

2. MARCO TEORICO

La mecánica de materiales constituye una rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a varios tipos de carga. En general este análisis nos llevara a la determinación de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones producidos por cargas. Si estas magnitudes pueden determinarse para todos los valores de carga, incluso hasta la carga de falla, entonces se tendrá un panorama completo del comportamiento mecánico cuyo conocimiento es fundamental para el diseño confiable de cualquier estructura.

Así, para establecer una base racional de diseño es necesario obtener las características acción respuesta correspondiente a las sollicitaciones que actúan más frecuentemente sobre los elementos estructurales. Con esta información se puede delimitar el rango de las sollicitaciones bajo las cuales el elemento se comportará satisfactoriamente en condiciones de servicio.

En otras palabras, si nos enfocamos a estructuras de concreto es necesario establecer las relaciones entre los elementos siguientes:

Acciones interiores: carga axial, flexión, cortante.

Características del elemento: tipo de concreto, refuerzo tamaño, forma restricciones, y

Respuestas: deformación, agrietamiento, durabilidad, vibración, etc.

Al valuar la respuesta correspondiente a una acción o carga determinada, se debe tomar en cuenta el modo de aplicación de la misma (instantánea, de corta duración, sostenida, repetida, etc.), ya que como veremos, este factor ejerce influencia muy importante en dicha respuesta.

2.1. Análisis de estructuras de concreto reforzado.

Para analizar una estructura ó elemento estructural se idealiza, generalmente reduciendo el problema real tridimensional a uno de dos dimensiones; esta suposición está plenamente justificada en el caso de muros ya que la rigidez en su plano es muchas veces mayor que perpendicular a él, además, se considerará que las propiedades mecánicas están concentradas a lo largo de sus ejes y a este modelo se aplican las sollicitaciones.

El propósito fundamental del análisis es valuar las acciones interiores en las distintas partes de la estructura o elemento. Para esto es necesario conocer o suponer la relación en términos generales entre la acción y la respuesta, la cual puede ser representada por un diagrama esfuerzo-deformación, diagramas de interacción, etc., y para poder obtener estas relaciones ó diagramas es necesario emplear ciertas hipótesis, en este caso para concreto reforzado comúnmente se usan las siguientes:

2.1.1. Hipótesis empleadas

- a) La distribución de deformaciones unitarias en la sección transversal de un elemento es lineal; es decir, las secciones transversales planas antes de la deformación, permanecen planas después de que esta ocurre. Esta hipótesis permite conocer la deformación unitaria en las fibras a cualquier altura de la sección si se fijan dos puntos de deformación conocidos. Para el caso de muros se ha observado experimentalmente que lo anterior es totalmente válido para el caso de flexión con bajos niveles de fuerza cortante.

- b) El concreto no resiste esfuerzos de tensión. En realidad el concreto tiene una resistencia a la tensión aproximadamente igual a $0.1f_c$, pero para fines prácticos no influye en la resistencia de miembros con cantidades normales de refuerzo.
- c) Se conocen las características de esfuerzo y deformación del acero. En general se supone un comportamiento elastoplástico del acero, esto es, los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones hasta una deformación unitaria máxima ϵ_y , después de la cual el esfuerzo permanece constante no importando la deformación. Con esta idealización se desprecia la zona de endurecimiento del acero de refuerzo. Si se tomara en cuenta esta zona, se calcularían resistencias mayores; sin embargo, se considera que las deformaciones en la zona de endurecimiento son de tal magnitud que haría objetable el funcionamiento estructural de los elementos.
- d) Se conocen las características esfuerzo-deformación unitaria del concreto. Se han propuesto curvas muy diferentes para la relación esfuerzo-deformación del concreto; además, son muchas las variables que influyen en las características de esta curva, de las cuales las principales son: el tamaño y forma de la sección transversal, el gradiente de esfuerzos y la duración de carga.

Aunque las distintas idealizaciones de la curva esfuerzo-deformación difieren notablemente (triangular, rectangular, trapecial, parabólica, etc.), todas ellas llevan a resultados aproximadamente iguales en cuanto a resistencia; pero desde el punto de vista del cálculo de curvaturas y rigideces, y por lo tanto de deformaciones, la forma de la curva juega un papel muy importante.

- e) La adherencia entre el concreto y el acero es perfecta, esto es, no existen corrimientos relativos de consideración entre el acero y el concreto que lo rodea. Esta hipótesis es necesaria para establecer la igualdad de deformaciones en el acero y el concreto para las mismas distancias al eje neutro. La hipótesis es bastante realista para el concreto reforzado con varillas corrugadas.
- f) El elemento alcanza su resistencia a una cierta deformación unitaria máxima útil del concreto, ϵ_{cu} . Esto implica que una sección falla si el concreto, en alguna fibra, alcanza una deformación unitaria de compresión máxima ϵ_{cu} . Usualmente se considera que esta deformación unitaria de falla varía entre 0.003 y 0.004.

Algunos de los efectos importantes que no son tomados en cuenta en las hipótesis anteriores son:

1. Deformaciones unitarias por la contracción y flujo plástico (deformaciones en el tiempo bajo carga sostenida) del concreto.
2. Velocidad de aplicación de la carga
3. Pérdida de capacidad de carga por inestabilidad.

Pero que pueden tomarse en cuenta como se indica en el capítulo 4.

2.2. Conceptos y definiciones.

Rigidez.

Este concepto es muy importante así que veremos de donde se origina. Una barra de longitud L es cargada a tensión por fuerzas axiales P . Si las fuerzas P actúan en el centroide de la sección transversal, el esfuerzo uniforme en la barra para secciones alejadas de los extremos se determina con $\sigma = \frac{P}{A}$ donde A es el área de la sección transversal. Además si la barra está constituida por un material homogéneo, la deformación unitaria axial es $\varepsilon = \frac{\delta}{L}$ donde δ es el alargamiento total producido por las fuerzas axiales. Ahora supongamos que el material es linealmente elástico de tal modo que se cumple la Ley de Hooke ($\sigma = E\varepsilon$). Entonces las expresiones anteriores para σ y ε

Pueden combinarse para obtener la siguiente expresión $\delta = \frac{PL}{EA}$ para el alargamiento de la barra, el producto EA se conoce como rigidez axial de la barra, así la rigidez k (EA/L) de una barra cargada axialmente se define como la fuerza requerida para producir una cierta deformación. El concepto de rigidez en un muro es similar que el explicado para esta barra, así cuando decimos que un muro proporciona mucha rigidez es que se necesita aplicarle una fuerza muy grande para que el muro se flexione apenas muy poco. Sin embargo, obtener la rigidez de un muro es más complicado que el obtener la rigidez de una barra, porque el concreto lo consideramos homogéneo, aunque no lo sea, entonces involucrar el acero de refuerzo y todos los componentes del concreto dificulta la tarea; además, considerar que es elástico y lineal no es tan válido, por esto la obtención de la rigidez de un muro no es tan directa como el de la barra, sin embargo el concepto, como se dijo, es el mismo.

Diagrama esfuerzo – deformación unitaria

Estos diagramas se obtienen del ensayo estático del material en cuestión. Es la representación en un plano de ejes coordenados del esfuerzo (carga de compresión o tensión aplicada dividida entre el área de la sección transversal) y la deformación unitaria (relación entre el acortamiento o alargamiento total y la longitud de medición) de un material, con el cual se caracteriza y prevé su comportamiento típico. Para concreto reforzado será necesario conocer el diagrama tanto del concreto como el del acero.

Diagrama de interacción.

Bajo el criterio de resistencia se define como diagrama de interacción a la representación gráfica de las combinaciones de carga axial y momento flexionante, alrededor de un eje principal de una sección, que llevan a la falla a un elemento, que puede ser una viga, una columna ó un muro de concreto reforzado.

Gráficas carga – deflexión.

Estas curvas se obtienen ensayando un elemento ante carga cíclica o bien monotónica. El proceso de carga y descarga puede repetirse en el ensayo de un elemento para valores de carga cada vez mayores hasta llegar al límite superior de la región elástica donde la estructura interna del material se modifica y sus propiedades cambian; esto se manifiesta en una deformación residual o permanente en el espécimen; el área encerrada por dichas curvas será la energía que disipó. Ver figura 2.2a.

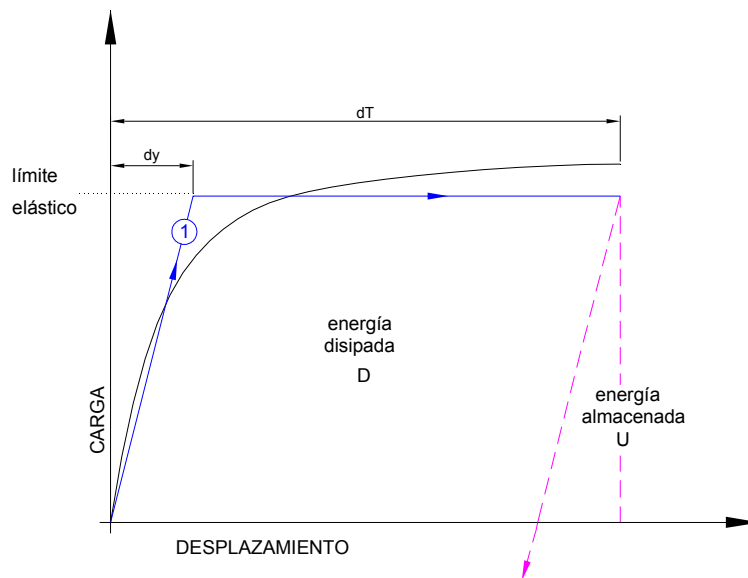


FIG. 2.2a Definición de ductilidad

Esta figura ilustra el punto de vista usual de ductilidad derivado del comportamiento bajo carga monotónica. Cuando la curva de desplazamiento de carga “verdadera” se idealiza y se toma de acuerdo con el comportamiento elástico perfectamente plástico, la ductilidad μ puede expresarse en forma de,

$$\mu = 1 + \frac{1}{2} \frac{D}{U}$$

Donde U es la energía total que puede recuperarse al quitar la carga (esto es, energía de deformación) y D es la energía disipada en deformación plástica. En la mayoría de las situaciones la disipación de energía está localizada y condicionada por requisitos de detallado y por las características del refuerzo.

2.3. Características generales de un ensayo de muros de concreto

El esquema de un ensayo típico se muestra en la fig.2.3a.

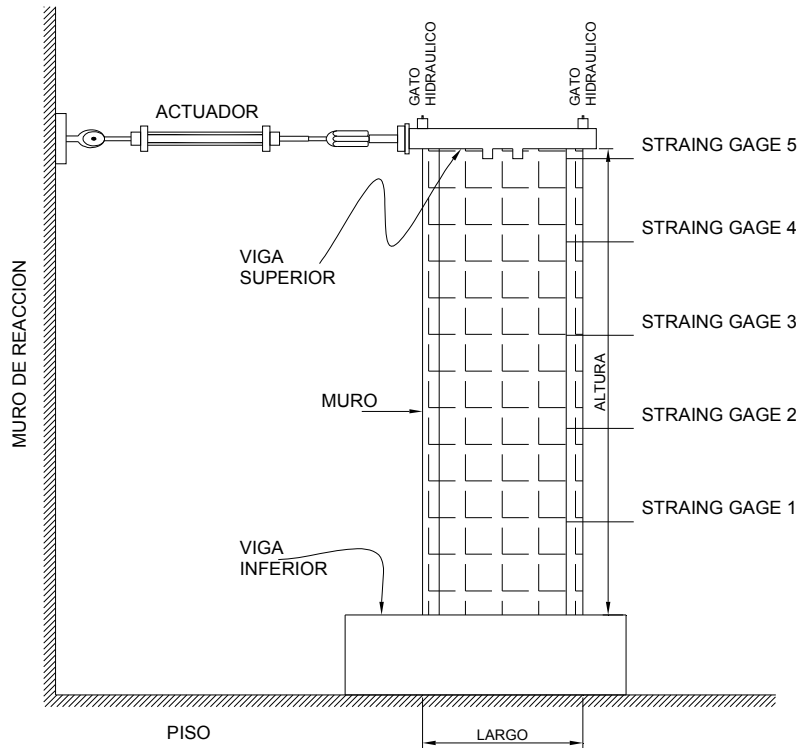


FIG. 2.3a Esquema de un ensayo típico de un muro de concreto

En un ensayo típico como el que se muestra podemos distinguir tres partes componentes: las características del espécimen, los elementos de aplicación de carga y los elementos de medición.

2.3.1 Características de los especímenes.

Los principales parámetros que se consideran son los siguientes:

Altura, longitud y espesor del muro.

Si el muro está confinado o no con columnas ó muros transversales en sus extremos.

En general es necesario que tenga una base rígida, que usualmente es una viga inferior en la que se ancla el muro.

También es necesaria una viga superior en la que se apliquen las cargas tanto horizontales como las verticales para que se distribuyan uniformemente en todo el espécimen, pero no siempre se colocan.

Las características de resistencia y deformación del concreto y del acero utilizado.

Refuerzo del alma del muro sea éste vertical, horizontal o ambos.

Refuerzo en los extremos del muro o bien del elemento de confinamiento.

Todos estos elementos influyen, de manera muy importante, en el comportamiento del muro. Es por esto que se harán resaltar en la bibliografía encontrada.

2.3.2 Elementos de aplicación de carga.

La aplicación de carga se hace mediante un equipo llamado actuador, que son gatos individuales programables que aplican la sollicitación sobre el muro

2.3.3 Elementos de medición.

Existen multitud de tipos desde los manuales, analógicos hasta los electrónicos automáticos y la función de éstos es la adquisición de datos para obtener las curvas acción (p) contra respuesta (δ).

2.4. Tipos de muros de concreto.

Los muros de concreto poseen una alta rigidez lateral en su plano si está aislado. Los esquemas que aparecen en la figura 2.3b muestran los tipos mas usuales de muros de concreto en edificios.

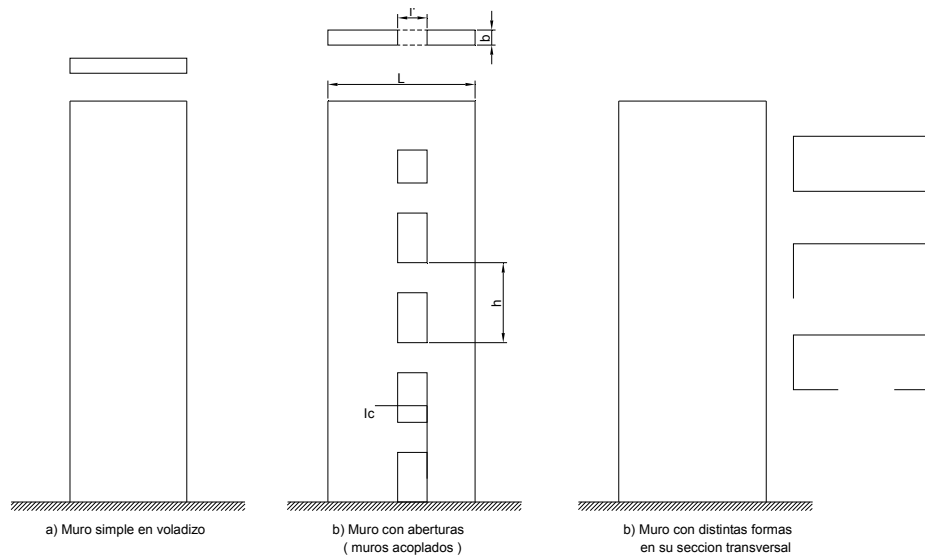


FIG. 2.3b Tipos de muros

El cálculo de rigidez lateral y de esfuerzos en muros involucra solamente a la teoría de flexión. Las aberturas representan un problema mucho más complejo; usualmente están alineadas en posición vertical en la altura del muro. La conexión entre los muros adyacentes se proporciona por vigas que forman parte de los mismos; para las losas de los entrepisos, o por una combinación de ambas. El termino mas apropiado para estos muros es muros acoplados, la importancia de las vigas de acoplamiento y la forma de considerarlas no se contempla en esta tesis.

2.5. Comportamiento de muros de concreto ante cargas laterales cíclicas.

Como se dijo anteriormente el principal requisito de un muro de concreto es asegurar la estabilidad de la estructura durante un temblor, ya que el daño ocasionado puede ser irreparable. Se acepta generalmente que, en la mayoría de las situaciones, la dispersión de energía mediante el amortiguamiento histerético es un medio viable para asegurar la estabilidad estructural contra los grandes desplazamientos impuestos por sismos. Para asegurar la dispersión deseada de energía, el principal propósito del diseñador debe ser evitar hasta lo posible la degradación de la rigidez y la resistencia. Por lo tanto para asegurar la ductilidad deseada, la mayor parte de las fuerzas internas de la región plástica potencial de un muro se debe manifestar en curvas histeréticas “bien redondeadas” como la formada por la trayectoria 2 de la fig. 2.3c.

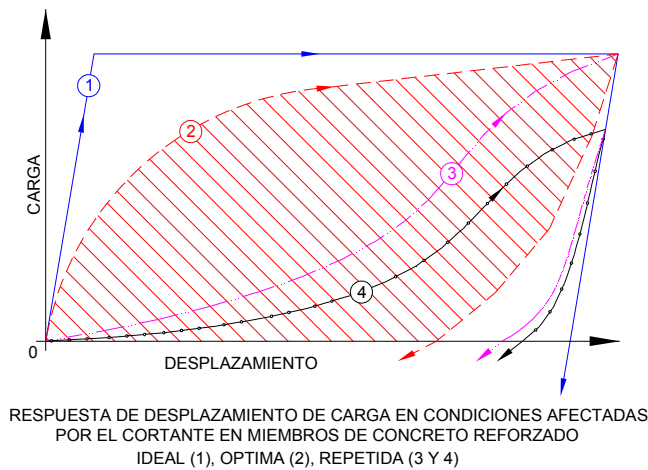


FIG. 2.3c Curvas histeréticas en muros de concreto bajo cargas laterales

En el ensaye de un muro de concreto reforzado ante cargas cíclicas se pueden variar tantos aspectos como se requiera para poder identificar cual o cuales de ellos son los que rigen la falla del muro. Como se mencionó, la curva histerética entre más amplia indica un mejor comportamiento y se ha visto que ocurre cuando la falla es principalmente por flexión; y cuando la gráfica está totalmente estrangulada el muro falla en cortante.

De diversos estudios se ha encontrado cuándo en un muro rige la flexión y cuándo la fuerza cortante. Si la relación M/VL en un muro es mayor de 2.5 predomina la flexión sobre el cortante, mientras que lo hace el cortante cuando dicha relación es menor al valor antes mencionado; en dicha relación, M es el momento flexionante, V la fuerza cortante, y L la longitud del muro.

La relación anterior es llamada **relación de aspecto**, es importante hacer notar que en un muro en cantiliver al que se le aplica una sola fuerza, como lo son la mayoría de especímenes ensayados, esta relación se reduce a H/L , ya que al aplicar la fuerza (V) a una altura (H), el momento con respecto a la base sería $M=VH$ y esto dividido por VL queda H/L .

Teniendo en cuenta esto, se puede decir que si ensayáramos un muro con ciertas características se obtendrá una curva histerética que caracteriza su modo de falla y si se modifica cualquiera de éstas, el modo de falla puede cambiar dependiendo de si dicha característica es o no una variable importante, de tal manera que después de identificar cuales variables son las que significativamente afectan su comportamiento, se está en condiciones de diseñar para el modo de falla deseado.

2.6. Comportamiento de muros de concreto reforzado con falla por cortante.

En la mayoría de las veces los muros de concreto reforzado tienen un bajo nivel de carga axial, siendo su función principal resistir las fuerzas cortantes y el momento flexionante inducidos por los sismos.

El comportamiento de muros de concreto reforzado ante fuerza cortante se muestra en la figura 2.6a.

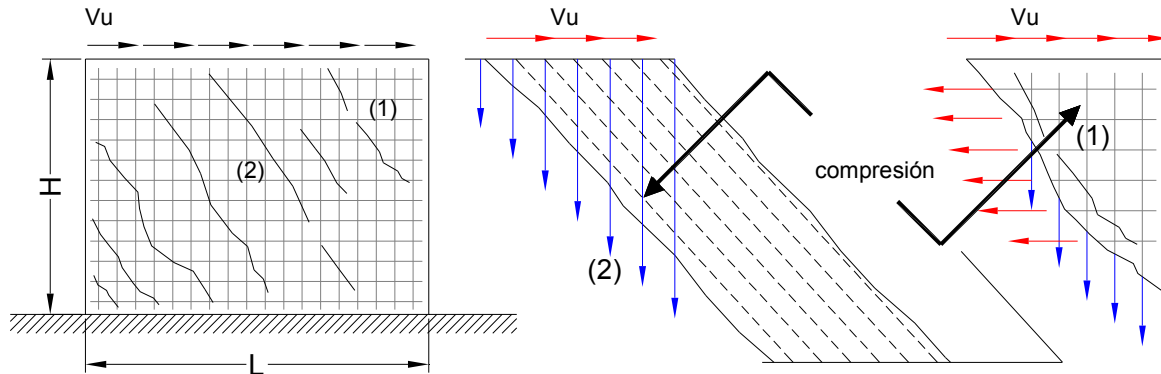


FIG. 2.6a Contribución del refuerzo a la resistencia a cortante

Ante cargas laterales, el mecanismo de la transferencia de la fuerza cortante se considera que es como a continuación se menciona: bajo la acción de la fuerza lateral, una parte de esa fuerza se transfiere directamente al concreto que está en compresión, otra por el refuerzo en el alma del muro, otra por el alma del muro mediante la llamada acción de armadura, y una más (aunque pequeña) se transfiere por la acción denominada dowel del refuerzo, esto es, del doblado del acero en la zona agrietada del concreto.

Cuando disminuye la carga, las grietas no son capaces de cerrarse inmediatamente, transfiriéndose el cortante mediante el doblado del acero de refuerzo y la fricción que se presenta en las grietas; por este motivo se presenta la forma de huso en los ciclos histeréticos. Al aplicar carga en sentido contrario se cierran las grietas que estaban anteriormente en la zona de tensión, aumentando la fricción en el concreto de estas zonas que, junto con la acción de armadura, hace que se incremente la pendiente de las curvas.

Según Wang (Ref. 8.3.2), la acción de armadura se presenta cuando se cierra una grieta diagonal abierta anteriormente, y el aumento en rigidez es debida en primera instancia a la fricción en las grietas y después a la acción de armadura.

Con la alternación de cargas se va perdiendo la resistencia por fricción, ya que se va alisando la superficie de contacto; además, la acción de doblado en el acero de refuerzo hace que se pierda la adherencia. Todo lo anterior deteriora la resistencia y rigidez y acelera la falla por cortante.

Por medio de una gráfica esfuerzos versus deformación angular se puede explicar de la siguiente manera: para cargas muy bajas prácticamente el comportamiento es elástico y lineal, después, el muro se va deteriorando siendo entonces diferente la curva de carga y descarga, presentando la forma usual de elementos donde rige la falla por cortante (spindle); al ir hacia un nuevo incremento de carga y deformación se obtiene el trazo continuo de la figura 2.6b,

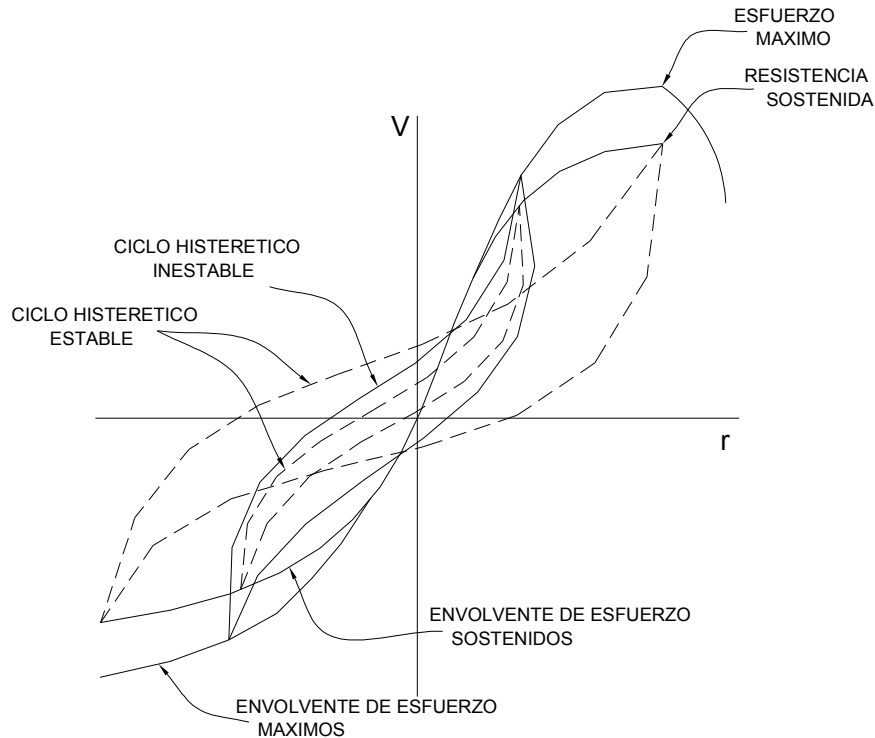


FIG. 2.6b Comportamiento ante cargas alternadas de un muro de concreto con falla por cortante

Al efectuar alternaciones de carga para la misma deformación se observa que disminuye la resistencia, estabilizándose la misma aproximadamente al tercer ciclo (trazo discontinuo). A este esfuerzo se le denomina **esfuerzo sostenido**, y al máximo de estos como **resistencia sostenida**. Después de que se alcanza esta, el muro pierde resistencia brusca y continuamente. Por lo anterior, durante un ensaye se tienen dos envoltorios de esfuerzos; la correspondiente a los máximos y la otra a los sostenidos.

2.7. Diseño de muros con las NTC para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto

Las NTC puestas en vigor en 2004 contiene las siguientes disposiciones para el diseño aproximado de muros de concreto.

- a) Flexión y flexocompresión.

$$\text{Si } P_u \leq 0.3F_R L d f'_c \quad \text{y} \quad p = \frac{A_s}{bd} < 0.008$$

El momento resistente es

$$M_R = F_R A_s f_y z$$

donde

$$P_u \quad \text{carga axial actuante}$$

F_R	factor de resistencia igual a 0.9
L	longitud horizontal del muro
d	peralte efectivo del muro en dirección de la flexión
f_c'	resistencia a compresión del concreto
p	cuantía de acero a tensión
b	espesor del muro
A_s	área de acero de un extremo del muro
f_y	resistencia a la fluencia del acero y

z será el obtenido con las expresiones siguientes

$$z = 1.2H_m \quad \text{si} \quad \frac{H_m}{L} \leq 0.5$$

$$z = 0.4 \left(1 + \frac{H_m}{L} \right) L \quad \text{si} \quad 0.5 < \frac{H_m}{L} \leq 1.0$$

$$z = 0.8L \quad \text{si} \quad 1.0 \leq \frac{H_m}{L}, \quad H_m \text{ altura total del muro}$$

b) Fuerza cortante

Fuerza cortante que toma el concreto

$$\text{Si} \quad \frac{H_m}{L} < 1.5 \quad V_{CR} = 0.85F_R \sqrt{f_c^*} bL$$

$$\text{Si} \quad \frac{H_m}{L} \geq 2 \quad V_{CR} = F_R b d (0.2 + 20p) \sqrt{f_c^*} \quad \text{si} \quad p < 0.015$$

$$V_{CR} = 0.5F_R b d \sqrt{f_c^*} \quad \text{si} \quad p \geq 0.015$$

$$\text{donde} \quad d = 0.8L$$

para valores intermedios de $\frac{H_m}{L}$ se interpolará entre los valores arriba indicados.

Fuerza que toma el acero

La cuantía de refuerzo paralelo a la dirección de la fuerza cortante, p_m , se obtiene con

$$p_m = \frac{V_u - V_{CR}}{F_R f_y A}$$

y la cuantía de refuerzo perpendicular a la fuerza cortante, p_n , se obtiene con

$$p_n = 0.0025 + 0.5 \left(2.5 + \frac{H}{L} \right) (p_m - 0.0025)$$

donde

$$p_m = \frac{A_{vm}}{s_m t}; \quad p_n = \frac{A_{vn}}{s_n t}$$

F_R factor de resistencia en cortante igual a 0.8

s_m y s_n separación del refuerzo

A_{vm} y A_{vn} área del refuerzo comprendida en una distancia s

Además si $\frac{H}{L} \leq 2.0$ entonces $p_n = p_m$; y $p_n \leq p_m$ en otros casos la cuantía mínima de refuerzo en el muro es de 0.0025 y la fuerza cortante última debe limitarse a

$$V_u \leq 2F_R A \sqrt{f_c^*}$$