

**NUEVAS TENDENCIAS PARA EL DISEÑO
DE MUROS DE CONCRETO REFORZADO.
CASO DE ESTUDIO: DISEÑO POR DESPLAZAMIENTOS**

FREDDY ARNALDO CALDERÓN ARDILA
RICARDO VALDERRAMA CORDERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA

2015

NUEVAS TENDENCIAS PARA EL DISEÑO
DE MUROS DE CONCRETO REFORZADO
CASO DE ESTUDIO: DISEÑO POR DESPLAZAMIENTOS

FREDDY ARNALDO CALDERÓN ARDILA
RICARDO VALDERRAMA CORDERO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en Estructuras

DIRECTOR:
PH.D., ÁLVARO VIVIESCAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN DE ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA

2015

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por el apoyo recibido durante la preparación de este trabajo y en general durante el curso de postgrado.

A nuestro director **Ph.D. Ing. Álvaro Viviescas** por su asesoría para la elaboración de este trabajo y por su diligencia para que lográramos culminar esta etapa de estudios.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS .	16
2.1 DEFINICIONES	16
2.2 MÉTODO DIRECTO DE DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS DDBD	17
2.3 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO POR DESPLAZAMIENTOS	24
2.3.1 Procedimientos propuestos por Priestley, Calvi y Kowalsky (2007) [1].....	24
2.3.2 Procedimiento propuesto por López y Ayala (2013) [13]	27
2.3.3 Método de diseño descrito por Huaman Cevallos (2011) [12]	28
2.3.4 Método propuesto por Richard Klingner (2007)	28
2.3.5 Método propuesto por Urrego y Bonett (2010) [17].....	30
2.3.6 Método presentado por Jara, Jara y Osorio (2009) [10]	31
2.3.7 Método presentado por V. Suárez (2009) [11].....	31
3. IMPLEMENTACIÓN EN LA NORMATIVA COLOMBIANA DE MÉTODOS DE DISEÑO SÍSMICO BASADOS EN DESPLAZAMIENTOS	33
3.1 CÓDIGO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIONES SISMO-RESISTENTES (1984) [14]	33
3.2 NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98 [15].....	34
3.3 REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10 [16].....	36

4. ALGORITMO PARA EL DISEÑO POR DESPLAZAMIENTOS DE MUROS ESTRUCTURALES EN CONCRETO REFORZADO.....	40
5. CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
BIBLIOGRAFIA.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Simulación a un Sistema SDOF [1].....	18
Figura 2. Rigidez efectiva K_e [1].....	19
Figura 3. Amortiguamiento Equivalente vs Ductilidad [1].....	20
Figura 4. Formas típicas de respuesta estructural histerética Fuerza- Desplazamiento [1].....	20
Figura 5. Espectro de Desplazamiento de Diseño [1].....	21
Figura 6. Ejemplo de un grupo de espectros de desplazamiento inelástico relacionados con el periodo efectivo para una regla histerética específica [1]	23
Figura 7. Espectro de Velocidades de Diseño [16].....	37
Figura 8. Espectro de Desplazamientos de Diseño [16].....	37
Figura 9. Regquisitos de diseño sismo resistente.....	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Procedimiento propuesto por Priestley, Calvi y Kowalsky	25
Tabla 2 - Procedimiento para incluir efectos de torsión	26
Tabla 3 - Procedimiento para muros acoplados.....	26
Tabla 4 - Procedimiento propuesto por López y Ayala	27
Tabla 4 - Procedimiento propuesto por Huaman Cevallos.....	28
Tabla 6 - Procedimiento propuesto por Richard Klingner	29
Tabla 7 - Procedimiento propuesto por Urrego y Bonett.....	30
Tabla 8 - Procedimiento propuesto por Jara, Jara y Osorio.....	31
Tabla 9 - Procedimiento propuesto por V. Suárez	32
Tabla 10 - Algoritmo para el diseño por desplazamientos de muros estructurales en concreto reforzado	40

RESUMEN

TITULO:

NUEVAS TENDENCIAS PARA EL DISEÑO DE MUROS DE CONCRETO REFORZADO. CASO DE ESTUDIO: DISEÑO POR DESPLAZAMIENTOS.*

AUTOR:

Calderón Ardila, Freddy Arnaldo
Valderrama Cordero, Ricardo.**

PALABRAS CLAVE: DDBD (Direct Displacement Based Design - Método Directo de Diseño Sísmico Basado en Desplazamientos), SDOF (Single Degree of Freedom – Un Grado de Libertad), OTM (Overturning Moment – Momento de vuelco), amortiguamiento, rigidez, periodo, demanda de ductilidad.

DESCRIPCION

Alternativamente al método basado en resistencia, vigente en la mayoría de los códigos de diseño del mundo, existen metodologías que representan mejor el comportamiento de las estructuras, especialmente cuando éstas sobrepasan los límites de trabajo en el rango elástico. Aunque desde hace mucho tiempo existía certeza de las deficiencias del diseño sísmico basado en fuerzas, sólo en los últimos años se ha enfatizado el desarrollado de métodos enfocados en el desempeño de las estructuras, dentro de los que se encuentran los métodos de diseño por desplazamientos.

El presente trabajo hace una revisión del método directo de diseño sísmico basado en desplazamientos (DDBD), el cual parte de la conversión del sistema a una “estructura equivalente” caracterizada por una rigidez secante que incluye el comportamiento elástico e inelástico hasta una deformación de diseño, incluye correlaciones entre demanda de ductilidad y amortiguamiento, espectros de desplazamiento para diferentes amortiguamientos y con las fórmulas básicas del análisis estructural se obtienen las propiedades requeridas para la estructura sustituta en cada estado límite, con lo que se obtiene el cortante basal, se distribuye y se diseñan los elementos por capacidad.

Adicionalmente, se realiza la revisión de diversas propuestas de diseño por desplazamientos presentadas por diferentes autores y se incluyen resúmenes de las metodologías planteadas.

A continuación se hace una revisión de la incursión de estas metodologías en la normativa colombiana de diseño sísmico, encontrándose que cada nueva reglamentación incluye más herramientas basadas en filosofías de diseño por desplazamientos.

Finalmente, se produce un algoritmo de diseño sísmico por desplazamientos, para muros de concreto reforzado, que no es otra cosa que la recopilación de los métodos revisados.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Ph.D Ing Alvaro Viviescas

ABSTRACT

TITLE:

NEW TRENDS IN THE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE WALLS. CASE STUDY: DESIGN FOR DESPLAZAMIENTOS.*

AUTHOR:

Calderon Ardila, Freddy Arnaldo
Valderrama Lamb Ricardo.**

KEYWORDS:

DDBD (Direct Displacement Based Design - Direct Method Based on Displacement Seismic Design), SDOF (Single Degree of Freedom - one degree of freedom), OTM (Overturning Moment - Moment of tipping), damping, stiffness, period, demand ductility.

Besides the resistance method, valid in most design codes around the world, there are better methods to simulate the behavior of structures, especially when they work beyond the elastic limits. Although there was certain deficiencies in the seismic design based on strength, only in recent years has emphasized the developed focused on the performance of the structures, within which are displacement based design methods.

This paper reviews the Direct Displacement Based Design (DDBD), that starts with the system conversion to an "substitute structure" characterized by a secant stiffness including elastic and inelastic deformation behavior, includes correlations between ductility demand and damping spectra displacement for different damping and the basic formulas of structural analysis the properties required for the replacement structure in each limit state, whereby the base shear is obtained, is obtained is distributed and the elements are designed capacity.

Additionally, a review of various design proposals by different authors and include abstracts about their methodologies.

Below is a review of the incursion of these methodologies in Colombian Seismic Design Codes, finding that every new regulation includes more tools based on design philosophies for travel. Finally, an algorithm for seismic design displacement for reinforced concrete walls, which is nothing other than collecting the revised methods occurs.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los códigos de diseño sísmico alrededor del mundo, reglamentan el diseño de las estructuras por Factores de Carga y Resistencia (LRFD - Load and Resistance Factor Design), que consiste básicamente en realizar un análisis de resistencia de los elementos estructurales en el rango elástico, sometidos a cargas preestablecidas en cada normativa. Las cargas se afectan con factores de mayoración y la capacidad de los materiales que conforman la estructura con factores de reducción. Posteriormente se verifica que las solicitaciones no sobrepasen la capacidad de los elementos estructurales.

Aunque ha sido la filosofía tradicional para el diseño estructural y es una buena representación del comportamiento de las estructuras ante cargas estáticas, hay serias deficiencias cuando se está tratando el fenómeno sísmico.

Las cargas sísmicas, que en realidad son una excitación a la estructura mediante movimientos bruscos de la base, en varias direcciones y en un lapso de tiempo; se representan en la estructura con la asignación de una carga (cortante basal) y su distribución en la estructura de acuerdo con la distribución de masas y rigideces. Aunque es un método aceptado globalmente, es una representación muy pobre del verdadero comportamiento de la estructura durante un fenómeno sísmico.

En primera instancia, este método no analiza el comportamiento inelástico de la estructura y pretende cubrir el comportamiento estructural post-fluencia mediante la aplicación de un coeficiente de capacidad de disipación de energía "R". Esto implica realizar sofisticados cálculos para estimar una solicitación por sismo y dividir dicha solicitación por un coeficiente que en algunos casos llega a 8, es decir que realizamos un cálculo minucioso de la carga sísmica y utilizamos un pequeño porcentaje de ésta en un modelo elástico, dejando el remanente a la capacidad de

trabajo de la estructura en el rango inelástico, sin mayores evaluaciones adicionales. En nuestra normativa, este coeficiente “R” depende básicamente del sistema estructural y de la capacidad de disipación de energía que se le deberá proveer a la estructura mediante el detallado del refuerzo. Es decir, salvo unos coeficientes de reducción por irregularidades, este coeficiente no depende de las características propias de la estructura.

Por otro lado, este método no tiene en cuenta el nivel de daño que cada sismo le induce a la estructura, es decir, se analiza como si la estructura se fuese a estrenar con cada sismo. En un sismo, se disipa energía mediante daño estructural por fluencia de algunos elementos, y éstas serán las verdaderas condiciones iniciales para afrontar el siguiente sismo.

Por lo anterior, las tendencias del diseño sísmico apuntan a métodos basados en el desempeño de las estructuras. Dentro de estos métodos se encuentran principalmente: 1- Métodos basados en el control de desplazamientos, y, 2- Métodos Energéticos que tienen en cuenta el índice de daño (DM) de las estructuras.

En el presente escrito se presentará la filosofía básica del método de diseño sísmico basado en desplazamientos (DDBD por sus siglas en inglés) y se generará un algoritmo de diseño para muros de concreto reforzado, por este método.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión del procedimiento de diseño sísmico basado en desplazamientos y generar un algoritmo para el diseño de muros estructurales en concreto reforzado por este método.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir brevemente la filosofía del método de diseño por desplazamientos.
- Documentar como se ha venido implementando este método para el diseño de muros estructurales en las normativas colombianas de diseño.
- Generar un algoritmo para el diseño por desplazamientos de muros estructurales en concreto reforzado.

2. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO SÍSMICO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS

2.1 DEFINICIONES

Rigidez efectiva 'Ke': Rigidez obtenida de la "linearización" de la respuesta no-lineal de una estructura, por lo que incluye efectos del comportamiento elástico y del comportamiento inelástico del sistema.

Rigidez secante: Definida por Shibata y Sozen [Shibata and Sozen, 1976] en el método de la estructura sustituta, es la rigidez empleada con mayor frecuencia para estimar la rigidez efectiva de una estructura, definida para un máximo desplazamiento ' Δd ' y un nivel de amortiguamiento viscoso equivalente ' ξ_{eff} '.

Desplazamiento de diseño ' Δd ': Desplazamiento pre-fijado por cada estado límite considerado, para el cual se diseña una estructura por DDBD.

Amortiguamiento Viscoso Equivalente ' ξ ': Amortiguamiento que representa la combinación del comportamiento elástico y el debido a la energía histerética absorbida durante la respuesta inelástica. Es función de la ductilidad del sistema y de la forma del ciclo histerético de la estructura.

Masa efectiva ' m_e ': Masa efectiva de la estructura que participa en el modo fundamental de vibración.

Altura efectiva: ' h_e ': Altura a la cual se concentra la masa efectiva de la estructura equivalente simulada mediante un SDOF.

Ductilidad de desplazamiento ' μ ': Relación entre el desplazamiento máximo ' Δd ' y el desplazamiento de fluencia ' Δy '.

2.2 MÉTODO DIRECTO DE DISEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS DDBD [1] [2] [4] [7] [8]

El diseño basado en desplazamientos, utiliza como punto de partida el desplazamiento en lugar de la fuerza, ya que éste es determinante para controlar la capacidad y el daño de la estructura. Al final se revisan las fuerzas.

El Método Directo de Diseño Sísmico Basado en Desplazamientos (DDBD) es un procedimiento planteado por Priestley, Calvi y Kowalsky (2007) [1].

Este método emplea una “estructura equivalente” [8] con un solo grado de libertad que representa el funcionamiento de la respuesta pico de desplazamiento, más que las características elásticas iniciales de la estructura como lo hace el diseño basado en fuerzas.

El método de diseño es ilustrado con referencia a la Figura 1, la cual considera una representación de un edificio de varios grados de libertad por un elemento SDOF, con una altura equivalente ‘ H_e ’ y una masa equivalente ‘ m_e ’, aunque los fundamentos básicos se aplican a todo tipo de estructura.

Figura 1. Simulación a un Sistema SDOF [1]

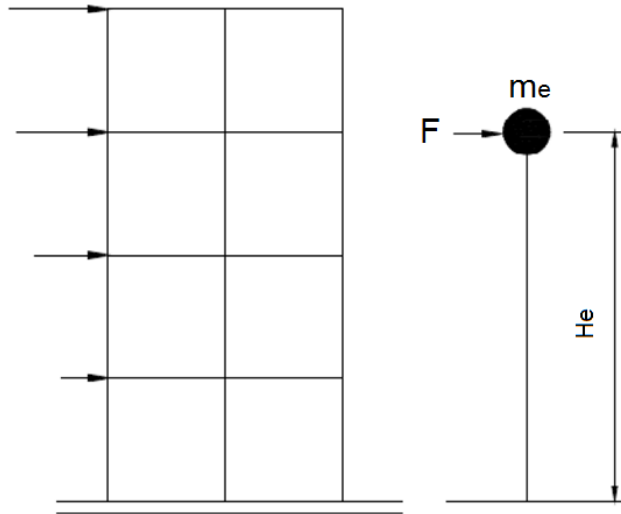


Imagen tomada de Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy, p. 64

La curva bilineal de la respuesta lateral de fuerza-desplazamientos de un SDOF se muestra en la Figura 2. El primer tramo representa la rigidez inicial elástica de la estructura ' K_i ', seguida por un tramo de rigidez post-fluencia de pendiente ' rK_i '.

DDBD caracteriza a la estructura por la rigidez secante ' K_e ' definida para un máximo desplazamiento ' Δ_d ' y un nivel de amortiguamiento viscoso equivalente ' ξ ', que representa la combinación del amortiguamiento elástico y el debido a la energía histerética absorbida durante la respuesta inelástica.

Figura 2. Rigidez efectiva K_e [1]

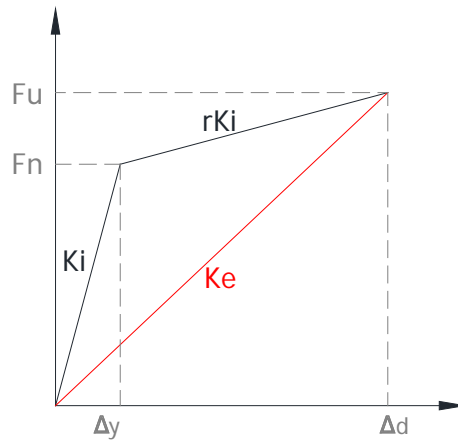


Imagen tomada de Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy, p. 64.

Así, como se muestra en la Figura 3, para un nivel dado de demanda de ductilidad para un edificio de estructura metálica se le asignaría un nivel alto de amortiguamiento viscoso equivalente mayor que a un puente de hormigón armado diseñado para el mismo nivel de demanda de ductilidad, como consecuencia del ciclo histerético “abultado”. Ver figura 4

Figura 3. Amortiguamiento Equivalente vs Ductilidad [1]

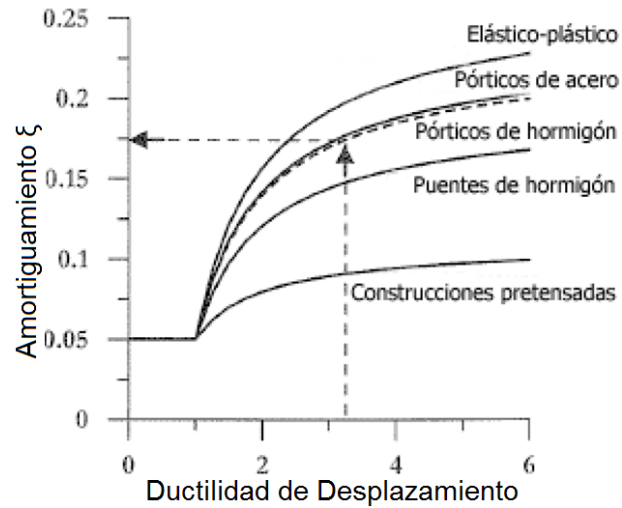


Imagen tomada de Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy, p. 64.

Figura 4. Formas típicas de respuesta estructural histerética Fuerza-Desplazamiento [1]

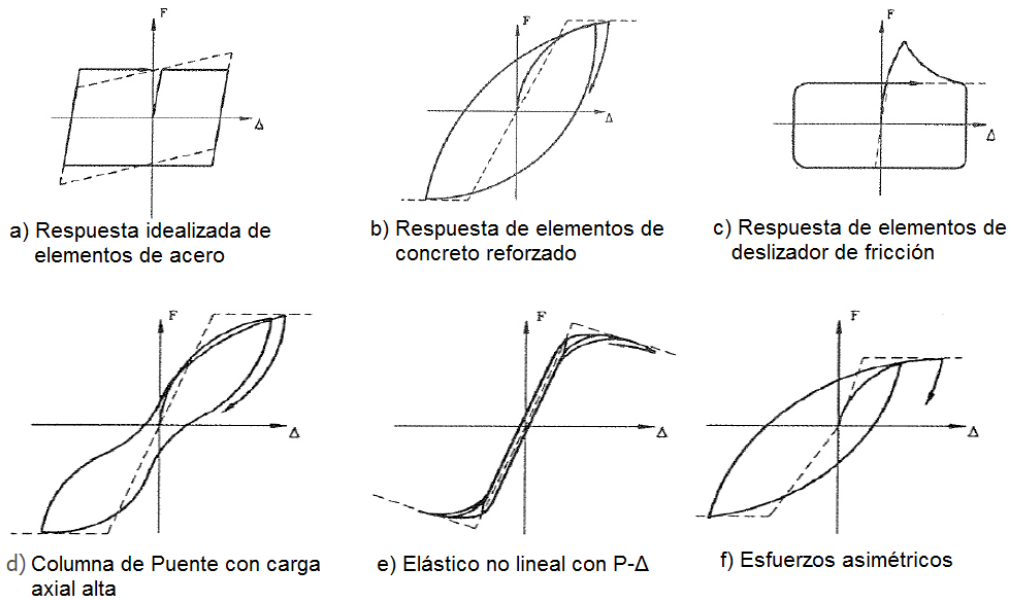


Imagen tomada de Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy, p. 65

Con el desplazamiento de diseño para la respuesta máxima determinada y el correspondiente amortiguamiento obtenido a partir de la demanda por ductilidad, el periodo efectivo ' T_e ' para el desplazamiento máximo de respuesta, medido a la altura efectiva ' H_e ' (Figura 1), se puede leer desde el grupo de espectros de desplazamientos para diferentes niveles de amortiguamiento, como se muestra en el ejemplo de la figura 5.

Figura 5. Espectro de Desplazamiento de Diseño [1]

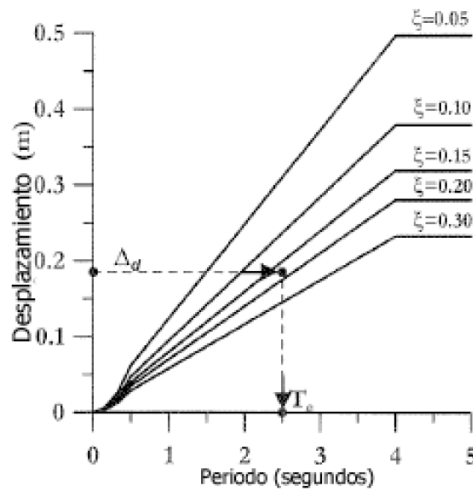


Imagen tomada de Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy, p. 64

La rigidez efectiva ' K_e ' del sistema equivalente SDOF para el desplazamiento máximo puede ser deducida de la ecuación del periodo de un oscilador SDOF:

$$T = 2\pi\sqrt{(m/K)} \quad (1)$$

Por lo tanto:

$$K_e = 4\pi^2 m_e/T_e^2 \quad (2)$$

Donde 'm_e' es la masa efectiva de la estructura que participa en el modo fundamental de vibración. De la Figura 2, la fuerza lateral de diseño que es también el cortante de diseño, y se obtiene como:

$$F = V_{Basal} = K_e \times \Delta d \quad (3)$$

El proceso de diseño es sencillo. La complejidad está relacionada con la determinación de las características de la "Estructura Equivalente", la determinación del desplazamiento de diseño, y el desarrollo del espectro en desplazamientos de diseño.

Sin embargo son necesarias algunas consideraciones para la distribución de la fuerza cortante basal de diseño V_{Basal} para las diferentes localizaciones de masas discretizadas, y para el análisis de la estructuras bajo la fuerza sísmica distribuida.

La formulación del DDBD descrita anteriormente con referencia a las figuras 3 y 5, tiene la ventaja de caracterizar los efectos de la ductilidad en demanda sísmica de un forma que es independiente de las características histeréticas, puesto que las relaciones amortiguamiento/ductilidad son generadas de forma separada para diferentes reglas histeréticas. Esto es relativamente sencillo para tener en cuenta la influencia de diferentes niveles de amortiguamiento en el espectro de respuesta de desplazamientos y por lo tanto gráficas similares a la figura 5 pueden ser generadas para nuevas intensidades sísmicas, o nuevas sismicidades de lugares específicos usando técnicas estándar.

También es posible, combinar la relación amortiguamiento/ductilidad para una regla histerética específica con el espectro de demanda de desplazamiento sísmico en un grupo de espectros de desplazamiento inelástico, donde las diferentes curvas se relacionan directamente con la demanda de ductilidad de desplazamiento, como se ilustra en la figura 6.

Figura 6. Ejemplo de un grupo de espectros de desplazamiento inelástico relacionados con el periodo efectivo para una regla histerética específica [1]

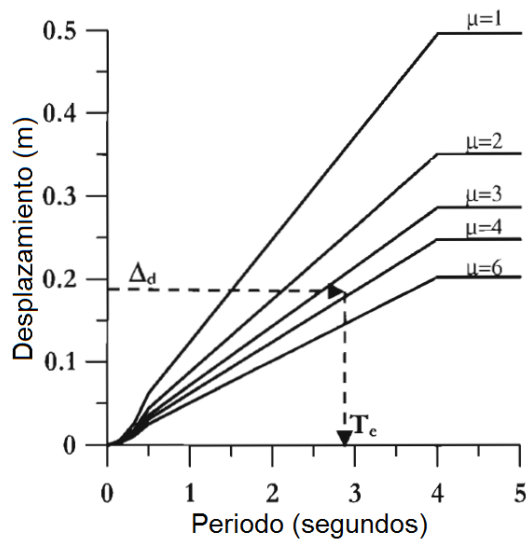


Imagen tomada de Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy, p. 66

Con la demanda sísmica caracterizada de esta forma, el proceso de diseño se simplifica ligeramente, pues se elimina un paso. Se ingresa en el conjunto de espectros de desplazamiento inelástico con el desplazamiento de diseño y se obtiene el periodo efectivo de diseño para el nivel de ductilidad de desplazamiento de diseño. Sin embargo, esta simplificación requiere que el espectro de desplazamiento inelástico sea generado para diferentes reglas histeréticas por cada intensidad sísmica considerada.

2.3 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO POR DESPLAZAMIENTOS

Aunque no hay un procedimiento estándar para el diseño sísmico de Muros de Concreto reforzado basado en desplazamientos, varios autores han propuesto una serie de pasos a seguir. En algunos casos, los procedimientos hacen referencia específicamente al diseño de muros estructurales de concreto reforzado; en otros casos, se trata de procesos generales de diseño sísmico basado en desplazamientos, aplicables a muros estructurales.

A continuación consignaremos superficialmente algunos de los procedimientos propuestos. Aunque en muchos casos se trata de propuestas similares o referidas al método directo (DDBD), se consignaron por variaciones en el alcance que cada autor establece.

No está dentro del alcance de este proyecto profundizar en el desarrollo de cada uno de los pasos. Si se requiere información adicional, deberá remitirse al escrito referenciado para cada método.

Esta información nos servirá de insumo para la generación del algoritmo de diseño.

2.3.1 Procedimientos propuestos por Priestley, Calvi y Kowalsky (2007) [1]

Todas las ecuaciones, figuras y secciones mencionadas, hacen referencia al libro de Priestley, Calvi y Kowalsky (2007) [1]

Aunque en el libro no se presenta el paso a paso de un procedimiento de diseño para muros, anotan los autores que en su mayoría se puede adoptar el procedimiento para diseño de pórticos, salvo por diferencias en los perfiles de deformación y los valores de amortiguamiento.

A continuación un compendio de los pasos, realizando la homologación propuesta por los autores:

Tabla 1 - Procedimiento propuesto por Priestley, Calvi y Kowalsky

Paso 1	Desplazamiento de piso para diseño: a) Desplazamiento de fluencia <i>[De acuerdo con la ecuación (6.5)]</i> b) Desplazamiento plástico <i>[De acuerdo con la ecuación (6.6a) ó la ecuación aproximada (6.6b)]</i> c) Curvatura y Capacidad a Momento de estado límite <i>[Calcular para las características del muro]</i> d) Perfil de desplazamiento de diseño <i>[De acuerdo con la ecuación (6.11)]</i>
Paso 2	Determinar desplazamiento de diseño para el sistema SDOF equivalente <i>[De acuerdo con la ecuación (5.3)]</i>
Paso 3	Calcular la masa equivalente <i>[De acuerdo con la ecuación (5.4)]</i>
Paso 4	Determinar la altura efectiva <i>[De acuerdo con la ecuación (5.5)]</i>
Paso 5	Determinar la ductilidad de diseño <i>[De acuerdo con la ecuación (5.6), pero utilizando la ecuación (6.4) para el valor de 'Δy']</i>
Paso 6	Determinar la rigidez efectiva de la estructura sustituta <i>[De acuerdo con la ecuación (5.10)]</i>
Paso 7	Determinar el cortante basal de diseño <i>[De acuerdo con la ecuación (5.11)]</i>
Paso 8	Distribuir el cortante basal de diseño <i>[De acuerdo con la ecuación (5.12)]</i>

Por otro lado, los autores plantean algunas “sub-rutinas” para tener en cuenta otros efectos en el diseño de los muros, tales como la torsión o el trabajo de muros con vigas de acople, que presentamos a continuación:

Procedimiento de diseño para tener en cuenta la torsión en muros (según sección 6.4.5):

Tabla 2 - Procedimiento para incluir efectos de torsión

Paso 1	Determinar si la flexibilidad o rigidez del muro gobierna el diseño <i>[De acuerdo con las ecuaciones (6.30) y (6.31)]</i>	
Paso 2	Para muros flexibles	Para muros rígidos
	a) Determinar las fuerzas para carga sin excentricidad <i>[De acuerdo con la ecuación (6.33a)]</i>	a) Determinar el desplazamiento de diseño y deriva en cubierta b) Determinar el desplazamiento de diseño a la altura efectiva
	b) Determinar el desplazamiento de diseño para el centro de masa	c) Determinar el desplazamiento de fluencia del sistema d) Determinar la ductilidad del sistema
	c) Determinar la ductilidad del sistema. <i>[Los valores de Δy pueden obtenerse de la ecuación (6.34b)]</i>	e) Determinar el cortante basal para el SDOF f) Determinar la rigidez rotacional
		d) Determinar la fuerza cortante basal

Procedimiento de diseño para muros acoplados:

Tabla 3 - Procedimiento para muros acoplados

Paso 1	Escoger la geometría de la estructura
Paso 2	Escoger la proporción de OTM tomado por las vigas de acople: β_{CB}
Paso 3	Determinar la altura de contraflexión <i>[Calcular, o para edificios regulares, según fig. 6.32(c)]</i>
Paso 4	Determinar la altura efectiva <i>[De acuerdo con la ecuación (6.35), o para edificios regulares, según fig. 6.32(a)]</i>
Paso 5	Calcular el desplazamiento de fluencia del muro <i>[De acuerdo con la ecuación (6.61), o para edificios regulares, según fig. 6.32(b).]</i>
Paso 6	Calcular la deriva de fluencia para las vigas de acople a la altura de contraflexión <i>[De acuerdo con la ecuación (6.64), incrementando un 50% si se usa refuerzo diagonal en las vigas de acople]</i>
Paso 7	Calcular el desplazamiento de diseño del sistema <i>[De acuerdo con las diferentes alternativas de la ecuación (6.35)]</i>
Paso 8	Calcular la deriva a la altura de contraflexión para el desplazamiento de diseño
Paso 9	Calcular los promedios de demanda de ductilidad por desplazamiento
Paso 10	Calcular el amortiguamiento viscoso equivalente del sistema <i>[De acuerdo con la ecuación (6.66)]</i>
Paso 11	Determinar el cortante basal requerido y el momento de vuelco, por principios DDBD en la forma habitual. Distribuir este momento de vuelco entre los muros y las vigas de acople en proporción al valor de ' β_{CB} ' determinado en el paso 2.
Paso 12	Calcular el cortante sísmico que será tomado por cada viga de acople <i>[De acuerdo con la ecuación (6.55)]</i>
Paso 13	Calcular la fuerza en cada viga de acople <i>[De acuerdo con la ecuación (6.56)]</i> Diseñar las vigas de acople.
Paso 14	Diseñar el refuerzo de flexión en la base
Paso 15	Usar procedimientos de diseño por capacidad para diseñar el muro por flexión y corte arriba de la base.

2.3.2 Procedimiento propuesto por López y Ayala (2013) [13]

Aunque se trata de un procedimiento propuesto para pórticos de concreto reforzado, tal como se estableció en el punto anterior, se puede realizar una homologación de procedimientos puesto que las variaciones se dan básicamente en la diferencia entre la silueta de la deformada del muro y la de un pórtico; lo cual corrige calculando los desplazamientos de fluencia, plástico, curvatura y capacidad de momento, de acuerdo con el Paso 1 del procedimiento básico en el punto anterior.

Cabe anotar que ese método no hace referencia a DDBD.

Todas las ecuaciones y figuras mencionadas, hacen referencia al paper “Método de diseño Sísmico basado en desplazamientos para marcos de concreto reforzado, S. López y G. Ayala (2013) [13]

Tabla 4 - Procedimiento propuesto por López y Ayala

Paso 1	Escoger la geometría de la estructura <i>[De acuerdo con criterio del diseñador, dimensionamiento mínimo de código o realizando un diseño preliminar por fuerzas]</i>
Paso 2	Realizar análisis modal espectral. De este modelo se obtiene: <ul style="list-style-type: none"> • Periodo fundamental • Deformada elástica
Paso 3	Definición de una distribución de daño <i>(Aplicaría para muros con vigas de acople)</i>
Paso 4	Análisis modal del modelo dañado De este modelo se obtiene: <ul style="list-style-type: none"> • Periodo asociado al estado dañado. • Deformada asociada al estado dañado. • Relación entre rigidez de post-fluencia y elástica 'α' <i>[Ecuación 4]</i>
Paso 5	Cálculo del desplazamiento objetivo del sistema de referencia, ' d_U ', en función de la distorsión permisible para el estado límite último. <i>[Ecuaciones 10 y 11]</i>
Paso 6	Definición de la ductilidad modal del sistema de referencia, asociado al estado último. <i>[Ecuaciones 19, 20 y 21]</i>
Paso 7	Obtención del Periodo ' T_{E_REQ} ', del espectro de desplazamientos de diseño, correspondiente a la ductilidad modal y la relación de rigidez de post-fluencia ' α '.
Paso 8	Obtención de la resistencia de fluencia por unidad de masa ' R_Y ' asociada al periodo ' T_{E_REQ} ' a partir del espectro de ' R_Y ' para la ductilidad modal y ' α '
Paso 9	Cálculo de la resistencia última del sistema de referencia, ' R_U ' <i>[Ecuación 3]</i>
Paso 10	Construcción de la curva de comportamiento con base en (d_Y, R_Y) (d_U, R_U)
Paso 11	Modificación de rigideces del modelo elástico y del dañado de la estructura

	prediseñada, de manera que el periodo fundamental del primero sea igual a ' T_{E_REQ} ' y del segundo sea igual a ' $\alpha \cdot T_{E_REQ}$ '. [Ecuación 22]
Paso 12	Análisis con cargas gravitacionales del modelo elástico.
Paso 13	Análisis modal espectral del modelo elástico, usando el espectro de diseño escalado por ' λ_E ', el cual se define como la relación entre ' R_Y ' de la curva de diseño con respecto a la pseudoaceleración del espectro elástico, correspondiente a ' T_{E_REQ} '. [Figura 11-a]
Paso 14	Análisis modal espectral del modelo dañado, usando el espectro de diseño escalado por ' λ_D ', el cual se define como la relación entre resistencia complementaria de la curva de diseño con respecto a la pseudoaceleración del espectro elástico, correspondiente a ' $\alpha \cdot T_{E_REQ}$ '. [Figura 11-b]
Paso 15	Diseño de los elementos estructurales con las fuerzas obtenidas de los 3 análisis, conforme a la normativa de diseño.

2.3.3 Método de diseño descrito por Human Cevallos (2011) [12]

No es un método propuesto por el autor; más bien se trata de una descripción del DDBD que éste incluye en el póster “Estudio Comparativo de los Métodos de Diseño Sísmico Basado en Fuerzas y Desplazamientos Aplicados a un Edificio de Hormigón Armado de Mediana Altura”, presentado en el “V Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural”, en Barcelona, España, en octubre de 2011 [12]

Tabla 5 - Procedimiento propuesto por Human Cevallos

Paso 1	Transformar la estructura a un sistema de un grado de libertad
Paso 2	Determinar el desplazamiento de cedencia
Paso 3	Determinar el desplazamiento de diseño
Paso 4	Calcular la ductilidad de diseño
Paso 5	Obtener amortiguamiento equivalente
Paso 6	Determinar el periodo de vibración
Paso 7	Determinar la rigidez efectiva
Paso 8	Determinar y distribuir fuerza sísmica
Paso 9	Realizar análisis estructural
Paso 10	Diseñar elementos por capacidad

2.3.4 Método propuesto por Richard Klingner (2007)

Se presentan los pasos del borrador distribuido por Richard Klingner en febrero de 2007, con base en el material distribuido por Steve Dill en enero del mismo año. Este método se planteó para diseño de muros reforzados de mampostería, pero, al igual que en el diseño por fuerzas, el procedimiento es homologable para muros

de concreto reforzado. La metodología se presenta para muros conformados por varios segmentos.

Este método no tiene relación con DDBD.

Tabla 6 - Procedimiento propuesto por Richard Klingner

Paso 1	<p>Asignar a la estructura un valor de R, con base en la CDS de acuerdo con ASCE7-05. Usando una configuración preliminar de muros, calcular cortante basal incluyendo efectos de redundancia y discontinuidad.</p> <p>Calcular cortante a lo largo de cada línea de resistencia.</p> <p>Usando momentos de inercia de secciones fisuradas, calcular deflexión inicial elástica 'δ_e' y deflexión total de diseño '$\delta_d = C_d \delta_e$, para $I = 1.0$.</p>
Paso 2	<p>Hacer un diseño inicial de los segmentos del muro, en aquella línea de resistencia por cargas fuera del plano y por refuerzo mínimo de norma.</p>
Paso 3	<p>Proponer un mecanismo inelástico de resistencia.</p> <ol style="list-style-type: none"> Revisar si cada segmento de muro se limita por flexión o por corte. Suponer que los segmentos de muro limitados por flexión tienen resistencia cortante inelástica en el plano igual a la sumatoria de los momentos en los 2 extremos, dividida por la altura a lo largo del segmento. Suponer que los segmentos de muro limitados por corte tienen una resistencia cortante inelástica igual a la V_m de la 2005 MSJC Code. Calcular la resistencia basal correspondiente, usando para cada segmento la resistencia flectora o cortante según corresponda. Esta resistencia se denomina "Resistencia de Movilización Completa". Si la resistencia inicial calculada es menor que el cortante basal de diseño, con un mayor valor de 'R' o con un mayor largo total de segmentos de muro. Si la resistencia inicial calculada es mayor que el cortante basal de diseño, escalar las demandas en los segmentos hacia el nivel de diseño.
Paso 4	<p>Usando la distribución plástica de resistencia requerida, diseñar por resistencia todos los segmentos, para todas las combinaciones de carga, incluyendo factores de mayoración de cargas y de reducción de resistencia y fuerzas axiales asociadas a momentos de acople.</p>
Paso 5	<p>Verificar que cada segmento que participe en el mecanismo inelástico tiene la capacidad de deformación para soportar la demanda inelástica esperada.</p> <ol style="list-style-type: none"> Para segmentos limitados por flexión, verificar que la capacidad inelástica de rotación de cada rótula iguale o exceda la demanda de rotación en la misma. Para segmentos limitados por corte, calcular la deformación inelástica cortante asociada a la deflexión de diseño. <ol style="list-style-type: none"> Si la deformación inelástica cortante no excede de 0.0025, el refuerzo cortante solo debe satisfacer los requisitos de resistencia del Paso 4 y los requisitos generales del Paso 2. Si la deformación inelástica cortante excede de 0.0025, agregar refuerzo cortante y volver al Paso 3. Si la deformación inelástica cortante excede de 0.005, agregar más segmentos de muro o aumentar el espesor de los segmentos existentes para reducir la deriva. Diseñar cada segmento del muro, limitado por flexión o por corte de acuerdo con los pasos 4a y 4b.

2.3.5 Método propuesto por Urrego y Bonett (2010) [17]

Se presenta un método práctico para el diseño de muros en concreto reforzado, teniendo en cuenta los modos superiores en la respuesta sísmica. A diferencia de DDBD que plantea el problema mediante la representación de la estructura como un SDOF, los autores plantean un modelo de tres grados de libertad. El método se desarrolla mediante un proceso iterativo de convergencia rápida, en el cual, en cada ciclo se realiza análisis y diseño.

Aunque los autores presentan un diagrama de flujo del procedimiento (el cual puede ser consultado en el ‘paper’ referenciado), presentamos el proceso global del método.

Tabla 7 - Procedimiento propuesto por Urrego y Bonett

Paso 1	Definición de los objetivos de desempeño en términos de la demanda sísmica y los parámetros de control del desempeño estructural (estados límite).
Paso 2	Predimensionamiento geométrico e los muros y definición de refuerzo inicial por cuantías mínimas
Paso 3	Cálculo de la capacidad a flexión, definición de diagramas momento-curvatura (teniendo en cuenta la carga axial). Definición de la longitud de la rótula plástica, de forma que se garantice la ductilidad de desplazamiento requerida para el estado límite.
Paso 4	Generación del sistema de tres grados de libertad, para considerar el efecto de los modos superiores.
Paso 5	Cálculo de la capacidad de ductilidad de desplazamiento del muro.
Paso 6	Determinación de la demanda de ductilidad por desplazamiento para el nivel de amenaza sísmica requerido.
Paso 7	Definición del refuerzo final y geometría para satisfacer la demanda requerida para los tres niveles de desempeño, teniendo en cuenta el efecto de los modos superiores.

2.3.6 Método presentado por Jara, Jara y Osorio (2009) [10]

No es un método propuesto por los autores, ni se presenta para el diseño de muros de concreto reforzado. Al igual que lo mostrado por Huaman Cevallos, se trata de una descripción del procedimiento DDBD que los autores incluyen en el “Curso de Diseño Sísmico de Puentes por Desplazamientos” [10], presentado en el “3er Simposio Internacional de Diseño y Construcción de Puentes”, en Bucaramanga, Colombia, en diciembre de 2009.

Tabla 8 - Procedimiento propuesto por Jara, Jara y Osorio

Paso 1	Definición de estados límite. Servicio, control de daño, protección de vida, prevención de colapso, etc.
Paso 2	Definición de la demanda sísmica. Generación de espectros de desplazamientos para diferentes condiciones de amortiguamiento.
Paso 3	Periodo efectivo del sistema. Con base en un predimensionamiento se calculan los desplazamientos de fluencia ' Δy '. Para cada estado límite se obtiene una ductilidad de desplazamiento, que multiplicado por el desplazamiento de fluencia indica el desplazamiento máximo esperado. Con este desplazamiento y la curva del espectro de desplazamientos correspondiente al amortiguamiento equivalente, se obtiene el periodo efectivo del sistema.
Paso 4	Rigidez efectiva y Solicitaciones. Se determina ' K_e ' de acuerdo con la ecuación (2), y el cortante basal de la ecuación (3).
Paso 5	Diseño de los Elementos. Conocidas las solicitaciones, se determina el refuerzo requerido en la articulación plástica para el nivel de ductilidad asignado. Los demás elementos se diseñan bajo criterios de capacidad.
Paso 6	Dimensiones Finales. Si se requiere modificar las dimensiones del elemento para cumplir con los requisitos de diseño, se deberá repetir el procedimiento desde el Paso 3.
Paso 7	Diseño para todos los estados límite. Repetir el proceso para todos los estados límites definidos en el Paso 1.

2.3.7 Método presentado por V. Suárez (2009) [11]

Nuevamente se trata de una descripción de pasos globales del procedimiento DDBD, que el autor presenta en el paper “Diseño Basado en Desplazamientos, una Alternativa Racional al Diseño Basado en Fuerzas”, en la revista Tecnológica ESPOL-RTE, Vol. 22, en noviembre de 2009 [11].

Tabla 9 - Procedimiento propuesto por V. Suárez

Paso 1	Dimensionamiento Inicial de los Elementos Estructurales
Paso 2	Determinación del desplazamiento de diseño, basándose en los estados límites de deformación u otros aplicables
Paso 3	Determinación del amortiguamiento viscoso efectivo, basándose en las demandas de ductilidad para el desplazamiento de diseño.
Paso 4	Determinación de la rigidez requerida y resistencia, usando un espectro de desplazamiento.

3. IMPLEMENTACIÓN EN LA NORMATIVA COLOMBIANA DE MÉTODOS DE DISEÑO SÍSMICO BASADOS EN DESPLAZAMIENTOS

3.1 CÓDIGO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIONES SISMO-RESISTENTES (1984) [14]

Aunque al Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica realizó traducciones de normativas estadounidenses, como los Requisitos de la SEAOC en 1976 o el documento ATC-3 en 1979, que contenían requisitos de diseño sísmico para el área de California; la primera normativa de uso obligatorio en Colombia fue el Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes, Decreto 1400 de 1984.

Para esa época, se tenían identificados los problemas con el diseño sísmico basado en fuerzas, pero aún no se avanzaba mucho en el desarrollo de métodos de diseño basados en desempeño.

El Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes de 1984 [14], no hacía alusión directa a métodos de análisis o diseño por desplazamientos. En el A.1.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO, se establece como obtener y aplicar las fuerzas sísmicas, el análisis mediante FHE o Análisis Modal y el diseño por resistencia. No obstante, en el artículo A.1.4.2 establece:

ARTÍCULO A.1.4.2 - Cualquier sistema de diseño y/o construcción que haga referencia al alcance de este código y del cual exista evidencia, obtenida por uso, análisis o experimentación de que está capacitado para cumplir el Propósito de este Código pero que no cumple uno o más requisitos específicos de él; puede ser presentado ante la dependencia distrital o municipal encargada de expedir las licencias de construcción acompañado de un concepto al respecto de la Sociedad Colombiana de

Ingenieros, cuerpo consultivo del estado, en el cual se confirme la idoneidad del sistema y se defina el alcance de su utilización. Los costos en que se incurra para dar el concepto serán de cargo de quien presenta el sistema.

Parágrafo – En lo que respecta a la capacidad sísmica del sistema, la sociedad Colombiana de Ingenieros debe consultar a la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, la cual es Sociedad correspondiente de la Sociedad.

-Tomado de CCCSR-84 (1984)- [14]

Por tanto, aunque no se mencionan métodos de diseño sísmico diferentes los basados en fuerzas, estaba abierta la posibilidad de utilizar metodologías alternativas, dentro de las cuales podrían haberse presentado métodos basados en desplazamientos, claro, si estuviesen mejor desarrollados.

Ahora bien, por criterios de estados límite de servicio, se exigía un control de deformaciones de losa para cargas gravitacionales y de derivas de piso para cargas sísmicas. Para esta normativa, se limitaba la deformación de cada piso de la edificación al 1.5% de la altura de entrepiso. Esto, aunque no implica un enfoque de diseño por desplazamiento, si indica que había conciencia de la importancia de controlar las deformaciones de la estructura.

3.2 NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98 [15]

Casi catorce años después aparece la NSR-98, que fue una normativa de diseño mucho más completa y estructurada. No obstante, en el artículo A.1.3 – PROCEDIMIENTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES, DE

ACUERDO CON EL REGLAMENTO, se presenta nuevamente un paso-a-paso para el diseño sísmico basado en fuerzas.

Aunque el artículo 1.4.2 se modificó y en esta norma hacía alusión a la aceptación de sistemas prefabricados, dentro del cuerpo de la Ley 400 de 1997, en los artículos 13 y 14 se incluyó la reglamentación de alternativas contempladas en el Artículo A.1.4.2 del CCCSR-84; así:

Artículo 13. Otros sistemas metodología o materiales. Cualquier sistema de diseño y construcción que haga referencia al objeto de esta Ley y sus reglamentos, del cual exista evidencia obtenida por uso, análisis o experimentación que se esta capacitado para cumplir sus propósitos pero no reúne uno o mas requditos de la Ley y sus reglamentos, podrá presentarse ante la dependencia Distrital o Municipal a cargo de la expedición de las licecias de costruccion o a compañado de una autorización de la “Comision Asesora Përmanente para el Regimen de Costrucciones Sismo Resistentes”, de acuerdo con lo dispuesto en el articulo 14, la cual no exime del régimen de responsabilidades establecido en la ley y sus reglamentos.

Artículo 14°. Conceptos e la “ Comision Asesora Permanente para el Regimen de construcciones Sismo Resistentes” Con base eb la evidencia presentada sobre la idoneidad del sistea de resistencia sísmica y del alcance propuesto para su utilización, la “Comisión Asesora Permaente para el Regimen de construcciones Sismo Resistentes” emitirá un concepto sobre el uso de materiales, métodos y sitemas comprendidors en esta Ley y sus reglamentos.

-Tomado de NSR-98 (1998)- [15]

Como se observa, aunque se avanzó mucho en la reglamentación del diseño basado en fuerzas, nuevamente los procedimientos alternativos de diseño sísmico

apenas son mencionados como opciones a estudiar, aunque no se restringe su uso.

En cuanto al control de derivas, se hicieron más rigurosos los límites y se presentan valores diferentes dependiendo del material de construcción. Para estructuras de concreto reforzado, metálicas y de madera, se establece la deriva máxima de piso como el 1.0% de la altura de entrepiso. Para estructuras de mampostería, la deriva máxima será del 0.5% de la altura del entrepiso, que implica que por ser un material más frágil tiene menor capacidad de deformación. La severidad de esta restricción está claramente enfocado al control de daño.

3.3 REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10 [16]

En 2010 aparece la normativa sismo resistente vigente hasta la fecha en el territorio nacional. El procedimiento de diseño sigue estando basado en fuerzas. La ley 400 de 1997 sigue vigente y conteniendo lo referente a procedimientos alternativos en sus Artículos 13 y 14.

La tabla A.1.3-1 establece un procedimiento de diseño estructural para edificaciones nuevas y existentes, basado en fuerzas. Sin embargo en varios apartes se empieza a dar un giro hacia la filosofía de diseño basada en desplazamientos, tal como anotamos a continuación.

La primera novedad importante en cuanto al enfoque de diseño por desempeño consiste en la inclusión de espectros de velocidades (A.2.6.2) y de desplazamientos (A.2.6.3), tal como se presenta en las figuras 7 y 8.

Figura 7. Espectro de Velocidades de Diseño [16]

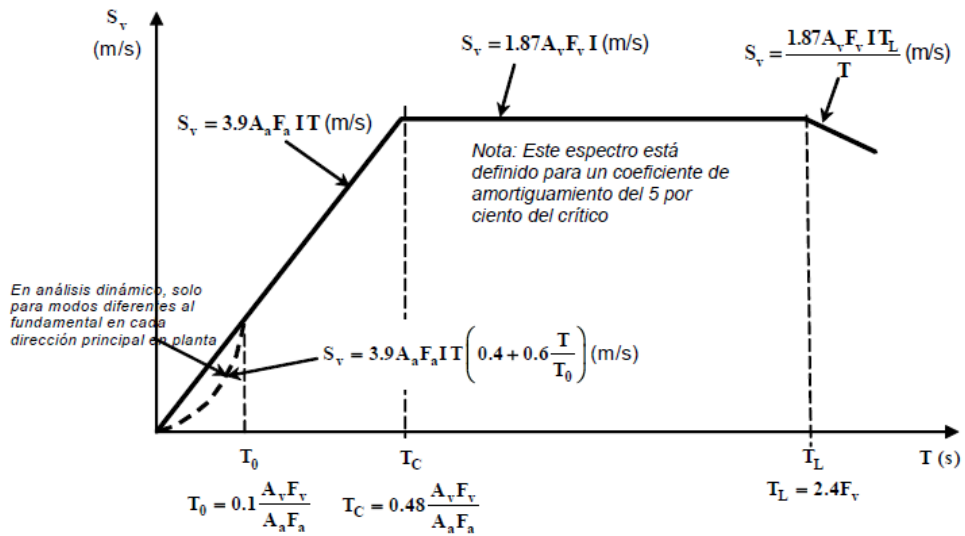


Figura A.2.6-2 — Espectro Elástico de Velocidades (m/s) de Diseño

-Tomado de NSR-10 (2010)- [16]

Figura 8. Espectro de Desplazamientos de Diseño [16]

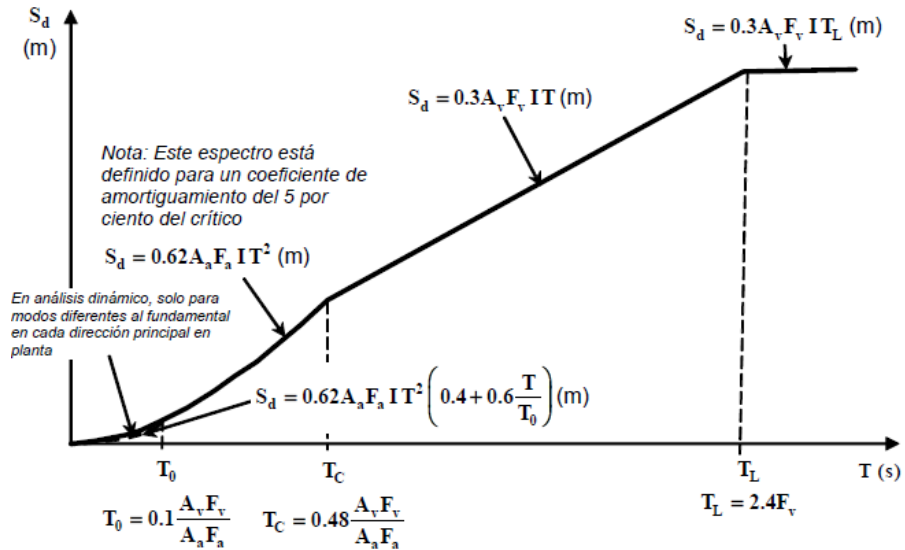


Figura A.2.6-3 - Espectro Elástico de Desplazamientos (m) de Diseño

-Tomado de NSR-10 (2010)- [16]

Si bien es un paso importante, al menos para iniciar una familiarización con métodos de diseño sísmico basados en desempeño, el método DDBD requiere más que de un espectro con un único amortiguamiento, de una familia de espectros para diferentes grados de amortiguamiento, tal como el que se presentó en la figura 5. Así mismo, el espectro de desplazamientos por sí solo no es insumo suficiente para desarrollar un diseño por DDBD, y se requieren otras correlaciones como la que existe entre amortiguamiento viscoso equivalente ' ξ ' y demanda de ductilidad por desplazamiento, presentada en la figura 3.

En el tema específico de muros de concreto, se han incluido criterios derivados de metodologías de diseño por desplazamientos para muros con capacidad especial de disipación de energía (DES) y para muros con capacidad moderada de disipación de energía (DMO).

En C.21.9.6.2 de NSR-10, se incluye una ecuación claramente procedente de una filosofía de diseño basada en desplazamientos, tal como lo indica el Comentario© contenido en la misma norma. La ecuación presenta un límite para determinar la necesidad de incluir elementos especiales de borde en muros estructurales. Este requisito, a la larga, está relacionado con la ductilidad que se le proporcionará al muro.

A continuación incluimos el requisito y el comentario, tal como aparecen en la norma:

Figura 9. Regquisitos de diseño sismo resistente

NSR-10 – Capítulo C.21 – Requisitos de diseño sismo resistente

REGLAMENTO	COMENTARIO Ⓢ
<p>(a) Las zonas de compresión deben ser reforzadas con elementos especiales de borde donde:</p> $c \geq \frac{\ell_w}{600(\delta_u/h_w)} \quad (C.21-11)$ <p>Donde c en la ecuación (C.21-11) corresponde a la mayor profundidad del eje neutro calculada para la fuerza axial mayorada y resistencia nominal a momento congruente con el desplazamiento de diseño δ_u. El cociente δ_u/h_w en la ecuación (C.21-11) no debe tomarse menor que 0.007</p>	<p>La ecuación (C.21-11) se deriva de un enfoque basado en desplazamientos.^{C.21.49,C.21.50} Este procedimiento supone que se requiere de elementos de borde especiales para confinar el concreto en los lugares en donde la deformación unitaria en la fibra extrema de compresión del muro exceda a un valor crítico cuando el muro alcanza el desplazamiento de diseño. Se pretende que la longitud horizontal del elemento especial de borde se extienda, por lo menos, en toda la zona en donde la deformación unitaria de compresión exceda el valor crítico. La altura del elemento de borde especial se basa en estimaciones del límite superior de la longitud de articulación plástica y se extiende más allá de la zona en la cual se podría producir descascaramiento del concreto. El límite inferior de 0.007 en la cantidad δ_u/h_w requiere una capacidad de deformación moderada en edificaciones rígidas.</p>

-Tomado de NSR-10 (2010)- [16]

Si bien la normativa reconoce la importancia del enfoque de diseño basado en desplazamientos, la inclusión de un requisito derivado de este enfoque no significa la implementación misma del método.

4. ALGORITMO PARA EL DISEÑO POR DESPLAZAMIENTOS DE MUROS ESTRUCTURALES EN CONCRETO REFORZADO

Con base en los procedimientos presentados en 1.3, se generó un algoritmo para el diseño de muros estructurales por DDBD.

Tabla 10 - Algoritmo para el diseño por desplazamientos de muros estructurales en concreto reforzado

Paso 1	Definiciones iniciales: <ol style="list-style-type: none"> 1. Predimensionamiento: de acuerdo con arquitectura y normativa vigente. 2. Definición de estados límite: definición de niveles de comportamiento estructural esperado, asociados a probabilidades de excedencia. 3. Definición de la demanda sísmica: Generación de Espectros de desplazamiento de acuerdo con los periodos de retorno derivados de la probabilidad de excedencia de los estados límite, para diferentes condiciones de amortiguamiento
Paso 2	Transformar el muro a un sistema SDOF: determinar altura equivalente ' H_e ' y masa equivalente ' m_e ', a partir de las ecuaciones (5.4) y (5.5) del libro de Priestley, Calvi, Kowalsky, 2007.
Paso 3	Calcular el Desplazamiento de Fluencia ' Δy ': a partir de las ecuaciones (6.4) y (6.5) del libro de Priestley, Calvi, Kowalsky, 2007.
Paso 4	Determinar el Desplazamiento de Diseño ' Δd ': para cada estado límite (ej: deriva máxima \rightarrow control de daño)
Paso 5	Calcular la ductilidad de diseño ' μ ' = $\Delta d / \Delta y$
Paso 6	Determinar el Amortiguamiento Viscoso Equivalente ' ξ ': Se lee de la figura 3, con base en la ductilidad de diseño.
Paso 7	Determinar el Periodo efectivo del sistema ' T_e ': se obtiene a partir del Desplazamiento de Diseño ' Δd ' y la curva del espectro de desplazamientos correspondiente al Amortiguamiento Viscoso Equivalente ' ξ '.
Paso 8	Determinar la rigidez efectiva ' Ke ': introduciendo el valor de ' T_e ' en la Ecuación 2.
Paso 9	Determinar el cortante basal: con base en ' Ke ' y ' Δd ', usando la Ecuación 3.
Paso 10	Distribuir las fuerzas.
Paso 11	Realizar análisis estructural con las cargas distribuidas.
Paso 12	Realizar diseño estructural para las solicitaciones resultantes del análisis. En caso de que se requiera modificar las dimensiones del muro para satisfacer el diseño, se deberá reiniciar el proceso en el paso 3.
Paso 13	Repetir desde el Paso 4 para cada estado límite.

5. CONCLUSIONES

El diseño basado en fuerzas es un procedimiento válido para resolver el problema de cargas gravitacionales que inducen esfuerzos en el rango elástico de una estructura. Para cargas sísmicas actuando en el rango inelástico, este método presenta muchas falencias. Métodos basados en el desempeño de la estructura son más apropiados para tratar el problema sísmico. Los métodos de diseño basado en desempeño se han desarrollado en dos corrientes principales: a) métodos basados en desplazamientos, y, b) métodos energéticos y modelos de daño acumulado.

Se estudiaron los principios básicos del método DDBD y se revisaron diversos procedimientos de diseño planteados por diferentes autores.

Se revisó la normativa colombiana, con el fin de examinar su orientación hacia estas filosofías de diseño, encontrándose que el método basado en fuerzas sigue siendo el procedimiento de diseño sísmico adoptado hasta ahora. Nuestras normativas se basan fundamentalmente en códigos estadounidenses, que conceptualmente no difieren mucho de los europeos, lo que indica que, aunque están claramente identificadas las deficiencias asociadas al diseño sísmico por fuerzas, sigue siendo el procedimiento vigente en la mayoría de los códigos alrededor del mundo. Sin embargo, en la normativa actual ya se incluyen algunos parámetros de diseño con enfoque de diseño por desplazamientos, sin que esto signifique la inclusión misma del método.

No obstante, la normativa colombiana permite métodos alternativos de diseño, por lo que, aunque no se encuentran reglamentados minuciosamente, no se descarta el uso de métodos basados en desempeño para el diseño sísmico de edificaciones.

Con base en los procedimientos revisados, se propuso un algoritmo de diseño basado en desplazamientos, por el método DDBD, para muros estructurales en concreto reforzado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy.
- [2] Priestley, M.J.N. (1993) "Myths and Fallacies in Earthquake Engineering – Conflicts Between Design and Reality," Bulletin NZ National Society for Earthquake Engineering, Vol. 26., No. 3, Sept 1993, pp. 328-341.
- [3] Applied Technology Council, (1996). ATC- 32 Improved seismic design criteria for California bridges, Redwood City, California.
- [4] Kowalsky, M.J., Priestley, M.J.N., and MacRae, G.A. (1995). Displacement-based Design of R.C. Bridge Columns in Seismic Regions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 24, pp. 1623-1643.
- [5] Suarez V, Kowalsky M. (2006), Seismic design of drilled shaft bents with soilstructure interaction effects, Journal of Earthquake Engineering, in press.
- [6] SEAOC. (2004). Revised Interim Guidelines Performance-Based Seismic Engineering. Structural Engineers Association of California.
- [7] Priestley, M.J.N. (1998) "Brief Comments on Elastic Flexibility of Reinforced Concrete Frames, and Significance to Seismic Design " Bulletin NZ National Society for Earthquake Engineering, Vol. 31., No. 4, pp. 246-259.
- [8] Shibata and Sozen, (1976). Substitute Structure Method for Seismic Design. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 102, No ST1.
- [9] Blandon, C. A., and Priestley, M. J. N., (2005) "Equivalent viscous damping equations for direct displacement-based design" Journal of Earthquake Engineering Vol. 9, Special Issue 1.
- [10] Jara M., Jara J.M., Osorio E., (2009). "Curso de Diseño Sísmico de Puentes por Desplazamientos", presentado en el "3er Simposio

Internacional de Diseño y Construcción de Puentes”, Bucaramanga, Colombia.

- [11] Suarez V, (2009). Diseño Basado en Desplazamientos, una Alternativa Racional al Diseño Basado en Fuerzas. Revista Tecnológica ESPOL – RTE, Vol. 22, N.2, 47-59.
- [12] Huaman Cevallos V.M., (2011). “Estudio Comparativo de los Métodos de Diseño Sísmico Basado en Fuerzas y Desplazamientos Aplicados a un Edificio de Hormigón Armado de Mediana Altura”, presentado en el “V Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural”, Barcelona, España.
- [13] López S. y Ayala G., (2013). “Método de Diseño Sísmico Basado en Desplazamientos para Marcos de Concreto Reforzado”, Revista de Ingeniería Sísmica No. 88 91-111.
- [14] AIS 100 - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (1984). Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR.
- [15] AIS 100 - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.
- [16] AIS 100 - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.
- [17] URREGO, HECTOR, & BONETT, RICARDO L.. (2010). A DISPLACEMENT-BASED DESIGN METHOD FOR MEDIUM-RISE REINFORCED CONCRETE WALLS. DYNA, 77(163), 13-25. Retrieved August 11, 2015, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S001273532010000300002&lng=en&tlng=en.

BIBLIOGRAFIA

AIS 100 - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (1984). Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR.

AIS 100 - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.

AIS 100 - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Applied Technology Council, (1996). ATC- 32 Improved seismic design criteria for California bridges, Redwood City, California.

Blandon, C. A., and Priestley, M. J. N., (2005) "Equivalent viscous damping equations for direct displacement-based design" Journal of Earthquake Engineering Vol. 9, Special Issue 1.

Huaman Cevallos V.M., (2011). "Estudio Comparativo de los Métodos de Diseño Sísmico Basado en Fuerzas y Desplazamientos Aplicados a un Edificio de Hormigón Armado de Mediana Altura", presentado en el "V Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural", Barcelona, España.

Jara M., Jara J.M., Osorio E., (2009). "Curso de Diseño Sísmico de Puentes por Desplazamientos", presentado en el "3er Simposio Internacional de Diseño y Construcción de Puentes", Bucaramanga, Colombia.

Kowalsky, M.J., Priestley, M.J.N., and MacRae, G.A. (1995). Displacement-based Design of R.C. Bridge Columns in Seismic Regions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 24, pp. 1623-1643.

López S. y Ayala G., (2013). “Método de Diseño Sísmico Basado en Desplazamientos para Marcos de Concreto Reforzado”, Revista de Ingeniería Sísmica No. 88 91-111.

Priestley, M.J.N. (1993) “Myths and Fallacies in Earthquake Engineering – Conflicts Between Design and Reality,” Bulletin NZ National Society for Earthquake Engineering, Vol. 26., No. 3, Sept 1993, pp. 328-341.

Priestley, M.J.N. (1998) “Brief Comments on Elastic Flexibility of Reinforced Concrete Frames, and Significance to Seismic Design ” Bulletin NZ National Society for Earthquake Engineering, Vol. 31., No. 4, pp. 246-259.

Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007) Displacement Based Seismic Design of Structures. Pavia, Italy.

SEAOC. (2004). Revised Interim Guidelines Performance-Based Seismic Engineering. Structural Engineers Association of California.

Shibata and Sozen, (1976). Substitute Structure Method for Seismic Design. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 102, No ST1.

Suarez V, (2009). Diseño Basado en Desplazamientos, una Alternativa Racional al Diseño Basado en Fuerzas. Revista Tecnológica ESPOL – RTE, Vol. 22, N.2, 47-59.

Suarez V, Kowalsky M. (2006), Seismic design of drilled shaft bents with soilstructure interaction effects, Journal of Earthquake Engineering, in press.

URREGO, HECTOR, & BONETT, RICARDO L.. (2010). A DISPLACEMENT-BASED DESIGN METHOD FOR MEDIUM-RISE REINFORCED CONCRETE WALLS. DYNA, 77(163), 13-25. Retrieved August 11, 2015, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S001273532010000300002&lng=en&tlng=en.