



Por una cultura común del riesgo sísmico
Pour une culture commune du risque sismique

«Matriz Tipológica de Edificios de la zona POCRISC»

Informe E4.1.0 - Acción 4



Créditos

Autores

Blázquez¹⁰ A, Lantada³ N, González-Drigo³ R, Pujades³ LG y Meza² K.

Revisión

Irizarry¹ J, Goula¹⁰ X, Martin⁶ C, Dalverny O⁶, Weleman⁶ H, Trapero¹¹ L y Echeverria¹¹ A.

Ilustraciones de tipologías

BIS structures: Centelles¹⁰ X, Padrós¹⁰ C y Garcia¹⁰ D.

Fotografías de edificios

Blázquez-Guanter: Blázquez¹⁰ A, González-Drigo³ R, Trapero¹¹ L y Borges¹¹ P.

Palabras clave

Terremoto, Edificio, Vulnerabilidad sísmica, Vulnerabilidad estructural, Índice de Vulnerabilidad, Fragilidad, Daño sísmico.

Socios del proyecto

1. ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
2. BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
3. UPC: Universitat Politècnica de Catalunya
4. DIGC: Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
5. IEA: Institut d'Estudis Andorrans
6. ENIT: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
7. CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique - Délégation Alsace
8. EPLFM : Entente pour la Forêt Méditerranéenne
9. DW: Deveryware
10. ACE: Associació de Consultors d'Estructures

Otras instituciones

11. IEA Institut d'Estudis Andorrans.

Agradecimientos

La matriz tipológica de edificios de la zona de estudio POCRISC desarrollada en este estudio no habría sido posible sin el trabajo previo de identificación de tipologías constructivas llevado a cabo por expertos en el marco de proyectos anteriores. Cabe señalar los trabajos realizados por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) para el estudio del riesgo sísmico en el Plan de Emergencias por Riesgo Sísmico de Cataluña, SISMICAT, primer plan homologado en el estado español en 2002, con la colaboración del Profesor Frutuós Mañá, que propuso matrices de vulnerabilidad basadas en la escala EMS-98 (Grünthal, 1998) y usando tres clases de altura y tres períodos de construcción. Posteriormente, la participación en proyectos europeos, como Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Faccioli 2006; Mouroux y Le Brun 2008; Barbat et al. 2010; Lantada et al. 2010), ISARD (ISARD, 2006; Goula et al. 2008) y SISPy¹ (SISPy, 2013; Auclair et al. 2015), en los que se desarrollaron las matrices tipológicas de edificios (*Building Typology Matrix*, BTM) de las construcciones típicas de Girona (Irizarry et al. 2013), las comarcas de la Cerdanya (Roussillon et al. 2006) y la Val d'Aran en Cataluña, y el Luchonnais en Francia (Roullé et al. 2012).

La profesionalidad, dedicación y saber hacer de personal gestor y administrativo de instituciones participantes en el proyecto, ha permitido gestionar los siempre tediosos y delicados temas burocráticos y administrativos que comportan el normal seguimiento del proyecto, permitiendo, al personal investigador, centrarse en los aspectos y desarrollos científico-técnicos. Especiales gracias a Agnès Lladós de *l'Institut Cartogràfic y Geològic de Catalunya*, a Silvia Garceso, Malcolm Campbell Burns y Francesc Vendrell, de la *Universitat Politècnica de Catalunya*.

Un agradecimiento especial también a Xavier Goula, que fue impulsor del proyecto POCRISC y que, incluso después de su jubilación, lo ha dinamizado, implicándose en prácticamente todas las acciones. Su carisma personal y su entusiasmo investigador han contribuido, de forma importante, al desarrollo y resultados del proyecto.

¹ Proyecto SISPy. <http://www.sispyr.eu/?lang=es> (último acceso: diciembre 2021)

Síntesis

Esta guía y la matriz tipológica de edificios propuesta en la misma, se han desarrollado en el contexto del proyecto “*POr una Cultura común del Riesgo Sísmico*” POCRISC, de referencia EFA158/16/POCRISC². El proyecto ha sido financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y se enmarca en el programa Interreg V-A España Francia Andorra (POCTEFA 2014-2020) de la Unión Europea. El programa POCTEFA 2014-2020 tiene por objeto reforzar el desarrollo económico y social de la zona fronteriza franco-española-andorrana. Su acción se centra en el desarrollo de actividades económicas, sociales y medioambientales transfronterizas a través de estrategias comunes que promueven una ordenación territorial sostenible. El proyecto se ha desarrollado en el período 2018-2021.

Este documento es un compendio de las tipologías constructivas de edificios que se consideran representativas de las diferentes regiones de estudio del proyecto POCRISC, y que abarcan la zona transfronteriza entre España, Andorra y Francia. El propósito de esta matriz de tipología de edificios (*Building Typology Matrix*, BTM), es agrupar en un conjunto de clases los edificios con sistemas estructurales y características de comportamiento similares. Se pretende así, facilitar el análisis de su vulnerabilidad, frente a demandas potenciales asociadas a movimientos sísmicos. Dichas tipologías se han definido mediante juicio de experto, tomando como referencia las tipologías identificadas en el marco del proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Faccioli 2006; Mouroux y Le Brun 2008; Barbat et al. 2010; Lantada et al. 2010). Por otra parte, la información contenida en este informe está directamente relacionada con la Base de Datos de Vulnerabilidad para la zona de estudio del proyecto POCRISC (Lantada et al. 2021) incluida en la acción 3, y en la Guía de evaluación de la vulnerabilidad (Pujades et al. 2021) y la Guía de reducción de la vulnerabilidad (Meza et al. 2021), ambas desarrolladas en la acción 4 del proyecto. En este sentido, el informe sobre la matriz de tipologías de edificios de la región POCRISC, se considera un documento transversal que debe acompañar a los citados anteriormente.

Los siguientes parámetros primarios que afectan las características de daños y pérdidas se consideraron en el desarrollo de la matriz de tipología de edificios:

- Parámetros estructurales que afectan la capacidad y respuesta estructurales.
- Criterios de diseño sísmico (nivel de código).
- Sistema estructural básico (material y sistema).
- Altura del edificio (de poca altura, de mediana altura, de gran altura).
- Elementos no estructurales que afecten a daños no estructurales.

Las subclases de altura de los edificios se introdujeron para representar las relaciones de los períodos de construcción típicos, y otros parámetros de diseño, con la altura del edificio.

En el primer capítulo se presenta el objetivo y utilidad de este tipo de matrices tipológicas, cuyo propósito es agrupar en un conjunto de clases de edificios predefinidos los edificios con sistemas estructurales y características de comportamiento similares. A partir de dicha matriz se puede desarrollar el proceso de la estimación de daños y pérdidas, mediante diferentes metodologías que también se explican brevemente en este capítulo. En el capítulo 2 se realiza una descripción detallada de cada tipología estructural que forma la matriz de tipologías. En este capítulo se ha realizado un esfuerzo importante ilustrando cada una de ellas con dibujos

² Proyecto POCRISC-EFA 158/16: <https://pocrisc.eu/es> (último acceso: diciembre 2021)

y/o fotografías tomadas de edificios reales. En el capítulo 3 se muestra una tabla resumen de las tipologías y se propone también un rango de índices de vulnerabilidad asociados a cada una, así como su correspondencia con las tipologías definidas en la BTM del proyecto Risk-UE y las clases de vulnerabilidad incluidas en las escalas EMS-98 (Grünthal, 1998) y MSK-64 (Medvedev y Sponheuer, 1969). Esta información puede resultar muy útil para aplicarla directamente en la evaluación de la vulnerabilidad de edificios localizados en la región estudiada en POCRISC, en la validación de las distribuciones estadísticas de clases de vulnerabilidad ya existentes y en el desarrollo de las nuevas clases introducidas en el proyecto.

Sumario	
Créditos	i
Palabras clave	i
Socios del proyecto	i
Otras instituciones	i
Agradecimientos	i
1. Las matrices tipológicas de edificios.....	9
1.1. Introducción	9
1.2. Antecedentes	9
1.3. Métodos basados en clases de Vulnerabilidad.....	11
1.3.1 Escala macrosísmica MSK-64.....	11
1.3.2 Escala macro-sísmica Europea EMS-98	13
1.3.3 Método ATC-13	15
1.4. Métodos basados en Índice de Vulnerabilidad	16
1.4.1 Método de Nivel I del proyecto Risk-UE	17
1.5. Método HAZUS.....	20
1.6. Método RISK-UE. Nivel 2 (LM2).....	22
2. Matriz tipológica para la zona POCRISC	23
2.1. Descripción de las tipologías estructurales.....	27
2.1.1. Estructuras de mampostería (M)	27
2.1.2. Estructuras de hormigón (RC, reinforced concrete)	39
2.1.3. Estructuras metálicas (S).....	50
2.1.4. Estructuras mixtas (X)	55
2.1.5. Estructuras de madera (W).....	59
3. Equivalencias de la BTM Pocrisc con otras	61
4. Conclusion	67
5. Bibliografía	69

Lista de figuras

Figura 1 - Cuantificación de Daños según la escala EMS-98	15
Figura 2. Mampostería en seco.	27
Figura 3. a) Ejemplo de edificio de mampostería en seco y b) detalle de forjado de madera.	27
Figura 4. Mampostería ordinaria.	28
Figura 5. a) Ejemplo de casa con mampostería ordinaria (casa Rull, Andorra) y b) Bóveda de mampostería.....	28
Figura 6. Mampostería concertada.	29
Figura 7. a) Ejemplo de bóveda cerámica y b) Forjado de madera y bovedillas de maón.	29
Figura 8. Muros de sillería.	30
Figura 9. Ejemplo de edificio con muros de sillería y detalle del muro (Palacio de los Condes de Gómara, Soria).	30
Figura 10. Muros de tierra amasada.	31
Figura 11. a) Ejemplo de edificio con muros de tapia y b) Ejemplo de edificio con ladrillos de adobe.	31
Figura 12. Muros de fábrica de ladrillo sin armar con forjados de madera.	32
Figura 13. a) Ejemplo de muro de fábrica de ladrillo y b) Ejemplo de forjado con viguetas de madera y bovedillas de maón.	32
Figura 14. Muros de fábrica de ladrillo no reforzada con bóvedas de fábrica.	33
Figura 15. Ejemplo de casas con bóvedas de cerámica.	33
Figura 16. Muros de fábrica de ladrillo o bloque y viguetas de acero.....	34
Figura 17. a) Ejemplo muro de bloques de hormigón y b) forjado de viguetas metálicas y bovedillas de maón.....	34
Figura 18. Muros de fábrica de ladrillo o bloque y forjados de hormigón.	35
Figura 19. Ejemplo de forjados unidireccionales. a) viguetas de hormigón pretensado y bovedillas de cerámica, b) viguetas de hormigón armado y bovedillas de hormigón.	36
Figura 20. Muros de fábrica armada o confinada de ladrillo o bloque.	37
Figura 21. Imágenes de muros de fábrica armada.....	37
Figura 22. Muros de fábrica reforzada globalmente.....	38
Figura 23. Ejemplo de muro reforzados globalmente.....	38
Figura 24. Pórticos de hormigón resistentes a momentos.	39
Figura 25. Ejemplo de edificio con pórticos de hormigón resistentes a momentos.	40
Figura 26. Muros de cortante.....	41
Figura 27. Ejemplos de edificios con muros estructurales de hormigón.....	41
Figura 28. Pórticos regulares de hormigón con relleno de fábrica.	42
Figura 29. Pórticos regulares de hormigón con relleno de fábrica.	42
Figura 30. Pórticos irregulares de hormigón.	43
Figura 31. Jácenas planas y forjados unidireccionales.	44
Figura 32. Ejemplo de edificio de jácenas planas y forjados unidireccionales.	44
Figura 33. Losas planas sobre pilares.	45
Figura 34. Losas planas sobre pilares.	45

Figura 35. Sistemas duales de pórticos y muros.	46
Figura 36. Ejemplo de sistemas duales de pórticos y muros.	46
Figura 37. Muros y forjados prefabricados.	47
Figura 38. Ejemplo de muros y forjados prefabricados.	47
Figura 39. Pórticos prefabricados con muros de cortante.	48
Figura 40. Pórticos prefabricados sin nudos rígidos.	49
Figura 41. Ejemplo de estructura de pórticos prefabricados.	49
Figura 42. Pórticos de acero con nudos rígidos.	50
Figura 43. Ejemplo de pórticos de acero con nudos rígidos.	50
Figura 44. Pórticos arriostrados de acero.	51
Figura 45. Ejemplo de estructura de acero con pórticos arriostrados.	51
Figura 46. Pórticos de acero con rellenos de fábrica.	52
Figura 47. Pórticos de acero arriostrados con muros de hormigón.	53
Figura 48. Pórticos de acero con vigas celosía.	54
Figura 49. Ejemplo de pórticos de acero con vigas de celosía.	54
Figura 50. Sistemas mixtos de acero y hormigón.	55
Figura 51. Ejemplo de viga mixta antes de colocar las placas de hormigón. Se pueden observar los conectores para la unión con la capa de hormigón.	56
Figura 52. Ejemplo de viga mixta después de colocar las placas de hormigón a falta de colocar una capa de hormigón in situ.	56
Figura 53. Pórticos isostáticos en planta baja y muros en pisos.	57
Figura 54. Pilares metálicos y forjados planos de hormigón.	58
Figura 55. Estructura de madera con barras.	59
Figura 56. Ejemplo de estructura con barras de madera.	59
Figura 57. Estructura con láminas de madera.	60
Figura 58. Ejemplo de estructura con láminas de madera.	60

Lista de tablas

Tabla 1. Tipologías de edificios clasificados en la escala MSK-64	12
Tabla 2. Descripción de los daños en construcciones, según la escala MSK-64	12
Tabla 3. Cuantificación de daños en la escala MSK-64.	12
Tabla 4. Clase de vulnerabilidad por el tipo de estructura, según la escala EMS-98	13
Tabla 5. Clasificación del daño en edificios de mampostería y de hormigón armado según la escala EMS-98	14
Tabla 6. Estados de daño propuestos en el informe ATC-13 (1985)	16
Tabla 7. Clases de vulnerabilidad según la BTM del proyecto RISK-UE	18
Tabla 8. Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).....	19
Tabla 9. Tipologías de edificios según la metodología Hazus (FEMA, 2003).....	21
Tabla 10. Tipologías estructurales identificadas en la zona POCRISC: Andorra (AND), Cataluña (CAT) y Francia (FR).	23
Tabla 11. Matriz Tipológica de Edificios (BTM) de la zona POCRISC	25
Tabla 12. Matriz Tipológica de Edificios (BTM) de la zona POCRISC y equivalencias con Risk- UE, EMS-98 y MSK	63

1. LAS MATRICES TIPOLÓGICAS DE EDIFICIOS

1.1. Introducción

Un aspecto muy importante en los métodos de evaluación de la vulnerabilidad y el daño sísmico esperado, es la matriz tipológica de edificios (BTM, *Building typology Matrix*). El propósito de la BTM es agrupar en un conjunto de clases de edificios predefinidos aquellas edificaciones con sistemas estructurales y características de comportamiento similares. A partir de dicha matriz se pueden desarrollar modelos de predicción de daños y pérdidas para los tipos de edificios modelo que representan las características promedio de la población total de edificios representadas en cada clase.

Para desarrollar una matriz tipológica de edificios deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros primarios que afectan a las características de daños y pérdidas de los edificios:

- Parámetros estructurales que afectan a la capacidad y respuesta estructural
- Criterios de diseño sísmico (nivel de código)
- Sistema estructural básico (material y sistema)
- Altura del edificio (baja, media o alta)
- Elementos no estructurales que afectan daños no estructurales

El objetivo de este informe es definir una matriz de tipologías constructivas (BTM) que abarque las diferentes regiones de la zona de estudio del proyecto POCRISC. Esta información puede resultar muy útil para aplicarla directamente en la evaluación de la vulnerabilidad en POCRISC, en la validación de las distribuciones estadísticas de clases de vulnerabilidad ya existentes y en el desarrollo de las nuevas que hagan falta.

1.2. Antecedentes

Existe una variedad de metodologías y técnicas propuestas por distintos autores para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de diferentes tipos de edificaciones, donde cada técnica depende principalmente de factores como: la información disponible, el objetivo del estudio, los resultados esperados y las características del elemento que se pretende estudiar, entre otros.

Entre los diferentes métodos encontramos los simplificados, basados en escalas de intensidad macro-sísmica, concretamente, la escala MSK-64 (Medvedev y Sponheuer, 1969), establecida por Medvedev, Sponheuer y Karnik en 1964, y la escala macrosísmica europea (*European Macroseismic Scale*) EMS-98 (Grünthal, 1998), en los cuales, en base a una matriz tipológica bien definida, hay que identificar en qué posición de la matriz mejor encaja el edificio a evaluar. En general, las matrices tipológicas modernas son muy extensas, pero, en métodos basados en clases de vulnerabilidad y en escalas de intensidad tradicionales eran muy limitadas a la hora de representar las diferentes tipologías. Así, por ejemplo, la matriz tipológica de la escala MSK-64 (Tabla 1) es muy sencilla y está constituida por sólo tres tipos de edificios: A) Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobe, de tapial; B) Con

muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, de sillería, entramados de madera y C) con estructura metálica o de hormigón armado. Podríamos decir que esta escala considera edificios con muy mal comportamiento sísmico (A), con un comportamiento razonable (B) y con un buen comportamiento (C). Para comprender esta simplicidad, téngase en cuenta que el uso del hormigón en edificios residenciales en España no se generaliza hasta la década de 1950-60 (Díaz-Gómez et al. 2015). Por otra parte, la construcción de estructuras porticadas metálicas, con aplicaciones iniciales en edificios residenciales en España y a mediados del siglo XIX, no llegó a tener una implantación significativa en edificios residenciales en Europa (Díaz-Gómez et al. 2015). Así, a mediados del siglo XX, estas tres tipologías dominaban la construcción de edificios residenciales. En la segunda mitad del siglo XX los materiales y técnicas usadas en la edificación se diversifican, dando lugar a una notable diversidad de tipos estructurales.

Por otra parte, sucesivos sismos han evidenciado la insuficiencia de esta clasificación tan sencilla para recoger la diversidad existente, que parcialmente ya queda recogida en la matriz tipológica de la escala EMS-98. La matriz de esta escala, aunque mantiene una clasificación general en 4 grupos de edificios: i) mampostería (M), ii) hormigón armado (RC), iii) estructuras metálicas (S) y iv) estructuras de madera (W), sub-clasifica cada una de estas categorías. De esta forma identifica hasta 15 tipologías diferentes: 7 tipo M, 6 tipo RC, 1 tipo S y 1 tipo W. Por otra parte, un aspecto novedoso de esta escala es la introducción explícita de las clases de vulnerabilidad, permitiendo que edificios de tipología diferente puedan pertenecer a una misma clase de vulnerabilidad. Las clases de vulnerabilidad son A, B, C, D, E y F, siendo la A la más vulnerable y F la clase menos vulnerable. Otro aspecto original en el desarrollo de metodologías de análisis de daño en base a la escala EMS-98, es la definición de funciones de pertenencia (Lagomarsino y Giovinazzi, 2006) que permite que un determinado edificio perteneciente a una tipología específica, por ejemplo, RC, pueda vincularse a diferentes clases de vulnerabilidad, con rangos más y menos probables. Otro antecedente importante, basado en la escala de Mercalli modificada (MM) (Wood y Neumann, 1931), es el método desarrollado en 1985 por el Consejo de Tecnología Aplicada (*Applied Technology Council*) de California (US). El método, que se basa totalmente en opinión experta, propone funciones de daño para 91 clases de instalaciones y servicios, 40 de las cuales se refieren a edificios (ATC-13, 1985).

Es en base a este planteamiento y anteriores experiencias, como fue el desarrollo y aplicación del método del índice de vulnerabilidad a edificios de mampostería no reforzada situados en varias zonas sísmicas de Italia (Benedetti y Petrini, 1984), que, en el marco del proyecto europeo Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Faccioli 2006; Mouroux y Le Brun 2008; Barbat et al. 2010; Lantada et al. 2010), se propuso adaptar y aplicar el método del índice de vulnerabilidad, también denominado método de primer nivel, LM1, a otras tipologías de edificios propias de Europa (Giovinazzi, 2005; Lagomarsino y Giovinazzi, 2006). De acuerdo con este método, la acción sísmica se caracteriza mediante la intensidad macro-sísmica en la escala EMS-98 (Grünthal, 1998) y la vulnerabilidad de cada edificio mediante un índice de vulnerabilidad que toma valores entre 0, muy resistente, a 1, muy vulnerable. El método admite índices mayores que la unidad y también negativos, para poder considerar, respectivamente, edificios de muy mala calidad y edificios muy resistentes. De esta forma es posible una distribución prácticamente continua de los índices de vulnerabilidad.

Una forma más sofisticada de evaluar las estructuras es mediante los métodos basados en el espectro de capacidad de las edificaciones. La metodología HAZUS (FEMA 2020), para evaluar el riesgo sísmico en los Estados Unidos, usó el método del espectro de capacidad (*Capacity Spectrum Method, CSM*) usando curvas y espectros de capacidad lo denominamos método basado en el espectro de capacidad (*Capacity Spectrum Based Method, CSBM*). El proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003), se inspiró en la metodología HAZUS, para proponer una metodología CSBM de análisis de riesgo sísmico a ciudades de Europa, denominada método de segundo nivel, (*Level method 2, LM2*). Esta metodología define el edificio mediante su curva o espectro de capacidad, y la acción sísmica mediante el espectro de respuesta 5% amortiguado. En el documento del proyecto POCRISC de Pujades et al. (2021) se muestra una descripción detallada de estos métodos.

1.3. Métodos basados en clases de Vulnerabilidad

Es muy común, en el estudio de la vulnerabilidad de edificaciones, clasificar las construcciones en grupos de similar vulnerabilidad, por lo cual esta tendencia se fundamenta en el comportamiento sísmico observado contemporáneamente en edificaciones con características estructurales y constructivas similares. Esta experiencia se basa en datos empíricos de daños causados en el pasado por terremotos, donde se utiliza la capacidad de cada profesional de la construcción para relacionar las características de la estructura con el comportamiento observado ante estas acciones sísmicas y, de esta manera, clasificarlas. Con esta clasificación es posible calificar, de manera relativa, la mayor o menor predisposición de la estructura o grupo de estructuras a sufrir daños debido a un sismo. Existen diversos esquemas de clasificación propuestos por diversos autores, entre los que destacan las clasificaciones propuestas por el ATC-13 (1985) y por las escalas de intensidad MSK-64 y EMS-98 (Grünthal, 1998) (Barbat, 1998).

1.3.1 Escala macrosísmica MSK-64

La escala MSK o MSK-64 (Medvedev y Sponheuer, 1969), propuesta por Medvedev, Sponheuer y Karnik, es una escala de intensidad macrosísmica usada para evaluar la fuerza de los movimientos de tierra basándose en los efectos destructivos en las construcciones y en el cambio de aspecto del terreno, así como en el grado de afectación entre la población. Está basada en los datos obtenidos, a principios de la década de 1960-70, mediante la aplicación de la escala Mercalli Modificada y también mediante la aplicación de la versión de 1953 de la escala de Medvedev conocida como la escala de intensidad sísmica de GEOFIAN.

La escala MSK pasó a ser muy utilizada en Europa y en la extinta unión soviética (hoy federación de Rusia) con pequeñas modificaciones en la década de 1970-80. Al inicio de la década de los noventa, la Comisión Sismológica Europea usó muchos de los principios postulados en la escala MSK para desarrollar la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98), que es utilizada como estándar para la medición de la actividad sísmica y de su intensidad en los países europeos.

La Escala MSK-64 clasifica los edificios en tres tipologías en base a sus características resistentes. Tal como recoge la Tabla 1, los edificios se ordenan de menor resistencia sísmica (tipología “A”) a mayor resistencia sísmica (“C”).

Tabla 1. Tipologías de edificios clasificados en la escala MSK-64

TIPOLOGIA	DESCRIPCIÓN
A	Con muros de mampostería en seco o barro, de adobe, de tapial.
B	Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, de sillería, entramados de madera.
C	Con estructura metálica o de hormigón armado.

La escala MSK-64 considera 5 grados o clases de daño no nulos (Tabla 2). Si consideramos el estado nulo, resultan seis grados o clases de daño que abarcan desde edificios sin daño (grado o clase 0) hasta edificios colapsados (grado o clase 5).

Tabla 2. Descripción de los daños en construcciones, según la escala MSK-64

Clase	Descripción del daño
1	Daños ligeros: Fisuras en los revestimientos. Caída de pequeñas trazas de revestimiento.
2	Daños moderados: Fisuras en los muros. Caída de grandes trozos de revestimiento. Caída de tejas. Caída de pretilas. Grietas en las chimeneas o incluso derrumbamientos parciales en las mismas.
3	Daños graves: Grietas en los muros. Caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos externos.
4	Destrucción: Brechas en los muros resistentes. Derrumbamiento parcial. Pérdida del enlace entre distintas partes de la construcción. Destrucción del enlace entre distintas partes de la construcción.
5	Colapso: Ruina completa de la construcción.

En la escala MSK-64 se define la cuantificación de los grados de intensidad de acuerdo con tres categorías, como lo vemos en la Tabla 3. A partir de los datos obtenidos en los pasos anteriores se procede a construir la matriz de daño observada, que luego se ajustará por medio de una distribución binomial.

Tabla 3. Cuantificación de daños en la escala MSK-64.

Daño cualitativo	Porcentaje de daño
Algunos	5%
Muchos	50%
La mayoría	75%

1.3.2 Escala macro-sísmica Europea EMS-98

La Escala Macrosísmica Europea de intensidades, EMS-98 (Grünthal, 1998), es una actualización de la escala MSK-64 (Medvedev y Sponheuer, 1969). En referencia a los edificios, propone seis clases de vulnerabilidad y modifica la definición de las tipologías estructurales incorporando las estructuras metálicas y discriminando el sistema resistente de las estructuras de hormigón armado entre pórticos y muros (Safina, 2003). Se introduce aquí el concepto de vulnerabilidad, según el cual edificios de diferentes tipos pueden presentar daños similares o edificaciones similares pueden presentar diferentes niveles de daños. La escala EMS-98 considera las siguientes cuatro categorías para clasificar los tipos de estructura atendiendo al material empleado para su construcción: i) mampostería; ii) hormigón armado; iii) acero y iv) madera. Cada categoría distingue, a su vez, diferentes tipos de estructuras que se clasifican de acuerdo con sus características de diseño, construcción y vulnerabilidad (Tabla 4).

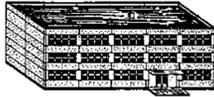
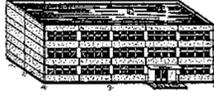
Tabla 4. Clase de vulnerabilidad por el tipo de estructura, según la escala EMS-98

Tipo de Estructura	Clase de Vulnerabilidad					
	A	B	C	D	E	F
MAMPOSTERÍA	Paredes de peña viva / roca de cantera	○				
	Adobe (ladrillo de tierra)	○—				
	Roca simple	—○				
	Roca masiva		—○—			
	Unidades de roca manufacturada	—○—				
	Ladrillo no reforzado, pisos de HA		—○—			
	Reforzado o confinado			—○—		
HORMIGÓN ARMADO (HA)	Armazón sin diseño sismorresistente (DSR)		—○—			
	Armazón con un nivel moderato de DSR			—○—		
	Armazón con un alto nivel de DSR				—○—	
	Paredes sin DSR		—○—			
	Paredes con un nivel moderato de DSR			—○—		
	Paredes con un nivel alto de DSR				—○—	
ACERO	Estructuras de acero			—○—		
MADERA	Estructuras de madera		—○—			

○ Clase de vulnerabilidad más probable; — Rango probable;
 Rango de casos excepcionales, menos probables

La escala EMS-98 considera los mismos estados de daño que la escala MSK-64, aunque describe, con un mayor detalle, las características de cada estado. En total, se consideran seis estados de daño, incluido el grado de daño 0, el cual indica que no existe daño alguno, seguido del grado de daño 1 (leve), grado de daño 2 (moderado), grado de daño 3 (severo), grado de daño 4 (muy severo) y grado de daño 5 (destrucción). En la Tabla 5. se detalla la descripción de cada estado de daño para edificios de mampostería y hormigón armado.

Tabla 5. Clasificación del daño en edificios de mampostería y de hormigón armado según la escala EMS-98

Clasificación del daño en los edificios de mampostería		Clasificación del daño en los edificios de hormigón armado	
	<p>Grado 1: daño leve <i>(Sin daño estructural; daño no estructural leve).</i> Grietas finas en muy pocas paredes. Caída de pequeños trozos del yeso o enlucido. En muy pocos casos se produce la caída de piedras sueltas de las partes altas del edificio.</p>		<p>Grado 1: daño leve <i>(Sin daño estructural; leve daño no estructural)</i> Grietas finas en el yeso sobre los elementos estructurales en la base de las paredes. Grietas en las paredes de separación y de relleno.</p>
	<p>Grado 2: Daño moderado <i>(Daño estructural leve; daño no estructural moderado).</i> Grietas en muchas paredes. Caída de trozos bastante grandes del yeso. Colapso parcial de chimeneas.</p>		<p>Grado 2: Daño moderado <i>(Daño estructural leve; daño no estructural moderado).</i> Grietas en las columnas, vigas y muros estructurales. Grietas en las paredes de relleno. Caída de trozos de yeso y de mortero de las juntas de las paredes.</p>
	<p>Grado 3: Daño severo. <i>(Daño estructural moderado, considerable daño no estructural.)</i> Grandes grietas en la mayoría de las paredes. Caída de tejas. Rotura de las chimeneas al nivel de la línea de techo. Rotura de elementos no estructurales individuales (particiones, hastiales, etc.)</p>		<p>Grado 3: Daño severo. <i>(Daño estructural moderado, considerable daño no estructural.)</i> Roturas en las columnas y en las juntas viga-columna a nivel del suelo. Deformación del acero de refuerzo. Grandes grietas en las paredes de relleno y caída de paneles de relleno aislados.</p>
	<p>Grado 4: Daño muy severo. <i>(Daño estructural severo, daño no estructural muy severo.)</i> Roturas graves en los muros. Derrumbe estructural parcial de suelos y techos.</p>		<p>Grado 4: Daño muy severo. <i>(Daño estructural severo, daño no estructural muy severo.)</i> Grandes grietas en los elementos estructurales con fallos a compresión del hormigón; fallo de las uniones de las vigas. Deformación de las columnas. Colapso de algunas columnas o de algún piso superior.</p>
	<p>Grado 5: Destrucción <i>(Daño estructural muy severo).</i> Colapso total o casi total del edificio.</p>		<p>Grado 5: Destrucción <i>(Daño estructural muy severo).</i> Colapso del primer piso o partes del edificio.</p>

La escala EMS-98 define la cuantificación con una aproximación estadística tal y como reflejan, en la Figura 1, las bandas gráficas que representan rangos de porcentajes asociados a cada término de cuantificación. El uso de términos cuantitativos ("pocos", "muchos", "la mayoría") aporta un importante elemento estadístico a la escala. Definir rangos estadísticos con un grado de solape razonable entre cada rango de cuantificación es la solución propuesta en la escala. Se evitaron las opciones de rangos muy disjuntos, por un lado, y rangos muy solapados, por otro, para evitar, respectivamente, indefiniciones o ambigüedades en las apreciaciones cuantitativas. La Escala EMS-98 ha encontrado una solución de compromiso utilizando definiciones estrechamente superpuestas, de modo que el usuario debe considerar las implicaciones y la coherencia en la clasificación cuando ciertas medidas toman valores en las zonas de solape.

En un escenario de daño, este criterio sobre la cuantificación permite indicar la cantidad de edificios dañados de acuerdo a la clase de vulnerabilidad a la que pertenece. Se suele asignar un valor central de 10% para "pocos", de 35% para "muchos" y de 80% para "la mayoría", pero permite un margen de variabilidad para estas cantidades, que va de 0 a 15% para el significado numérico del término "pocos", de 15 a 55% para "muchos" y de 55 a 100% para "la mayoría".

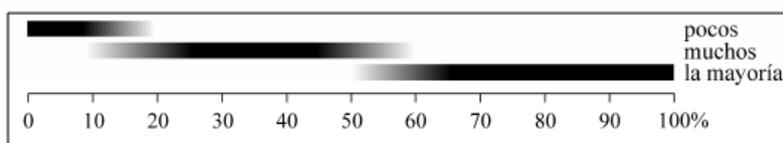


Figura 1 - Cuantificación de Daños según la escala EMS-98

A partir de los datos obtenidos en los pasos anteriores se procede a construir la matriz de daño observada, que luego se ajustará por medio de una distribución binomial.

1.3.3 Método ATC-13

El método descrito en esta sección y conocido como ATC-13 (ATC-13, 1985), es parte del informe *"Earthquake Damage evaluation data for California"*, para la evaluación de daños previsibles por terremotos en California, desarrollado por el Consejo de Tecnología Aplicada (*Applied Technology Council*, ATC³) de California (US). El método propuesto en ATC-13 incluye un total de 78 matrices de probabilidad de daño correspondientes a diferentes tipos de instalaciones y servicios (FC), 40 de los cuales corresponden a edificios y, las restantes 38, a otras estructuras o infraestructuras. El informe clasifica las edificaciones comúnmente empleadas en la zona de la Bahía de San Francisco (California) en cinco grupos o clases de vulnerabilidad: madera, hormigón, acero y mixta, en base a la opinión de expertos, en función de los materiales empleados en la estructura principal del inmueble y considerando la altura de la edificación y el nivel de diseño sismorresistente.

La metodología propuesta en el informe ATC-13, se basa en utilizar el método Delphi para desarrollar matrices de probabilidad de daño a partir de la opinión de expertos. El método de Delphi consiste en tratar estadísticamente la opinión de expertos sobre un problema determinado. El método toma en consideración el nivel de conocimiento en el tema del experto, así como el nivel de confianza que éste deposita en la opinión manifestada. Se determinan tres estimaciones del factor de daño esperado, el más bajo, el más alto y el óptimo. Los factores de daño más alto y más bajo se considera que constituyen los límites del intervalo

³ Applied Technology Council (ATC) (<https://www.atcouncil.org>). Último acceso: diciembre.2021.

que contiene el 90% de la muestra, mientras que el óptimo se interpreta como el valor más probable.

En el informe ATC-13 se establecen 7 estados de daño, tal como detalla la Tabla 6. El mayor grado de resolución de los estados de daño considerados en el ATC-13 se fundamenta en las consideraciones sismorresistentes publicadas por la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (*Structural Engineers Association of California*, SEAOC⁴, 1980) y, a su vez, permite un mayor margen para la definición de los niveles de daño esperados para diferentes intensidades, que se obtienen a partir de la opinión de expertos. Vale la pena indicar que, en esta tabla, los porcentajes se refieren al coste económico de la reparación del daño con respecto al coste total o de reposición del edificio.

Tabla 6. Estados de daño propuestos en el informe ATC-13 (1985)

Estado de daño	Rango (%)	Valor central	Descripción
1. Sin daño	0	0	No hay daños
2. Insignificantes	0-1	0.5	Daños mínimos y localizados. No requieren reparación para mantener la operatividad
3. Leves	1-10	5	Daños significativos localizados en algunos elementos que normalmente no necesitan reparación para mantener la operatividad
4. Moderados	10-30	20	Daños significativos localizados en bastantes elementos y que es necesario reparar
5. Fuertes	30-60	45	Daños generales. Es necesario efectuar reparaciones importantes
6. Graves	60-99	80	Daños graves que pueden interrumpir la operatividad o la función del elemento. Hay que reparar, sustituir o derribar.
7. Destrucción	100	100	Destrucción del elemento e inutilidad total de la línea o elemento.

1.4. Métodos basados en Índice de Vulnerabilidad

En los métodos de primer nivel, (LM1), o del índice de vulnerabilidad, la vulnerabilidad sísmica de un edificio ya se define mediante un índice de vulnerabilidad I_v (*Vulnerability Index*, V_i), que se obtiene a partir de la evaluación y ponderación de diferentes parámetros, teniendo así en cuenta la tipología del edificio y sus características constructivas. Los métodos de nivel 1, recogen la simplicidad de las descripciones de daños de las escalas de intensidad macrosísmica, para desarrollar métodos expeditos que permiten caracterizar el sismo y el edificio de forma sencilla. Este índice de vulnerabilidad suele tomar valores en un rango predefinido: 0-1 en general, ó bien, 0-100 cuando se da en porcentaje; en casos particulares pueden usarse otros valores límite.

Se trata de un método versátil, que permite modificar los índices de vulnerabilidad básicos, mediante características específicas de edificios de la misma tipología constructiva. Esto hace que, frecuentemente, se permitan valores mayores que 1, ó bien, en su caso, mayores que 100, y menores que 0, para considerar, respectivamente, edificios fuera de rango por su vulnerabilidad muy elevada (valores mayores que 1) ó bien por su alto nivel de seguridad, como, por ejemplo, edificios con un alto nivel de diseño y construcción sismoresistente, o con protección antisísmica.

⁴ Structural Engineers Association of California (SEAOC) (<https://www.seaoc.org>). Último acceso: diciembre 2021.

Estos métodos permiten generar escenarios de la calidad resistente de los edificios y de los daños esperados para estudios masivos en entornos urbanos, en los que no se justifica el uso de métodos costosos como, por ejemplo, aquellos basados en análisis dinámicos no lineales. Los escenarios de daño son, en promedio, robustos y fiables, y muy útiles para proveer información valiosa para el diseño e implementación de planes de emergencia sísmica y la detección de sectores urbanos con una mayor vulnerabilidad. Sin embargo, aunque para edificios individuales pueden proporcionar una idea rápida de su vulnerabilidad y daño esperado, su fiabilidad es menor. En estos casos, de evaluación de edificios individuales, sobre todo para casos especiales como son los edificios de especial importancia o los edificios esenciales, es preferible pensar en métodos más avanzados, como entre otros, aquellos basados en descripciones espectrales de la demanda sísmica y de los edificios.

Existen funciones de vulnerabilidad semi-empíricas que correlacionan el grado de daño medio, μ_D , la intensidad macrosísmica, I , y el índice de vulnerabilidad, V_I . Estas funciones se han determinado de forma que ajustan las relaciones entre los índices de vulnerabilidad y los correspondientes grados de daño medio, en función de la intensidad macrosísmica.

La correlación entre la demanda sísmica y el daño esperado, en función de la vulnerabilidad evaluada, se expresa en términos de curvas de vulnerabilidad descritas por la función analítica (Lagomarsino & Giovinazzi, 2006):

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad [1]$$

Donde:

μ_D = grado de daño medio

I = intensidad

V_I = índice de vulnerabilidad

Para esta función los datos de intensidad son los considerados en la escala EMS-98, quedando el grado de daño medio en función del índice de vulnerabilidad.

1.4.1 Método de Nivel I del proyecto Risk-UE

La vulnerabilidad de un edificio, de un agregado o de un conjunto de edificios viene definida por el índice de vulnerabilidad (I_v), cuyo valor se asigna en función de la tipología de lo edificado y de otros factores que afectan a la vulnerabilidad, como son la altura, el nivel de código, el estado de mantenimiento y las interacciones agregadas, entre otros factores, y que se identifican como modificadores de comportamiento. El índice de vulnerabilidad puede evaluarse en cada localidad mediante un tratamiento diferente de los datos disponibles, pasando por la BTM previamente definida (Lungu et al. 2001), como representativa del parque de edificios de la zona, región o país. La potencia de esta metodología es que no necesita una encuesta en campo por un formulario en particular, sino que puede aplicarse en diferentes países, y en función de la disponibilidad de información relativa a los edificios (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Si los datos están disponibles para cada edificio, se puede identificar la tipología de la BTM a la que pertenece (Tabla 7). Posteriormente, en base a la experiencia, se puede proponer un valor medio de Índice de Vulnerabilidad (I_v), para cada tipo de edificio. En el caso del proyecto Risk-UE, la mayoría de los valores de I_v propuestos han sido validados por datos observados (Tabla 8). Concretamente, a partir de la evaluación de daños después de los terremotos de Vrancea, 1977, Skopje, 1963, Irpinia, 1980 y de otros terremotos ocurridos en Italia (Milutinovic and Trendafiloski, 2003).

Si los datos disponibles no son suficientes para una atribución unívoca del tipo, se puede definir una nueva clase de edificio, especificando la distribución estadística de los tipos BTM en la clase y, en consecuencia, su valor característico de I_v calculado como la media ponderada del I_v de los miembros de la clase.

Tabla 7. Clases de vulnerabilidad según la BTM del proyecto RISK-UE

Tipologías de edificios		CLASES DE VULNERABILIDAD					
		A	B	C	D	E	F
MAMPOSTERÍA	M1.1	<input type="checkbox"/>					
	M1.2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>				
	M1.3		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>		
	M2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
	M3.1	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>			
	M3.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	M3.3	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	M3.4		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>		
	M4			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	
	M5		<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	
HORMIGÓN ARMADO	RC1		<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	RC2			<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	RC3.1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	RC3.2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>		
	RC4			<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	RC5			<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	RC6		<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
METÁLICA	S1	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>		
	S2			<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>
	S3		<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="radio"/>	
	S4				<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	S5				<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MADE-RA	W		<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

- Clase más probable
- Clase posible
- Clase poco probable (casos excepcionales)

En Risk-UE se proponen modificadores del comportamiento consistentes en puntuaciones asociadas a cada factor, *i.e.* la altura y el nivel de código; cada valor debe sumarse al valor medio para obtener una estimación más precisa del índice de vulnerabilidad. En principio, pueden suponerse valores diferentes en cada localidad para los valores medios del V_I y las puntuaciones de los modificadores de comportamiento, debido a la diferente habilidad de los constructores y calidad de los materiales en cada región o país; sin embargo, para evitar que esta elección puede parecer arbitraria, es recomendable un respaldo basado en datos experimentales o análisis detallados.

Tabla 8. Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Tipología	Descripción	Índices de vulnerabilidad				
		V_I^{\min}	V_I^-	V_I^*	V_I^+	V_I^{\max}
M1.1	Rubble stone, fieldstone	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
M1.2	Simple Stone	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M1.3	Massive Stone	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M2	Adobe	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
M3.1	Wooden slabs	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M3.2	Masonry vaults	0.46	0.65	0.776	0.953	1.02
M3.3	Composite steel and masonry slabs	0.46	0.527	0.704	0.83	1.02
M3.4	Reinforced concrete slabs	0.30	0.49	0.616	0.793	0.86
M4	Reinforced or confined masonry walls	0.14	0.33	0.451	0.633	0.70
M5	Overall strengthened	0.30	0.49	0.694	0.953	1.02
RC1	Concrete Moment Frames	-0.02	0.047	0.442	0.8	1.02
RC2	Concrete shear walls	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC3.1	Regularly infilled walls	-0.02	0.007	0.402	0.76	0.98
RC3.2	Irregular frames	0.06	0.127	0.522	0.88	1.02
RC4	RC Dual systems - RC frame and wall	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC5	Precast Concrete Tilt-Up Walls	0.14	0.207	0.384	0.51	0.70
RC6	Precast C. Frames, C. shear walls	0.30	0.367	0.544	0.67	0.86
S1	Steel Moment Frames	-0.02	0.467	0.363	0.64	0.86
S2	Steel braced Frames	-0.02	0.467	0.287	0.48	0.70
S3	Steel frame+unreinf. mas. infill walls	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
S4	Steel frame+cast-in-place shear walls	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
S5	Steel and RC composite system	-0.02	0.257	0.402	0.72	1.02
W	Wood structures	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

V_I^* índice de vulnerabilidad más probable

$[V_I^- ; V_I^+]$ límites del intervalo plausible del índice de vulnerabilidad (suelen ser los valores en los que la función de pertenencia vale 0.5)

$[V_I^{\min} ; V_I^{\max}]$ límites inferior y superior de los índices de vulnerabilidad que se consideran posibles

1.5. Método HAZUS

El programa HAZUS⁵, acrónimo que proviene de "Hazards U.S.", describe un método estandarizado, aplicable a nivel federal (USA), para la estima de las pérdidas potenciales por terremotos, vientos huracanados, tsunamis e inundaciones. Por tanto, HAZUS es una herramienta orientada al análisis de peligros naturales. El programa HAZUS (FEMA 366, 2001; FEMA, 2003; FEMA, 2020) está gestionado por el Programa de Evaluación de Riesgos debidos a Peligros Naturales (NHRAP) de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA⁶), incluida en la Dirección de Gestión de Riesgos norteamericana. Conjuntamente con el Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción (NIBS⁷) y la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) de los Estados Unidos, el programa HAZUS combina la experiencia de muchas disciplinas para crear información de riesgo procesable con el objetivo de mitigar o reducir los daños y los impactos sociales y económicos debidos a peligros naturales e incrementar, de este modo, la resiliencia de las comunidades.

FEMA publicó por primera vez HAZUS en 1997, seguido de una versión actualizada en 1999, HAZUS'99. En este sentido es un programa abierto y en permanente revisión en función de la información actualizada sobre nuevas amenazas. El software incluido en el programa HAZUS, basado en una plataforma de Sistema de Información Geográfica (SIG) de última generación, mapea y muestra los datos de peligro y las estimaciones de daños y pérdidas económicas en edificios e infraestructuras. Los recursos de evaluación de riesgos del programa Hazus son siempre de libre acceso y de desarrollo transparente.

Además, HAZUS es una metodología aplicable para la evaluación del riesgo sísmico que puede usarse a nivel local y a nivel nacional. Su desarrollo técnico fue delegado por FEMA a la compañía privada Risk Management Solutions, ubicada en Menlo Park, California. Se considera una herramienta valiosa al momento de requerir una comprensión más amplia de posibles pérdidas por terremoto y en ayudar a construir un consenso de la comunidad para la prevención de pérdidas y mitigación de desastres.

HAZUS clasifica los edificios en 36 tipos de construcción (Tabla 9), dependiendo del material constructivo y de la altura del edificio, en base al sistema de clasificación propuesto en FEMA 178 (FEMA, 2003; Allen and Rainer, 1995).

⁵ Hazards US (HAZUS) (<https://www.fema.gov/flood-maps/products-tools/hazus>). Último acceso: diciembre 2021

⁶ Federal Emergency Management Agency (FEMA) (<https://www.fema.gov/>). Último acceso: diciembre 2021

⁷ National Institute of Building Science (NIBS) (<https://www.nibs.org>). Último acceso: diciembre 2021

Tabla 9. Tipologías de edificios según la metodología Hazus (FEMA, 2003).

No.	Código	Descripción	Altura			
			Rango		Típico	
			Altura	Nivel	Nivel	pies
1	W1	Madera, pórtico ligero (≤ 5.000 sq. ft.)		1 - 2	1	14
2	W2	Madera, comerciales e industriales (> 5.000 sq. ft.)		Todos	2	24
3	S1L	Pórtico de acero - Momento	Baja	1 - 3	2	24
4	S1M		Media	4 - 7	5	60
5	S1H		Alta	8+	13	156
6	S2L	Pórtico de acero - Arriostrado	Baja	1 - 3	2	24
7	S2M		Media	4 - 7	5	60
8	S2H		Alta	8+	13	156
9	S3	Pórtico de acero ligero		Todos	1	15
10	S4L	Estructura de acero con muros de corte de hormigón colocados in-situ	Baja	1 - 3	2	24
11	S4M		Media	4 - 7	5	60
12	S4H		Alta	8+	13	156
13	S5L	Estructura de acero con paredes de mampostería no reforzada	Baja	1 - 3	2	24
14	S5M		Media	4 - 7	5	60
15	S5H		Alta	8+	13	156
16	C1H	Pórtico de concreto - Momento	Baja	1 - 3	2	20
17	C1L		Media	4 - 7	5	50
18	C1M		Alta	8+	12	120
19	C2H	Muros de hormigón armado	Baja	1 - 3	2	20
20	C2L		Media	4 - 7	5	50
21	C2M		Alta	8+	12	120
22	C3H	Estructura de hormigón con paredes de mampostería no reforzada	Baja	1 - 3	2	20
23	C3L		Media	4 - 7	5	50
24	C3M		Alta	8+	12	120
25	PC1	Paredes de hormigón prefabricado		Todos	1	15
26	PC2L	Pórticos prefabricados de hormigón con muros de hormigón armado	Baja	1 - 3	2	20
27	PC2M		Media	4 - 7	5	50
28	PC2H		Alta	8+	12	120
29	RM1L	Muros armados de mampostería con diafragmas de madera o cubierta de metal	Baja	1-3	2	20
30	RM1M		Media	4+	5	50
31	RM2L	Muros de soporte de mampostería reforzada con diafragmas de hormigón prefabricados	Baja	1 - 3	2	20
32	RM2M		Media	4 - 7	5	50
33	RM2H		Alta	8+	12	120
34	URML	Muros de carga de mampostería no reforzada	Baja	1 - 2	1	15
35	URMM		Media	3+	3	35
36	MH	Casas móviles		Todos	1	10

La metodología de Hazus'99, considera los siguientes 5 grados o estados de daño (incluyendo el estado de edificio exento de daño): i) Estado de daño nulo (grado 0); ii) Estado de daño leve (grado 1); iii) Estado de daño moderado (grado 2); iv) Estado de daño severo (grado 3), y v) Estado de daño completo (grado 4).

En algunos casos el daño estructural no es directamente observable debido a que los elementos estructurales no son visibles o accesibles, lo que se debe a los acabados arquitectónicos o protección contra el fuego. Por lo tanto, se describen estos estados de daño estructural, cuando sea posible.

1.6. Método RISK-UE. Nivel 2 (LM2)

Este método, descrito en el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Faccioli 2006; Mouroux y Le Brun 2008; Barbat et al. 2010; Lantada et al. 2010), y conocido como método de nivel 2 o LM2, proporciona un procedimiento detallado para estimar el daño esperado en el edificio empleando curvas de fragilidad, obtenidas a partir de la definición de cuatro umbrales de estados de daño no nulo y de la curva y espectro de capacidad del edificio. El método permite determinar matrices de probabilidad de daño para un edificio sometido a una acción sísmica específica. Los principales pasos del procedimiento son los siguientes: a) Determinación de la forma bilineal del espectro de capacidad a partir del punto de fluencia y del último punto del espectro de capacidad; b) Cálculo de los umbrales de los estados de daño a partir del punto de fluencia y del último punto del espectro de capacidad; c) Interpolación de las curvas de fragilidad considerando una matriz de probabilidades de excedencia de estados de daño basada en la función de distribución beta-equivalente; d) Cálculo del punto de capacidad por demanda (diferentes procedimientos posibles basados en el cruce o interacción entre espectro de demanda y de capacidad); e) Generación de matrices de probabilidad de daño para una demanda específica (utilizando el desplazamiento del punto de capacidad por demanda y una lectura sobre las curvas de fragilidad). El método, en base al cálculo del desplazamiento espectral del punto de capacidad por demanda, obtiene una estimación del daño esperado en el edificio y debido a la acción sísmica considerada.

De esta manera, el análisis estático no lineal equivalente es una herramienta sumamente útil para cuantificar la resistencia de un edificio a fuerzas laterales. La técnica, conocida como *pushover*, consiste en aplicar fuerzas laterales al edificio de acuerdo a un patrón establecido y aplicado de forma incremental. Normalmente, el patrón lateral es proporcional al primer modo de vibración del edificio en la dirección de empuje. La curva de capacidad así obtenida representa, en abscisas, el desplazamiento en un nodo de control situado en el techo, mientras que, en ordenadas, se representa la fuerza de reacción del esfuerzo cortante en la base. Por consideraciones basadas en el análisis modal, transformaciones sencillas permiten convertir la curva de capacidad en el espectro de capacidad, de forma que éste representa la evolución del desplazamiento espectral (S_d), en abscisas, contra la aceleración espectral (S_a), en ordenadas, durante el pushover. La obtención de curvas y espectros de capacidad de un edificio o clase de edificios requiere su modelado estructural numérico y, por lo tanto, es conveniente conocer, en detalle, los detalles geométricos y materiales del diseño y construcción de la edificación. La aplicación de este método a una muestra suficiente de edificios sugiere su aproximación a una población ideal y, por tanto, su agrupamiento en clases, suficientemente amplias, para representar el máximo número de edificios, pero también suficientemente concretas para representar bien las diferencias en las características constructivas.

2. MATRIZ TIPOLÓGICA PARA LA ZONA POCRISC

En base a la opinión de expertos y a las matrices tipológicas de edificios ya desarrolladas en proyectos anteriores, como ISARD (ISARD, 2006; Goula et al. 2008) y SISPyR (2013), en los que se desarrollaron las BTM de las construcciones típicas de Girona (Irizarry et al, 2013), las comarcas de la Cerdanya (Roussillon et al. 2006) y la Val d’Aran, en Cataluña, y el Luchonnais en Francia (Roullé et al. 2012), se ha desarrollado la matriz tipológica de la zona de estudio de POCRISC. En la Tabla 10 se indica una breve descripción de cada tipología y su código, así como la zona POCRISC en la que se encuentra dicha tipología. Los códigos empleados en la BTM de POCRISC siguen la nomenclatura de las tipologías de Risk-UE (2003), siempre que exista una concordancia entre ambas. En caso contrario, se ha buscado una nueva nomenclatura que caracterice, adecuadamente, la tipología. En adelante se hará referencia a las tipologías según esta nomenclatura asociada.

Tabla 10. Tipologías identificadas en la zona POCRISC: Andorra (AND), Cataluña (CAT), y Francia (FR).

Tipología General	Tipología POCRISC	Descripción	Zona representada
Muros de fábrica	M1.0	Estructuras de muros de fábrica con mampostería en seco	AND, CAT y FR
	M1.1	Estructuras de muros de fábrica de piedras o cantos rodados (mampostería ordinaria). Bóveda en planta baja (PB) y forjados de viguetas de madera en las plantas de los pisos (PP).	AND, CAT y FR
	M1.2	Estructuras de muros de fábrica con piedra labrada (mampostería concertada). Bóveda en PB y forjados de viguetas de madera en PP. Casa tradicional.	AND, CAT y FR
	M1.3	Estructuras de muros de fábrica con sillería. Techos con viguetas de madera.	AND, CAT y FR
	M2	Estructuras de muros de tierra amasada.	AND, CAT y FR
	M3.1	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo sin armar con forjados de madera	AND, CAT y FR
	M3.2	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo sin armar con bóvedas de fábrica	CAT
	M3.3	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo o bloque de hormigón sin armar con forjados de vigas de acero y bovedillas de cerámica	AND, CAT y FR
	M3.4	Estructuras de muros de fábrica de ladrillo o bloque de hormigón sin armar con forjados de hormigón armado	AND, CAT y FR
	M4	Estructuras de muros de fábrica armada o confinada	CAT y FR
	M5	Estructuras de muros de fábrica reforzadas globalmente	FR

Tipología General	Tipología POCRISC	Descripción	Zona representada
Hormigón armado	RC1	Pórticos de hormigón resistentes a momentos. Alta o muy alta ductilidad.	AND, CAT y FR
	RC2	Muros estructurales de hormigón (de cortante)	FR
	RC3.1	Pórticos regulares de hormigón con relleno regular de fábrica de ladrillo sin armar	AND, CAT y FR
	RC3.2	Pórticos irregulares de hormigón (p.e., estructura irregular, relleno irregular, piso blando/débil)	AND, CAT y FR
	RC3.3*	Estructuras de hormigón con jácenas planas y forjados unidireccionales. Baja ductilidad.	CAT
	RC3.4*	Estructuras de losas (aligeradas o macizas) sobre pilares de hormigón. Baja ductilidad.	AND, CAT y FR
	RC4	Sistemas duales de hormigón armado. Pilares y forjados de hormigón con muros estructurales de hormigón alrededor de escaleras y ascensores.	CAT
	RC5	Muros de hormigón prefabricado con forjados prefabricados de hormigón armado o pretensado	CAT
	RC6	Pórticos prefabricados sin nudos rígidos (vigas simplemente apoyadas en ménsulas de los pilares) arriostrados por muros estructurales	CAT
	RC7*	Pórticos prefabricados sin nudos rígidos (vigas simplemente apoyadas en ménsulas de los pilares). Sin ductilidad.	CAT
Acero	S1	Pórticos de acero con nudos rígidos resistentes a momento	AND, CAT y FR
	S2	Pórticos de acero arriostrados con triangulaciones	AND, CAT y FR
	S3	Pórticos metálicos con rellenos de fábrica sin armar	CAT
	S4	Pórticos metálicos arriostrados con muros estructurales de hormigón	CAT
	S5**	Pórticos metálicos con cerchas o vigas celosía con luces grandes	CAT
Mixtas Acero - Hormigón	X1*	Sistemas mixtos de acero y hormigón. Vigas y / o pilares mixtos de acero y hormigón.	CAT
	X2*	Estructuras de pilares de fábrica con jácenas de acero en la planta baja y muros de fábrica en pisos.	CAT
	X3*	Estructuras con pilares de acero y forjados planos de hormigón	CAT
Madera	W	Estructuras de madera	CAT y FR

(*) Tipologías que no aparecen en la matriz tipológica de Risk-UE.

(**) Código que no coincide con el de la BTM de Risk-UE

Se han introducido subclases de altura de edificios que pueden apreciarse en la Tabla 11. Esta información, junto con el periodo constructivo de la región al que pertenece el edificio permitirían identificar el código de diseño del mismo y clasificarlo según cuatro clases: no código (incluye periodos pre-código); código-bajo (diseñado con un coeficiente sísmico de

cizallamiento de base arbitrario único y/o, sin reglas adecuadas para la estructura y el detalle); código-moderado (cualquier código que no sea bajo o alto); código-elevado (código comparable con Eurocódigo 8).

Tabla 11. Matriz Tipológica de Edificios (BTM) de la zona POCRISC

Código Tipología POCRISC	Descripción del tipo de edificio	Rango altura	Nº de plantas	Altura, h (m)
M				
<i>M1</i>	Muros de mampostería:			
1.0	En seco.	Baja	1 - 2	$h \leq 6$
1.1	Ordinaria.	Baja Media	1 - 2 3 - 5	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$
1.2	Careada.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
1.3	De sillares.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
<i>M2</i>	Tierra amasada.	Baja	1-2	$h \leq 6$
<i>M3</i>	De ladrillo o bloque sin armar con:			
3.1	Forjados de madera.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
3.2	Bóvedas de fábrica.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
3.3	Viguetas de acero y bovedillas ladrillo.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
3.4	Forjados de hormigón armado.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
<i>M4</i>	Muros de fábrica armada o confinada.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
<i>M5</i>	Muros de fábrica reforzados globalmente.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
RC				
<i>RC1</i>	Pórticos resistentes a momento.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
<i>RC2</i>	Muros estructurales (de cortante).	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$

RC3				
3.1	Pórticos de hormigón con relleno de fábrica sin armar. Pórticos regulares.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
3.2	Pórticos irregulares de hormigón (p.e., estructura irregular, rellenos irregulares, piso débil).	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
3.3	Pórticos con jácenas planas y forjados unidireccionales.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
3.4	Losas (aligeradas o macizas) sobre pilares de hormigón.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
RC4	Sistemas duales de hormigón armado (pórticos y muros).	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
RC5	Muros prefabricados con forjados prefabricados.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
RC6	Pórticos prefabricados arriostrados por muros de cortante.	Baja Media Alta	1 - 2 3 - 5 6+	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$ $h > 15$
RC7	Pórticos prefabricados sin nudos rígidos y sin arriostrar.	Baja Media	1 - 2 3 - 5	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$
S				
S1	Pórticos resistentes a momento.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S2	Pórticos arriostrados.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S3	Pórticos con rellenos de fábrica sin armar.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S4	Pórticos arriostrados con muros de hormigón.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
S5	Pórticos con cerchas o vigas celosía con luces grandes.	Baja Media	1 - 2 3 - 5	$h \leq 6$ $6 < h \leq 15$
X				
X1	Sistemas mixtos de acero y hormigón.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
X2	Pilares de fábrica y jácenas de acero en planta baja y de muros de fábrica en los pisos.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
X3	Pilares metálicos y forjados planos de hormigón.	Baja Media Alta	1 - 3 4 - 7 8+	$h \leq 9$ $9 < h \leq 21$ $h > 21$
W	Estructuras de madera	Baja Media	1-2 3+	$h \leq 5.5$ $h > 5.5$

2.1. Descripción de las tipologías estructurales

A continuación, se describen con más detalle las características estructurales de cada una de las tipologías propuestas en la matriz tipológica de edificios (BTM) del proyecto POCRISC.

2.1.1. Estructuras de mampostería (M)

- M1.0. Estructuras de muros de fábrica con mampostería en seco

Construcciones tradicionales en las que el material básico de construcción son las piedras, colocadas en seco, sin mortero. Los edificios son pesados y con poca resistencia a las cargas laterales (Figura 2 y Figura 3.a). Los forjados son típicamente de madera y no proporcionan rigidez horizontal (Figura 3.b). Debe destacarse que este tipo de edificaciones no es usual en la región de estudio de POCRISC para edificios de vivienda habitual.

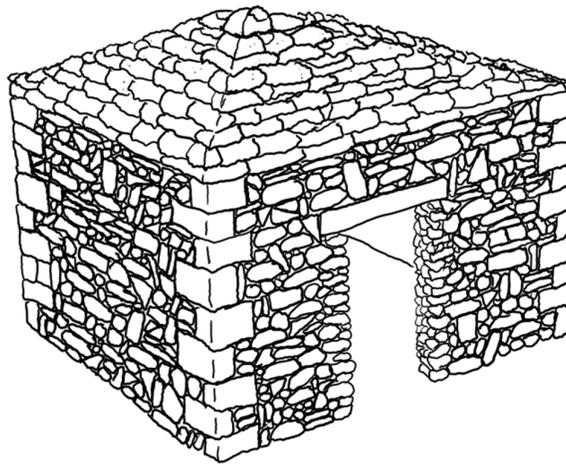


Figura 2. Mampostería en seco.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



a)

b)

Figura 3. a) Ejemplo de edificio de mampostería en seco y b) detalle de forjado de madera.

Fuente: a) <https://diccionarioactual.com/mamposteria-en-seco/>. b) [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

- M1.1. Estructuras de muros de fábrica con muros de piedras o cantos rodados (mampostería ordinaria)

Construcciones tradicionales en las que el material básico de construcción son las piedras, con mortero de mala calidad. Los edificios son pesados y con poca resistencia a las cargas laterales (Figura 4 y Figura 5.a). Los forjados son típicamente de madera y no proporcionan rigidez horizontal (Figura 3.b).

En ocasiones el techo de la planta baja está constituido por bóvedas de mampostería (Figura 4.b).

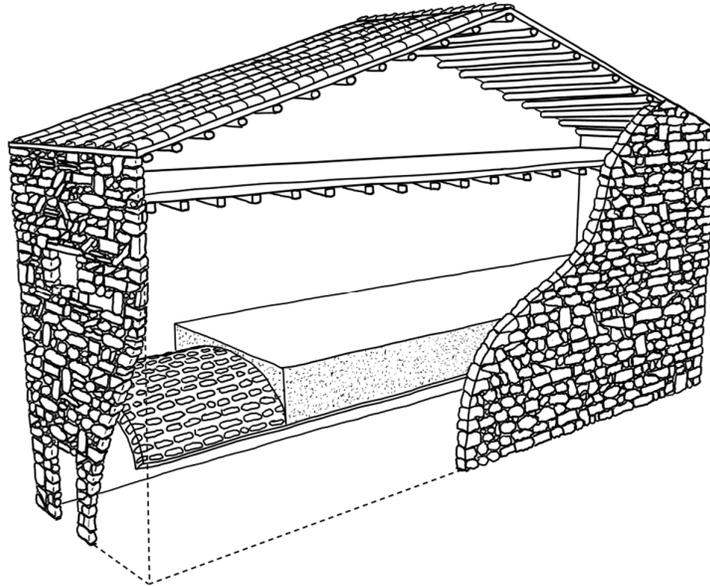


Figura 4. Mampostería ordinaria.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



a)

b)

Figura 5. a) Ejemplo de casa con mampostería ordinaria (casa Rull, Andorra) y b) Bóveda de mampostería.

Fuente: a) A. Etxebarria, b) <https://restauranteordesa.es/>

- M1.2. Estructuras de muros de fábrica con piedra labrada (mampostería concertada)

Construcciones simples de piedra, difieren de las anteriores en que éstas han sido trabajadas antes de colocarlas (Figura 6). Estas piedras labradas se disponen en el muro siguiendo un conjunto de técnicas destinadas a mejorar la resistencia de la estructura.

También se pueden considerar en esta tipología los edificios con mampostería de piedras cortadas y toscamente revestidas, siempre que las piedras sean de tamaño significativo, con textura precisa y, en ocasiones, con pequeñas láminas de piedra, colocadas posteriormente para aumentar los contactos.

Además, se puede incluir, en este tipo, la fábrica de piedra intercalada con capas horizontales de ladrillos o piedras de mayor tamaño.

En ocasiones el techo de la planta baja está constituido por bóvedas de cerámica (Figura 7.a). Los forjados son típicamente de madera y no proporcionan rigidez horizontal (Figura 7.b).

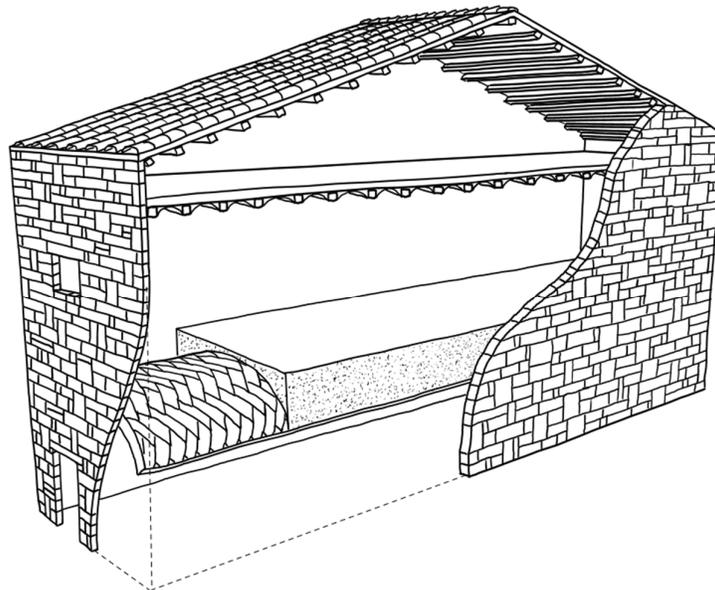
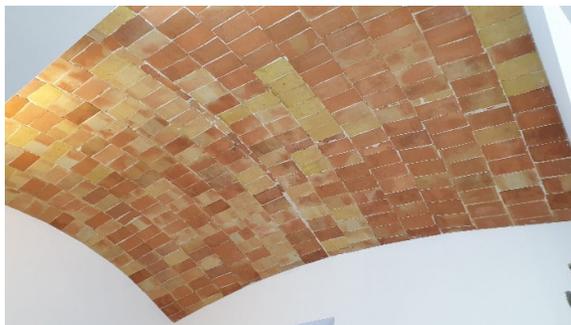


Figura 6. Mampostería concertada.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



a)



b)

Figura 7. a) Ejemplo de bóveda cerámica y b) Forjado de madera y bovedillas de maón.

Fuente: a) [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#) y b) <https://enriquealario.com/refuerzo-de-forjados-de-madera-por-la-cara-superior/>

- M1.3. Estructuras de muros de fábrica con sillería

Edificios de grandes piedras, estas son, usualmente, utilizadas en construcciones monumentales como son palacios, castillos y mansiones entre otros (Figura 8 y Figura 9). Estos tipos de fábricas se desarrollaron durante la edad media; las piedras están colocadas con gran precisión, y los materiales y la mano de obra son, la mayoría de las veces, de gran calidad. En consecuencia, estos edificios suelen tener una gran resistencia, lo que contribuye a su buen comportamiento sísmico.

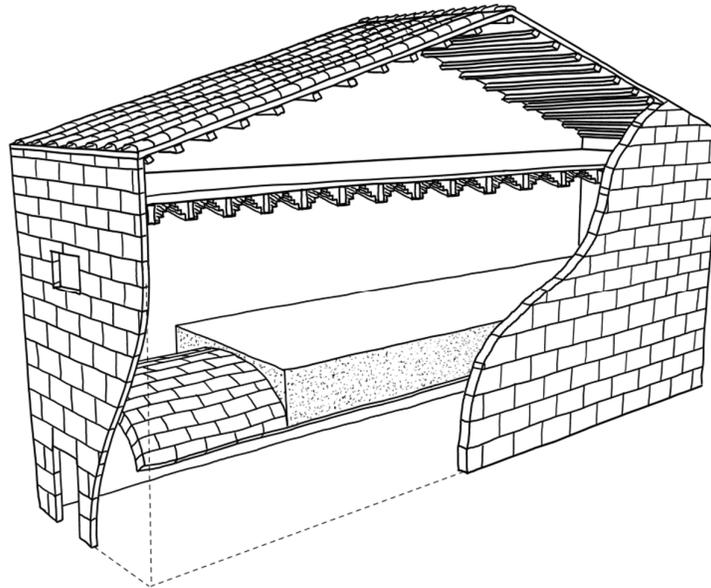


Figura 8. Muros de sillería.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 9. a) Ejemplo de edificio con muros de sillería y b) detalle del muro (Palacio de los Condes de Gómara, Soria).

Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

- M.2. Tierra amasada

Este tipo de construcción se puede encontrar en muchos lugares donde existen arcillas (Figura 10). Los métodos de construcción con ladrillos, hechos de tierra húmeda amasada (adobe), varían ampliamente e introducen grandes variaciones en la resistencia a los terremotos. Los muros construidos con capas de tierra apisonada sin el uso de ladrillos (tapia) son rígidos pero débiles. Las construcciones de adobe pueden tener un mejor comportamiento dependiendo de la calidad del mortero y, en menor medida, de la calidad de los ladrillos (Figura 11.b). Las casas de adobe con entramados o tirantes de madera (Figura 11.a) poseen una mayor resistencia horizontal y funcionan significativamente mejor durante los terremotos. Tales edificios pueden sufrir daños en las paredes de adobe con relativa facilidad, mientras que el entramado de madera permanece intacto.

También se encuentran casos en los que se utilizan vigas y columnas de madera desconectadas entre ellas, que proporcionan una resistencia adicional horizontal y, por lo tanto, mejoran la respuesta, pero, no tanto como lo haría un entramado conectado.

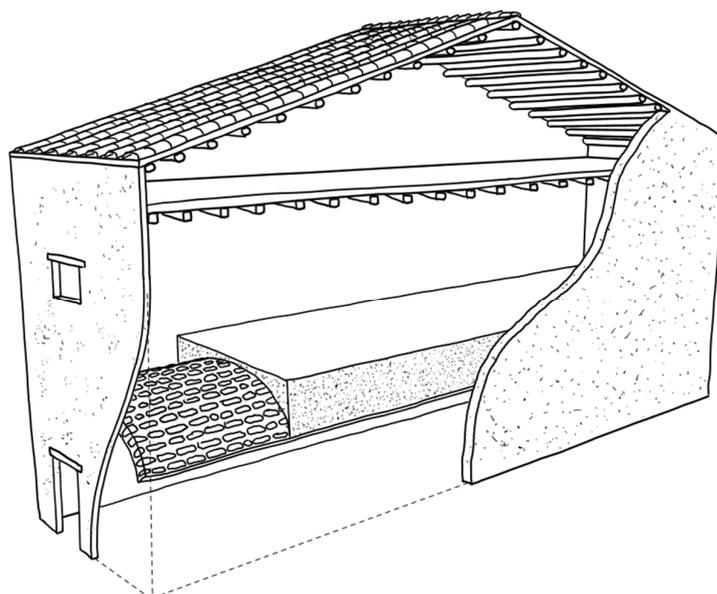


Figura 10. Muros de tierra amasada.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 11.a) Ejemplo de edificio con muros de tapia y b) Ejemplo de edificio con ladrillos de adobe.

Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

- M3.1. Estructuras de muros de fábrica sin armar con forjados de madera (Figura 12).

La mayor parte de los forjados y tejados consisten en un revestimiento de madera, sostenido por un entramado de madera. En general, la vulnerabilidad se ve afectada por el número, el tamaño y la posición de las aberturas. Grandes aberturas, pequeños pilares entre aberturas y esquinas, así como paredes internas escasas, debido a la amplitud de las habitaciones, contribuyen a un edificio más vulnerable. Un problema a tener en cuenta es el uso de paredes huecas, que pueden, si no se conectan correctamente, crear paredes muy débiles con una resistencia sísmica muy deficiente (Figura 13).

En la Figura 13.a, se puede ver un ejemplo de muro de fábrica sin armar, aunque a menudo, si el aparejo no es muy cuidado, puede presentarse revestida por un revoco. En ocasiones, los forjados consisten en bóvedas hechas a mano sobre viguetas de madera, con relleno de mortero (Figura 13.b).

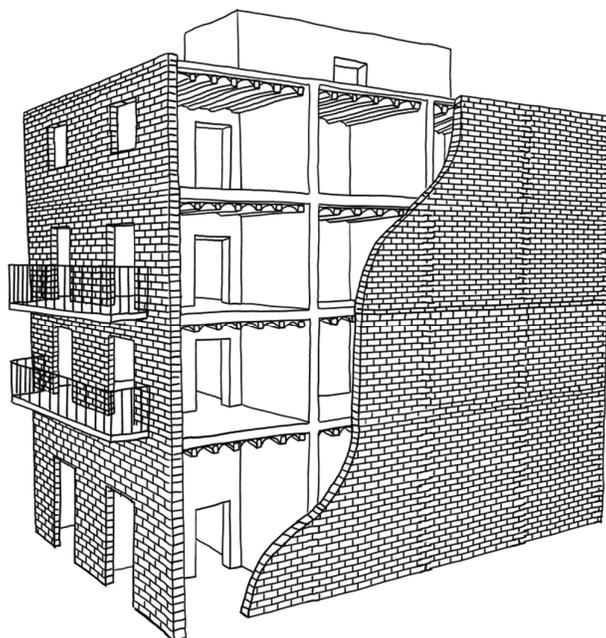


Figura 12. Muros de fábrica de ladrillo sin armar con forjados de madera.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

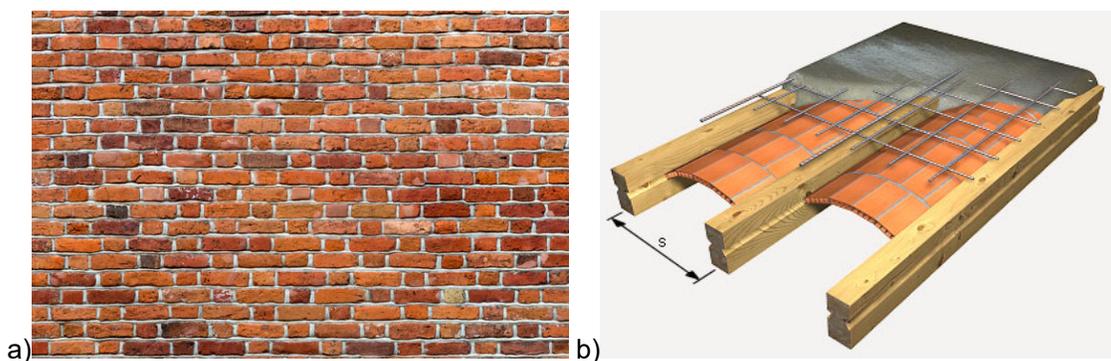


Figura 13. a) Ejemplo de muro de fábrica de ladrillo y b) Ejemplo de forjado con viguetas de madera y bovedillas de maón.

Fuente: a) [freepik.es](#) y b) Programa Generador de Precios ([Cype Ingenieros, S.A.](#)).

- M3.2. Estructuras de muros de fábrica de ladrillo sin armar con bóvedas de fábrica

Las bóvedas de fábrica se apoyan directamente sobre los muros de fábrica o indirectamente mediante arcos de fábrica (Figura 14 y Figura 15). En general, la vulnerabilidad se ve afectada por el número, tamaño y posición de las aberturas. Grandes aberturas, pequeños pilares entre aberturas y esquinas, así como paredes internas escasas debido a la amplitud de las habitaciones, contribuyen a un edificio más vulnerable. Un problema a tener en cuenta es el uso de paredes huecas, que pueden, si no se conectan correctamente, crear paredes muy débiles con una resistencia sísmica insuficiente.

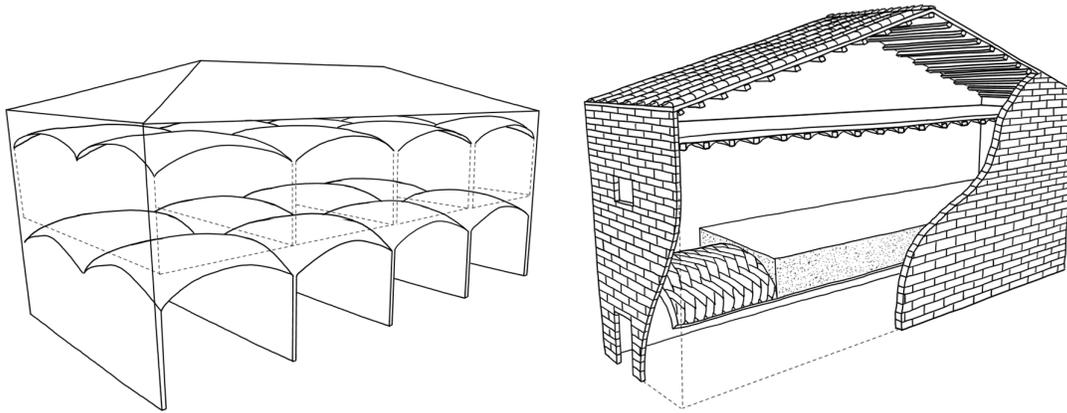


Figura 14. Muros de fábrica de ladrillo no reforzada con bóvedas de fábrica.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

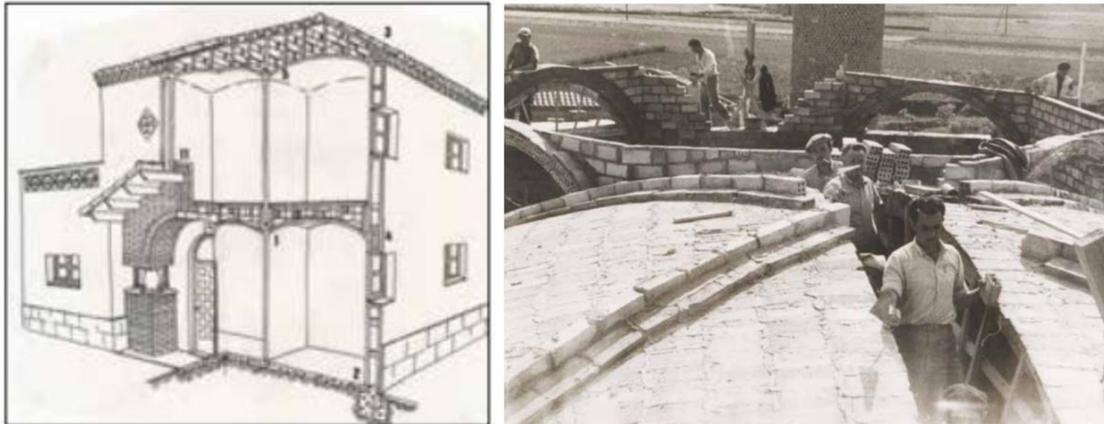


Figura 15. Ejemplo de casas con bóvedas de cerámica.

Fuente: Cases barates de Girona, revista "La Punxa" nº 57. Col·legi d'aparelladors de Girona 2019.

- M3.3. Estructuras de muros de fábrica de ladrillo o bloque de hormigón sin armar con forjados de vigas de acero y bovedillas de cerámica (Figura 16 y Figura 17.a)

Los forjados están compuestos por vigas de acero, apoyadas en los muros de fábrica, y bóvedas de fábrica colocadas entre las vigas y apoyadas en las alas de las vigas (Figura 17.b). En general, la vulnerabilidad se ve afectada por el número, tamaño y posición de las aberturas. Grandes aberturas, pequeños pilares entre aberturas y esquinas, así como paredes internas escasas, debido a la amplitud de las habitaciones, contribuyen a un edificio más vulnerable. Un problema a tener en cuenta es el uso de paredes huecas, que pueden, si no se conectan correctamente, crear paredes muy débiles con una resistencia sísmica deficiente o insuficiente.

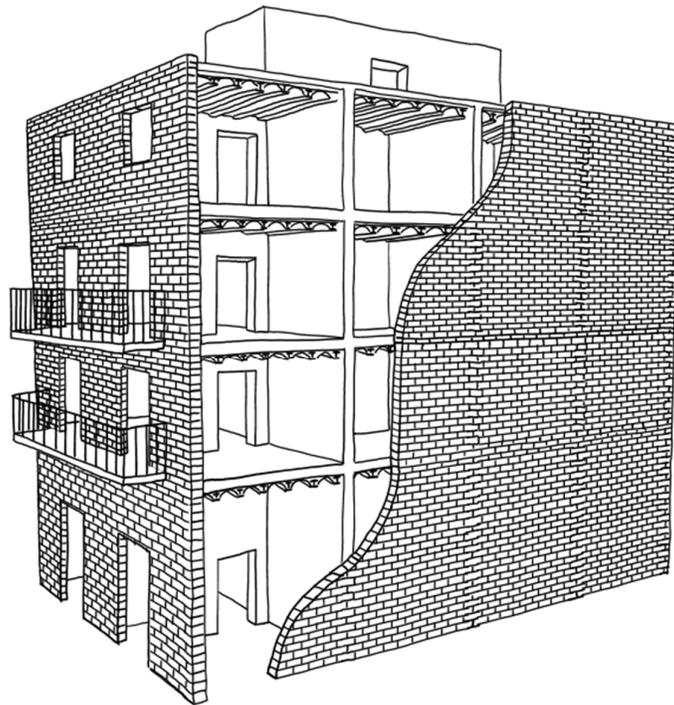


Figura 16. Muros de fábrica de ladrillo o bloque y viguetas de acero.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

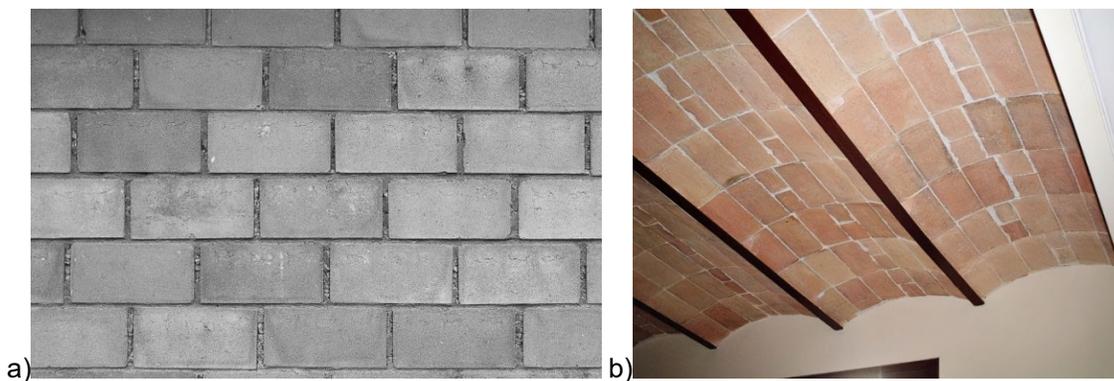


Figura 17. a) Ejemplo muro de bloques de hormigón y b) forjado de viguetas metálicas y bovedillas de maón.

Fuente: a) [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#) y b) [2045e6aae8260fcec6699a9e2b17542f.jpg \(410×310\) \(pinimg.com\)](#).

- M3.4. Estructuras de muros de fábrica de ladrillo o bloque de hormigón sin armar con forjados de hormigón armado.

Aunque los muros son los elementos más importantes en un edificio, a veces, los elementos horizontales pueden ser igualmente decisivos para determinar la resistencia de una estructura a las cargas laterales. Por lo tanto, el tipo de construcción, donde las paredes no están armadas (ladrillos, piedras labradas, bloques de hormigón) y los forjados son de hormigón armado, se comportará significativamente mejor que los edificios de muros de fábrica ordinarios más antiguos.

Si las paredes están conectadas y unidas con un forjado rígido mediante zunchos perimetrales (Figura 18), se crea un sistema similar a una caja que reduce efectivamente el riesgo de colapso de las paredes fuera del plano, o la separación y deriva, gracias a las paredes perpendiculares con que se cruzan. Esta respuesta mejorada solo se producirá si el forjado está conectado correctamente con los muros; este es el caso de las construcciones recientes de muros de fábrica (siglo XX), en las que se colocaron zunchos perimetrales durante la construcción (Figura 19).

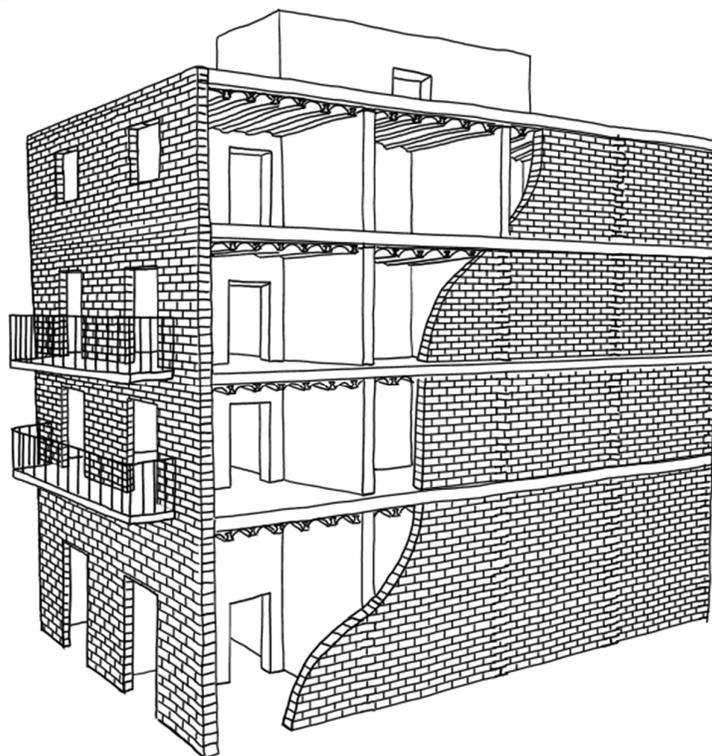


Figura 18. Muros de fábrica de ladrillo o bloque y forjados de hormigón.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



a)

b)

Figura 19. Ejemplo de forjados unidireccionales. a) viguetas de hormigón pretensado y bovedillas de cerámica, b) viguetas de hormigón armado y bovedillas de hormigón.

Fuente: a) [forjat02.jpg \(1200×900\) \(gero10.cat\)](#), b) [forjados05.jpg \(2048×1536\) \(arpape.com\)](#).

Los forjados pueden ser de viguetas pretensadas o armadas, así como las bovedillas que pueden ser cerámicas o de mortero (Figura 19).

- M4. Estructuras de muros de fábrica armada o confinada

En los muros de fábrica armada (Figura 20), se colocan barras o mallas de acero (en mortero o lechada) en agujeros o entre las hiladas de ladrillo (Figura 21), creando un material compuesto que actúa como una pared altamente resistente y dúctil. Dicho refuerzo estará presente tanto en dirección vertical como horizontal.

La fábrica confinada se caracteriza por la fábrica construida rígidamente entre columnas estructurales y vigas en sus cuatro lados, y proporciona un nivel similar de resistencia. En tales casos, no se pretende que los elementos de conexión funcionen como un entramado resistente a momentos, por lo que la fábrica no solo es un relleno no estructural sino el material estructural principal.

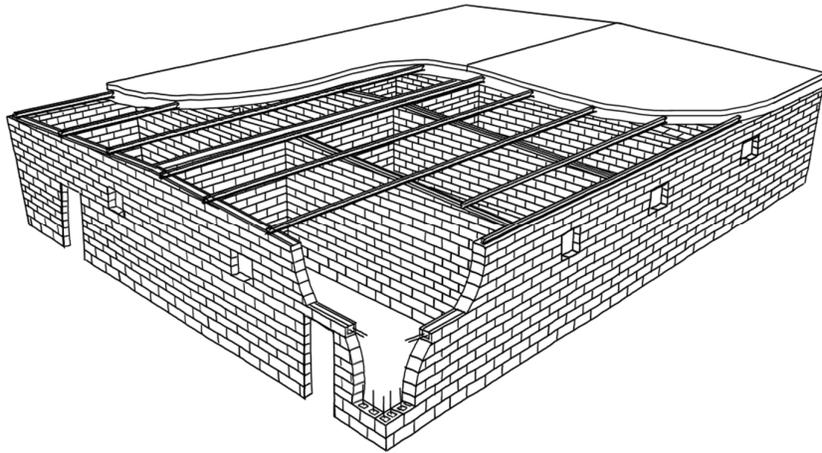


Figura 20. Muros de fábrica armada o confinada de ladrillo o bloque.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 21. Imágenes de muros de fábrica armada.

Fuente: <https://www.bekaert.com/es-MX/product-catalog/construction/masonry-reinforcement/productos>

- M5. Estructuras de muros de fábrica reforzadas globalmente

Los edificios antiguos de muros de fábrica se podrían haber reforzado globalmente, para reducir la vulnerabilidad sísmica (Figura 22). Las obras que pertenecen a esta categoría son las siguientes:

- a) Forjados rígidos nuevos de hormigón armado con zunchos perimetrales de conexión con los muros
- b) Revestimiento de los muros de fábrica con hormigón armado
- c) Construcción de un entramado de vigas y columnas de hormigón armado en el espesor de la pared, para confinar la fábrica con un entramado resistente a momentos (Figura 23)
- d) Inserción de un entramado de acero en el espesor de la pared. El comportamiento de este tipo de edificaciones es muy disperso, pues depende de la eficacia de la intervención adoptada, en relación con la edificación original, y de la calidad de su realización real.

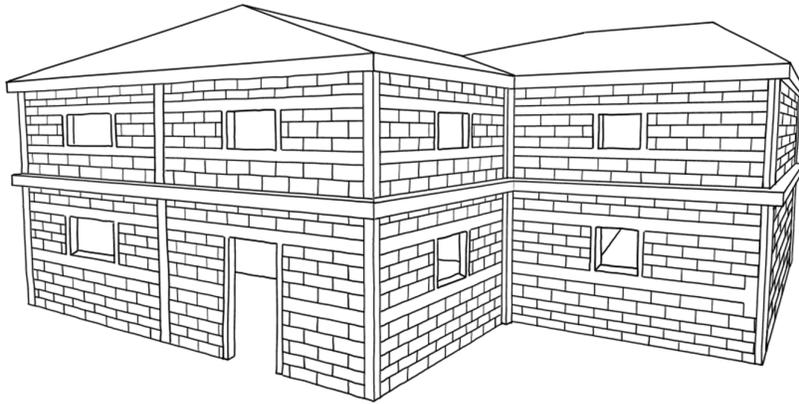


Figura 22. Muros de fábrica reforzada globalmente.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 23. Ejemplo de muro reforzados globalmente.

Fuente: <https://eird.org/publicaciones/doc18144-contenido.pdf>

2.1.2. Estructuras de hormigón (RC, reinforced concrete)

- RC1. Pórticos de hormigón resistentes a momentos

Los elementos estructurales de estos pórticos consisten en pilares de hormigón armado vigas y nudos rígidos (Figura 24 y Figura 25). En algunos casos, las conexiones viga-pilar tienen una capacidad de resistencia a momento muy pequeña, pero, en otros casos, algunos pilares y vigas están armados para resistir fuerzas horizontales. Por lo general, la estructura está oculta del exterior por muros no estructurales, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo o paneles de hormigón prefabricado).

Los forjados de hormigón armado transfieren las cargas de inercia horizontal a los pórticos resistentes a momentos. Una menor rigidez de los pórticos puede resultar en grandes derivas entre pisos que pueden conducir a daños no estructurales relativamente mayores.

Hay una gran variedad de sistemas de pórticos. Algunos pórticos de hormigón más antiguos pueden estar armados de manera inadecuada, por lo que se puede producir un fallo frágil en terremotos y ocasionar colapso parcial o total de los edificios. Por el contrario, los pórticos modernos ubicados en zonas de alta sismicidad están adecuadamente armados para un comportamiento dúctil y es probable que puedan sufrir grandes deformaciones durante un terremoto sin fallo frágil de los miembros del pórtico y sin colapso.

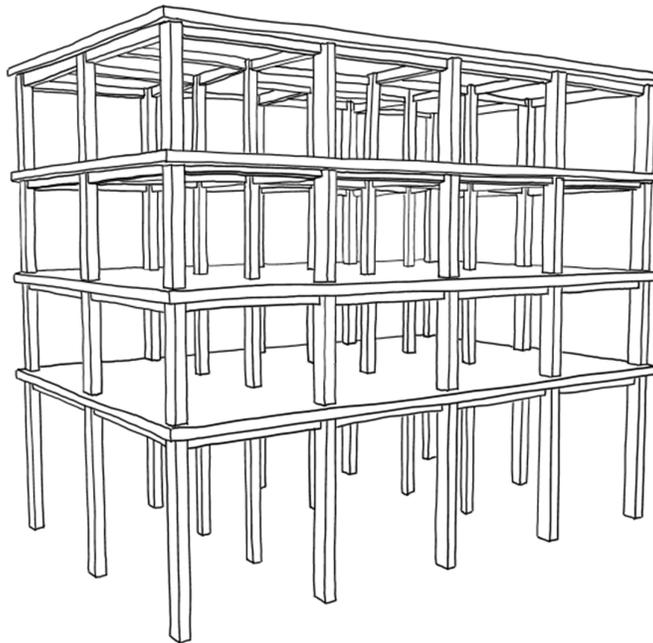


Figura 24. Pórticos de hormigón resistentes a momentos.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 25. Ejemplo de edificio con pórticos de hormigón resistentes a momentos.

Fuente: <https://www.engineersdaily.com/2014/02/spreadsheet-seismic-design-for-special-moment-resisting-frame.html>

- RC2. Muros estructurales de hormigón (de cortante)

Los componentes verticales del sistema de resistencia a fuerzas horizontales en los edificios con muros de cortante de hormigón consisten en muros estructurales de HA (Figura 26 y Figura 27). En edificios más antiguos, las paredes tienen, a menudo, áreas de sección transversal bastante extensas, de modo que las tensiones por gravedad de la pared son bajas y el refuerzo, tanto vertical como horizontal, es muy ligero.

En los edificios de muros de cortante de hormigón más recientes, los muros estructurales, generalmente diseñados y armados adecuadamente, a menudo, tienen una extensión limitada, lo que genera preocupación sobre los miembros delimitadores y la resistencia al cortante de los muros. Cabe señalar que la estructura de muro de cortante de hormigón armado es la solución antisísmica más adecuada para edificios de mediana altura.

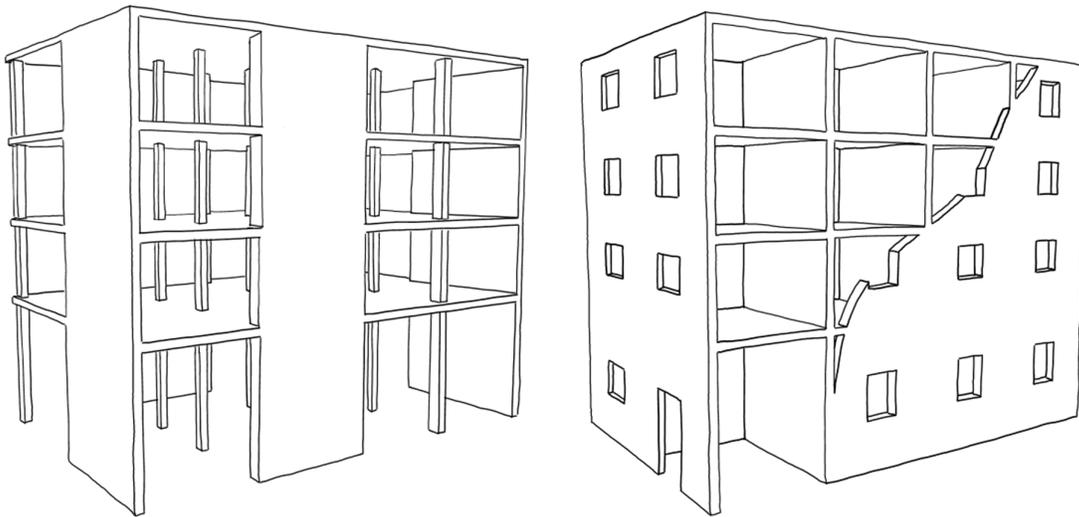


Figura 26. Muros de cortante.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 27. Ejemplos de edificios con muros estructurales de hormigón.

Fuente: a) <https://civiljungle.com/advantages-of-shear-wall/>, b) [Industrial.jpg \(420x480\) \(withamgroup.co.uk\)](#).

- RC3.1. Pórticos regulares de hormigón con relleno regular de fábrica sin armar

Estructuras, generalmente sin diseño sismorresistente, que, sin embargo, tienen buenos rellenos regulares de fábrica, que pueden ayudar significativamente a la resistencia a las acciones laterales (Figura 28). Las paredes de relleno generalmente están desplazadas de los elementos del pórtico exterior, se disponen alrededor de ellos y muestran un exterior de fábrica de menor espesor con el pórtico oculto. Los paneles de fábrica con relleno sólido, cuando se acoplan completamente a los elementos del pórtico circundante, (es decir, colocados en el mismo plano), pueden proporcionar una rigidez y una resistencia frente a fuerzas horizontales, adecuadas a la estructura (Figura 29). En estos edificios, la fragilidad de los pilares, tras el agrietamiento del relleno, puede limitar el comportamiento semi-dúctil del sistema.

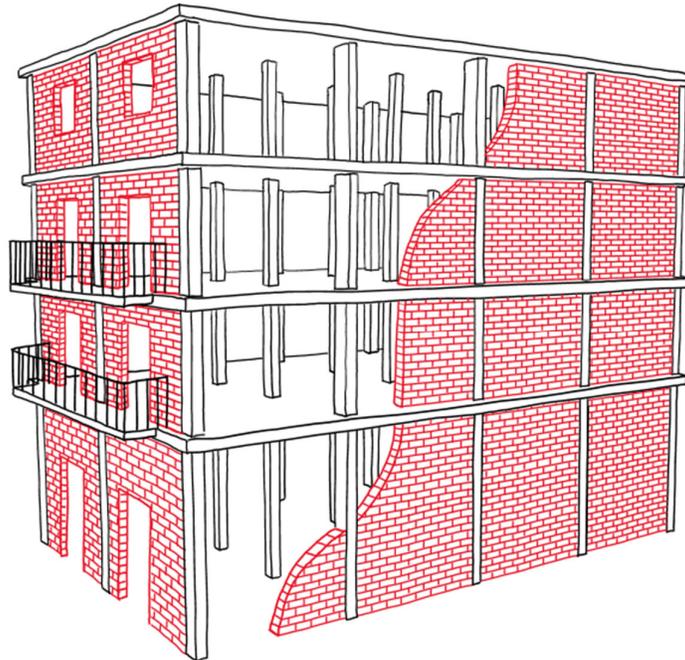


Figura 28. Pórticos regulares de hormigón con relleno de fábrica.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 29. Pórticos regulares de hormigón con relleno de fábrica.

Fuente: <https://taxonomy.openquake.org/terms/infilled-frame>

- RC3.2. Pórticos irregulares de hormigón

Estas estructuras son similares a las de pórticos de hormigón con relleno de fábrica sin armar regulares, excepto que el sistema estructural presenta falta de regularidad de los pórticos de hormigón o de los muros de fábrica de relleno. Las irregularidades del pórtico de hormigón (Figura 30) y/o la presencia de pisos blandos/débiles (especialmente en la planta baja) ocasionan un mal comportamiento estructural frente a cargas horizontales.

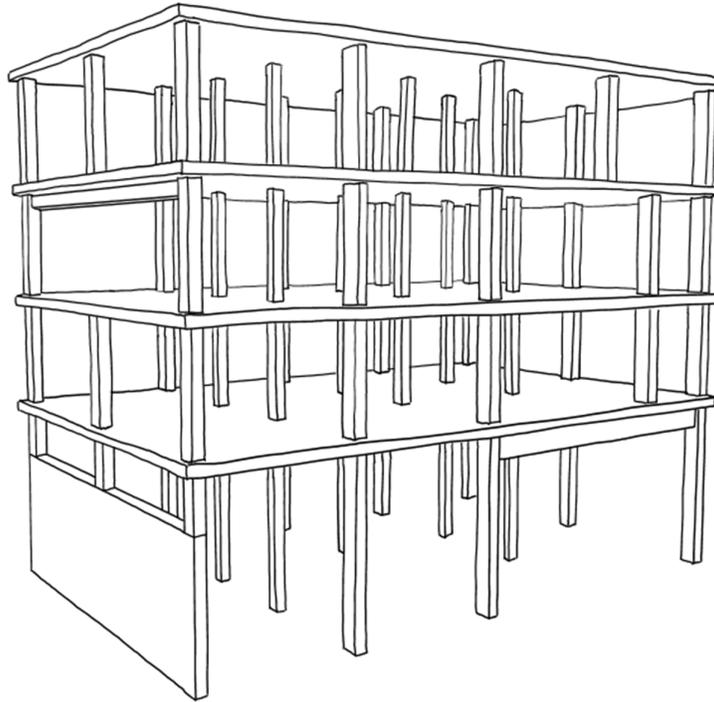


Figura 30. Pórticos irregulares de hormigón.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

- RC3.3. Pórticos de hormigón con jácenas planas y forjados unidireccionales

Los elementos estructurales de estos pórticos consisten en pilares de hormigón armado, jácenas planas (del mismo espesor que el forjado) y nudos rígidos (Figura 31 y Figura 32). Las conexiones viga-pilar tienen una capacidad de resistencia a momento escasa. Por lo general, la estructura está oculta del exterior por muros no estructurales, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo o paneles de hormigón prefabricado).

Los forjados de hormigón armado transfieren las cargas de inercia horizontal a los pórticos. Debido a la escasa rigidez de los pórticos puede resultar en grandes derivas entre pisos, que pueden conducir a daños no estructurales relativamente elevados.

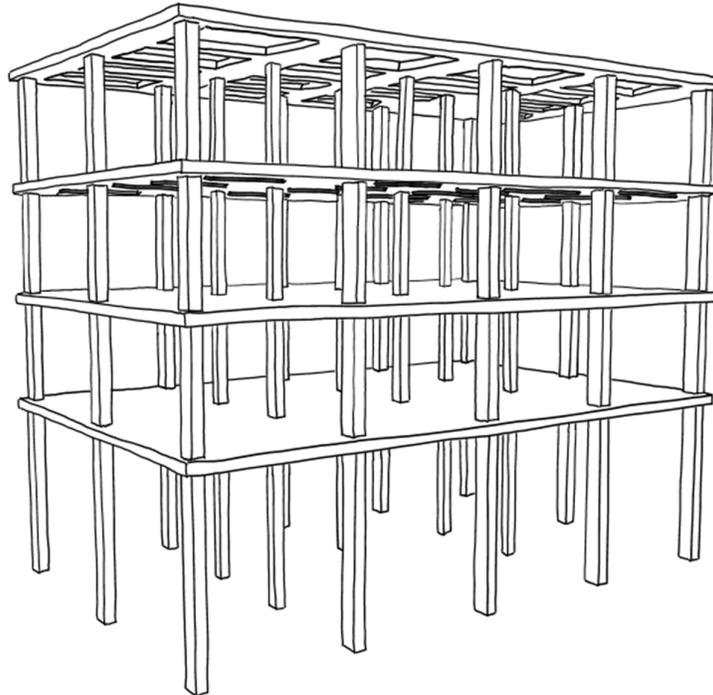


Figura 31. Jácenas planas y forjados unidireccionales.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 32. Ejemplo de edificio de jácenas planas y forjados unidireccionales.

Fuente: <https://www.prefabricatspujol.com/es/productos/edificacion-y-forjados/>

- RC3.4. Losas (aligeradas o macizas) sobre pilares de hormigón

Los elementos estructurales horizontales son losas planas, que pueden ser macizas o aligeradas sobre pilares de hormigón (Figura 33 y Figura 34). Las conexiones losa-pilar tienen una capacidad de resistencia a momento escasa. Por lo general, la estructura está oculta del exterior por muros no estructurales, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo o paneles de hormigón prefabricado).

Los forjados de hormigón armado transfieren las cargas de inercia horizontal a los pilares. Debido a la escasa rigidez del conjunto, puede resultar en grandes derivas entre pisos que pueden conducir a daños no estructurales relativamente elevados.

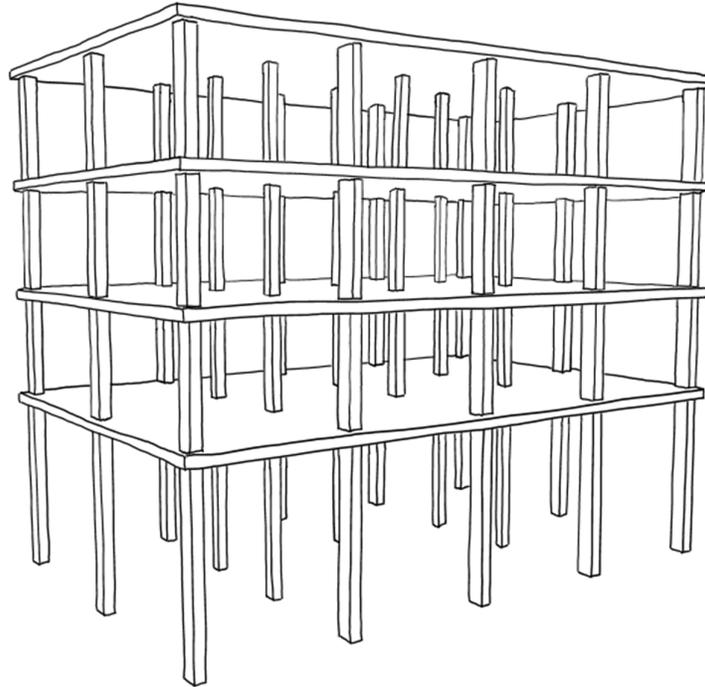


Figura 33. Losas planas sobre pilares.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 34. Losas planas sobre pilares.

Fuente: <https://gharpedia.com/wp-content/uploads/2019/02/RCC-Framed-Building-06-0202030035.jpg>

- RC4. Sistemas duales de hormigón armado (pórticos y muros de hormigón armado)

Estos edificios tienen sistemas estructurales compuestos por pórticos de hormigón armado y muros de cortante, también de hormigón armado (Figura 35 y Figura 36).

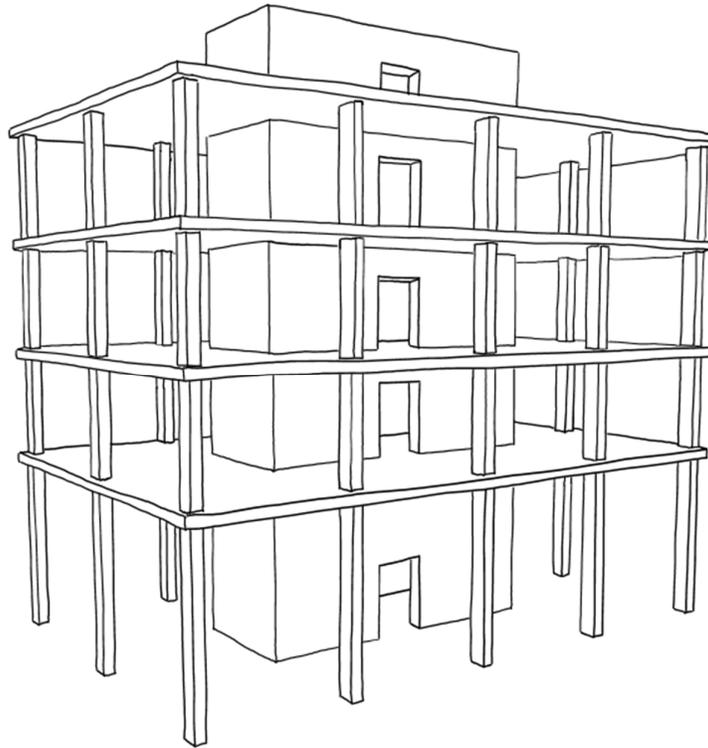


Figura 35. Sistemas duales de pórticos y muros.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 36. Ejemplo de sistemas duales de pórticos y muros.

Fuente: <https://tamaconecuador.com/2019/06/28/nuestro-sistema-estructural/>

- RC5. Muros prefabricados de hormigón con forjados prefabricados de hormigón

Estos edificios constan de muros de cortante de hormigón armado prefabricados y conectados por losas prefabricadas de HA (Figura 37). Los edificios más antiguos, a menudo, tienen conexiones inadecuadas para el anclaje de las paredes a las losas y, en general, las conexiones de los paneles prefabricados suelen ser frágiles (Figura 38). Las paredes pueden tener numerosas aberturas para puertas y ventanas, de tal tamaño que la pared se parezca más a un pórtico que a un muro de cortante.

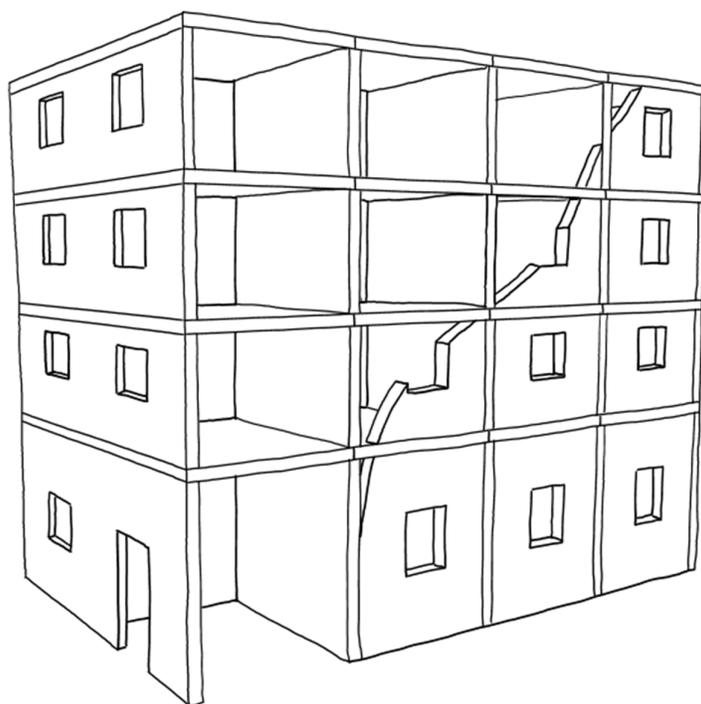


Figura 37. Muros y forjados prefabricados.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 38. Ejemplo de muros y forjados prefabricados.

Fuente: <https://concretocivil.com/precast-concrete-construction-process-advantages/>

- RC6. Pórticos prefabricados con muros de cortante de hormigón

Estos edificios tienen losas de hormigón armado típicamente compuestas de elementos prefabricados con o sin capa superior de hormigón in situ (Figura 39).

Las vigas y pilares de hormigón prefabricado sostienen los forjados. Las vigas se suelen apoyar en ménsulas que vuelan de los pilares, por lo que constituyen apoyos simples. Los pilares suelen estar empotrados en la cimentación y libres en cabeza. Los muros de cortante, hormigonados in situ, e incluso prefabricados, resisten cargas horizontales. Para que los edificios con pórticos prefabricados y muros de cortante hormigonados in situ funcionen bien, los detalles de armado utilizados para conectar los elementos estructurales deben tener suficiente resistencia y ductilidad; sin embargo, en algunos casos, los detalles de conexión entre los elementos prefabricados tienen una ductilidad insignificante.

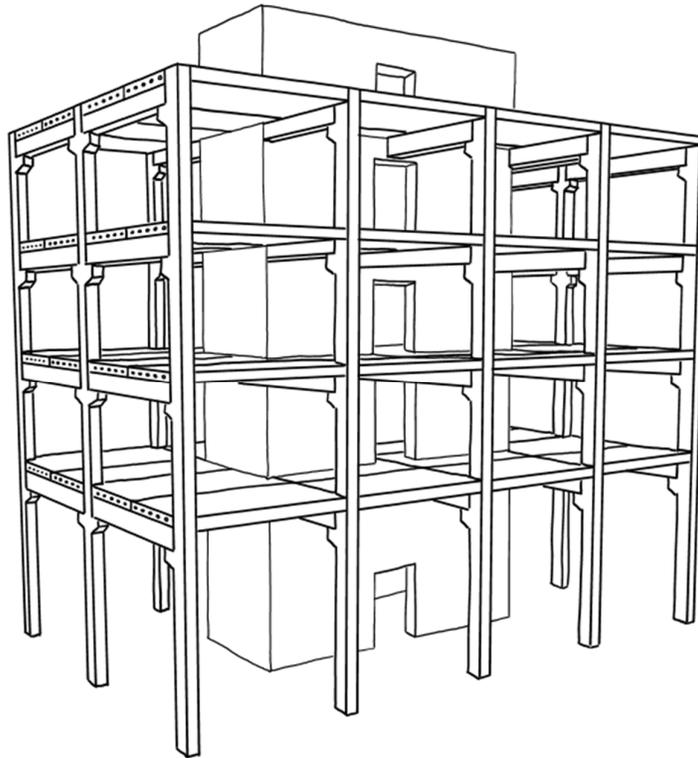


Figura 39. Pórticos prefabricados con muros de cortante.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

- RC7. Pórticos prefabricados sin nudos rígidos

Estos edificios tienen losas de hormigón armado típicamente compuestas de elementos prefabricados con o sin capa superior de hormigón in situ (Figura 40).

Las vigas y pilares de hormigón prefabricado sostienen los forjados. Las vigas se suelen apoyar en ménsulas que vuelan de los pilares (Figura 41), por lo que constituyen apoyos simples. Los pilares suelen estar empotrados en la cimentación y libres en cabeza. En algunos casos se dispone una armadura de conexión para evitar la desconexión del nudo, pero no hay ninguna restricción al giro. La ductilidad de este sistema es totalmente nula.

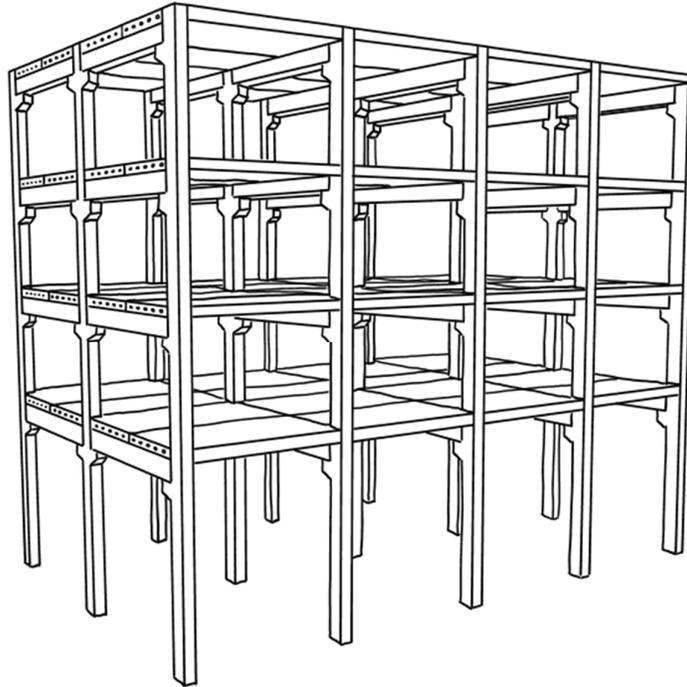


Figura 40. Pórticos prefabricados sin nudos rígidos.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 41. Ejemplo de estructura de pórticos prefabricados.

Fuente: [25100th-web_pilares_foto_05.jpg \(800x586\) \(tecnyconta.es\)](#)

2.1.3. Estructuras metálicas (S)

- S1. Pórticos de acero resistentes a momento

Los elementos estructurales de estos edificios consisten en pilares y vigas de acero que forman pórticos con nudos rígidos (Figura 42). En algunos casos, los nudos viga-pilar tienen una rigidez a momento pequeña, pero, en otros casos, los nudos son suficientemente rígidos para resistir momentos (Figura 43). Por lo general, la estructura está oculta por muros exteriores no estructurales, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, fábrica de ladrillo o paneles de hormigón prefabricado). Los diafragmas transfieren las cargas horizontales a los pórticos. Los pórticos desarrollan su rigidez mediante nudos de resistencia total o parcial.

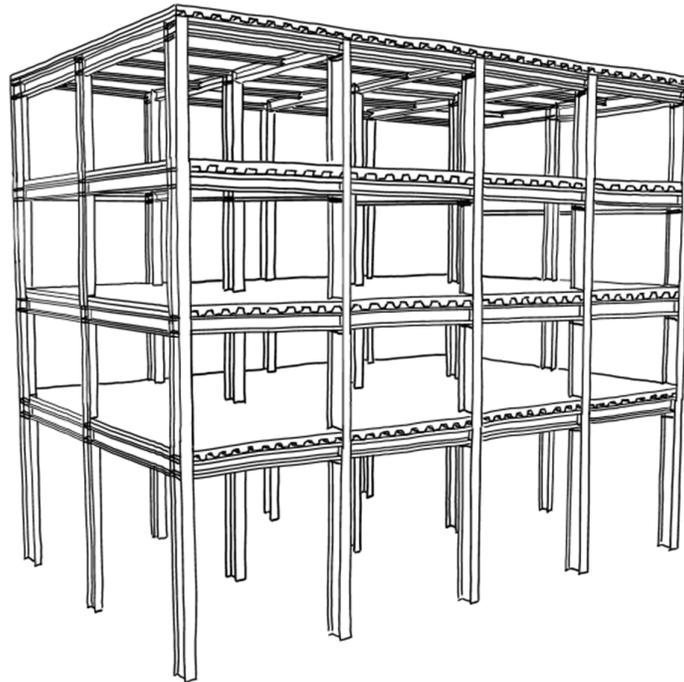


Figura 42. Pórticos de acero con nudos rígidos.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 43. Ejemplo de pórticos de acero con nudos rígidos.

Fuente: <https://www.e-zigurat.com/blog/es/revision-y-aplicacion-zona-panel-porticos-resistentes-momento-acero/>

- S2. Pórticos arriostrados de acero

Estos edificios son similares a los de acero con pórticos resistentes a momento, excepto que los componentes verticales del sistema de resistencia a fuerzas horizontales son pórticos reforzados con triangulaciones de barras de acero (Figura 44 y Figura 45).

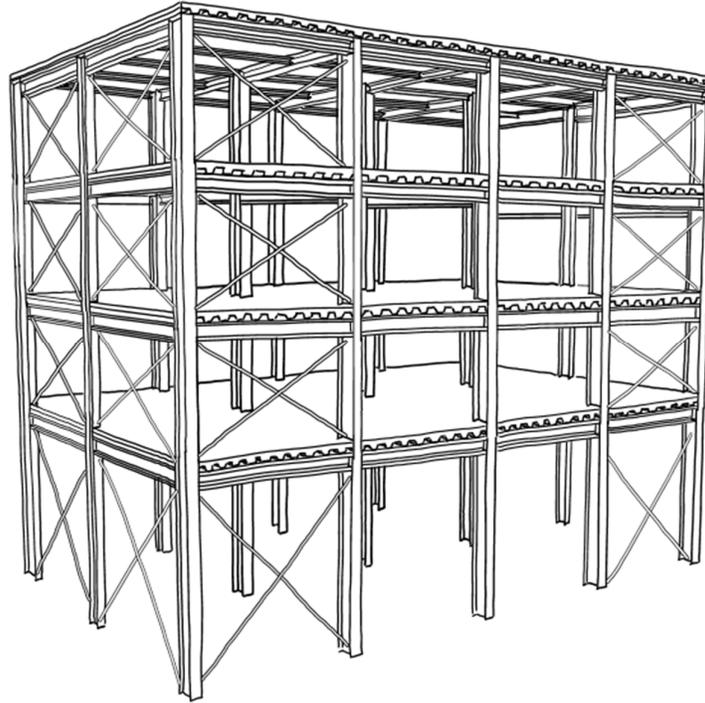


Figura 44. Pórticos arriostrados de acero.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 45. Ejemplo de estructura de acero con pórticos arriostrados.

Fuente: <https://slideplayer.com/slide/13875006/>

- S3. Pórticos de acero con relleno de fábrica sin armar

Las paredes de relleno generalmente están desplazadas de los elementos del pórtico exterior y presentan un exterior de fábrica suave ocultando el pórtico (Figura 46). Los paneles de fábrica con relleno sólido, cuando se acoplan completamente a los elementos del pórtico circundante, es decir, se encuentran en el mismo plano, pueden proporcionar rigidez y resistencia a las cargas horizontales.

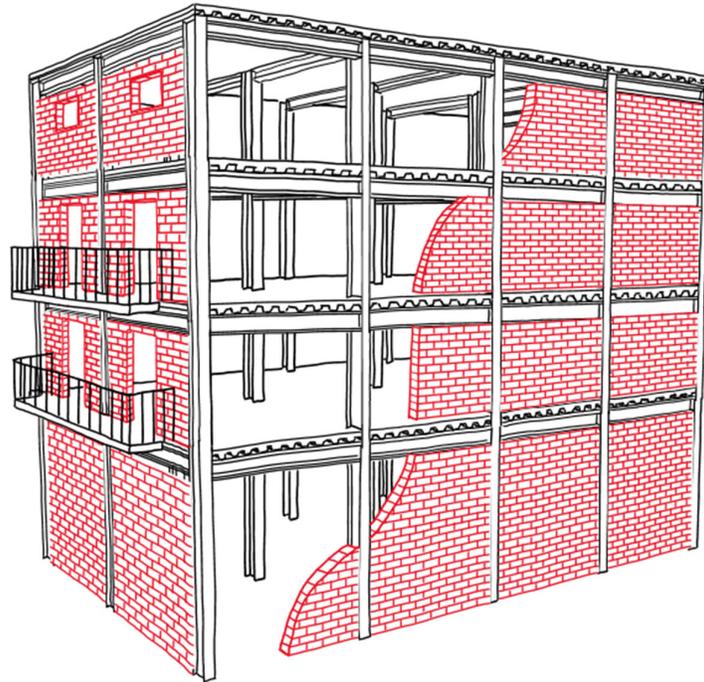


Figura 46. Pórticos de acero con rellenos de fábrica.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

- S4. Pórticos de acero con muros estructurales de hormigón

Los muros estructurales (de cortante) en estos edificios son muros de hormigón armado in situ. El pórtico de acero está diseñado para cargas verticales únicamente. El pórtico de acero puede proporcionar un sistema secundario de resistencia a las fuerzas horizontales dependiendo de su rigidez y de la de los nudos. En los sistemas "duales" modernos, los pórticos rígidos de acero están diseñados para trabajar juntamente con los muros de cortante de HA (Figura 47).

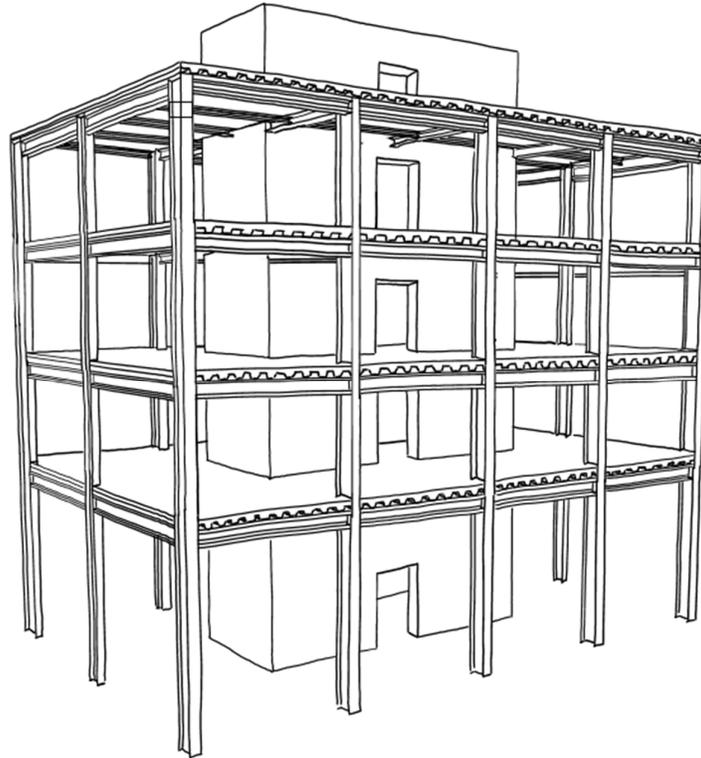


Figura 47. Pórticos de acero arriostrados con muros de hormigón.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

- S5. Pórticos de acero con cerchas o vigas celosía de luces grandes

El pórtico de acero suele estar diseñado para cargas verticales únicamente, porque suelen tener alturas reducidas. El pórtico de acero puede proporcionar un sistema secundario de resistencia a las fuerzas horizontales dependiendo de su rigidez y de la de los nudos. Si en lugar de cerchas, hay vigas celosía, en las que tanto el cordón superior como el inferior se unen a los pilares, la rigidez del nudo es mucho mayor (Figura 48 y Figura 49).

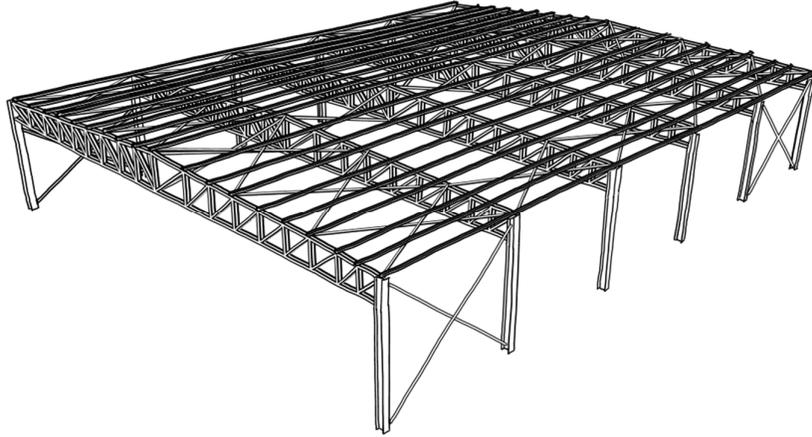


Figura 48. Pórticos de acero con vigas celosía.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

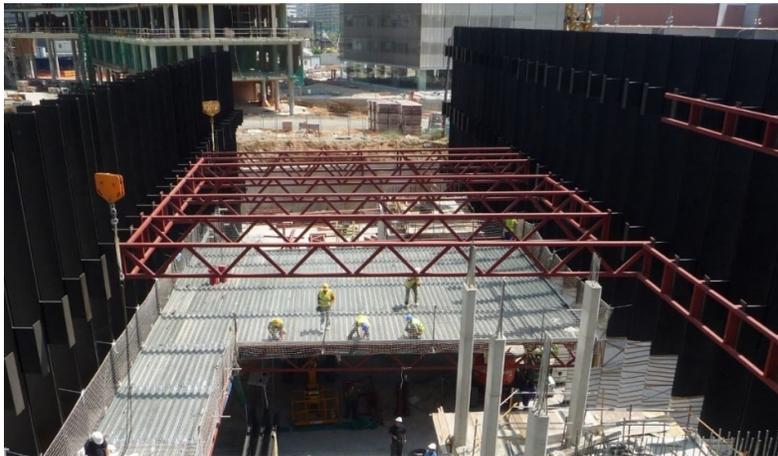


Figura 49. Ejemplo de pórticos de acero con vigas de celosía.

Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

2.1.4. Estructuras mixtas (X)

- X1. Sistemas mixtos de acero y HA.

Estos edificios tienen pórticos rígidos que consisten en pilares y vigas mixtos de acero y HA (Figura 50). Por lo general, la estructura está oculta del exterior por muros exteriores no estructurales, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo o paneles de hormigón prefabricado). Los diafragmas transfieren las cargas horizontales a los pórticos rígidos, que desarrollan su rigidez mediante nudos de resistencia total o parcial.

Las vigas mixtas suelen consistir en un perfil de acero (Figura 51) en la que se apoya la losa de hormigón (Figura 52), con unos conectores soldados a la viga, que garantizan el comportamiento mixto de los dos elementos.

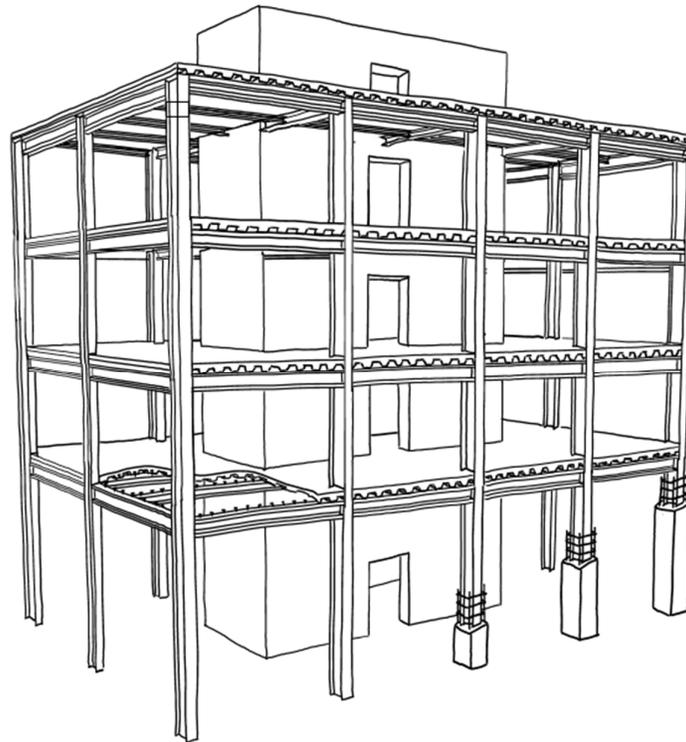


Figura 50. Sistemas mixtos de acero y hormigón.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 51. Ejemplo de viga mixta antes de colocar las placas de hormigón. Se pueden observar los conectores para la unión con la capa de hormigón.

Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)



Figura 52. Ejemplo de viga mixta después de colocar las placas de hormigón a falta de colocar una capa de hormigón in situ.

Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

- X2. Sistemas mixtos de pilares de fábrica con jácenas de acero en planta baja y muros de fábrica en pisos.

Estos edificios tienen vigas metálicas de apeo de los muros de los pisos y se apoyan sobre pilares de fábrica de ladrillo o de hormigón armado (Figura 53). Por lo general, la estructura suele estar oculta por cielorrasos. Los nudos son articulados, simplemente apoyados en los soportes, por lo que no hay ninguna restricción al giro. La ductilidad de este sistema es totalmente nula.

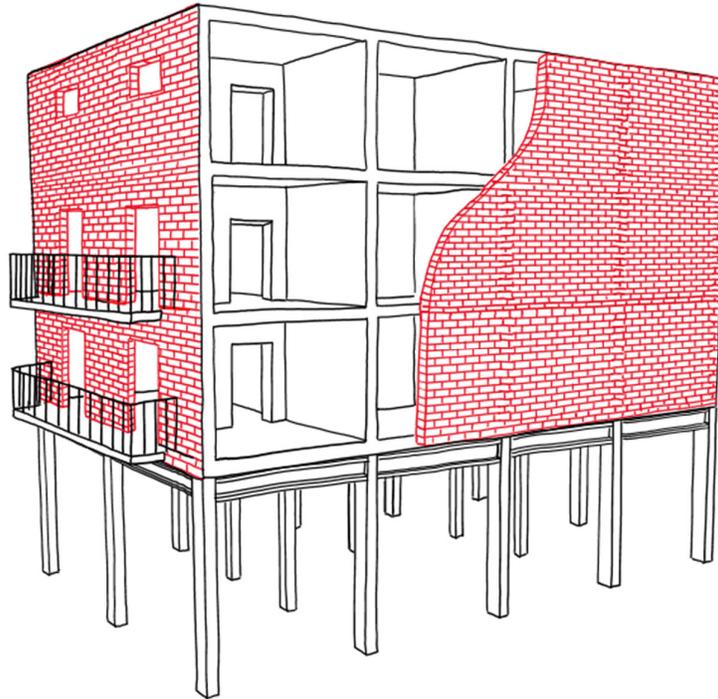


Figura 53. Pórticos isostáticos en planta baja y muros en pisos.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

- X3. Sistemas mixtos de pilares de acero y forjados planos de HA.

Los elementos estructurales de este tipo consisten en pilares de acero y forjados planos de hormigón armado, que son losas macizas o aligeradas. Los pilares suelen tener rigideces menores que los de hormigón y las conexiones viga-pilar tienen una capacidad de resistencia a momento escasa. Por lo general, la estructura está oculta del exterior por muros no estructurales, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo o paneles de hormigón prefabricado).

Los forjados de hormigón armado transfieren las cargas de inercia horizontal a los pilares. Debido a la escasa rigidez de los nudos puede resultar en grandes derivas entre pisos que pueden conducir a daños no estructurales relativamente elevados.

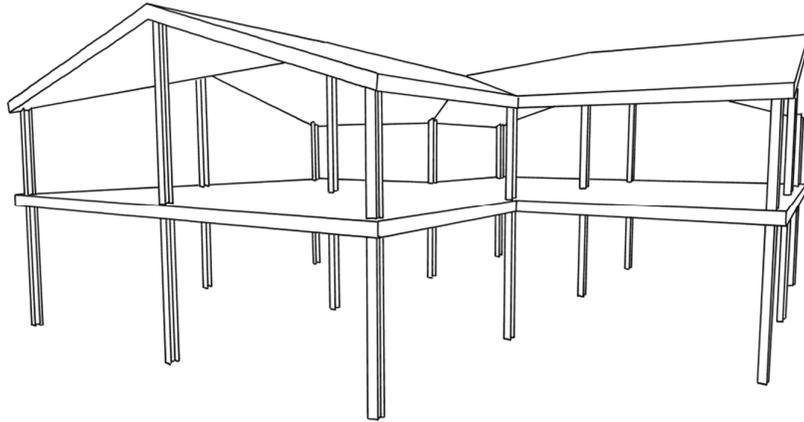


Figura 54. Pilares metálicos y forjados planos de hormigón.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)

2.1.5. Estructuras de madera (W)

- W. Estructuras de madera

Por lo general, se trata de edificios unifamiliares o pequeños edificios plurifamiliares. El sistema de resistencia a las fuerzas horizontales se realiza mediante pórticos de madera arriostrados (Figura 55 y Figura 56) o láminas de contrachapado de madera, entre otras soluciones. Las cargas son ligeras y las luces pequeñas. Estos edificios pueden tener chimeneas de fábrica relativamente pesadas y pueden estar parcial o totalmente cubiertos con tejados de obra de fábrica. Los suelos de madera que pueden revestirse con madera aserrada, contrachapado o láminas de fibra de madera. Las paredes de madera están cubiertas con tableros, estuco, yeso, madera contrachapada, tablero de yeso, tablero de partículas o tablero de fibra.

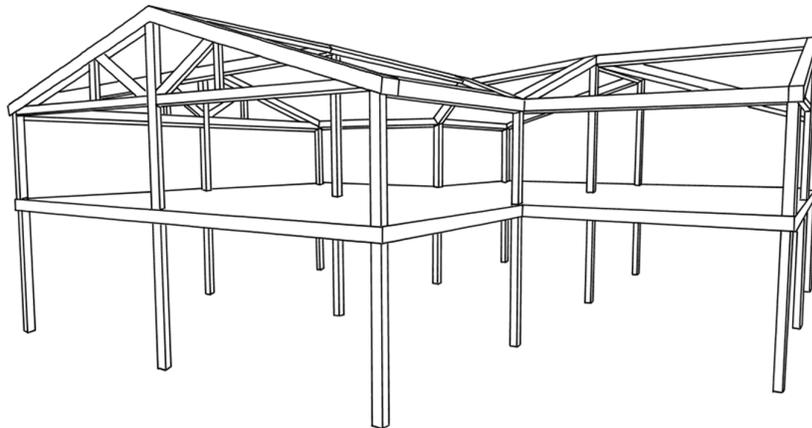


Figura 55. Estructura de madera con barras.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 56. Ejemplo de estructura con barras de madera.

Fuente: www.seyseysha.com

Recientemente ha aparecido un nuevo tipo de estructuras de madera de varios pisos (Figura 57 y Figura 58), que están constituidas por láminas contrachapadas tanto para los muros como para los forjados. En estos casos las uniones entre láminas son críticas para la estabilidad global de la estructura.

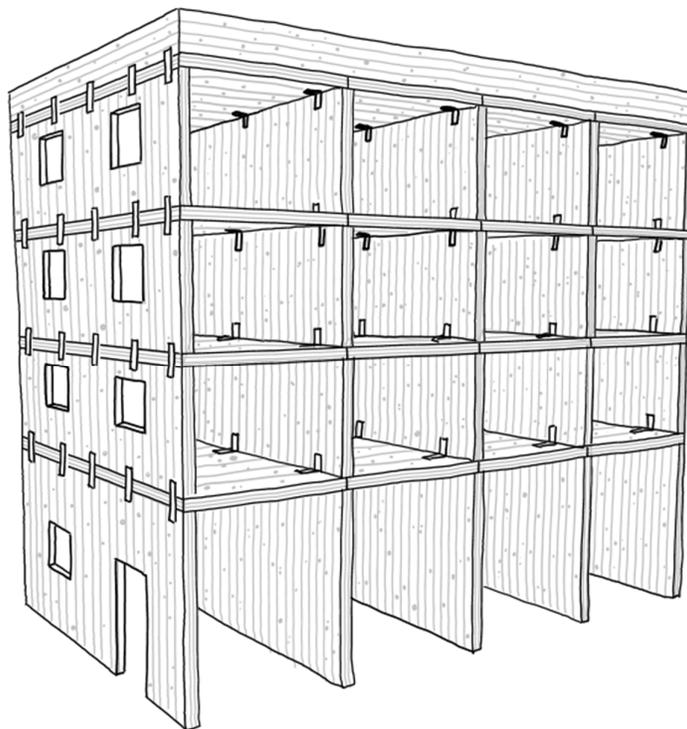


Figura 57. Estructura con láminas de madera.

Fuente: [BIS structures \(ACE\)](#)



Figura 58. Ejemplo de estructura con láminas de madera.

Fuente: [Blázquez-Guanter \(ACE\)](#)

3. EQUIVALENCIAS DE LA BTM POCRISC CON OTRAS

En las primeras columnas de la Tabla 12 se muestran las principales características de las 30 tipologías de la matriz tipológica de edificios del proyecto POCRISC: tipología general a la que pertenece, código de tipología, rango de altura, número de plantas y altura en metros. A continuación, se propone un rango de índices de vulnerabilidad (mínimo, más probable y máximo) asociados a cada tipología. En las siguientes columnas de dicha tabla se muestra la correspondencia de cada una con las tipologías definidas en el proyecto Risk-UE: códigos, alturas e índices de vulnerabilidad, así como la correspondencia con las clases de vulnerabilidad de las escalas EMS-98 y MSK.

Tabla 12. Matriz Tipológica de Edificios (BTM) de la zona POCRISC y equivalencias con Risk-UE, EMS-98 y MSK

TIPOLOGÍA GENERAL	TIPOLOGÍA POCRISC							TIPOLOGÍA Risk-UE					NIVEL 0 (LM0)	
								Código	NIVEL 2 (LM2)			NIVEL1 (LM1)		
	Código	Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	Iv_{min}	Iv^*	Iv_{max}		Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	$Iv_{min} - Iv^* - Iv_{max}$	EMS-98	MSK
MAMPOSTERÍA	M1.0(*)	Baja	1-2	$h \leq 6$	0.7	0.9	1.02	-	-	-	-	-	A	A
	M1.1	Baja	1-2	$h \leq 6$	0.62	0.873	1.02	M1.1	Baja	1-2	$h \leq 6$	$0.62 - 0.873 - 1.02$	B	B
		Media	3-5	$6 < h \leq 15$					Media	3-5	$6 < h \leq 15$			
	M1.2	Baja	1-2	$h \leq 6$	0.46	0.74	1.02	M1.2	Baja	1-2	$h \leq 6$	$0.46 - 0.74 - 1.02$	B	B
		Media	3-5	$6 < h \leq 15$					Media	3-5	$6 < h \leq 15$			
	M1.3	Alta	6+	$h > 15$	0.30	0.616	0.86	M1.3	Alta	6+	$h > 15$	$0.30 - 0.616 - 0.86$	C	B
		Baja	1-2	$h \leq 6$					Media	3-5	$6 < h \leq 15$			
	M2	Media	3-5	$6 < h \leq 15$	0.62	0.84	1.02	M2	Alta	6+	$h > 15$	$0.62 - 0.84 - 1.02$	A	A
		Baja	1-2	$h \leq 6$					Baja	1-2	$h \leq 6$			
	M3.1	Baja	1-2	$h \leq 6$	0.46	0.74	1.02	M3.1	Baja	1-2	$h \leq 6$	$0.46 - 0.74 - 1.02$	C	B
		Media	3-5	$6 < h \leq 15$					Media	3-5	$6 < h \leq 15$			
	M3.2	Alta	6+	$h > 15$	0.46	0.776	1.02	M3.2	Alta	6+	$h > 15$	$0.46 - 0.776 - 1.02$	C	B
		Baja	1-2	$h \leq 6$					Baja	1-2	$h \leq 6$			
	M3.3	Media	3-5	$6 < h \leq 15$	0.46	0.704	1.02	M3.3	Media	3-5	$6 < h \leq 15$	$0.46 - 0.704 - 1.02$	C	B
		Alta	6+	$h > 15$					Alta	6+	$h > 15$			
	M3.4	Baja	1-2	$h \leq 6$	0.30	0.616	0.86	M3.4	Baja	1-2	$h \leq 6$	$0.30 - 0.616 - 0.86$	C	B
Media		3-5	$6 < h \leq 15$	Media					3-5	$6 < h \leq 15$				
M4	Alta	6+	$h > 15$	0.14	0.451	0.70	M4	Alta	6+	$h > 15$	$0.14 - 0.451 - 0.70$	D	B	
	Baja	1-2	$h \leq 6$					Baja	1-2	$h \leq 6$				
	Media	3-5	$6 < h \leq 15$					Media	3-5	$6 < h \leq 15$				

TIPOLOGÍA GENERAL	TIPOLOGÍA POCRISC							TIPOLOGÍA Risk-UE					NIVEL 0 (LM0)	
								Código	NIVEL 2 (LM2)			NIVEL 1 (LM1)		
	Código	Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	Iv_{min}	Iv^*	Iv_{max}		Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	$Iv_{min} - Iv^* - Iv_{max}$	EMS-98	MSK
	M5	Baja	1-2	$h \leq 6$	0.30	0.694	1.02	M5	Baja	1-2	$h \leq 6$	0.30 - 0.694 - 1.02	D	B
		Media	3-5	$6 < h \leq 15$					Media	3-5	$6 < h \leq 15$			
		Alta	6+	$h > 15$					Alta	6+	$h > 15$			
		HORMIGÓN ARMADO	RC1	Baja	1-3	$h \leq 9$	0.02	0.442	1.02	RC1	Baja	1-3	$h \leq 9$	0.02 - 0.442 - 1.02
Media	4-7		$9 < h \leq 21$	Media	4-7	$9 < h \leq 21$								
RC2	Alta		8+	$h > 21$	0.02	0.386	0.86	RC2	Baja	1-3	$h \leq 9$	0.02 - 0.386 - 0.86	D	C
	Media		4-7	$9 < h \leq 21$				Media	4-7	$9 < h \leq 21$				
RC3.1	Alta		8+	$h > 21$	0.02	0.402	0.98	RC3.1	Baja	1-3	$h \leq 9$	0.02 - 0.402 - 0.98	D	C
	Media		4-7	$9 < h \leq 21$				Media	4-7	$9 < h \leq 21$				
RC3.2	Alta		8+	$h > 21$	0.06	0.522	1.02	RC3.2	Baja	1-3	$h \leq 9$	0.06 - 0.522 - 1.02	C	C
	Media		4-7	$9 < h \leq 21$				Media	4-7	$9 < h \leq 21$				
RC3.3 (*)	Baja		1-3	$h \leq 9$	0.30	0.60	1.02				-	C	C	
	Media		4-7	$9 < h \leq 21$										
RC3.4 (*)	Alta		1-3	$h \leq 9$	0.20	0.57	1.02				-	C	C	
	Media		4-7	$9 < h \leq 21$										
RC4	Alta		8+	$h > 21$	0.02	0.386	0.86	RC4	Baja	1-3	$h \leq 9$	0.02 - 0.386 - 0.86	D	C
	Media		4-7	$9 < h \leq 21$				Media	4-7	$9 < h \leq 21$				
RC5	Alta	8+	$h > 21$	0.14	0.384	0.70	RC5	Baja	1-3	$h \leq 9$	0.14 - 0.384 - 0.70	C	C	
	Media	4-7	$9 < h \leq 21$				Media	4-7	$9 < h \leq 21$					
		Baja	1-3	$h \leq 9$	0.30	0.544	0.86	RC6	Baja	1-3	$h \leq 9$			

TIPOLOGÍA GENERAL	TIPOLOGÍA POCRISC							TIPOLOGÍA Risk-UE					NIVEL 0 (LM0)	
								Código	NIVEL 2 (LM2)			NIVEL 1 (LM1)		
	Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	$Iv_{min} - Iv^* - Iv_{max}$										
	Código	Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	Iv_{min}	Iv^*	Iv_{max}							
RC6	Media	4-7	9 < h ≤ 21				Media	4-7	9 < h ≤ 21	0.30 - 0.544 - 0.86	C	C		
RC7 (*)	Baja	1-2	h ≤ 6	0.60	0.80	1.02	Alta	8+	h > 21		B	C		
	Media	3-5	6 < h ≤ 15							-				
ACERO	S1	Baja	1-3	h ≤ 9	-0.02	0.363	0.86	S1	Baja	1-3	h ≤ 9	-0.02 - 0.363 - 0.86	E	C
		Media	4-7	9 < h ≤ 21					Media	4-7	9 < h ≤ 21			
		Alta	8+	h > 21					Alta	8+	h > 21			
	S2	Baja	1-3	h ≤ 9	-0.02	0.287	0.70	S2	Baja	1-3	h ≤ 9	-0.02 - 0.287 - 0.70	E	C
		Media	4-7	9 < h ≤ 21					Media	4-7	9 < h ≤ 21			
	Alta	8+	h > 21					Alta	8+	h > 21				
S3	Baja	1-3	h ≤ 9	0.14	0.484	0.86	S3	Baja	1-3	h ≤ 9	0.14 - 0.484 - 0.86	D	C	
	Media	4-7	9 < h ≤ 21					Media	4-7	9 < h ≤ 21				
	Alta	8+	h > 21					Alta	8+	h > 21				
S4	Baja	1-3	h ≤ 9	-0.02	0.224	0.54	S4	Baja	1-3	h ≤ 9	-0.02 - 0.224 - 0.54	E	C	
	Media	4-7	9 < h ≤ 21					Media	4-7	9 < h ≤ 21				
	Alta	8+	h > 21					Alta	8+	h > 21				
S5 (**)	Baja	1-2	h ≤ 6	0.10	0.400	1.02	S5	Baja	1-2	h ≤ 6	-0.02 - 0.402 - 1.02	D	C	
	Media	3-5	6 < h ≤ 15					Media	3-5	6 < h ≤ 15				
MIXTA: ACERO- HORMIGÓN	X1 (*)	Baja	1-3	h ≤ 9	0.01	0.40	1.02	-			-	D	C	
		Media	4-7	9 < h ≤ 21				-						
		Alta	8+	h > 21				-						
X2 (*)	Baja	1-3	h ≤ 9	0.60	0.80	1.02	-			-	B	C		
	Media	4-7	9 < h ≤ 21				-							
	Alta	8+	h > 21				-							
X3 (*)	Baja	1-3	h ≤ 9	0.35	0.65	1.02	-			-	C	C		
	Media	4-7	9 < h ≤ 21				-							
	Alta	8+	h > 21				-							

TIPOLOGÍA GENERAL	TIPOLOGÍA POCRISC							TIPOLOGÍA Risk-UE				NIVEL 0 (LM0)		
	Código	Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	Iv_{min}	Iv^*	Iv_{max}	Código	NIVEL 2 (LM2)		NIVEL1 (LM1)			EMS-98
									Altura	Nº de plantas	Altura h (m)	$Iv_{min} - Iv^* - Iv_{max}$		
MADERA	W	Baja	1-2	$h \leq 5.5$	0.14	0.447	0.86	W	Baja	1-2	$h \leq 5.5$	0.14 - 0.447 - 0.86	D	B
		Media	3+	$h > 5.5$					Media	3+	$h > 5.5$			

(*) Tipologías no existentes en la BTM de Risk-UE

(**) Tipología con el mismo código que Risk-UE, pero con diferencias estructurales

Iv^* índice de vulnerabilidad más probable

$[Iv_{min}; Iv_{max}]$ límites inferior y superior de los índices de vulnerabilidad que se consideran posibles

4. CONCLUSION

Este informe describe la matriz de tipologías constructivas de edificios (Building Typology Matrix, BTM) del proyecto POCRISC. Esta matriz es un compendio de las tipologías que se consideran representativas de la zona de estudio de dicho proyecto, que abarca la región transfronteriza del Pirineo entre España, Andorra y Francia. Cada una de estas clases de tipologías agrupa edificios con sistemas estructurales y características de comportamiento similares frente a demandas potenciales asociadas a movimientos sísmicos.

La BTM del proyecto POCRISC está formada por 30 tipologías, definidas mediante juicio de experto, tomando como referencia las tipologías identificadas en el marco del proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). Las tipologías se identifican con un código que también sigue la nomenclatura del proyecto Risk-UE, siempre que exista una concordancia entre ambas. No obstante, la tipología de estructura de acero (código S5), aquí descrita, presenta algunas diferencias respecto a la correspondiente del mismo código en Risk-UE. Por otro lado, ha sido necesario definir seis nuevas tipologías, que no aparecen en la matriz tipológica de Risk-UE, para representar edificios identificados en la zona POCRISC. Tres de estas son estructuras de hormigón armado con baja o ninguna ductilidad (RC3.3., RC3.4 y RC7) y otras tres de tipo mixta de acero y hormigón (X1, X2 y X3).

Además del código y descripción de cada una de estas tipologías se proporciona su altura (tipo o rango, número de plantas y altura en metros) y se propone un rango de índices de vulnerabilidad (mínimo, más probable y máximo). Como información gráfica, se aportan fotografías de edificios representativos, y también dibujos o ilustraciones realizados de cada tipología. Sin duda estas ilustraciones proporcionan una información estructural de forma mucho más clara y rápida para cada una de las tipologías de la BTM de POCRISC, lo que supone un valor añadido frente a otras matrices tipológicas, que cabe destacar.

Por último, se ha realizado una tabla de equivalencias de cada tipología de la BTM de POCRISC con las definidas en el proyecto Risk-UE, y su correspondencia con las clases de vulnerabilidad de las escalas EMS-98 y MSK. Esta información puede resultar muy útil para aplicarla directamente en la evaluación de la vulnerabilidad de los edificios localizados en la región estudiada en POCRISC, en la validación de las distribuciones estadísticas de clases de vulnerabilidad ya existentes y en el desarrollo de las nuevas que se desarrollen.

Sin duda se trata de una matriz tipológica de edificios que permitirá un análisis y evaluación de la vulnerabilidad de sus edificios de forma más específica y detallada. Esta información es imprescindible para la posterior determinación del daño y riesgo sísmico y para la elaboración de planes de mitigación de las catástrofes producidas por terremotos.

Este informe se considera un documento transversal que debe acompañar y servir de apoyo a otros informes del proyecto POCRISC. Concretamente, la información contenida en él está directamente relacionada con la base de datos de vulnerabilidad para la zona de estudio del proyecto POCRISC (Lantada et al. 2021), desarrollada en la acción 3, y con la guía de evaluación de la vulnerabilidad (Pujades et al. 2021) y la guía de reducción de la vulnerabilidad (Meza et al. 2021), desarrolladas en la acción 4 del proyecto.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Auclair, S., Goula, X., Jara, J. A., and Colom, Y. (2015). Feasibility and interest in earthquake early warning systems for areas of moderate seismicity: Case study for the Pyrenees. *Pure and Applied Geophysics*, 172(9), 2449-2465.
- Allen, D. E., and Rainer, J. H. (1995). Guidelines for the seismic evaluation of existing buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(3), 500-505.
- ATC-13 (1985). *Earthquake damage evaluation data for California. Applied Technology Council, Redwood City, California*. California, 492 pp.
- Barbat, A. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*. Calidad Siderúrgica S.R.L. Cuadernos técnicos 3, Madrid. 248 pp.
- Barbat, A. H., Carreño, M. L., Pujades, L. G., Lantada, N., Cardona, O. D., and Marulanda, M. C. (2010). Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 17-38.
- Benedetti, D and Petrini, V (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione. A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings. *L'industria delle Costruzioni* 19: 66-74.
- Díaz-Gómez C., Cornadó C. y S. Vima (2015). *El uso del hormigón armado en los sistemas estructurales de los edificios residenciales modernos del Área Metropolitana de Barcelona*. IX Congreso Nacional y I Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción. pp. 531-540 Volume: I. October 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3719.4328> (acceso: 6/8/2021).
- Faccioli, E. (2006). Seismic hazard assessment for derivation of earthquake scenarios in Risk-UE. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 341-364.
- FEMA 366 (2001). HAZUS® 99 Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States. Edited and published by Federal Emergency Management Agency (FEMA) under a cooperative agreement with the National Institute of Building Sciences (NIBS). Washington D.C.
- FEMA (2003). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH MR4*. Edited and published by Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS). Washington D.C.
- FEMA (2020). Hazus earthquake model. Hazus 4.2 SP3 Technical manual. Edited and published by Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS). Washington D.C. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_hazus_earthquake_technical_manual_4-2.pdf (acceso: diciembre.2021).
- Giovinazzi S. (2005). The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. PhD Thesis of the doctoral course "Risk Management on the built environment" jointly organized by University of Florence (I) and TU-Braunschweig (D).

- Goula X., Dominique P., Colas B., Jara J.A., Roca A., and Winter T. (2008). Seismic rapid response system in the eastern Pyrenees. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998. EMS-98*. Conseil de L'Europe: Cahiers du centre de Geodynamique et de Seismologie.
- Irizarry J., Vendrell S., Lantada N., Pujades L y Goula X. (2013). *Riesgo sísmico de los edificios de vivienda del municipio de Girona* Action 4.2. SISPYR. Sistema de Información Sísmica del Pirineo/ Système d'Information Sismique des Pyrénées. Programme opérationnel Interreg IVA.France-Espagne-Andorre 2007 – 2013.
- ISARD (2006), *Información Sísmica Automática Regional de Daños*, Interreg IIIA France Spain 2000 – 2006 programme.
- Lantada, N., Irizarry, J., Barbat, A. H., Goula, X., Roca, A., Susagna, T., and Pujades, L. G. (2010). Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bulletin of earthquake engineering*, 8(2), 201-229.
- Lantada N., Negolescu C., Mas R., y Irizarry J. (2021). Base de datos de vulnerabilidad para la zona de estudio del proyecto POCRISC. Reporte Acción 3. POCRISC
- Lagomarsino S. and Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull Earthquake Eng. Special Issue "The Risk-UE Project"* (4) 415-443. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>
- Lungu D., Aldea A., Arion A., and Vacareanu R., Petrescu F. and Cornea T. (2001). *WP01. European distinctive features, inventory database and typology* RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. December 2001
- Medvedev S.V. and Sponheuer W. (1969). Scale of seismic intensity. In *Proceedings of the 4th World Conference of Earthquake Engineering*, Santiago, Chile. A2, 143-153.
- Meza K, Blazquez A., Pujades L.G., González-Drigo R., y Lantada N. (2021). Guía para la reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios E4.2.3. Informe acción 4. POCRISC
- Milutinovic, Z. V., and Trendafiloski, G. S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings*. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No.EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.
- Mouroux, P. and Le Brun, B. (2008). RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns. In *Assessing and managing earthquake risk* (pp. 479-508). Springer, Dordrecht.
- Pujades L.G., González-Drigo R., Lantada N., Blazquez A. and Meza K. (2021). Guía para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica E4.2.1. Informe acción 4. POCRISC
- Risk-UE (2003). *An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns*. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage. CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014. Duration: 44 Months (15/01/2001-30/09/2004). Disponible en: www.risk-ue.net.

- Roullé A., Macau A., Figueras S., Monfort D., Lantada N., Susagna T. and Irizarry J. (2012). Performing seismic scenarios in the Luchon - Val d'Aran area, Central Pyrenees. In Proceedings of the *7th European Congress on REgional GEOscientific cartography and Information systems: 7th EUROGEO*, Jun 2012, Bologne, Italy. (pp. 12-15). Disponible en <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00682752>
- Roussillon P., Irizarry J., González M., Delmotte P. Sedan O., and Susagna T. (2006). Cross-border Seismic Risk Scenarios (Eastern Pyrenees). Proceedings of the *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland* (pp. 3-8)
- Safina, M. S. (2003). *Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones Esenciales*. Análisis y de su contribución al riesgo sísmico. Tesis doctoral de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona. ISBN: 8468815748. Disponible en <http://hdl.handle.net/10803/6226>
- SEAOC (1980). *Recommended lateral force requirements and Commentary*. Seismology Committee, Structural Engineering Association of California, San Francisco, California.
- SISPyR. (2013). Sistema de Información Sísmica del Pirineo. Proyecto europeo SISPyR, financiado por el programa POCTEFA 2007-2013. Available at: <http://www.sispyr.eu/>
- Wood, H. O. and Neumann, F. (1931). Modified Mercalli intensity scale of 1931. Bulletin of the Seismological Society of America, 21(4), 277-283.