

Comportamiento sísmico de los muros de adobe en edificaciones patrimoniales

Seismic behavior of the walls in buildings heritage

Mario P. Morán Proaño¹, Odalys Álvarez Rodríguez²

¹Universidad Tecnológica Quito, Ecuador

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Correo electrónico: mmoran11@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 23 de febrero del 2016

Aprobado: 6 de abril del 2017

Resumen

El estudio del comportamiento sismo-resistente de los muros de adobe en edificaciones patrimoniales en zonas sísmicas se realizó considerando su estado actual de agrietamiento para determinar la máxima aceleración sísmica que resistiría sin afectaciones al patrimonio; esta aceleración se define como el *sismo de comprobación o de diseño murario* (a_c) que caracteriza la respuesta dinámica de un segmento estructuralmente representativo del muro agrietado denominado *segmento de masa crítica muraria (mcm)*. El modelo matemático estructural del segmento *mcm* para el análisis de la aceleración de la respuesta sísmica se realiza utilizando una forma espectral para el cálculo del *coeficiente sísmico murario* (C_{sm}), cuyo valor depende de su período fundamental (T_m), que es determinado por la masa del segmento *mcm* y la rigidez de los sistemas colaborantes de entrepiso y/o cubierta. Finalmente, se exponen algunos criterios y lineamientos para el diseño de la intervención de mejoramiento sismo-resistente de las edificaciones patrimoniales de adobe basadas en los principios conservacionistas.

Palabras claves: adobe, sismo de comprobación o diseño, espectro de respuesta, segmento de masa crítica muraria, microvibraciones

Abstract

The study of seismic-resistant behavior of the adobe walls at heritage buildings in seismic areas was carried out by considering its current state of fissured to determine maximum seismic acceleration that would resist without affectations to the heritage; This acceleration is defined as the seismic test or seismic design wall (a_c) that characterizes the dynamic reply of a segment that is structurally representative of the fissured wall called critical mass wall segment (*mcm*). The structural mathematical model of the segment *mcm* for the acceleration of seismic response analysis is performed using a spectral form for the calculation of seismic wall coefficient (C_{sm}) whose value depends on their fundamental period (T_m), which is determined by the mass of the segment *mcm* and the rigidity of composite floor systems or roof.

Finally, outlined some criteria and guidelines for the design of the intervention of seismic-resistant breeding of the heritage buildings of adobe based on conservation principles.

Key words: Adobe, seismic design, response spectrum, critical mass wall segment, micro-vibration

INTRODUCCIÓN

La preservación del patrimonio cultural edificado cobra un especial significado cuando se trata de edificaciones monumentales en tierra (adobe y adobón), en las que el maestro constructor (se refiere a la habilidad y creatividad de los obreros que construyeron obras monumentales en adobe) ha desarrollado intuitivamente formas y tecnologías constructivas desafiando la peligrosidad sísmica y la fragilidad y características propias de este material.

Las construcciones en tierra con valor patrimonial han sido reconocidas como un prototipo único de construcción [1], caracterizadas por la estabilidad mostrada de los muros discretizados (fisurados) por sismos pasados, cuyo comportamiento necesita ser analizado para su protección sísmica dentro de los preceptos preservacionistas de la Carta de Venecia [2].

Este estudio presenta un nuevo planteamiento para comprender y analizar el comportamiento sísmico de las edificaciones patrimoniales de adobe en su estado actual de fisuración y degradación, sobre la base del análisis dinámico espectral de la respuesta de un segmento representativo de los muros discretizados, denominado para el estudio como segmento de masa crítica muraria (*mcm*).

Para el análisis estructural del comportamiento del segmento *mcm* se consideró la respuesta dinámica a la sollicitación sísmica basada en el desarrollo de un espectro de respuesta consistente con los criterios que definen el coeficiente sísmico murario (C_{sm}). El estudio del comportamiento sísmico del segmento *mcm* fue validado mediante mediciones in situ de la respuesta dinámica de los muros discretizados, en una muestra de edificaciones de esta tipología constructiva en las ciudades de Cuenca y Quito, Ecuador [3].

CARACTERIZACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN PATRIMONIAL EN ADOBE

Las edificaciones antiguas de muros de adobe en zonas sísmicas han mostrado la estabilidad de los muros para ciertos valores de intensidad sísmica considerando la vulnerabilidad y la fragilidad del material adobe y su estado actual de degradación y fisuración. Su caracterización [4], se realizó atendiendo a dos criterios estructurales: La tipificación de las formas de fisuración y discretización de los muros por sismos pasados y el comportamiento dinámico de los segmentos de los muros agrietados.

Comportamiento sismo-resistente de la construcción patrimonial de adobe

Para la comprensión del comportamiento sismo-resistente se emplearon los criterios de las observaciones, estudios e investigaciones relacionados con el tema como son las del proyecto Getty Seismic Adobe Project (GSAP) [5], de la Getty Conservation Institute (GCI), así como los estudios e investigaciones realizadas por Morán para el Fondo de Salvamento del Municipio Metropolitano de Quito (FONSAL, Fondo de Salvamento del municipio de Quito) para la restauración estructural y mejoramiento sísmico de las principales edificaciones patrimoniales de Quito [6 -11].

En las edificaciones de adobe, los movimientos sísmicos ocasionan el agrietamiento y la discretización de los muros en segmentos más pequeños, cuyo comportamiento sismo-resistente difiere del de un muro continuo. Puntualmente, en las guías de GSAP (Getty Seismic Adobe Project) se señala que ...“ la formación de fisuras (por sismos o asentamientos del suelo), disminuye notablemente la frecuencia fundamental del muro y aumenta los desplazamientos por el sismo de los segmentos (entre 2 y 3 veces), por la inelasticidad (fragilidad) del material” [5]. Además, referente al proceso de segmentación de los muros este estudio señala que ... “ se generan segmentos murarios independientes de menor masa, cuya respuesta dinámica es caracterizada por altas frecuencias y desplazamientos moderados”, razón por la cual el comportamiento corresponde a ...“ una respuesta inelástica posfisuración del edificio” [5]. Por otra parte, también ha sido investigado el cambio del comportamiento dinámico de los muros cuyos resultados se sintetizan en el capítulo 5 de la guía, poniendo de manifiesto el comportamiento dinámico de los muros dentro del proceso de discretización resumido en la siguiente frase: “A medida que el muro se agrieta, la aceleración y la frecuencia disminuyen y los desplazamientos crecen drásticamente...” [5] y se señala que el comportamiento de los desplazamientos, en la mesa vibratoria, para las intensidades 30 % mayores del movimiento, los resultados habían mostrado que tanto el pico de las aceleraciones como el valor de la frecuencia efectiva habían disminuido y que los desplazamientos de los segmentos para esa intensidad incrementada no afectan la estabilidad de la edificación.

Las observaciones realizadas en varias edificaciones patrimoniales de adobe en Quito, que han resistido sismos, evidencian que los desplazamientos fuera del plano de los segmentos de los muros discretizados, considerados infinitamente rígidos, se originan por los corrimientos de los apoyos de las estructuras de entrepiso y/o cubierta (rigidez lateral) y por la libertad de giro del apoyo inferior fisurado. Ver figura 1.

El proceso de agrietamiento de los muros se interpretó como una forma natural de cambio de la respuesta dinámica que hace posible la estabilidad muraria de la edificación debido a la menor masa vibrante y la modificación de los parámetros dinámicos.

Es importante citar otra experiencia del proyecto GSAP referente a los ensayos en una mesa vibratoria de dos construcciones: una dañada (fisurada) y otra sin daños. Los resultados del ensayo demostraron que los desplazamientos fuera del plano de los muros de la construcción dañada fueron diez veces mayores que los medidos en la construcción,

sin daños, además se resalta que los desplazamientos medidos en la construcción dañada, ... “son apenas una décima parte de los necesarios para voltear el muro”.

Los resultados de este ensayo evidencian que el comportamiento por desplazamiento de los muros agrietados no representa una amenaza a la estabilidad, sino más bien regulan de forma natural el comportamiento sísmico.

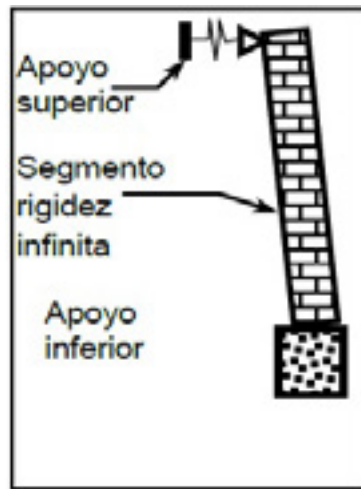


Fig. 1. Clasificación del perfil litológico [3]

Estudio históricosísmico de la construcción en tierra

Esta tipología constructiva y su relación con intensidades sísmicas y daños causados fueron investigados por los autores en las principales edificaciones patrimoniales de tierra en Quito construidas entre los siglos XVI y XIX para conocer el comportamiento sísmico en función de la sismicidad local. Según estudios realizados por la revista *Forbes*, Quito es considerada la cuarta ciudad de mayor riesgo sísmico a nivel mundial.

“La arquitectura religiosa fue desde un inicio la más importante tanto por su significado que la llevaba a buscar monumentalidad (...). Las construcciones religiosas a pesar de los deterioros resultantes del paso del tiempo y de los sismos son las que han perdurado” [12].

Basado en el estudio histórico se debe resaltar que el conocimiento existente de las tipologías y técnicas constructivas en tierra son adquiridos de la experiencia y las enseñanzas heredadas de generaciones pasadas como únicas fuentes del conocimiento [13,14].

El comportamiento sísmico de las construcciones patrimoniales de adobe investigadas en Cuenca y Quito bajo criterios de resistencia y estabilidad son coincidentes con las del proyecto GSAP y fueron presentadas en formato similar al gráfico del índice de incremento de daños de las guías de planteamiento e ingeniería para la estabilización sismo-resistente de estructuras históricas de adobe, extraídas de [1] y mostradas en la figura 2, con algunas adecuaciones.

La tabla 1 señala el comportamiento de las edificaciones en tierra según la tipología constructiva y los daños sísmicos observados en función de la magnitud del empuje sísmico.

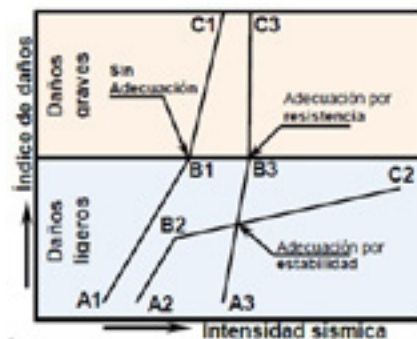


Fig. 2. Índice de incremento de daños

Tabla 1. Comportamiento estructural de las edificaciones de adobe

Tipología	Puntos de comportamiento
Estructuras no intervenidas	A1 Los muros no se dañan hasta que se rebasa el umbral de severidad para una intensidad sísmica
	B1 Los daños aumentan con el tiempo de duración del sismo y comienza la inestabilidad
	C1 En corto tiempo la edificación colapsa
Intervenidas con criterios de resistencia	A2 Punto inicial (estado actual)
	B2 Límite crítico de estabilidad
	C2 Punto de colapso
Intervenidas con criterios de estabilidad	A3 Punto inicial (estado actual)
	B3 Ligeros daños, estabilidad adecuada
	C3 Daños permanecen relativamente constantes sin incremento de los desplazamientos

Sismo de comprobación o de diseño (a_c) para muros de adobe y adobón

La aceleración sísmica para el estudio sismo-resistente y el diseño de la intervención de adecuación sísmica para las construcciones patrimoniales de adobe, se denominó sismo de comprobación o diseño murario (s_{cm}) y definida como la máxima aceleración sísmica del suelo local (a_c), para la cual un monumento ha demostrado ser seguro y estable en su estado de conservación y/o degradación. Para su determinación se siguieron los siguientes criterios:

Primer criterio: Las edificaciones patrimoniales deben ser preservadas en su autenticidad [2], señalándose de esta manera un límite superior para la aceleración sísmica, sobre la cual no tiene sentido ninguna intervención de reforzamiento.

Segundo criterio: El reconocimiento y la caracterización de esa aceleración sísmica límite, hace posible planificar y desarrollar intervenciones preservacionistas y de mantenimiento, sin alterar los principios de mínima intervención, autenticidad, reversibilidad y renovación (tabla 2).

Tercer criterio: La magnitud de la aceleración límite, es determinada en función de datos históricos de daños por sismos (Escala Mercalli, MM) y de las ecuaciones de atenuación en función de la distancia epicentral y las relaciones I/A establecidas para el sitio en estudio.

La aplicabilidad de los criterios expuestos para el Centro Histórico de Quito se resume a continuación: a) Investigación histórico-sísmica de afectaciones en los edificios patrimoniales de Quito, para conocer su comportamiento sismo-resistente sobre la base de las intensidades sísmicas y los daños murarios causados; b) Recopilación de la información sísmica de magnitudes Richter (K_R) y localización de epicentros, fundamentada en los registros del proyecto "Sismicidad Regional Andina" (SISRA) para el período 1540 – 1980 y c) Resultados de la aplicación de las ecuaciones de atenuación para establecer las relaciones I/A, a ser aplicadas para la aceleración del sismo de comprobación o diseño de las edificaciones patrimoniales en tierra para Quito.

De los resultados obtenidos se concluyó que el riesgo sísmico de mayor peligrosidad para las edificaciones patrimoniales en adobe es el generado por intensidades sísmicas de grado VI o VII (IMM) que según las ecuaciones de atenuación para Quito, corresponden a una magnitud 7,0 (KRichter), y una aceleración del suelo $a_c = 0,15g$ que es interpretada como el sismo de comprobación o sismo de diseño murario (s_{cm}).

ESTUDIO SISMO-RESISTENTE DE LA CONSTRUCCIÓN PATRIMONIAL EN ADOBE

Planteamiento del segmento de masa crítica muraria (m_{cm}) para el análisis sísmico

Estructuralmente, el segmento m_{cm} fue definido como un elemento de muro fisurado, infinitamente rígido por las características geométricas e infinitamente plástico por la libertad de giro del apoyo inferior fisurado y simplemente apoyado. Esta definición del elemento m_{cm} coincide con la conceptualización de GiorgioCrocì [13], referente a los muros de adobe agrietados y con lo planteado a continuación.

Identificación del segmento m_{cm} en muros de adobe:

Para el análisis estructural, toma especial significación la identificación del segmento m_{cm} , como el elemento representativo del muro. A continuación se describen algunas indicaciones que servirán de ayuda para identificar el segmento m_{cm} en los muros dañados. Los sitios de posibles concentraciones de esfuerzos, establecen el origen de las trazas de fisuración, las mismas que se desarrollan según dos tendencias básicas, que fueron definidas como sistemas de fisuras verticales y horizontales. Ver figura 3.

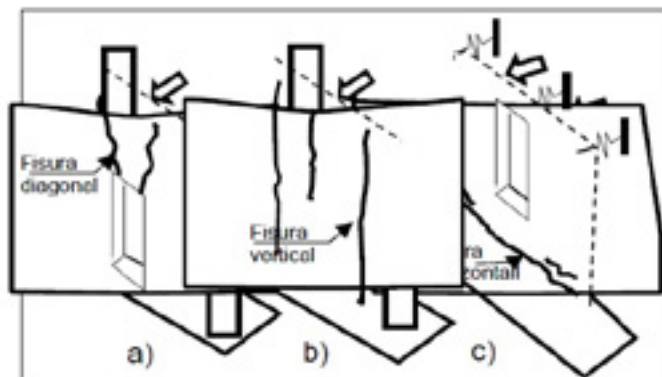


Fig. 3. Esquema de muro deformado por sismo y trazas de agrietamientos típicos por flexión y cortante: a) y b) Fisuras verticales en muros arriostrados lateralmente por muros normales (con y sin aberturas); c) Fisuras horizontales en muro apoyado lateralmente en las estructura de entrepiso y/o cubierta

- *Segmentos mcm, por fisuración vertical o inclinada.*

Las trazas verticales se localizan en sitios de discontinuidad coincidentes con las aberturas de puertas y ventanas y/o con los sitios aledaños a los cruces entre muros normales. Un caso especial son los segmentos de muros continuos de gran longitud sin aberturas (figura 3b); estos segmentos son delimitados por fisuraciones verticales localizadas en las inmediaciones del centro del vano y/o en las proximidades de los muros normales, son los de mayor significación para la respuesta sísmica muraria debido a que la inercia de su masa ocasiona corrimientos importantes fuera del plano cuando los apoyos laterales no controlan adecuadamente los desplazamientos por falta de rigidez y/o resistencia.

- *Segmentos mcm, por fisuración horizontal.*

Aparecen en las secciones inferiores de los segmentos como una consecuencia de los corrimientos fuera del plano y la fragilidad del material. Estas fisuraciones ocasionadas por la restricción a los desplazamientos de la estructura de entrepiso en las edificaciones de dos niveles, independizan los muros de planta baja con los de planta alta, determinando una condición de apoyo simple para los segmentos *mcm* inferior y superior.

- *Segmentos de muro por fisuración inclinada.*

Las trazas de estas fisuras son causadas por: a) Esfuerzos cortantes ocasionados por asentamientos diferenciales del suelo; b) Por concentración de esfuerzos cortantes en las esquinas superiores de las aberturas por solicitaciones sísmicas en el plano del muro; c) Golpeteo entre muros normales por diferencia de frecuencias y desplazamientos.

Esquema estructural (modelo) para edificaciones de adobe

Sobre la base de la definición de segmento de masa crítica muraria *mcm*, se esquematizaron dos modelos matemáticos para el análisis estructural de las edificaciones de uno y dos niveles.

a) Esquema del segmento *mcm* para edificaciones de muros de un nivel

La figura 4 representa las condiciones de apoyo y arriostramiento lateral del segmento *mcm* de un muro solicitado el empuje sísmico EQ y por el peso G. El segmento *mcm* se conceptualizó como un elemento isostático, simplemente apoyado sobre la cimentación y arriostrado elásticamente en el extremo superior por las estructuras de cubierta y viga solera; el apoyo inferior se caracteriza por ser una sección fisurada por los corrimientos (cabeceo) del segmento. La resistencia del apoyo elástico lateral en el extremo superior del muro, se genera por la rigidez de la viga solera y la estructura de cubierta unidas al segmento *mcm*.

b) Esquema del segmento *mcm* para edificaciones de muros de dos niveles

En las edificaciones de dos niveles hay una independencia estructural entre los muros inferior y superior, razón por la cual la esquematización de los dos segmentos *mcm* sigue el mismo patrón que para edificaciones de un nivel. Lo anterior permite considerar dos segmentos *mcm* estructuralmente similares, como se muestra en la figura 5, caracterizados por las condiciones de apoyo simple en la base y apoyados elásticamente en las estructuras de entrepiso y cubierta.

Espectro sísmico para análisis de edificaciones de adobe

Es necesario considerar que una forma espectral representa la respuesta dinámica del segmento *mcm* al empuje sísmico ocasionado por la aceleración del suelo local y los parámetros dinámicos del segmento dados por su masa y la rigidez de los sistemas colaborantes de arriostramiento lateral de la edificación.

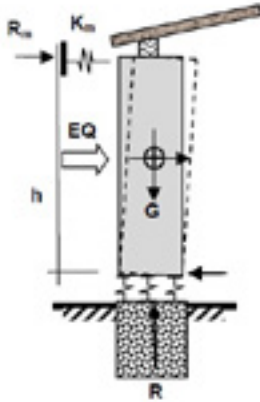


Fig. 4. Segmento mcm muro de un nivel

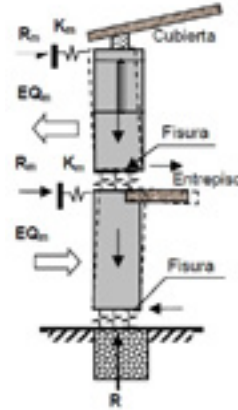


Fig. 5. Segmento mcm de muro de dos niveles

Espectro sísmico propuesto por ATC-3

Los espectros sísmicos para el análisis y diseño de edificios propuestos por varios códigos en América fueron desarrollados sobre la base de ATC-3 [15], que caracteriza la respuesta dinámica en función del coeficiente sísmico (C_s), del período natural (T) y de la aceleración pico efectiva del suelo ($S \cdot A_v$) mediante la ecuación:

$$C_s = 1,2 \cdot S \cdot A_v / R \cdot T^{2/3} \quad (1)$$

Espectro sísmico murario para edificaciones de adobe

El estudio del comportamiento dinámico del segmento *mcm* se formuló considerando los criterios del coeficiente sísmico (C_s) propuesto por ATC-3 para el desarrollo del *coeficiente sísmico murario*, C_{sm} de la respuesta sísmica, esquemáticos y modelados anteriormente.

- *Desarrollo del espectro sísmico murario (Esmu)*: El espectro contiene tres sectores que lo definen: el coeficiente sísmico murario C_{sm} en función del período del segmento *mcm* (T_m), el período del suelo (T_s) y de la rigidez del apoyo lateral superior (K_m). Ver figura 6.

a) Primer sector espectral: El valor el coeficiente sísmico de respuesta C_{sm} es caracterizado por una respuesta constante a los desplazamientos de los segmentos *mcm* de tamaño reducido y período corto (T_m), igual o menor que el período del suelo (T_s) cuyo valor se define como:

$$C_{sm} = a_c / T_s \quad (2)$$

modificado por el coeficiente de conversión de escalas $F_{ss} = 1,2$, que atenúa las incertidumbres de la transformación de escalas de intensidades sísmicas a aceleraciones.

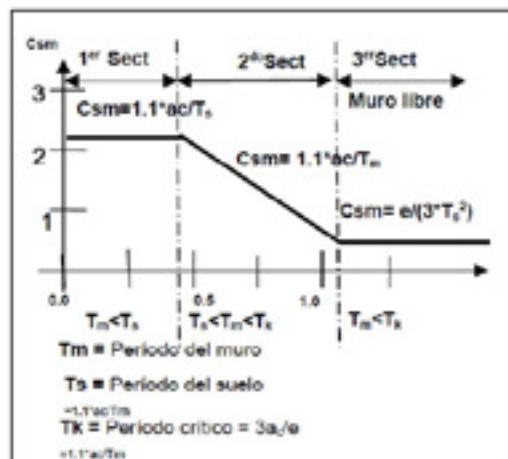


Fig. 6. Espectro Esmu para muros de tierra

$$C_{sm} = 1,2 \cdot a_c / T_s \quad (3)$$

y el empuje sísmico será:

$$EQ = C_{sm} \cdot W \quad (4)$$

b) Segundo sector espectral:

Este sector define la respuesta sísmica del segmento *mcm* para períodos mayores que los del suelo ($T_m > T_s$), cuyo coeficiente sísmico de respuesta es definido como:

$$C_{sm} = F_{ss} \cdot a_c / T_m \quad (5)$$

Es caracterizado por la ecuación:

$$T_m = 2 \cdot (W/Km)^{1/2} \quad (6)$$

cuyo valor depende de la masa o peso (G) del segmento *mcm* y de la rigidez de los apoyos laterales Km del entrepiso y/o cubierta.

Debe notarse que la degradación o pérdida del apoyo lateral (Km) puede cambiar la condición de apoyo del segmento *mcm* de isostático doblemente apoyado, a la de muro libre simplemente apoyado en la base.

La determinación del empuje sísmico del segmento *mcm*, no requiere de un factor de seguridad, debido a que la edificación ya ha demostrado, para sismos pasados, ser estable y segura para la aceleración de diseño o de comprobación.

El empuje sísmico para la comprobación estructural y el diseño de la intervención será:

$$EQ = C_{sm} \cdot W \quad (7)$$

c) Tercer sector espectral:

El tercer sector espectral, es complementario a los dos sectores anteriores, establece el coeficiente sísmico murario, C_{sm} para segmentos de muros cuyo período sea mayor que el crítico T_k .

Empuje sísmico para muros libres

La respuesta dinámica para muros libres $EQ = C_{sm} \cdot W$ se establece considerando que la estabilidad de estos muros depende únicamente del equilibrio estático entre el momento estabilizante del peso propio del muro y el empuje sísmico. Ver figura 7.

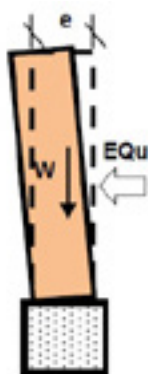


Fig. 7. Muro libre (sin apoyo) lateral

Los muros libres son definidos por la aceleración (am) de respuesta sísmica del segmento *mcm* según en la ecuación general del movimiento: $m \cdot a + \xi \cdot v + k \cdot u = p_t = P \cdot \text{sen}(\omega t)$; Si $p_t = 0$ y $\xi = 0$ y se divide la ecuación para la masa (m) haciendo que $k/m = \omega^2$ por lo cual se obtiene la ecuación $(a + u \cdot \omega^2 = 0)$, cuya solución homogénea es el vector del desplazamiento

$$u_t = A \cdot (\cos \omega T) + B \cdot (\text{sen} \omega T) \quad (8)$$

cuya derivada es la aceleración del segmento:

$$a_m = \omega^2 A \cdot (\cos \omega T) - \omega^2 B \cdot (\sin \omega T) \quad (9)$$

Que para un desplazamiento inicial (u_0) o una velocidad inicial (v_0), correspondientes a las constantes $A = u_0$ y $B = v_0/\omega$ la aceleración es:

$$a_m = u_0 \cdot \omega^2 \quad (10)$$

Para un segmento de muro libre de espesor (e) y peso (W), el desplazamiento inicial crítico (u_0) para su estabilidad estática será: $u_0 = e/3$; y el período (T_m) del segmento es considerado similar al del suelo (T_s). Para estas condiciones la aceleración máxima de respuesta, según la ecuación anterior, será:

$$a_m = (e/3) \cdot (1/T_s)^2 = e/(3 \cdot T_s^2) \quad (11)$$

y ocasionaría el máximo empuje sísmico para la estabilidad estática del segmento. Esta aceleración es denominada en este estudio como *coeficiente sísmico murario* C_{sm} .

$$a_m = C_{sm} = e/(3 \cdot T_s^2) \quad (12)$$

El empuje sísmico (EQ) para la comprobación de la estabilidad sismo-resistente de los muros libres, requiere de un factor de seguridad (FS) por la incertidumbre del comportamiento, cuyo valor de 1,3 fue adoptado según las recomendaciones del Código ATC-3.

$$EQ = FS \cdot W \cdot C_{sm} \quad (13)$$

$$EQ = 1,3 \cdot W \cdot e/(3 \cdot T_s^2) \quad (14)$$

Definición de parámetros del espectro sísmico murario (Esmu)

El comportamiento sísmico y la forma espectral de los muros agrietados de las edificaciones patrimoniales de adobe, presentado en los acápites anteriores definen el *coeficiente sísmico murario* (C_{sm}), cuyos factores y compatibilidad con las formas espectrales propuestas en ATC-3, se presentan a continuación:

- Para el desarrollo del espectro sísmico murario (*Esmu*) no se utilizaron los coeficientes ATC-3 del suelo local que modifican la aceleración del suelo, considerando que no existe una interacción suelo-estructura debido a la discontinuidad entre el suelo y los muros por el estado de fisuración.
- No se utilizó ningún coeficiente de modificación de la respuesta por efecto de disipación de energía, considerando la fragilidad y la inelasticidad del material adobe.
- La aceleración del *suelo* *ac es igual a la del sismo de comprobación o diseño murario (scm)* e interpretada como la máxima aceleración sísmica resistida por la edificación, considerando los principios conservacionistas patrimoniales dados en la Carta de Venecia de la UNESCO [2]. Por esta razón no se utilizaron los coeficientes probabilísticos propuestos para la aceleración sísmica efectiva utilizada por ATC-3 para la construcción con materiales modernos.
- El período fundamental adoptado para el segmento *mcm*, fue calculado considerando su peso propio y la rigidez de los arriostramientos laterales de entrepiso y/o cubierta, este concepto modificó las hipótesis utilizadas para edificios de material elástico en cantilever empotrados en la base.
- El período del suelo T_s se definió sobre la base de mediciones geofísicas superficiales realizadas en el área en estudio.

PRINCIPIOS PARA LA INTERVENCIÓN DE ADECUACIÓN SÍSMICA EN LA CONSTRUCCIÓN PATRIMONIAL DE ADOBE

Históricamente se ha evidenciado que los empujes sísmicos producen algún tipo de afectación en las construcciones patrimoniales en adobe, esta realidad aceptada ha motivado un afán en la conservación del patrimonio cultural basados en los principios preservacionistas de la Carta de Venecia de la UNESCO [2].

“El problema al realizar una reparación sísmica de estructuras históricas radica en la dificultad para encontrar un equilibrio entre las intervenciones que reduzcan el riesgo de pérdidas de vidas humanas sin destruir inútilmente porciones de la construcción original”.

Principios conservacionistas para el diseño de la intervención estructural

El conocimiento del comportamiento sísmico de las edificaciones patrimoniales en tierra ha permitido el desarrollo de habilidades constructivas y técnicas preservacionistas con tecnologías modernas y nuevos materiales. Algunos autores describen la necesidad y la importancia de la preservación de los valores culturales y el respeto a las técnicas constructivas tradicionales.

“La naturaleza del adobe y la forma en que este se utiliza como material de construcción, debe considerarse en el diseño de medidas de adecuación sísmica”.

“Es imposible evitar que las construcciones de adobe no se agrieten durante sismos importantes. Resulta por tanto imperativo, que la base teórica de un análisis estructural considere esencialmente el comportamiento dinámico de las estructuras agrietadas de adobe”.

La conservación de las edificaciones patrimoniales ha respondido a dos posturas ideológicas: la francesa de Violletle-Duc (1858) que sintetiza los principios conservacionistas como una restauración-reintegración y la inglesa de Ruskin basada en los principios metodológicos de estabilización-conservación. Estas dos posturas armonizaron los métodos hoy utilizados basados en los principios aceptados por la UNESCO, tales como: Los contenidos en las “Recomendaciones para el análisis, construcción y restauración estructural del patrimonio arquitectónico”, ICOMOS. Ver tabla 2.

Tabla 2. Principios y conceptos preservacionistas

Principios	Alcance
Estudiar y comprender la edificación en su totalidad	Requiere investigar aspectos como: estudios históricos del período formativo; comportamiento sísmico e intervenciones; estudios de materiales, sistemas constructivos y patología de la edificación. La intervención requiere de una revisión crítica de los conflictos que surjan entre los valores estéticos e históricos para ser resueltos mediante la evaluación de toda la información disponible. Este proceso también está dirigido a evaluar la necesidad de efectuar alteraciones de la estructura
CONCEPTO: Mínima intervención	Considera el diseño de una intervención y el grado y profundidad de cambios en una estructura. Reducir las intervenciones para preservar la mayor parte de la construcción original y salvaguardar su autenticidad
CONCEPTO: Reversibilidad de la intervención	Las alteraciones hechas deberían poder eliminarse en el futuro sin dañar de manera significativa la estructura original, requiere de tecnologías de avanzada, descartando toda alteración inapropiada. Promueve intervenciones aditivas y desalienta la eliminación de materiales o detalles arquitectónicos originales. Toda modificación se convierte en parte de la historia del edificio por lo que una intervención no reversible se convierte en permanente
CONCEPTO: Renovación de la intervención	Se refiere al planteamiento y ejecución de una intervención para no acumular cambios y/o residuos visibles y permanentes o cualquier otra consecuencia negativa que pudiera restringir la introducción de modificaciones en el futuro. Cuando no es imposible eliminar completamente los elementos estructurales añadidos, una intervención futura estará encaminada a mejorar el monumento con materiales o procedimientos de adecuación más apropiados
CONCEPTO: Uso de materiales idénticos	Promueve el uso de materiales idénticos o similares pero estructuralmente compatibles al reforzar, reparar o reemplazar partes deterioradas de una estructura con el fin de garantizar un comportamiento homogéneo de la misma
CONCEPTO: Mantenimiento	Minimiza la necesidad de intervenciones futuras. Pone en valor su uso actual y estimula los usos probables en el futuro. Es importante reparar en forma periódica las grietas de los muros y renovar los enlucidos de barro, como parte integral de la tradición y cultura local

Criterios sismo-resistentes para la intervención de adecuación sísmica

La adecuación sísmica deberá cumplir con objetivos de diseño adicionales, tales como: minimizar los efectos de la intervención sobre la integridad de la construcción histórica y los cambios en la apariencia de la construcción; mantener el principio de renovación de la intervención en la estructura y su apariencia; protección selectiva de detalles arquitectónicos o históricos y minimizar los daños menores por terremotos leves moderados (magnitud Richter < 6) y los daños estructurales para terremotos mayores (magnitud Richter > 6).

En la tabla 3 se sintetiza, para diferentes tipologías murarias en tierra, los niveles de intervención requeridos en función de los objetivos de seguridad para la vida y de la preservación del patrimonio construido, se muestran también las técnicas de intervención requeridas en cada caso, según Vargas Neumann [16].

El comportamiento sísmico de los muros de adobe en edificaciones patrimoniales en zonas de riesgo, fue estudiado considerando que dichos muros, en su estado de agrietamiento inicial, han sido capaces de resistir varios sismos con ligeras afectaciones y fue caracterizado por la respuesta sísmica de un segmento del muro agrietado, denominado segmento de masa crítica muraria (*mcm*), al ser solicitado por la aceleración del sismo de comprobación o diseño murario (a_c), definido como la máxima aceleración sísmica que un monumento patrimonial resistiría sin daños mayores.

La identificación del segmento *mcm* se dificulta debido a que las intervenciones de mantenimiento no evidencian el estado de fisuración real, presentándose algunas directrices que permiten reconocer las tendencias de las trazas de fisuración.

La esquematización del segmento *mcm* y el desarrollo de un modelo matemático estructural que posibilite el análisis de la respuesta dinámica, se realiza utilizando una forma espectral que define un valor de la aceleración de respuesta mediante el criterio de coeficiente sísmico murario C_{sm} , cuyo valor depende del período fundamental T_m determinado por el peso del segmento y la rigidez de los sistemas de entrepiso y cubierta.

Para el diseño de la intervención de mejoramiento sismo-resistente de las edificaciones patrimoniales de adobe. Se exponen en la tabla 3 algunos criterios y lineamientos basados en los principios conservacionistas, y en los criterios sismo-resistentes para la intervención de adecuación sísmica.

Tabla 3. Niveles de diseño para la intervención de mejoramiento sísmico

	Niveles de intervención	Objetivos de la intervención	Lineamientos para la intervención
Muros anchos $H/t < 6$ y medianos $H/t < 8$	MÍNIMO	<ul style="list-style-type: none"> Protección de la vida Mejorar la estabilidad muraria 	-Construcción de anclajes (conexiones) entre la viga solera y el muro
	MODERADO	<ul style="list-style-type: none"> Protección de la vida Mejorar la estabilidad muraria 	- Utilizar sistemas de vigas soleras perimetrales cerrada ancladas a los muros
	ALTO	<ul style="list-style-type: none"> Protección de la vida Mejorar la estabilidad muraria Control de grietas inclinadas Control de desplazamientos fuera del plano 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizar sistemas de vigas soleras perimetrales cerrada ancladas a los muros -Construcción de tensores (tirantes) adheridos a los muros y anclados en los extremos. Los tensores se ubicarán cerca de viga solera y/o del entrepiso
Muros delgados $H/t > 8$	MÍNIMO	<ul style="list-style-type: none"> Protección de la vida Mejorar la estabilidad muraria 	- Construcción de anclajes (conexiones) entre la viga solera y el muro
	MODERADO	<ul style="list-style-type: none"> Protección de la vida Mejorar la estabilidad muraria Control de grietas inclinadas Control de volcamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción de anclajes (conexiones) entre la viga solera y el muro - Construcción de tensores (tirantes) adheridos a los muros y anclados en los extremos. Los tensores se ubicarán cerca de la viga solera y/o del entrepiso - Construcción de sistemas de tensores entre muros paralelos, ubicados a nivel del entrepiso o la cubierta, anclados exteriormente a los muros
	ALTO	<ul style="list-style-type: none"> Protección de la vida Mejorar la estabilidad muraria Control de grietas inclinadas Control de desplazamientos fuera del plano Control de volcamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción de anclajes (conexiones) entre la viga solera y el muro - Construcción de tensores (tirantes) adheridos a los muros y anclados en los extremos. Los tensores se ubicarán cerca de viga solera y/o del entrepiso - Construcción de sistemas de tensores entre muros paralelos, ubicados a nivel del entrepiso o la cubierta, anclados exteriormente a los muros - Rigidizar muros y vínculos con cimentación para evitar volcamiento

CONCLUSIONES

- El comportamiento sísmico de los muros en tierra en las edificaciones patrimoniales se evalúa estructuralmente por la respuesta sísmica de un segmento representativo del muro agrietado, denominado segmento de masa crítica muraria (*mcm*).

- El análisis sismo-resistente de las edificaciones patrimoniales en tierra es una herramienta necesaria para la salvaguarda del patrimonio construido, que demanda un conocimiento científico de su comportamiento dinámico, frente a la aceleración del sismo de comprobación o de diseño (a_c), para el cual la edificación ha mostrado ser estable y segura.

- La planificación y desarrollo de una intervención de adecuación sísmica está dirigida a consolidar y asegurar los sistemas resistentes de la edificación dentro de los principios preservacionistas mediante el uso de materiales compatibles con los tradicionales en tierra y la adopción de tecnologías y materiales modernos compatibles con los lineamientos internacionales preservacionistas dictaminados por la UNESCO [17].

REFERENCIAS

1. Leroy Tolles E, et al. Guías de planeamiento e ingeniería para la estabilización sismo-resistente de estructuras históricas de adobe. Los Ángeles, USA; 2002.
2. ICOMOS CdV. In: II Congreso internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos; Venecia, Italia 1964. [Citado Disponible en: www.icomos.org/docs/venice_es.html].
3. Morán M. Afectaciones estructurales y ambientales producidas por el tráfico vehicular en la calle Juan Jaramillo de la ciudad de Cuenca. Ecuador: Gobierno Municipal de Cuenca; 2009.
4. Torrevalva D. Seminar on historical earthen buildings characterization and strengthening of historic adobe structures. Peru: Pontifical Catholic University of Peru; 2015.
5. Leroy Tolles E, et al. Guías de planeamiento e ingeniería para la estabilización sismo-resistente de estructuras históricas de adobe. Los Ángeles, USA Getty Seismic Adobe Project (GSAP); 2002.
6. Blondet M, Vargas J, Tarque N, et al. Construcción sismo-resistente en tierra: La gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*. 2011;63(523):41-50.
7. Cancino C, Lardinois S, et al. Earthen Architecture Initiative Seismic Retrofitting Project: A Bibliography. Los Angeles, USA: Getty Conservation Institute; 2014.
8. Figueiredo A, Varum H, Costa A, et al. Seismic retrofitting of an adobe masonry wall. Portugal: Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro; 2012.
9. Fonseca Ferreira C, D'Ayala D. Seismic assessment an retrofitting of peruvian earthen churches by means of numerical modelling. In: 15th Word Conference Earthquake Engineering Lisboa; Portugal: 2012.
10. Piattoni Q, Quagliarini E, Lenci S. Experimental analysis and modeling of the mechanical behavior of earth bricks. *Constructions and Building Materials*. 2011;25(4):2067-75. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.combuildmat.2010.11.039>.
11. Varuma H, Costab A, Fonseca J, et al. Behavior characterization and rehabilitation of adobe construction. USA; 2015.
12. Morán N. Visión general sobre la historia sísmica de Quito. Quito, Ecuador; 2009.
13. Croci G. The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. Roma, Italia; 2002.
14. Morán M. Criterios para evaluar las patologías en las construcciones de tierra en zonas sísmicas. In: *Reforzamiento Estructural en las Edificaciones Patrimoniales*; 2004. p. 83-102.
15. Disposiciones Tentativas para Desarrollar Códigos Sísmicos para Edificios. California, EUA: ATC-3 Applied Technology Council; 1978.
16. Vargas JN. Ottazzi. Gianfranco, Investigaciones en adobe, Earthen buildings in seismic areas;1981.
17. UNESCO. Declaration Concerning the Intentional Destruction of Cultural Heritage. In: *Actas de la Conferencia General 32a reunión de París*; París, Francia: UNESCO; 2004.