



*Programa de doctorado en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural*

**Vulnerabilidad sísmica en  
edificaciones porticadas compuestas  
de acero y hormigón armado**

Memoria presentada para optar al título de Doctor  
por la Universitat Politècnica de Catalunya

*Por: Ronald David Ugel Garrido*

**Directores:**

**Alex H. Barbat**  
**Luis G. Pujades**

**Septiembre 2015**



## *Dedicatoria*

Esta tesis está dedicada a mi esposa e hijos, quienes son mi razón de ser.

## *Agradecimientos*

Expreso mi mayor agradecimiento a mis directores Alex y Lluís, quienes me han demostrado que su brillantez académica e investigadora sólo se compara con su calidad humana;

A mis padres, hermanos y demás familiares que siempre tuvieron gestos y palabras de estímulo y apoyo para iniciar, desarrollar y culminar este recorrido;

A mis compañeros de aventura doctoral Reyes Indira y Hermenegildo, quienes saben, entienden y valoran mejor que nadie las dificultades transitadas;

A mis colegas del departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, que con su estímulo y disponibilidad para consultas y consejos oportunos, ayudaron a llevar a feliz término este estudio;

A mis alumnos y ahora colegas, cuyos aportes también forman parte importante de esta investigación;

A los integrantes de la oficina del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universidad Politécnica de Catalunya, por sus atenciones y disponibilidad permanente en las gestiones administrativas en la UPC durante todo este doctorado.

A los integrantes de la oficina DFPA de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, quienes hicieron seguimiento constante y ayudaron según sus disponibilidades en los aspectos económicos y administrativos de este doctorado en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado;

A la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, por otorgarme la beca, permisos y facilidades necesarios para llevar adelante estos estudios;

A la Universidad Politécnica de Catalunya por darme la oportunidad de hacer vida como integrante de esta institución.

## Resumen

En este estudio se evaluó el comportamiento sísmico de edificios porticados con estructuras compuestas de acero y hormigón armado con configuraciones estructurales formadas por niveles inferiores de hormigón armado (estructura primaria) y niveles superiores de acero (estructura secundaria). Este tipo de configuración resulta de modificaciones post-proyecto o post-construcción; Se analizó la vulnerabilidad sísmica y el comportamiento estructural de modelos típicos de edificios de uso residencial o comercial que actualmente se construyen o se han construido en la zona metropolitana Barquisimeto-Cabudare en Venezuela. Los modelos o edificaciones existentes se dividen en tres grupos: de baja altura, altura media y edificios altos según la definición de algunos de los códigos utilizados. Los niveles con estructuras de acero corresponden al último o dos últimos niveles de la edificación. Se realizaron análisis de naturaleza no lineal estáticos y dinámicos para determinar los parámetros de capacidad, fragilidad y daño de los sistemas estructurales según los criterios de proyectos como el *RISK UE*, *FEMA 750* y *ATC 40* junto con metodologías como *Espectro-Capacidad*, *N2*, *Adaptive Pushover* y el *Modelo Paramétrico de Capacidad*. En algunos modelos fue notable la diferencia de desempeño en función de las rigideces y las alturas de los modelos; en los desplazamientos relativos de entrepiso se evidencia que en algunos pórticos ciertos niveles experimentan su máximo desplazamiento en el rango elástico de respuesta, mientras que en otros niveles existe una alta concentración de inelasticidad. Las curvas de fragilidad y los índices de daño fueron determinados con dos metodologías distintas a fin de revisar el comportamiento en términos de confiabilidad y se evidencia que en algunos sistemas estructurales existe una gran probabilidad de daño *nulo* mientras que en otros existen altas probabilidades de daño que incursionan en los estados límites *moderado*, *severo* y *colapso*. En los *análisis en función del tiempo (THA)* y *Dinámico Incremental (IDA)* se revisaron 5 acelerogramas híbridos y se generaron 5 artificiales o sintéticos; Todos fueron normalizados y cada uno de ellos, junto a sus correspondientes medias y desviaciones máximas y mínimas, fueron utilizados para efectos de la confiabilidad estructural lo que resultó en 20 señales espectrales estudiadas. Todas estas señales son compatibles con el espectro elástico normativo de la zona en estudio. Los resultados numéricos muestran que con los acelerogramas utilizados la mayoría de los modelos estudiados sufren deformaciones laterales y degradaciones de rigidez significativas, incursionando frecuentemente más allá de estados límites aceptables desde el punto de vista normativo. Se realizaron ensayos experimentales en un pórtico mixto de dos niveles de hormigón armado (nivel inferior) y acero (nivel superior) y una junta mixta acero-hormigón armado a escala real. Ambos ensayos fueron sometidos a cargas laterales cíclicas a fin de determinar sus características, comportamiento y capacidad ante acciones histeréticas en términos de degradación de rigidez y evolución de daño. En la capacidad e índice de daños en los modelos matemáticos, se evidenció la influencia de los desplazamientos relativos de cada nivel y la degradación de rigidez como parámetros fundamentales en la determinación del daño. Todo esto fue convalidado con un enfoque probabilista del daño. Los resultados experimentales arrojaron valores muy similares a los obtenidos en los modelos numéricos utilizándose en este proceso el *Modelo Paramétrico de Capacidad* y los modelos de fragilidad y daño asociados a este método. Finalmente, para lograr continuidad estructural en la unión mixta de columnas de acero con elementos de hormigón armado, se concluye que es posible utilizar los criterios establecidos en *AISC* y *ASCE* para el diseño de placas base en columnas de acero. De otro modo, las juntas tendrían que ser consideradas semi-rígidas.

## *Abstract*

In this study it was assessed the seismic behavior of framed buildings with composite structure of steel and reinforced concrete (RC) in a specific configuration formed with lower levels with RC (primary structure) and higher levels with steel (secondary structure) as structural materials for components. This typology results from post-construction and post-project modifications; It was analyzed the seismic vulnerability and structural behavior in typical models of buildings for residential or commercial use currently being built or already built in the metropolitan area Barquisimeto-Cabudare in Venezuela. Models or existing buildings are divided into three groups: low-rise, medium height and tall buildings. Levels with steel elements correspond to the higher or two higher levels of the buildings. Static and dynamic nonlinear analyses were conducted to determine the parameters of capacity, fragility and damage of structural systems. These analyses were based on criteria for projects such as *RISK UE*, *FEMA 750* and *ATC 40*, along with methodologies such as *Spectrum-Capacity*, *N2*, *Adaptive Pushover* and *the Capacity Parametric Model*. The difference in performance was remarkable in some models depending on rigidities and the heights of models; Inter story displacements evidenced that in some structural systems, some levels experienced its maximum displacement in the elastic response range, whereas at other levels there is a high concentration of inelasticity. Fragility curves and damage indices were determined using two different methodologies in order to assert the behavior in terms of reliability and it was evidenced that in some structural systems there is a great probability of zero damage while in others predominate a high probability of reach *moderate*, *severe* or *collapse* damage states. In *Time-History* and *Incremental Dynamic* analysis, were used 5 real and 5 synthetic accelerograms; All of them were normalized and each one, with their corresponding mean, maximum and minimum deviations, resulted in 20 seismic signals that were used for purposes of structural reliability. All accelerograms were compatible with the elastic spectrum corresponding to the emplacement site design of the building stiff soil. Numerical results show that with these accelerograms most of the models suffer significant lateral deformations, often reaching beyond acceptable limits states from the Venezuelan normative. It was performed a experimental test of a two level frame with Steel elements in the higher level and Reinforced Concrete elements in the lower level. Another experimental test was performed on a full-scale mixed Steel-Reinforced Concrete joint. Both tests were subjected to cyclic lateral loads in order to determine its characteristics, behavior and capacity to hysteretic actions in terms of stiffness degradation and damage evolution. Concerning to capacity and damage indexes, it was showed the influence of horizontal relative displacements of each level and the stiffness degradation as key parameters in determining the damage to a building. All this was revalidated with a probabilistic approach to the Damage Index. Experimental results showed very similar values in absolute and relative terms to those obtained in the numerical models. In these numerical and experimental process was used the *Capacity Parametric Model (CPM)* and the fragility and damage models associated with this methodology. Finally to achieve structural continuity at the structural joint of steel columns with reinforced concrete elements, it was evidenced that it can be used the *AISC* and *ASCE* design criteria for base-plates for steel columns. Otherwise, the composite joints should be considered semi-rigid connections.

## **INDICE GENERAL**

### **Contenido**

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>INDICE GENERAL</b> .....	<b>VII</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Planteamiento</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Motivación y antecedentes</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3. Objetivo general</b> .....	<b>7</b>
<b>1.3.1. Objetivos específicos</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4. Metodología</b> .....	<b>8</b>
<b>1.5. Contenido y estructura del documento</b> .....	<b>9</b>
<b>1.6. Principales aportes</b> .....	<b>12</b>
<b>2. MARCO TEORICO: DEMANDA Y CAPACIDAD SISMICA</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1. Introducción</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2. Vulnerabilidad sísmica</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.1. Concepto de vulnerabilidad</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.2. Análisis y evaluación de comportamiento sismo-resistente</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.3. Confiabilidad en el estudio del comportamiento sismo-resistente</b> .....	<b>18</b>

<b>2.3. Acción sísmica.</b>	<b>25</b>
2.3.1. Acelerogramas	25
2.3.2. Espectros de respuesta	25
2.3.3. Espectros de diseño	26
2.3.4. Representación espectral de aceleración y desplazamiento	27
2.3.5. Espectros compatibles	28
2.3.6. Estudio y selección de registros	29
<b>2.4. Capacidad estructural</b>	<b>30</b>
2.4.1. Parámetros básicos para determinación de la capacidad	33
2.4.2. Análisis Estático Incremental con patrón adaptativo de cargas	36
2.4.3. Uso de espectros en el Empuje Incremental Adaptativo	38
2.4.4. Espectro de capacidad	40
<b>2.5. Análisis dinámico</b>	<b>42</b>
2.5.1. Análisis incremental	42
2.5.2. Variables aleatorias y confiabilidad	43
<b>2.6. Revisión por desempeño</b>	<b>46</b>
2.6.2. Punto de desempeño	48
<b>2.7. Estados de daño</b>	<b>50</b>
2.7.1. Desplazamientos globales y de entrepiso	50
2.7.2. Curvas de fragilidad	51
2.7.3. Matriz de probabilidad de daño	52
2.7.4. Índice de daño esperado	53
2.7.5. Estabilidad estructural	56
<b>2.8. Estructuras con pórticos mixtos</b>	<b>57</b>
2.8.1. Comportamiento de uniones mixtas	60
2.8.2. Revisión de códigos de diseño sobre estructuras mixtas	61
<b>2.9. Construcciones mixtas en Venezuela</b>	<b>63</b>
2.9.1. Uniones de columnas mixtas	67
<b>2.10. Resumen y discusión</b>	<b>68</b>
<b>3. MARCO METODOLOGICO</b>	<b>69</b>
<b>3.1. Introducción</b>	<b>69</b>
<b>3.2. Consideraciones acerca de la norma sismo-resistente COVENIN 1756:2001</b>	<b>69</b>
3.2.1. Selección de acelerogramas	74
3.2.2. Acción sísmica normativa	77



<b>3.3. Casos de estudio .....</b>	<b>79</b>
3.3.1. <i>Viviendas de baja altura .....</i>	83
3.3.2. <i>Edificios de mediana altura .....</i>	84
3.3.3. <i>Modelos estructurales de alta y mediana elevación .....</i>	86
<b>3.4. Análisis estático .....</b>	<b>89</b>
3.4.1. <i>Empuje incremental adaptativo .....</i>	90
<b>3.5. Análisis dinámico .....</b>	<b>91</b>
3.5.1. <i>Análisis de respuesta en función del tiempo (THA) .....</i>	91
3.5.2. <i>Análisis dinámico incremental (IDA).....</i>	92
<b>3.6. Estimación del daño .....</b>	<b>93</b>
3.6.1. <i>Punto de desempeño.....</i>	93
3.6.2. <i>Curvas de fragilidad .....</i>	94
3.6.3. <i>Índice de daño.....</i>	94
<b>3.7. Estudio experimental .....</b>	<b>95</b>
3.7.1. <i>Descripción de los ensayos .....</i>	97
3.7.2. <i>Revisión numérica.....</i>	103
<b>3.8. Resumen y discusión .....</b>	<b>105</b>
<b>4. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS MIXTAS ELEMENTALES .....</b>	<b>107</b>
<b>4.1. Introducción .....</b>	<b>107</b>
<b>4.2. Ensayo Experimental 1. Pórtico mixto de hormigón armado y acero. ....</b>	<b>109</b>
4.2.1. <i>Comportamiento post ensayo. ....</i>	111
<b>4.3. Ensayo experimental 2. Unión rígida mixta de hormigón armado y acero. ....</b>	<b>115</b>
4.3.1. <i>Comportamiento post ensayo. ....</i>	116
<b>4.4. Ajuste de propiedades mecánicas de los materiales .....</b>	<b>119</b>
<b>4.5. Estudio numérico del comportamiento experimental.....</b>	<b>121</b>
<b>4. 6. Modelos numéricos equivalentes. ....</b>	<b>123</b>
<b>4.7. Ajuste de modelo paramétrico .....</b>	<b>126</b>
<b>4.8. Resumen y discusión de resultados .....</b>	<b>134</b>
<b>5. ESTUDIO NUMERICO DE EDIFICIOS MIXTOS.....</b>	<b>137</b>
<b>5.1 Consideraciones preliminares .....</b>	<b>137</b>
<b>5.2 Análisis modal.....</b>	<b>137</b>

5.2.1	<i>Modelo E15M</i>	138
5.2.2	<i>Modelo M27M</i>	139
<b>5.3</b>	<b><i>Capacidad</i></b>	<b>140</b>
5.3.1	<i>Modelo E15M</i>	141
5.3.2	<i>Modelo M27M</i>	144
<b>5.4</b>	<b><i>Modelos de capacidad</i></b>	<b>148</b>
<b>5.5</b>	<b><i>Modelos de daño</i></b>	<b>150</b>
<b>5.6</b>	<b><i>Curvas de fragilidad</i></b>	<b>151</b>
<b>5.7</b>	<b><i>Estados de daño medio</i></b>	<b>154</b>
<b>5.8</b>	<b><i>Enfoque probabilista</i></b>	<b>159</b>
<b>5.9</b>	<b><i>Resumen y discusión de resultados</i></b>	<b>162</b>
<b>6.</b>	<b>SINTESIS, CONCLUSIONES Y PROPUESTAS INVESTIGATIVAS</b>	<b>165</b>
<b>6.1</b>	<b><i>Síntesis general</i></b>	<b>165</b>
6.1.1	<i>Bases teóricas</i>	166
6.1.2	<i>Aspectos metodológicos</i>	167
<b>6.2</b>	<b><i>Conclusiones sobre los ensayos experimentales</i></b>	<b>168</b>
<b>6.3</b>	<b><i>Conclusiones sobre los edificios modelados</i></b>	<b>171</b>
<b>6.4</b>	<b><i>Conclusión general</i></b>	<b>175</b>
<b>6.5</b>	<b><i>Posibles líneas de estudio e investigación</i></b>	<b>176</b>
<b>6.6</b>	<b><i>Otras propuestas de desarrollo</i></b>	<b>178</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>181</b>
	<b>ANEXO TECNICO A</b>	<b>193</b>
	<b>ANEXO TECNICO B</b>	<b>205</b>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Esquema básico de la curva de capacidad</i> .....	31
<i>Figura 2.2. Características principales de la curva de capacidad</i> .....	35
<i>Figura 2.3. Diagrama de algoritmo del Adaptive Pushover. Papanokilaou y Elnashai (2005)</i> .....	38
<i>Figura 2.4. Esquema básico del espectro de capacidad</i> .....	40
<i>Figura 2.5. Espectro de respuesta y espectro de diseño</i> .....	42
<i>Figura 2.6. Punto de desempeño a partir de los espectros de capacidad y respuesta</i> .....	48
<i>Figura 2.7. Vista general de estructura mixta con columnas de hormigón armado y de acero</i> .....	58
<i>Figura 2.8. a) Unión de losas de acero y hormigón; b) Unión viga-columna; c) vista de vigas y columnas de acero y hormigón; d) Vista general de losas, vigas y correas.</i> .....	61
<i>Figura 2.9. a) Vista general; b) Modelo de un módulo estructural modificado.</i> .....	64
<i>Figura 2.10. Vista externa de columnas de hormigón armado, vigas y losas de acero.</i> .....	65
<i>Figura 2.11. Vista interna de columnas de hormigón armado, vigas y losas de acero.</i> .....	65
<i>Figura 2.12. Vista general de edificaciones con pisos añadidos de acero estructural.</i> .....	66
<i>Figura 2.13. Unión mixta típica de AISC para diseño de placa-base.</i> .....	67
<i>Figura 3.1. Emplazamiento de las edificaciones. Se encuentran en la zona de amenaza sísmica de moderada a alta (color amarillo).</i> .....	70
<i>Figura 3.2. Mapa de isoaceleraciones de la zona en estudio</i> .....	71
<i>Figura 3.3. Formas espectrales de la zona en estudio para diferentes tipos de suelos</i> .....	72
<i>Figura 3.4. Espectros de diseño para <math>R = 6</math></i> .....	72
<i>Figura 3.5. Mapa de isoperíodos de la zona en estudio.</i> .....	73
<i>Figura 3.6. Vista de ramificación de la falla de Boconó, adyacente a la zona en estudio.</i> .....	73
<i>Figura 3.7. Ubicación general de la zona en estudio respecto a la falla de Boconó.</i> .....	74
<i>Figura 3.8. Acelerogramas híbridos</i> .....	76
<i>Figura 3.9. Acelerogramas artificiales y sintéticos</i> .....	76
<i>Figura 3.10. Espectros de respuesta compatibles con espectro de diseño COVENIN</i> .....	76
<i>Figura 3.11. Componentes del espectro elástico de respuesta según Covenin 1756 (2001)</i> .....	78
<i>Figura 3.12. Modelo para acero de refuerzo propuesto por Filippou et al. (1983)</i> .....	82
<i>Figura 3.13. Modelo uni-axial no lineal de confinamiento constante para el hormigón.</i> .....	82
<i>Figura 3.14. Modelo de Ramberg –Osgoord para comportamiento elasto plástico del acero.</i> .....	82
<i>Figura 3.15. Planta general de las viviendas.</i> .....	83
<i>Figura 3.16. Vista de pórticos. Vivienda V1M.</i> .....	84
<i>Figura 3.17. Planta general de edificación existente de mediana altura.</i> .....	85
<i>Figura 3.18. Vista general del esquema estructural del edificio E15M. El edificio E14RC corresponde a los primeros cuatro niveles de esta misma edificación.</i> .....	85
<i>Figura 3.19. Vista en planta de los modelos M16RC, M17RC y M17M.</i> .....	86
<i>Figura 3.20. Pórticos <math>B = C = D</math>. a) modelo M16RC6; b) modelo M17M6</i> .....	87
<i>Figura 3.21. Vista en planta de los modelos M26RC, M27M y M28M</i> .....	88
<i>Figura 3.22. Pórticos <math>2 = 3 = 4</math>. a) modelo M26RC5; b) modelo M28M5</i> .....	89
<i>Figura 3.23. Pórtico mixto de dos niveles.</i> .....	97
<i>Figura 3.24. Gráfico tiempo-desplazamiento usado en el ensayo 1.</i> .....	98
<i>Figura 3.25. Vista de actuadores hidráulicos utilizados en cada nivel.</i> .....	98
<i>Figura 3.26. Esquema de unión mixta columna – columna</i> .....	99

<i>Figura 3.27. Unión rígida mixta Hormigón armado – Acero.</i>	100
<i>Figura 3.28. Gráfico tiempo – desplazamiento utilizado en el ensayo 2.</i>	100
<i>Figura 3.29. Zonas de tracción en la fase de carga sobre columnas y vigas en el ensayo 2.</i>	101
<i>Figura 3.30. Modelo numérico del Ensayo 1.</i>	104
<i>Figura 3.31. Modelo numérico del Ensayo 2.</i>	104
<i>Figura 4.1. Detalle de los dos primeros ciclos de la curva de histéresis del Ensayo 1. Se observa la rigidez inicial y la rigidez última del ciclo 2.</i>	109
<i>Figura 4.2 Vista general del pórtico Ensayo 1 donde se observa el nivel superior de acero y el nivel inferior de hormigón armado.</i>	110
<i>Figura 4.3. Vista de los actuadores aplicados al baricentro de las vigas de acero (nivel superior y hormigón armado (nivel inferior).</i>	110
<i>Figura 4.4. Punto de falla por tracción y corte en columna 2 de hormigón armado</i>	111
<i>Figura 4.5. Detalle del inicio de las grietas en columna 1 de hormigón armado</i>	112
<i>Figura 4.6. Detalle de falla por tracción y corte de la columna 2 de hormigón armado</i>	112
<i>Figura 4.7. Detalle de falla general de la columna 2 de hormigón armado.</i>	113
<i>Figura 4.8. Detalle de agrietamiento general de la columna 1 de hormigón armado.</i>	113
<i>Figura 4.9. Curvas de histéresis del pórtico separadas por cada nivel.</i>	114
<i>Figura 4.10. Envolventes de las curvas de histéresis del pórtico</i>	114
<i>Figura 4.11. Vista general de la junta rígida con columna inferior y vigas de hormigón armado y columna superior de acero.</i>	115
<i>Figura 4.12. Vista del actuador hidráulico en el extremo libre de la columna de acero.</i>	116
<i>Figura 4.13. Composición gráfica de los puntos de colapso en los ciclos positivos y negativos. A la izquierda el ciclo negativo y a la derecha el ciclo positivo</i>	117
<i>Figura 4.14. Detalle de la rotura generalizada en las caras de la columna de hormigón.</i>	117
<i>Figura 4.15. Detalle donde se observa la rotación post-colapso de la columna de hormigón.</i>	118
<i>Figura 4.16. Curva de histéresis de la junta</i>	118
<i>Figura 4.17. Envolventes de la curva de histéresis de la junta</i>	119
<i>Figura 4.18. Esquema de discretización en vigas y columnas</i>	123
<i>Figura 4.19. Modelo numérico del pórtico</i>	123
<i>Figura 4.20. Curvas experimentales y numéricas del pórtico</i>	124
<i>Figura 4.21. Modelo numérico de la junta</i>	125
<i>Figura 4.22. Curvas numéricas y experimentales de la junta</i>	126
<i>Figura 4.23. Curva CEEP</i>	127
<i>Figura 4.24. Detalle de separación de las partes lineales y no lineales en la curva CEEP</i>	127
<i>Figura 4.25. Detalle de las derivadas de las funciones de CEEP (Pujades et al. 2014).</i>	128
<i>Figura 4.26. Parámetros de ajuste LogNormal y Beta para CEEP (Pujades et al. 2014).</i>	129
<i>Figura 4.27. Parámetros de ajuste LogNormal y Beta para MNEP (Pujades et al. 2014).</i>	129
<i>Figura 4.28. Parámetros de ajuste LogNormal y Beta para CEPEJ (Pujades et al. 2014).</i>	130
<i>Figura 4.29. Parámetros de ajuste LogNormal y Beta para CENEJ (Pujades et al. 2014).</i>	130
<i>Figura 4.30. Parámetros de ajuste LogNormal y Beta para CEMEJ (Pujades et al. 2014).</i>	131
<i>Figura 4.31. Parámetros de ajuste LogNormal y Beta para MNEJ (Pujades et al. 2014).</i>	131
<i>Figura 4.32. Resumen de curvas de capacidad. Ensayo Pórtico.</i>	132
<i>Figura 4.33. Resumen de curvas de capacidad. Ensayo Junta.</i>	133
<i>Figura 5.1. Vista de esquemas de sistemas porticados del modelo E15M.</i>	138
<i>Figura 5.2. Vista de esquemas de sistemas porticados del modelo M27M.</i>	139

Figura 5.3. a) Curvas de capacidad AENL y ADNL para el sistema porticado E15M2; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado E15M2 en función de la aceleración.....	141
Figura 5.4. Comparación de desplazamientos del modelo E15M2 con modelos similares de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	141
Figura 5.5. a) Curvas de capacidad AENL y ADNL para el sistema porticado E15M4; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado E15M4 en función de la aceleración.....	142
Figura 5.6. Comparación de desplazamientos del modelo E15M4 con modelos similares de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	142
Figura 5.7. a) Curvas de capacidad AENL y ADNL para el sistema porticado E15M6; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado E15M6 en función de la aceleración.....	142
Figura 5.8. Comparación de desplazamientos del modelo E15M6 con modelos similares de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	143
Figura 5.9. a) Curvas de capacidad AENL y ADNL para el sistema porticado M27M3; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado M27M3 en función de la aceleración.....	144
Figura 5.10. Comparación de desplazamientos del modelo M27M3 con otro modelo similar de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos.....	144
Figura 5.11. a) Curvas AENL y ADNL del sistema M27M5 comparado con otro modelo de RC; b) Desplazamiento dinámico del sistema M27M5 comparado con otro modelo de RC.....	145
Figura 5.12. Comparación de desplazamientos del modelo M27M5 con modelos similares de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos.....	145
Figura 5.13. a) Curvas AENL y ADNL del sistema M27M6 comparado con otro modelo de RC; b) Desplazamiento dinámico del sistema M27M5 comparado con otro modelo de RC.....	145
Figura 5.14. Comparación de desplazamientos del modelo M27M6 con modelo similar de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	146
Figura 5.15. Curvas de capacidad de los modelos iniciales, ajustados y mejorados de todos los sistemas estructurales. ....	149
Figura 5.16. Formas bilineales de las curvas de capacidad de los modelos iniciales, ajustados y mejorados de todos los sistemas estructurales.....	151
Figura 5.17. Modelos normalizados de daño en los sistemas estructurales.....	151
Figura 5.18. Umbrales de los estados de daño de los sistemas estructurales. ....	152
Figura 5.19. Curvas de fragilidad de los modelos inicial y mejorados, según Risk-UE .....	153
Figura 5.20. Curvas de fragilidad según modelo de Pujades et al. (2014). ....	154
Figura 5.21. Curvas de daño medio para los sistemas estructurales E15M .....	155
Figura 5.22. Curvas de daño medio para los sistemas estructurales M27M.....	157
Figura 5.23. Daño medio en los sistemas E15M según los modelos de daño IDcc y Risk UE.....	157
Figura 5.24. Daño medio en los sistemas M27M según los modelos de daño IDcc y Risk UE. ....	158
Figura 5.25. Comparación del Daño medio en los sistemas E15M y M27M según los modelos de daño IDcc y Risk UE.....	159
Figura 5.26. Daño medio IDcc en: a) modelos E15M; b) modelos M27M .....	160
Figura 5.27. Curvas de daño medio. a) Modelo E15M2; b) Modelo M27M6. ....	161
Figura A.1. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado E14RC4; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado E14RC4 en función de la aceleración.....	194
Figura A.2. Desplazamientos laterales por nivel del modelo E14RC4; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos.....	194
Figura A.3. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado E14RC6; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado E14RC6 en función de la aceleración.....	195

Figura A.4. Desplazamientos laterales por nivel del modelo E14RC6; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos.....	195
Figura A.5. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado M16RC3; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado M16RC3 en función de la aceleración.....	196
Figura A.6. Desplazamientos laterales por nivel del modelo M16RC3; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	196
Figura A.7. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado M16RC5; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado M16RC5 en función de la aceleración.....	197
Figura A.8. Desplazamientos laterales por nivel del modelo M16RC5; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	197
Figura A.9. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado M17M3; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado M17M3 en función de la aceleración.....	198
Figura A.10. Desplazamientos laterales por nivel del modelo M17M3; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	198
Figura A.11. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado M17M5; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado M17M5 en función de la aceleración.....	199
Figura A.12. Desplazamientos laterales por nivel del modelo M17M5; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	199
Figura A.13. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado M18M3; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado M18M3 en función de la aceleración.....	200
Figura A.14. Desplazamientos laterales por nivel del modelo M18M3; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	200
Figura A.15. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado M18M5; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado M18M5 en función de la aceleración.....	201
Figura A.16. Desplazamientos laterales por nivel del modelo M18M5; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	201
Figura A.17. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado V12M3; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado V12M3 en función de la aceleración .....	202
Figura A.18. Desplazamientos laterales por nivel del modelo V12M3 comparados con modelos similares de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	202
Figura A.19. a) Curvas estáticas y dinámicas del sistema porticado V12M4; b) Desplazamiento dinámico del sistema porticado V12M4 en función de la aceleración .....	203
Figura A.20. Desplazamientos laterales por nivel del modelo V12M4 comparados con modelos similares de RC; a) desplazamientos relativos; b) desplazamientos absolutos .....	203
Figura B.21. Curvas de capacidad. Se muestran las curvas empíricas, el modelo paramétrico y el modelo paramétrico refinado.....	207
Figura B.22. Forma bilineal de las curvas de capacidad. Se muestran las curvas empíricas y el modelo paramétrico. ....	210
Figura B.23. Curvas normalizadas de capacidad no lineal (CNLN), de degradación de la energía ( $E_N$ ), de la rigidez tangente ( $RT_N$ ) y de la rigidez secante ( $RS_N$ ). Se muestra también el índice de daño $DI_N$ .....	211
Figura B.24. Índices de daño (DI) y umbrales de los estados de daño de acuerdo al modelo de Pujades et al. (2014). ....	211
Figura B.25. Curvas de fragilidad. a) Curvas correspondientes al modelo de fragilidad propuesto en Risk-UE. ....	214

<i>Figura B.26. Curvas correspondientes al nuevo modelo de daño propuesto por Pujades et al. (2014).</i> .....	214
<i>Figura B.27. Curvas del grado de daño medio normalizado <math>d</math> para las diferentes curvas de capacidad de los dispositivos ensayados.</i> .....	216
<i>Figura B.28. Comparación de las curvas del grado de daño medio normalizado para las diferentes curvas de capacidad analizadas.</i> .....	216

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1.1. Relación entre desplazamiento relativo y daño potencial, Scholl (1984).</i> .....	47
<i>Tabla 2.1.2. Propuesta de Elnashai y DiSarno (2008)</i> .....	47
<i>Tabla 2.1.3. Propuesta del Documento VISION 2000</i> .....	47
<i>Tabla 2.1.4. Distribución de probabilidades para cuatro umbrales de daño</i> .....	52
<i>Tabla 2.1.5. Índice de Daños propuesto por Park &amp; Ang. (1985).</i> .....	54
<i>Tabla 3.1. Parámetros característicos de los acelerogramas</i> .....	77
<i>Tabla 3.2. Características mecánicas de los materiales</i> .....	80
<i>Tabla 3.3. Características normativas de la acción sísmica</i> .....	80
<i>Tabla 3.4. Descripción de edificios existentes y modelos de edificaciones</i> .....	81
<i>Tabla 3.5. Cargas gravitacionales sobre viviendas de baja altura</i> .....	84
<i>Tabla 3.6. Cargas gravitacionales sobre edificio residencial</i> .....	85
<i>Tabla 3.7. Características geométricas de los modelos M16RC, M17RC y M17M.</i> .....	87
<i>Tabla 3.8. Cargas gravitacionales sobre modelos M16RC, M17RC y M17M</i> .....	87
<i>Tabla 3.9. Características geométricas de los modelos M26RC, M27M y M28M</i> .....	88
<i>Tabla 3.10. Cargas gravitacionales sobre modelos M26RC, M27M y M28M</i> .....	88
<i>Tabla 3.11. Propuesta de VISION 2000 para estados de daño</i> .....	92
<i>Tabla 3.12. Características mecánicas de los materiales</i> .....	101
<i>Tabla 3.13. Dimensiones de los elementos estructurales</i> .....	102
<i>Tabla 3.14. Características de las varillas de refuerzo</i> .....	102
<i>Tabla 4.1. Características mecánicas ajustadas del Modelo Pórtico. Hormigón armado.</i> .....	119
<i>Tabla 4.2. Características mecánicas ajustadas del Modelo Pórtico. Acero de refuerzo.</i> .....	120
<i>Tabla 4.3. Características mecánicas ajustadas del Modelo Pórtico. Acero estructural.</i> .....	120
<i>Tabla 4.4. Características mecánicas ajustadas del Modelo Junta. Hormigón armado.</i> .....	120
<i>Tabla 4.5. Características mecánicas ajustadas del Modelo Junta. Acero de refuerzo.</i> .....	121
<i>Tabla 4.6. Características mecánicas ajustadas del Modelo Junta. Acero estructural.</i> .....	121
<i>Tabla 4.7. Variación de Corte último, desplazamiento último, rigidez y daño por ciclo histerético. Ensayo Pórtico.</i> .....	122
<i>Tabla 4.8. Variación de Corte último, desplazamiento último, rigidez y daño por ciclo histerético. Ensayo Junta.</i> .....	122
<i>Tabla 4.9. Características del Modelo Pórtico</i> .....	124
<i>Tabla 4.10. Variación de Corte último, desplazamiento último, rigidez y daño por ciclo histerético. Modelo numérico Pórtico</i> .....	124
<i>Tabla 4.11. Características del Modelo Junta</i> .....	125

<i>Tabla 4.12. Variación de Corte último, desplazamiento último, rigidez y daño por ciclo histerético. Modelo numérico Junta.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 4.13. Parámetros de ajuste en curvas de ensayo Pórtico .....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 4.14. Parámetros de ajuste en curvas de ensayo Junta .....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 4.15. Comparación entre índice de daño IDcc y el Índice de daño experimental IDE .....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 5.1. Cantidades modales del análisis de modos propios para el modelo E15M.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 5.2. Cantidades modales del análisis de modos propios para el modelo M27M.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 5.3. Pendientes iniciales y valores últimos de los modelos estructurales E15M.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 5.4. Pendientes iniciales y valores últimos de los modelos estructurales M27M. ....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 5.5. Parámetros independientes de curvas de capacidad.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 5.6. Parámetros de las curvas de capacidad bilineales.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 5.7. Umbrales de daño de Risk UE y del modelo de fragilidad de Pujades et al. (2014)....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 5.8. Parámetros de las curvas de fragilidad para los modelos estructurales según Risk-UE y IDcc.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla B.1. Parámetros independientes correspondientes a la curva de capacidad .....</i>	<i>207</i>
<i>Tabla B.2. Parámetros de las curvas de capacidad bilineales (véase explicación en el texto). ...</i>	<i>210</i>
<i>Tabla B.3. Umbrales de los estados de daño. ....</i>	<i>212</i>
<i>Tabla B.4. Umbrales de los estados de daño .....</i>	<i>215</i>