

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	5
1.3. Marco de la tesis . . . . .	9
1.4. Objetivos y aportaciones . . . . .	11
1.5. Estructura de la tesis . . . . .	16
<b>2. El Análisis Estructural y el Sector de la Construcción</b>	<b>19</b>
2.1. Ciudades y edificios . . . . .	19
2.2. El sector de la construcción como motor económico . . . . .	20
2.3. El I+D+i en el sector de la construcción . . . . .	22
2.4. El análisis estructural . . . . .	23
2.5. Los métodos de análisis . . . . .	29
2.5.1. Introducción . . . . .	29
2.5.2. Análisis por barras . . . . .	30
2.5.3. Análisis por elementos finitos . . . . .	33
2.5.3.1. Generalidades . . . . .	33
2.5.3.2. Funciones de forma . . . . .	36
2.5.3.3. Relaciones deformaciones unitarias - desplazamientos . . . . .	38
2.5.3.4. Ecuaciones de equilibrio . . . . .	39
2.5.3.5. Principio de los trabajos virtuales . . . . .	39
2.6. El Código Técnico de la Edificación . . . . .	42
2.7. Acciones en la edificación . . . . .	44
<b>3. El Análisis Estático Lineal de Estructuras</b>	<b>47</b>

3.1.	Introducción . . . . .	48
3.2.	Generación de la matriz de rigidez de la estructura . . . . .	49
3.2.1.	Matriz de rigidez de barras . . . . .	50
3.2.2.	Matriz de rigidez de barras excéntricas . . . . .	59
3.2.3.	Matriz de rigidez de elementos triangulares . . . . .	61
3.2.3.1.	Formulación del elemento DKT . . . . .	65
3.2.3.2.	Formulación del elemento LST3/9R óptimo . . . . .	67
3.2.3.3.	Formulación del elemento triangular de lámina . . . . .	69
3.2.4.	Matriz de rigidez de elementos cuadriláteros . . . . .	74
3.2.5.	Matriz de rigidez de elementos tetraédricos . . . . .	75
3.2.6.	Matriz de rigidez de prismas triangulares . . . . .	80
3.2.7.	Matriz de rigidez de elementos hexaédricos . . . . .	81
3.3.	Generación del vector de cargas . . . . .	86
3.3.1.	Generalidades . . . . .	86
3.3.2.	Cargas aplicadas sobre las barras . . . . .	86
3.3.2.1.	Cargas de fuerzas puntuales en barras . . . . .	90
3.3.2.2.	Cargas de fuerzas constantes en barras . . . . .	92
3.3.2.3.	Cargas de fuerzas variables en barras . . . . .	93
3.3.2.4.	Cargas de momentos puntuales en barras . . . . .	96
3.3.2.5.	Cargas de momentos constantes en barras . . . . .	97
3.3.2.6.	Cargas de momentos variables en barras . . . . .	97
3.3.2.7.	Cargas de temperatura en barras . . . . .	99
3.3.2.8.	Esfuerzos de empotramiento en barras con desconexiones en extremos . . . . .	99
3.3.2.9.	Esfuerzos de empotramiento en barras con excentricidades . . . . .	102
3.3.3.	Cargas aplicadas sobre los triángulos . . . . .	102
3.3.3.1.	Cargas superficiales sobre los triángulos . . . . .	103
3.3.3.2.	Cargas por variación de la temperatura en triángulos	104
3.3.4.	Cargas aplicadas sobre los cuadriláteros . . . . .	105
3.3.5.	Cargas aplicadas sobre los tetraedros . . . . .	105
3.3.5.1.	Cargas volumétricas sobre los tetraedros . . . . .	105
3.3.5.2.	Cargas por variación de la temperatura en los tetraedros . . . . .	106

3.3.6.	Cargas aplicadas sobre los prismas triangulares . . . . .	107
3.3.7.	Cargas aplicadas sobre los hexaedros . . . . .	107
3.3.7.1.	Cargas volumétricas sobre los hexaedros . . . . .	107
3.3.7.2.	Cargas por variación de la temperatura en los hexaedros . . . . .	108
3.4.	Imposición de las condiciones de contorno . . . . .	109
3.5.	Cálculo de los desplazamientos en los nudos de la estructura . . . . .	112
3.6.	Cálculo de solicitaciones en los extremos de las barras . . . . .	113
3.7.	Cálculo de reacciones en apoyos . . . . .	114
3.7.1.	Reacciones en apoyos debidas a las barras . . . . .	115
3.7.2.	Reacciones en apoyos debidas a los triángulos . . . . .	115
3.7.3.	Reacciones en apoyos debidas a los tetraedros . . . . .	115
3.7.4.	Reacciones en apoyos debidas a los hexaedros . . . . .	116
3.7.5.	Reacciones en apoyos debidas a cargas aplicadas sobre los nudos . . . . .	116
3.8.	Cálculo de esfuerzos en puntos intermedios de las barras . . . . .	117
3.8.1.	Cálculo de esfuerzos axiles . . . . .	120
3.8.2.	Cálculo de esfuerzos cortantes en el eje Y y momentos flectores en el eje Z . . . . .	120
3.8.3.	Cálculo de esfuerzos cortantes en el eje Z y momentos flectores en el eje Y . . . . .	121
3.8.4.	Cálculo de momentos torsores en X . . . . .	122
3.9.	Cálculo de deformaciones en puntos intermedios de las barras . . . . .	123
3.9.1.	Cálculo de flechas y giros debido a los movimientos de sus extremos . . . . .	125
3.9.2.	Cálculo de flechas y giros debido a las cargas aplicadas . . . . .	128
3.9.3.	Cálculo de elongaciones y distorsiones . . . . .	132
3.10.	Cálculo de deformaciones, esfuerzos y tensiones en elementos finitos . . . . .	133
3.10.1.	Deformaciones y tensiones en triángulos . . . . .	135
3.10.2.	Esfuerzos cortantes y momentos flectores en triángulos . . . . .	137
3.10.3.	Deformaciones unitarias y tensiones en tetraedros . . . . .	140
3.10.4.	Deformaciones unitarias y tensor de tensiones en hexaedros . . . . .	141
<b>4.</b>	<b>El Análisis Dinámico Lineal de Estructuras</b>	<b>143</b>

4.1.	Introducción . . . . .	144
4.2.	La ecuación del movimiento y su resolución . . . . .	148
4.3.	Generación de la matriz de rigidez de la estructura . . . . .	152
4.4.	Generación de la matriz de masa de la estructura . . . . .	152
4.4.1.	Matriz de masa de barras . . . . .	153
4.4.2.	Matriz de masa de elementos triangulares . . . . .	155
4.4.2.1.	Formulación del elemento triangular a flexión . . . . .	156
4.4.2.2.	Formulación del elemento triangular a membrana . . . . .	157
4.4.2.3.	Formulación del elemento de lámina . . . . .	158
4.4.3.	Matriz de masa de elementos cuadriláteros . . . . .	159
4.4.4.	Matriz de masa de elementos tetraédricos . . . . .	160
4.4.5.	Matriz de masa de elementos hexaédricos . . . . .	160
4.4.6.	Aportación a la matriz de masa de las cargas aplicadas sobre los nudos . . . . .	161
4.5.	Generación de la matriz de amortiguamiento . . . . .	161
4.6.	Generación del vector de cargas dinámicas . . . . .	163
4.7.	Análisis dinámico lineal mediante métodos de integración directa . . . . .	165
4.7.1.	Generalidades . . . . .	165
4.7.2.	Estado del arte . . . . .	169
4.7.3.	El Método de Newmark . . . . .	178
4.7.4.	El Método de Wilson- $\theta$ . . . . .	181
4.7.5.	El Método de las Diferencias Centradas . . . . .	183
4.7.6.	El Método de Houbolt Monopaso . . . . .	184
4.7.7.	El Método HHT- $\alpha$ . . . . .	186
4.7.8.	El Método WBZ- $\alpha$ . . . . .	187
4.7.9.	El Método Generalizado- $\alpha$ . . . . .	189
4.7.10.	El Método SDIRK . . . . .	190
4.7.11.	La Integral de Duhamel . . . . .	192
4.7.12.	Imposición de las condiciones de contorno en los métodos de integración . . . . .	195
4.8.	Análisis dinámico lineal mediante técnicas de análisis modal . . . . .	196
4.8.1.	Vibraciones libres en sistemas no amortiguados . . . . .	196
4.8.2.	Propiedades de los modos de vibración . . . . .	201
4.9.	Análisis dinámico lineal mediante el método de superposición modal	202

4.10. Análisis dinámico lineal mediante el método del análisis modal es- pectral . . . . .	206
4.10.1. Descripción . . . . .	206
4.10.2. Cálculo de la aceleración espectral máxima . . . . .	211
4.10.2.1. Espectro de respuesta de la NCSE-02 . . . . .	211
4.10.2.2. Espectro de respuesta del Eurocódigo 8 . . . . .	212
4.10.2.3. Espectro de respuesta definido por el usuario . . . . .	214
4.10.2.4. Espectro de respuesta proveniente de un acelero- grama . . . . .	214
4.10.3. Técnicas de combinación de los efectos de las componentes de la acción sísmica . . . . .	215
4.10.4. Técnicas de combinación de los resultados modales . . . . .	218
4.10.5. Técnicas de obtención del signo de los resultados . . . . .	230
<b>5. La Computación Científica</b>	<b>235</b>
5.1. Introducción . . . . .	235
5.2. La Computación de Altas Prestaciones . . . . .	238
5.3. Los computadores de altas prestaciones . . . . .	244
5.3.1. Los multiprocesadores de memoria compartida . . . . .	245
5.3.2. Los multiprocesadores de memoria distribuida . . . . .	247
5.3.3. Los multiprocesadores de memoria compartida distribuida . . . . .	248
5.4. Paradigmas de la Programación Paralela . . . . .	251
5.4.1. Hilos de ejecución explícitos . . . . .	251
5.4.2. Paso de mensajes . . . . .	252
5.4.3. Directivas del compilador . . . . .	254
5.4.4. Programación paralela multinivel . . . . .	255
5.5. Entornos de programación paralela . . . . .	256
5.5.1. Message Passing Interface (MPI) . . . . .	257
5.5.2. OpenMP . . . . .	260
5.5.3. Uso conjunto de MPI y OpenMP . . . . .	262
5.6. Evaluación de los algoritmos paralelos . . . . .	263
5.6.1. Speedup o Incremento de Velocidad . . . . .	264
5.6.2. Eficiencia . . . . .	266
5.6.3. Escalabilidad . . . . .	266

5.7.	Software de Computación Científica . . . . .	266
5.7.1.	Núcleos computacionales . . . . .	268
5.7.1.1.	BLAS . . . . .	268
5.7.1.2.	LAPACK . . . . .	268
5.7.1.3.	BLACS . . . . .	269
5.7.1.4.	PBLAS . . . . .	270
5.7.1.5.	ScaLAPACK . . . . .	270
5.7.1.6.	Implementaciones alternativas . . . . .	270
5.7.2.	Particionado de mallas y grafos . . . . .	272
5.7.2.1.	METIS . . . . .	273
5.7.2.2.	PARMETIS . . . . .	276
5.7.3.	Resolución de sistemas de ecuaciones lineales . . . . .	277
5.7.3.1.	Método directos . . . . .	277
5.7.3.2.	Métodos iterativos . . . . .	283
5.7.3.3.	Software numérico disponible . . . . .	287
5.7.4.	El paquete PETSc . . . . .	292
5.7.5.	El cálculo de valores propios . . . . .	295
5.7.5.1.	Introducción . . . . .	295
5.7.5.2.	Métodos de resolución . . . . .	296
5.7.5.3.	Software numérico disponible . . . . .	305
<b>6.</b>	<b>Las Tecnologías Grid y Cloud</b>	<b>309</b>
6.1.	Las Arquitecturas Orientadas a Servicio . . . . .	309
6.2.	La Computación basada en Grid . . . . .	311
6.3.	Globus Toolkit . . . . .	313
6.3.1.	Introducción . . . . .	313
6.3.2.	Componentes principales . . . . .	318
6.3.2.1.	Gestión de recursos y ejecución de trabajos . . . . .	319
6.3.2.2.	Acceso y comunicación de los datos . . . . .	319
6.3.2.3.	Servicios de información . . . . .	320
6.3.2.4.	Gestión de la seguridad . . . . .	320
6.4.	Meta-planificación de tareas en el Grid . . . . .	322
6.5.	La computación en la nube . . . . .	324
6.5.1.	Infraestructura como Servicio (IaaS) . . . . .	326

6.5.2. Plataforma como Servicio (PaaS) . . . . .	327
6.5.3. Software como Servicio (SaaS) . . . . .	327
6.5.4. Tipos de infraestructuras Cloud . . . . .	328
6.6. Microsoft Azure . . . . .	329
6.6.1. Modelos de ejecución . . . . .	329
6.6.2. Gestión de los datos . . . . .	331
6.7. El proyecto VENUS-C . . . . .	332
6.7.1. Generic Worker . . . . .	333
6.7.2. COMPSs . . . . .	335
<b>7. Implementación en Paralelo del Simulador Estructural</b>	<b>337</b>
7.1. Introducción . . . . .	337
7.2. Paralelización del cálculo estático . . . . .	342
7.2.1. Lectura, envío y recepción de los datos de entrada . . . . .	344
7.2.2. Particionado de la estructura . . . . .	344
7.2.2.1. Particionado por corte de nodos . . . . .	345
7.2.2.2. Particionado por corte de elementos . . . . .	349
7.2.2.3. Tareas pendientes en el particionado . . . . .	351
7.2.2.4. Métricas a emplear en el particionado . . . . .	353
7.2.3. Generación de la matriz de rigidez de la estructura . . . . .	355
7.2.4. Generación del vector de cargas . . . . .	363
7.2.5. Imposición de las condiciones de contorno . . . . .	367
7.2.6. Cálculo de los desplazamientos en los nudos . . . . .	368
7.2.7. Cálculo de solicitaciones en extremos de barras . . . . .	372
7.2.8. Cálculo de reacciones en apoyos . . . . .	373
7.2.9. Cálculo de esfuerzos y deformaciones en puntos intermedios de las barras . . . . .	375
7.2.10. Cálculo de deformaciones, esfuerzos y tensiones en elemen- tos finitos . . . . .	376
7.2.11. Escritura de los resultados en disco . . . . .	380
7.3. Paralelización del cálculo dinámico . . . . .	384
7.3.1. Generación de las matrices de rigidez, masa y amortigua- miento . . . . .	384
7.3.2. Generación del vector de cargas dinámicas . . . . .	387

7.3.3.	Paralelización del análisis dinámico mediante métodos de integración directa . . . . .	388
7.3.4.	Paralelización del análisis dinámico lineal mediante técnicas de análisis modal . . . . .	393
7.3.5.	Paralelización del análisis dinámico mediante el método de superposición modal . . . . .	400
7.3.6.	Paralelización del análisis dinámico mediante el método modal espectral . . . . .	403
<b>8.</b>	<b>Aplicación de las Tecnologías Grid y Cloud al Análisis Estructural</b>	<b>409</b>
8.1.	Diseño e implementación del servicio Grid de análisis estructural .	409
8.1.1.	Introducción . . . . .	409
8.1.2.	Gestión de las simulaciones . . . . .	412
8.1.3.	Comunicaciones entre el cliente y el servicio Grid . . . . .	415
8.1.4.	Gestión de la transferencia de los resultados . . . . .	416
8.1.5.	Planificación Grid . . . . .	417
8.1.6.	Notificaciones . . . . .	420
8.1.7.	Tolerancia a fallos . . . . .	421
8.1.8.	Seguridad en el servicio Grid . . . . .	422
8.1.9.	Monitorización del Servicio Grid de Cálculo Estructural . .	423
8.1.10.	Métodos implementados para interactuar con el servicio	424
8.1.11.	El cliente gráfico . . . . .	426
8.2.	Diseño e implementación del servicio Cloud de análisis estructural	428
8.2.1.	Introducción . . . . .	428
8.2.2.	Desarrollos basados en Generic Worker . . . . .	432
8.2.2.1.	Introducción . . . . .	432
8.2.2.2.	El Cliente Gestor de las Simulaciones Remotas .	433
8.2.2.3.	El Servicio Cloud de Análisis Estructural . . . . .	436
8.2.2.4.	Gestión de las simulaciones mediante Generic Worker . . . . .	441
8.2.3.	Desarrollos basados en PMES COMPSs . . . . .	444
8.2.4.	Métodos disponibles para interactuar con el servicio . . .	449
<b>9.</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>451</b>



9.1. Resultados del simulador estructural sobre un cluster . . . . .	451
9.1.1. Plataforma computacional de ejecución . . . . .	451
9.1.2. Librerías numéricas adicionales . . . . .	453
9.1.3. Estructuras seleccionadas como batería de test . . . . .	453
9.1.4. Análisis estático . . . . .	455
9.1.5. Análisis dinámico . . . . .	470
9.2. Resultados del simulador estructural sobre un PC tradicional . . .	476
9.3. Diseño estructural en una infraestructura Grid computacional . . .	480
9.4. Diseño estructural en la plataforma Cloud de Microsoft Azure . . .	483
9.5. Simulación estructural en los servicios Cloud . . . . .	494
<b>10. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>497</b>
10.1. Contribuciones principales . . . . .	497
10.2. Publicaciones docentes y de investigación . . . . .	499
10.3. Aplicaciones que integran al simulador estructural . . . . .	504
10.4. Trabajos futuros . . . . .	510