

Tese apresentada para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade da Beira Interior, sob orientação de:

Prof. Doutor Luís Filipe Almeida Bernardo

- Prof. Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior

“Jamais consideres os teus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para o teu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual o teu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein

Aos meus Pais...

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com a colaboração indispensável de muitas pessoas a quem a autora não pode deixar de manifestar o seu profundo e sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor Luís Filipe Almeida Bernardo, orientador científico deste trabalho, manifesto com destaque e admiração a mais sincera gratidão pela orientação e disponibilidade sempre demonstrada para me aconselhar e direccionar da melhor forma no meu trabalho. Sem a sua valiosa ajuda, esta dissertação de mestrado não seria a mesma.

Gostaria de agradecer ao Mestre Jorge Miguel de Almeida Andrade e ao meu colega de Mestrado, Rui Silva, toda a ajuda prestada que contribuiu para o sucesso e conclusão deste trabalho, designadamente na utilização do programa de cálculo automático.

Agradeço de forma especial à minha irmã Lia, ao meu namorado Rui, à minha avó Margarida e ao Luís. O vosso apoio, carinho e compreensão foram fundamentais. Sem a vossa força e encorajamento, este trabalho não teria sido possível!

E finalmente, esta investigação nunca poderia ter sido realizada sem o apoio incondicional dos meus pais, que fizeram inúmeros sacrifícios para o bem da minha educação e para que conseguisse alcançar os meus sonhos. Para tal, quero lhes agradecer de forma especial todo este apoio e carinho, que foram essenciais para a elaboração da minha dissertação de mestrado.

RESUMO

A construção com recurso a contentores marítimos remodelados é um sistema construtivo recente, existindo diversos tipos e casos de sucesso por todo o mundo. Apresenta um enorme potencial no domínio da construção sustentável uma vez que se baseia na reciclagem de contentores usados.

No entanto não se encontram, na literatura consultada, artigos técnicos sobre o comportamento estrutural deste tipo de construção. Apenas os aspectos arquitectónicos são abordados.

Face ao exposto, este trabalho pretende contribuir para um melhor conhecimento da constituição de um contentor comercial marítimo assim como seu o comportamento estrutural elástico. Este estudo é realizado para dois modelos comerciais de contentores, designadamente os contentores modelo 20'HC e 40'HC com origem nos E.U.A.

Faz-se uma breve apresentação dos vários tipos de construções existentes com recurso a este sistema construtivo. Estas construções caracterizam-se pela sua versatilidade, inovação, modernismo e estética.

Identificam-se os principais elementos constituintes dos dois modelos de contentor estudados que são, essencialmente, chapas e elementos lineares em aço Corten A não comerciais.

Para o estudo do comportamento elástico dos dois modelos de contentor, realizou-se uma análise numérica tendo em conta vários aspectos normativos muito específicos. O programa utilizado, para efeitos de modelação e de cálculo automático, foi o software de análise com elementos finitos LUSAS (Version 14).

Verificou-se que os dois modelos se comportam de uma forma muito semelhante. As chapas apresentam comportamento de placa e os elementos lineares funcionam essencialmente ao esforço axial.

Palavras-chave: contentores marítimos; constituição; comportamento elástico estrutural; modelo 20'HC; modelo 40'HC.

ABSTRACT

The construction with reconverted shipping containers is a recent constructive system and there are already many types of constructions and success projects all around the world. This system presents a great potential in sustainable domain construction because the containers used are recycling containers.

However it was not found, in the consulted literature, technical papers about the structural behavior of this type of construction. Only architectural aspects are discussed.

This work intends to contribute for a better knowledge about the constitution of a commercial shipping container's as well as its elastic structural behavior. This study is performed for two commercial models of containers; in particular the 20'HC and 40'HC models.

A brief presentation of the various types of existing constructions with this constructive system is made. Those constructions are characterized by versatility, innovation, modernism and esthetics.

The components of both models are identified which are steel Corten A plates and linear elements with no commercial cross section.

To study the elastic behavior's of the two models of container, a numerical analysis was achieved and several specific normative aspects were taking into account. The program used for the purposes of modeling and automatic calculation, was the software of analysis with finite elements LUSAS (Version 14).

It was found that the two models behave in a very similar manner. The plates behave with membrane forces and linear elements behave essentially with axial forces.

Key-words: shipping containers; constitution; structural elastic behavior; model 20'HC; model 40'HC

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações gerais.....	1
1.2 – Objectivos e justificação do tema proposto.....	4
1.3 – Organização do trabalho	5
CAPÍTULO II – UTILIZAÇÃO DE CONTENTORES MARÍTIMOS PARA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS	7
2.1 – Introdução	7
2.2 – Tipos de construções existentes.....	7
2.3 – Populações alvo	8
2.4 – Exemplos de edifícios existentes.....	9
2.5 – Conclusões.....	22
CAPÍTULO III – CONSTITUIÇÃO DE UM CONTENTOR	24
3.1 – Introdução	24
3.2 – Contentores marítimos comerciais	24
3.2.1 – Normas I.S.O. associadas aos contentores	24
3.2.2 – Contentores I.S.O.	25
3.3 – Generalidades.....	27
3.4 – Materiais.....	31
3.4.1 – Aço Corten A.....	32
3.5 – Descrição detalhada de cada elemento constituinte.....	33
3.5.1 – Contentor modelo 40’HC.....	33
3.5.1.1 - Estrutura da base.....	33
3.5.1.2 - Face frontal.....	37
3.5.1.3 - Face da porta.....	39
3.5.1.4 - Face lateral.....	42
3.5.1.5 – Cobertura.....	44
3.5.2 – Contentor modelo 20’HC.....	46
3.5.2.1 - Estrutura da base.....	46
3.5.2.2 - Face frontal.....	48

3.5.2.3 - Face da porta.....	50
3.5.2.4 - Face lateral.....	52
3.5.2.5 – Cobertura.....	54
3.6 – Conclusão	55
CAPÍTULO IV – ASPECTOS NORMATIVOS PARA CONTENTORES	56
4.1 – Introdução	56
4.2 - Classificação de secções segundo o EC3.....	56
4.3 – Secções efectivas.....	59
4.4 – Análise global.....	64
CAPÍTULO V –ANÁLISE DE SECÇÕES	66
5.1 – Introdução	66
5.2 – Características mecânicas das secções reais	66
5.2.1 - Coordenadas do centro de gravidade e momentos estáticos de áreas	66
5.2.2 - Momentos e produto de inércia.....	67
5.2.3 - Módulo elástico de flexão	69
5.2.4 - Áreas de corte	69
5.2.5 – Apresentação dos valores.....	72
5.3 – Classificação das secções.....	74
5.3.1 – Modelo 40'HC	74
5.3.2 – Modelo 20'HC	82
5.4 – Determinação das secções efectivas.....	89
5.4.1 – Modelo 40'HC	89
5.4.2 – Modelo 20'HC	94
5.5 - Exemplo de cálculo	98
5.5.1 - Classificação da secção	98
5.5.2 - Determinação da secção efectiva	99
5.5.3 - Características mecânicas da secção.....	100

CAPÍTULO VI – ANÁLISE COMPORTAMENTAL GLOBAL ELÁSTICA DE CONTENTORES	105
6.1 – Modelação dos contentores com elementos finitos.....	105
6.1.1 - Introdução.....	105
6.1.2 – Elementos finitos lineares	107
6.1.3 – Elementos finitos planos	107
6.1.4 - Material.....	110
6.1.5 - Apoios	110
6.1.6 – Carregamento.....	110
6.2 – Casos de carga analisados	111
6.3 – Discussão/análise dos resultados.....	116
6.4 – Conclusões.....	127
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	128
7.1 – Considerações finais	128
7.2 – Recomendações para trabalhos futuros	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
SITES CONSULTADOS	131
ANEXOS	134
A.1 – Peças desenhadas.....	134
A.1.1 – Contentor modelo 20’HC.....	135
A.1.2 – Contentor modelo 40’HC.....	136
A.2 – Resultados obtidos.....	137
A.2.1 – Contentor modelo 20’HC – Caso de carga 1.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Contentores empilhados em navios porta-contentores [7].....	1
Figura 1.2 - Derrube de contentores empilhados em navios porta-contentores [7].....	2
Figura 1.3 - Parqueamento de contentores marítimos [7].....	3
Figura 1.4 - Residencial universitária (Holanda) [U]	3
Figura 2.1 - Container City – Londres [T]	9
Figura 2.2 - Construção de Container City [T].....	9
Figura 2.3 - Vista do interior dum apartamento [T].....	10
Figura 2.4 - Residência universitária Holanda (Amesterdão) [N].....	10
Figura 2.5 - Vista interior de um estúdio [U]	11
Figura 2.6 - Assemblagem dos contentores [U]	11
Figura 2.7 – Projecto da residência universitária - Le Havre (França) [S].....	12
Figura 2.8 - Sede da sociedade Freitag – Zurich (Alemanha) [R].....	12
Figura 2.9 – Loja da Puma – “Puma City” [F]	13
Figura 2.11 – Loja da Puma [F].....	13
Figura 2.12 – Vista interior da loja Puma [F]	14
Figura 2.14 – Contentores tipográficos em Nova York [G]	14
Figura 2.13 – Loja da Puma [F].....	14
Figura 2.15 - Hotel em Uxbridge (Inglaterra) - Fase construtiva [D]	15
Figura 2.16 - Hotel em Uxbridge, Inglaterra – montagem dos contentores [E]	15
Figura 2.17 - Hotel em Uxbridge (obra acabada) [D].....	16
Figura 2.18 - Escritórios em Londres [A].....	16
Figura 2.19 - Publicidade em Nova York [I].....	17
Figura 2.20 – Escola <i>Greenlands School</i> em Guadalajara – México [J]	17
Figura 2.21 – Café/restaurante [K].....	18
Figura 2.22 – Exterior do Museu Nomadic [K].....	18
Figura 2.23 – Interior do Museu Nomadic [K].....	18
Figura 2.24 - Obra de arte [B]	19
Figura 2.25 - Casa de campo na Áustria [A].....	19
Figura 2.26 – Moradia de dois pisos na Califórnia (E.U.A.) [M]	20
Figura 2.27 - Moradia com acabamento exterior tradicional (E.U.A.) [M]	20
Figura 2.28 – Moradia constituída por contentores [M]	20
Figura 2.29 – Moradia constituída por contentores [L]	21
Figura 2.30 – Projecto contentores para Haiti	21
Figura 2.31 – Acampamentos das pessoas desalojadas no Haiti.....	22

Figura 2.32 – Projecto da torre Lotto Turm – Stuttgart (Alemanha) [P].....	23
Figura 3.1 - Constituição de um contentor	27
Figura 3.2 - Constituição de um contentor (modelo 40'HC).....	29
Figura 3.3 - Constituição de um contentor (modelo 20'HC).....	29
Figura 3.4 – Estrutura da base.....	33
Figura 3.5 - Secção do elemento BCM1	34
Figura 3.6 - Secção do elemento BCM2	34
Figura 3.7 - Secção do elemento BCM3	35
Figura 3.8 - Secção do elemento BCM4	35
Figura 3.9 - Secção do elemento BCM5	35
Figura 3.10 - Secção do elemento BCM6	36
Figura 3.11 - Secção do elemento FP.....	36
Figura 3.12 - Secção do elemento BSR	36
Figura 3.13 – Face frontal.....	37
Figura 3.14 - Secção do elemento few.....	37
Figura 3.15 - Secção do elemento FH.....	38
Figura 3.16 - Secção do elemento FS.....	38
Figura 3.17 - Secção do elemento FCP	39
Figura 3.18 – Face da porta.....	39
Figura 3.19 - Secção do elemento DS	40
Figura 3.20 - Secção do elemento DCP (<i>inner part</i>).....	41
Figura 3.21 - Secção do elemento DCP (<i>outer part</i>)	41
Figura 3.22 - Secção do elemento DCP.....	41
Figura 3.23 - Secção do elemento DH	42
Figura 3.24 - Face lateral.....	43
Figura 3.25 – Secção do elemento TSR	43
Figura 3.26 - Secção do elemento sw1/sw3.....	44
Figura 3.27 - Secção do elemento sw2.....	44
Figura 3.28 - Secção do elemento sw2'	44
Figura 3.29 - Cobertura.....	45
Figura 3.30 - Secção do elemento roof	45
Figura 3.31 – Estrutura da base.....	46
Figura 3.32 - Secção do elemento BCM1	46
Figura 3.33 - Secção do elemento BCM2	47
Figura 3.34 - Secção do elemento BSR.....	47
Figura 3.35 – Face frontal.....	48
Figura 3.36 - Secção do elemento few.....	48

Figura 3.37 - Secção do elemento FS.....	49
Figura 3.38 - Secção do elemento FH.....	49
Figura 3.39 - Secção do elemento FCP	50
Figura 3.40 – Face da porta.....	50
Figura 3.41- Secção do elemento DS	51
Figura 3.42 - Secção do elemento DCP.....	51
Figura 3.43 - Secção do elemento DH	52
Figura 3.44 – Face lateral.....	53
Figura 3.45 - Secção do elemento TSR	53
Figura 3.46 - Secção do elemento sw1.....	54
Figura 3.47 - Secção do elemento sw2.....	54
Figura 3.48 – Cobertura.....	54
Figura 3.49 - Secção do elemento <i>roof</i>	54
Figura 4.1 – Exemplo de redução de secção submetida a momento flector [9].....	64
Figura 4.2 – Exemplo de redução de secção submetida a esforço axial [9]	64
Figura 5.1 - Momentos estáticos e coordenadas do centro de gravidade.....	66
Figura 5.2 – Teorema de Steiner	67
Figura 5.3 - Rotação dos eixos em relação aos de referência.....	68
Figura 5.4 - Secção do elemento FP.....	98
Figura 5.5 – Classificação do elemento FP	99
Figura 5.6 – Secção efectiva do elemento FP.....	100
Figura 5.8 – Distancias das fibras extremas ao centro de gravidade	103
Figura 5.9 – Metade da secção efectiva do elemento FP.....	104
Figura 6.1 – Processo de modelação no <i>LUSAS modeller</i>	106
Figura 6.2 – Visualização dos resultados no <i>LUSAS modeller</i>	107
Figura 6.3 - Chapa real com comprimento de 0.30 m e espessura e	108
Figura 6.4 - Modelação da chapa com superfície plana e reforço	108
Figura 6.5 - Caso de carga 1	111
Figura 6.6 - Caso de carga 2	112
Figura 6.7 - Caso de carga 3	112
Figura 6.8 - Caso de carga 4	113
Figura 6.9 - Caso de carga 5	113
Figura 6.10 - Caso de carga 6	114
Figura 6.11 - Caso de carga 7	114
Figura 6.12 - Caso de carga 8	115
Figura 6.13 - Caso de carga 9	115
Figura 6.14 - Caso de carga 10.....	116

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Designação dos contentores segundo a I.S.O.....	25
Tabela 3.2 – Dimensões, pesos e capacidades para vários tipos de contentores.....	25
Tabela 3.3 - Dimensões externas e tolerâncias respectivas a cada tipo de contentor.....	26
Tabela 3.4 - Listagem dos vários elementos com os seus respectivos materiais.....	31
Tabela 3.5 - Valor característico da tensão de cedência dos aços à tracção	31
Tabela 4.1 - Relações máximas comprimento-espessura (c/t) de elementos internos [1]	58
Tabela 4.2 - Relações máximas comprimento-espessura (c/t) de banzos em consola [1]	59
Tabela 4.3 - Fórmulas para a largura efectiva em elementos internos [3]	63
Tabela 4.4 - Fórmulas para a largura efectiva em elementos externos [3]	63
Tabela 5.1 - Áreas de corte dos elementos do contentor 40'HC	69
Tabela 5.2 - Áreas de corte dos elementos do contentor 20'HC	71
Tabela 5.3 - Características mecânicas dos elementos constituintes do contentor 40'HC	72
Tabela 5.4 - Características mecânicas das chapas constituintes do contentor 40'HC	73
Tabela 5.5 - Características mecânicas dos elementos constituintes do contentor 20'HC	73
Tabela 5.6 - Características mecânicas das chapas constituintes do contentor 20'HC	73
Tabela 5.7 – Valor do parâmetro ϵ	74
Tabela 5.8 – Valores limite das relações c/t para os elementos internos	74
Tabela 5.9 - Valores limite das relações c/t para os banzos em consola.....	74
Tabela 5.10 – Classificação do elemento BSR	75
Tabela 5.11 - Classificação do elemento FH/TSR.....	75
Tabela 5.12 - Classificação do elemento DCP	75
Tabela 5.13 - Classificação do elemento DH	75
Tabela 5.14 - Classificação do elemento DS.....	76
Tabela 5.15 - Classificação do elemento FCP	76
Tabela 5.16 - Classificação do elemento FH.....	76
Tabela 5.17 - Classificação do elemento BCM1.....	76
Tabela 5.18 - Classificação do elemento BCM2.....	77
Tabela 5.19 - Classificação do elemento BCM3.....	77
Tabela 5.20 - Classificação do elemento BCM4.....	77
Tabela 5.21 - Classificação do elemento BCM5.....	77
Tabela 5.22 - Classificação do elemento BCM6.....	77
Tabela 5.23 - Classificação do elemento sw1/sw3.....	77
Tabela 5.24 - Classificação do elemento sw2	77
Tabela 5.25 - Classificação do elemento few	77

Tabela 5.26 - Classificação do elemento FP	77
Tabela 5.27 – Classificação das secções dos elementos constituintes do contentor 40'HC	79
Tabela 5.28 - Classificação das secções das chapas constituintes do contentor 40'HC ..	82
Tabela 5.29 – Valor do parâmetro ϵ	82
Tabela 5.30 – Valores limites das relações c/t para os elementos internos.....	83
Tabela 5.31 - Valores limites das relações c/t para os banzos em consola.....	83
Tabela 5.32 - Classificação do elemento BCM1	83
Tabela 5.33 - Classificação do elemento BCM2.....	83
Tabela 5.34 - Classificação do elemento BSR	83
Tabela 5.35 - Classificação do elemento DH	84
Tabela 5.36 - Classificação do elemento DS.....	84
Tabela 5.37 - Classificação do elemento DCP	84
Tabela 5.38 - Classificação do elemento FS	85
Tabela 5.39 - Classificação do elemento FH/TSR.....	85
Tabela 5.40 - Classificação do elemento FCP	85
Tabela 5.41 - Classificação do elemento sw1	85
Tabela 5.42 - Classificação do elemento sw2	86
Tabela 5.43 - Classificação do elemento few	86
Tabela 5.44 - Classificação das secções dos elementos constituintes do contentor 20'HC	86
Tabela 5.45 - Classificação das secções das chapas constituintes do contentor 20'HC ..	88
Tabela 5.46 – Valor do parâmetro ϵ	89
Tabela 5.47 – Secção efectiva do elemento FH.....	89
Tabela 5.48 - Secção efectiva dos elementos BCM2 E BCM5	89
Tabela 5.49 - Secção efectiva do elemento BCM6.....	90
Tabela 5.50 - Secção efectiva do elemento sw1/sw3.....	90
Tabela 5.51 - Secção efectiva do elemento DH	90
Tabela 5.52 - Secção efectiva do elemento DS	90
Tabela 5.53 - Secção efectiva do elemento sw2	90
Tabela 5.54 - Secção efectiva do elemento few	91
Tabela 5.55 - Secção efectiva do elemento FP	91
Tabela 5.56 - Secções efectivas dos elementos constituintes do contentor 40'HC	91
Tabela 5.57 – Características mecânicas das secções efectivas	93
Tabela 5.58 - Características mecânicas das secções efectivas.....	94
Tabela 5.59 - Valor do parâmetro ϵ	94
Tabela 5.60 - Secção efectiva do elemento BCM2.....	94

Tabela 5.61 - Secção efectiva do elemento DH	95
Tabela 5.62 - Secção efectiva do elemento DS	95
Tabela 5.63 - Secção efectiva do elemento sw1	95
Tabela 5.64 - Secção efectiva do elemento sw2	95
Tabela 5.65 - Secção efectiva do elemento few	95
Tabela 5.66 - Secções efectivas dos elementos constituintes do contentor 20'HC	96
Tabela 5.67 - Características mecânicas das secções.....	97
Tabela 5.68 - Características mecânicas das secções.....	97
Tabela 5.69 – Valores limites das relações c/t para os elementos internos.....	98
Tabela 5.70 - Valores limites das relações c/t para os banzos em consola.....	98
Tabela 5.71 - Classificação do elemento FP	99
Tabela 5.72 – Propriedades do elemento FP	100
Tabela 5.73 – Propriedades do elemento FP	101
Tabela 5.74 – Momentos e produto de inércia de cada parcela do elemento FP	102
Tabela 5.75 – Propriedades das parcelas 2 e 7	102
Tabela 5.76 - Propriedades geométricas da secção efectiva FP.....	103
Tabela 5.77 - Propriedades geométricas da secção efectiva FP.....	103
Tabela 5.78 – Propriedades geométricas de metade da secção efectiva FP	104
Tabela 5.79 - Propriedades geométricas de metade da secção efectiva FP	104
Tabela 6.1 - Características mecânicas dos reforços correspondentes a cada chapa (contentor modelo 40'HC).....	109
Tabela 6.2 - Características mecânicas dos reforços correspondentes a cada chapa (contentor modelo 20'HC).....	109
Tabela 6.3 – Tabela resumo dos casos de carga do contentor modelo 40'HC.....	118
Tabela 6.4 – Tabela resumo dos casos de carga do contentor modelo 20'HC.....	122

SIGLAS

- EC3 - Eurocódigo 3
- E.U.A. - Estados Unidos de América
- I.S.O. - *International Standart Organization*

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

a	Distância segundo y
b	Distância segundo z , Largura do reforço
b_{eff}	Largura efectiva
c	Comprimento útil de uma parte de uma secção
e	Espessura da chapa
$e_{y,N}$	Excentricidade segundo y
$e_{z,N}$	Excentricidade segundo z
f_y	Tensão de cedência
h	Altura do reforço
k_σ	Coefficiente de encurvadura (tensões normais)
l	Comprimento
t	Espessura de um componente de uma secção
y	Distância em y do ponto mais afastado da secção ao centro de gravidade
y_0	Coordenada do centro de gravidade segundo y
z	Distância em z do ponto mais afastado da secção ao centro de gravidade
z_0	Coordenada do centro de gravidade segundo z

Letras maiúsculas latinas

A	Área da secção transversal de um elemento
A_c	Área comprimida de uma secção
A_{eff}	Área efectiva de uma secção de classe 4
A_{sy}	Área de corte segundo y
A_{sz}	Área de corte segundo z
I_{eff}	Momento de inércia efectivo
I_y	Momento de inércia de uma secção em relação a y
I_z	Momento de inércia de uma secção em relação a z
I_{yz}	Produto de inércia de uma secção
M	Momento flector
$M_{y,Ed}$	Valor de cálculo do momento flector actuante em torno de y
$M_{z,Ed}$	Valor de cálculo do momento flector actuante em torno de z
N	Esforço axial

N_{Ed}	Valor de cálculo do esforço axial actuante
S_y	Momento estático de uma área em relação ao eixo y
S_z	Momento estático de uma área em relação ao eixo z
W_{eff}	Módulo elástico de flexão efectivo
$W_{eff,y}$	Módulo elástico de flexão efectivo segundo y
$W_{eff,z}$	Módulo elástico de flexão efectivo segundo z

Letras minúsculas gregas

ε	Parâmetro
γ_{Mo}	Coeficiente parcial de segurança
η_1	Parâmetro
λ_p	Coeficiente de esbelteza adimensional de uma placa
ρ_c	Factor de redução para encurvadura da placa
σ_{cr}	Tensão crítica
ψ	Parâmetro