

# ÍNDICE

---

<b>Resumen</b> .....	<b>v</b>
<b>Resum</b> .....	<b>ix</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Índice</b> .....	<b>xxi</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>xxix</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>xxxvii</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	3
1.2. Objetivo y contribuciones .....	5
1.3. Mención de “Doctor Internacional” .....	7
1.4. Estructura de la tesis .....	7
1.5. Referencias .....	9
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>13</b>
2.1. Origen de la disciplina .....	15
2.2. Bloques temáticos y líneas de investigación .....	15
2.3. Definición del problema .....	16
2.3.1. Estadísticas .....	17
2.3.2. Costes .....	21
2.3.3. Singularidades respecto a otras disciplinas .....	22
2.3.4. Cargas de fuego .....	23
2.3.5. Tipologías de puentes .....	26
2.4. Estudio del problema .....	27
2.4.1. Análisis de eventos .....	27
2.4.2. Análisis experimental .....	27
2.4.3. Análisis numérico .....	28

<b>2.5. Resolución del problema .....</b>	<b>28</b>
2.5.1. Mitigación del riesgo .....	29
2.5.2. Protección de puentes.....	29
2.5.3. Diseños menos vulnerables al fuego .....	29
2.5.4. Comprobación de diseño .....	30
<b>2.6. Aplicación de soluciones .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7. Referencias.....</b>	<b>31</b>
<b>3. Metodología .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1. Introducción .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Software empleado.....</b>	<b>40</b>
3.2.1. Fire dynamics simulator (FDS) .....	40
3.2.2. Abaqus .....	41
<b>3.3. Superficie adiabática.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4. Estudio de un evento real .....</b>	<b>43</b>
3.4.1. Incidente.....	43
3.4.2. Modelo de mecánica de fluidos computacional .....	45
3.4.2.1. Volumen de control.....	45
3.4.2.1.1. Obtención del volumen de control .....	45
3.4.2.1.2. Obtención del tamaño de celda .....	46
3.4.2.1.3. Comprobación del tamaño de celda .....	46
3.4.2.2. Carga de fuego .....	47
3.4.2.3. Disposición de sensores .....	47
3.4.2.4. Temperaturas obtenidas .....	48
3.4.3. Modelo de análisis termo-mecánico.....	50
3.4.3.1. Geometría.....	51
3.4.3.2. Elementos y malla .....	52
3.4.3.3. Propiedades del material .....	52
3.4.3.4. Unión viga armada-losa .....	53
3.4.3.5. Condiciones de contorno.....	53
3.4.3.6. Cargas gravitatorias.....	54

3.4.3.7. Cargas térmicas .....	55
3.4.3.8. Discretización longitudinal empleada.....	55
3.4.3.9. Definición del fallo.....	56
3.4.4. Estudio paramétrico para la validación del modelo.....	56
3.4.4.1. Estudio de la tasa de liberación de calor del derrame .....	57
3.4.4.2. Estudio de la restricción longitudinal al movimiento .....	59
3.4.5. Validación del modelo.....	60
<b>3.5. Conclusiones del estudio de validación de la metodología .....</b>	<b>61</b>
3.5.1. Respecto a las temperaturas del incendio .....	61
3.5.2. Respecto a la respuesta termo-mecánica .....	62
<b>3.6. Referencias.....</b>	<b>62</b>
<b>4. Campaña experimental.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1. Introducción.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2. Descripción del puente experimental.....</b>	<b>69</b>
4.2.1. Proceso constructivo.....	71
4.2.2. Escenarios de fuego.....	72
4.2.2.1. Ensayos preliminares.....	72
4.2.2.2. Ensayos con puente .....	74
4.2.3. Instrumentación .....	76
4.2.3.1. Báscula .....	77
4.2.3.2. Termopares .....	77
4.2.3.2.1. Termopares de control.....	78
4.2.3.3. Termopares de gas .....	78
4.2.3.3.1. Termopares en el acero.....	80
4.2.3.3.2. Termopares en el hormigón .....	81
4.2.3.4. LVDT .....	82
4.2.3.5. Sensores de fibra óptica de altas temperaturas .....	82
4.2.4. Registro de datos .....	83
4.2.5. Ensayos de laboratorio .....	84
<b>4.3. Resultados y discusión.....</b>	<b>84</b>

4.3.1. Tasa de pérdida de masa .....	84
4.3.2. Temperaturas.....	87
4.3.2.1. Árbol de termopares vertical .....	87
4.3.2.2. Temperaturas del gas .....	88
4.3.2.3. Temperaturas del acero .....	91
4.3.2.4. Temperaturas en la losa de hormigón armado.....	95
4.3.3. Flechas .....	95
<b>4.4. Conclusiones .....</b>	<b>97</b>
4.4.1. Aportaciones cuantitativas de los ensayos .....	98
4.4.2. Aportaciones cualitativas de la campaña experimental.....	99
<b>4.5. Futuras líneas .....</b>	<b>100</b>
<b>4.6. Referencias.....</b>	<b>100</b>
<b>5. Validación del modelo de incendios.....</b>	<b>105</b>
<b>5.1. Introducción .....</b>	<b>107</b>
<b>5.2. Caso de estudio.....</b>	<b>107</b>
<b>5.3. Aproximación experimental.....</b>	<b>108</b>
5.3.1. Escenarios de fuego .....	108
5.3.2. Tasa de pérdida de masa .....	110
5.3.3. Temperaturas del gas .....	110
<b>5.4. Modelo simplificado. Correlación de Heskestad &amp; Hamada .....</b>	<b>112</b>
5.4.1. Modelos empleados en la ingeniería frente a incendios .....	112
5.4.2. Ceiling jets .....	113
5.4.2.1. Antecedentes teóricos .....	113
5.4.3. Correlación de Heskestad & Hamada .....	115
5.4.3.1. Parámetros y limitaciones .....	115
5.4.3.2. Aplicación a los ensayos “Valencia bridge fire tests”.....	116
<b>5.5. Modelo avanzado. Fire dynamics simulator (FDS) .....</b>	<b>118</b>
5.5.1. Volumen de control y mallado.....	120
5.5.2. Geometría y materiales .....	121
5.5.3. Carga de fuego y modelo de combustión .....	123

5.5.4. Distribución y tipo de sensores.....	124
5.5.5. Resultados .....	125
<b>5.6. Análisis de incertidumbre de los resultados obtenidos con FDS. ....</b>	<b>128</b>
5.6.1. Incertidumbre experimental.....	129
5.6.2. Incertidumbre del modelo.....	130
5.6.3. Aplicación a los ensayos “Valencia bridge fire tests” .....	131
5.6.3.1. Incertidumbre experimental.....	131
5.6.3.2. Incertidumbre del modelo.....	131
<b>5.7. Conclusiones.....</b>	<b>133</b>
<b>5.8. Referencias.....</b>	<b>135</b>
<b>6. Validación del modelo termo-mecánico .....</b>	<b>139</b>
<b>6.1. Introducción.....</b>	<b>141</b>
<b>6.2. Metodología.....</b>	<b>143</b>
6.2.1. Metodología general .....	143
6.2.2. Validación del modelo termo-mecánico .....	143
6.2.3. Definición del flujo térmico neto sobre la estructura.....	144
6.2.4. Validación mixta del modelo termo-mecánico .....	145
6.2.5. Validación mixta iterativa del modelo termo-mecánico.....	145
<b>6.3. Caso de estudio .....</b>	<b>148</b>
<b>6.4. Registros experimentales .....</b>	<b>149</b>
6.4.1. Tasa de pérdida de masa.....	150
6.4.2. Exposición térmica .....	151
6.4.3. Temperaturas en el acero.....	153
6.4.4. Flechas.....	155
6.4.5. Viento .....	156
<b>6.5. Modelo de simulación de incendios .....</b>	<b>157</b>
6.5.1. Definición del modelo .....	157
6.5.2. Distribución y tipo de sensores.....	158
<b>6.6. Modelo de elementos finitos termo-mecánico .....</b>	<b>160</b>
6.6.1. Elementos y malla .....	161

6.6.2. Propiedades de los materiales .....	162
6.6.3. Discretización de la exposición térmica .....	163
6.6.4. Restricciones y condiciones de contorno y simetría .....	164
6.6.5. Cargas gravitatorias.....	166
<b>6.7. Validación termo-mecánica.....</b>	<b>166</b>
6.7.1. Paso 1. Iteración inicial con hipótesis de viento nulo .....	167
6.7.2. Paso2. Reproducción de la respuesta mecánica .....	168
6.7.3. Paso3. Validación del modelo mecánico.....	170
6.7.4. Paso4. Validación del modelo térmico.....	175
<b>6.8. Metodologías predictivas .....</b>	<b>177</b>
6.8.1. Predicción mediante modelo de campo.....	177
6.8.1.1. Definición de los modelos numéricos .....	178
6.8.1.1.1. Viento.....	178
6.8.1.1.2. Tasa de liberación de calor (HRR).....	178
6.8.1.2. Predicciones de los modelos numéricos .....	179
6.8.1.3. Sobre el coeficiente de convección .....	180
6.8.2. Predicción mediante modelo de fuego localizado .....	181
6.8.2.1. Planteamiento del método de Hasemi .....	181
6.8.2.2. Limitación relativa a la posición relativa entre el fuego y elemento estructural ...	183
6.8.2.3. Limitación relativa al fallo global de la estructura .....	184
<b>6.9. Conclusiones .....</b>	<b>187</b>
6.9.1. Sobre la metodología general.....	187
6.9.2. Sobre el modelo termo-mecánico.....	187
6.9.3. Sobre el modelo de Hasemi .....	187
6.9.4. Sobre los registros experimentales .....	188
6.9.5. El viento .....	189
<b>6.10. Referencias.....</b>	<b>190</b>
<b>7. Conclusions.....</b>	<b>193</b>
<b>7.1. Introduction.....</b>	<b>195</b>
<b>7.2. Chapter 3. Methodology .....</b>	<b>196</b>

7.3. Chapter 4. Valencia bridge fire tests.....	197
7.4. Chapter 5. Fire model validation .....	199
7.5. Chapter 6. Thermo-mechanical model .....	200
7.6. General conclusions.....	202
7.7. References .....	204
<b>8. Futuras líneas .....</b>	<b>207</b>
8.1. Futuras líneas.....	209
<b>9. Glosario y Notación.....</b>	<b>211</b>
9.1. Notación.....	213
9.2. Abreviaturas .....	217
9.3. Términos anglosajones .....	218
<b>10. Aclaraciones.....</b>	<b>221</b>
10.1. Introducción.....	223
10.2. Limitación del sistema estructural considerado .....	223
10.3. Formulación de la condición de contorno térmica .....	223
10.4. Empleo de la superficie adiabática.....	225
10.5. Consideración de aplicación de la superficie adiabática .....	227
10.6. Versiones de FDS empleadas .....	228
10.7. Densidad del hormigón .....	228
10.8. Tasa de liberación de calor por unidad de superficie .....	229
10.9. Justificación de curvas de HRRPUA sin fase de enfriamiento .....	229
10.10. Detalles sobre los termopares empleados en la campaña experimental.....	230
10.11. Descarte de la hipótesis de temperatura de radiación asimilable a la temperatura del gas.....	232
10.12. Distribuciones y tipos de sensores empleados en las distintas validaciones de los modelos numéricos .....	232
10.13. Tipos de validaciones numéricas .....	233
<b>11. Anexo 1. Conclusiones .....</b>	<b>237</b>
11.1. Introducción.....	239
11.2. Capítulo 3. Metodología .....	240

<b>11.3. Capítulo 4. Campaña experimental.....</b>	<b>241</b>
<b>11.4. Capítulo 5. Validación del modelo de incendios .....</b>	<b>243</b>
<b>11.5. Capítulo 6. Validación del modelo termo-mecánico.....</b>	<b>244</b>
<b>11.6. Conclusiones generales .....</b>	<b>246</b>
<b>11.7. Referencias.....</b>	<b>248</b>
<b>12. Anexo 2. Justificación de impacto .....</b>	<b>249</b>
<b>13. Anexo 3. Cartas de aceptación y artículos publicados.....</b>	<b>257</b>
<b>14. Anexo 4. Artículos .....</b>	<b>267</b>