

# TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                                              | <b>31</b> |
| 1.1 Contexto y motivación del estudio                                               | 31        |
| 1.2 Definición de objetivos del proyecto                                            | 32        |
| 1.3 Estructura y organización del documento                                         | 33        |
| <b>2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE</b>                                            | <b>35</b> |
| 2.1 Introducción                                                                    | 35        |
| 2.2 Definición de conceptos                                                         | 36        |
| 2.3 Métodos de diseño y requisitos normativos para la robustez                      | 40        |
| 2.4 Evolución temporal de la producción científica                                  | 44        |
| 2.5 Simulación computacional                                                        | 44        |
| 2.5.1 Método de elementos finitos (FEM)                                             | 45        |
| 2.5.2 Método de elementos discretos (DEM)                                           | 47        |
| 2.5.3 Método de elementos aplicados (AEM)                                           | 48        |
| 2.6 Ensayos experimentales                                                          | 49        |
| 2.6.1 Ensayos con subestructuras                                                    | 50        |
| 2.6.2 Ensayos en pórticos 2D                                                        | 53        |
| 2.6.3 Ensayos en edificios cuya demolición está prevista                            | 56        |
| 2.6.4 Ensayos en edificios cuya construcción es con propósito de investigación      | 58        |
| 2.7 La dualidad: continuidad vs segmentación                                        | 61        |
| 2.8 La segmentación mediante fusibles estructurales                                 | 64        |
| 2.9 Conclusiones                                                                    | 65        |
| <b>3. FUSIBLES ESTRUCTURALES: FUNDAMENTOS Y APLICACIÓN EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL</b> | <b>67</b> |
| 3.1 Introducción                                                                    | 67        |
| 3.2 Concepto y funcionamiento                                                       | 68        |
| 3.3 Límites y configuración de bordes                                               | 69        |
| 3.4 Marco metodológico de segmentación basada en fusibles                           | 71        |

|                                                                                                              |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>3.5 Aproximaciones de diseño basadas en fusibles estructurales.</b>                                       | <b>76</b>      |
| 3.5.1 Columnas fuertes                                                                                       | 77             |
| 3.5.2 Limitadores de fuerza                                                                                  | 77             |
| 3.5.3 Ubicación estratégica del limitador de fuerza                                                          | 77             |
| <b>3.6 Conclusiones</b>                                                                                      | <b>80</b>      |
| <br><b>4. DISEÑO, DESARROLLO DE PROTOTIPOS Y ENSAYOS DE LIMITADORES DE FUERZA</b>                            | <br><b>81</b>  |
| <b>4.1 Introducción y objetivo</b>                                                                           | <b>81</b>      |
| <b>4.2 Diseño y desarrollo de prototipos</b>                                                                 | <b>81</b>      |
| 4.2.1 Diseño conceptual                                                                                      | 81             |
| 4.2.1.1 Elección del diseño                                                                                  | 81             |
| 4.2.1.2 Descripción de los acopladores de rosca                                                              | 85             |
| 4.2.2 Diseño y desarrollo preliminar                                                                         | 86             |
| 4.2.3 Diseño y desarrollo detallado                                                                          | 99             |
| <b>4.3 Análisis y evaluación final</b>                                                                       | <b>101</b>     |
| <b>4.4 Resumen y conclusiones</b>                                                                            | <b>103</b>     |
| <br><b>5. DISEÑO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE FUSIBLES ESTRUCTURALES EN UNA SUBESTRUCTURA</b>                    | <br><b>105</b> |
| <b>5.1 Introducción y objetivo</b>                                                                           | <b>105</b>     |
| <b>5.2 Edificio prototipo con fusibles estructurales</b>                                                     | <b>106</b>     |
| 5.2.1 Diseño y análisis del edificio prototipo                                                               | 106            |
| 5.2.2 Diseño del edificio prototipo para los Estados Límite Últimos (ELU) y Estados Limite de Servicio (ELS) | 106            |
| 5.2.3 Verificación de robustez del edificio prototipo                                                        | 107            |
| 5.2.4 Análisis para escenarios críticos de daño inicial del edificio prototipo                               | 110            |
| 5.2.5 Diseño con fusible del edificio prototipo                                                              | 111            |
| 5.2.6 Verificación de robustez en el edificio prototipo con fusible                                          | 114            |
| 5.2.7 Conclusiones                                                                                           | 116            |
| <b>5.3 Diseño de ensayo experimental</b>                                                                     | <b>116</b>     |
| 5.3.1 Diseño de la subestructura                                                                             | 118            |
| 5.3.2 Modelo computacional para el diseño de la subestructura                                                | 119            |
| 5.3.3 Definición de fases del ensayo – protocolo de carga                                                    | 124            |
| 5.3.4 Análisis y verificación estructural del setup y protocolo de carga del ensayo experimental             | 125            |
| 5.3.5 Disposición final del setup y del espécimen para el ensayo experimental                                | 126            |
| <b>5.4 Fabricación de la subestructura</b>                                                                   | <b>127</b>     |
| 5.4.1 Especimen de hormigón                                                                                  | 128            |
| 5.4.2 Control de Calidad                                                                                     | 131            |
| 5.4.3 Sistema de sujeción auxiliar                                                                           | 132            |
| 5.4.4 Monitorización                                                                                         | 133            |
| 5.4.5 Montaje del ensayo                                                                                     | 137            |
| <b>5.5 Ensayos y protocolo de carga</b>                                                                      | <b>139</b>     |
| 5.5.1 Fase 0 - Carga en columna                                                                              | 139            |

|                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.2 Fase 1 – Demanda a flexión con solo el actuador vertical                              | 140        |
| 5.5.3 Fase 2 – Demanda simultánea a flexión y catenaria (se agota el sistema a flexión)     | 141        |
| 5.5.4 Fase 3 – Catenaria pura                                                               | 141        |
| 5.5.5 Activación del fusible o fallo en la columna, como criterio de finalización           | 141        |
| <b>5.6 Resultados correspondientes al ensayo</b>                                            | <b>142</b> |
| 5.6.1 Descripción y análisis de los daños observados mediante inspección visual             | 142        |
| 5.6.2 Análisis de la monitorización de la respuesta estructural                             | 144        |
| <b>5.7 Comparación entre simulación y ensayo</b>                                            | <b>162</b> |
| <b>5.8 Conclusiones</b>                                                                     | <b>165</b> |
| <b>6. CONCLUSIONES, APORTACIÓN ORIGINAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>               | <b>167</b> |
| 6.1 Resumen y conclusiones                                                                  | 167        |
| 6.2 Aportación original                                                                     | 168        |
| 6.3 Futuras líneas de investigación                                                         | 170        |
| <b>A. APÉNDICE 1 – PUBLICACIONES DEL AUTOR RELACIONADAS CON LA TESIS</b>                    | <b>183</b> |
| <b>B. APÉNDICE 2 – METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL FUSIBLE</b>                            | <b>185</b> |
| <b>C. APÉNDICE 3 – PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS PARA LIMITADORES DE FUERZA</b>                  | <b>213</b> |
| <b>D. APÉNDICE 4 – DESCRIPCIÓN DE UTILLAJES Y OTROS ELEMENTOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS</b> | <b>217</b> |
| <b>E. APÉNDICE 5 – PLANOS DE LA SUBESTRUCTURA</b>                                           | <b>221</b> |