

CÓDIGO: 2.1 ⁽¹⁾

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA BAJO ACCIONES SÍSMICAS

Yuste Navarro, Fco-Javier¹; Perepérez Ventura, Bernardo

1: Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
e-mail: jyustenavarro@gmail.com

2: Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Universitat Politècnica de València
e-mail: bpereper@csa.upv.es

PALABRAS CLAVE: Seísmo, Vulnerabilidad, Demanda-Capacidad, Mecanismo, Análisis cinemático

RESUMEN

Los daños que producen los seísmos en las estructuras de fábrica muestran varios mecanismos, que pueden formarse en una parte o en el conjunto de un muro de fábrica. La mayor parte de daños se producen más por mecanismos locales, debido a la acción sísmica fuera del plano del muro, que respecto del comportamiento conjunto de la estructura. El vuelco o flexión de paramentos de fábrica constituye un caso típico. Varios métodos de análisis límite de las fábricas están recogidos en diversas normas y recomendaciones para la evaluación de vulnerabilidad de las estructuras de fábrica.

El estudio se puede plantear en términos de fuerza y en términos de desplazamiento, en un contexto cinemático demanda-capacidad. El artículo presenta un ejemplo de evaluación de la vulnerabilidad de fachadas de fábrica frente al vuelco, ortogonalmente al plano medio del muro, de edificios de centros históricos y rurales de altura limitada mediante el empleo de modelos simplificados de análisis límite. Se emplean las siglas ACL y ACNL para designar los análisis cinemático lineal y cinemático no lineal, respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento sísmico de las estructuras de fábrica, y la vulnerabilidad sísmica de edificios con un esquema resistente de muros de fábrica no armada, depende de la capacidad para obtener un efecto "caja" en su respuesta de los enlaces de los muros con los forjados y de los muros entre sí.

Cuando las acciones sísmicas actúan sobre las construcciones de fábrica rara vez se produce el colapso global de la estructura, siendo más frecuentes los daños que producen mecanismos locales de colapso [1]. La acción sísmica produce una serie de mecanismos que se pueden clasificar en Modo I (mecanismos locales fuera del plano) y en Modo II (fallo en el plano) [2] (Figura 1).

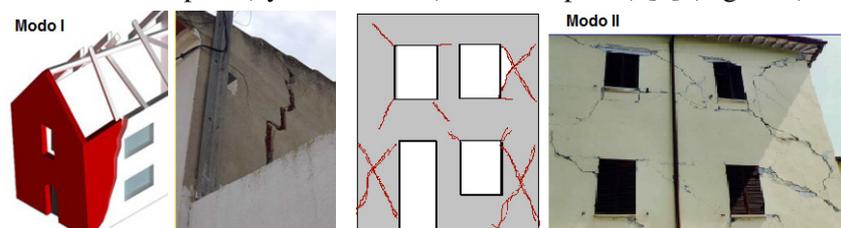


Figura 1. Mecanismos de Modo I y de Modo II

Se han identificado mecanismos locales de fallo con la observación de los daños producidos por los terremotos y en la investigación de modelos de análisis y ensayos sobre mesa vibratoria. Se han caracterizado los distintos daños, tanto para construcciones tradicionales de edificios de fábrica [3], como

para construcciones del patrimonio [4]. La Figura 2 presenta los mecanismos principales para acciones ortogonales al plano medio del muro, aunque pueden darse otros mecanismos más ó menos complejos en función de la geometría de la construcción, de los sistemas de enlace y de la presencia de huecos.

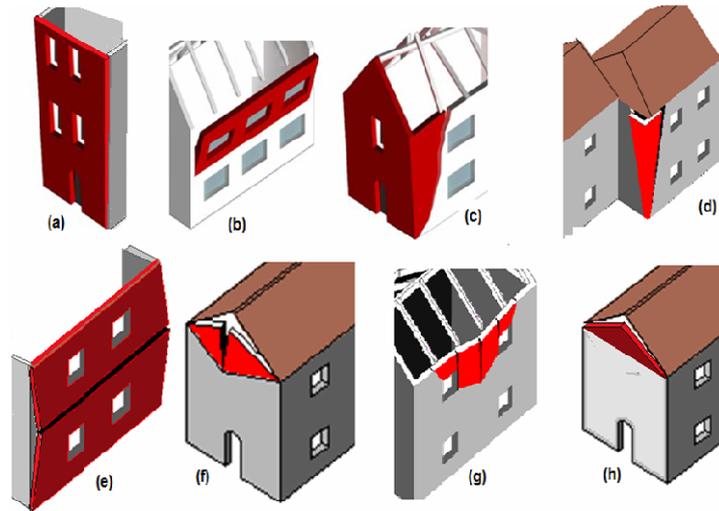


Figura 2. Mecanismos locales fuera del plano más comunes: (a) (b) (h) vuelco simple total ó parcial; (c) vuelco compuesto; (d) vuelco con cuña de esquina; (e) flexión vertical de fachada; (f) (g) flexión horizontal

2. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS LÍMITE A LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL VUELCO DE FACHADAS DE UN EDIFICIO DE TRES PLANTAS

2.1 Tipología de la fachada

Se estudia un diseño usual de fachada de fábrica en edificios habitacionales de principios del s. XX en una zona sísmica como la de Lorca (Murcia) (Figura 3). Los datos para el análisis son:

- Espesor uniforme en altura de la fachada para espesores de 0.30 m y de 0.45 m (Tabla 1).
- Luz de la primera crujía de forjado = 4 m, con carga en situación sísmica: $G + 0.30Q = 4 \text{ KN/m}^2$.
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f'_m = 2.5 \text{ N/mm}^2$, con factor de ponderación $\gamma_m = 2$.
- Factor de confianza $LC = 1.35$ (conocimiento limitado y sin ensayos) (EC-8 y NTC-2008).
- Factor de comportamiento $q = 2$.

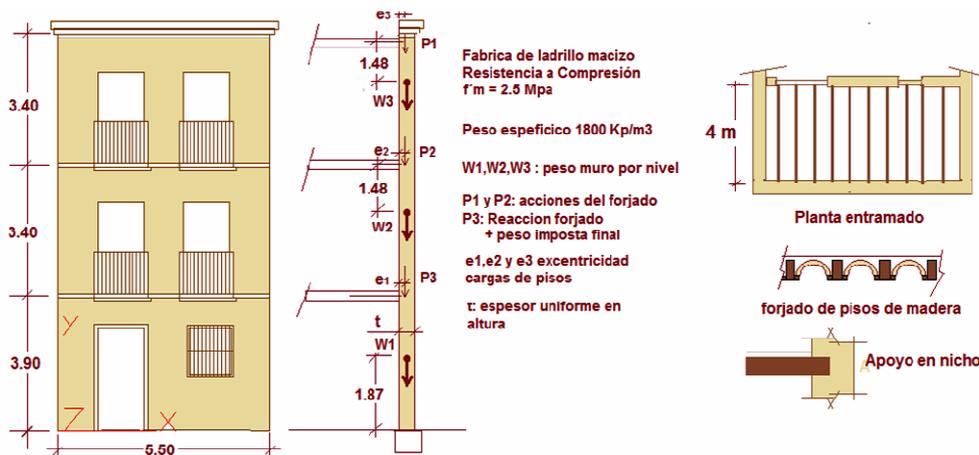


Figura 3. Esquema de fachada para el análisis límite

Tabla 1: Pesos considerados en el análisis

Espesor del muro(m)	Peso de los muros (KN)			Reacción de los forjados (KN/ml)			Apoyos(m)		
	W1	W2	W3	P1	P2	P3	e1	e2	e3
0.30 (caso A)	90	70	70	8.5	8.5	11.3	0.08	0.08	0.10
0.45 (caso B)	130	105	105						

2.2 Acción y demanda sísmica consideradas

La acción sísmica se define en el área de Lorca para el Estado Límite Último, no considerando en este trabajo otros Estados Límite. A partir de distintos estudios de peligrosidad realizados [5] [6], la aceleración, para un período medio de retorno $T = 475$ años, oscila entre 0,12 g y 0,24 g, con un coeficiente de variación del 25 %. Los parámetros sísmicos contemplados son los de la Tabla 2, en tanto que la Figura 4 recoge los mecanismos objeto de estudio.

Tabla 2: Parámetros sísmicos del estudio

Espectro	Aceleración básica a_g	Suelo	Amplificación		Período fundamental T1
			Terreno S	Topográfico	
EC-8, Tipo 1	0,20 g	B - C	1,20	1	0,30 s

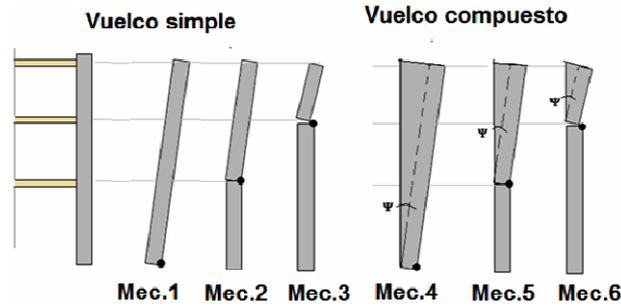


Figura.4. Esquema de los mecanismos analizados

3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS CON ACCIONES FUERA DE SU PLANO. BASES DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO

Hay recomendaciones y normas con métodos simplificados en el contexto de análisis límite para la verificación de acciones fuera del plano de la fábrica. Es el caso de las guías NZSEE de Nueva Zelanda, la americana ASCE-07 y la italiana NTC-2008. Tales métodos se basan en la experimentación y en estudios de diversos autores [7] [8] [9] [10] [11]. Los métodos simplificados emplean el comportamiento de sólido rígido a los efectos de evaluar la carga que produce un determinado mecanismo y el desplazamiento último cuando se alcanza la inestabilidad. El análisis cinemático considera una serie de bloques rígidos unidos por rótulas que se corresponden con las lesiones (resistencia nula a tracción), y permiten el giro libre relativo entre ellos. Un determinado mecanismo se puede generar disponiendo una serie de rótulas y centros de rotación que permitan el movimiento de los sólidos compatible con las lesiones. Con ello, se obtiene un multiplicador de colapso a través de la formulación de trabajos virtuales para un desplazamiento virtual de un punto de control.

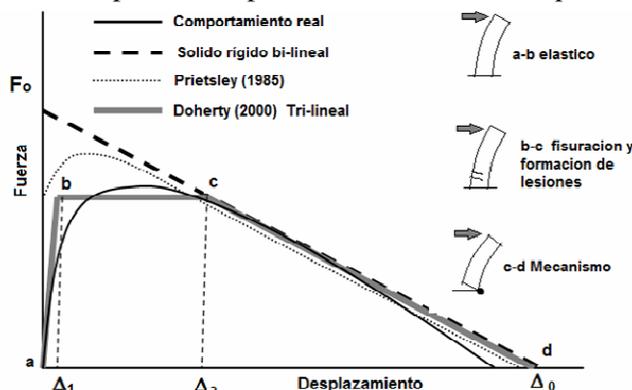


Figura 5. Comportamiento de un muro de fábrica con carga ortogonal a su plano [8] [9]

La Figura 5 muestra la respuesta fuerza-desplazamiento experimental de una pared sometida a carga lateral. Los valores de Δ_1 Δ_2 se determinan experimentalmente en función del grado de daño del muro. La razón Δ_2/Δ_0 correspondiente al inicio del mecanismo varía entre 0.4 y 0.6. El sistema cinemático de estos métodos simplificados se transforma en un sistema dinámico de un grado de libertad de un

oscilador simple y elástico con una masa y un período equivalentes [8] [9].

En el ACL se obtiene el multiplicador de colapso y la aceleración que activa el mecanismo sobre la configuración inicial del sistema. El ACNL obtiene el desplazamiento último a partir de la configuración variada hasta que se anula el multiplicador de colapso (Figura 6a). La curva de capacidad se simplifica con la recta de comportamiento rígido de la Figura 5. La Figura 6b muestra el análisis demanda-capacidad en ACLN de uno de los casos estudiados en este trabajo a partir de la demanda del espectro en aceleración-desplazamiento.

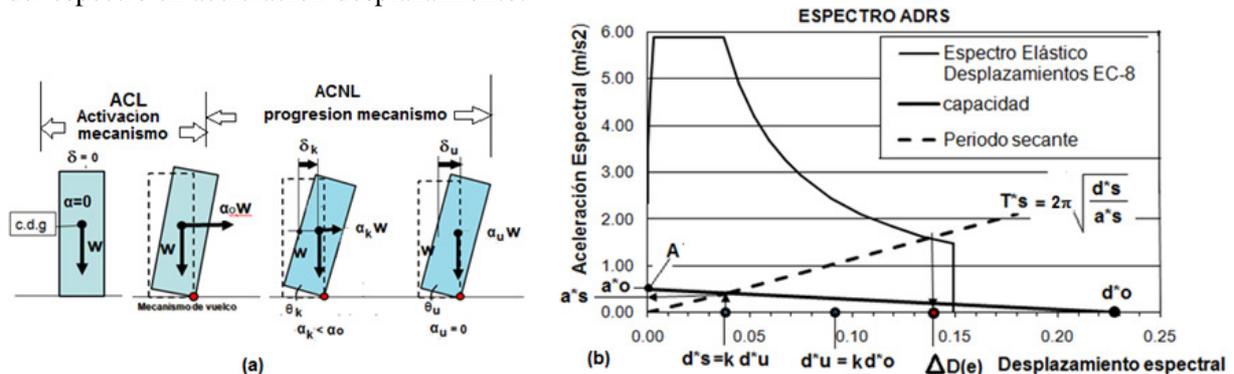


Figura 6. 6(a): ACL y ACNL; 6(b): Análisis Demanda-Capacidad en desplazamientos. a^*o : aceleración espectral que activa el mecanismo (punto A, ACL); d^*o : desplazamiento espectral máximo del sistema; d^*u : desplazamiento espectral último del sistema ($K = 0.40$); d^*s : desplazamiento espectral del oscilador SDOF elástico equivalente; $\Delta D(e)$: Demanda de desplazamiento debe ser $\Delta D(e) < d^*u$; T^*s : período secante

Conviene señalar que:

- Es necesario un mínimo de calidad e integridad de la fábrica. Si es de escasa calidad, se disgrega durante la acción sísmica y es incapaz de formar el mecanismo [12].
- El desplazamiento último se ve limitado además por otros factores, como el deslizamiento y fallo del apoyo de los forjados o la rotura de los tirantes de anclaje de sujeción.

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL CASO ESTUDIADO

4.1 Análisis del vuelco simple

La Tabla 3 muestra las aceleraciones espectrales y la PGA que activa el mecanismo de colapso obtenidas con ACL para los muros de 0,30 m y 0,45 m de espesor.

Tabla 3: Análisis cinemática lineal (ACL) en vuelco simple

Parámetros sísmicos	T1 (s)	Gamma	H	S	q	ag sitio	
		0.3	1.28	10.7	1.2	2	0.2
Mecanismo	$\lambda = H/t$	Z	$\psi(Z)$	Capacidad $a_0^*(m/s^2)$	Demanda $a^*(m/s^2)$	Capacidad/ Demanda	Capacidad PGA/g
Vuelco global 1.A	36	0	0	0.23	1.177	0.2	0.01911
Vuelco global 1.B	24	0	0	0.34	1.177	0.3	0.02905
Vuelco parcial 2.A	22	3.9	0.36449	0.30	1.350	0.2	0.05593
Vuelco parcial 2.B	15	3.9	0.36449	0.51	1.350	0.4	0.09509
Vuelco parcial 3.A	11	7.3	0.68224	0.57	2.528	0.2	0.05698
Vuelco parcial 3.B	8	7.3	0.68224	1.00	2.528	0.4	0.09961

Con una traba deficiente, los valores de PGA para Estado Límite Último son muy reducidos e inferiores a la demanda, por lo que para todos los mecanismos de vuelco la vulnerabilidad sería muy elevada para la aceleración del sitio. La Figura 7 muestra, en ACNL, el mecanismo de vuelco global y que se alcanza la demanda de desplazamiento solamente para muros de gran espesor y esbeltez geométrica inferior a 11.

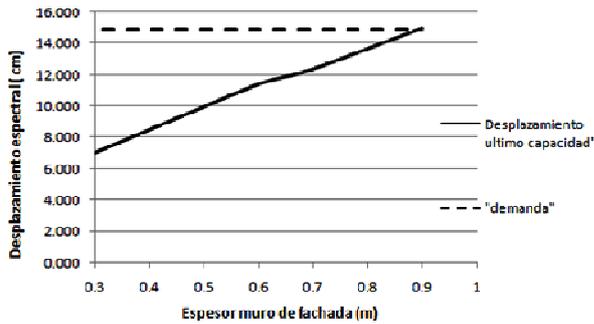


Figura 7. Mecanismo 1 (vuelco simple)

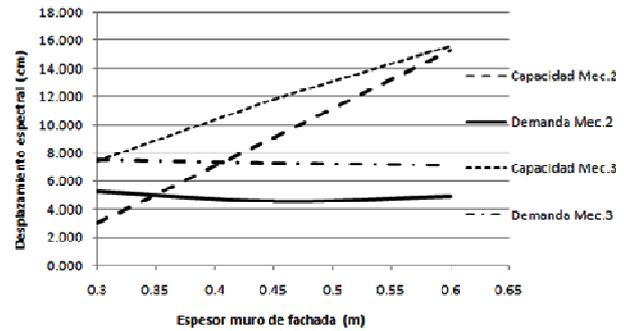


Figura 8. Mecanismos 2 y 3 (vuelco simple parcial)

Para el caso de los mecanismos parciales 2 y 3, se parte de que el enlace es adecuado en el piso 1 y en los pisos 1 y 2, respectivamente. La Figura 8 muestra que para espesores moderados, 0,30 m en el caso de mecanismo 3 de vuelco de la planta superior y 0,35 en el caso del vuelco parcial de las dos últimas plantas, se cumpliría la condición de Estado Límite Último. Un aspecto destacable son los valores de compatibilidad de los desplazamientos requeridos con el apoyo de los elementos de piso.

4.2 Resistencia a compresión limitada

Una forma de considerar un valor limitado de la resistencia a compresión de la fábrica es desplazar el eje de giro y la reacción de las cargas, admitiendo una distribución lineal de las tensiones en una longitud finita (Figura 9a), aunque también se emplean otras distribuciones. Para el mecanismo de vuelco global se ha realizado una estimación de la influencia de la resistencia a compresión de la fábrica en el coeficiente de activación del mecanismo analizado con ACL como muestra la Figura 9(b), en la que el valor 100 % se corresponde con una resistencia infinita de la fábrica.

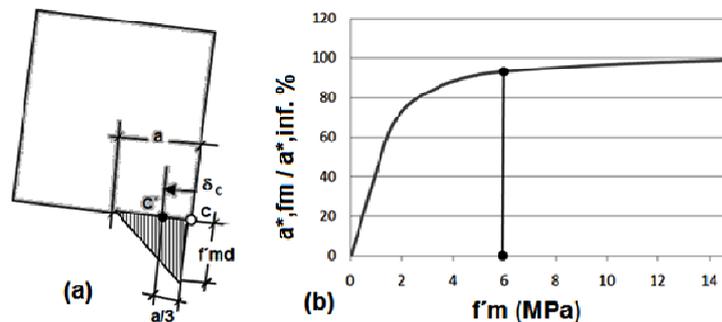


Figura 9. Resistencia limitada a compresión

4.3 Influencia del enlace del muro de fachada con los muros transversales

Los efectos del enlace entre el muro de fachada y los muros ortogonales es obvio que desempeña un papel clave en el posible desarrollo de mecanismos de vuelco por acciones sísmicas fuera del plano de la estructura. El efecto del enlace se da en fábricas constituidas por piezas más ó menos regulares.

Se puede tener en cuenta el enlace mediante el rozamiento que induce en las piezas el peso de la fábrica y de cualquier otro elemento que gravite sobre ellas. Para modelizar este efecto se ha considerado el rozamiento de Coulomb, despreciando la contribución del peso de las estructuras horizontales, que es pequeña, admitiendo como hipótesis una distribución uniforme en cada planta (Figura 10a) [13].

Se ha estimado el efecto del enlace en el caso de los mecanismos de vuelco estudiados para fábrica de ladrillo macizo con piezas de 29 x 14 x 5,2 cm, con un factor de eficacia $K = 1$ para una longitud de traba igual a $0,8 \times (\frac{1}{2}$ longitud de la pieza) y una separación entre enlaces pequeña. Con ello, se ha calculado el efecto con ACL en el caso de vuelco global, de vuelco parcial y en el caso de espesores reducidos de los muros transversales a la fachada (Figura 10b). Para un enlace eficaz, las aceleraciones PGA obtenidas satisfacen la demanda de 0,2 g. Como es lógico, para un espesor limitado de los muros

transversales, incluso con un buen enlace, se reduce la respuesta a menos de la mitad. Grados de traba mediocres se corresponden con aceleraciones inferiores a la demanda.

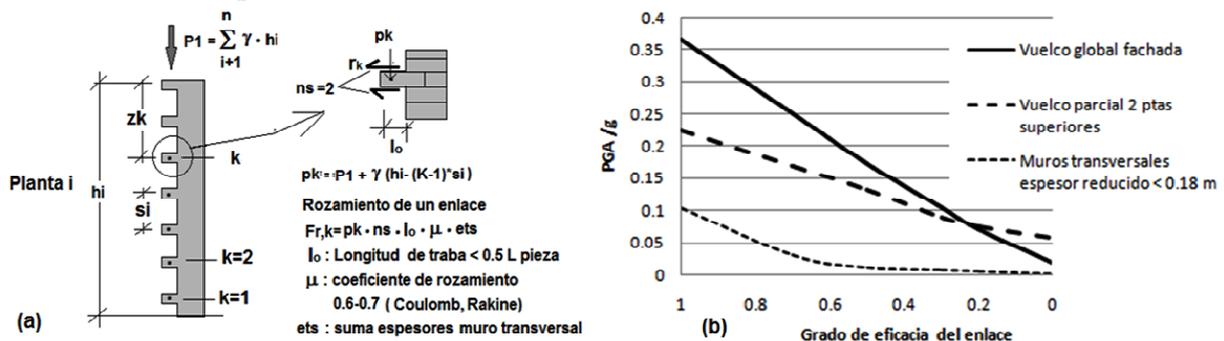


Figura 10. Estimación de la influencia del grado de enlace en la respuesta sísmica al vuelco

4.4 Análisis del mecanismo de vuelco compuesto

Si aumenta el ángulo que forma la cuña del muro ortogonal con la fachada, el coeficiente de colapso crece y lo hace también la estabilidad. La estimación del ángulo se establece a partir de la observación de los daños. En este caso, se ha considerado un ángulo $\psi = 15^\circ$ (Figura 4), con un cateto horizontal del triángulo de acompañamiento de 0.9~1,0 m. Se analiza el cinemático de vuelco compuesto para una suma de espesores de los muros transversales de al menos 0.30 m y se presentan los resultados para espesores del muro de fachada de 0.30 m y 0.45 m (Tabla 4).

Tabla 4: Análisis de vuelco compuesto

Mecanismo	Análisis cinemático lineal				A. cinemático no lineal	
	Espesor e del muro (m)	Demanda $a^*(m/s^2)$	Capacidad $a0^*(m/s^2)$	Capacidad PGA/g	Demanda ΔDe (cm)	Capacidad d^*u (cm)
Mecanismo 4	0.3	1.17	0.44	0.04	15 (*)	21.0
	0.45		0.54	0.05		22.8
Mecanismo 5	0.3	1.35	0.45	0.08	5.7 (**)	12.6
	0.45		0.63	0.11	5.4 (**)	15.2
Mecanismo 6	0.3	2.53	0.56	0.06	8.2 (*)	8.3
	0.45		0.89	0.09	8 (*)	12.0

(*) Desplazamientos que pueden ser incompatibles con el fallo del apoyo del forjado

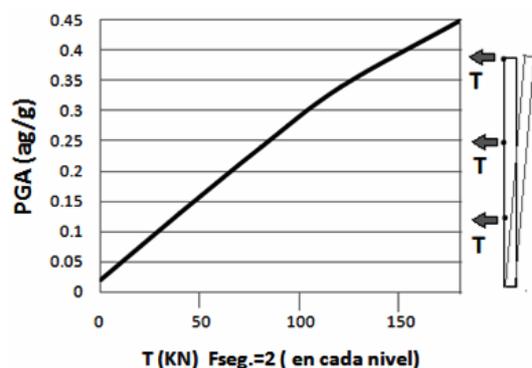
(**) Desplazamientos que estarían en el límite por deslizamiento de los apoyos de los forjados

El análisis ACL indica que la PGA disponible es muy reducida e inferior a la demanda. El resultado del ACNL da una capacidad de desplazamiento que supera a la demanda y que, por tanto, podría cumplir el requisito de Estado Límite Último; pero no es posible, pues el desplazamiento por deslizamiento de los elementos de piso limita el desplazamiento espectral último.

El mecanismo de vuelco compuesto es complejo. Se puede producir con un buen enlace con los muros transversales, en cuyo caso no se debe olvidar el comportamiento en dos direcciones de la fachada y la posibilidad de aparición de otros mecanismos, como la flexión horizontal. Por otro lado, la fuerza de fricción que se desarrolla en el enlace a lo largo de la grieta del bloque de acompañamiento, depende de múltiples factores, como las dimensiones de las piezas que forman la fábrica, el tipo de traba, la altura del bloque de acompañamiento, etc., e influye en la respuesta al vuelco.

5. VÍNCULOS Y SUJECCIÓN

La respuesta sísmica respecto a mecanismos de vuelco de la fachada está muy condicionada por el efecto diafragma de los forjados y la rigidez correspondiente. Los forjados de madera suelen tener poca rigidez y su deformabilidad dificulta el comportamiento como caja del conjunto (*box-behaviour*). Además, el apoyo de las piezas de madera en los mechinales de la fábrica tiene una capacidad de enlace muy limitada. La intervención sísmica, en estos casos, debe mejorar los enlaces y el efecto diafragma de los forjados, aspecto que desborda los límites de este trabajo.



El atirantamiento es un modo usual de combatir los mecanismos de vuelco. A título de estimación, incorporando en la ecuación de trabajos virtuales fuerzas de sujeción, se ha evaluado el incremento medio de la aceleración del terreno PGA que introducen tales fuerzas en los mecanismos de vuelco simple estudiados con ACL. Como se observa (Figura 11), aun con fuerzas moderadas los valores de PGA alcanzan la demanda requerida para cumplir el Estado Límite Último.

Figura 11. Efecto de la sujeción en PGA

6. CONCLUSIONES

- El estudio de mecanismos de vuelco simple muestra la gran vulnerabilidad sísmica de las fachadas de fábrica si el enlace con los muros transversales y los forjados es deficiente. Con análisis cinemático lineal se han obtenido aceleraciones que difícilmente superan la aceleración básica de 0.10 g.
- El análisis cinemático no lineal permite estimar mejor los recursos de desplazamiento de la fachada, pero el apoyo en mechinales de viguetas de madera limita los desplazamientos admisibles, máxime si la madera está en proceso de pudrición. Un deslizamiento de hasta 5~6 cm de las viguetas de madera difícilmente puede soportar la demanda de desplazamiento para la aceleración del sitio considerado.
- Se ha analizado la influencia del espesor del muro y de la esbeltez geométrica en la respuesta al mecanismo de vuelco, observando que el Estado Límite Último en aceleración requiere espesores muy superiores a los usuales en los edificios de entre 2 y 4 plantas como, por ejemplo, el estudiado.
- El empleo de los métodos simplificados de análisis cinemático requiere una inspección detallada del enlace de la fachada con los muros ortogonales y los forjados. Se ha determinado que si los muros transversales son de espesor reducido la capacidad ante el vuelco puede reducirse a menos de la mitad de la obtenida con un enlace más eficaz. Por otra parte, un buen enlace con los muros transversales obliga a no despreciar el comportamiento en dos direcciones del muro de fachada.
- La adecuación sísmica puede requerir el aumento del efecto diafragma de los forjados. El atirantamiento preventivo es de coste limitado y reduce el riesgo de desplome de la fachada.
- Los mecanismos de vuelco compuesto son de compleja evaluación debido a la influencia del rozamiento, a la definición de la geometría del bloque de acompañamiento y a la profundidad de la grieta. Por tanto, conviene profundizar en su estudio y en la mejora del análisis simplificado cinemático.
- Los métodos simplificados son una herramienta útil y razonable para evaluar la vulnerabilidad de los mecanismos locales, pero presentan incertidumbres ligadas al comportamiento dinámico, la no linealidad, el período propio de vibración, el amortiguamiento y disipación de energía, etc. Por ello, hay que abundar en la mejora de estos métodos, incluyendo el efecto de las coacciones y su respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sorrentino L. *Comportamento sismico delle costruzine murarie storiche. Evoluzione ed interpret-tazione meccanica dei criteri e delle tecniche di intervento*. Tesi di Laurea Università la Sapienza, Roma, 2000
- [2] Giuffrè A., *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Antonino Edizioni Kappa, Roma, 1991
- [3] D' Ayala, D. & Speranza, E. Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of

masonry structures. *Earthquake Spectra* 19(3): 479-509 (2003)

- [4] Podestà, S. Una metodologia per la valutazione della vulnerabilità degli edifici storici: la "scheda chiese" del Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti. Apartado 3.3.1 de *Mitigazione del rischio sismico dei centri storici e degli edifici di culto dell'area del Matese nella regione Molise*. Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti, GNDT, Pescara, Brandolini, 2001
- [5] Benito B., Rivas A; Gaspar-Escribano J.M; Murphy P. El terremoto de Lorca de 2011 en el contexto de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Murcia. *Física de la Tierra*, Vol. 24:255-287 (2012)
- [6] Figueras S; Macau A; Belvaux M; Peix, M; Benjumea B; Gabás A; Susagna T; Goula, X. Caracterización de los efectos sísmicos locales en la ciudad de Lorca. *Física de la Tierra*, Vol.24:231-234 (2012)
- [7] Priestley, J.N. Seismic Behaviour of Unreinforced Masonry Walls. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. Vol.18, nº2,191-205, June (1985)
- [8] Doherty, K. *An investigation of the weak links in the seismic load path of unreinforced masonry buildings*. PhD Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Adelaide, 2000
- [9] Doherty, K; Griffith, M. C; Lam N; Wilson J. Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 31, 833-850 (2002)
- [10] Griffith, M. C; Lam, N.T.K; Wilson, J. L; Doherty, K. Experimental investigation of Unreinforced Brick Masonry Walls in Flexure. *Journal of Structural Engineering ASCE*. 130(3), 423-432 (2004)
- [11] Derakshan, H; Dizhur, DY; Griffith, MC; Ingham, JM. Seismic assessment of out-of plane masonry walls in multi-storey buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 47 (2), 119-138 (2014)
- [12] Giuffrè , A. *Sicurezza e conservazione dei centri storici, Il caso Ortigia*. Editori Laterza, Bari, 1993
- [13] Sorrentino, L; Monti, G; Kunnath,S; Scalora G. Un modello meccanico semplificato accoppiato nel piano-fuori piano per valutare il ruolo di solai, immorsature, qualità muraria e muri di controvento. *XII Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia*, Pisa 2007