

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objecto	4
1.3	Objectivo	5
1.4	Metodologia	5
1.5	Organização	7
2	Formulação do problema	11
2.1	Considerações iniciais	11
2.2	Condições de equilíbrio	12
2.3	Condições de compatibilidade	13
2.4	Relações constitutivas	14
2.4.1	Fase elástica	15
2.4.2	Fase plástica	15
2.5	Teoremas energéticos	24
2.5.1	Análise elástica	24
2.5.2	Análise elastoplástica	26
3	Modelos híbrido-mistos de elementos finitos	29
3.1	Considerações iniciais	29
3.2	Formulações não-convencionais de elementos finitos	30

3.3	Critérios de aproximação	34
3.4	Condições de equilíbrio	36
3.4.1	Modelo de equilíbrio	36
3.4.2	Modelo de compatibilidade	37
3.5	Condições de compatibilidade	39
3.5.1	Modelo de equilíbrio	39
3.5.2	Modelo de compatibilidade	40
3.6	Relações constitutivas	41
3.6.1	Elasticidade	41
3.6.2	Plasticidade	42
3.7	Sistema governativo - Modelo elástico	44
3.7.1	Modelo de equilíbrio	44
3.7.2	Modelo de compatibilidade	46
3.8	Sistema governativo - Modelo elastoplástico	47
3.8.1	Modelo de equilíbrio	48
3.8.2	Modelo de compatibilidade	51
3.9	Análise incremental	54
3.9.1	Descrição geral do algoritmo	54
3.9.2	Fase elástica	55
3.9.3	Fase plástica	56
3.10	Teorema dos trabalhos virtuais	60
3.10.1	Modelo de equilíbrio	61
3.10.2	Modelo de compatibilidade	61
3.11	Teoremas energéticos - Modelo elástico	62
3.11.1	Modelo de equilíbrio	62
3.12	Teoremas energéticos- Modelo elastoplástico	65
3.12.1	Modelo de equilíbrio	65

ÍNDICE	xi
3.12.2 Modelo de compatibilidade	67
4 Funções de Walsh	71
4.1 Considerações iniciais	71
4.2 Funções e séries de Walsh	73
4.3 Ordenação das funções de Walsh	75
4.4 Geração das funções de Walsh	80
4.4.1 Aplicação da fórmula de Harmuth	81
4.4.2 Aplicação da fórmula de Chien	82
4.4.3 Produtos de funções de Rademacher	83
4.4.4 Montagem da matriz de Hadamard	84
4.5 Propriedades das funções de Walsh	85
4.6 Transformadas de Walsh	86
5 Wavelets	93
5.1 Considerações iniciais	93
5.2 Análise Multiresolução	96
5.3 Definição das Wavelets de Daubechies	105
5.4 Wavelets bidimensionais	111
5.5 Obtenção do valor dos coeficientes a_k	112
5.6 Geração das funções de escala	115
5.7 Propriedades das wavelets	120
5.8 Aproximação de funções	123
5.9 Resolução numérica de equações diferenciais	128
5.10 Considerações finais	135
6 Cálculo das matrizes estruturais	137
6.1 Considerações iniciais	137

6.2	Aproximação dos campos de tensão e de deslocamento	138
6.2.1	Aproximação dos campos no domínio dos elementos	138
6.2.2	Aproximação dos campos na fronteira	139
6.3	Aproximação dos parâmetros plásticos	141
6.4	Cálculo dos elementos das matrizes	144
6.4.1	Matriz de flexibilidade generalizada	144
6.4.2	Operadores de compatibilidade	145
6.4.3	Operadores de equilíbrio	146
6.4.4	Matriz das normais	147
6.4.5	Matriz de endurecimento plástico	147
6.5	Definição de elementos com forma genérica	148
6.6	Dimensão e esparsidade das matrizes	152
6.6.1	Aproximação com funções de Walsh	154
6.6.2	Aproximação com wavelets	161
6.7	Observações finais	164
7	Tratamento numérico de matrizes esparsas	167
7.1	Considerações iniciais	167
7.2	Armazenamento de matrizes esparsas	169
7.3	Operações envolvendo matrizes esparsas	173
7.4	Métodos directos na resolução de sistemas lineares	173
7.5	Métodos iterativos na resolução de sistemas lineares	176
7.5.1	Método dos gradientes conjugados	176
7.5.2	Método de Lanczos	180
7.5.3	Método <i>MRES</i>	182
7.6	Exemplos de aplicação	183
7.6.1	Métodos directos	183

ÍNDICE	xiii
7.6.2 Métodos iterativos	188
7.7 Comentários finais	199
8 Caracterização do comportamento dos modelos híbrido-mistos	201
8.1 Introdução	201
8.2 Refinamento hierárquico	201
8.2.1 Análise com funções de Walsh	202
8.2.2 Análise com wavelets	210
8.3 Análise do efeito da distorção da malha	221
9 Análise de Placas	227
9.1 Introdução	227
9.2 Definição dos operadores intervenientes	228
9.3 Análise elástica da consola quadrada	230
9.3.1 Comparação com outros modelos de elementos finitos	230
9.3.2 Modelo de equilíbrio <i>vs.</i> modelo de compatibilidade	237
9.4 Consideração de soluções singulares	240
9.5 Placa traccionada com fenda central	245
9.6 Consola triangular	248
9.7 Tubo cilíndrico com pressão interna	252
9.8 Viga com carga concentrada	258
9.9 Análise elastoplástica da consola quadrada	259
9.9.1 Análise com funções de Walsh	259
9.9.2 Análise com wavelets	268
10 Análise de Lajes	275
10.1 Introdução	275
10.2 Lajes de Reissner-Mindlin	276

10.2.1	Condições de compatibilidade	276
10.2.2	Condições de equilíbrio	278
10.2.3	Relações constitutivas	279
10.3	Lajes de ordem superior	280
10.3.1	Condições de compatibilidade	281
10.3.2	Condições de equilíbrio	281
10.3.3	Relações constitutivas	283
10.4	Laje quadrada simplesmente apoiada	283
10.4.1	Análise com funções de Walsh	284
10.4.2	Análise com wavelets	293
10.5	Efeito de locking	296
10.6	Efeito da distorção da malha	303
10.7	Laje enviezada	306
10.8	Laje circular	308
10.9	Análise de uma laje espessa encastrada	316
10.10	Análise elastoplástica de uma laje encastrada	323
11	Conclusões e desenvolvimentos futuros	327
11.1	Conclusões	327
11.2	Desenvolvimentos futuros	334
A	Modelos híbrido-mistos de elementos finitos	353
A.1	Teorema dos trabalhos virtuais	353
A.1.1	Modelo de equilíbrio	353
A.1.2	Modelo de compatibilidade	354
A.2	Teoremas energéticos - Modelo elástico	355
A.2.1	Modelo de equilíbrio	355
A.2.2	Modelo de compatibilidade	358

A.3	Definição dos vectores resíduo	361
B	Séries de Walsh	363
B.1	Propriedades das funções de Walsh	363
C	Wavelets	367
C.1	Valores dos coeficientes de filtro	367
C.2	Obtenção das condições de normalização	367
D	Cálculo das matrizes estruturais	371
D.1	Cargas concentradas	371
D.2	Aproximação dos parâmetros plásticos	372
D.2.1	Aproximação constante	372
D.2.2	Aproximação linear	373
D.2.3	Aproximação quadrática	373
D.2.4	Aproximação cúbica	373
D.2.5	Aproximação do 4 grau	376
D.3	Cálculo do integral envolvendo sequências de funções de Dirac	378
D.4	Definição de elementos com forma genérica	380
D.4.1	Elementos trapezoidais	380
D.4.2	Elementos parabólicos	382
E	Tratamento numérico de matrizes esparsas	385
E.1	Operações envolvendo matrizes esparsas	385
E.1.1	Produto interno de vectores	385
E.1.2	Combinação linear de vectores	385
E.1.3	Multiplicação de matriz por vector	386
E.1.4	Multiplicação de matriz por matriz	387
E.1.5	Método de Lanczos	388

Lista de Figuras

2.1	<i>Definição do módulo de plasticidade.</i>	18
2.2	<i>Leis de endurecimento.</i>	19
2.3	<i>Dissipação plástica durante um ciclo fechado de tensões.</i>	20
3.1	<i>Topologia da estrutura.</i>	45
4.1	<i>Processamento de imagens utilizando séries de Walsh (extraído de Beauchamp).</i>	73
4.2	<i>Funções de Walsh ordenadas sequencialmente.</i>	74
4.3	<i>Funções de Walsh bidimensionais.</i>	75
4.4	<i>Quatro primeiras funções das séries CAL e SAL.</i>	76
4.5	<i>Funções de Walsh dispostas segundo a ordem diádica.</i>	77
4.6	<i>Funções de Walsh dispostas segundo a ordem natural.</i>	78
4.7	<i>Expansão de uma função trigonométrica em série de Walsh.</i>	87
4.8	<i>Aplicação da transformada de Walsh bidimensional.</i>	91
5.1	<i>Primeiras funções da série de Haar.</i>	95
5.2	<i>Sistema de Haar; função de escala e wavelet primária.</i>	100
5.3	<i>Operações de translação e de dilatação aplicadas sobre a wavelet primária de Haar.</i>	100
5.4	<i>Funções $\psi_{1,0}(x)$ e $\psi_{1,1}(x)$.</i>	100
5.5	<i>Funções $\psi_{2,0}(x)$, $\psi_{2,1}(x)$, $\psi_{2,2}(x)$ e $\psi_{2,3}(x)$.</i>	101
5.6	<i>Funções $\phi_{2,k}(x)$, com $k = 0, 1, 2, 3$.</i>	102

5.7	<i>Projecção da função $f(x)$ no sub-espaço definido pelas funções $\phi_{2,k}(x)$.</i>	103
5.8	<i>Funções $\phi_{1,k}(x)$, com $k = 0, 1$.</i>	103
5.9	<i>Projecção da função $f(x)$ no sub-espaço definido pelas funções $\phi_{1,k}(x)$.</i>	104
5.10	<i>Projecção da função $f(x)$ no sub-espaço definido pelas funções $\psi_{1,k}(x)$.</i>	105
5.11	<i>Famílias de wavelets de Daubechies. Correspondentes funções de escala e wavelets primárias; $N = 2, 3, 4$.</i>	107
5.12	<i>Famílias de wavelets de Daubechies. Correspondentes funções de escala e wavelets primárias; $N = 5, 6, 7$.</i>	108
5.13	<i>Famílias de wavelets de Daubechies. Correspondentes funções de escala e wavelets primárias; $N = 8, 9, 10$.</i>	109
5.14	<i>Traçado das funções ${}_4\phi_{0,1}(x)$ e ${}_4\phi_{1,0}(x)$.</i>	111
5.15	<i>Representação das wavelets ${}_4\phi(x)$ e ${}_4\phi'(x)$.</i>	121
5.16	<i>Representação das derivadas das funções de escala; $N = 5, \dots, 10$.</i>	122
5.17	<i>Wavelets no intervalo $[0, 1]$.</i>	124
5.18	<i>Wavelets no intervalo $[0, 1]$.</i>	126
5.19	<i>Aproximação da função $f(t) = \sin(2\pi t)$; wavelets com $j = 0$.</i>	129
5.20	<i>Aproximação da função $f(t) = \sin(2\pi t)$; wavelets com $N = 3$.</i>	130
5.21	<i>Soluções aproximadas obtidas com $N = 4$.</i>	134
5.22	<i>Erro relativo das soluções aproximadas obtidas com $N = 4$.</i>	134
5.23	<i>Erro relativo das soluções aproximadas obtidas com $N = 10$.</i>	135
6.1	<i>Célula plástica tipo.</i>	142
6.2	<i>Funções polinomiais utilizadas na aproximação dos parâmetros plásticos.</i>	142
6.3	<i>Funções polinomiais utilizadas na aproximação dos parâmetros plásticos.</i>	143
6.4	<i>Elemento mestre utilizado na definição de elementos com forma não-rectangular.</i>	148
6.5	<i>Consola quadrada.</i>	153
6.6	<i>Malhas utilizadas na análise.</i>	153
6.7	<i>Evolução do índice de esparsidade.</i>	156

6.8	<i>Forma não-condensada da matriz do sistema; malha B e $p = 2$.</i>	156
6.9	<i>Forma condensada da matriz do sistema; malha B e $p = 2$.</i>	158
6.10	<i>Malhas envolvendo a utilização de elementos não rectangulares.</i>	159
6.11	<i>Forma não-condensada da matriz do sistema; malha B' e $p = 2$.</i>	160
6.12	<i>Forma não-condensada da matriz do sistema; malha B'' e $p = 2$.</i>	161
6.13	<i>Forma não-condensada da matriz do sistema; malha B e $p_5^{(w)} = 1$.</i>	162
7.1	<i>Ilustração da ocorrência de fill-in.</i>	184
7.2	<i>Comparação da resolução directa das formas condensada e não-condensada do sistema governativo.</i>	188
7.3	<i>Estimativa do valor óptimo para o parâmetro w.</i>	190
7.4	<i>Comparação do número de iterações necessário para garantir a convergência.</i>	191
7.5	<i>Comparação dos tempos de solução dos algoritmos iterativos.</i>	192
7.6	<i>Evolução do valor da norma do resíduo; gradientes conjugados.</i>	193
7.7	<i>Evolução do valor da norma do resíduo; CG, Lanczos e MRES.</i>	196
7.8	<i>Evolução do valor da norma do resíduo; complemento de Schur.</i>	198
8.1	<i>Evolução do valor da energia de deformação; modelo de equilíbrio com funções de Walsh.</i>	204
8.2	<i>Distribuição das tensões tangenciais; modelo de equilíbrio com funções de Walsh.</i>	205
8.3	<i>Erro relativo da energia de deformação; modelo de equilíbrio com funções de Walsh.</i>	206
8.4	<i>Campo de deslocamentos; modelo de equilíbrio com funções de Walsh.</i>	208
8.5	<i>Evolução da energia de deformação; modelo de compatibilidade vs. modelo de equilíbrio.</i>	209
8.6	<i>Distribuição das tensões tangenciais; modelo de compatibilidade com funções de Walsh.</i>	211
8.7	<i>Campo de deslocamentos; modelo de compatibilidade com funções de Walsh.</i>	212

8.8	<i>Evolução do valor da energia de deformação; solução com wavelets de diferentes famílias.</i>	214
8.9	<i>Tensões tangenciais; solução com wavelets de diferentes famílias.</i>	215
8.10	<i>Campo de deslocamentos na fronteira; solução com wavelets de diferentes famílias.</i>	216
8.11	<i>Tensões tangenciais; solução com wavelets com diferentes graus de refinamento.</i>	219
8.12	<i>Campo de deslocamentos na fronteira; solução com wavelets com diferentes graus de refinamento.</i>	220
8.13	<i>Evolução da energia de deformação; solução com wavelets com diferentes graus de refinamento.</i>	220
8.14	<i>Malha utilizada no estudo da distorção.</i>	221
8.15	<i>Efeito da distorção; variação do deslocamento vertical em A.</i>	223
8.16	<i>Efeito da distorção; variação da tensão σ_{xx} em B.</i>	224
8.17	<i>Efeito da distorção; solução com funções de Walsh.</i>	225
8.18	<i>Efeito da distorção; solução com wavelets.</i>	226
9.1	<i>Análise da consola quadrada; solução com funções de Walsh.</i>	232
9.2	<i>Análise da consola quadrada; solução com wavelets.</i>	233
9.3	<i>Análise da consola quadrada; solução com séries trigonométricas.</i>	234
9.4	<i>Análise da consola quadrada; solução com polinómios de Legendre.</i>	235
9.5	<i>Análise da consola quadrada; solução com COSMOS/D.</i>	236
9.6	<i>Consola quadrada; modelo de compatibilidade com funções de Walsh.</i>	238
9.7	<i>Consola quadrada; modelo de compatibilidade com wavelets.</i>	239
9.8	<i>Distribuição do campo de tracções na fronteira.</i>	241
9.9	<i>Análise da consola encastrada; solução sem funções singulares.</i>	243
9.10	<i>Análise da consola encastrada; solução com funções singulares.</i>	244
9.11	<i>Placa traccionada com fenda central.</i>	245
9.12	<i>Distribuição das tracções na fronteira da placa traccionada com fenda central.</i>	246

9.13	<i>Distribuição do campo de tensões na placa traccionada com fenda central.</i>	247
9.14	<i>Consola triangular.</i>	248
9.15	<i>Malha utilizada na análise da consola triangular.</i>	248
9.16	<i>Consola triangular; traçado das trajectórias de tensão.</i>	250
9.17	<i>Consola triangular; solução obtida através da análise com wavelets.</i>	251
9.18	<i>Tubo cilíndrico sujeito a pressão interna.</i>	252
9.19	<i>Malhas utilizadas na análise do tubo com pressão interna.</i>	253
9.20	<i>Distribuição das tensões ao longo do bordo interior do tubo; solução com 1 elemento.</i>	255
9.21	<i>Distribuição das tensões ao longo do bordo interior do tubo; solução com 2 elementos.</i>	256
9.22	<i>Tubo com pressão interna; solução correspondente ao caso de teste 4.</i>	257
9.23	<i>Viga simplesmente apoiada sujeita à acção de uma carga concentrada.</i>	258
9.24	<i>Solução obtida para a viga simplesmente apoiada.</i>	260
9.25	<i>Distribuição das tracções no bordo superior da viga simplesmente apoiada.</i>	261
9.26	<i>Análise da consola com funções de Walsh e 32×32 células críticas; limite da fase elástica.</i>	262
9.27	<i>Análise da consola com funções de Walsh e 32×32 células críticas; fase intermédia.</i>	262
9.28	<i>Análise da consola com funções de Walsh e 32×32 células críticas; colapso.</i>	263
9.29	<i>Diagramas carga-deslocamento para os diferentes casos de teste.</i>	264
9.30	<i>Análise com 4×4 células críticas; instante de colapso.</i>	265
9.31	<i>Análise com 16×16 células críticas; instante de colapso.</i>	265
9.32	<i>Análise com 128 modos de cedência; instante de colapso.</i>	267
9.33	<i>Análise com 400 modos de cedência; instante de colapso.</i>	267
9.34	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com funções de Walsh; limite da fase elástica.</i>	268

9.35	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com funções de Walsh; fase intermédia 1.</i>	269
9.36	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com funções de Walsh; fase intermédia 2.</i>	269
9.37	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com funções de Walsh; instante de colapso.</i>	270
9.38	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com wavelets; limite da fase elástica.</i>	271
9.39	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com wavelets; fase intermédia 1.</i>	271
9.40	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com wavelets; fase intermédia 2.</i>	272
9.41	<i>Análise elastoplástica da consola quadrada com wavelets; instante de colapso.</i>	272
10.1	<i>Laje simplesmente apoiada.</i>	283
10.2	<i>Malhas utilizadas na análise da laje simplesmente apoiada.</i>	284
10.3	<i>Evolução do valor da energia de deformação; solução com funções de Walsh.</i>	287
10.4	<i>Evolução do valor do deslocamento transversal em C; solução com funções de Walsh.</i>	287
10.5	<i>Evolução do valor do momento flector em C; solução com funções de Walsh.</i>	288
10.6	<i>Erro relativo do valor da energia de deformação; solução com funções de Walsh.</i>	288
10.7	<i>Distribuição do campo de momentos M_{xx}; solução com funções de Walsh.</i>	289
10.8	<i>Campo de deslocamentos transversais ao longo do bordo DC; solução com funções de Walsh.</i>	290
10.9	<i>Campo de esforços obtido com a malha B e $p=6$.</i>	291
10.10	<i>Campo de deslocamentos obtido com a malha B e $p=6$.</i>	292
10.11	<i>Evolução do valor da energia de deformação; solução com wavelets.</i>	295

10.12	<i>Evolução do valor do deslocamento transversal em C; solução com wavelets.</i>	295
10.13	<i>Evolução do valor do momento flector em C; solução com wavelets.</i>	296
10.14	<i>Distribuição do campo de momentos M_{xx}; solução com wavelets.</i>	297
10.15	<i>Campo de esforços obtidos com a malha B e $N = 10$.</i>	298
10.16	<i>Campo de deslocamentos obtidos com a malha B e $N = 10$.</i>	299
10.17	<i>Distribuições de M_{xx}, V_x e w ao longo do bordo DC.</i>	300
10.18	<i>Variação do valor do deslocamento transversal com a espessura; solução com funções de Walsh.</i>	302
10.19	<i>Variação do valor do deslocamento transversal com a espessura; solução com wavelets.</i>	303
10.20	<i>Malha utilizada no estudo da distorção.</i>	304
10.21	<i>Efeito da distorção no valor dos momentos no centro da laje.</i>	305
10.22	<i>Efeito da distorção no valor do deslocamento transversal no centro da laje.</i>	305
10.23	<i>Efeito da distorção no valor da energia de deformação.</i>	306
10.24	<i>Laje enviezada.</i>	306
10.25	<i>Malhas utilizadas na análise da laje enviezada.</i>	307
10.26	<i>Laje enviezada; campo de esforços referente à solução com a malha C.</i>	309
10.27	<i>Laje enviezada; campo de deslocamentos referente à solução com a malha C.</i>	310
10.28	<i>Laje circular com o bordo encastrado.</i>	311
10.29	<i>Malhas utilizadas na análise da laje circular.</i>	311
10.30	<i>Laje circular; campo de esforços na laje com $2R/\tau = 10$.</i>	313
10.31	<i>Laje circular; campo de deslocamentos na laje com $2R/\tau = 10$.</i>	314
10.32	<i>Distribuição dos deslocamentos transversais ao longo do raio da laje circular.</i>	315
10.33	<i>Laje espessa encastrada.</i>	316
10.34	<i>Distribuição das tensões na camada superior da laje; problema "out plane" com $N = 4$.</i>	318

10.35	<i>Distribuição das tensões na camada superior da laje; problema "in plane" com $N = 4$.</i>	319
10.36	<i>Distribuição do campo de tensões na secção EE'; problema "in plane" com modelo do 3º grau.</i>	320
10.37	<i>Distribuição do campo de tensões na secção EE'; problema "in plane" com modelo do 4º grau.</i>	321
10.38	<i>Deformada tridimensional da laje espessa; problemas "in-plane" e "out-plane".</i>	322
10.39	<i>Deslocamentos verticais do plano médio da laje ao longo do segmento de recta \overline{DC}.</i>	323
10.40	<i>Laje encastrada.</i>	323
10.41	<i>Análise elastoplástica da laje encastrada; limite da fase elástica.</i>	324
10.42	<i>Análise elastoplástica da laje encastrada; fase intermédia 1.</i>	325
10.43	<i>Análise elastoplástica da laje encastrada; fase intermédia 2.</i>	325
10.44	<i>Análise elastoplástica da laje encastrada; colapso.</i>	326
D.1	<i>Definição das forças concentradas.</i>	371
D.2	<i>Funções de aproximação quadráticas; construção 2.</i>	374
D.3	<i>Funções de aproximação cúbicas; construção 1.</i>	375
D.4	<i>Funções de aproximação cúbicas; construção 2.</i>	376
D.5	<i>Funções de aproximação do 4º grau.</i>	377
D.6	<i>Representação aproximada de $W(1, x)$ e sua derivada.</i>	379
F.1	<i>Definição da cunha.</i>	391

Lista de Tabelas

4.1	<i>Relação entre a série PAL e as séries WAL e HAD.</i>	79
4.2	<i>Relação entre a série HAD e as séries WAL e PAL.</i>	80
4.3	<i>Relação entre a série WAL e as séries PAL e HAD.</i>	80
4.4	<i>Tempos de CPU (em milésimos de segundo) gastos no cálculo dos N coeficientes da expansão.</i>	88
4.5	<i>Tempos de CPU (em milésimos de segundo) gastos no cálculo dos N coeficientes da expansão em série utilizando o algoritmo FWT.</i>	90
5.1	<i>Valores de $\lambda > 0$ para os quais ${}_N\phi(x), {}_N\psi(x) \in C^\lambda$.</i>	122
5.2	<i>Número de funções e tempos de cálculo (segundos) dispendidos na aproximação para $j = 0$.</i>	128
5.3	<i>Número de funções e tempos de cálculo (segundos) dispendidos na aproximação para $N = 3$.</i>	128
5.4	<i>Tempos de cálculo (segundos) e erros obtidos na resolução numérica da equação diferencial com $N = 4$.</i>	133
5.5	<i>Tempos de cálculo e erros obtidos na resolução da equação diferencial com $N = 10$.</i>	135
6.1	<i>Caracterização do sistema não-condensado; malha A.</i>	155
6.2	<i>Caracterização do sistema não-condensado; malha B.</i>	155
6.3	<i>Caracterização do sistema não-condensado; malha C.</i>	155
6.4	<i>Coefficientes não nulos em cada operador estrutural; malha A.</i>	156
6.5	<i>Influência do valor de p no número de coeficientes não-nulos.</i>	157
6.6	<i>Caracterização do sistema condensado; malha A.</i>	157

6.7	<i>Caracterização do sistema condensado; malha B.</i>	158
6.8	<i>Caracterização do sistema condensado; malha C.</i>	158
6.9	<i>Caracterização do sistema; elementos com forma trapezoidal; malha B'.</i>	160
6.10	<i>Caracterização do sistema; elementos curvos; malha B''.</i>	160
6.11	<i>Número de wavelets envolvido nas aproximações.</i>	162
6.12	<i>Caracterização do sistema não-condensado; malha A.</i>	163
6.13	<i>Caracterização do sistema não-condensado; malha B.</i>	163
6.14	<i>Caracterização do sistema não-condensado; malha C.</i>	163
6.15	<i>Caracterização do sistema condensado; malha A.</i>	164
6.16	<i>Caracterização do sistema condensado; malha B.</i>	164
6.17	<i>Caracterização do sistema condensado; malha C.</i>	164
6.18	<i>Caracterização do sistema; elementos com forma trapezoidal; malha B'.</i>	165
6.19	<i>Caracterização do sistema; elementos curvos; malha B''.</i>	165
7.1	<i>Solução directa do sistema não condensado; malha A.</i>	183
7.2	<i>Solução directa do sistema não-condensado com MA47; malha A.</i>	184
7.3	<i>Solução directa do sistema não-condensado com MA47; malha B.</i>	185
7.4	<i>Solução directa do sistema não-condensado com MA47; malha C.</i>	185
7.5	<i>Tempos de resolução associados a discretizações com aproximadamente o mesmo número de graus de liberdade.</i>	185
7.6	<i>Resolução directa da forma condensada do sistema; malha A.</i>	186
7.7	<i>Resolução directa da forma condensada do sistema; malha B.</i>	187
7.8	<i>Resolução directa da forma condensada do sistema; malha C.</i>	187
7.9	<i>Resolução iterativa dos sistemas governativos; malha A.</i>	189
7.10	<i>Resolução iterativa dos sistemas governativos; malha B.</i>	193
7.11	<i>Resolução iterativa dos sistemas governativos; malha C.</i>	194
7.12	<i>Resolução iterativa dos sistemas normalizados; malha A.</i>	195

7.13	<i>Utilização de algoritmos alternativos.</i>	195
7.14	<i>Resolução iterativa da forma condensada do sistema de equações sem pré-condicionamento.</i>	197
7.15	<i>Resolução iterativa da forma condensada do sistema de equações com pré-condicionamento.</i>	198
8.1	<i>Caracterização das discretizações adoptadas; solução com funções de Walsh.</i>	202
8.2	<i>Resultados referentes à utilização da malha A; solução com funções de Walsh.</i>	202
8.3	<i>Resultados referentes à utilização da malha B; solução com funções de Walsh.</i>	203
8.4	<i>Resultados referentes à utilização da malha C; solução com funções de Walsh.</i>	203
8.5	<i>Valor dos deslocamentos no ponto D; modelo de equilíbrio com funções de Walsh.</i>	207
8.6	<i>Evolução do valor da energia de deformação; modelo de compatibilidade com funções de Walsh.</i>	209
8.7	<i>Valor dos deslocamentos no ponto D; modelo de compatibilidade.</i>	210
8.8	<i>Caracterização das discretizações adoptadas; solução com wavelets de diferentes famílias.</i>	210
8.9	<i>Resultados referentes à utilização da malha A; solução com wavelets de diferentes famílias.</i>	213
8.10	<i>Resultados referentes à utilização da malha B; solução com wavelets de diferentes famílias.</i>	213
8.11	<i>Resultados referentes à utilização da malha C; solução com wavelets de diferentes famílias.</i>	214
8.12	<i>Caracterização das discretizações adoptadas; solução com wavelets com diferentes graus de refinamento.</i>	217
8.13	<i>Resultados referentes à utilização da malha A; solução com wavelets com diferentes graus de refinamento.</i>	218
8.14	<i>Resultados referentes à utilização da malha B; solução com wavelets com diferentes graus de refinamento.</i>	218

8.15	<i>Resultados referentes à utilização da malha C; solução com wavelets com diferentes graus de refinamento.</i>	218
8.16	<i>Caracterização das discretizações utilizadas no estudo do efeito da distorção.</i>	221
8.17	<i>Comparação das soluções obtidas com a malha não-distorcida.</i>	222
8.18	<i>Efeito da distorção; valores normalizados obtidos para o deslocamento vertical em A.</i>	222
8.19	<i>Efeito da distorção; valores normalizados obtidos para o valor da tensão σ_{xx} em B.</i>	223
9.1	<i>Caracterização das diferentes discretizações consideradas.</i>	230
9.2	<i>Valores das tensões nos pontos A, B e C.</i>	231
9.3	<i>Valores dos deslocamentos no ponto D.</i>	237
9.4	<i>Caracterização das discretizações consideradas; modelo de compatibilidade.</i>	237
9.5	<i>Valores das tensões nos pontos A, B e C; modelos de compatibilidade.</i>	240
9.6	<i>Valor dos deslocamentos no ponto D; modelos de compatibilidade.</i> . .	240
9.7	<i>Características das discretizações adoptadas.</i>	242
9.8	<i>Características das discretizações utilizadas na análise da placa tracionada.</i>	245
9.9	<i>Discretizações adoptadas na análise da consola triangular.</i>	249
9.10	<i>Comparação dos valores das tensões nos pontos 1,2,3,4 e 5 da consola triangular.</i>	250
9.11	<i>Discretizações adoptadas para a análise do tubo com pressão interna.</i>	253
9.12	<i>Tubo com pressão interna; solução exacta para o campo de deslocamentos nos pontos A-F.</i>	254
9.13	<i>Tubo com pressão interna; solução referente aos casos 1 e 3.</i>	254
9.14	<i>Tubo com pressão interna; solução referente aos casos 5 e 2.</i>	254
9.15	<i>Tubo com pressão interna; solução referente aos casos 4 e 6.</i>	258
9.16	<i>Discretização utilizada na análise da viga simplesmente apoiada.</i> . . .	259
9.17	<i>Influência da dimensão das células críticas.</i>	264

9.18	<i>Influência do grau dos polinómios seleccionados para aproximar os parâmetros plásticos.</i>	266
9.19	<i>Valor do parâmetro de carga no colapso.</i>	270
10.1	<i>Caracterização das discretizações consideradas na análise da laje simplesmente apoiada.</i>	285
10.2	<i>Laje simplesmente apoiada; resultados obtidos com a malha A e com funções de Walsh.</i>	285
10.3	<i>Laje simplesmente apoiada; resultados obtidos com a malha B e com funções de Walsh.</i>	286
10.4	<i>Laje simplesmente apoiada; resultados obtidos com a malha C e com funções de Walsh.</i>	286
10.5	<i>Laje simplesmente apoiada; caracterização das discretizações adoptadas.</i>	293
10.6	<i>Laje simplesmente apoiada; resultados obtidos com a malha A e com wavelets.</i>	294
10.7	<i>Laje simplesmente apoiada; resultados obtidos com a malha B e com wavelets.</i>	294
10.8	<i>Laje simplesmente apoiada; resultados obtidos com a malha C e com wavelets.</i>	294
10.9	<i>Variação do deslocamento transversal em função do valor da espessura da laje.</i>	301
10.10	<i>Variação do momento flector M_{xx} em função do valor da espessura da laje.</i>	302
10.11	<i>Soluções obtidas para diferentes valores do parâmetro de distorção.</i>	304
10.12	<i>Laje enviezada; resultados referentes a cada uma das malhas testadas.</i>	307
10.13	<i>Laje enviezada; resultados obtidos com outros modelos.</i>	307
10.14	<i>Laje circular; soluções obtidas com as wavelets com $N = 5$.</i>	311
10.15	<i>Laje circular; soluções obtidas com as wavelets com $N = 10$.</i>	311
10.16	<i>Laje circular; comparação de soluções obtidas com diferentes modelos.</i>	315
10.17	<i>Caracterização das aproximações utilizadas na análise da laje espessa.</i>	317
C.1	<i>Valores dos coeficientes de filtro, a_k.</i>	368

F.1	<i>Equações que permitem determinar o valor do parâmetro "a".</i>	392
-----	---	-----