

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL BASADA EN DESPLAZAMIENTOS PARA EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA, EL DESARROLLO MEXICANO

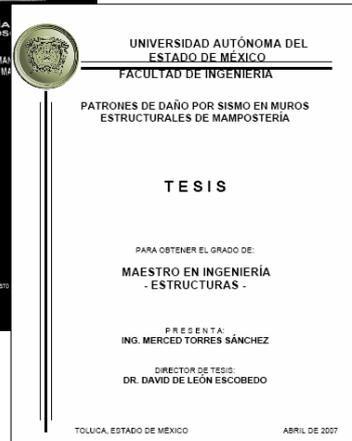
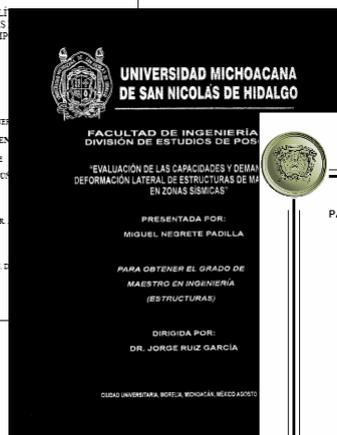
Amador Terán Gilmore



2do. Curso ALEMANIA-MÉXICO-PERÚ
CISMID-FIC-UNI



M. en I. Leonardo Flores



Dr. Jorge Ruiz

ANTECEDENTES

Las tendencias arquitectónicas y las necesidades de urbanización han dado lugar a edificaciones de mampostería cuya estructuración se aleja de las condiciones de regularidad que fomentan un desempeño sísmico adecuado.



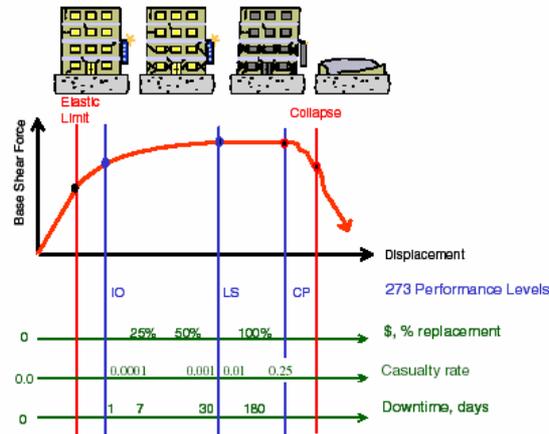
El mal desempeño de algunas estructuras se debe a eficiencias y lagunas existentes en los procedimientos actuales de diseño sísmico.

La falta de atención a demandas que pueden ser relevantes para el desempeño sísmico contrasta con un contexto donde la función del ingeniero estructural contempla la obligación de satisfacer las muchas necesidades y expectativas, técnicas y socioeconómicas, que en las últimas décadas han surgido alrededor de la construcción de obras de ingeniería civil.



Dado el gran número de edificaciones de mampostería ubicadas en zonas de alto peligro sísmico resulta relevante desarrollar herramientas que sean capaces de estimar las distribuciones de fuerzas y desplazamientos en su rango inelástico de comportamiento. Es necesario establecer criterios de análisis y diseño cuyo principal objetivo sea reducir su vulnerabilidad a través del control explícito de su respuesta dinámica.

Se ha observado que los niveles de daño no estructural y de degradación estructural que una estructura exhibe dependen de la demanda máxima de deformación lateral.

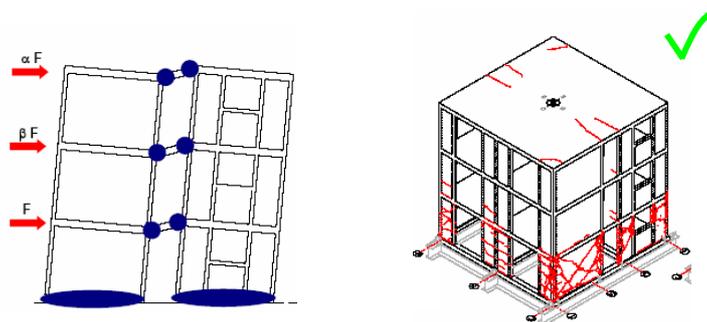


CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA

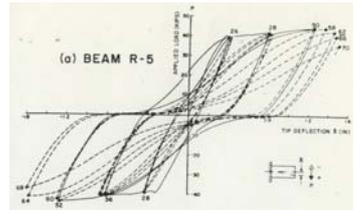
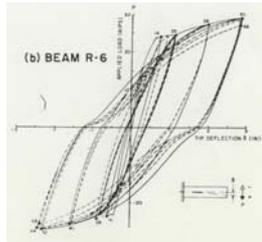
En las últimas décadas, ha habido un cambio en el enfoque del diseño sísmico. Más que diseñar las estructuras para que resistan un determinado conjunto de demandas, se ha considerado necesario limitar las opciones que tiene la estructura para responder ante excitaciones sísmicas de diferente intensidad.

Para hacer posible un control adecuado de su respuesta sísmica, el comportamiento dinámico de las estructuras debe exhibir tres características: consistencia, estabilidad y control.

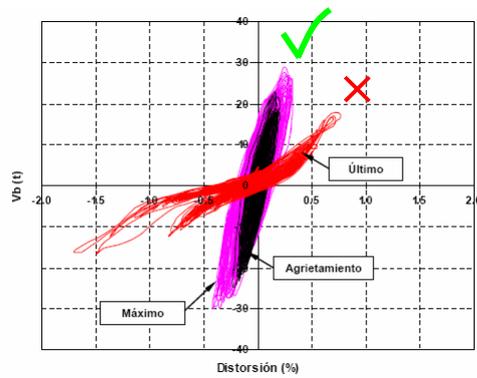
- **Consistencia**



- Estabilidad

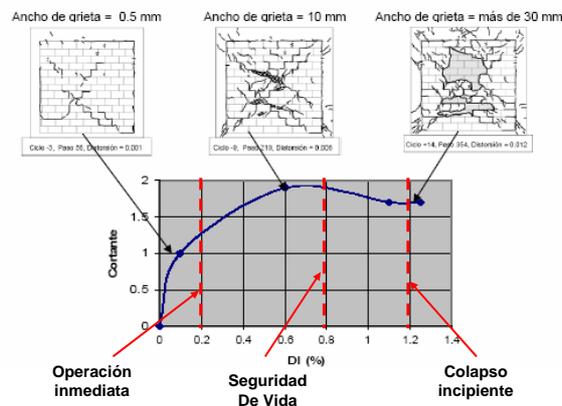


- Control



Es importante fomentar la aparición de un mecanismo inelástico consistente, y usar un detallado que establezca el comportamiento inelástico de la estructura. Además, es necesario aportar una combinación de propiedades estructurales (resistencia y rigidez) que permitan controlar la respuesta dinámica dentro de límites consistentes con los niveles aceptables de daño.

En años recientes, se ha ido consolidado el planteamiento de que el control de las demanda máxima de deformación lateral es una manera racional y efectiva de controlar el daño estructural y no estructural.

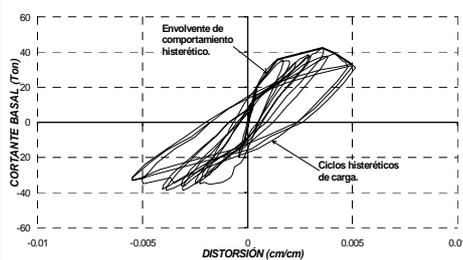


Controlar la distorsión máxima de entrepiso requiere controlar el desplazamiento de azotea. Una vez establecido un umbral para el desplazamiento de azotea, es necesario utilizar espectros de respuesta para determinar las propiedades estructurales requeridas para controlar adecuadamente la respuesta dinámica de la estructura.

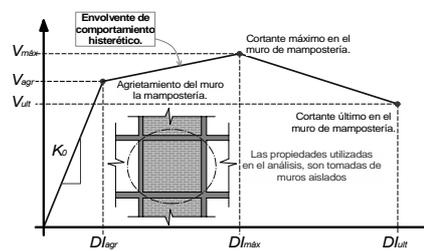
COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA ANTE CARGA LATERAL

Aunque el daño excesivo observado en estructuras de mampostería ha llegado a ganarle a la mampostería una mala reputación, es claro que con el debido cuidado durante su diseño y detallado, la mampostería resulta una buena alternativa para la sismorresistencia.

La envoltura de comportamiento histerético permite caracterizar el comportamiento de los elementos de mampostería.

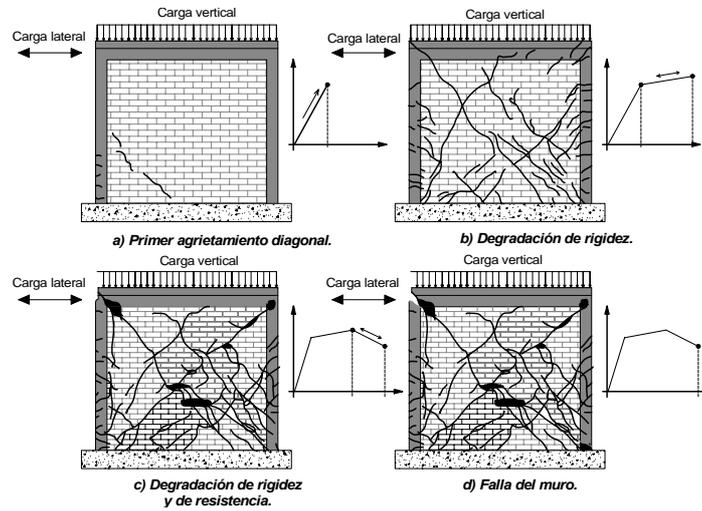


Experimental

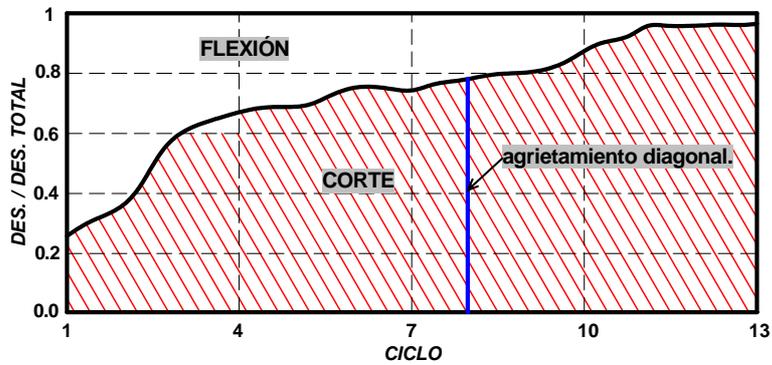


Flores y Alcocer (1995)

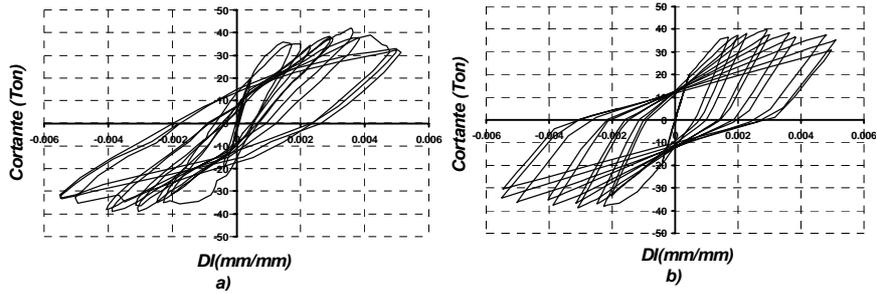
Puntos de cambio en la envolvente delimitan diferentes etapas de comportamiento y de nivel de daño.



A partir de su agrietamiento diagonal, la respuesta de los muros de mampostería queda progresivamente controlada por su deformación a corte.

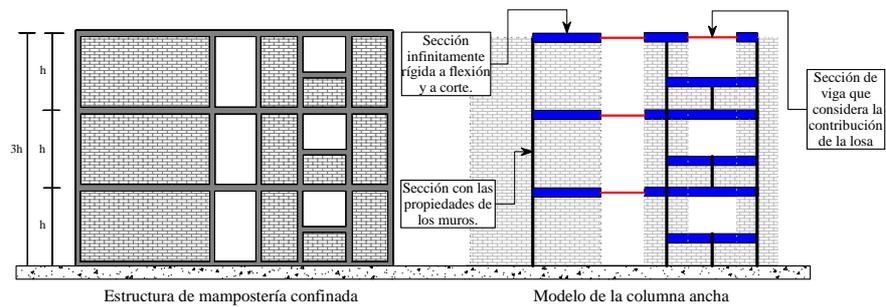


El planteamiento de un método para estimar la respuesta dinámica máxima de una estructura requiere caracterizar, además de la envolvente, la posible degradación estructural que ocurre en presencia de cargas cíclicas.



MODELO DE LA COLUMNA ANCHA

El modelo analítico de un edificio de mampostería debe estar constituido por un ensamblaje de elementos estructurales que tomen en consideración las propiedades mecánicas de la mampostería. La práctica mexicana utilizar el modelo de la columna ancha para el análisis y diseño de edificaciones de mampostería.

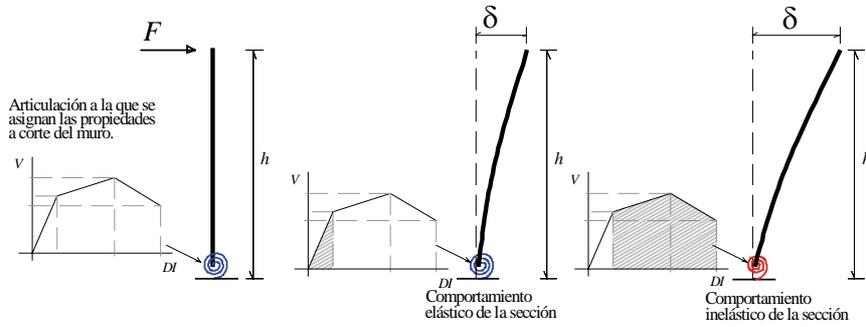


El modelo de la columna ancha es capaz de estimar de manera razonable la rigidez lateral elástica medida experimentalmente en varios especímenes de mampostería.

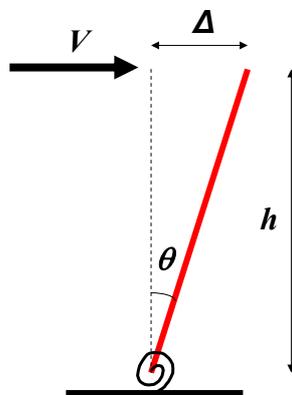
Especímen	Rigidez Experimental (Ton/cm)			Rigidez Teórica (Ton/cm)
	$K_0 (+)$	$K_0 (-)$	K_0 (Promedio)	
Especímen <i>WW</i>	113.51	104.48	109.00	104.77
Especímen <i>WBW</i>	88.07	88.07	88.07	95.12
Especímen <i>WWW</i>	128.09	144.19	136.14	101.56
Especímen <i>3D</i>	113.87	165.12	139.47	130.57

Zúñiga (2005) plantea un modelo modificado de la columna ancha, que asocia a la componente de deformación por corte la degradación estructural del muro de mampostería. Esto implica que después del agrietamiento diagonal, la rigidez a flexión del muro se mantiene constante mientras que las propiedades estructurales por corte son modificadas conforme se incrementa la distorsión lateral.

Modelo modificado de la columna ancha



El resorte se ubica en la base de los muros con el fin de relacionar su comportamiento no lineal con la distorsión a corte. A partir de dicha distorsión, es posible establecer la evolución del daño estructural en función del desplazamiento de azotea.



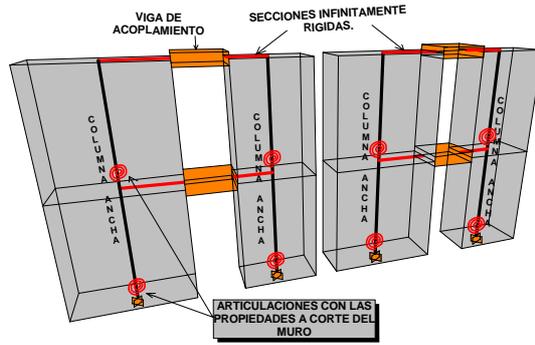
$$V = K_V \Delta$$

$$M = K_R \theta \Rightarrow Vh = K_R \frac{\Delta}{h}$$

$$V = \frac{K_R}{h^2} \Delta$$

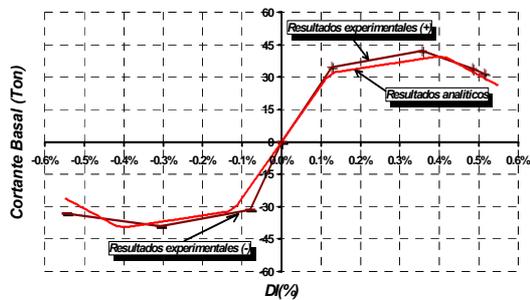
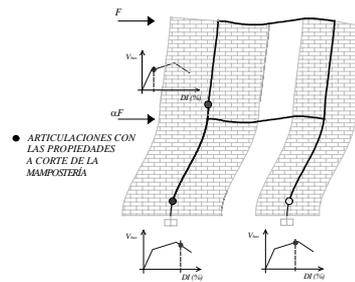
$$\therefore K_R = \frac{K_V}{h^2}$$

Para evaluar la capacidad del modelo modificado de la columna ancha para estimar el comportamiento no lineal de la mampostería, se modelaron varios especímenes estudiados experimentalmente en México.



Espécimen 3D (Alcocer 1993)

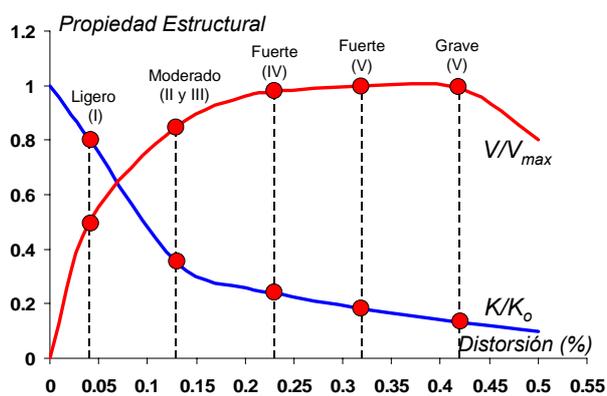
A partir de una análisis estático no lineal bajo desplazamiento lateral monótonamente creciente, es posible estimar la curva de capacidad del espécimen 3D.



Así como el comportamiento local de cada muro.

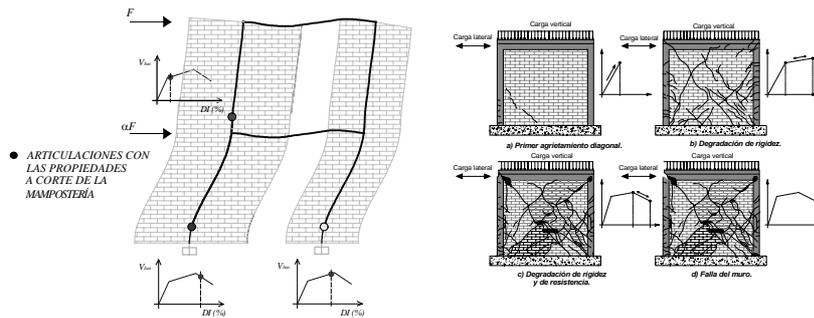
Determinación del Nivel de Daño Local en la Mampostería

Una opción consiste en relacionar la distorsión a corte del muro con niveles específicos de degradación estructural.



(Ruiz, Sánchez y Alcocer 1998)

Otra opción consiste en asociar directamente las demandas de comportamiento no lineal con una región de comportamiento caracterizada por determinado patrón de grietas y nivel de degradación.



DISEÑO POR DESEMPEÑO

Las pérdidas originadas a raíz de eventos sísmicos recientes, han llevado a la comunidad de ingeniería estructural a recapacitar acerca de las necesidades y expectativas, técnicas y socioeconómicas, que surgen de la construcción de obras de ingeniería civil. Se ha concluido que estas se han refinado con el tiempo, de tal manera que el nivel de riesgo sísmico en las zonas urbanas no se ha reducido, sino crecido de manera preocupante. Es necesario actualizar algunas de las bases que han sustentado al diseño sísmico práctico por muchos años.

Nuevo paradigma:

Integral. El proceso de diseño sísmico debe abarcar todos los aspectos y parámetros relevantes para el buen desempeño sísmico de la estructura.

Sistémico. Las propiedades de las partes no son propiedades intrínsecas, sino que solo pueden ser comprendidas en el contexto de un conjunto mayor. Es necesario tanto atender las partes como los patrones de relacionamiento.

Diseño basado en el control de la respuesta dinámica. Se busca que la estructura alcance el desempeño deseado ante sismos de diferente intensidad a través de controlar su nivel de movimiento.

Comité Visión 2000 (SEAOC)

FASE CONCEPTUAL



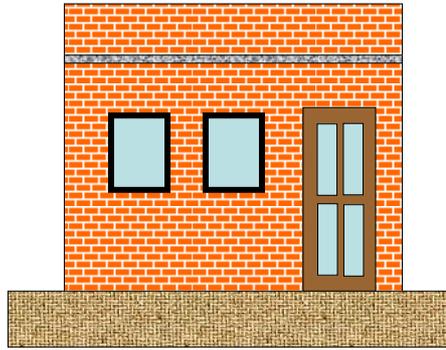
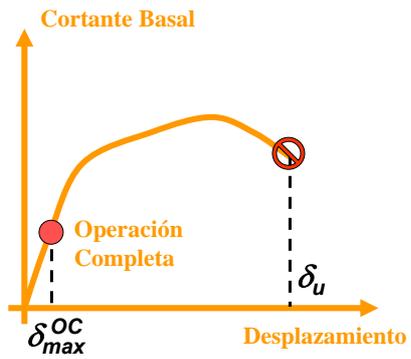
FASE NUMÉRICA



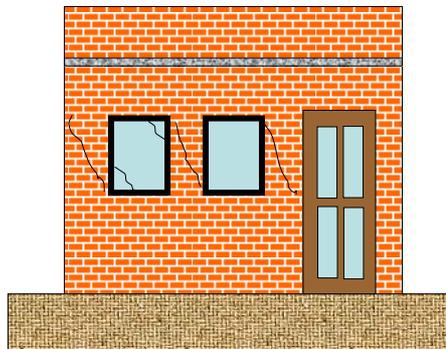
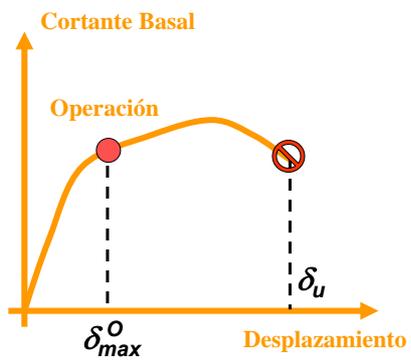
IMPLANTACIÓN

LA FASE CONCEPTUAL

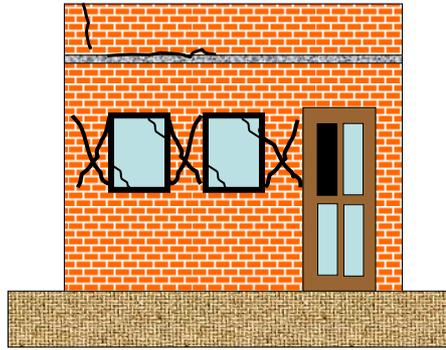
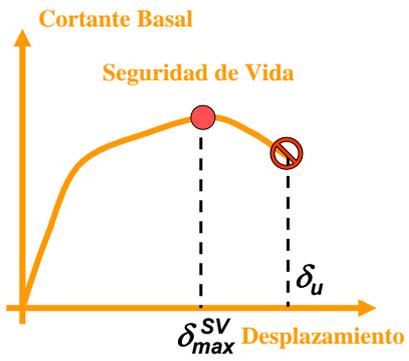
ESTADOS LÍMITE



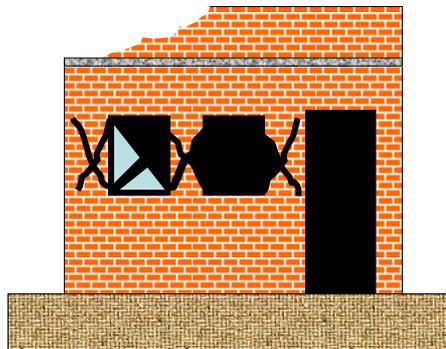
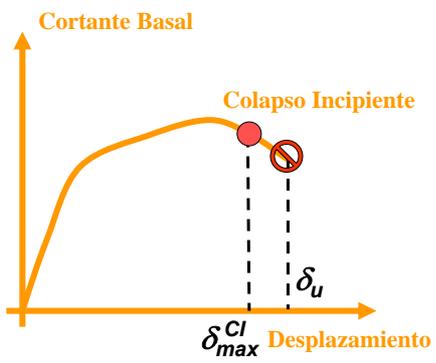
ESTADOS LÍMITE



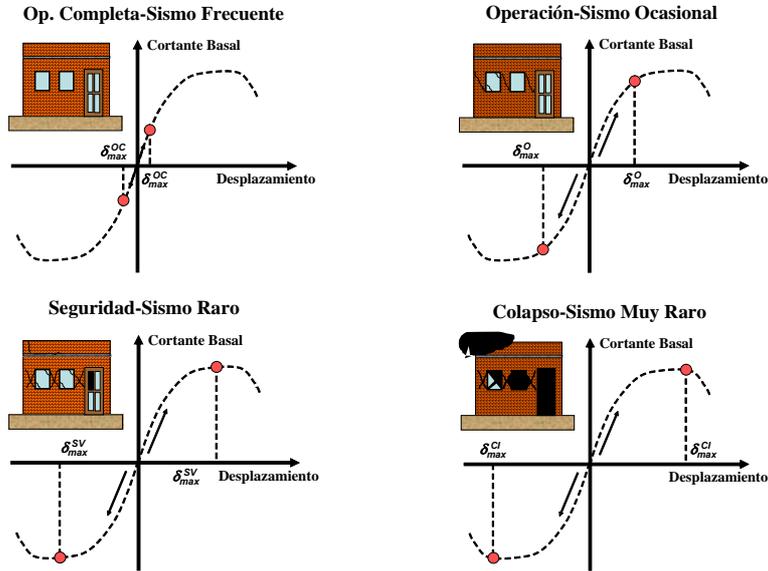
ESTADOS LÍMITE



ESTADOS LÍMITE



Objetivos de diseño para estructura de ocupación estándar



Objetivos de Diseño

Criterio Desemp. Nivel Sísmico	Operación Completa	Operación	Seguridad de Vida	Colapso Incipiente
Frecuente	□	Estructuras de Ocupación Estándar	DESEMPEÑO INACEPTABLE	□
Ocasional	●			
Raro	▲			
Muy raro	○			
		Estructuras Esenciales/Peligrosas		
		Estructuras Críticas		

Durante el diseño conceptual el ingeniero debe establecer opciones viables para el sistema y configuración estructural, y los elementos no estructurales y contenido. Es importante que el diseñador conciba un mecanismo resistente consistente, estable y controlado.

LA FASE NUMÉRICA

El ingeniero estructural debe establecer el valor de las propiedades estructurales que permiten a la estructura controlar y acomodar su respuesta dinámica dentro de límites aceptables.

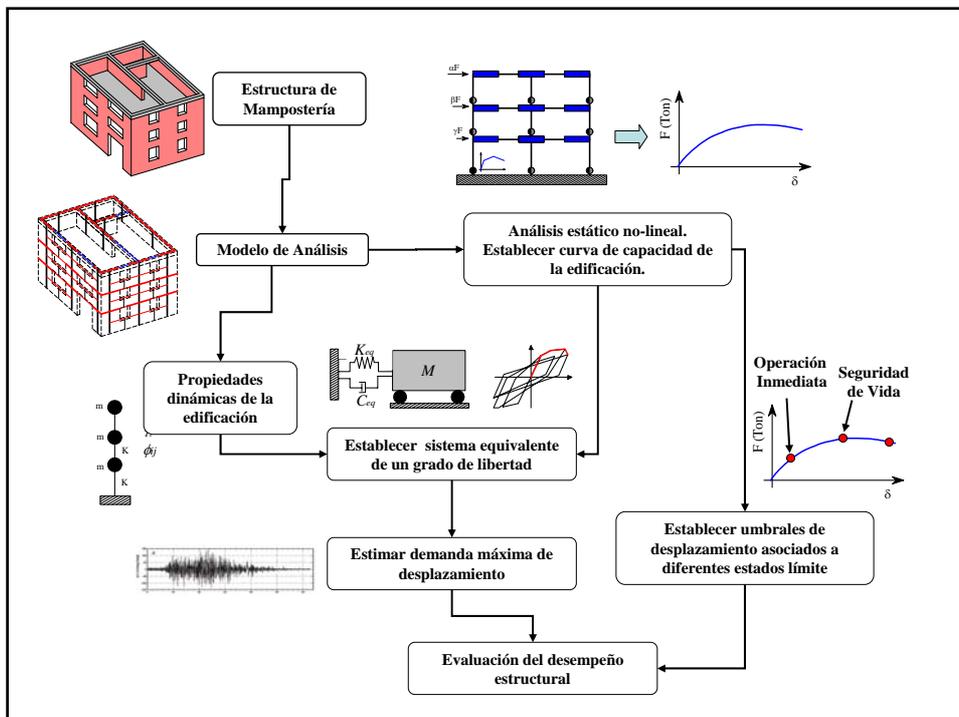
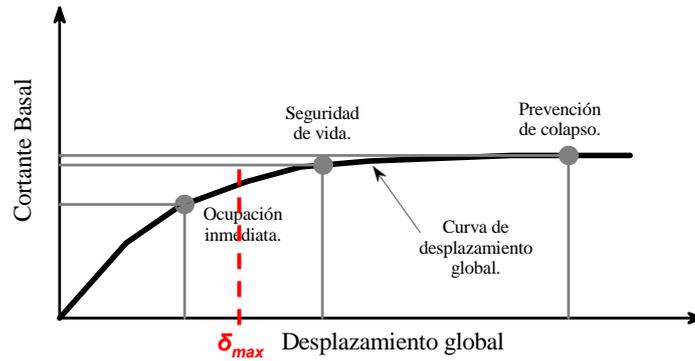
Pueden distinguirse tres etapas durante la Fase Numérica:

Prediseño global. Con la ayuda de espectros de respuesta se determinan a nivel global las propiedades estructurales.

Diseño local preliminar. Se procede al diseño local, donde se determinan, en función de las propiedades globales, las dimensiones y detallado de los elementos estructurales.

Revisión del diseño. Se revisa a través de una serie de análisis estructurales con alto grado de refinamiento si la estructura es capaz de cumplir con los objetivos de diseño. La metodología que se presenta a continuación se enmarca dentro de esta etapa de la fase numérica.

Dentro de un formato basado en desplazamientos, la revisión del diseño requiere evaluar la demanda máxima de desplazamiento lateral, y compararla con umbrales de desplazamiento asociados a diferentes estados límite. En EE.UU. existen lineamientos que siguen este formato: FEMA 273, FEMA 306, FEMA 356 y FEMA 440



Evaluación del Desplazamiento de Azotea

Dado que el comportamiento dinámico de las edificaciones de mampostería tiende a estar dominado por su periodo fundamental de vibración, el uso de un sistema de un grado de libertad permite estimar de manera razonable la demanda máxima de desplazamiento lateral.

Al respecto, existen dos opciones: A) Utilizar un espectro de diseño, y B) Establecer un sistema equivalente de un grado de libertad y llevar a cabo un análisis paso a paso.

En cuanto a la primera opción, Negrete (2006) propone el uso de una versión simplificada del método de los coeficientes propuesto por el FEMA 440:

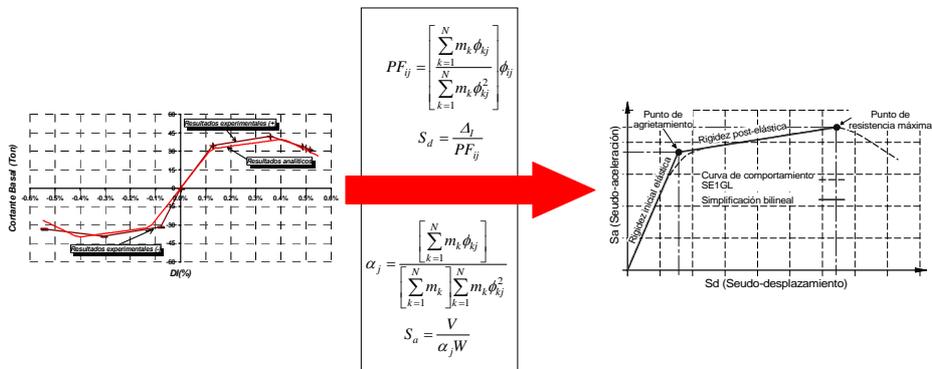
$$\delta_T = C_1 C_2 S_a \frac{T^2}{4\pi^2} g$$

donde C_1 y C_2 son coeficientes que toman en cuenta el comportamiento no lineal y la degradación del ciclo histerético de la mampostería confinada:

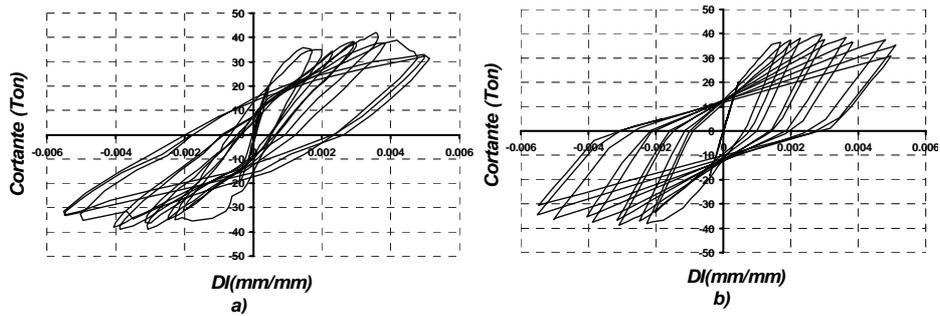
$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{415 T^{2.5}} \quad C_2 = 1 + \frac{1}{300} \left(\frac{R-1}{T} \right)^{1.34}$$

Se asume que la edificación de mampostería acomoda toda su deformación lateral en un piso suave que se forma en la planta baja, y que los efectos $P-\Delta$ no son de importancia.

La segunda opción implica el planteamiento de un sistema equivalente de un grado de libertad (Zúñiga). Aunque esta opción es más compleja, permite tomar en cuenta las particularidades de la configuración estructural y del ciclo histerético del sistema estructural de mampostería.



Aparte de la envolvente de comportamiento histerético, el análisis dinámico requiere establecer reglas que definan la degradación de las propiedades estructurales del sistema equivalente en función de las demandas máxima y acumulada de desplazamiento lateral.



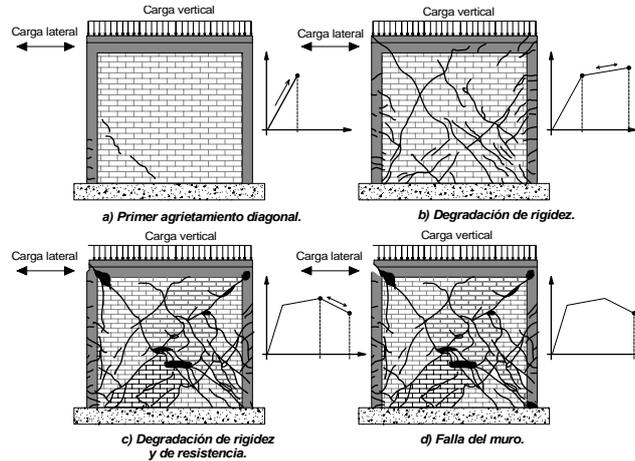
(Ruiz y Miranda 2003)

Daño Previo

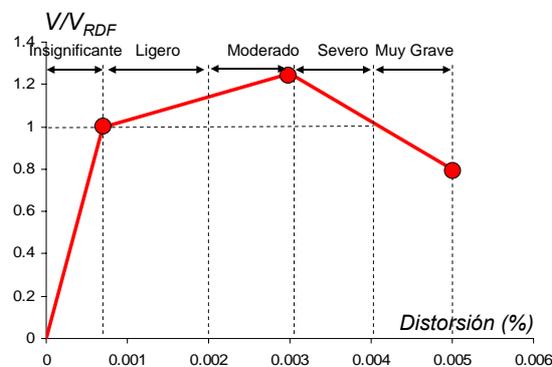
Uno de los contextos bajo los cuales la evaluación estructural adquiere mayor importancia se da alrededor de una estructura que ha sido dañada durante una excitación sísmica severa. En particular las NTCM-2004 indican en su sección 11.2.1: *“Se deberá evaluar la seguridad estructural de una edificación cuando se tengan indicios de que ha sufrido algún daño,...”* Y agregan en el inciso c de la sección 11.2.2: *“Si aplica, estudio de los efectos del daño en los elementos estructurales en el desempeño futuro de la edificación.”*

Vale la pena comentar la experiencia que la Agencia Federal para la Administración de Desastres de los EE.UU. vivió después del sismo de Northridge. La gran cantidad de solicitudes que se hicieron para tener acceso un fondo administrado por dicha agencia resultó en un cuestionamiento de los criterios usados para evaluar el nivel de seguridad estructural de las estructuras dañadas. Esto resultó a su vez que en 1996 se planteara una serie de metodologías basadas en desplazamiento para la evaluación de estructuras dañadas por sismo. La aplicación de dichas metodologías dejó claro que los lineamientos de evaluación basados en desplazamiento hacen posible evaluaciones mas racionales.

Para evaluar el impacto que el daño estructural tiene sobre muros estructurales de mampostería, se asocia un patrón y ancho de grietas con un nivel de deterioro estructural (rigidez y resistencia).



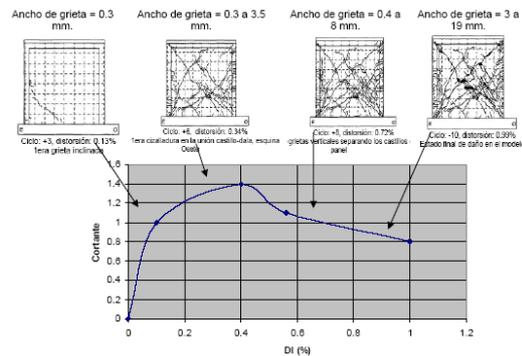
Torres (2007) caracteriza la severidad del daño estructural a través de clasificarlo en cinco niveles (NTCM-2004): A) Insignificante, que no afecta de manera relevante la capacidad estructural; B) Ligero, cuando afecta ligeramente la capacidad estructural; C) Moderado, cuando afecta medianamente la capacidad estructural; D) Severo, cuando el daño afecta significativamente la capacidad estructural; y E) Muy grave, cuando el daño ha deteriorado a la estructura al punto que su desempeño no es confiable.



A partir de la definición de los niveles de daño y de información experimental, es posible asociar patrones y anchos de grieta al nivel de deterioro estructural en un muro. Esto puede hacerse a partir de índices de deterioro para la rigidez (λ_K) y resistencia (λ_R) :

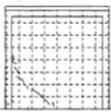
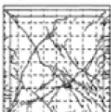
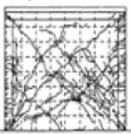
$$\lambda_K = \frac{K}{K_o}$$

$$\lambda_R = \frac{V}{V_{max}}$$

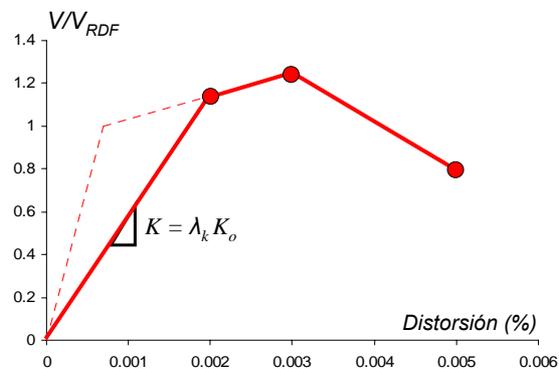


**Pineda
(1996)**

El estudio estadístico de varios muros de un tipo específico de mampostería que exhiban un comportamiento similar permite establecer valores de λ_K y λ_R para diferentes niveles de daño que se consideren relevantes (estados límite). A partir de la información generada en este proceso se establecen formas de evaluación para diferente tipo de mampostería y modos de falla.

2	Muro confinado	Panel sólido
MCSO	Modo de comportamiento:	FTDMC (Tensión diagonal)
	Materiales:	Tabique rojo de barro recocido, confinamiento de concreto reforzado y refuerzo horizontal en muros.
Cómo distinguir el tipo de daño por observación:		
Este tipo de daño ocurre por esfuerzos de tensión. Las grietas diagonales se generan a través de las juntas de mortero. La resistencia de la mampostería es alta con respecto a la del mortero y la adherencia entre piezas y mortero no es buena.		
Severidad	Descripción del daño	Medidas de restauración
Ligero $\lambda_k = 1.0$ $\lambda_R = 1.0$	<ol style="list-style-type: none"> Criterio: Grietas inclinadas en uno de los extremos inferiores del muro. Anchos de grieta entre 0.2 y 1.0 mm. Apariencia típica: 	<ul style="list-style-type: none"> Reponer el mortero Injectar las grietas.
Moderado $\lambda_k = 0.4$ $\lambda_R = 1.0$	<ol style="list-style-type: none"> Criterio: Grietas inclinadas, las principales son sensiblemente a 45° se extienden de esquina a esquina opuesta. Existe penetración de la grieta en castillos, dala y losa. Anchos de grietas entre 1.0 y 3.0 mm. Apariencia típica: 	<ul style="list-style-type: none"> Remueva y reemplace unidades dañadas. Injectar grietas diagonales o colocar grapas.
Severo $\lambda_k = 0.2$ $\lambda_R = 0.8$	<ol style="list-style-type: none"> Criterio: Daño concentrado en grietas inclinadas que penetran en las uniones de castillo con dala. Las grietas diagonales se escalonaron a través de las juntas de mortero. Existe separación de muro y castillo. Anchos de grieta mayores a 3.0 mm. Apariencia típica: 	<ul style="list-style-type: none"> Quitar y reemplazar las piezas dañadas. Aplicar una cubierta de mortero esponjón. Colocar refuerzo de malla electro soldada.

Las formas de evaluación de daño estructural pueden utilizarse en diferentes contextos. Por ejemplo, a partir del factor λ_K puede plantearse un modelo de análisis elástico, y contraponer las demandas de resistencia obtenidas del mismo con las resistencias degradadas a través del factor λ_R . Dentro del contexto de un análisis no lineal se recomienda ajustar la envolvente del modelo de Flores y Alcocer, y utilizar el modelo modificado de la columna ancha para modelar el muro dañado.



OBSERVACIONES

Dado que la evaluación de la capacidad y demanda de deformación lateral en las estructuras de mampostería conlleva una alta incertidumbre, es importante que las recomendaciones que se hagan den lugar a evaluaciones razonablemente conservadoras.

La información que se dispone hasta el momento no abarca muchas situaciones que pueden presentarse en edificaciones reales. Por tanto, es necesario seguir llevando a cabo estudios que integren los aspectos experimental, analítico y de campo para aportar información que permita calibrar de mejor manera modelos como el que aquí se presenta.

PERSPECTIVAS

Durante las últimas décadas se ha avanzado considerablemente en el entendimiento de la respuesta dinámica de las estructuras sismorresistentes. Esto ha ido consolidando una nueva percepción de la labor del ingeniero estructural. Se ha abandonado la visión de que el ingeniero debe diseñar la estructura ante condiciones inalterables impuestas por la naturaleza, y se ha concebido una labor de ingeniería que consiste en el diseño de estructuras que exhiban una respuesta consistente, estable y controlada.

Actualmente ya se han planteado una serie de lineamientos de evaluación basados en desplazamiento que se enmarcan dentro del contexto del enfoque de diseño por desempeño (FEMA).

Los planteamientos que se han hecho hasta la fecha se basan en el uso juicioso del conocimiento que se tiene de la respuesta estructural y de las herramientas numéricas disponibles. Aunque se ha establecido un marco sólido y racional para el diseño sísmico por desempeño, es necesario seguir calibrándolo conforme a la evidencia experimental y de campo que se vaya obteniendo, y a los desarrollos analíticos que se logren.

El advenimiento del diseño por desempeño ha traído consigo una serie de retos y oportunidades. Desde el lado de los retos, destacan la necesidad de coordinar los esfuerzos de investigación, y de mejorar el ámbito legal y profesional bajo el cual se diseñan las estructuras. Desde el lado de las oportunidades, el desarrollo del diseño por desempeño permitirá a la comunidad de ingeniería estructural establecer una mejor comunicación con clientes, arquitectos, agencias de gobierno y la sociedad en general.