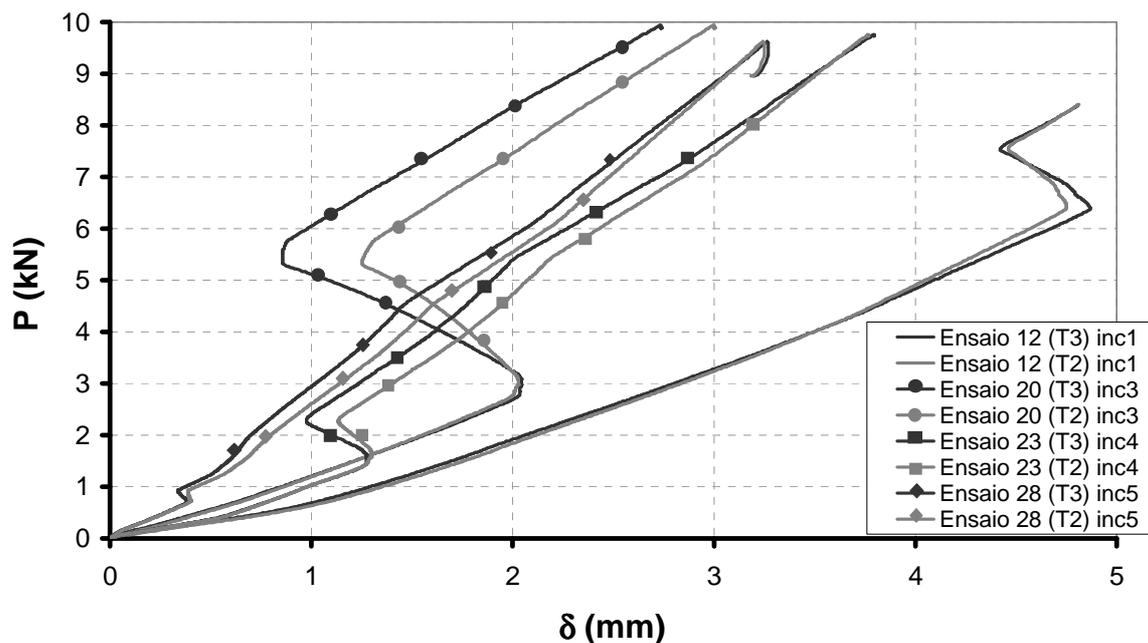


Figura B.2 – Curvas P- δ obtidas nos ensaios 12 a 30 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m).

De seguida efectuaram-se os ensaios 31 a 39 (*inc5*). Estes ensaios foram já realizados com o acessório inferior na posição correcta, estabelecida com o auxílio de um fio-de-prumo.

Observa-se uma elevada heterogeneidade nos resultados obtidos, ver a Figura B.3. Para alguns ensaios ainda se registam troços não característicos do comportamento espectável do prumo. A justificação para tal comportamento, reside no facto de a chapa do prato do acessório não ter sido ainda rectificadas, de modo a que fosse possível o melhor ajuste entre a chapa da cunha e a chapa do prato.

Nos ensaios 40 a 49 com a inclinação *inc6* na base inferior, introduziu-se outro elemento ao procedimento de ensaio: previamente ao registo dos diagramas força-deslocamento, foram efectuados ciclos carga-descarga até 4 kN (1/5 da força máxima de ensaio prevista) de modo a permitir o ajuste dos elementos do prumo nos acessórios de ensaio, minorando os efeitos das folgas existentes no sistema. Começou-se igualmente a registar a trajectória da descarga da força aplicada em cada ensaio.

Da análise dos resultados destes ensaios, observou-se uma maior uniformidade nas trajectórias de equilíbrio (carga e descarga), não se observando o efeito de diminuição de deslocamento para aumento da força aplicada. No entanto, foram detectadas irregularidades no comportamento dos prumos, já que os resultados dos ensaios 46 a 49, realizados rodando 180° os tubos do prumo, diferem substancialmente dos resultados dos restantes ensaios. Este facto é devido à falta de ajuste entre a chapa do prato e a chapa da cunha do acessório inferior.

Face a estes problemas, foi decidido rectificar a chapa do prato do acessório, o que foi feito nas oficinas de mecânica do LNEC. Como tal, a partir do ensaio 50, os problemas de funcionamento do acessório inferior foram resolvidos. Os diagramas força-deslocamento transversal (carga e descarga) dos ensaios 50 a 54

(*inc6*) estão ilustrados na Figura B.4¹⁶. Pode observar-se uma melhor uniformidade dos resultados dos vários ensaios. Nota-se ainda uma mudança de declive nas curvas experimentais porque existem folgas entre a chapa da base inferior do prumo e a chapa do prato do acessório inferior. A mudança de declive corresponde ao instante em que ocorre contacto entre as duas superfícies na sua totalidade.

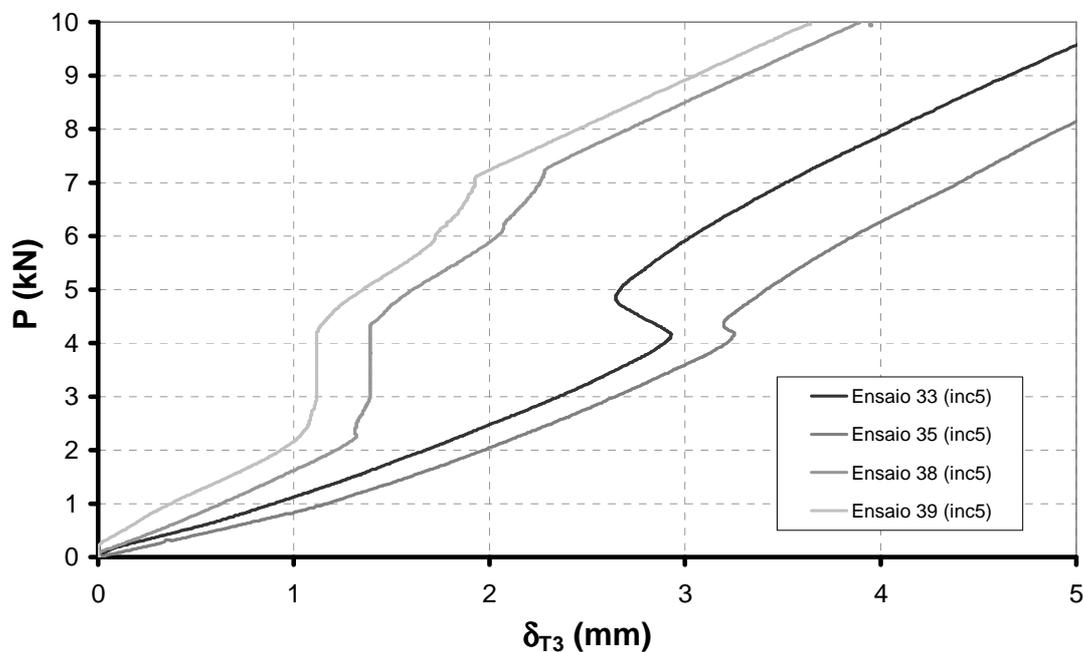


Figura B.3 – Curvas P - δ_{T3} obtidas nos ensaios 31 a 39 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, *inc5*).

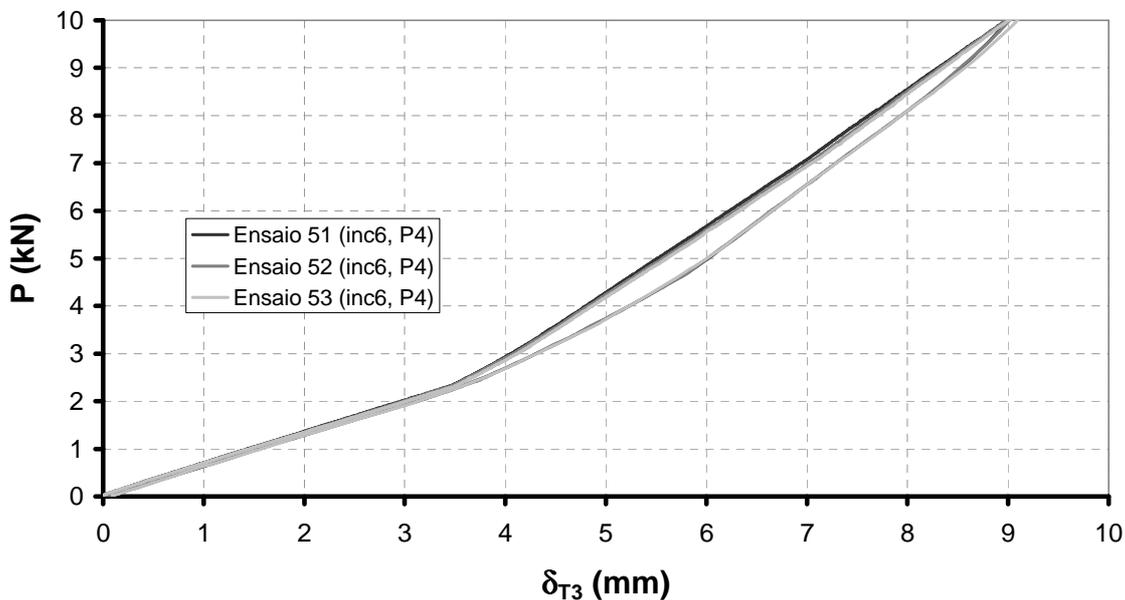


Figura B.4 – Curvas P - δ_{T3} obtidas nos ensaios 50 a 54 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, *inc6*).

¹⁶ Os diagramas correspondentes aos ensaios 50 e 54 não são ilustrados devido a problemas na aquisição dos dados.

O comportamento do prumo nos ensaios 55 a 71 é semelhante ao obtido no ensaio 73 pelo que não são ilustrados. Nestes ensaios o ângulo de rotação imposto na base inferior é muito inferior ao ângulo permitido pela folga existente entre os dois tubos.

Esta série de ensaios corresponde ao final da primeira fase do estudo na qual foi possível, (i) definir a velocidade de ensaio para caracterizar o comportamento dos prumos em regime elástico, (ii) identificar os vários problemas que influenciam os resultados obtidos e resolvê-los, e (iii) aumentar o conhecimento sobre o comportamento dos prumos telescópicos extensíveis, algo que veio a revelar-se muito importante durante o decurso dos ensaios posteriormente realizados.

O objectivo da fase seguinte de ensaios (ver a Tabela B.3), era definir o comportamento do prumo impondo um ângulo na base correspondente ao ângulo permitido pela folga existente entre os dois tubos, e estudar a influência da rotação, em conjunto, dos dois tubos. Foram efectuados pelo menos 3 ensaios em cada posição.

Foram sempre efectuadas medições da geometria da chapa antes do início do ensaio, utilizando uma craveira digital para medir a variação da distância entre o topo da face superior da chapa da base inferior do prumo e a face superior da chapa da máquina de ensaio, e ainda a espessura da chapa da base inferior. Com estes dados foi possível obter a configuração geométrica da chapa da base inferior do prumo, um dado importante na subsequente interpretação dos resultados.

A partir dos ensaios 72 a 80 foi possível determinar o ângulo médio correspondente à folga existente entre os dois tubos, conforme interpretação da Figura B.5.

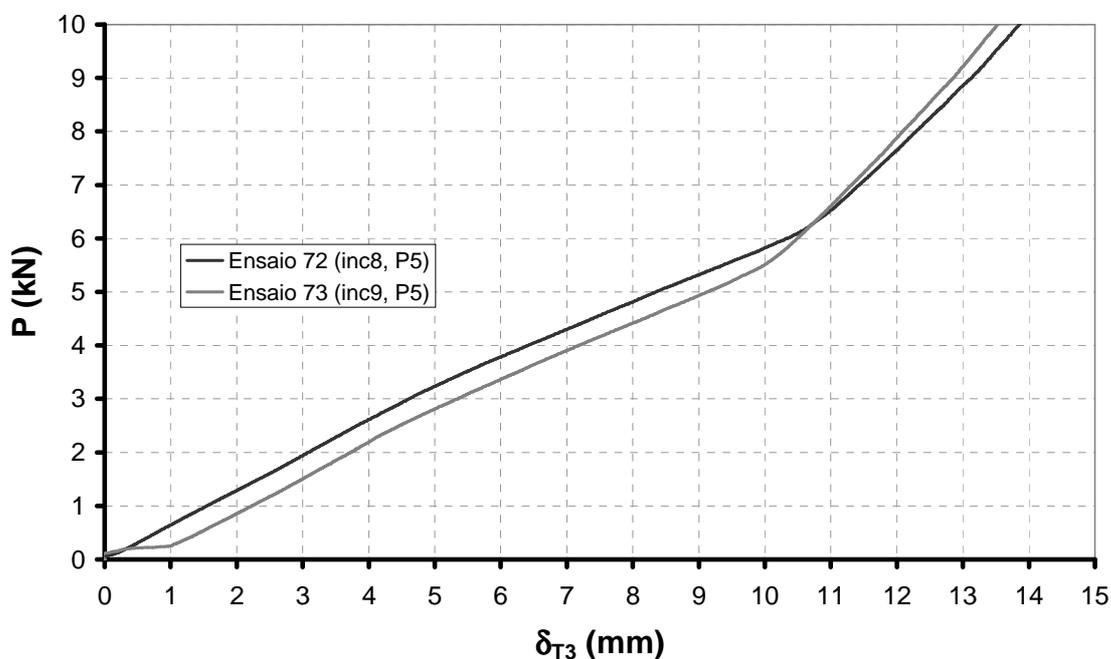


Figura B.5 – Curvas P - δ_{T3} obtidas nos ensaios 72 a 77 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m).

Para a inclinação *inc9* (menor que a rotação inicial possível devido à folga entre os dois tubos, i.e. $0,5^\circ$) pode observar-se que os tubos ainda não estão em contacto, já que de início existe um patamar de força constante onde o deslocamento transversal aumenta, até a extremidade inferior do tubo interior entrar em contacto com

a parede interior do tubo exterior (ver a Figura B.5). Posteriormente, há uma mudança de declive devido ao ajuste das duas chapas, base inferior do prumo e do prato do acessório inferior. Para a inclinação *inc8* (maior que $0,5^\circ$) apenas se observa este último fenómeno.

As séries de ensaios subsequentes foram realizadas impondo um ângulo de rotação na base inferior do prumo correspondente ao ângulo de ensaio previsto na norma EN 1065:1998, i.e $1,5^\circ$ para $L=3,5$ m. Este ângulo foi identificado como *inc10*. Os ensaios 81 a 106 e ensaios 107 a 122, permitiram analisar a influência da rotação da posição dos dois tubos no comportamento do prumo, na configuração normal e na configuração invertida, respectivamente.

Da análise da Figura B.6, é possível observar que até a chapa da base inferior assentar totalmente se obtém uma rigidez inicial maior no par de posições 2 e 4 do que no par 1 e 3, como seria de esperar já que as duas primeiras correspondem à flexão segundo o eixo de maior inércia do tubo interior. Até aos 10 kN tem-se muito pouca informação sobre a trajectória após a chapa assentar. Não obstante é de esperar que se continue a verificar a tendência descrita acima.

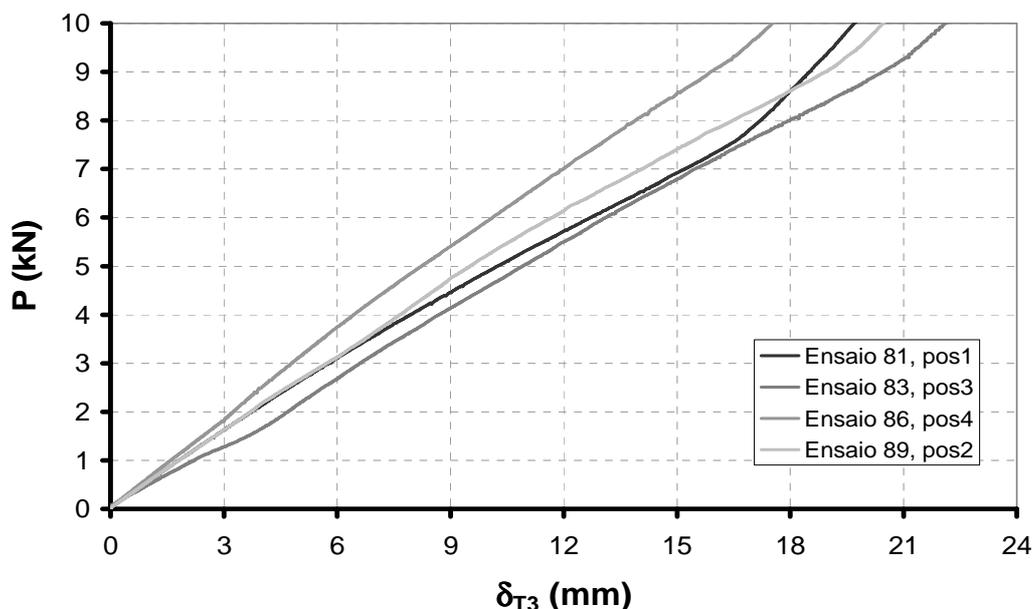


Figura B.6 – Curvas $P-\delta_{T3}$ obtidas nos ensaios 81 a 92 (ensaio preliminares, $L=3,5$ m, *inc10*).

Analisando agora os resultados obtidos para a configuração invertida (ver a Figura B.7), reportados ao deslocamento do transdutor T_2 , de modo a que secção analisada seja a mesma nos dois gráficos, verifica-se que a rigidez inicial é semelhante nas quatro posições de ensaio. Após a chapa assentar totalmente observa-se que a rigidez para as posições 1 e 3 são ligeiramente diferentes ($1,27$ kN/mm para a posição 1 e $1,20$ kN/mm para a posição 3), ao passo que nas outras duas posições, 2 e 4 (flexão do prumo segundo o eixo de maior inércia do tubo interior), a rigidez é inferior ($1,22$ kN/mm para a posição 2 e $1,08$ kN/mm para a posição 4). Estes valores contrariam o que seria de esperar, i.e. maior rigidez dos prumos quando flectidos segundo o eixo de maior inércia do tubo interior. Este facto pode advir de nos ensaios com as direcções 2 e 4 a chapa da base inferior do prumo poder ainda não estar

totalmente em contacto com a chapa do prato para a carga máxima atingida (10 kN), o que viria a acontecer para uma carga superior, resultando num aumento da rigidez.

Tabela B.3 – Resumo das condições do estudo inicial (2), $L=3,5$ m.

Ensaio N°	Prumo N°	Posição N°	Configuração	Comprimento	Inclinação
72	5	1	N	L3	inc8
73	5	1	N	L3	inc9
74	5	1	N	L3	inc8
75 a 77	5	3	N	L3	inc8
78	6	1	N	L3	inc7
79 a 80	6	1	N	L3	inc6
81	6	1	N	L3	inc10
82 a 85	6	3	N	L3	inc10
86 a 88	6	4	N	L3	inc10
89 a 91	6	2	N	L3	inc10
92	6	1	N	L3	inc10
93 a 95	7	1	N	L3	inc10
96 a 98	7	3	N	L3	inc10
99 a 101	7	2	N	L3	inc10
102 a 104	7	4	N	L3	inc10
107 a 109	9	1	I	L3	inc10
110 a 112	9	3	I	L3	inc10
113 a 115	9	4	I	L3	inc10
116 a 118	9	2	I	L3	inc10

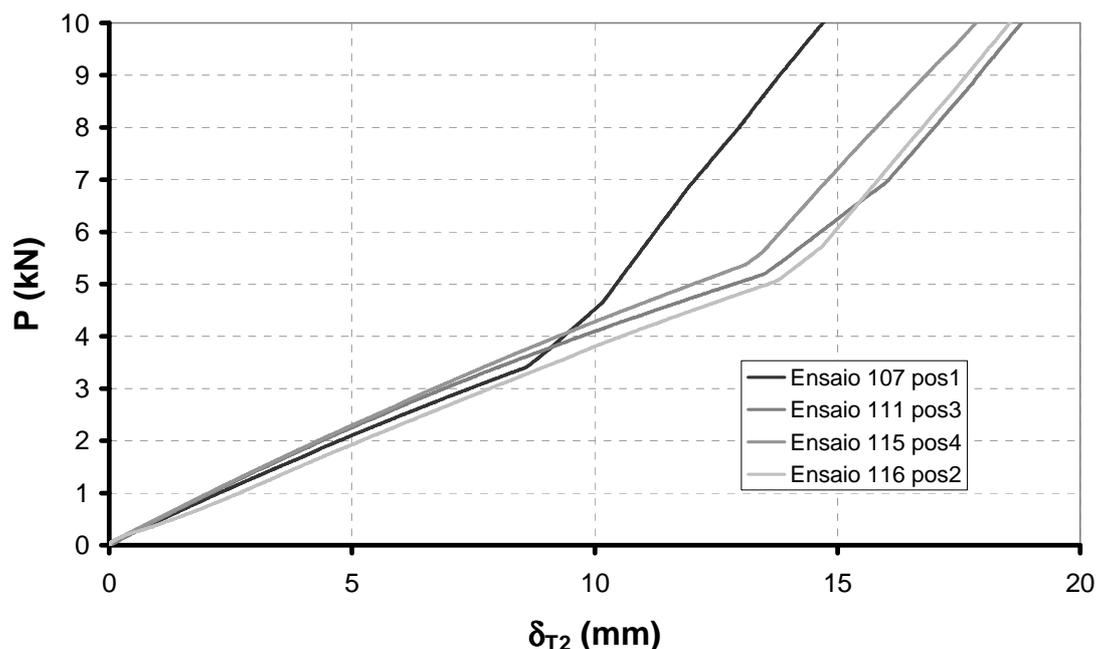


Figura B.7 – Curvas P - δ_{T2} obtidas nos ensaios 107 a 122 (ensaios preliminares, $L=3,5$ m, configuração invertida, *inc10*).

B.1.2. Ensaio de prumos com a altura mínima ($L=2,0$ m)

A Tabela B.4 resume as condições do estudo inicial realizado para $L=2,0$ m.

Os ensaios 125 a 142 permitiram definir o ângulo de rotação necessário para o deslocamento de corpo rígido possível pela folga existente entre os dois tubos. O valor desta inclinação foi identificado como *inc13*, sendo ligeiramente superior à rotação nominal (ver a Tabela 3.5 e a Tabela B.2).

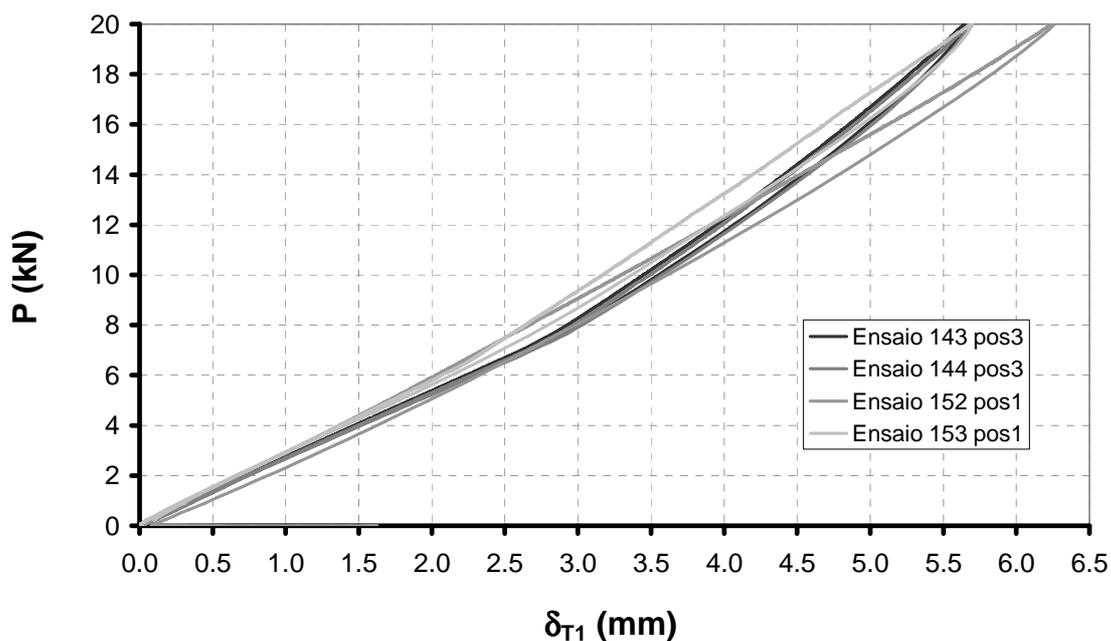
A altura mínima do prumo é igual ao comprimento do tubo interior, pelo que a extremidade deste está em contacto com a fundação, i.e., o tubo interior irá receber a carga e transmiti-la, em grande parte, directamente à fundação. Para simular o comportamento do prumo, incluindo a ligação entre os dois tubos, foi decidido ensaiar outra posição que consiste em subir um centímetro o tubo interior e fixar a sua posição com o pino e o batente roscado.

Após a imposição de uma rotação na base inferior correspondente à inclinação *inc13*, incrementou-se o respectivo ângulo em 1° , de modo a se impor a configuração inicial do prumo estipulada na norma EN 1065:1998. De seguida, estudou-se o efeito da alteração da posição dos tubos, rodando-os em conjunto 180° , ver as figuras B.8 e B.9 (configuração normal). Estes ensaios foram realizados até a força de ensaio atingir 20 kN (cerca de 1/3 da força máxima prevista pelo modelo numérico ABAQUS N.2), de modo a caracterizar o comportamento dos prumos em regime elástico.

É possível observar que a rigidez inicial obtida com o tubo interior totalmente recolhido (figura B.9) é superior à que se obtém quando se sobe o tubo interior cerca de um centímetro, de modo a que a sua extremidade inferior deixe de se apoiar directamente sobre a chapa da base do exterior (figura B.8). O mesmo comportamento foi registado com o prumo na configuração invertida.

Tabela B.4 – Resumo das condições do estudo inicial, $L=2,0$ m.

Ensaio N°	Prumo N°	Posição N°	Configuração	Comprimento	Inclinação
125 a 127	15	1	N	L1	inc11
128 a 130	15	1	N	L1	inc12
131 a 133	15	1	N	L1 + 1 cm	inc13
134 a 136	15	1	N	L1	inc13
137 a 139	15	3	N	L1	inc13
140 a 142	15	3	N	L1 + 1 cm	inc13
143 a 145	15	3	N	L1 + 1 cm	inc13+1°
146 a 148	15	3	N	L1	inc13+1°
149 a 151	15	1	N	L1	inc13+1°
152 a 154	15	1	N	L1 + 1 cm	inc13+1°
158 a 160	18	1	I	L1	inc13+1°
161 a 162	18	1	I	L1 + 1 cm	inc13+1°
163 a 165	18	1	I	L1	inc13+1°
166 a 168	18	1	I	L1 + 1 cm	inc13+1°
169 a 171	18	3	I	L1 + 1 cm	inc13+1°
172 a 174	18	3	I	L1	inc13+1°

Figura B.8 – Curvas $P-\delta_{T1}$ (ensaios preliminares, $L=2,0$ m + 1cm, configuração normal, $inc13+1^\circ$).

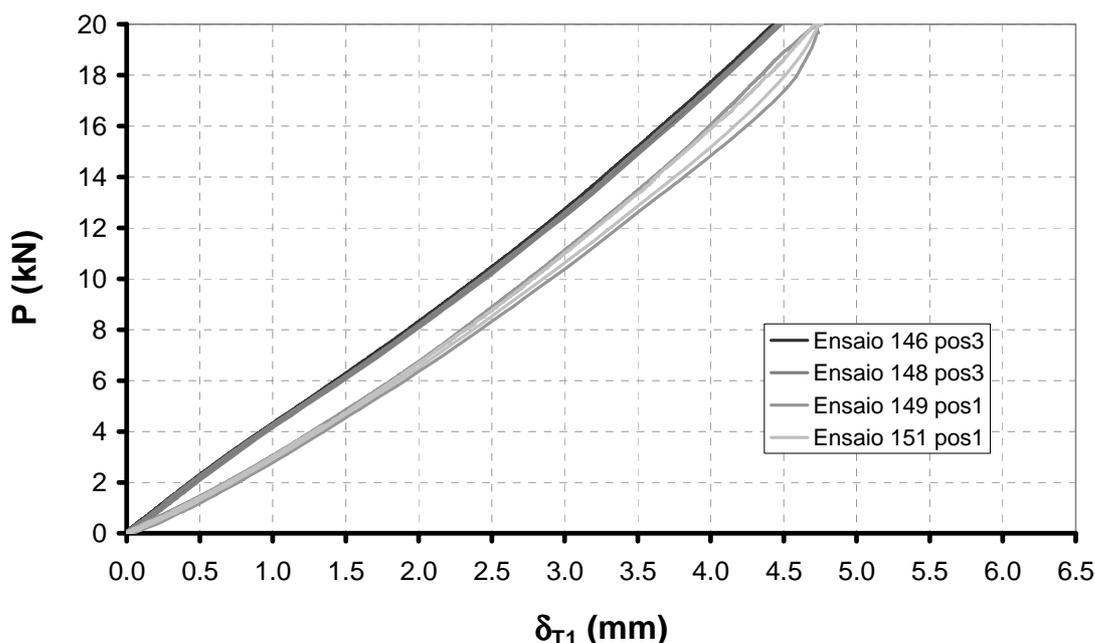


Figura B.9 – Curvas $P-\delta_{T1}$ (ensaios preliminares, $L=2,0$ m, configuração normal, $inc13+1^\circ$).

B.1.3. Ensaio de prumos para as alturas intermédias

A Tabela B.5 resume as condições do estudo inicial realizado para as alturas intermédias.

Nesta fase do estudo preliminar já existia confiança no valor dos ângulos dados pela equação (3.5), e no correcto funcionamento dos acessórios utilizados nos ensaios. Deste modo foram apenas realizados, para cada uma das alturas intermédias, três ensaios preliminares na configuração normal. Os ensaios foram realizados submetendo um ângulo na base inferior do prumo igual ao permitido pela folga inicial entre os dois tubos, de modo a verificar a validade dos ângulos determinados através da equação (3.5).

No final deste estudo foi possível concluir que a equação (3.5) devolve os ângulos correctos para todas as alturas ensaiadas.

Tabela B.5 – Resumo dos ensaios realizados para as alturas intermédias.

Ensaio N°	Prumo N°	Posição N°	Configuração	Comprimento	Inclinação
178 a 184	21	1	N	L4	inc13
189 a 192	23	1	N	L5	inc13
196 a 198	25	1	N	L6	inc13
202 a 204	28	1	N	L7	inc14
208 a 210	31	1	N	L8	inc7

B.2. Ensaaios à rotura de prumos

Após a conclusão do estudo preliminar para cada uma das alturas foi efectuada uma série de ensaios à rotura, na configuração normal e invertida.

B.2.1. Ensaaios de prumos com a altura máxima ($L=3,5$ m)

A Tabela B.6 resume os ensaios realizados para esta altura.

Utilizaram-se quatro posições de medida de deslocamentos transversais, conforme o disposto na Tabela B.7.

Tabela B.6 – Resumo dos ensaios à rotura para $L=3,5$ m.

Ensaio N°	Prumo N°	Posição N°	Configuração	Comprimento	Inclinação
105	7	1	N	L3	inc10
106	8	1	N	L3	inc10
119	9	1	I	L3	inc10
120	10	1	I	L3	inc10
121	11	1	I	L3	inc10
122	12	1	I	L3	inc10
123	13	1	N	L3	inc10
124	14	1	N	L3	inc10

Tabela B.7 – Posicionamento dos transdutores utilizados nos ensaios para a altura máxima.

Configuração	Transdutor T ₁	Transdutor T ₂	Transdutor T ₃	Transdutor T ₄
N	1/4L, 100 mm	Fim L _o , 200 mm	T _{int} , 200 mm	3/4L, 100 mm
I	1/4L, 100 mm	T _{int} , 200 mm	Fim L _o , 200 mm	3/4L, 100 mm

B.2.2. Ensaaios de prumos com a altura mínima ($L=2,0$ m)

A Tabela B.8 resume os ensaios realizados para esta altura.

Utilizaram-se três posições de medida de deslocamentos transversais, conforme o disposto na Tabela B.7.

Tabela B.8 – Resumo dos ensaios realizados para $L=2,0$ m.

Ensaio N°	Prumo N°	Posição N°	Configuração	Comprimento	Inclinação
155	15	1	N	L1	inc13+1°
156	16	1	N	L1 + 1 cm	inc13+1°
157	17	1	N	L1 + 1 cm	inc13+1°
175	18	1	I	L1	inc13+1°
176	19	1	I	L1 + 1 cm	inc13+1°
177	20	1	I	L1 + 1 cm	inc13+1°

Tabela B.9 – Posicionamento dos transdutores utilizados nos ensaios para a altura mínima.

Configuração	Transdutor T ₁	Transdutor T ₂	Transdutor T ₃
N	L/2, 100 mm	3/4L, 200 mm	T _{int} , 200 mm
I	T _{int} , 200 mm	1/4L, 200 mm	L/2, 100 mm

B.2.3. Ensaio de prumos para as alturas intermédias

A Tabela B.10 resume os ensaios realizados.

Na maioria dos ensaios instrumentaram-se três secções do prumo, conforme indica a Tabela B.11.

Tabela B.10 – Resumo dos ensaios realizados para as alturas intermédias.

Ensaio N°	Prumo N°	Posição N°	Configuração	Comprimento	Inclinação
185	21	1	N	L4	inc13+1°
187	22	1	I	L4	inc13+1°
193	23	1	N	L5	inc13+1°
194	24	1	I	L5	inc13+1°
199	25	1	N	L6	inc13+1°
200	26	1	N	L6	inc13+1°
201	27	1	I	L6	inc13+1°
205	28	1	N	L7	inc14+1°
206	29	1	N	L7	inc14+1°
207	30	1	I	L7	inc14+1°
211	31	1	N	L8	inc7+1°
212	32	1	N	L8	inc7+1°
213	33	1	N	L8	inc7+1°
214	34	1	N	L8	inc7+1°
215	35	1	I	L8	inc7+1°
216	36	1	I	L8	inc7+1°
217	37	1	I	L8	inc7+1°
218	38	1	I	L8	inc7+1°

Tabela B.11 – Posicionamento dos transdutores utilizados nos ensaios para as alturas intermédias.

Ensaio N°	Configuração	Comprimento	Transdutor T ₁	Transdutor T ₂	Transdutor T ₃	Transdutor T ₄
185	N	L4	Fim L _o , 50 mm	L/2, 200 mm	3/4L, 100 mm	T _{int} , 100 mm
187	I	L4	T _{int} , 100 mm	1/4L, 100 mm	L/2, 200 mm	Fim L _o , 50 mm
193	N	L5	Fim L _o , 50 mm	L/2, 200 mm	T _{int} , 100 mm	
194	I	L5	T _{int} , 50 mm	L/2, 200 mm	Fim L _o , 100 mm	
199, 200	N	L6	Fim L _o , 50 mm	L/2, 200 mm	T _{int} , 100 mm	
201	I	L6	T _{int} , 50 mm	L/2, 200 mm	Fim L _o , 100 mm	
205, 206	N	L7	Fim L _o , 50 mm	L/2, 200 mm	T _{int} , 100 mm	
207	I	L7	T _{int} , 100 mm	L/2, 200 mm	Fim L _o , 50 mm	
211, 214	N	L8	Fim L _o , 50 mm	T _{int} , 200 mm	3/4L, 100 mm,	
215	I	L8	1/4L, 100 mm,	T _{int} , 200 mm	Fim L _o , 50 mm	
216, 218	I	L8	1/4L, 50 mm	T _{int} , 200 mm	Fim L _o , 100 mm,	

As figuras B.10 a B.15 ilustram o comportamento do prumo para 2,25, 2,50 e 2,75 m de comprimento, e as figuras B.16 a B.19 o comportamento do prumo para 3,00 m e 3,25 m de comprimento.



Figura B.10 – Deformação do prumo, $L=2,25$ m (configuração normal).



Figura B.11 – Ovalização do furo do tubo interior, $L=2,25$ m (configuração normal).



Figura B.12 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,50$ m (config. normal).



Figura B.13 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,50$ m (config. invertida).



Figura B.14 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,75$ m (config. normal).



Figura B.15 – Ovalização do furo do tubo interior para $L=2,75$ m (config. invertida).



Figura B.16 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,00$ m (config. normal).



Figura B.17 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,00$ m (config. invertida).



Figura B.18 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,25$ m (config. normal).



Figura B.19 – Configuração do prumo na força máxima para $L=3,25$ m (config. invertida).

ANEXO C

MODELOS NUMÉRICOS DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS

C.1. Validação dos modelos desenvolvidos no programa ABAQUS

São a seguir apresentadas as figuras que ilustram os parâmetros utilizados na validação dos modelos desenvolvidos no programa ABAQUS.

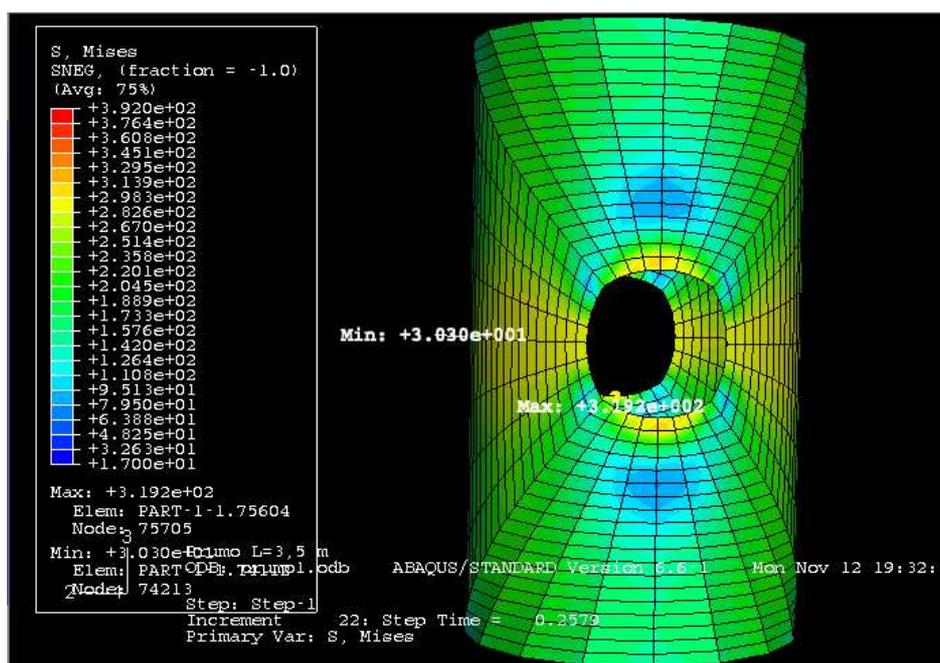


Figura C.1 – Tensões de Von-Mises (elementos lineares).

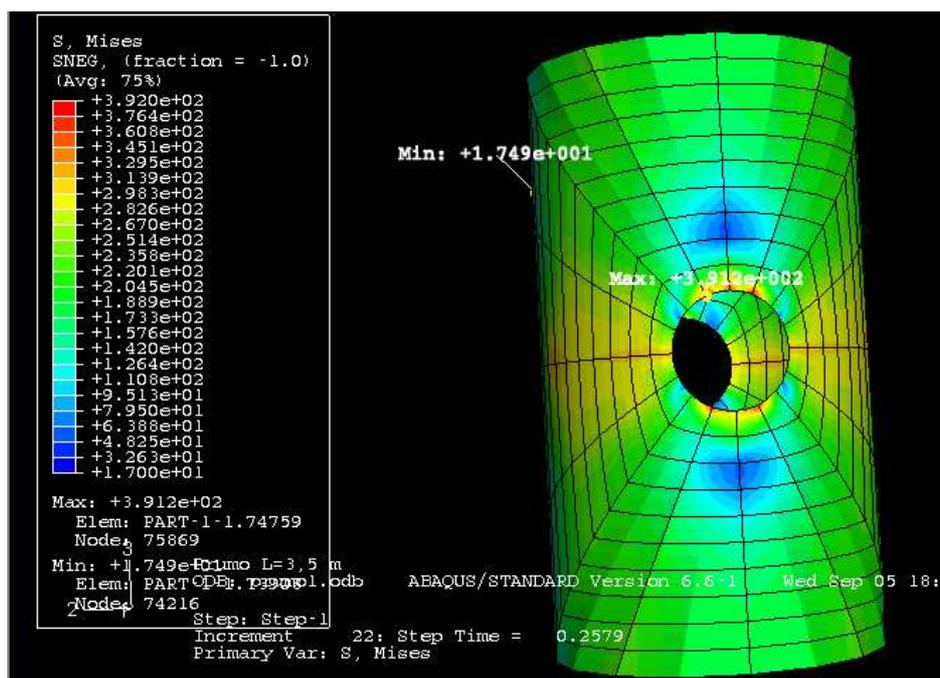


Figura C.2 – Tensões de Von-Mises (elementos quadráticos).

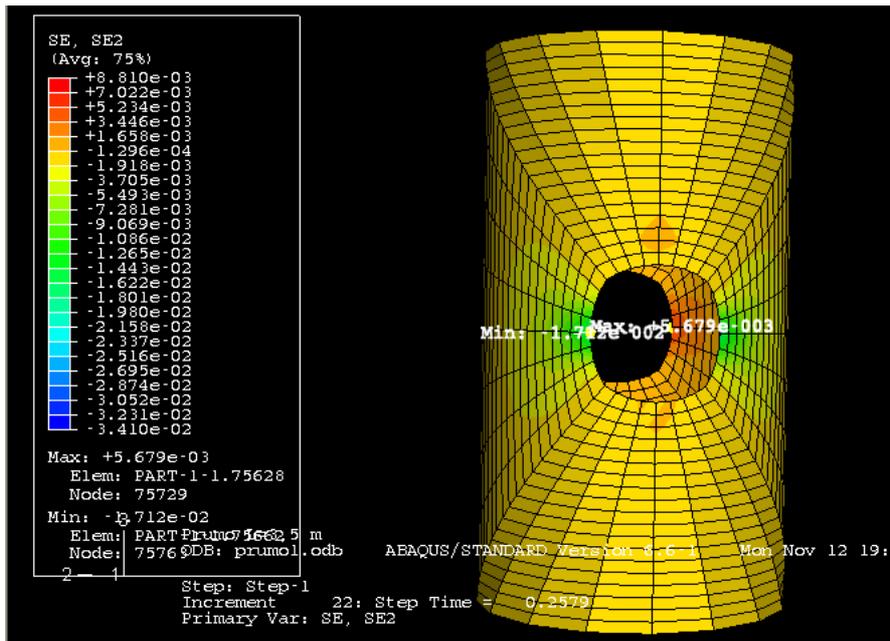


Figura C.3 – Extensões E22 (extensões na direcção longitudinal do prumo) – elementos lineares.

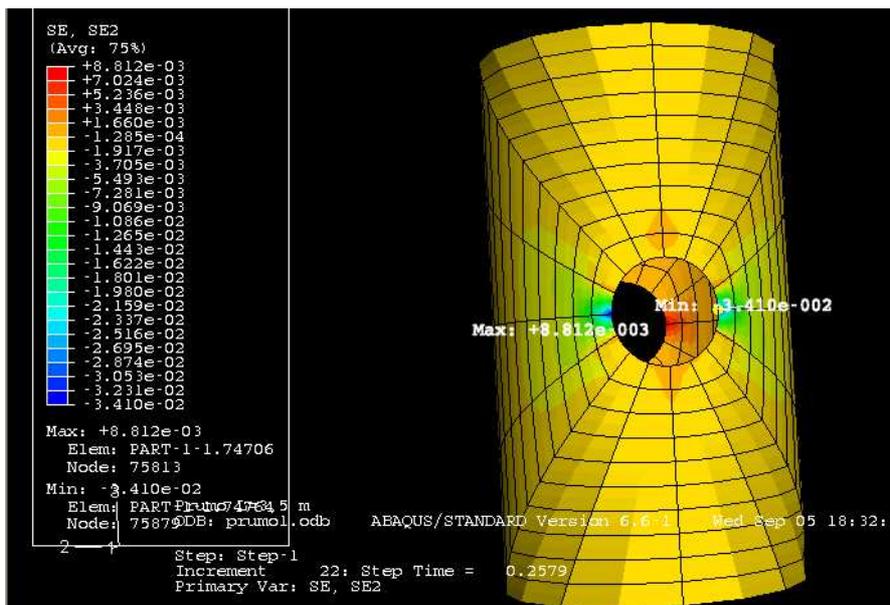


Figura C.4 – Extensões E22 (extensões na direcção longitudinal do prumo) – elementos quadráticos.

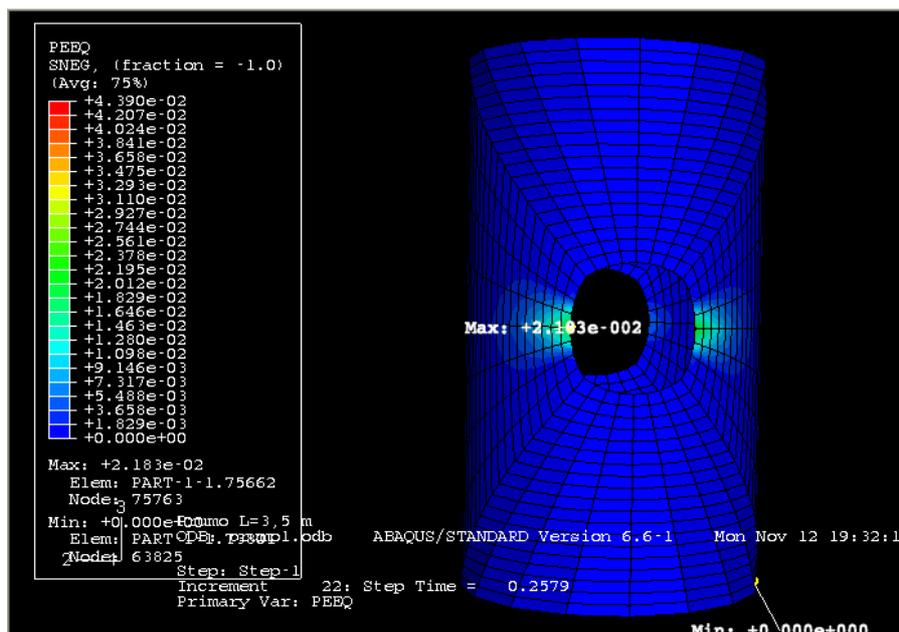


Figura C.5 – Extensões plásticas equivalentes (escalar de todas as componentes do vector extensões plásticas) - elementos lineares.

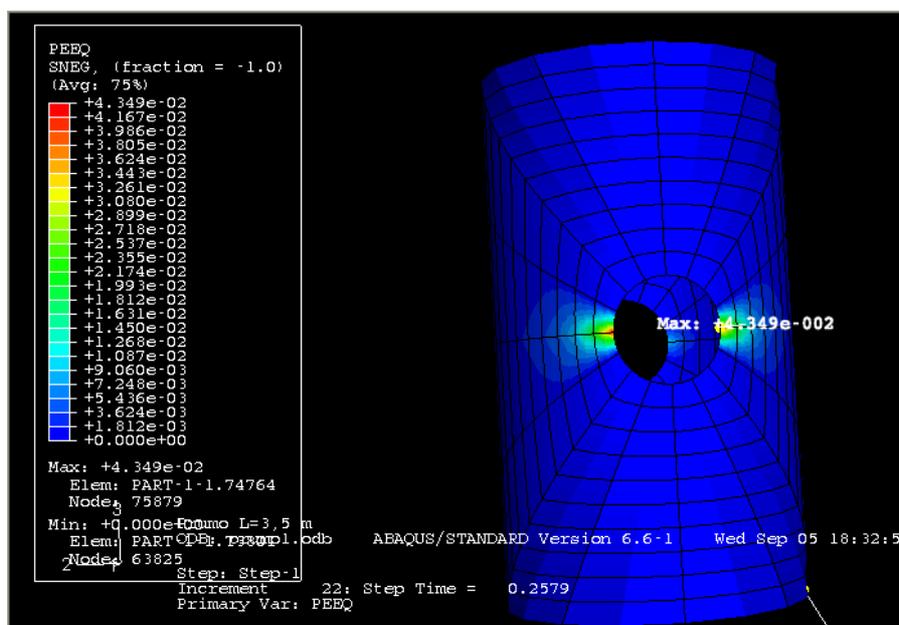


Figura C.6 – Extensões plásticas equivalentes (escalar de todas as componentes do vector extensões plásticas) - elementos quadráticos.

C.2. Ficheiros-tipo de dados dos modelos numéricos desenvolvidos no programa ABAQUS

C.2.1. Modelos N. e E.

```

*****
**      MESH GENERATION      **
*****
**      NODE DEFINITION     **
*****

```

```

** Tubo Text: Dext=60 mm, Dint=55,0 mm, L= 1900 mm
*****
*NODE
  900201, 0, 0, 0
  7000001, 0, -28.75, 0
  7000005, 28.75, 0, 0
  7000009, 0, 28.75, 0
  7000013, -28.75, 0, 0
  7000017, 0, -28.75, 0
*NGEN, LINE=C, NSET=Sec1T2
  7000001, 7000005, 1, 900201
  7000005, 7000009, 1, 900201
  7000009, 7000013, 1, 900201
  7000013, 7000017, 1, 900201
*NCOPY, OLD SET=Sec1T2, CHANGE NUMBER=14400, NEW SET=Sec2T2, SHIFT
  0, 0, 1900
  , , , , ,
*NFILL, NSET=NT2
  Sec1T2, Sec2T2, 144, 100
*****
** Tubo Tint: Dext=48,3 mm, Dint=41,7 mm, L= 2000 mm, diamFuros=15 mm, @furos = 80 mm a contar do
topo do prumo
*****
*NODE
  900301, 0, 0, 1900
  901301, 0, 0, 1980
  3801, 22.55, -35.42145717, 1900
  3805, 22.55, 0, 1900
  3809, 22.55, 35.42145717, 1900
  3817, 22.55, 35.42145717, 1980
  3821, 22.55, 0, 1980
  3825, 22.55, -35.42145717, 1980
  3833, 22.55, -35.42145717, 1900
*NGEN, NSET=CONTORNO
  3801, 3809, 1
  3809, 3817, 1
  3817, 3825, 1
  3825, 3833, 1
*****
** FUROS
*****
*SYSTEM
  22.55, 0, 1940
*NODE
  90020, 0, 0, 0
  5801, 0, -5.302808454, -5.302808454
  5809, 0, 5.302808454, -5.302808454
  5817, 0, 5.302808454, 5.302808454
  5825, 0, -5.302808454, 5.302808454
  5833, 0, -5.302808454, -5.302808454
*NGEN, LINE=C, NSET=FUROS
  5801, 5809, 1, 90020
  5809, 5817, 1, 90020
  5817, 5825, 1, 90020
  5825, 5833, 1, 90020
*SYSTEM
  0, 0, 0
*NFILL, NSET=ALL
  CONTORNO, FUROS, 20, 100
*****

```

```
*NMAP,TYPE=CYLINDRICAL,NSET=ALL
  0.,0.,0., 0.,0.,1.
  22.55, 0, 0.
  1, 2.540832794, 1.
*NCOPY, OLD SET=ALL, CHANGE NUMBER=50, NEW SET=ALL, REFLECT=MIRROR
  0, 0, 0, 0, 1, 0
  0, 0, 1
*NCOPY, OLD SET=ALL, CHANGE NUMBER=10000, NEW SET=ALL2, SHIFT
  0, 0, 80
  ' ' ' ' '
*NCOPY, OLD SET=ALL2, CHANGE NUMBER=10000, NEW SET=ALL3, SHIFT
  0, 0, 80
  ' ' ' ' '
...
...
*NCOPY, OLD SET=ALL19, CHANGE NUMBER=10000, NEW SET=ALL20, SHIFT
  0, 0, 80
  ' ' ' ' '
*NSET, NSET=NT3
  ALL, ALL2, ALL3, ALL4, ALL5,
  ALL6, ALL7, ALL8, ALL9, ALL10,
  ALL11, ALL12, ALL13, ALL14, ALL15,
  ALL16, ALL17, ALL18, ALL19, ALL20
*****
*NSET, NSET=PRUMO
  NT2, NT3,
*****
** ELEMENT CONNECTIVITY DEFINITION
*****
*ELEMENT, TYPE=S9R5, ELSET=ET2
  7000001, 7000001, 7000003, 7000203, 7000201, 7000002, 7000103, 7000202, 7000101, 7000102
  7000016, 7000001, 7000201, 7000215, 7000015, 7000101, 7000216, 7000115, 7000016, 7000116
*ELGEN, ELSET=ET2
  7000001, 7, 2, 1, 72, 200, 100
  7000016, 72, 200, 100
*****
*ELEMENT,TYPE=S9R5
  3801, 3801, 3803, 4003, 4001, 3802, 3903, 4002, 3901, 3902
*ELGEN,ELSET=ALL
  3801, 15, 2, 1, 10, 200, 100
*ELEMENT, TYPE=S9R5
  3816, 4001, 4031, 3831, 3801, 4032, 3931, 3832, 3901, 3932
*ELGEN, ELSET=ALL
  3816, 10, 200, 100
**MIRROR
*ELEMENT,TYPE=S9R5
  3951, 4051, 4251, 4253, 4053, 4151, 4252, 4153, 4052, 4152
*ELGEN,ELSET=ALL
  3951, 15, 2, 1, 9, 200, 100
*ELEMENT,TYPE=S9R5
  3966, 4051, 4081, 4281, 4251, 4082, 4181, 4282, 4151, 4182
*ELGEN,ELSET=ALL
  3966,9,200,100
*ELEMENT,TYPE=S9R5,ELSET=ALL
  3851, 3801, 4051, 4053, 3853, 3951, 4052, 3953, 3852, 3952
*ELEMENT,TYPE=S9R5
  3852, 3853, 4053, 4055, 3855, 3953, 4054, 3955, 3854, 3954
*ELGEN,ELSET=ALL
  3852, 2, 2, 1
*ELEMENT,TYPE=S9R5,ELSET=ALL
```

```

3854, 3857, 4057, 4059, 3809, 3957, 4058, 3959, 3858, 3958
*ELEMENT,TYPE=S9R5
3859, 3809, 4059, 4061, 3811, 3959, 4060, 3961, 3810, 3960
*ELGEN,ELSET=ALL
3859, 4, 2, 1
*ELEMENT,TYPE=S9R5,ELSET=ALL
3867, 3817, 4067, 4069, 3869, 3967, 4068, 3969, 3868, 3968
*ELEMENT,TYPE=S9R5
3868, 3869, 4069, 4071, 3871, 3969, 4070, 3971, 3870, 3970
*ELGEN,ELSET=ALL
3868, 2, 2, 1
*ELEMENT,TYPE=S9R5,ELSET=ALL
3870, 3873, 4073, 4075, 3825, 3973, 4074, 3975, 3874, 3974
*ELEMENT,TYPE=S9R5
3875, 3825, 4075, 4077, 3827, 3975, 4076, 3977, 3826, 3976
*ELGEN,ELSET=ALL
3875, 3, 2, 1
*ELEMENT,TYPE=S9R5,ELSET=ALL
3878, 3801, 3831, 4081, 4051, 3832, 3981, 4082, 3951, 3982
...
...
*ELCOPY, OLD SET=ALL1, NEW SET=ALL2, ELEMENT SHIFT=10000, SHIFT NODES=10000
*ELCOPY, OLD SET=ALL2, NEW SET=ALL3, ELEMENT SHIFT=10000, SHIFT NODES=10000
...
...
*ELCOPY, OLD SET=ALL18, NEW SET=ALL19, ELEMENT SHIFT=10000, SHIFT NODES=10000
**
*ELSET, ELSET=ET3
ALL, ALL1, ALL2, ALL3, ALL4, ALL5,
ALL6, ALL7, ALL8, ALL9, ALL10,
ALL11, ALL12, ALL13, ALL14, ALL15,
ALL16, ALL17, ALL18, ALL19
*****
*ELSET, ELSET=PRUMO
ET2, ET3
*****
**          TIEING OF PARTS          **
*****
*MPC
PIN, 7014401, 3801
...
...
PIN, 7014416, 3852
*NSET, NSET=NN, GENERATE
7014401, 7014416, 1
3801, 3809, 1
3852, 3858, 1
*****
**          TIES das bases          **
*****
*NODE, NSET=NOSSUFBASE1_MASTER
1600041, 0, -28.75, 0
1600441, 28.75, 0, 0
1600841, 0, 28.75, 0
1601241, -28.75, 0, 0
1601641, 0, -28.75, 0
*NGEN, LINE=C, NSET=NOSSUFBASE1_MASTER
1600041, 1600441, 25, 900201
1600441, 1600841, 25, 900201
1600841, 1601241, 25, 900201

```

```
1601241, 1601641, 25, 900201
*NODE
1703843, 22.55, 35.42145717, 3500
1703443, 22.55, 0, 3500
1703043, 22.55, -35.42145717, 3500
*NGEN, NSET=NOSSUFBASE2_MASTER
1703043, 1703843, 1
*NMAP, TYPE=CYLINDRICAL, NSET=NOSSUFBASE2_MASTER
0., 0., 0., 0., 0., 1.
22.55, 0, 0.
1, 2.540832794, 1.
*NCOPY, OLD SET=NOSSUFBASE2_MASTER, CHANGE NUMBER=50000, NEW
SET=NOSSUFBASE2_MASTER, REFLECT=MIRROR
0, 0, 0, 0, 1, 0
0, 0, 1
*****
** CONTACT ELEMENTS **
*****
*NODE, NSET=BASE1
41, 0, -35, 0
241, 35, -35, 0
441, 35, 0, 0
641, 35, 35, 0
841, 0, 35, 0
1041, -35, 35, 0
1241, -35, 0, 0
1441, -35, -35, 0
1641, 0, -35, 0
*NGEN, NSET=CONTBASE1_1
41, 241, 25
241, 441, 25
441, 641, 25
641, 841, 25
841, 1041, 25
1041, 1241, 25
1241, 1441, 25
1441, 1641, 25
*NODE, NSET=CONTBASE1_2
100041, 0, -55.0, 0
100241, 55.0, -55.0, 0
100641, 55.0, 55.0, 0
101041, -55.0, 55.0, 0
101441, -55.0, -55.0, 0
101641, 0, -55.0, 0
*NGEN, NSET=CONTBASE1_2
100041, 100241, 25
100241, 100641, 25
100641, 101041, 25
101041, 101441, 25
101441, 101641, 25
*NFILL, NSET=BASE1
CONTBASE1_1, CONTBASE1_2, 10, 10000
*****
*ELEMENT, TYPE=S4R, ELSET=BASE1
668801, 1600041, 1600066, 66, 41
*ELGEN, ELSET=BASE1
668801, 63, 25, 1, 1
*ELEMENT, TYPE=S4R, ELSET=BASE1
668864, 1601616, 1600041, 41, 1616
668865, 41, 66, 10066, 10041
```

```

668928, 1616, 41, 10041, 11616
*ELGEN, ELSET=BASE1
668865, 63, 25, 1, 10, 10000, 153300
668928, 10, 10000, 153300
*****
*NODE, NSET=NREF1
12847, 0, 0, -0
12849, 0, 0, -0.1
*NODE, NSET=NRIGIDOBASE1
112849, 0, 0, -0
110041, 0, -200, -0
110241, 200, -200, -0
110441, 200, 0, -0
110641, 200, 200, -0
110841, 0, 200, -0
111041, -200, 200, -0
111241, -200, 0, -0
111441, -200, -200, -0
*ELEMENT, TYPE=S4R, ELSET=RIGIDOBASE1
1041, 112849,110041,110241,110441
1042, 112849,110441,110641,110841
1043, 112849,110841,111041,111241
1044, 112849,111241,111441,110041
*RIGID BODY, REF NODE=12849, ELSET=RIGIDOBASE1
*SURFACE, NAME=MASTER1, TYPE=ELEMENT
RIGIDOBASE1, SPOS
*SURFACE, NAME=BASE1SLAVE, TYPE=ELEMENT
BASE1, SPOS
*****
*CONTACT PAIR, INTERACTION=BASE1
BASE1SLAVE, MASTER1
*SURFACE INTERACTION, NAME=BASE1
*FRICTION, ROUGH
*SURFACE BEHAVIOR, NO SEPARATION
*****
*NODE, NSET=BASE2
...
...
*****
*NODE, NSET=NREF2
12846, 0, 0, 3500.1
12848, -10, 0, 3500.1
...
...
*****
**          TIES das bases          **
*****
*NSET, NSET=NOSSUFBASE1_SLAVE, GENERATE
7000001, 7000016, 1
*NSET, NSET=NOSSUFBASE2_SLAVE, GENERATE
193817, 193825, 1
193867, 193875, 1
*SURFACE, NAME=SUFBASE1_SLAVE, TYPE=NODE
NOSSUFBASE1_SLAVE, 1
*SURFACE, NAME=SUFBASE1_MASTER, TYPE=NODE
NOSSUFBASE1_MASTER, 1
*SURFACE, NAME=SUFBASE2_SLAVE, TYPE=NODE
NOSSUFBASE2_SLAVE, 1
*SURFACE, NAME=SUFBASE2_MASTER, TYPE=NODE
NOSSUFBASE2_MASTER, 1

```

```
*TIE, NAME=TIEBASE1, ADJUST=YES
  SUFBASE1_SLAVE,SUFBASE1_MASTER
*TIE, NAME=TIEBASE2, ADJUST=YES
  SUFBASE2_SLAVE,SUFBASE2_MASTER
*****
**          OUTPUT DATA          **
*****
...
...
*****
**          PROPERTY DEFINITION          **
*****
*SHELL SECTION, ELSET=ET2, MATERIAL=ELPLAST1, POISSON=ELASTIC
  2.5, 5
*SHELL SECTION, ELSET=ET3, MATERIAL=ELPLAST2, POISSON=ELASTIC
  3.2, 5
*SHELL SECTION, ELSET=BASE1, MATERIAL=ELPLAST1, POISSON=ELASTIC
  6, 5
*SHELL SECTION, ELSET=BASE2, MATERIAL=ELPLAST2, POISSON=ELASTIC
  6, 5
*SHELL SECTION, ELSET=RIGIDOBASE1, MATERIAL=ELPLAST1, POISSON=ELASTIC
  6, 5
*SHELL SECTION, ELSET=RIGIDOBASE2, MATERIAL=ELPLAST2, POISSON=ELASTIC
  6, 5
*MATERIAL, NAME=ELPLAST1
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
  205.E3, 0.3
*PLASTIC
  275., 0.
  275.1, 142.E-2
...
...
*****
**          TIME INDEPENDENT BOUNDARY CONDITIONS          **
*****
*BOUNDARY
  12849, ENCASTRE
  12848, 1,2
*ELEMENT, TYPE=SPRING1, ELSET=EL4
  444, 12848
*ELEMENT, TYPE=SPRING1, ELSET=EL5
  445, 12848
*ELEMENT, TYPE=SPRING1, ELSET=EL6
  446, 12848
*SPRING, ELSET=EL4
  4,
  10
*SPRING, ELSET=EL5
  5,
  10
*SPRING, ELSET=EL6
  6,
  10
*Amplitude, name=Amp-1
  0., 0., 1, 1.
*Amplitude, name=Amp-2
  0., 0., 0.04, 1.
*****
...
...

```

```

*****
**          IMPERFEIÇÃO          **
*****
*IMPERFECTION, FILE=IMPER, STEP=1
  1, 1
*****
**          first LOAD STEP          **
*****
*STEP, NLGEOM=yes, INC=1500, UNSYMM=YES
*STATIC, STABILIZE, factor=2e-8
  0.0001, 1, ,
*Boundary, amplitude=Amp-1
  12848, 3, 3, -20
*****
*CONTACT INTERFERENCE, TYPE=CONTACT PAIR, AMPLITUDE=AMP-2
  BASE1SLAVE, MASTER1, 0
*CONTACT INTERFERENCE, TYPE=CONTACT PAIR, AMPLITUDE=AMP-2
  BASE2SLAVE, MASTER2, 0
*****
*CONTACT CONTROLS, AUTOMATIC TOLERANCES
*CONTROLS, ANALYSIS=DISCONTINUOUS
*CONTROLS, PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
  ,,,,,,25
...
...
*END STEP

```

C.2.2. Modelo EN 1065

```

*****
**          MESH GENERATION          **
*****
**          NODE DEFINITION          **
*****
** Tubo Text: Dext=60 mm, Dint=55,0 mm, L= 1900 mm
*****
*NODE, NSET=NT2_1
  1, 0, 0, 0
*NODE, NSET=NT2_2
  901, 0, 0, 1900
*****
** Tubo Tint: Dext=48,3 mm, Dint=41,7 mm, L= 2000 mm, diamFuros=15 mm, @furos = 80 mm a contar do
topo do prumo
*****
*NODE, NSET=NT3_2
  1799, 0, 0, 3500
*NFILL, NSET=NT2
  NT2_1 , NT2_2 , 900, 1
*NFILL, NSET=NT3
  NT2_2 , NT3_2 , 898, 1
*****
*NSET, NSET=PRUMO
  NT2, NT3
*****
**          ELEMENT CONNECTIVITY DEFINITION          **
*****
*ELEMENT, TYPE=B32, ELSET=ET2
  1, 1, 2, 3

```

```

*ELGEN, ELSET=ET2
  1, 450, 2, 1
*ELGEN, ELSET=ET3
  450, 450, 2, 1
*****
*ELSET, ELSET=PRUMO
  ET2, ET3
*****
**          TIES das bases          **
*****
*NODE, NSET=BASE1AUX
  920001, -28.8, 0, 0
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=RIGIDEZ
  2000, 920001, 1
*NODE, NSET=BASE2AUX
  940001, -10, 0, 3500
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=EXC
  2001, 940001, 1799
*ELSET, ELSET=PRUMO
  PRUMO, RIGIDEZ, EXC
*****
**          OUTPUT DATA          **
*****
...
...
*****
**          PROPERTY DEFINITION          **
*****
*NODE, NSET=MOLA
  4005555, -29.8, 0, 0
*ELEMENT, TYPE=B31, ELSET=MOLA
  4005555, 920001, 4005555
*ELSET, ELSET=PRUMO2
  PRUMO, RIGIDEZ, EXC, MOLA
*BEAM SECTION, SECTION=RECT, ELSET=MOLA, MATERIAL=MOLA
  1, 12
*BEAM SECTION, SECTION=PIPE, ELSET=ET2, MATERIAL=ELPLAST1
  30, 2.5
  1, 0, 0
*BEAM SECTION, SECTION=PIPE, ELSET=ET3, MATERIAL=ELPLAST2
  23.91, 2.5
  1, 0, 0
*BEAM SECTION, SECTION=RECT, ELSET=RIGIDEZ, MATERIAL=EL1
  1e3, 1e3
*BEAM SECTION, SECTION=RECT, ELSET=EXC, MATERIAL=EL1
  1e3, 1e3
*MATERIAL, NAME=EL1
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
  205.E3, 0.3
*MATERIAL, NAME=ELPLAST1
*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
  205.E3, 0.3
*PLASTIC
  275, 0.
  275.1, 142.E-2
...
...
*****
*MATERIAL, NAME=MOLA
*Elastic,DEPENDENCIES=1

```

```

1E+18, 0.3, , 0
3E+7, 0.3, , 1
1E1, 0.3, , 2
*User defined field
*DEPVAR
1,
*****
**      TIME INDEPENDENT BOUNDARY CONDITIONS      **
*****
*BOUNDARY
920001, PINNED
940001, 1, 2
4005555, 1,2
4005555, 4,6
*****
*Amplitude, name=Amp-1
0., 0., 1, 1.
*****
...
...
*****
**      IMPERFEIÇÃO      **
*****
*FILE FORMAT, ASCII
*IMPERFECTION, FILE=IMPER, STEP=1
1, 1
*****
**      first LOAD STEP      **
*****
*STEP, NLGEOM=yes, INC=1500
*STATIC
0.005, 1, ,
*Boundary, amplitude=Amp-1
940001, 3, 3, -20
...
...
*END STEP

```

C.2.3. Programa fjoin2

```

INCLUDE 'aba_param.inc'
DIMENSION ARRAY(513), JRRAY(NPRECD,513)
EQUIVALENCE (ARRAY(1), JRRAY(1,1))
C=====
PARAMETER (MXUNIT=21)
INTEGER LRUNIT(2,MXUNIT),LUNIT(10)
CHARACTER FNAME*80
DATA LUNIT/1,5,6,7,9,11,12,13,20,28/
C=====
PARAMETER (ITOTAL = 80000)
C=====
DIMENSION DISP(6,ITOTAL), COORD(3,ITOTAL), COORD2(3,ITOTAL)
DIMENSION INODE(ITOTAL), IDOF(30), JEIGNO(10)
C=====
ICYCLE = 0
I1901 = 0
I101 = 0
I = 1
K = 1
C=====

```

```

5 CONTINUE
  WRITE(6,10) MXUNIT
10 FORMAT(1X,'Enter the number of files to be joined (MAX:',I3,':)')
  READ(5,'(I3)') NRU
  IF (NRU .GT. MXUNIT) GOTO 5
  DO 40 INRU = 1, NRU
15  CONTINUE
    WRITE(6,20) INRU
20  FORMAT(1X,'Enter the unit number of input file #',I3,':')
    READ(5,*) LRUNIT(1,INRU)
    DO 41 K1=1,9
    IF (LRUNIT(1,INRU) .EQ. LUNIT(K1)) THEN
      WRITE(6,*) 'ERROR! Unit number cannot be ',LUNIT(K1)
      GOTO 15
    ENDIF
41  CONTINUE
42  CONTINUE
    WRITE(6,30) INRU
30  FORMAT(1X,'Enter the format of input file #',I3,
1    '(1-ASCII, 2-binary):')
    READ(5,*) LRUNIT(2,INRU)
    IF (LRUNIT(2,INRU).NE. 1 .AND. LRUNIT(2,INRU) .NE. 2) THEN
      WRITE(6,*) 'ERROR! This number must be 1 or 2'
      GOTO 42
    ENDIF
40 CONTINUE
C=====
45 CONTINUE
  WRITE(6,50)
50 FORMAT(1X,'Enter the format of the output file ',
1    '(1-ASCII, 2-binary):')
  READ(5,*) LOUTF
  IF (LOUTF .NE. 1 .AND. LOUTF .NE. 2) THEN
    WRITE(6,*) 'ERROR! This number must be 1 or 2'
    GOTO 45
  ENDIF
  WRITE(6,60)
60 FORMAT(1X,'Enter the name of the input file(s) (w/o extension):')
  READ(5,'(A)') FNAME
  CALL INITPF (FNAME, NRU, LRUNIT, LOUTF)
  KEYPRV = 0
C=====
  DO 100 INRU = 1, NRU
    JUNIT = LRUNIT(1,INRU)
    CALL DBRNU (JUNIT)
    I2001 = 0
C=====
    LWRITE=1
C=====
    IF (INRU.EQ.1) THEN
      CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
      DO WHILE (JRCD .EQ. 0)
        KEY=JRRAY(1,2)
        IF((KEY.EQ.1900).OR.(KEY.EQ.1901).OR.(KEY.EQ.1902).OR.
1      (KEY.EQ.1910).OR.(KEY.EQ.1911).OR.(KEY.EQ.1921).OR.
2      (KEY.EQ.1922).OR.(KEY.EQ.2000).OR.(KEY.EQ.1).OR.
3      (KEY.EQ.2001)) THEN
          CALL DBFILW(1,ARRAY,JRCD)
          IF (JRCD .NE. 0) THEN
            WRITE(6,*) 'ERROR WRITING FILE'

```

```

        CLOSE (JUNIT)
        GOTO 100
    ENDIF
ENDIF
IF (JRRAY(1,2) .EQ. 1921 ) THEN
    NODEMAX = JRRAY(1,8)
    IELMAX = JRRAY(1,7)
ENDIF
CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
ENDDO
CALL DBFILE(2,ARRAY,JRCD)
WRITE(*,2010) NODEMAX, IELMAX
CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
DO WHILE (I1901 .LE. NODEMAX)
    IF (JRRAY(1,2) .EQ. 101) THEN
        I1901 = I1901 + 1
        INODE(I1901) = JRRAY(1,3)
        COORD(1,I1901) = ARRAY(4)
        COORD(2,I1901) = ARRAY(5)
        COORD(3,I1901) = 0.0D0
        IF (JRRAY(1,1) .GE. 6) COORD(3,I1901) = ARRAY(6)
    ENDIF
    CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
ENDDO
CALL DBFILE(2,ARRAY,JRCD)
C=====
ELSEIF (INRU.EQ.2) THEN
    CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
    DO WHILE (JRCD .EQ. 0)
        IF (JRRAY(1,2) .EQ. 1980) THEN
            IEIGNO = JRRAY(1,3)
        ENDIF
        CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
    ENDDO
    CALL DBFILE(2,ARRAY,JRCD)
    WRITE(*,2015) IEIGNO
55    READ(5,*,ERR = 950) JEIGNO(I)
    IF (JEIGNO(I) .EQ. 0) GOTO 1010
    I=I+1
    GOTO 55
1010    CONTINUE
    CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
C=====
    DO J = 1, I-1
        IF (JEIGNO(J) .EQ. IEIGNO) K = J
    ENDDO
C=====
    DO WHILE (JRCD .EQ. 0)
        IF (JRRAY(1,2) .EQ. 1902) THEN
            DO 155 IXX3 = 1, JRRAY(1,1)-2
                IDOF(IXX3) = JRRAY(1,IXX3+2)
155            CONTINUE
                ITRANS = 3
                IF (IDOF(3) .EQ. 0) ITRANS = 2
            ENDIF
            CALL DBFILE(0, ARRAY, JRCD)
        ENDDO
        CALL DBFILE(2, ARRAY, JRCD)
C=====
        CALL DBFILE(0, ARRAY, JRCD)

```

```

WRITE(*,2010) NODEMAX, IELMAX
DO WHILE (JRCD .EQ. 0)
  IF (JRRAY(1,2) .EQ. 101 .AND. IEIGNO .EQ.
1    JEIGNO(K))THEN
    I101 = I101 + 1
    DISP(1,I101) = ARRAY(4)
    DISP(2,I101) = ARRAY(5)
    IF (IDOF(3) .NE. 0) DISP(3,I101) = ARRAY(IDOF(3)+3)
    IF (IDOF(4) .NE. 0) DISP(4,I101) = ARRAY(IDOF(4)+3)
    IF (IDOF(5) .NE. 0) DISP(5,I101) = ARRAY(IDOF(5)+3)
    IF (IDOF(6) .NE. 0) DISP(6,I101) = ARRAY(IDOF(6)+3)
    IF (INODE(I101) .EQ. 0) INODE(I101) = JRRAY(1,3)
  ENDIF
  CALL DBFILE(0, ARRAY, JRCD)
  ENDDO
  ENDIF
  CALL DBFILE(2, ARRAY, JRCD)
100 continue
C=====
WRITE(*,2020)
READ(5,*,IOSTAT = J) FACTOR
IF (J .NE. 0) GOTO 950
C=====
WRITE(*,*) FACTOR, DISP(1,1)
DO 2300 p = 1, NODEMAX
  JRRAY(1,1) = 6
  JRRAY(1,2) = 101
  KEY=JRRAY(1,2)
  JRRAY(1,3) = INODE(p)
  ARRAY(4) = COORD(1,p)*10 + FACTOR*DISP(1,p)
  ARRAY(5) = COORD(2,p)*10 + FACTOR*DISP(2,p)
  ARRAY(6) = COORD(3,p)*10 + FACTOR*DISP(3,p)
  if (INODE(p).EQ.7014401) then
    WRITE(*,*) COORD(1,p)*10, INODE(p)
    WRITE(*,*) FACTOR*DISP(1,p), INODE(p)
    WRITE(*,*) COORD(3,p)*10, INODE(p)
    WRITE(*,*) FACTOR*DISP(3,p), INODE(p)
  pause
  endif
  CALL DBFILW(1,ARRAY,JRCD)
  IF (JRCD .NE. 0) THEN
    WRITE(6,*) 'ERROR WRITING FILE'
    CLOSE (JUNIT)
    GOTO 2300
  ENDIF
2300 CONTINUE
C=====
950 WRITE(*,1000)
1000 FORMAT(//,
  1  /,2X,'... TROUBLE READING DATA ... ',
  2  /,2X,'... PROGRAM STOPPED ... ',/)
2010 FORMAT(//,
  1  /,2X,'Number of nodes in model .....',I20,
  2  /,2X,'Number of elements in model .....',I20)
2015 FORMAT(//,
  1  /,2X,'Number of mode shapes available .....',I20,
  2  //,2X,'Enter the mode shape(s) to be used in calculating',
  3  /,2x,'the perturbed mesh (zero when finished):')
2020 FORMAT(//,
  1  /,2X,'Enter the imperfection factor to be introduced ',

```

```

2      /,2X,'into the geometry for this eigenmode:      ')
2025 FORMAT(/,
1      /,2X,'... TROUBLE READING COORDINATE DATA ... ',
2      /,2X,'Number of coordinates in model . . . . .',I20,
3      /,2X,'Number of coordinates read . . . . .',I20)
RETURN
END

```

C.2.4. Programa fjoin3

```

INCLUDE 'aba_param.inc'
DIMENSION ARRAY(513), JRRAY(NPRECD,513)
EQUIVALENCE (ARRAY(1), JRRAY(1,1))
C=====
PARAMETER (MXUNIT=21)
INTEGER LRUNIT(2,MXUNIT),LUNIT(10)
CHARACTER FNAME*80
DATA LUNIT/1,5,6,7,9,11,12,13,20,28/
C=====
PARAMETER (ITOTAL = 80000)
C=====
DIMENSION DISP(6,ITOTAL), COORD(3,ITOTAL), COORD2(3,ITOTAL)
DIMENSION INODE(ITOTAL), INODE2(ITOTAL), IDOF(30), JEIGNO(10)
C=====
ICYCLE = 0
I1901 = 0
I1902 = 0
I101 = 0
I = 1
K = 1
C=====
5 CONTINUE
WRITE(6,10) MXUNIT
10 FORMAT(1X,'Enter the number of files to be joined (MAX:',I3,':)')
READ(5,'(I3)') NRU
IF (NRU .GT. MXUNIT) GOTO 5
DO 40 INRU = 1, NRU
15 CONTINUE
WRITE(6,20) INRU
20 FORMAT(1X,'Enter the unit number of input file #',I3,':')
READ(5,*) LRUNIT(1,INRU)
DO 41 K1=1,9
IF (LRUNIT(1,INRU) .EQ. LUNIT(K1)) THEN
WRITE(6,*) 'ERROR! Unit number cannot be ',LUNIT(K1)
GOTO 15
ENDIF
41 CONTINUE
42 CONTINUE
WRITE(6,30) INRU
30 FORMAT(1X,'Enter the format of input file #',I3,
1      '(1-ASCII, 2-binary):')
READ(5,*) LRUNIT(2,INRU)
IF (LRUNIT(2,INRU).NE. 1 .AND. LRUNIT(2,INRU) .NE. 2) THEN
WRITE(6,*) 'ERROR! This number must be 1 or 2'
GOTO 42
ENDIF
40 CONTINUE
C=====
45 CONTINUE
WRITE(6,50)

```

```

50 FORMAT(1X,'Enter the format of the output file ',
1      '(1-ASCII, 2-binary):')
READ(5,*) LOUTF
IF (LOUTF .NE. 1 .AND. LOUTF .NE. 2) THEN
    WRITE(6,*) 'ERROR! This number must be 1 or 2'
    GOTO 45
ENDIF
WRITE(6,60)
60 FORMAT(1X,'Enter the name of the input file(s) (w/o extension):')
READ(5,'(A)') FNAME
CALL INITPF (FNAME, NRU, LRUNIT, LOUTF)
KEYPRV = 0
C=====
DO 100 INRU = 1, NRU
    JUNIT = LRUNIT(1,INRU)
    CALL DBRNU (JUNIT)
    I2001 = 0
C=====
    LWRITE=1
C=====
    IF (INRU.EQ.1) THEN
        CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
        DO WHILE (JRCD .EQ. 0)
            KEY=JRRAY(1,2)
            IF((KEY.EQ.1900).OR.(KEY.EQ.1901).OR.(KEY.EQ.1902).OR.
1          (KEY.EQ.1910).OR.(KEY.EQ.1911).OR.(KEY.EQ.1921).OR.
2          (KEY.EQ.1922).OR.(KEY.EQ.2000).OR.(KEY.EQ.1).OR.
3          (KEY.EQ.2001)) THEN
                CALL DBFILW(1,ARRAY,JRCD)
                IF (JRCD .NE. 0) THEN
                    WRITE(6,*) 'ERROR WRITING FILE'
                    CLOSE (JUNIT)
                    GOTO 100
                ENDIF
            ENDIF
            IF (JRRAY(1,2) .EQ. 1921 ) THEN
                NODEMAX = JRRAY(1,8)
                IELMAX = JRRAY(1,7)
            ENDIF
            CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
        ENDDO
        CALL DBFILE(2,ARRAY,JRCD)
        WRITE(*,2010) NODEMAX, IELMAX
        I1901=0
        CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
        WRITE(*,*) I1901, NODEMAX
        DO WHILE (I1901 .LE. NODEMAX)
            IF (JRRAY(1,2) .EQ. 101) THEN
                I1901 = I1901 + 1
                INODE(I1901) = JRRAY(1,3)
                COORD(1,I1901) = ARRAY(4)
                COORD(2,I1901) = ARRAY(5)
                COORD(3,I1901) = 0.0D0
                IF (JRRAY(1,1) .GE. 6) COORD(3,I1901) = ARRAY(6)
            ENDIF
            CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
        ENDDO
        CALL DBFILE(2,ARRAY,JRCD)
C=====
    ELSEIF (INRU.EQ.2) THEN

```

```

I1902=0
CALL DBFILE(2,ARRAY,JRCD)
DO WHILE (I1902 .LE. NODEMAX)
  IF (JRRAY(1,2) .EQ. 101) THEN
    I1902 = I1902 + 1
    INODE2(I1902) = JRRAY(1,3)
    DISP(1,I1902) = ARRAY(4)
    DISP(2,I1902) = ARRAY(5)
    DISP(3,I1902) = 0.0D0
    IF (JRRAY(1,1) .GE. 6) DISP(3,I1902) = ARRAY(6)
    if (INODE2(I1902).EQ. 7014401) then
      WRITE(*,*) ARRAY(4), ARRAY(5), ARRAY(6), ARRAY(7),I1902
      WRITE(*,*) ARRAY(3), ARRAY(8), ARRAY(9), INODE2(I1902)
      pause
    endif
  ENDIF
  CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
ENDDO
ENDIF
CALL DBFILE(2, ARRAY, JRCD)
100 continue
C=====
DO 2300 p = 1, NODEMAX
  JRRAY(1,1) = 6
  JRRAY(1,2) = 101
  KEY=JRRAY(1,2)
  JRRAY(1,3) = INODE(p)
  ARRAY(4) = COORD(1,p)*10**3 + DISP(1,p+1)
  ARRAY(5) = COORD(2,p)*10**3 + DISP(2,p+1)
  ARRAY(6) = COORD(3,p)*10**3 + DISP(3,p+1)
  if (INODE(p).EQ. 7014401) then
    WRITE(*,*) ARRAY(4), JRRAY(1,3)
    WRITE(*,*) ARRAY(5), JRRAY(1,3)
    WRITE(*,*) ARRAY(4), JRRAY(1,3)
    WRITE(*,*) COORD(1,p)*10**3, DISP(1,p+1), p
    WRITE(*,*) COORD(2,p)*10**3, DISP(2,p+1), p
    WRITE(*,*) COORD(3,p)*10**3, DISP(3,p+1), p
    pause
  endif
  CALL DBFILW(1,ARRAY,JRCD)
  IF (JRCD .NE. 0) THEN
    WRITE(6,*) 'ERROR WRITING FILE'
    CLOSE (JUNIT)
    GOTO 2300
  ENDIF
2300 CONTINUE
C=====
950 WRITE(*,1000)
1000 FORMAT(/,
  1 /,2X,'... TROUBLE READING DATA ... ',
  2 /,2X,'... PROGRAM STOPPED ... ')/
2010 FORMAT(/,
  1 /,2X,'Number of nodes in model .....',I20,
  2 /,2X,'Number of elements in model .....',I20)
2025 FORMAT(/,
  1 /,2X,'... TROUBLE READING COORDINATE DATA ... ',
  2 /,2X,'Number of coordinates in model .....',I20,
  3 /,2X,'Number of coordinates read .....',I20)
RETURN
END

```

C.2.5. Programa Mola

```

SUBROUTINE URDFIL(LSTOP,LOVRWRT,KSTEP,KINC,DTIME,TIME)
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
DIMENSION ARRAY(513),JRRAY(NPRECD,513),TIME(2)
EQUIVALENCE (ARRAY(1),JRRAY(1,1))
COMMON /VAR/ axial, mom
save /VAR/
COMMON /VAR3/ aux1, rot
save /VAR3/
integer elem, no, n
n=0
DO K1 = 1, 9999999
  CALL DBFILE(0,ARRAY,JRCD)
  JRCD=0
  IF (JRCD.NE.0) GO TO 110
  KEY = JRRAY(1,2)
  if (KEY.EQ.101) then
    if (jrray(1,3).EQ.1) then
      rot=abs(array(8))
      WRITE(6,*) 'Variável rot URDFIL. ',
1    rot
    endif
  endif
  if (KEY.EQ.13) then
    mom=abs(array(7))
    WRITE(6,*) 'Variável mom URDFIL. ',
1    mom
    axial=abs(array(3))
    WRITE(6,*) 'Variável axial URDFIL. ',
1    axial
    n=n+1
  endif
end do
WRITE(6,*) 'Axial, Mom: Incremento n° ',
1    n
110 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,TIME,DTIME,
1 CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,KSPT,KSTEP,KINC,
2 NDI,nshr,coord,jmac,jmtyp,matlayo,laccflg)
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
CHARACTER*3 FLGRAY(15)
DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),T(3,3),TIME(2),
* coord(*),jmac(*),jmtyp(*)
COMMON /VAR/ axial, mom
save /VAR/
COMMON /VAR2/ estado, estado2
save /VAR2/
COMMON /VAR3/ aux1, rot
save /VAR3/
COMMON /VAR4/ rot2
save /VAR4/
real EXC
WRITE(6,*) 'Variável axial USDFLD. ',
1    axial
WRITE(6,*) 'Variável mom USDFLD. ',
1    mom

```

```

if (axial.GT.0) then
WRITE(6,*) 'Excentricidade (mm) USDFLD. ', abs(mom/axial)
endif
STATEV(1)=0
if (abs(rot)<=3.14/180-0.013855805 .and. rot2==0) then
  FIELD(1)=2
else
  rot2=1
  if (axial.EQ.0) then
    FIELD(1)=aux1
  else
    EXC=abs(mom/axial)
    IF (EXC.LE.(60+2*6)*0.65) THEN
      FIELD(1)=0
    ELSEIF (EXC.LE.(60+2*6)*0.90) then
      if (EXC.GT.(60+2*6)*0.65) THEN
        FIELD(1)=1
        estado=1
      endif
    ELSEIF (EXC.GT.(60+2*6)*0.90) THEN
      FIELD(1)=2
      estado2=2
    ENDIF
  endif
  if (estado.EQ.1) then
    FIELD(1)=1
  endif
  if (estado2.EQ.2) then
    FIELD(1)=2
  endif
endif
STATEV(1) = FIELD(1)
aux1=STATEV(1)
WRITE(6,*) 'Variável aux USDFLD. ',
1 aux1,'Posição fim '
RETURN
END

```

ANEXO D

RESULTADOS NUMÉRICOS: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

São apresentados os resultados da análise de sensibilidade realizada para os prumos ensaiados. Esta análise foi realizada utilizando o modelo ABAQUS E.3.

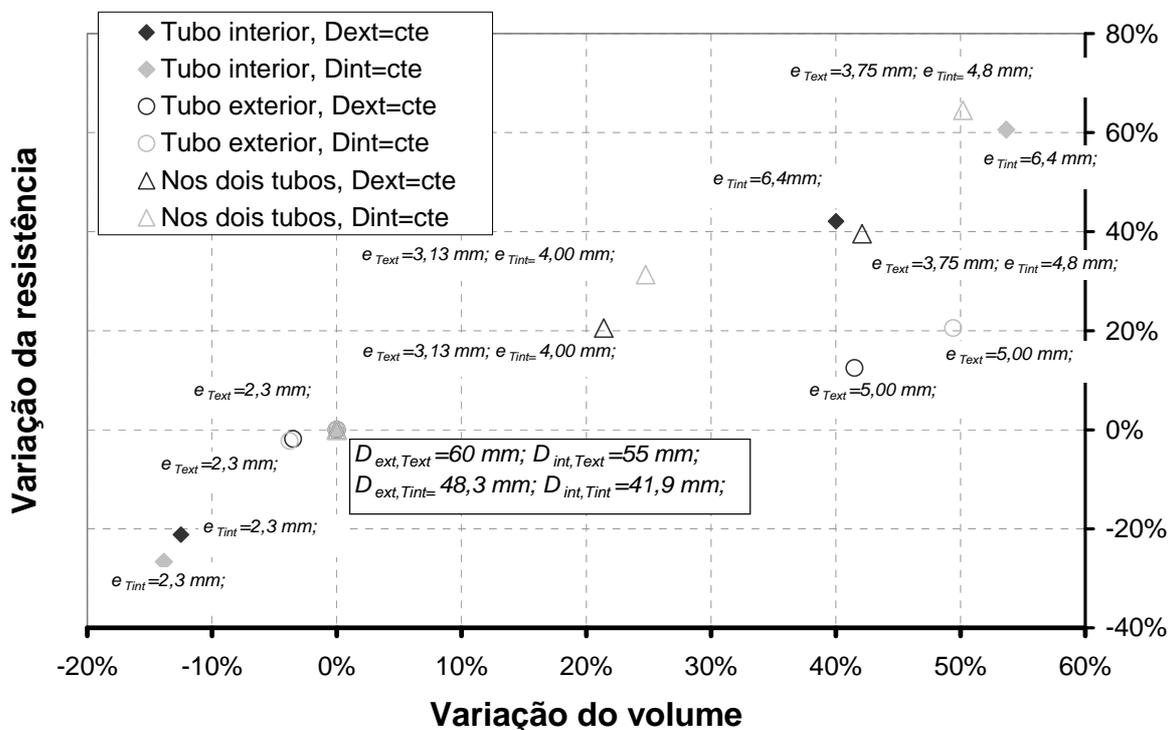


Figura D.1 – Variação da resistência em função da variação da espessura dos tubos.

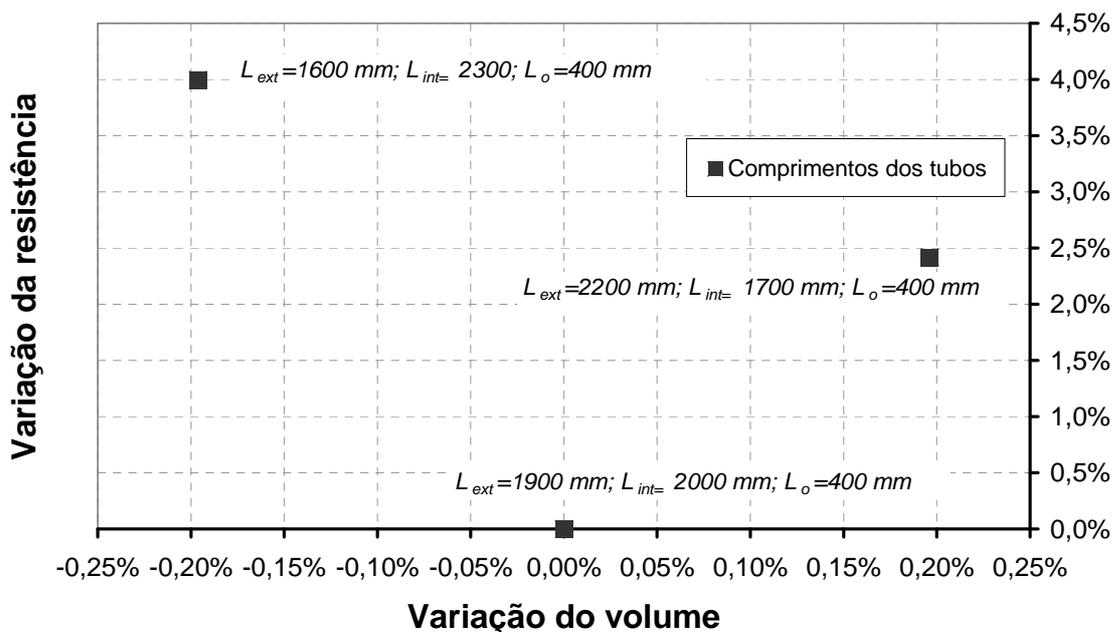


Figura D.2 – Variação da resistência em função da variação do comprimento dos tubos.

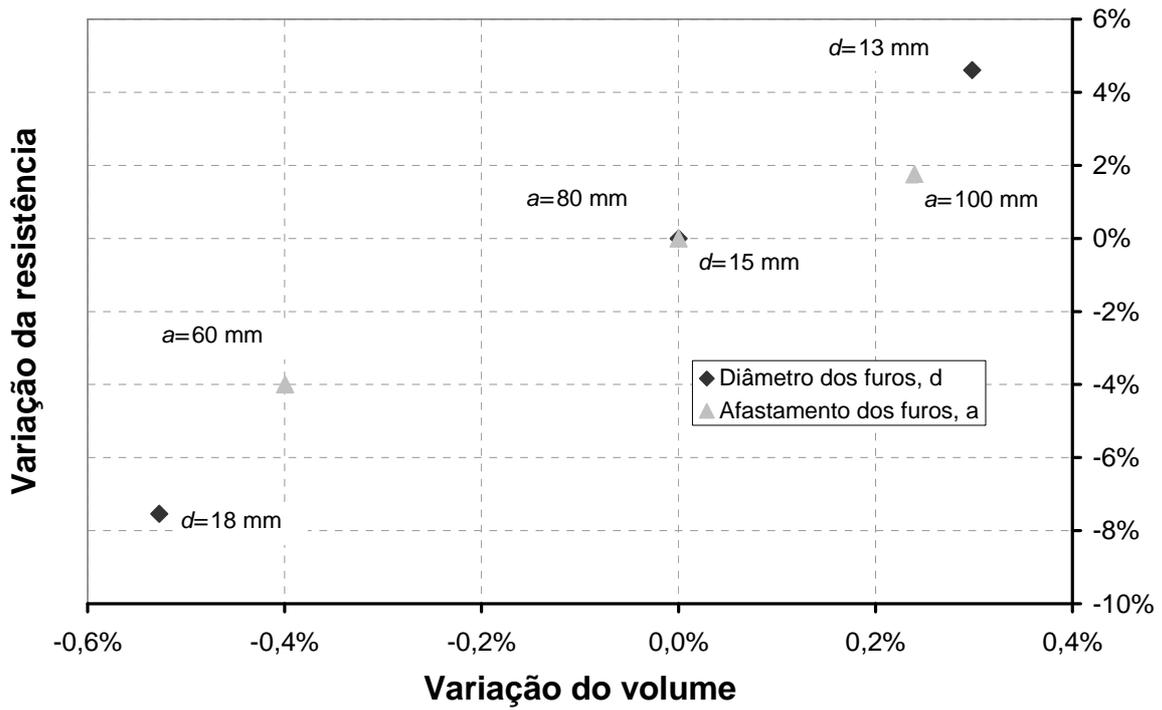


Figura D.3 – Variação da resistência em função da variação das características dos furos.

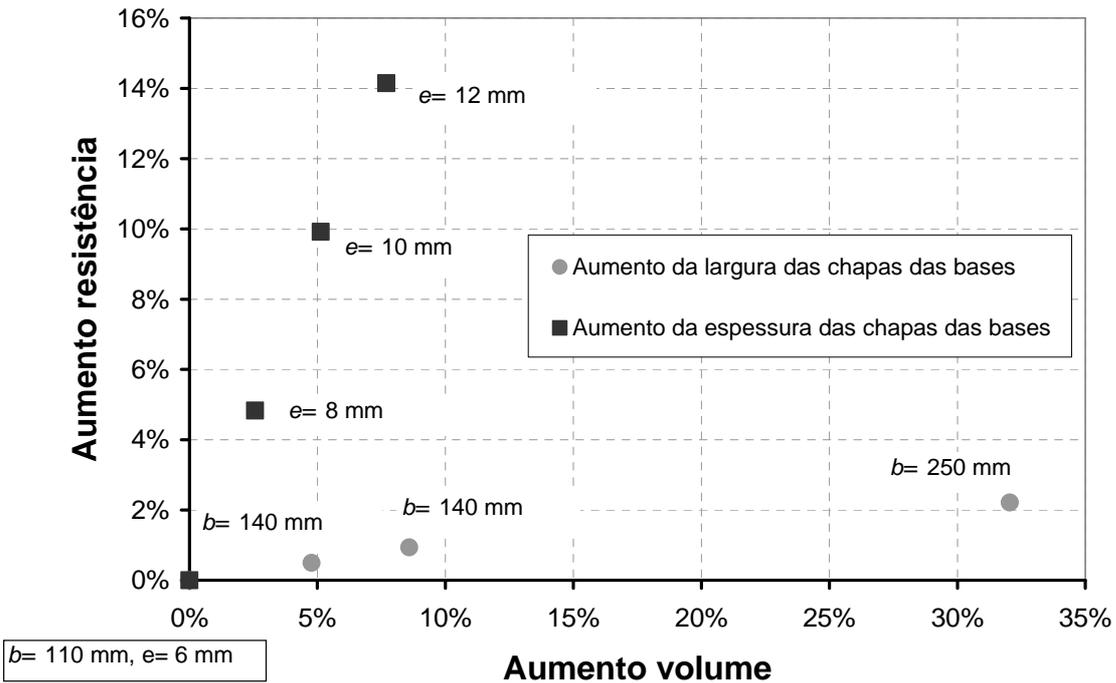


Figura D.4 – Variação da resistência em função da variação das características das chapas das bases.

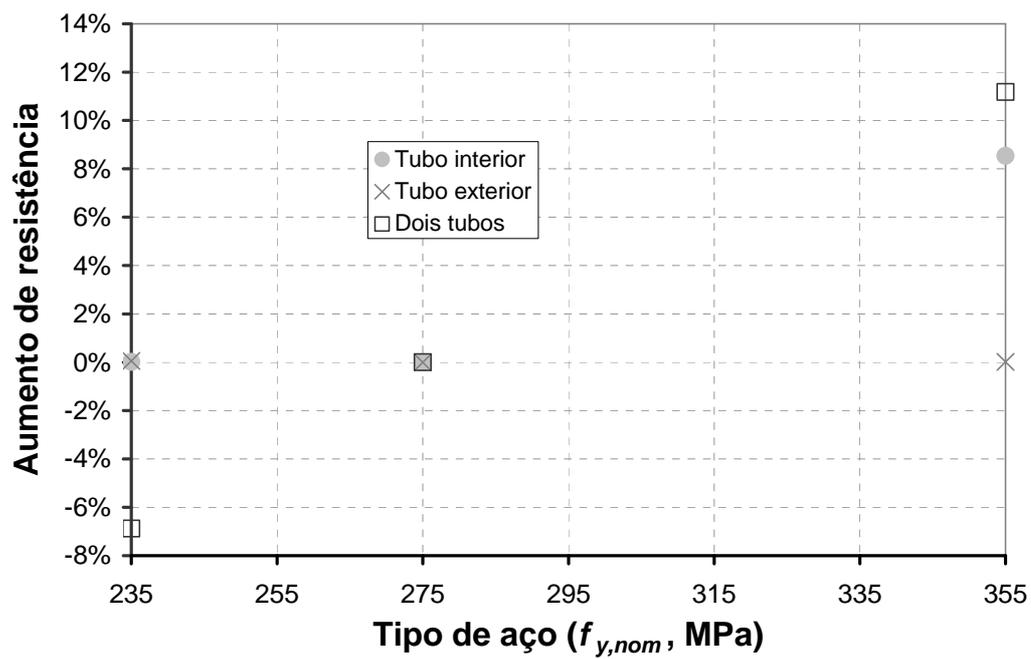


Figura D.5 – Variação da resistência em função da variação da qualidade do aço.

ANEXO E

ENSAIOS DE TRACÇÃO DE PROVETES MAQUINADOS

E.1. Descrição dos ensaios realizados

Foram realizados doze ensaios de tracção de provetes de material retirado dos tubos dos prumos ensaiados. Os provetes foram identificados de modo a ser possível assegurar a rastreabilidade dos resultados, *Identificação do tubo – Identificação do prumo – Identificação do lado da secção*. Foi recolhido material de três prumos, dois dos quais haviam já sido ensaiados à compressão – prumos P4NL3 e P5NL3 – enquanto que o restante – prumo P3 – não havia ainda sido submetido a qualquer ensaio.

Para evitar que os resultados fossem influenciados pela deformação que o material sofreu durante os ensaios, foi retirado material dos prumos ensaiados na altura máxima, i.e. $L=3,5$ m, na configuração normal, (i) na zona junto à base superior do prumo (na configuração normal corresponde à zona próxima da base do tubo interior) já que nesta zona os esforços são menores e (ii) junto à base do tubo exterior, na zona de mudança de curvatura do prumo.

Foram retirados dois provetes na mesma secção, por tubo, em cada prumo.

Os provetes foram maquinados de acordo com os Anexos B e E da norma EN 10002-1:2006. A Figura E.1 ilustra a geometria dos provetes ensaiados. Foi adoptado um comprimento inicial entre referências (L_o) igual a 80 mm. De acordo com esta norma, os provetes ensaiados são considerados não proporcionais¹⁷ já que $5,65 \times \sqrt{20 \times 3,2} = 45,2$ mm e $5,65 \times \sqrt{20 \times 2,5} = 40,0$ mm, para o tubo interior e exterior respectivamente.

O ensaio foi realizado numa máquina de ensaios hidráulica com um alcance máximo de 100 kN, ver a Figura E.2. Com a finalidade de se determinar o módulo de elasticidade do material dos tubos utilizou-se um extensómetro de pontas durante os ensaios, com um comprimento da base inicial de 50 mm, ver a Figura E.3.

Para obter o alongamento na rotura, A , foram efectuadas marcas por punção nos provetes. Foi utilizada uma base inicial de 80 mm para determinar A .

Manteve-se a velocidade de ensaio constante durante a totalidade do ensaio, correspondendo à velocidade média indicada na norma EN 10002-1:2006 para determinar a força de cedência, i.e. em regime elástico.

¹⁷ Os provetes para os quais o comprimento inicial entre referências está relacionado com a área da secção inicial da zona útil pela expressão $L_o = k \sqrt{S_o}$ são designados proporcionais. O valor de k adoptado a nível internacional é de 5,65.

No manual de utilização dos prumos é referido que o material dos tubos, interior e exterior, é da qualidade 43C de acordo com a norma BS 4360:1990. Deste modo o material deve cumprir os requisitos indicados na Tabela E.1.

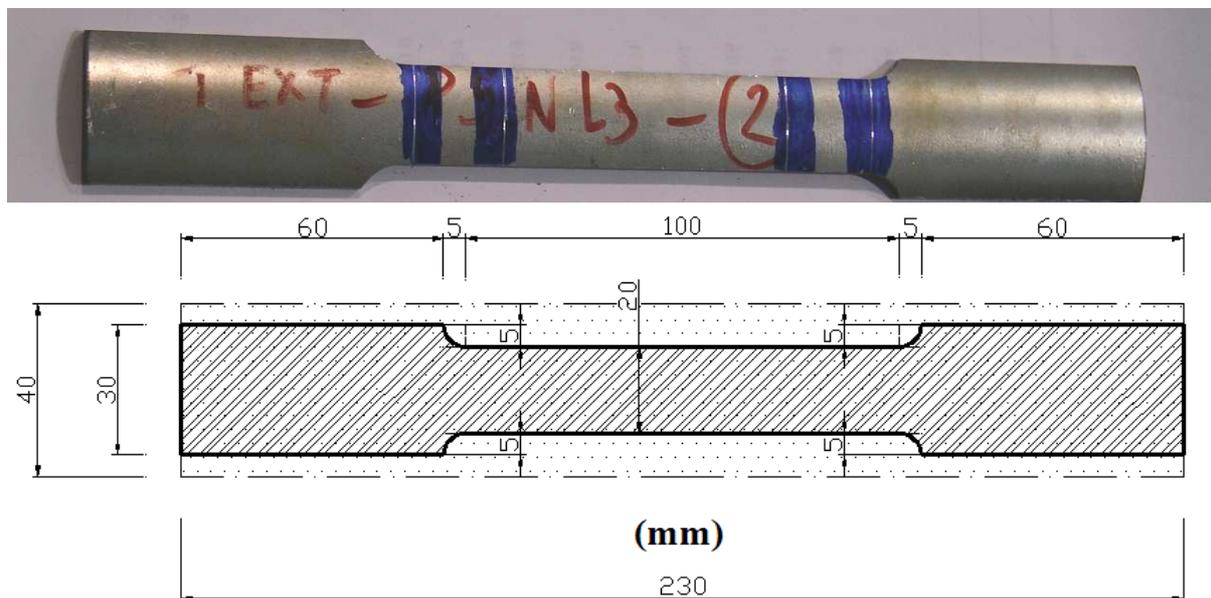


Figura E.1 – Aspecto geral e dimensões dos provetes maquinados.



Figura E.2 – Máquina de ensaio.

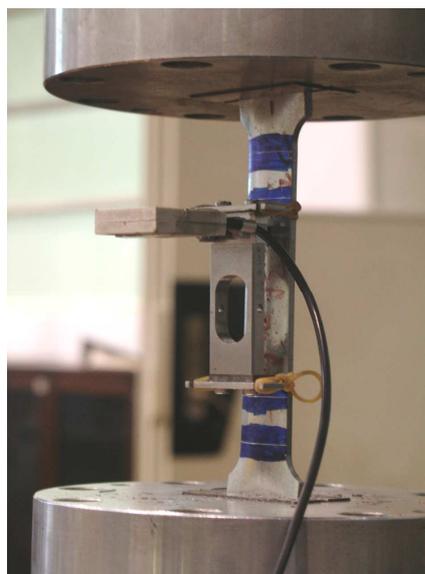


Figura E.3 – Provede em posição de ensaio.

Tabela E.1 – Requisitos mínimos do aço 43C segundo a norma BS 4360:1990.

Tensão de cedência mínima, R_{eH} (MPa)	Tensão máxima, R_m (MPa)	Alongamento na rotura mínimo, A , num provede proporcional, com base inicial de $5,65 \sqrt{S_o}$ (%)
275	430/580	22

E.2. Resultados dos ensaios realizados

A Tabela E.2 resume os resultados obtidos através dos ensaios de tracção dos provetes maquinados de cada um dos tubos. De forma a comparar os valores obtidos com os valores especificados na norma BS 4360:1990 é necessário converter os valores da extensão na rotura para uma base de um provete proporcional. O comprimento da base escolhido corresponde a $5,65\sqrt{S_o}$. A conversão é realizada pelo método descrito na norma EN ISO 2566-1:1999. Deste modo obtêm-se os resultados apresentados na Tabela E.3. Os valores médios de cada um dos parâmetros medidos constam da Tabela E.4.

Tabela E.2 – Resultados dos ensaios de tracção.

ID	Tubo	E (GPa)	F _{eH} (kN)	F _m (kN)	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	L _o (mm)	L _u (mm)	A ₈₀ (%)
P4NL3-1	T _{int}	164	32,26	33,12	504,09 ^{a)}	517,50	80,00	90,56	13,2%
P4NL3-2		161	36,47	38,55	569,78 ^{a)}	602,34		86,72	8,4%
P5NL3-1		160	30,21	32,29	472,03	504,53		91,49	14,4%
P5NL3-2		188	34,09	35,67	532,66	557,34		89,77	12,2%
P3-1		158	30,30	32,05	473,44	500,75		89,79	12,2%
P3-2		172	34,32	36,16	536,25	565,06		87,92	9,9%
P4NL3-1	T _{ext}	163	20,68	24,13	413,60	482,60	80,00	96,53	20,7%
P4NL3-2		166	20,28	24,01	405,60	480,20		100,12	25,2%
P5NL3-1		157	20,03	23,64	400,60	472,80		99,60	24,5%
P5NL3-2		160	20,47	23,90	409,40	478,00		97,13	21,4%
P3-1		160	21,45	24,80	429,00	496,00		98,19	22,7%
P3-2		156	21,60	25,53	432,00	510,60		97,00	21,2%

^{a)}Tensão limite de proporcionalidade a 0,2%.

Tabela E.3 – Conversão dos valores de extensão.

ID	Tubo	A ₈₀ (%)	A _{5√S_o} (%)	ID	Tubo	A ₈₀ (%)	A _{5√S_o} (%)
P4NL3-1	T _{int}	13,2%	16,6%	P4NL3-1	T _{ext}	20,7%	27,3%
P4NL3-2		8,4%	10,6%	P4NL3-2		25,2%	33,2%
P5NL3-1		14,4%	18,1%	P5NL3-1		24,5%	32,3%
P5NL3-2		12,2%	15,3%	P5NL3-2		21,4%	28,2%
P3-1		12,2%	15,4%	P3-1		22,7%	30,0%
P3-2		9,9%	12,4%	P3-2		21,2%	28,0%

Analisando a Tabela E.4 é possível concluir que o material constituinte do tubo interior não cumpre as exigências indicadas na norma BS 4360:1990 para o valor máximo da tensão de rotura e para o valor mínimo da extensão na rotura.

É igualmente possível observar que os valores obtidos para o módulo de elasticidade são inferiores ao esperado, i.e. 210 GPa segundo a parte 1-1 do Eurocódigo 3. Este facto deve-se possivelmente à ocorrência de escorregamentos das lâminas do extensómetro na superfície metálica do provete. Como

tal, os valores do módulo de elasticidade obtidos através dos ensaios de tracção não foram considerados no modelo numérico escolhido, tendo-se admitido o valor de 205 GPa.

Por fim observa-se que os valores da tensão de cedência do material dos dois tubos são muito superiores aos valores nominais. Com base nestes valores apresentam-se na Tabela E.5 os valores dos esforços resistentes dos tubos, esforço normal e momento-flector segundo o eixo de menor inércia. É possível observar que o esforços resistentes do tubo interior quase que duplicam face aos respectivos valores nominais. No entanto continua o tubo exterior a ser o tubo mais resistente dos prumos ensaiados.

A Figura E.4 ilustra o andamento do gráfico tensão vs. deformação extensométrica do material dos dois tubos, obtido através dos ensaios de tracção.

Tabela E.4 – Médias e desvios-padrão dos resultados obtidos.

		E (GPa)	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	A _{5%So} (%)
T _{int}	Média	167	515	541	14,7%
	Desvio padrão	11	35	40	2,8%
T _{ext}	Média	161	415	487	29,8%
	Desvio padrão	4	12	14	2,4%

Tabela E.5 – Esforços resistentes, efectivos e nominais, dos tubos.

Tubo	Reais (Resultados médios)		Nominais	
	N _{pl,rk} (kN)	M _{y,el} (kN.m)	N _{pl,rk} (kN)	M _{y,el} (kN.m)
T _{int}	182,99	1,95	97,77	1,04
T _{ext}	187,43	2,59	124,19	1,71

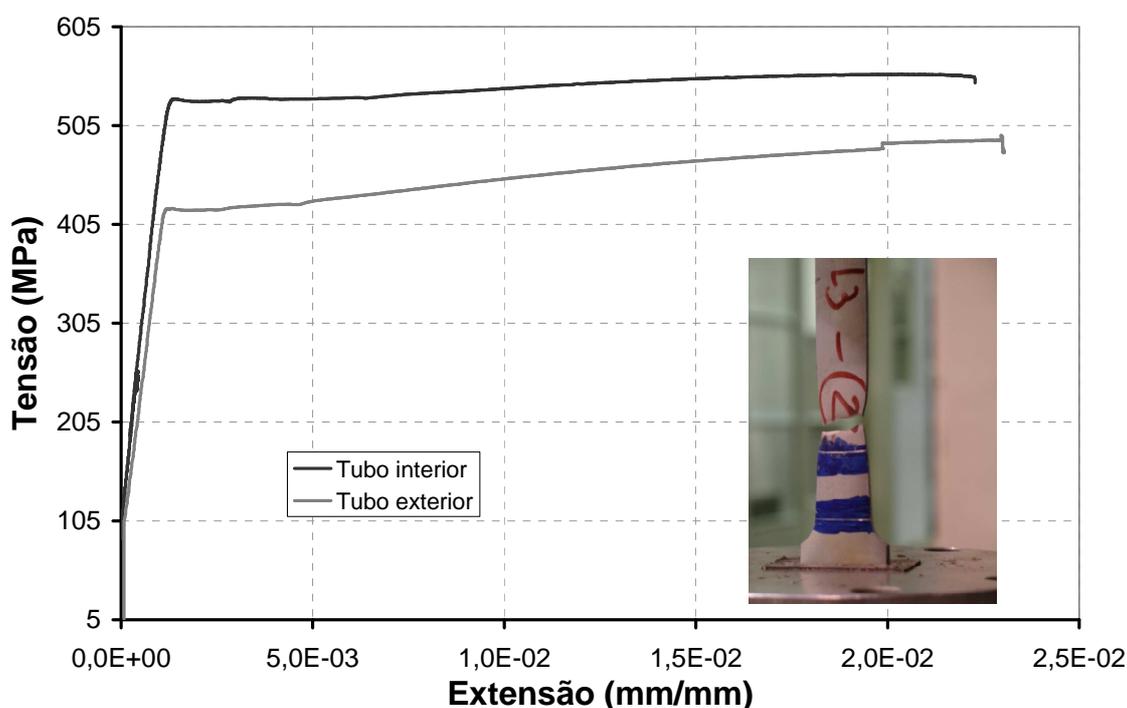


Figura E.4 – Diagrama força-deformação.

ANEXO F

CONTROLO DIMENSIONAL DE PRUMOS TELESCÓPICOS EXTENSÍVEIS

A norma EN 1065:1998 também requer que se realize uma verificação de requisitos funcionais e geométricos das várias componentes do prumo, i.e. tubos, mecanismo de ajuste e fixação do comprimento do prumo e chapa da base dos tubos, num total de cerca de vinte parâmetros. A norma EN 1065:1998 não define no entanto o número mínimo de medições a realizar por parâmetro, pelo que presente Dissertação foi definido como sendo razoável proceder-se ao controlo de 18 parâmetros em três prumos, perfazendo um total de 327 medições de características dos prumos e componentes. Consta da Tabela F.1 a identificação dos parâmetros medidos e o número de medições. Os dois parâmetros sobrantes foram verificados por via experimental. A Tabela F.2 resume os resultados obtidos.

Tabela F.1 – Controlo dimensional dos prumos (continua).

Secção da norma	Descrição das verificações.			Total medições
7.1 (pag 10)	Verificar espessura mínima (tubos interior, exterior), t_w			108
	Classe A:	$t_w \geq 2,3$ mm	18 medições por tubo	
7.7 (pag 15)	Verificação espaço livre entre a chapa da base do tubo interior e o topo do tubo exterior			9
	≥ 100 mm		3 medições por prumo	
7.8 (pag 15)	Extensão mínima do prumo			12
	≥ 1 m		4 medições por prumo	
7.9 (pag 16)	Comprimento mínimo de intersecção dos tubos, l_o			12
	$l_o \geq 300$ mm		4 medições por prumo	
7.3.5 (pag 12) A sua verificação dispensa teste do mecanismo de ajuste do comprimento (Ver 10.3)	Altura mínima do batente da porca roscada			12
	Porca roscada (ligação aberta)	$t_u \geq 5,0$ mm	4 medições por prumo	
	Largura mínima do batente, l_w			12
	Porca roscada (ligação aberta)	$l_w \geq 8,0$ mm	4 medições por prumo	
	Verificar diâmetro mínimo do pino (d_p), se $t_u \leq 7,0$ mm			12
	$d_p \geq 14$ mm		4 medições por prumo	
	Comprimento radial, entre a porca roscada e o tubo interior.			12
$D_m - D_i \leq d_p$		4 medições por prumo		
7.3.1 (pag 11)	Verificar espessura mínima da porca roscada, t_r			24
	$t_r \geq 2,3$ mm		8 medições por prumo	
7.3.2 (pag 11,12)	Extensão do contacto entre a porca roscada e a zona helicoidal do prumo			9
	$\geq 0,5$ mm (Configuração concêntrica)		3 medições por prumo	
	$\geq 0,01$ mm (Configuração excêntrica)		3 medições por prumo	

Tabela F.1 – Controlo dimensional dos prumos.

Secção da norma	Descrição das verificações.			Total medições
7.3.3 (pag 12)	Altura da porca roscada.			24
	Classe A:	min (30 mm; 3 voltas completas na rosca)	8 medições por prumo	
7.3.4 (pag 12)	Diâmetro mínimo do pino, d_p .			12
	$d_p \geq 13$ mm		4 medições por prumo	
7.5.1 (pag 13)	Nº de furos para fins de ligação da chapa das bases.			-
	≥ 2		Contagem por observação	
	Diâmetro do furo central da chapa das bases			12
	≥ 28 mm		4 medições por prumo	
7.5.2 (pag 13)	Espessura mínima da chapa das bases.			24
	Classe A, B e D:	≥ 6 mm	8 medições por prumo	
7.5.3 (pag 13)	Largura mínima da chapa das bases.			12
	Classe A, B e D:	≥ 110 mm	4 medições por prumo	
	Raios mínimos dos cantos da chapa das bases.			12
	$5 \leq r \leq 10$ (mm)		4 medições por prumo	

Tabela F.2 – Resumo das verificações realizadas durante o controlo dimensional dos prumos (continua).

Trabalho		Resultados (mm)		Conclusão
Grandeza a determinar	Critério de verificação	Média	Desvio padrão	
Verificar espessura mínima (tubo interior, exterior), t_w	$t_w \geq 2,3$ mm	Tubo interior	3,32	Verifica
Classe A:		Tubo exterior	2,55	
Verificar a possibilidade de o tubo interior se desligar do tubo exterior acidentalmente		-	-	Verifica
Verificação do espaço livre entre a chapa da base do tubo interior e o topo do tubo exterior (ou a porca roscada)	≥ 100 mm	99,75	0,80	Verifica ¹⁸
Extensão mínima do prumo	≥ 1 m	1499,76	0,78	Verifica
Comprimento mínimo de intersecção dos tubos, l_o	$l_o \geq 300$ mm	401,01	0,66	Verifica
Altura mínima do batente da porca roscada (no caso de uma ligação aberta, Fig. 2.9), t_u	$t_u \geq 5,0$ mm	7,62	0,14	Verifica
Largura mínima do batente da porca roscada (no caso de uma ligação aberta, Fig. 2.9), l_w	$l_w \geq 8,0$ mm	9,78	0,70	Verifica
Diâmetro mínimo do pino (verificar apenas se $t_u \leq 7,0$ mm)	$d_p \geq 14$ mm	13,74	0,06	Verifica ¹⁹

¹⁸ Considerou-se que verifica dada a pequena diferença entre o valor médio e o valor mínimo exigido pela norma EN 1065:1998, e o valor obtido para o desvio padrão.

¹⁹ Verifica porque $t_u=7,62$ mm.

Tabela F.2 – Resumo das verificações realizadas durante o controlo dimensional dos prumos (continua).

Trabalho		Resultados (mm)		Conclusão	
Grandeza a determinar	Critério de verificação	Média	Desvio padrão		
Comprimento radial, entre a porca roscada e o tubo interior.	$D_m - D_i \leq d_p$	12,18	0,02	Verifica	
Verificar se há possibilidade de ajustar o comprimento do prumo impondo uma distância de 100 mm entre o eixo do prumo e uma parede.		-	-	Verifica	
Espessura mínima do batente da porca roscada.	$t_r \geq 2,3$ mm	4,00	0,02	Verifica	
Espessura mínima da zona helicoidal do tubo interior.	$t_r \geq 2,3$ mm	3,47	0,06		
Extensão do contacto entre a porca roscada e a zona helicoidal do prumo, no caso de uma configuração concêntrica	$\geq 0,5$ mm	1,46	0,02	Verifica	
Extensão do contacto entre a porca roscada e a zona helicoidal do prumo, no caso de uma configuração excêntrica	$\geq 0,01$ mm	1,23	0,01	Verifica	
Porca roscada.	$\geq \max(30 \text{ mm}; 3 \text{ voltas completas na rosca})$	Altura batente	41,26	0,01	Verifica
		L^*_{rosca}	74,48	0,21	
		3 voltas	15,62	0,04	
Classe A:					
Diâmetro mínimo do pino, d_p .	$d_p \geq 13$ mm	13,74	0,06	Verifica	
Verificar possibilidade de o pino se soltar do prumo devido a uma acção não intencional		-	-	Verifica	
Nº de furos para fins de ligação da chapa das bases.	≥ 2	Base tubo exterior	4	-	Verifica
		Base tubo interior	8	-	
Diâmetro do furo central da chapa das bases.	≥ 28 mm	Base tubo exterior	39,89	0,12	Verifica
		Base tubo interior	39,76	0,02	
Espessura mínima da chapa das bases.	≥ 6 mm	Base tubo exterior	6,05	0,02	Verifica
		Base tubo interior	6,06	0,02	
Classe A, B e D:					

Tabela F.2 – Resumo das verificações realizadas durante o controlo dimensional dos prumos.

Trabalho		Resultados (mm)		Conclusão
Grandeza a determinar	Critério de verificação	Média	Desvio padrão	
Largura mínima da chapa das bases.	≥ 110 mm	Base tubo exterior	109,71	Verifica ²⁰
Classe A, B e D:		Base tubo interior	109,62	
Raio mínimo, r, nos cantos da chapa das bases.	$5 \leq r \leq 10$ (mm)	Base tubo exterior	8,88	Verifica
		Base tubo interior	8,99	

²⁰ Considerou-se que verifica dada a pequena diferença entre o valor médio e o valor mínimo exigido pela norma EN 1065:1998, e o valor obtido para o desvio padrão.

ANEXO G

PUBLICAÇÕES

André, J.; Baptista, A.M.: “Stability of telescopic props for temporary structures”, *III European Conference on Computational Mechanics, Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering: Stability and Non-Linear Behaviour of Thin-Walled Members and Structures*, ECCM-2006, Lisboa, Portugal, 5-8 Junho 2006;

André, J.; Baptista; A. M.: “Controlo da qualidade de prumos telescópicos extensíveis”, *Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção*, QIC2006, Lisboa, Portugal, 21-24 Novembro 2006;

André, J.; Baptista; A.M.: “Simulação numérica do comportamento de prumos telescópicos extensíveis”, *4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, JPEE 2006, Lisboa, Portugal, 13-16 Dezembro 2006;

André, J.; Baptista, A.M.; Camotim, D: “Estabilidade, pós-encurvadura e resistência última de prumos telescópicos extensíveis”, *CMNE/CILAMCE 2007*, Porto, 13-15 Junho 2007;

André, J.; Baptista, A.M.; Camotim, D: “Análise experimental do comportamento estrutural de prumos telescópicos extensíveis”, *VI Congresso de Construção Metálica e Mista*, CMM, Porto, 22-23 Novembro 2007.

