

Refuerzo Sísmico de Edificios de Fábrica en la región de Groninga, Holanda

Seismic Upgrading of Unreinforced Masonry Buildings in the Groningen Region, the Netherlands

Patricio García^a, Alessandro Marasca^b, Timurhan Timur^c, Maurizio Teora^d,
Ronald Stoter^e, Kubilay Hıçılmaz^f, Enrique Gonzalez^g, Laura Alvarez^h

^aIngeniero de Caminos Canales y Puertos. Asociado. Arup

^bStructural Engineer. Owner. Hopper Engineering and Consultancy

^cStructural Engineer. Director Asociado. Arup

^dStructural Engineer. Director. Arup

^eRonald Stoter. Asociado. Arup

^fKubilay Hıçılmaz. Director. Arup.

^gIngeniero Técnica de Obras Públicas. Ingeniero de Estructuras. Arup

^hIngeniera Técnica de Obras Públicas. Ingeniera de Estructuras. Arup

RESUMEN

En la provincia holandesa de Groninga, la extracción de gas ha generado un efecto de sismicidad inducida. Dado que la gran mayoría de edificios en la zona son de fábrica, no preparados para resistir cargas sísmicas, el gobierno holandés está realizando un programa de evaluación de aproximadamente 20.000 edificios. Este artículo recoge las soluciones de refuerzo estructural obtenidas tras la evaluación de aproximadamente 150 edificios empleando el método del empuje incremental (pushover). Estas medidas incluyen el regruessado de hormigón y de FRM, el adosado de postes de madera, la inserción de entramados metálicos y refuerzo generalizado de uniones entre cubiertas, forjados y muros de fábrica.

ABSTRACT

In the Groningen province, in the Netherlands, the gas extraction has generated an induced seismicity phenomenon. Given that the majority of the buildings are made of unreinforced masonry, and were not designed to resist seismic loads, the Dutch government has created a programme to evaluate about 20.000 buildings. This paper shows the retrofitting measures designed after the evaluation of about 150 buildings, analysed under the pushover methodology. These retrofitting measures include RC coating, FRM, placement of adjacent timber posts, external steel frames, as well as generalized retrofitting of connections between floor, roofs and masonry walls.

PALABRAS CLAVE: sismo, refuerzo, muro, fábrica, espectro, pushover, sismicidad inducida.

KEYWORDS: seismic, retrofit, masonry walls, response spectrum, pushover, induced seismicity.

1. Introducción

En la provincia de Groninga, al norte de Holanda, se encuentra el mayor yacimiento de gas natural de Europa, décimo a nivel mundial,

que ha venido funcionando desde los años 60. La extracción continuada de gas, ha provocado un fenómeno de sismicidad inducida en una región donde los edificios no estaban concebidos para resistir este tipo de solicitaciones, siendo los edificios de fábrica los más vulnerables. Estos edificios de fábrica

suponen una amplia mayoría en la zona, especialmente entre los edificios residenciales e históricos, lo que ha provocado la creación de un plan regional para la evaluación y refuerzo a gran escala de unos 20.000 edificios. Esta comunicación recoge las conclusiones obtenidas de la evaluación y refuerzo conceptual de unos 150 edificios residenciales analizados mediante el método no-lineal del empuje incremental (Pushover), realizado dentro del marco de la normativa holandesa, que a su vez se mueve en el entorno de los Eurocódigos. Esta metodológica del empuje incremental permite la evaluación y refuerzo de muros de fábrica solicitados bajo esfuerzos en su plano (in-plane), y se combina para esfuerzos fuera de plano (out-of-plane) con el análisis cinemático no-lineal.

2. Tipologías de Edificios Evaluados y Materiales

Si bien el alcance del plan regional se ocupa de la totalidad de las edificaciones, este estudio de alrededor de 150 edificios se circunscribe a tres tipologías principales, viviendas adosadas, viviendas adosadas pareadas y viviendas unifamiliares, todas ellas correspondientes a la clase de riesgo CC1b recogida en Eurocódigos y asimilada por la normativa holandesa también.



Figure 1. Ejemplo de viviendas adosadas.

En estos tipos de viviendas, la estructura es generalmente de muros portantes de fábrica no armada, con forjados de madera o de hormigón armado, éstos últimos bastante más habituales en las viviendas adosadas, mientras que los de madera son más comunes en viviendas unifamiliares..

Los muros pueden ser dobles o simples, y son generalmente de ladrillo de arcilla, o bien de silicato cálcico, con resistencias estandarizadas según la norma holandesa dependiendo del año de construcción. Los muros en fachada, son generalmente dobles, con una hoja exterior no portante, una cavidad intermedia, con función aislante, y una hoja interior portante.



Figure 2. Ejemplo de vivienda adosada pareada.



Figure 3. Ejemplo de vivienda unifamiliar.

Las cubiertas, pueden tener diversas configuraciones, dos, tres o cuatro aguas, y se materializan generalmente mediante estructuras de madera, que puede incluir cerchas, vigas inclinadas y correas.

Tabla 1. Resistencia fábrica según NPR 9998

	Clay brickwork (pre 1945)	Clay brickwork (post 1945)	Calcium silicate brickwork (1960-present)	Calcium-silicate blocks/elements with thin layer joints (1985-present)
T_m [MPa] (compressive strength)	8.5	10.0	7.0	10.0
E_m [MPa] (Young's modulus)	5000	6000	3500	7500
G_m [MPa] (Shear modulus)	2000	2500	1450	3000
f_{0i} [MPa] (Initial bed joint shear strength)	0.3	0.4	0.25	0.6
f_b [MPa] (compressive strength of the brick)	22.0	33.0	29.0	33.0
w [kN/m ²]	19.5	19.5	18.5	18.5

3. Documentación Existente e Inspecciones

Como punto de partida de las evaluaciones sísmicas es necesario conocer la geometría y materiales de la estructura construida y recoger esta información en planos (“as-built”) y en modelos tridimensionales que permitan procesar digitalmente la información de forma ágil.

Para completar esta tarea, se realiza una recopilación de planos originales, algo que, en la mayoría de los casos, es posible encontrar en los archivos municipales locales.

Adicionalmente se realiza una extensa labor de inspecciones, que incluye la apertura de catas, la toma de fotografía y el escaneado tridimensional de edificios. Este escaneado tridimensional de los edificios es especialmente relevante, dado que para tratar de perturbar lo menos posible a los habitantes, las viviendas solo pueden visitarse una vez.

4. Mapas Sísmico

Los mapas sísmicos que se han empleado en el proyecto han ido modificándose a medida que ha avanzado el estudio de la sismicidad inducida por la extracción de gas en la zona. Este avance se ha ido reflejando en diferentes versiones de la normativa sísmica holandesa NPR 9998. En las evaluaciones y refuerzos diseñados en el marco de este estudio, se han considerado dos mapas sísmicos principales, el correspondiente a la versión 2015 de la norma NPR 9998, y el correspondiente a la versión 2018.

4.1. NPR 9998:2015

La versión 2015 recogía unas aceleraciones sísmicas en roca, en línea con las normativas habituales. Por tanto, estas aceleraciones en roca debían ser trasladadas a aceleraciones en superficie mediante coeficientes normalizados en base al tipo de terreno, o bien debía obtenerse mediante un análisis no lineal de la columna de

terreno (site response análisis – SRA). Para los edificios de este estudio se realizó siempre este estudio no lineal geotécnico por considerarse más preciso y por permitir en cierta medida la optimización de las acciones sísmicas.



Figura 1. Mapa sísmico (PGA) correspondiente a la normativa NPR 9998:2015.

4.2. NPR 9998:2018

Con la aparición de la normativa NPR 2018, se dispuso una aplicación on line (<http://seismischekrachten.nen.nl/>) que permite obtener las aceleraciones en superficie, si bien se dejaba abierta también la posibilidad de realizar un análisis no lineal de la columna del terreno. Lo que se realizó en el marco de este estudio, fue llevar a cabo el estudio no lineal cuando se contaba con datos del terreno, y directamente se empleó la herramienta on line cuando no se contaba con estos datos.

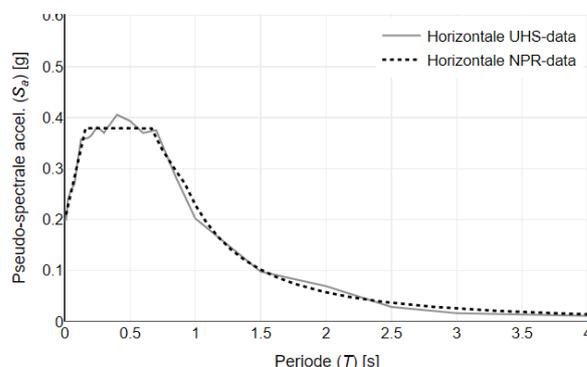


Figura 2 Espectro para la zona de Loppersum, zona de mayores aceleraciones, con la NPR 2018.

Como puede comprobarse, la nueva normativa, supuso una reducción significativa de las aceleraciones sísmicas a emplear.

5. Método de Análisis

En el marco global de la región de Groningen se han empleado dos metodologías fundamentales. Una basada en el análisis dinámico no lineal, y otra segunda, basada en el análisis mediante empuje incremental (pushover) combinado con el del análisis cinemático no lineal, que es en el que se centra este estudio.

El análisis mediante empuje incremental compete a la estimación de la capacidad de los muros de fábrica en su plano (in-plane). Mientras que el análisis cinemático no-lineal se ocupa de establecer la capacidad de los muros fuera de su plano (out-of-plane).

Adicionalmente, tras la realización del análisis de empuje incremental y del análisis cinemático no lineal, se completaba el estudio con una comprobación separada de las uniones entre muros y forjados y de las estructuras de madera de cubiertas.

5.1. Empuje incremental (Pushover)

Para el cálculo se realiza el modelo equivalente de barras habitualmente empleado en análisis no lineal de estructuras de fábrica. Separando los componentes de los muros en machones (piers), dinteles (spandres) y zonas rígidas en los encuentros. A partir de aquí se generan las barras y se distribuyen las rótulas no lineales (ver Figura 3).

Una vez generado el modelo de cálculo, se realiza el análisis no-lineal de empuje incremental (pushover), bajo condiciones de cargas gravitacionales constantes, mientras que las cargas horizontales se van incrementando gradualmente, generándose la curva de fuerza deformación.

Se realizan dos distribuciones de cargas laterales, una uniforme y otra modal, en cuatro

direcciones (X+, X-, Y+ e Y-), combinadas con cargas sin excentricidad y otras con una excentricidad +/- 5% con lo que se generan un total de 24 casos de carga. Para cada uno de estos 24 casos de cargas se compara la capacidad de la estructura en desplazamientos, con la demanda sísmica en desplazamientos.

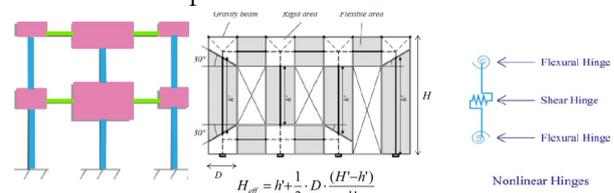


Figura 3. Modelo de barras equivalentes y modelización de rótulas.

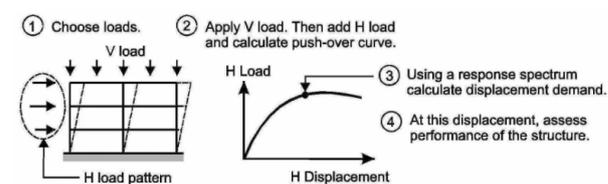


Figura 4 Método del empuje incremental (Pushover)

- Capacidad

Para el establecimiento de la capacidad de la estructura la normativa NPR indica que las comprobaciones deben realizarse para el estado límite NC (“near collapse”). Esto supone que se espera la estructura tendrá probablemente que ser reemplazada o profundamente reparada tras el evento sísmico considerado, pero se evitará el colapso de la misma.

El cálculo de la capacidad en deformaciones de la estructura bajo el empuje incremental, viene definido por las curvas no lineales que se definen tanto para las rótulas de cortante como para las rótulas de flexión indicadas en la Figura 3. La rama elástica de estas curvas viene dada por la rigidez equivalente de los machones de los muros, con un valor máximo correspondiente a los modos de fallo generalmente contemplados por la normativa internacional, mientras que la parte final de la rama plástica viene definida para el giro máximo permitido (drift máximo) en las rótulas, para cada uno de los modos de fallo.

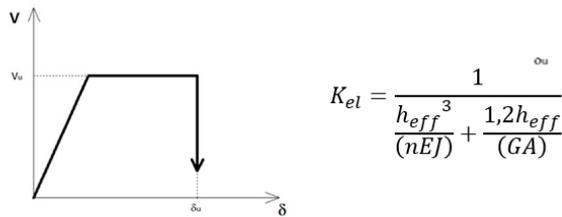


Figura 5. Curva no lineal y valor de la rigidez equivalente de los machones de muros.

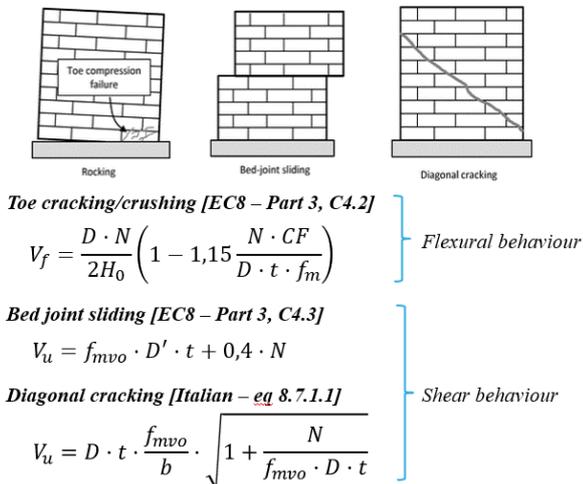


Figura 6 Modos de fallo elástico que marcan el fallo de la rama plástica.

Los valores máximos de las rotaciones (drift máximo) han sido fijados por la normativa. Con la NPR 9998:2015 se empleaban los valores de Eurocódigo, 0.53% en cortante y 1.00% en flexión. Con la llegada de la nueva norma NPR 9998:2018, los límites de rotaciones se establecen según lo indicado en el apéndice G. Lo que supone que son dependientes de la geometría y de la carga axial, haciendo que en general aumenten.

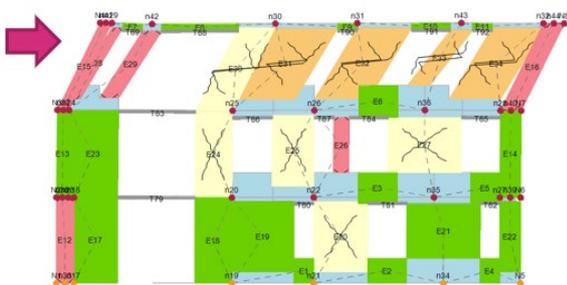


Figure 4. Muros de fábrica deformados en uno de los pasos del análisis pushover.

- Demanda

Para la evaluación de la demanda sísmica en deformación, la norma NPR 9998 establece el evento de 2475 años de periodo de retorno.

En la versión de **NPR 9998:2015** para calcular la demanda sísmica se seguía el método N2 en línea con el Eurocódigo 8.

Se establece la curva idealizada bilineal, y se considera que la curva se interrumpe cuando se produce una bajada el 20% de la capacidad (80% del cortante basal).

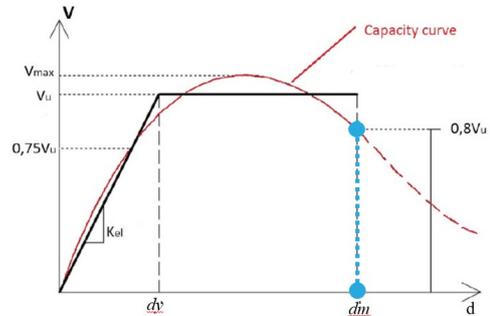
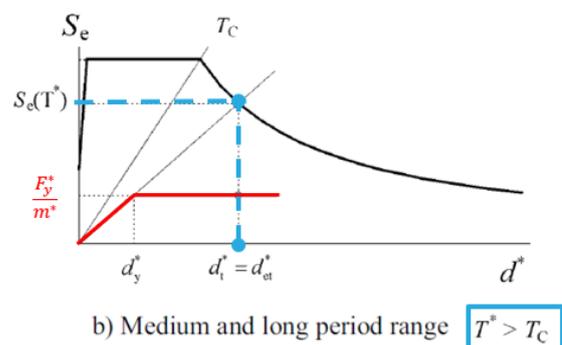
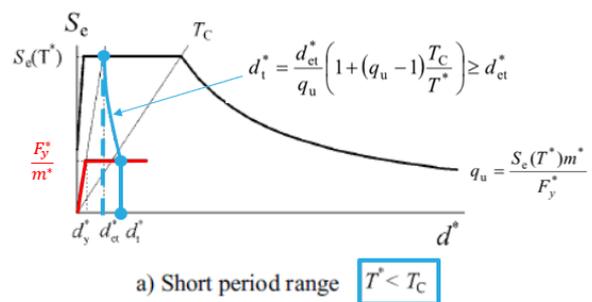


Figure 5. Curva bilineal.

A partir de aquí se establece el periodo del sistema multigrado y con este valor se establece la demanda empleando la curva del espectro.



En la versión de la **NPR-2018**, la curva de capacidad se interrumpe con una bajada del cortante basal del 50%. Adicionalmente se cambia el método de evaluar la demanda y ésta se establece mediante el método del espectro de capacidad. En este método, empleando la representación aceleración-desplazamiento del espectro, se busca el punto de demanda como la intersección entre la curva de capacidad de la

estructura y el espectro reducido por el amortiguamiento.

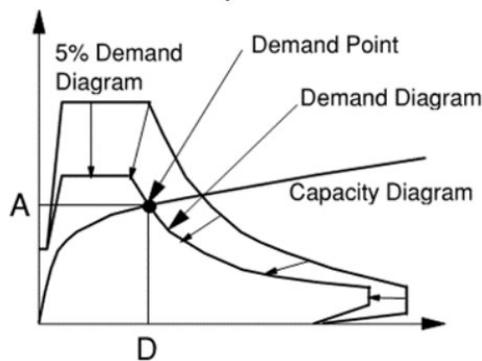


Figura 7 Espectro de capacidad (Chopra, 1999).

5.2. Análisis cinemático no-lineal

Un fallo habitual en muros de fábrica en zonas sísmicas es la pérdida de equilibrio de los muros cuando son excitados por fuerzas sísmicas perpendiculares a su plano, lo que suele llamarse fallo fuera de plano (out-of-plane).



Figure 6. Fallo fuera de plano motivado por la falta de comportamiento de diafragma de la cubierta, que no sujeta los muros en el plano perpendicular de los mismos.



Figure 7. Fallo de fábrica por flexión perpendicular a su plano.

El análisis cinemático no lineal supone primero la elección del tipo de fallo, flexión, volcamiento,

etc. Se calcula un multiplicador (α_0) que activa las fuerzas de inercia par ese fallo mediante el principio de los trabajos virtuales. Con la comprobación de distintos fallos, se define la curva de capacidad real, que luego se transforma en la curva de un sistema de un grado de libertad.

Posteriormente esta curva se compara con la demanda sísmica en deformaciones empleando el espectro aceleración-deformaciones.

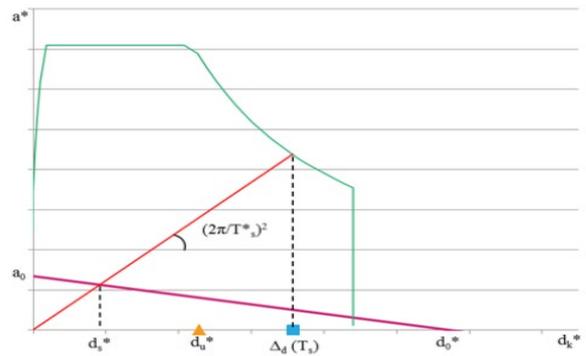


Figure 8. Capacidad frente a demanda.

5.3. Comprobación de uniones

Para la comprobación de las uniones entre forjados y muros de fábrica, se emplean como fuerzas actuantes de demanda el cortante obtenido del análisis de empuje incremental, y como axil de tracción, el correspondiente al tiro de la reacción del análisis cinemático no lineal.

Con estos valores de fuerzas de demanda sísmica en las uniones, se calcula de capacidad de las mismas empleando el documento ETAG029 que permite establecer el diagrama de interacción tracción-cortante de las uniones.

4.4. Análisis lineal de estructuras de cubierta

El análisis de las estructuras de madera de las cubiertas no es fácilmente compatible con los modelos generales de empuje incremental dada su gran diferencia de rigidez con los muros de fábrica. Con la idea de asegurar un comportamiento eminentemente elástico en estos entramados de madera, se comprueban

mediante métodos lineales convencionales empleando un valor de ductilidad de $q=1.5$.

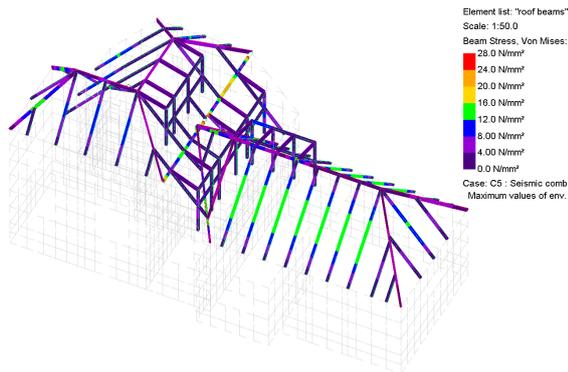


Figure 9. Ejemplo de modelo lineal realizado para los entramados de madera de las cubiertas.

6. Evaluación Sísmica y Soluciones de Refuerzo Estructural

6.1. Evaluación y restricciones

En las evaluaciones sísmicas realizadas, se comprobó que la mayoría de los edificios no cumplían con los requerimientos normativos y requerían ser reforzados.

A la hora de diseñar estos refuerzos se contaba con una serie de restricciones que debían tenerse en cuenta. Por un lado, era necesario no alterar sustancialmente el aspecto externo de los edificios, por lo que a ser posible debía no modificarse la fachada externa. Por otro lado, y como es lógico, debía tratar de limitarse el impacto interno sobre la vivienda.

6.2 Refuerzo de muros de fábrica

Los principales refuerzos dispuestos para los muros de fábrica fueron las siguientes:

- Anclajes.

Como medida de control de la hoja exterior no portante de los muros dobles de fachada, se dispone un número elevado de anclajes (entre 4 y 6 por metro cuadrado), que permiten solidarizar la hoja exterior no portante con la hoja interior portante.

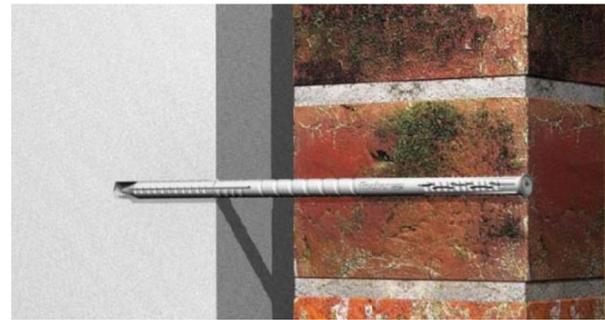


Figure 10. Esquema de anclajes empleados para conectar la hoja exterior no portante con la hoja interior portante de los muros de fábrica de fachada.

- Postes de madera

Este sencillo y económico sistema de refuerzo, consiste en disponer postes de madera adyacentes a los muros de fábrica cada cierta distancia. El sistema es muy efectivo para controlar los fallos por flexión fuera del plano del muro (out-of-plane), pero no tiene efecto para controlar los fallos en el plano (in-plane) de los muros.

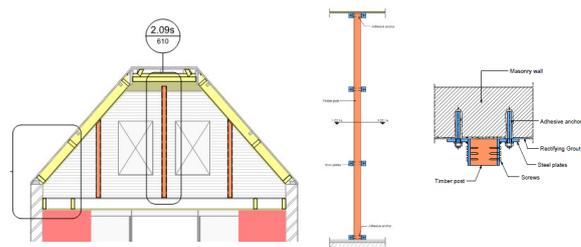


Figure 11. Colocación de postes de madera para control del fallo fuera de plano de los muros de fábrica.

- FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix, fibras de carbono en matriz cementicia)

Este sistema consiste en adherir a la fábrica una malla de fibra de carbono mediante un mortero que lo solidariza con ella. Este refuerzo aumenta la resistencia y la ductilidad de los muros de fábrica, aunque no tiene efecto significativo sobre la rigidez de los mismos.

Cuando se aplica en ambas caras de los muros permite controlar tanto el fallo fuera de plano, como el fallo en el plano del muro. Mientras que, colocado solo en una cara, controla el fallo en el plano del muro, pero no el de fuera de plano, por lo que debe combinarse con otras medidas como los postes de madera.

Con la aparición de la normativa NPR 9998:2018, las aceleraciones sísmicas se redujeron y se generó una herramienta on-line para la comprobación de la licuefacción en todo el territorio. Estos nuevos estudios y la disminución de las aceleraciones sísmicas permitieron reducir considerable el riesgo de licuefacción hasta hacerlo casi inexistente.

6.7. Chimeneas

Como es bien conocido en ingeniería sísmica, las chimeneas, como elemento esbelto y de fábrica, son potencialmente un riesgo importante al poder colapsar, dañando otras partes del edificio o suponiendo un riesgo de seguridad. En general, para los casos de esbeltez superior a 2:1, siguiendo el criterio de la normativa ASCE 41, las chimeneas son reemplazadas por otras de menor peso y mayor estabilidad.

7. Conclusiones

Mediante el método del empuje incremental, se han estudiado alrededor de 150 edificios de fábrica sometidos al fenómeno de la sismicidad inducida en la región de Groningen. Los edificios corresponden a viviendas adosadas, viviendas pareadas y unifamiliares.

El resultado de este estudio ha indicado que la gran mayoría de estos edificios requieren refuerzos estructurales para poder cumplir con las condiciones de seguridad indicadas en la normativa holandesa.

Las medidas de refuerzo empleadas contemplan el refuerzo de forjados y cubiertas de madera para asegurar un comportamiento de diafragma, el refuerzo de muros de fábrica mediante regruesado de hormigón y de FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix, fibras de carbono en matriz cementicia), adosado de postes de madera para prevenir fallos fuera de plano, inserción de entramados metálicos, así como refuerzo generalizado de uniones entre cubiertas, forjados y muros de fábrica.

Agradecimientos

Este estudio corresponde al trabajo conjunto de cuatro oficinas de Arup: Ámsterdam, Estambul, Milán y Madrid. El número de personas implicadas es amplio, recogiendo aquí solo algunas de ellas: Elizabeth Stocks, Joaquin Soriano, Tahir Fazal, Estrella Morato, Rosana Ibáñez, Doris Feijoo, Maria Lopez, Michele Malaspina, Vincenzo Bonura, Giorgio Conserva, Senem Gulal, Ekin Hatipoglu, Sebla Pelvan, Serhan Tako, Luca Mari, Emilio Schiavo, Mirko Morosi, Serena Alessi.

Referencias

- [1] NPR 9998:2015 Assessment of structural safety of buildings – Induced earthquakes – Basis of design, actions and resistances.
- [2] NPR 9998:2018 Assessment of structural safety of buildings– Induced earthquakes – Basis of design, actions and resistances.
- [3] Eurocódigo 8 Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación.
- [4] Eurocódigo 8 Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 3: Evaluación y adecuación sísmica de edificios.
- [5] ASCE/SEI 41-13 American Society of Civil Engineers - Seismic Evaluation and Retrof of Existing Buildings
- [5] ETAG 029 Edition April 2013 Guideline for European Technical Approval of Metal Injection Anchors for Use in Masonry.
- [6] NTC2008 - Norme tecniche per le costruzioni 2008 (NTC 2008) - D.M. 14 Gennaio 2008 (D.M. 14/1/08)
- [7] Chopra A., Goel R., (1999) Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures: SDF Systems. Report No. PEER-1999/02