

DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CON BASE EN DESPLAZAMIENTOS

Subcomité Técnico 5 (Mampostería)
Building Seismic Safety Council¹

Resumen

En las actuales provisiones de la norma EEUU MSJC para el diseño sísmico de estructuras de mampostería, una estructura se asigna a una categoría de diseño sísmico, con los coeficientes correspondientes de diseño sísmico R , C_d y Ω , y sus correspondientes tipos designados de muros. Los elementos del sistema resistente a fuerzas laterales se diseñan para las fuerzas reducidas por R , y también tienen que cumplir con requisitos de receta asociados al tipo de muro requerido. En este documento, se revisan las debilidades potenciales de este enfoque, y se propone una alternativa, con base en desplazamientos, destinado a encarar a aquellas debilidades.

1.1 Introducción

La práctica actual EEUU para el diseño de estructuras de mampostería, con base en las provisiones del 2005 MSJC *Code* y el ASCE 7-05 (Supplement), involucra los pasos siguientes:

- 1) La estructura se asigna a una Categoría de Diseño Sísmico (CDS) de acuerdo con el ASCE7-05 (Supplement).
- 2) Con base en aquella CDS, el sistema tiene que ser un tipo particular designado de muro cortante de mampostería, con los coeficientes asociados R , C_d and Ω , de acuerdo con el ASCE7-05 (Supplement).
- 3) Se calculan las fuerzas de diseño sísmico para el muro cortante, con base en análisis por secciones gruesas, e incluyendo los efectos de R , de la redundancia, y de la irregularidad de acuerdo con el ASCE7-05 (Supplement).
- 4) Se detallan los segmentos de muro según se requiere para el tipo designado de muro, y se diseñan para aquellas fuerzas sísmicas de diseño. Se se usa el diseño por resistencia, la norma MSJC invoca razones máximas de refuerzo que dependen del tipo designado de

¹ Dan Abrams, Ron Barnett, Gregg Borchelt, Bob Chittenden, Steve Dill, Tom Gangel, Greg Kingsley, Richard Klingner, Robert Lyons, David McLean, Max Porter, Art Schultz, James Tauby, John Tawresey, Jason Thompson, Diane Throop, Terence Weigel

muro, y de la razón ($M_u / V_u d$) del muro. Si se usa el diseño por resistencia, la norma MSJC requiere el diseño por capacidad contra corte.

- 5) Se calculan las derivas sísmicas de diseño como la respuesta elástica (secciones agrietadas y fuerzas reducidas), multiplicada por C_d . Aquellas derivas se comparan con los límites máximos.

Este procedimiento tiene fundamento racional, pues muros con niveles de detallamiento más severos generalmente son capaces de niveles mayores de ductilidad de desplazamiento, y niveles mayores de demanda de ductilidad de desplazamientos se asocian a reducciones mayores desde niveles elásticos de fuerzas para muchas configuraciones estructurales. Sin embargo, el procedimiento actual está lejos de lo ideal, y tiene las siguientes deficiencias potenciales:

- o Mientras que niveles más severos de detallamiento se han requerido tradicionalmente en los CDS más altos, y el nivel más alto (“especial”) ha dado un desempeño generalmente satisfactorio, hay poca evidencia experimental directa de una relación consistente entre el nivel de detallamiento sísmico y la ductilidad disponible, o la ductilidad implicada por el valor asociado de R , pues la ductilidad del sistema depende tanto de la configuración de la envoltura de mampostería como de los niveles del refuerzo o su detallamiento dentro de aquella configuración.
- o Por cuanto no se controlan las razones de aspecto de los segmentos de muro que constituyen el muro cortante de tipo designado, y por cuanto no se controlan directamente su capacidad de deformación, es bien posible para un calculista, sin intención, diseñar un muro que puede fallar en una manera frágil y dominada por corte, aunque se conforma a un tipo designado de muro con un valor alto de R .
- o Requisitos de refuerzo por sollicitación fuera del plan pueden conducir a refuerzo vertical que excede la máxima razón permitida para la designación exigida de muro, aunque la demanda de ductilidad sea menor que la implicada por aquel cálculo. No se permite al diseñador cambiar resistencia aumentada por ductilidad reducida. Este problema es especialmente difícil en muros con aperturas coladazas en forma arbitraria, pues los segmentos de muro que definen las aperturas de ventanas y puertas fácilmente pueden experimentar los valores

máximos de momento fuera del plano y en el plano, en aproximadamente los mismos puntos.

- o El requerir que el diseñador provea ductilidad flectora por receta sobre todo un muro de mampostería es derrochador y técnicamente incorrecto. La demanda de ductilidad flectora no es uniforme sobre un muro típico, por tres razones: Primero, muchas configuraciones de mampostería son tan rígidas que ningún elemento en la configuración tiene demanda alta de desplazamientos (si bien por rótulas plásticas o por deformaciones cortantes). Segundo, muchas configuraciones se dominan por corte, lo que no se encara por los requisitos actuales de detallamiento. Tercero, configuraciones que se esperan gobernarse por la formación de rótulas plásticas requieren detallamiento dúctil sólo en los sitios de aquellas rótulas.
- o Por cuanto el diseñador no se requiere ni se alienta a revisar directamente la respuesta carga-deformación de los segmentos de muro que constituyen el muro de mampostería de tipo designado, los requisitos de norma no se ligan tan directamente como fuera posible, a modos particulares de comportamiento. Por cuanto los requisitos de receta se invocan por la designación del muro cortante en lugar del comportamiento esperado de cada segmento de muro, unos segmentos pueden ser detallados insuficientemente, y otros, sobre-detalados. Aunque una norma de diseño no se redacta primeramente como una herramienta de enseñanza, las provisiones actuales no comunican sus objetivos a diseñadores tan claramente como posible, y como resultado muchas veces obligan al diseñador a enfocarse en problemas ficticios en lugar de problemas reales.
- o Las provisiones actuales de diseño sísmico se basan primeramente en fuerzas, con niveles sobre-yacentes de requisitos de receta (porcentajes y espacios de refuerzo), requisitos sobre refuerzo máximo, y requisitos por diseño por capacidad. No requieren revisión consistente por el comienzo de la deformación local inelástica que generalmente conduce a mayores deformaciones locales inelásticas, concentraciones de daño, y colapso posible.

1.2 Objetivos de este Enfoque con base en Desplazamientos para el Diseño Sísmico de Estructuras de Mampostería

Este enfoque con base en desplazamientos para el diseño sísmico de estructuras de mampostería se presenta como una manera de hacerle frente a cada una de las deficiencias de arriba.

- o El diseñador tiene que revisar si cada segmento de muro a lo largo de una línea de resistencia se espera a participar en el mecanismo inelástico asociado a aquella línea de resistencia; en caso de que sí, si su comportamiento se dominará por flexión, por corte, o por una mezcla de los dos; a compare la capacidad de deformación de cada segmento con su demanda correspondiente; y a reforzar y detallar cada segmento consistentemente con su comportamiento esperado. Como resultado, el objetivo de las provisiones de diseño se comunica claramente a los diseñadores.
- o El diseñador tiene que revisar cada segmento de muro por el comienzo de deformación local inelástica, y diseñar cada segmento explícitamente contra el colapso bajo las deformaciones esperadas. Como resultado, se puede identificar en una forma relativamente clara, las regiones donde la demanda local de deformaciones puede aumentarse y exceder la capacidad local de deformación.

1.3 Procedimiento de Diseño con base en Desplazamientos

- 1) Asignar a la estructura un valor de R entre 2 y 5, con base en la CDS como lo haya dictado el ASCE7-05 (Supplement). Usando una configuración preliminary de muros y segmentos de muros, calcular el corte basal de diseño, incluyendo efectos de la redundancia y la discontinuidad. Calcular el corte basal de diseño a lo largo de cada línea de resistencia. Usando momentos de inercia de secciones agrietadas transformadas igual a la mitad del momento de inercia de las secciones gruesas, calcular una deflexión inicial elástica δ_e (designación del 1997 UBC Δ_S) y una deflexión total de diseño δ (designación del 1997 UBC Δ_M), igual a $C_d \delta_e$ para un factor de importancia I igual a la unidad. Estos cálculos proveen todo parámetro de entrada necesario para llevar a cabo un diseño preliminar a lo largo de la línea de resistencia.

- 2) Hacer un diseño inicial de los segmentos de muro en aquella línea de resistencia por cargas fuera de plano y por el refuerzo mínimo por receta asociado al tipo designado de muro que se requiera.
- 3) Proponer un mecanismo inelástico de resistencia. El propósito de este paso es simplemente llegar en una distribución inicial interna de resistencia correspondiente a un mecanismo inelástico, en lugar de una solución elástica. Los segmentos individuales pueden suponerse o limitados por flexión o por corte, dependiendo de su geometría.
 - a) Revisar si cada segmento de muro se limita por flexión o por corte, revisando la razón de capacidad cortante dividida por demanda cortante. La capacidad cortante se toma como la V_m de la 2005 MSJC Code, con base en la fuerza axial de carga muerta tributaria de diseño, sin consideración de las fuerzas axiales asociadas a momentos de acople. La demanda cortante se calcula por la estática, con base en las capacidades nominales de momento en rótulas flectoras. Las capacidades nominales flectoras se toman como las M_n de la 2005 MSJC Code, con base en cargas axiales de la carga tributaria de diseño de la carga muerta más el 50% de la carga viva. Los segmentos de muro con una razón de capacidad cortante entre demanda cortante en exceso de 1.20 se consideran como limitados por flexión; los con una razón menor que 0.90 se consideran como limitados por corte; y los con razones entre el 0.90 y el 1.20 se consideran como limitados tanto por flexión como por corte.
 - b) Suponer que los segmentos de muro limitados por flexión tienen una resistencia cortante inelástica en el plano igual a la sumatoria de sus momentos en los dos extremos, dividida por la altura o largo del segmento, según apropiado para la orientación del segmento. Basar aquellas capacidades flectoras en cargas axiales de la carga tributaria de diseño de la carga muerta más el 50% de la carga viva, sin consideración por las fuerzas axiales asociadas a momentos de acople.
 - c) Suponer que los segmentos de muro limitados por corte tienen una resistencia cortante inelástica en el plano igual a la V_m de la 2005 MSJC Code. Basar aquellas capacidades cortantes en cargas axiales de la carga tributaria de

- diseño de la carga muerta más el 50% de la carga viva, sin consideración por las fuerzas axiales asociadas s momentos de acople.
- d) Calcular la resistencia basal correspondiente, usando la resistencia flectora o cortante según sea apropiada para cada segmento. Esta resistencia inicial calculada se denomina como la “resistencia de movilización completa.”
 - e) Si la resistencia inicial calculada es menor que el corte basal de diseño, regresar al Paso 1 con un mayor valor supuesto de R o un mayor largo total de segmentos de muro.
 - f) Si la resistencia inicial calculada es mayor que el corte basal de diseño, escalar las demandas en los segmentos hacia el nivel de diseño. Esto en efecto da una distribución plástica de resistencia requerida.
- 4) Usando aquella distribución plástica de resistencia requerida, llevar a cabo un diseño complete por resistencia de cada segmento de la supuesta configuración por toda requerida combinación de carga (D, L, E), incluyendo factores de mayoración de carga, factores de reducción de capacidad, y las fuerzas axiales asociadas a momentos de acople. Como un diseño parcial por capacidad, multiplicar la demanda cortante de carga solamente por 1.5. Por cuanto este diseño incluye los efectos de factores de mayoración de carga y reducción de capacidad, es conservador con respecto a capacidad.
- 5) Para cada segmento de muro que participe en el mecanismo inelástico, confirmar que el segmento tiene la capacidad de deformación para acomodar la demanda inelástica esperada.
- a) Para segmentos limitados por flexión, confirmar que la capacidad inelástica de rotación en cada rótula plástica iguale o exceda la demanda inelástica de rotación en aquella rótula. La capacidad inelástica de rotación de cada rótula debe calcularse usando el gradiente de deformación unitaria (curvatura) correspondiente a la capacidad nominal flectora asociada a la carga axial de la carga muerta tributaria

más el 50% de la carga muerta tributaria más la carga sísmica (en la “resistencia de movilización completa”). Para prevenir la rotura de refuerzo este gradiente de deformación unitaria debe limitarse a $(5\varepsilon_y / d)$. La capacidad inelástica de rotación de esta rótula es este gradiente definido de deformación unitaria, multiplicado por un largo supuesto de la rótula del 50% de la peralte del miembro. La demanda inelástica de rotación en cada rótula se define por la geometría del mecanismo inelástico en la deriva inelástica de diseño.

- b) Para los segmentos limitados por corte, calcular la deformación inelástica cortante asociada a la deflexión de diseño. Si aquella deformación inelástica cortante no excede el 0.0025, el refuerzo cortante tiene que satisfacer solamente los requisitos de resistencia del Paso 4 y los requisitos del Paso 2. Si aquella deformación inelástica cortante excede el 0.0025, agregar algún nivel más alto (hasta ahora no definido) de refuerzo cortante de receta. Si aquella deformación inelástica cortante excede el 0.005, agregar más segmentos de muro, o aumentar el peralte estructural de los segmentos existentes para reducir la deriva.
- c) Diseñar cada segmento de muro, ya sea limitado por flexión o por corte, de acuerdo con los Pasos 4a y 4b.

1.4 Comentarios sobre el Procedimiento de Diseño con base en Desplazamientos

Aunque el procedimiento de diseño con base en desplazamientos que se resume arriba se semeja en unas maneras a procedimientos de diseño actuales, unas de sus implicaciones merece comentario.

- o Una premisa del procedimiento, consistente con la práctica actual de diseño, es que el desplazamiento total de diseño en el plano en cada línea de resistencia depende casi completamente de la rigidez elástica de aquella línea de resistencia, y es esencialmente independiente de la ductilidad supuesta de la estructura y del valor de R que se haya usado en su diseño. Esto se debe a que los valores de R y C_d se aumentan juntos. A medida que se aumenta R , se disminuyen tanto los niveles elásticos de fuerzas, como la deriva elástica. Por

cuanto la deriva total es la deriva elástica multiplicada por C_d , aquella deriva queda esencialmente constante.

- o Esta premisa, si se acepta, implica una inconsistencia en nuestro procedimientos actual de diseño con base en fuerzas, lo cuales favorecen a segmentos de muro limitados por flexión. Para tales segmentos, la curvatura de cadencia, y por consiguiente el desplazamiento de cadencia, dependen solamente de las dimensiones de los segmentos. Si el desplazamiento total es esencialmente independiente del valor de R que se haya usado en diseño, entonces la demanda de ductilidad (razón de desplazamiento total entre desplazamiento de cedencia) es también independiente de R . Siguiendo esta lógica, valores más altos de R no deben de requerir capacidad más alta de ductilidad (niveles más severos de detallamiento dúctil), ni tampoco límites más severos sobre el $\rho_{máx}$.
- o En realidad, las inconsistencias de arriba son a lo mejor no tan chocantes como podrían aparecer al principio. Mientras que la premisa de arriba de desplazamiento constante es generalmente válida para estructuras de períodos largos, no es válida para estructuras de períodos cortos, cuyos desplazamientos tienden a aumentarse a medida que se aumente la demanda de ductilidad. Sin embargo, la inconsistencia arriba notada sí sugiere que los procedimientos actuales de diseño para estructuras de período corto no deben de seguir basándose en los procedimientos para estructuras de período largo.

1.5 Referencias

Las siguientes referencias ofrecen discusión directa, tanto experimental como analítica, del procedimiento propuesto de diseño. Muchas otras referencias podrían incluirse.

Leiva, G., Merryman, M., Antrobus, N. and Klingner, R. E., "In-Plane Seismic Resistance of Two-Story Coupled Concrete Masonry Walls," *MASONRY - Components to Assemblages*, ASTM STP 1063, John H. Matthys, Editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

Leiva, Gilberto and Klingner, R. E., "Behavior and Design of Multi-Story Masonry Walls under In-Plane Seismic Loading," *The Masonry Society Journal*, vol 13, no 1, August 1994, pp. 15-24.

Seible, F., Hegemier, A., Igarashi, A. and Kingsley, G. (1994a). "Simulated Seismic-Load Tests on Full-Scale Five-Story Masonry Building," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 120(3), 903-924.

Seible, F., Priestley, N., Kingsley, G. and Kurkchubashe, A. (1994b). "Seismic Response of Full-Scale Five-Story Reinforced-Masonry Building," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 120(3), 925-947.

BORRADOR