



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:
CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE
HORMIGÓN ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS
EFECTOS DE DEGRADACIÓN POR CARGA CÍCLICA.**

**AUTOR:
Condo Colcha, Alejandro Bolívar**

**TRABAJO DE TITULACION PREVIO A LA OBTENCION DEL
TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:
Ing. Barros Cabezas, José Andrés**

**Guayaquil, Ecuador
2015**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Alejandro Bolívar Condo Colcha**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR (A)

Ing. José Andrés, Barros Cabezas

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Stefany Esther, Alcívar Bastidas

Guayaquil, a los 22 del mes de Septiembre del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Alejandro Bolívar Condo Colcha**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **CALIBRACION DE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE HORMIGON ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE DEGRADACION POR CARGA CICLICA** previa a la obtención del Título **de Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 22 del mes de Septiembre del año 2015

EL AUTOR

Alejandro Bolívar, Condo Colcha



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Alejandro Bolívar Condo Colcha**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **CALIBRACION DE UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE HORMIGON ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE DEGRADACION POR CARGA CICLICA**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 22 del mes de Septiembre del año 2015

EL AUTOR

Alejandro Bolívar Condo Colcha

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme su fortaleza.

A mi familia, por brindarme siempre su apoyo y su amor incondicional durante todos estos años.

A mi tutor, Ingeniero José Barros, por su guía y dedicación de tiempo para el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero. Carlos Chon Díaz, por darme la oportunidad de trabajar en su empresa.

Al futuro Ing. David Loor Mera, por ser un gran compañero y amigo durante los años de estudio.

Alejandro Condo

DEDICATORIA

A mis padres Felipe y Piedad y a mi abuelita Natividad.

Alejandro Condo

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| INTRODUCCION..... | 1 |
| I.1 Generalidades | 1 |
| I.2 Objetivo..... | 3 |
| I.3 Justificación..... | 3 |
| I.4 Análisis estático no-lineal (push-over) | 3 |
| I.5 Análisis dinámico tiempo-historia no-lineal | 5 |
| I.6 Curva de fragilidad | 5 |
| I.7 Modelos no-lineales para secciones de hormigón armado..... | 6 |
| I.7.1 Modelo de Ibarra-Krawinkler-Medina..... | 6 |
| I.7.2 Modelo de fibras | 7 |
| I.7.3 Ventajas y desventajas de cada modelo..... | 10 |
| CAPÍTULO 1 | 12 |
| BASE DE DATOS, CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO Y ACERO DE REFUERZO..... | 12 |
| 1.1 Descripción de la Base de datos..... | 12 |
| 1.1.1 Parámetros | 13 |
| 1.2 Caracterización del comportamiento del Hormigón confinado..... | 18 |
| 1.2.1 Resistencia a la compresión del hormigón confinado (f'_{cc})..... | 19 |
| 1.2.2 Comando Concrete02-OPENSEES | 23 |
| 1.3 Caracterización del comportamiento del Acero de refuerzo longitudinal..... | 25 |
| 1.3.1 Comportamiento monotónico de esfuerzos en el acero de refuerzo..... | 25 |
| 1.3.2 Respuesta cíclica inelástica del acero de refuerzo..... | 26 |
| 1.3.3 Comando Reinforcing Steel Material – OPENSEES..... | 27 |
| 1.4 Rótula Plástica | 29 |
| 1.4.1 Longitud de formación de una rótula plástica | 30 |
| 1.4.2 Comando Beam With Hinges - OPENSEES..... | 31 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 2 | 33 |
| MODELOS ESTRUCTURALES..... | 33 |
| 2.1 Generalidades | 33 |
| 2.2 Alcance de los modelos | 33 |
| 2.3 Condiciones de apoyo..... | 34 |
| 2.3.1 Cantiliver..... | 35 |
| 2.3.2 Double-Curvature o doblemente empotrada | 36 |
| 2.4 Materiales | 36 |
| 2.4.1 Hormigón confinado..... | 37 |
| 2.4.2 Hormigón no confinado | 37 |
| 2.4.3 Acero de refuerzo longitudinal | 37 |
| 2.5 Sistema de modelación de la sección fibras | 38 |
| 2.6 Modelación del elemento | 39 |
| 2.7 Definición de Cargas | 40 |
| 2.7.1 Carga axial | 40 |
| 2.7.2 Carga cíclica | 40 |
| 2.8 Tipo de Análisis | 41 |
| 2.8.1 Análisis gravitacional | 41 |
| 2.8.2 Análisis Cíclico | 42 |
| 2.9 Metodología para la ejecución de un modelo..... | 42 |
| 2.10 Aplicación de modelo estructural. | 43 |
| 2.10.1 Ejemplo 1.- Modelo Cantiliver..... | 43 |
| 2.10.2 Ejemplo 2.- Modelo Double – Curvature | 44 |
| CAPÍTULO 3 | 46 |
| PROGRAMA DE CALIBRACIÓN..... | 46 |
| 3.1 Generalidades | 46 |
| 3.2 Scripts OpenSees | 46 |
| 3.3 Script Matlab | 46 |
| 3.3.1 # de Ensayo | 47 |
| 3.3.2 Conffin-Manson, Fatiga y Reducción de Resistencia | 47 |

| | |
|---|----|
| 3.3.3 Omega | 47 |
| 3.3.5 Número de paso..... | 47 |
| 3.4 Interfaz Gráfica | 48 |
| CAPÍTULO 4 | 49 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 49 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 50 |
| ANEXOS | 52 |
| APENDICE A..... | 53 |
| RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGON CONFINADO..... | 53 |
| APENDICE B..... | 59 |
| LONGITUD DE ROTULA PLASTICA..... | 59 |
| APENDICE C..... | 61 |
| BASE DE DATOS..... | 61 |
| APENDICE D..... | 62 |
| SCRIPTS DE MODELOS EN OPENSSES DE LOS EJEMPLOS..... | 62 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Definición de Condiciones de apoyo | 14 |
| Tabla 2. Configuración de tipo de confinamiento. (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004)..... | 15 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Curva de capacidad (Guevara , Osorio, & Vargas, 2006) | 4 |
| Fig. 2 Curva de fragilidad (Shinozuka, Feng, Kim, Uzawa, & Ueda, 2001) | 6 |
| Fig. 3 Curva de Resistencia Vs. Deformación (Back-bone curve) para modelos histeréticos (Ibarra, Medina, & Krawinkler, 2005) | 7 |
| Fig. 4 Sección de Columna – Modelo de fibras (Verri, 2003) | 8 |
| Fig. 5 Curva Esfuerzo Vs. Deformación para una fibra de acero (Verri, 2003) | 8 |
| Fig. 6 Curva Esfuerzo Vs. Deformación para una fibra de hormigón no confinado (Verri, 2003) | 9 |
| Fig. 7 Curva Esfuerzo Vs. Deformación para una fibra de hormigón confinado (Verri, 2003)..... | 9 |
| Fig. 8 Condiciones de apoyo (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004) | 14 |
| Fig. 9 Tipo de confinamiento (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004) | 16 |
| Fig. 10 Tipo de confinamiento (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004) | 17 |
| Fig. 11 Columna de Hormigón Armado (H.A)..... | 18 |
| Fig. 12 Núcleo efectivo de confinamiento para estribos rectangulares. (Mander, Priestley, & Park, 1988)..... | 22 |
| Fig. 13 Monograma de coeficiente de mayoración de resistencia K. (Mander, Priestley, & Park, 1988)..... | 22 |
| Fig. 14 Diagrama Esfuerzo deformación del material Concrete02 (Mohd & Mohd, 1994) | 24 |
| Fig. 15 Valores de los parámetros usados para el comando Concrete02 (Karthik & Mander, 2011) | 25 |
| Fig. 16 Curvas esfuerzo Vs deformación del acero – comportamiento monotónico (Paulay & Priestley, 1992)..... | 26 |
| Fig. 17 Curvas esfuerzo Vs deformación del acero bajo cargas cíclicas (Paulay & Priestley, 1992). | 27 |
| Fig. 18 Curva esfuerzo Vs deformación del acero. OpenSees (OpenSees, 2010). | 29 |
| Fig. 19 Relaciones de momento, curvatura y deformación para un elemento en cantiléver (Paulay & Priestley, 1992)..... | 30 |
| Fig. 20 Zonas elásticas e inelásticas de un elemento “Beam with Hinges” ... | 31 |
| Fig. 21 Coordenadas del modelo y grados de libertad. | 34 |
| Fig. 22 Grados de libertad del modelo Cantiléver..... | 35 |
| Fig. 23 Grados de libertad del modelo Double-Curvature..... | 36 |
| Fig. 24 Materiales de una sección tipo de columna..... | 38 |
| Fig. 25 Modelación de sección de fibras | 39 |

| | |
|--|----|
| Fig. 26 Ubicación de Carga Axial y Cíclica | 41 |
| Fig. 27 Grafica de Histéresis Fuerza cortante vs. Desplazamiento total – Modelo Cantiliver | 44 |
| Fig. 28 Grafica de Histéresis Fuerza cortante vs. Desplazamiento total – Modelo Double-Curvature..... | 45 |
| Fig. 29 Interfaz Gráfica, Programa de Calibración. | 48 |
| Fig. 30 Dimensiones del núcleo efectivo | 54 |
| Fig. 31 Dimensión de w' | 56 |
| Fig. 32 Monograma de coeficiente de mayoración de resistencia K. (Priestley, Mander and Park 1988)..... | 57 |

RESUMEN (ABSTRACT)

En la presente investigación se plantea el desarrollo de una herramienta computacional capaz de poder calibrar los parámetros de degradación y resistencia del acero de refuerzo longitudinal de un elemento viga-columna sometida a cargas cíclicas, los parámetros que se calibraron corresponden a los coeficientes de Conffin-Manson establecidos en el Software OpenSees por el comando Reinforcing Steel.

Para demostrar el funcionamiento de la herramienta computacional de calibración se realizó dos calibraciones de ensayos con distinta condición de apoyo (cantiliver, double-curvature). Adicionalmente se comparó la curva de histéresis fuerza cortante Vs deformación del experimento (ensayo) contra la del análisis (modelo).

De los resultados obtenidos se concluye que es técnicamente posible calibrar parámetros de degradación y resistencia del acero de refuerzo longitudinal, logrando así que el comportamiento del modelo analizado sea parecido al comportamiento del experimento (ensayo).

Palabras Claves: calibración, coeficientes de Conffin-Manson, Reinforcing Steel, condición de apoyo, degradación, resistencia, carga cíclica.

INTRODUCCION

I.1 Generalidades

En zonas de alto riesgo sísmico las estructuras no tienen una respuesta elástica, puesto que se diseñan para un comportamiento inelástico; por ahora, el estado del arte obliga a usar modelos lineales elásticos para este efecto. La respuesta de estructuras de hormigón armado (HA) depende de las características del sismo, la capacidad del suelo y de las propiedades de la estructura.

El diseño sismo-resistente se basa en asumir el comportamiento de una estructura frente a un evento sísmico, de forma que se define de antemano el sistema estructural, el tipo de análisis que se va a emplear y “los factores de desempeño global, incluyendo el coeficiente de modificación de respuesta (R), el factor de sobre-resistencia del sistema (Ω_o), y el factor de amplificación de desplazamientos (C_d)” (FEMA/P695, 2009), de tal manera que resulta indispensable tener estos factores calibrados para asegurar que las estructuras, así diseñadas, cumplan con los criterios de desempeño esperados.

La norma FEMA P-695 es una metodología que sirve para la cuantificación de los factores de diseño sísmico para nuevos sistemas constructivos, la cual toma en consideración el tipo de material de construcción, configuración de la estructura, forma de disipación de energía y el rango de aplicación de la tipología de la estructura (geometría y niveles de carga) (FEMA/P695, 2009).

Para cuantificar los factores de diseño sísmico, la metodología evalúa un sistema resistente a fuerza sísmica, mediante una metodología que incluye el desarrollo de modelos no-lineales. Mediante una serie de análisis se obtiene la

probabilidad de colapso de la estructura y los valores aproximados de los factores de diseño sísmico.

La Metodología FEMA P-695 para la modelación no-lineal requiere la siguiente información: eventos sísmicos, detalle del diseño estructural provisto (se refiere a las normas y códigos que se usarán para el detallamiento de los componentes estructurales), los límites de aplicación del sistema y resultados de los ensayos no lineales sobre los componentes de los miembros o elementos estructurales (propiedades del material, comportamiento fuerza deformación y respuesta no lineal); siendo esto último de vital importancia, pues el desarrollo de la metodología exige tener modelos calibrados del comportamiento de cada elemento estructural (FEMA/P695, 2009).

Según (Haselton, y otros, 2008) la inclusión de los términos de degradación en los modelos constitutivos es esencial para la determinación de la probabilidad de colapso de las estructuras. Aunque los modelos actuales pueden incluir estos términos de degradación, por ahora no pueden incluir de manera directa la interacción de la flexión con la carga axial.

La intención del presente documento es iniciar el proceso de calibración de un modelo de fibras de hormigón armado no-lineal, de manera que se puedan incluir los efectos de degradación y de la interacción de cargas de flexión con carga axial. Esta primera parte de la investigación tiene la finalidad de generar una herramienta computacional para facilitar el proceso de calibración de los modelos constitutivos, y realizar una recopilación de información de ensayos ejecutados en elementos tipo viga-columna de hormigón armado.

I.2 Objetivo

El objetivo principal de esta investigación es generar una herramienta computacional para facilitar el proceso de calibración de los modelos constitutivos, mediante la recolección de ensayos ejecutados en elementos tipo viga-columna de hormigón armado, como primer paso para la generación de modelos que incluyan la interacción de la carga axial para la determinación de la probabilidad de colapso en estructuras de hormigón armado.

La herramienta para la calibración se realizará con el programa Matlab en conjunto con el OpenSees. El primero de ellos es un programa con un lenguaje amigable, el mismo que puede facilitar la generación de varios modelos de OpenSees y correrlos de manera automática, con la ventaja adicional de permitir la interpretación de los resultados de manera gráfica y fácilmente comparable con las curvas de los ensayos recopilados.

I.3 Justificación.

La idea de obtener esta calibración es de tener la capacidad de aplicar la metodología FEMA P-695, con los tipos de análisis que este documento exige y que se detallan a continuación.

I.4 Análisis estático no-lineal (push-over)

Si una estructura está sometida a cargas cíclicas como un sismo, ésta sufre desplazamiento lateral y deformación en sus elementos. La deformación de los elementos de una estructura va a depender del tipo de respuesta que tenga la misma frente a una sollicitación sísmica. Para obtener una respuesta global de la estructura ante un evento sísmico se debe recurrir a un análisis no

lineal, en donde los resultados obtenidos van a depender del comportamiento de los elementos estructurales y de la fuerza sísmica (Guevara , Osorio, & Vargas, 2006)

El análisis estático no lineal (push-over), es un método que se emplea para obtener el comportamiento resistencia vs deformación de una estructura bajo una distribución de fuerzas laterales supuesta.

En este análisis la estructura se somete a un patrón de cargas laterales que se incrementan de manera monotonica hasta que la estructura alcanza su capacidad máxima. Mediante este tipo de análisis es posible determinar la secuencia del agrietamiento, fluencia y falla de cada uno de los elementos que componen la estructura (ver figura 1).

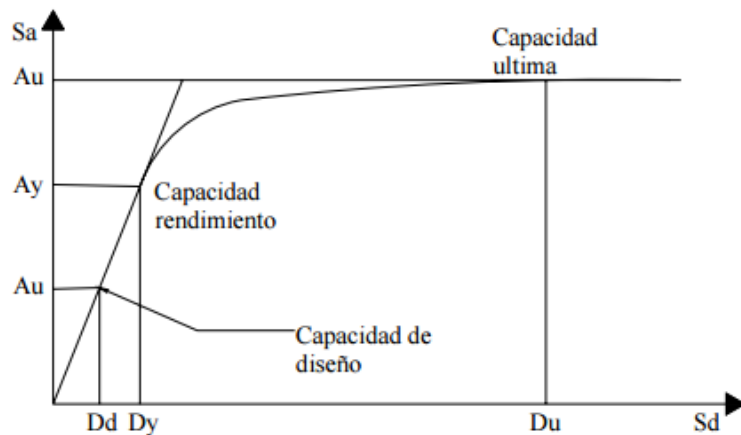


Fig. 1 Curva de capacidad (Guevara , Osorio, & Vargas, 2006)

Después de ejecutar un análisis push-over se obtiene como resultado, el cortante máximo y la deformación última, con estos dos valores se estima el factor de sobre-resistencia, según el capítulo VI del documento FEMA P-695, el mismo que sirve para realizar el diseño estructural (FEMA/P695, 2009).

I.5 Análisis dinámico tiempo-historia no-lineal

Es un método que se usa para evaluar la capacidad estructural y el desempeño sísmico de una edificación, debido a que representa una aproximación al comportamiento real de la estructura. Para la representación de la acción sísmica se utilizan acelerogramas reales o simulados. Este método de análisis es el más sofisticado en el momento de predecir las fuerzas y desplazamiento internos de una estructura cuando está sometida a fuerzas sísmicas. Este tipo de análisis incorpora las características no lineales de cada elemento (Guevara , Osorio, & Vargas, 2006)

La finalidad del análisis tiempo-historia no-lineal es definir la intensidad media de colapso y la probabilidad de falla para el sismo máximo considerado, para así poder determinar la relación marginal de colapso (CMR), según el capítulo VI de FEMA P-695. La metodología incluye un método probabilístico de aceptación de los factores de diseño (R y C_d) de un sistema estructural, a partir del CMR. La idea del CMR resulta del concepto de “Curva de fragilidad” (FEMA/P695, 2009).

I.6 Curva de fragilidad

La curva de fragilidad de una estructura o de un elemento se determina con respecto a su capacidad. Representa la probabilidad de exceder un determinado estado límite de daño cuando se produce un cierto nivel de demanda sísmica, definida mediante desplazamiento, velocidades o aceleraciones (Mander J. B., 2000).

Para poder determinar la curva de fragilidad se necesita establecer un modelo que contenga las principales características de la estructura o elemento

que se pretenda estudiar, estos modelos deberán permitir la respuesta no lineal tanto geométrica como constitutiva.

La gráfica muestra un resumen de probabilidades de que el elemento o estructura que se estudie, sobrepase un cierto nivel de comportamiento. De esta manera, se puede tener un resumen de probabilidades de colapso de una estructura frente a un evento sísmico de diferentes magnitudes (ver figura 2).

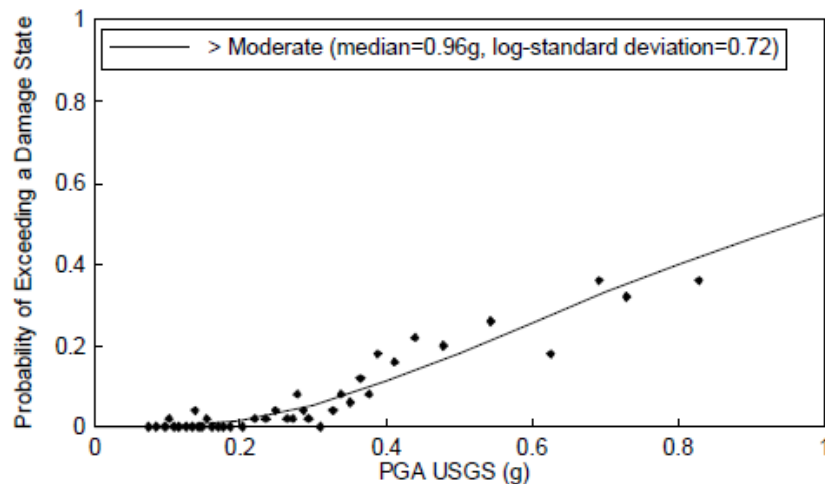


FIGURE 2-8 Fragility Curve for Caltrans' Bridges with at least Moderate Damage and Input Damage Data (Method 1)

Fig. 2 Curva de fragilidad (Shinozuka, Feng, Kim, Uzawa, & Ueda, 2001)

I.7 Modelos no-lineales para secciones de hormigón armado

I.7.1 Modelo de Ibarra-Krawinkler-Medina

Ibarra – Krawinkler – Medina, proponen modelos matemáticos con ciclos de histéresis, que tienen la capacidad de incluir la degradación cíclica de la resistencia y rigidez de un elemento. Este tipo de modelos utilizan la curva de Resistencia Vs. Deformación (Backbone curve), para poder definir el

crecimiento monótonico de las deformaciones. Si no existe degradación, esta curva define el esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y el esfuerzo de ruptura (Ibarra, Medina, & Krawinkler, 2005).

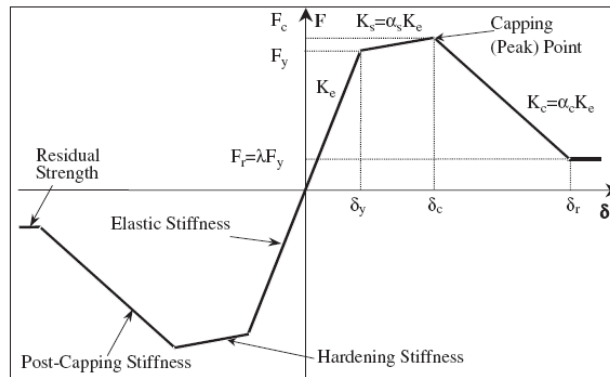


Fig. 3 Curva de Resistencia Vs. Deformación (Back-bone curve) para modelos histeréticos (Ibarra, Medina, & Krawinkler, 2005)

I.7.2 Modelo de fibras

Un modelo de fibras se utiliza para estimar numéricamente el comportamiento de secciones con materiales no lineales, en el cual se considera la discretización de un número finito de fibras con características geométricas y mecánicas equivalentes al material de la sección diferencial analizada. Cada fibra de la sección tendrá asociada una ecuación constitutiva según corresponda (Verri, 2003).

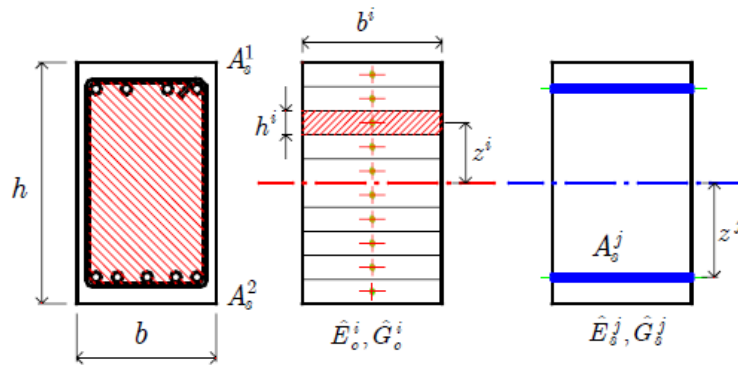


Fig.16. Discretización de una sección de hormigón armado mediante fibras. a) Núcleo de la sección confinada por estribos; b) Fibras correspondientes al hormigón confinado; c) fibras correspondientes al acero

Fig. 4 Sección de Columna – Modelo de fibras (Verri, 2003)

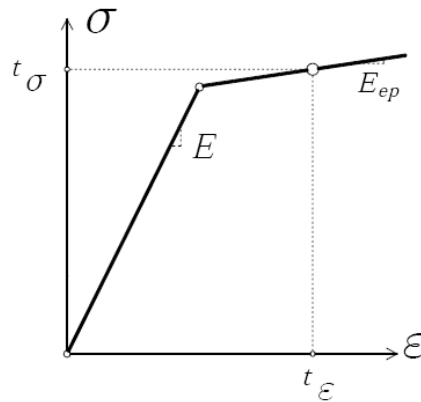


Fig. 5 Curva Esfuerzo Vs. Deformación para una fibra de acero (Verri, 2003)

I.7.3 Ventajas y desventajas de cada modelo

I.7.3.1 Ventajas y desventajas del modelo de Ibarra-Krawinkler-Medina

Ventajas

- Con este tipo de modelo se incluye la degradación de la rigidez y resistencia de un elemento.
- Estos modelos incorporan el deterioro cíclico controlado por la disipación de energía.
- Este tipo de modelos incorporan los efectos del deterioro por la respuesta sísmica.

Desventajas

- Este modelo no considera de manera directa la interacción de la flexión con la carga axial.
- Es un modelo de plasticidad concentrada, por lo que se pierde la posibilidad de encontrar formación de rótulas plásticas fuera de las zonas extremas de los pórticos.

I.7.3.2 Ventajas y desventajas del modelo de fibras

Ventajas

- Analiza y determina el comportamiento de cada fibra, tomando en cuenta la interacción de la carga axial con la flexión de manera directa.
- Se puede considerar el efecto del confinamiento en las secciones de hormigón armado, con una calibración adecuada de las constitutivas. Lo mismo aplica para el comportamiento a compresión de las varillas longitudinales, en lo referente al pandeo.

Desventajas

- Se considera adherencia perfecta entre las fibras, es decir no se consideran los deslizamientos entre fibras (es decir, no incluyen la deformación por cortante).
- Las constitutivas que se han propuesto todavía no consideran que la sección va a estar sujeta a degradación debido a los ciclos de carga y descarga.

CAPÍTULO 1

BASE DE DATOS, CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO Y ACERO DE REFUERZO.

1.1 Descripción de la Base de datos.

En esta parte del documento se definirán los datos característicos de cada ensayo a utilizar para generación de los modelos de elementos finitos.

Los datos característicos de cada ensayo fueron obtenidos de la base de datos de PEER (PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER) en esta página se encontraron 301 ensayos correspondientes a columnas rectangulares, de estos ensayos encontrados solo se seleccionaron 177 ensayos los cuales corresponden a los usados por (Haselton, y otros, 2008).

En esa base de datos se encontraron los parámetros más representativos de cada ensayo, los cuales son:

- Propiedades del hormigón
- Cargas impuestas
- Geometría
- Detalle de refuerzo longitudinal
- Detalle de refuerzo transversal
- Tipo de ensayo

Con los parámetros bien identificados de cada ensayo se procedió a tabularlos, el programa que se usó para dicha tabulación fue EXCEL por su facilidad de uso.

Para facilitar el proceso de búsqueda a cada ensayo se le asignó una numeración que va del 1 a 177 con una etiqueta la cual describe el autor y número de ensayo.

1.1.1 Parámetros

1.1.1.1 Propiedades del hormigón

Este parámetro describe la resistencia a los 28 días del hormigón.

1.1.1.2 Cargas impuestas

Este parámetro trata de las cargas que se aplican en cada ensayo; por lo general se aplican dos tipos de cargas: la primera es una carga puntual (en compresión, generalmente) que es aplicada en dirección paralela al eje longitudinal del elemento ensayado; la segunda es un desplazamiento lateral que se aplica de manera cíclica.

1.1.1.3 Geometría

En este parámetro engloba las dimensiones del elemento (sección y longitud) y el tipo de ensayo.

El tipo de ensayo se refiere a las condiciones de borde y la forma de la aplicación de la carga. Existen tres condiciones de apoyo las cuales se ven representadas en las figura 8. Para una mejor identificación se le asignó a cada condición de apoyo una codificación de la configuración, tal como se muestra en la tabla 1.

Dentro de los 177 ensayos se encuentran 113 ensayos con condición de apoyo tipo cantiliver y 64 ensayos con condición de apoyo tipo “double-curvature”.

| Condición de Apoyo | Config. |
|---|---------|
| Cantiliver | C |
| “Double-Curvature” o doblemente empotrada | DC |

Tabla 1. Definición de Condiciones de apoyo

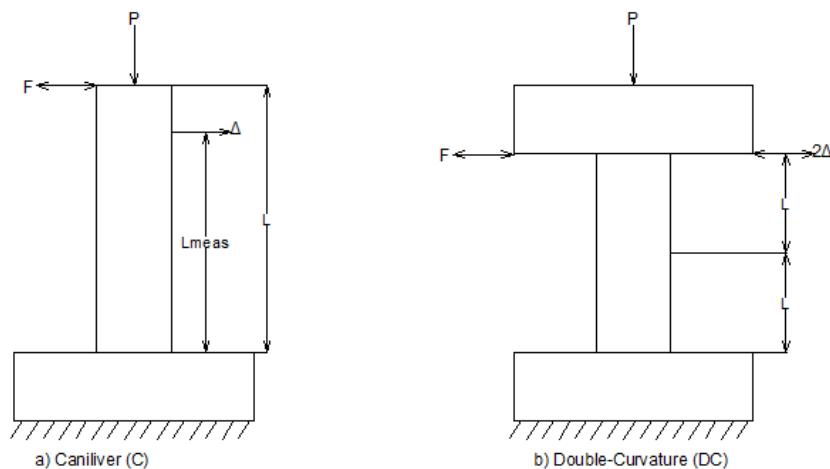


Fig. 8 Condiciones de apoyo (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004)

1.1.1.4 Refuerzo longitudinal

Este parámetro indica la información acerca del número de varillas longitudinales existente en cada elemento, el diámetro de las varillas (ya sea de las varillas esquineras o intermedias), el recubrimiento, número de varillas intermedias perpendiculares a la carga, número de varillas intermedia paralelo a la carga, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último.

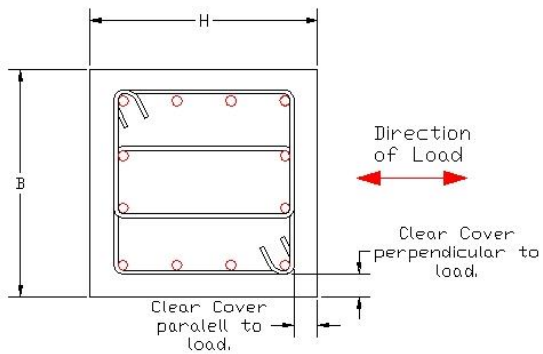
1.1.1.5 Refuerzo transversal

En este parámetro consta de las siguientes variables: número de ramas de cortante, diámetro de estribo, espaciamiento del estribo, tipo de estribo, esfuerzo de fluencia y esfuerzo último.

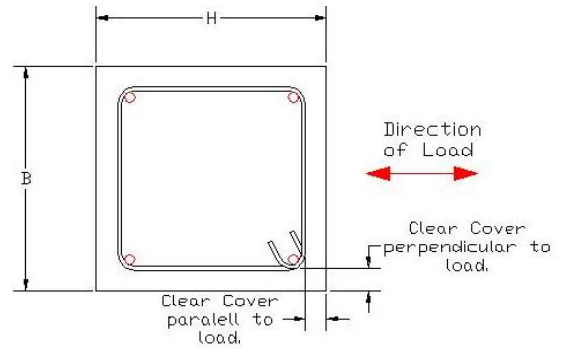
El tipo de estribo define la configuración del estribo. Existen 9 tipos de estribos, los cuales se presentan en la figura 9 y figura 10, a cada tipo de estribo se le asignó una codificación, tal como se muestra en la tabla 2.

| Tipo de confinamiento | | Código |
|-----------------------|---|--------|
| I | Interlocking | 1 |
| R | Rectangular ties (around perimeter) | 2 |
| RI | Rectangular and interlocking ties | 3 |
| RU | Rectangular ties and U-bars | 4 |
| RJ | Rectangular ties with J-hooks | 5 |
| RD | rectangular and diagonal ties | 6 |
| RO | rectangular and Octogonal ties | 7 |
| RIJ | Rectangular and interlocking ties, with J-hooks | 8 |
| UJ | U-bars with J-hooks | 9 |

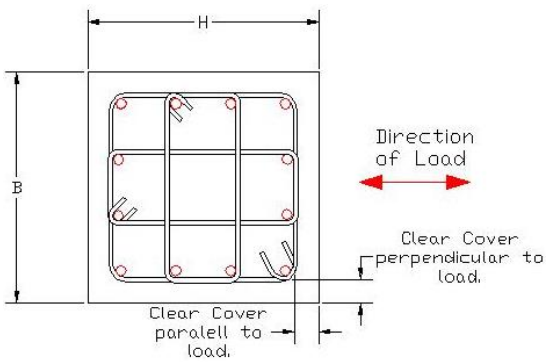
Tabla 2. Configuración de tipo de confinamiento. (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004)



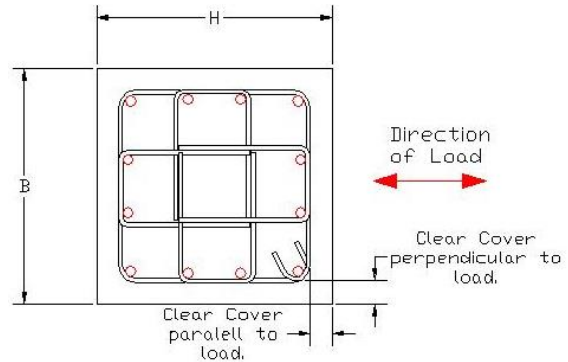
I Interlocking



R Rectangular ties (around perimeter)

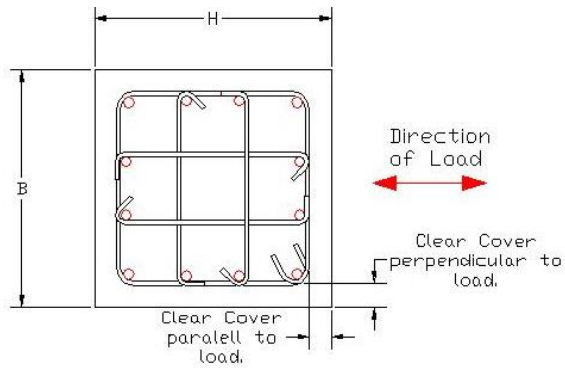


RI Rectangular and interlocking ties

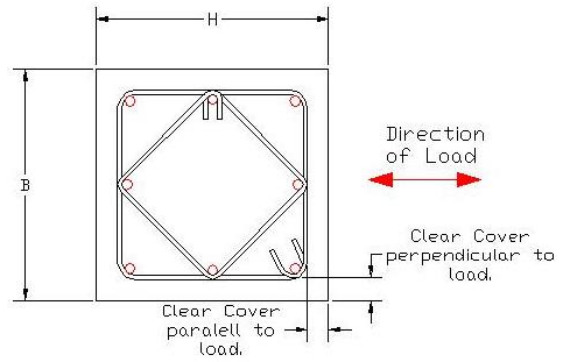


RU Rectangular ties and U-bars

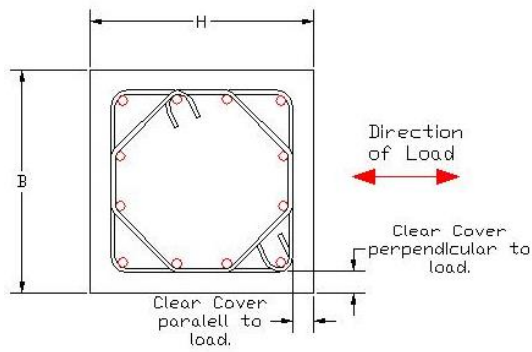
Fig. 9 Tipo de confinamiento (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004)



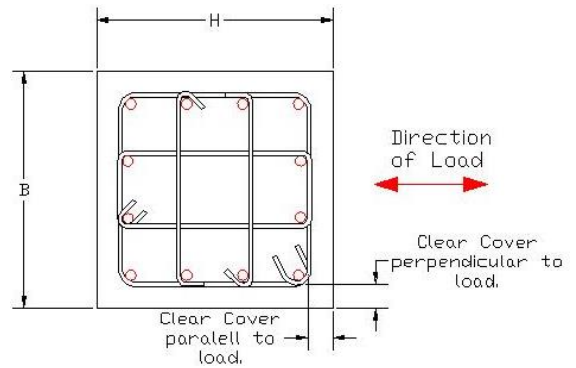
RJ Rectangular ties with J-hooks



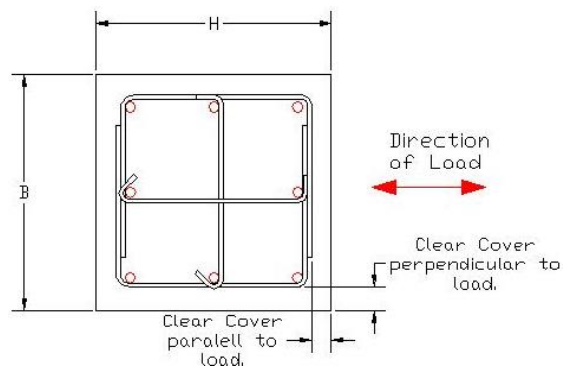
RD Rectangular and diagonal ties



RO Rectangular and Octagonal ties



RIJ Rectangular and interlocking ties, with J-hooks



UJ U-bars with J-hooks

Fig. 10 Tipo de confinamiento (Berry, Parrish, & Eberhard, 2004)

1.2 Caracterización del comportamiento del Hormigón confinado

Se entiende como hormigón confinado al elemento estructural que está compuesto por refuerzo longitudinal y transversal, existen varios modelos matemáticos utilizados para poder determinar el comportamiento del hormigón confinado. Uno de estos modelos es el modelo de esfuerzo-deformación propuesto por (Mander, Priestley, & Park, 1988)

Según (Mander, Priestley, & Park, 1988), este modelo se desarrolló para un elemento de hormigón armado, el cual está sujeto a cargas uniaxiales de compresión y confinamiento transversal. Por lo general las columnas están sometidas a cargas uniaxiales de compresión y constan de refuerzo transversal, el cual está dotado por los estribos que pueden ser rectangulares, circulares o espirales según sea la sección transversal de la columna.

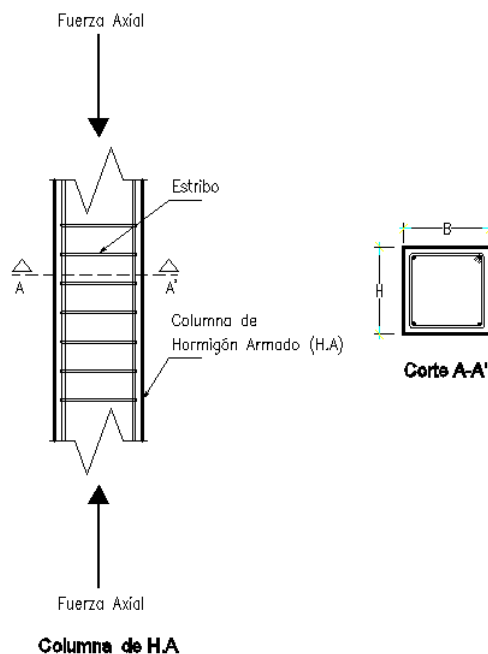


Fig. 11 Columna de Hormigón Armado (H.A)

1.2.1 Resistencia a la compresión del hormigón confinado (f'_{cc}).

La resistencia a la compresión del hormigón confinado está dada en función del refuerzo transversal y del refuerzo longitudinal; el refuerzo transversal puede tener la forma de sunchos, hélices o estribos (rectangulares o circulares) espaciados a poca distancia. Por efecto de la carga axial de compresión y del efecto de Poisson, se transmiten esfuerzos en los estribos y como resultado de esto se crea una presión de confinamiento al hormigón, aumentando así su resistencia a la compresión y ductilidad.

Para poder determinar el esfuerzo resistente a la compresión del hormigón confinado, (Mander, Priestley, & Park, 1988) proponen un procedimiento a seguir. Para utilizar el procedimiento mencionado, se deben de tener en cuenta las siguientes variables: sección de la columna, número total de varillas longitudinales, diámetro de las varillas longitudinales, recubrimiento, diámetro de estribo, espaciamiento entre estribos, cuantía longitudinal, numero de ramas y esfuerzo de fluencia del estribo.

A continuación se detalla el proceso de cálculo de la resistencia del hormigón confinado:

1.1.1.1 Cálculo de f'_{cc}

- 1.- Cálculo de b_c , es la distancia que existe entre los ejes del estribo en dirección X. Ver Figura 12.
- 2.- Cálculo de d_c , es la distancia que existe entre los ejes del estribo en dirección Y. Ver Figura 12.
- 3.- Cálculo de A_{sx} , es el área transversal del estribo multiplicado por el número de ramas de cortante en dirección X.

$$A_{sx} = A_v \times \#ramas \ de \ cortante_x \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde: A_v es el area de la varilla de estribo

4.- Cálculo de A_{sy} , es el área transversal del estribo multiplicado por el número de ramas de cortante en dirección Y.

$$A_{sy} = A_v \times \#ramas\ de\ cortante_y \quad \text{Ecuación 2}$$

5.- Calculo de f_{lx} , es el esfuerzo de confinamiento lateral sobre el hormigón en dirección x.

$$f_{lx} = \frac{A_{sx}}{s \times d_c} \times f_{yh} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

- s: espaciamiento entre estribos.
- f_{yh} : Esfuerzo de fluencia del acero de estribo.

6.- Calculo de f_{ly} , es el esfuerzo de confinamiento lateral sobre el hormigón en dirección y.

$$f_{ly} = \frac{A_{sy}}{s \times b_c} \times f_{yh} \quad \text{Ecuación 4}$$

7.- Calculo de w' , es la distancia que existe entre cara y cara de varilla longitudinal. Ver Figura 12

8.- Calculo de ρ_{cc} , cuantía de refuerzo longitudinal.

$$\rho_{cc} = \frac{A_s}{b \times d} \quad \text{Ecuación 5}$$

9.- Calculo de s' , espaciamiento entre cara y cara de estribo contiguos. Ver Figura 12

10.- Calculo de k_e , es el coeficiente efectivo de confinamiento para estribos rectangulares.

$$k_e = \frac{(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c}) (1 - \frac{s'}{2b_c}) (1 - \frac{s'}{2d_c})}{(1 - \rho_{cc})} \quad \text{Ecuación 6}$$

11.- Cálculo de f'_{lx} , es el esfuerzo de confinamiento efectivo lateral en dirección x.

$$f'_{lx} = k_e f_{lx} \quad \text{Ecuación 7}$$

12.- Cálculo de f'_{ly} , es el esfuerzo de confinamiento efectivo lateral en dirección y.

$$f'_{ly} = k_e f_{ly} \quad \text{Ecuación 8}$$

13.- Cálculo de K , es el coeficiente de mayoración de resistencia por confinamiento, este coeficiente se obtiene mediante el uso del nomograma de la figura 13.

14.- Cálculo de f'_{cc} , es el esfuerzo de compresión del hormigón confinado.

$$f'_{cc} = K f'_c \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

- f'_c : Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días.

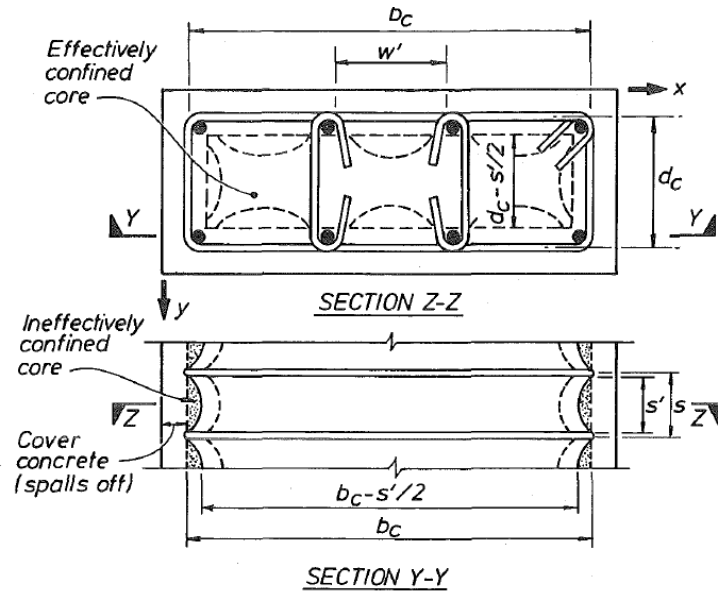


FIG. 3. Effectively Confined Core for Rectangular Hoop Reinforcement

Fig. 12 Núcleo efectivo de confinamiento para estribos rectangulares.
(Mander, Priestley, & Park, 1988)

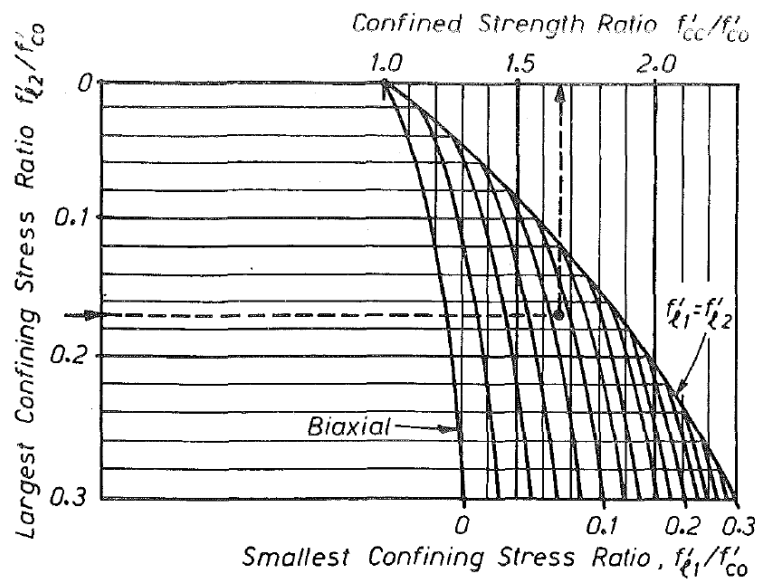


FIG. 4. Confined Strength Determination from Lateral Confining Stresses for Rectangular Sections

Fig. 13 Monograma de coeficiente de mayoración de resistencia K.
(Mander, Priestley, & Park, 1988)

1.2.2 Comando Concrete02-OPENSEES

“Concrete02 es un comando del software OPENSEES, el cual se utiliza para definir un material uniaxial que servirá para simular el comportamiento del hormigón” (OpenSees, 2010) .

Para poder utilizar este comando en la codificación de un modelo en OPENSEES, se lo debe de ingresar de la siguiente manera:

Comando: *Concrete02 \$matTag \$fpc \$epsc0 \$fpcu \$epsU \$lambda \$ft \$Ets*

Dónde:

| | |
|-----------------|--|
| <i>\$matTag</i> | Etiqueta del material (se asigna un número entero como etiqueta identificadora). |
| <i>\$fpc</i> | Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días. |
| <i>\$epsc0</i> | Deformación unitaria con respecto a la resistencia máxima. |
| <i>\$fpcu</i> | Resistencia última o esfuerzo de ruptura del hormigón. |
| <i>\$epsU</i> | Deformación unitaria con respecto al esfuerzo de ruptura del hormigón. |
| <i>\$lambda</i> | Relación entre la pendiente de descarga última y la pendiente Inicial. |
| <i>\$ft</i> | Resistencia a la tensión del hormigón. |
| <i>\$Ets</i> | Ablandamiento de rigidez en la zona de tensión (pendiente suavizada en la zona de tensión). Se ingresa como valor absoluto. $Ets = ft/0.002$ |

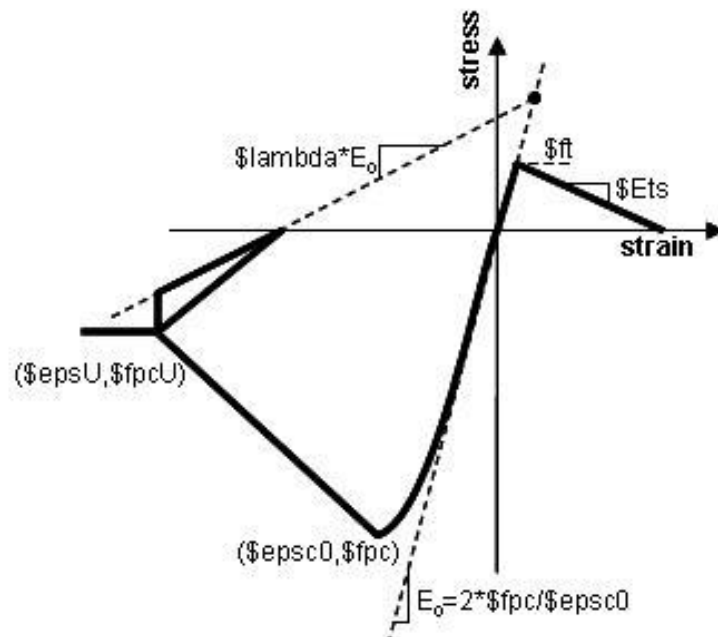


Fig. 14 Diagrama Esfuerzo deformación del material Concrete02 (Mohd & Mohd, 1994)

Se usaron las ecuaciones propuestas por (Mander, Priestley, & Park, 1988), para determinar los valores de los siguientes parámetros: resistencia a la compresión a los 28 días, deformación unitaria con respecto a la resistencia máxima, resistencia última del hormigón, deformación unitaria con respecto a la resistencia última del hormigón y resistencia a la tensión del hormigón.

Table 1. Default Values of the Parameters Used

| Parameter | Unconfined ($K=1$) (compression) | Confined ($K>1$) (compression) | Tension |
|-----------------------------|--|---|--|
| Peak stress | f'_c | $f'_{cc}=Kf'_c$ | $f'_t=0.625\sqrt{f'_c}$ (MPa); $f'_t=7.5\sqrt{f'_c}$ (psi) |
| Peak strain | $\epsilon_{co}=0.0015+f'_c(\text{MPa})/70,000^a$; $\epsilon_{co}=0.0015+f'_c(\text{psi})/10^7$ | $\epsilon_{cc}=\epsilon_{co}[1+5(K-1)]^b$ | $\epsilon_{ct}=0.1\epsilon_{co}$ |
| Ultimate stress | $f_{c1}=12$ MPa=1.74 ksi ^a | $f_{cu}=12+f'_c(K-1)^c$ | $f_{t1}=f'_t/3^d$ |
| Ultimate strain | $\epsilon_{c1}=0.0036^a$ | $\epsilon_{cu}=5\epsilon_{cc}^c$ | $\epsilon_{t1}=2\epsilon_u/9^d$ |
| Failure strain ^e | $\epsilon_{sp}=0.012-0.0001f'_c(\text{MPa})$; $\epsilon_{sp}=0.012-7\times 10^{-7}f'_c(\text{psi})$ | $\epsilon_f=0.004+\epsilon_{cu}$ | $\epsilon_u=18 G_f/(5f'_t h)^d$ |

^aBased on predicted stress-strain relation of normal-weight concrete (Collins and Mitchell 1994).

^bMander et al. (1988a,b).

^cBased on reevaluation of data from Mander et al. (1988a) and Li et al. (2000).

^dRots et al. (1985), where G_f =fracture energy= $h\times$ area under stress-strain softening diagram, and h =crack band width.

^eFailure stress=0 for all cases.

Fig. 15 Valores de los parámetros usados para el comando Concrete02

(Karthik & Mander, 2011)

1.3 Caracterización del comportamiento del Acero de refuerzo longitudinal.

“Una cualidad muy importante que tiene el acero de refuerzo es la capacidad de soportar cargas cíclicas hasta llegar a altas deformaciones plásticas sin reducir significativamente su resistencia” (Paulay & Priestley, 1992).

1.3.1 Comportamiento monótonico de esfuerzos en el acero de refuerzo.

“Las curvas esfuerzo-deformación que se presentan típicamente en los libros se obtuvieron de varios ensayos a varillas que fueron cargas monótonicamente a tensión, dando así como resultado una curva esfuerzo-deformación que exhibe una porción inicial elástica lineal, una zona donde la deformación unitaria aumenta con poco o ningún aumento de esfuerzo a esta zona se la denomina zona de cedencia o fluencia, una zona de endurecimiento por deformación, donde el esfuerzo aumenta con la deformación y por último,

una zona en donde el esfuerzo cae hasta producir la fractura de la varilla” (Paulay & Priestley, 1992).

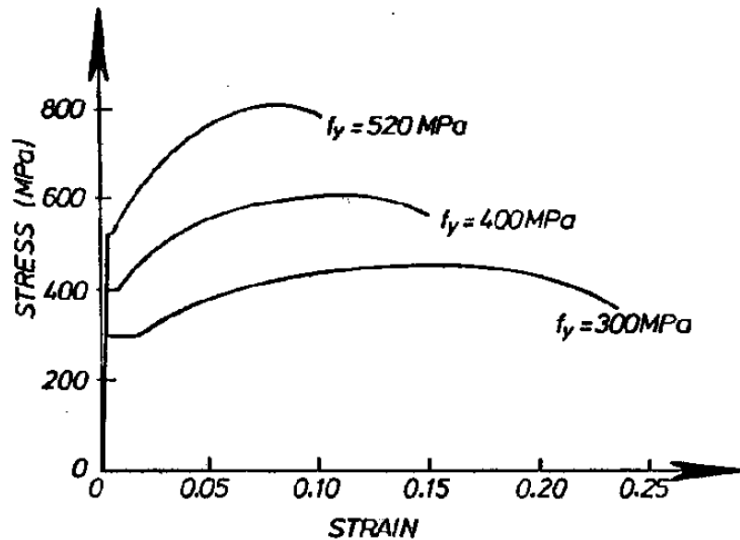


Fig. 3.18 Typical stress–strain curves for reinforcing steel. (1 MPa = 145 psi.)

Fig. 16 Curvas esfuerzo Vs deformación del acero – comportamiento monotónico (Paulay & Priestley, 1992)

1.3.2 Respuesta cíclica inelástica del acero de refuerzo.

Este tipo de comportamiento se tiene cuando a una varilla se la somete a ensayos de carga cíclica en el rango inelástico, obteniendo así una respuesta no-lineal en donde las deformaciones unitarias obtenidas son mayores que la deformación unitaria por fluencia (Paulay & Priestley, 1992).

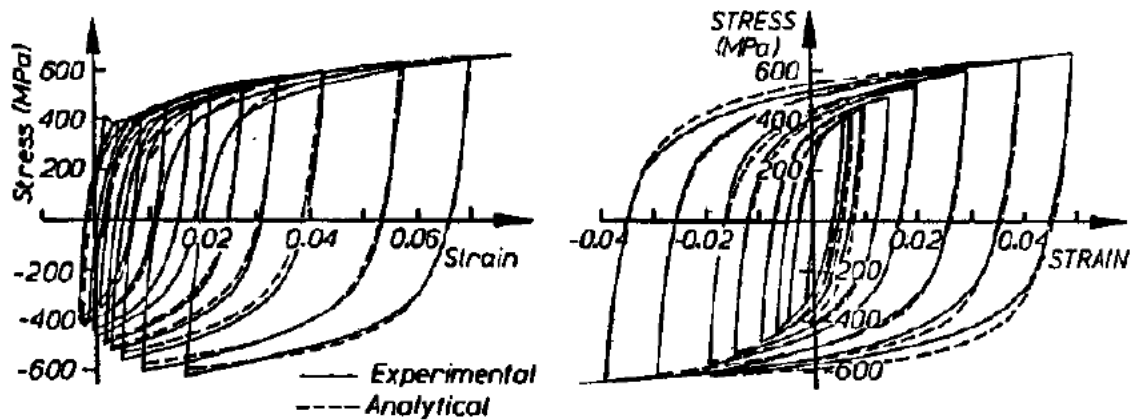


Fig. 3.19 Cyclic straining of reinforcing steel [$f_y = 380$ MPa (55 ksi)] [L3].

Fig. 17 Curvas esfuerzo Vs deformación del acero bajo cargas cíclicas (Paulay & Priestley, 1992).

En la figura 17 se pueden apreciar dos curvas de esfuerzo-deformación. En la curva de la izquierda, la incursión en el rango inelástico de la varilla predomina la tensión en cambio que, en la curva de la derecha, existe una simetría entre tensión y compresión.

Las columnas que están sometidas a cargas cíclicas y a cargas axiales tienen un comportamiento más o menos simétrico entre sus deformaciones de tensión y compresión tal como el que se aprecia en la curva de la derecha de la figura 17. Para el caso del comportamiento en compresión, la curva puede modificarse de manera importante, en términos de resistencia, por el efecto del pandeo.

1.3.3 Comando Reinforcing Steel Material – OPENSEES.

Este comando de OPENSEES se utiliza para crear una material uniaxial para el acero de refuerzo longitudinal. Usualmente este tipo de material se usa cuando existe una sección de fibras de hormigón armado (OpenSees, 2010).

Comando: uniaxialMaterial ReinforcingSteel \$matTag \$fy \$fu \$Es \$Esh \$esh \$eult -CMFatigue \$Cf \$alpha \$Cd

Dónde:

\$matTag Etiqueta del material (se asigna un número entero como etiqueta identificadora).

\$fy Esfuerzo de fluencia en tensión del acero de refuerzo.

\$fu Esfuerzo de ultimo en tensión del acero de refuerzo.

\$Es Módulo de elasticidad del acero de refuerzo en la zona elástica.

\$Esh Módulo de elasticidad del acero de refuerzo en la zona de endurecimiento por deformación.

$$E_{sh} = 0.01E_s$$

\$esh Deformación unitaria al inicio de la zona de endurecimiento por deformación.

$$e_{sh} = 12 \frac{f_y}{E_s}$$

\$eult Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo máximo.

$$e_{eul} = 283 \frac{f_y}{E_s}$$

-CMFatigue Conffin-Manson, Fatiga y Reducción de Resistencia.

Cf Ductilidad.

alpha Coeficiente de daño.

Cf Coeficiente de reducción de resistencia

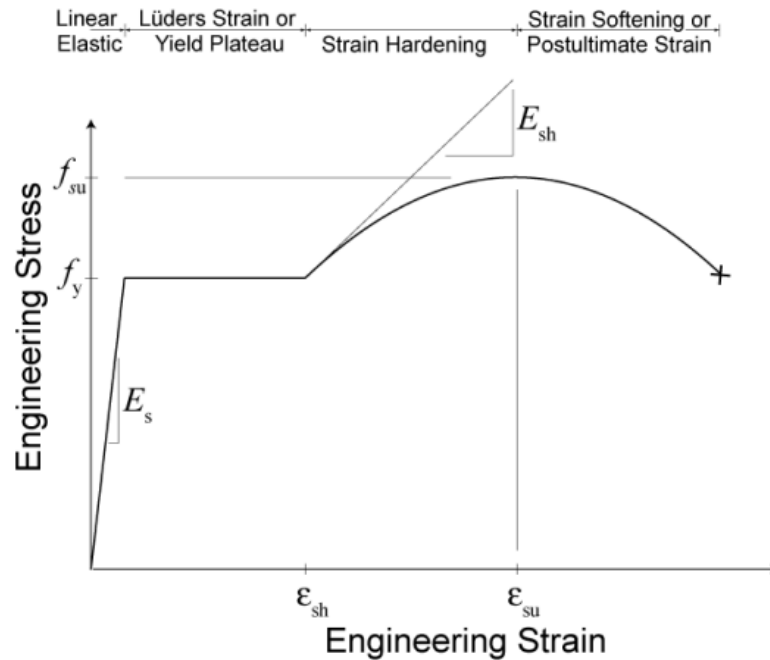


Fig. 18 Curva esfuerzo Vs deformación del acero. OpenSees (OpenSees, 2010).

1.4 Rótula Plástica

Se define como rótula plástica a una zona de disipación de energía por deformación. Estas rotulas plásticas se forman cuando todas las fibras de un elemento estructural alcanza el esfuerzo de fluencia produciendo su plastificación.

Para que exista ductilidad en las zonas donde se forman rótulas plásticas en una columna de H.A, a ésta se la deberá dotar de suficiente refuerzo transversal, considerando que el adecuado uso de estribos incrementa significativamente la resistencia y capacidad de deformación del hormigón (Moehle, 2015)

1.4.1 Longitud de formación de una rótula plástica.

Paulay and Priestley proponen la siguiente ecuación para estimar la longitud de formación de la rótula plástica teórica:

$$l_p = 0.008L + 0.022d_b f_y \text{ (MPa) (Paulay \& Priestley, 1992).}$$

dónde:

L Longitud del elemento.

d_b Diámetro de la varilla de refuerzo longitudinal.

f_y esfuerzo de fluencia del elemento.

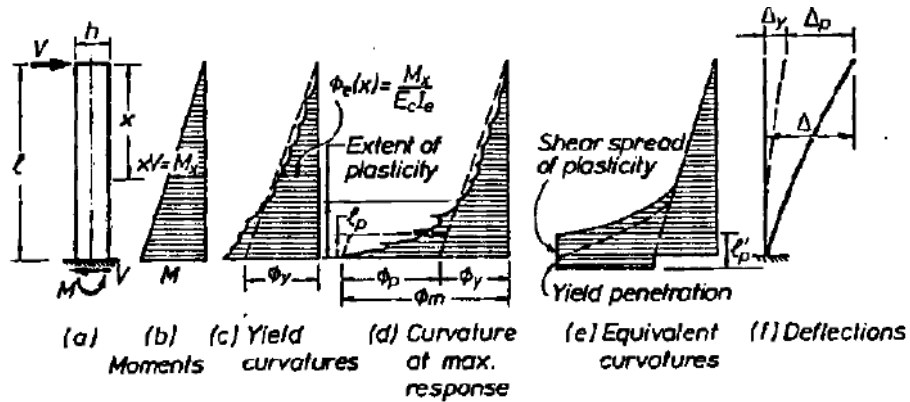


Fig. 3.27 Moment, curvature, and deflection relationships for a prismatic reinforced concrete or masonry cantilever.

Fig. 19 Relaciones de momento, curvatura y deformación para un elemento en cantiléver (Paulay & Priestley, 1992)

1.4.2 Comando Beam With Hinges - OPENSEES

“Este comando de OPENSEES sirve para definir un elemento de tipo viga-columna, que se divide internamente en tres zonas: dos zonas inelásticas en los extremos y una elástica en la parte medular” (OpenSees, 2014). Para definir las zonas inelásticas, podemos utilizar lo expuesto en el numeral 1.4.1 de este documento.

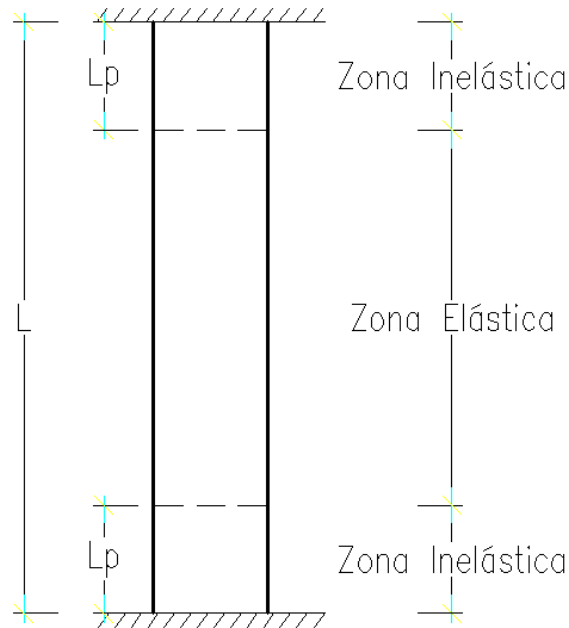


Fig. 20 Zonas elásticas e inelásticas de un elemento “Beam with Hinges”

Para poder utilizar este comando en la codificación de un modelo en OPENSEES, se lo debe de ingresar de la siguiente manera:

Comando: `element forceBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $transfTag "HingeRadau $secTagI $LpI $secTagJ $LpJ $secTagInterior"`

`$eleTag` Etiqueta del elemento (se asigna un número entero como etiqueta identificadora).

| | |
|-------------|--|
| \$iNode | Número identificador del nodo donde inicia el elemento |
| \$jNode | Número identificador del nodo donde termina el elemento |
| \$transfTag | Etiqueta identificadora de coordenadas (etiqueta previamente definida). |
| \$secTagI | etiqueta identificadora de la sección en el inicio, (etiqueta previamente definida). |
| \$LpI | Longitud de rótula plástica en el inicio |
| \$secTagJ | etiqueta identificador de la sección en el final, (etiqueta previamente definida). |
| \$LpJ | Longitud de rótula plástica en el final. |

CAPÍTULO 2

MODELOS ESTRUCTURALES

2.1 Generalidades

En este capítulo se desarrollarán dos modelos de análisis en el software OpenSees, estos modelos de hormigón armado van a estar sometidas a cargas estáticas de compresión y cargas cíclicas de corte y flexión.

2.2 Alcance de los modelos

Los modelos a analizar consisten en una columna de hormigón armado con diferentes condiciones de apoyo. Los modelos fueron realizados en el Software OpenSees versión 2.4.6.

Los comandos específicos utilizados se explican en el capítulo anterior.

Hipótesis del modelo:

- El modelo tiene dos dimensiones como se muestra en la figura 21 y se consideran 3 grados de libertad en cada nudo.

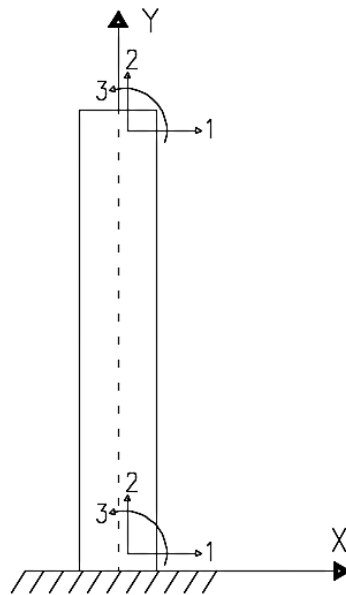


Fig. 21 Coordenadas del modelo y grados de libertad.

- La columna está conformada por hormigón armado, esta tiene una sección rectangular.
- Las columnas fueron modeladas como elementos tipo frame debido a que las dimensiones de la sección transversal son mucho menores a su longitud.
- Los modelos no consideran el peso propio del elemento.
- Los materiales definidos consideran los efectos de degradación por carga cíclica y la interacción de carga axial y flexión.

2.3 Condiciones de apoyo

Para poder realizar un análisis de cualquier ensayo como primer punto se tiene que definir las condiciones de apoyo. Para poder definir los nudos en el programa OpenSees primero se deberá insertar las coordenadas de los nudos mediante el comando "node" luego de esto se deberá restringir los grados de libertad de los nudos usando el comando "fix".

En nuestra base de datos encontramos tres diferentes condiciones de apoyo, las cuales se explican a continuación:

2.3.1 Cantiliver

En la base de datos se pueden encontrar 113 ensayos con este tipo de apoyo. Para estos elementos con esta condición se definieron dos nudos: el NODO 1 va a tener restringido sus tres grados de libertad, y el NODO2 va a estar separado del NODO1 por una distancia igual a la longitud de la columna (Ver figura 22).

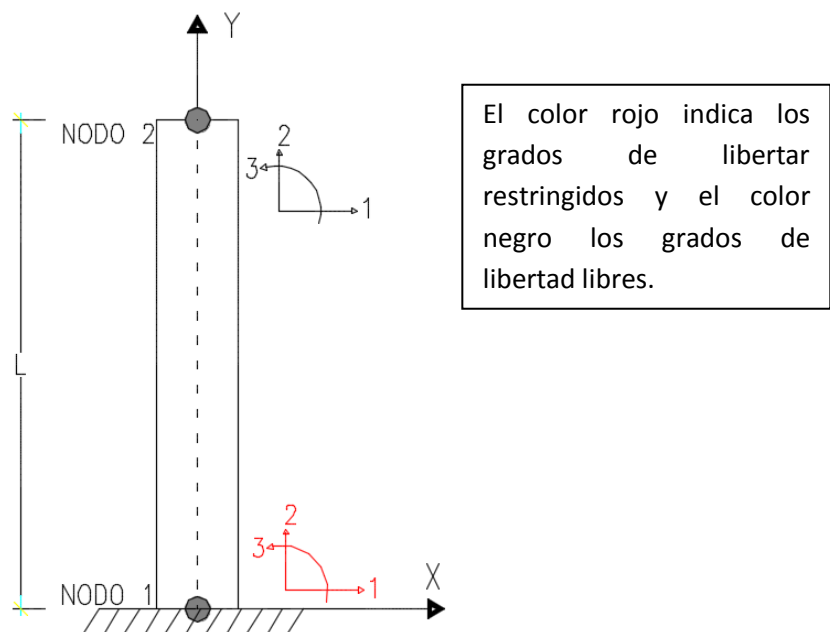


Fig. 22 Grados de libertad del modelo Cantiléver.

2.3.2 Double-Curvature o doblemente empotrada

En la base de datos se pueden encontrar 64 ensayos con este tipo de apoyo. Para estos elementos con esta condición se definieron dos nudos: el NODO1 va a tener restringido sus tres grados de libertad y va a estar separado del NODO2 una distancia igual a la longitud de la columna. El NODO2 solo va a tener restringido el tercer grado de libertad (la rotación).

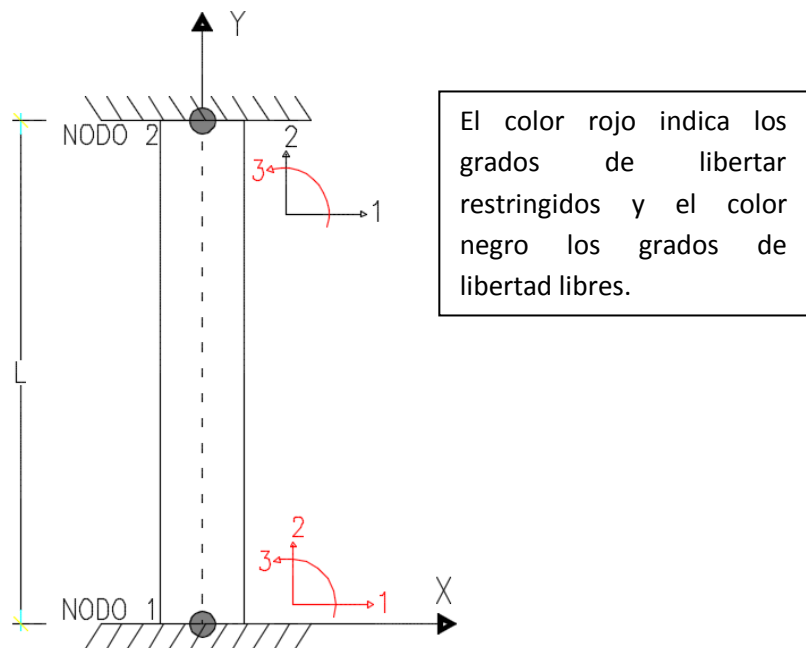


Fig. 23 Grados de libertad del modelo Double-Curvature.

2.4 Materiales

Para la generación de cualquier modelo planteado en este trabajo se consideraron tres tipos de materiales: hormigón confinado, hormigón no confinado y acero de refuerzo longitudinal, estos materiales se definen según

las curvas de esfuerzo – deformación unitaria presentadas en el Manual de OpenSees. En la figura 24 se muestra un esquema del modelo de la columna dividido cada zona de material uniaxial.

2.4.1 Hormigón confinado

Para definir el hormigón confinado se utilizó la teoría de Mander, la cual considera que la curva esfuerzo-deformación unitaria tiene una forma parabólica hasta en el punto en el cual la deformación unitaria es igual al doble de deformación unitaria que corresponde al máximo esfuerzo, considerando todos estos antecedentes se utilizó el material Concrete02.

2.4.2 Hormigón no confinado

Al hormigón requerido como recubrimiento para el acero de refuerzo se lo consideró como hormigón no confinado; para este caso también se utilizó el material Concrete02.

2.4.3 Acero de refuerzo longitudinal

Para el tipo de análisis que se desea realizar en este trabajo, es muy importante que el material tome en cuenta la degradación por carga cíclica, y por tal motivo se utilizó el comando uniaxial ReinforcingSteel.

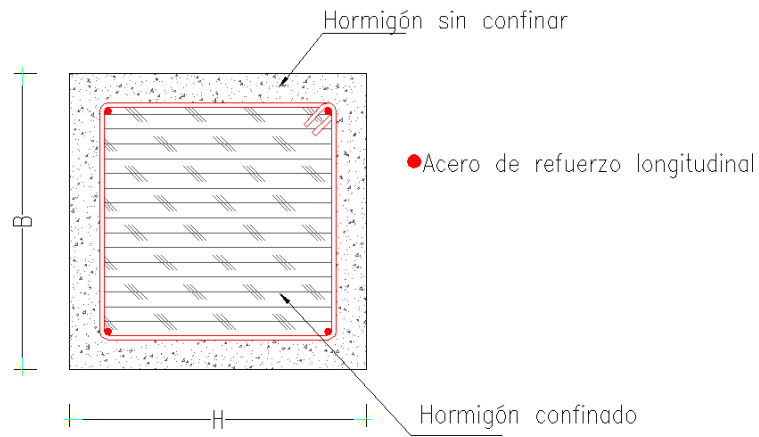


Fig. 24 Materiales de una sección tipo de columna

2.5 Sistema de modelación de la sección fibras

A los elementos tipo columna se les definió una sección por medio de fibras como se muestra en la figura 25, para poder generar este tipo de secciones se tiene que definir previamente el comportamiento de los materiales que conforman el elemento.

La sección transversal del elemento se divide en tres regiones, la región uno corresponde al núcleo, la región dos corresponde al recubrimiento y la región tres corresponde al acero de refuerzo longitudinal. A la región uno se le asignó el material hormigón no confinado debido a que se trata del hormigón que está por fuera del estribo, a la región dos se le asignó el material hormigón confinado y a la región número tres se definieron fibras como material de acero de refuerzo, las de fibras que se colocaron en la sección es igual en cantidad y en distribución al acero de refuerzo longitudinal existente en cada ensayo.

Este tipo de elemento tiene una sección rectangular, al núcleo se lo dividió en diez rectángulos paralelos a la dirección de la carga cíclica. El recubrimiento se dividió en cuatro zonas (superior, inferior, izquierda y derecha), las zonas superior e inferior se dividieron en 2 y las zonas izquierda y derecha se dividieron en 12 rectángulos paralelos a la dirección de la carga cíclica.

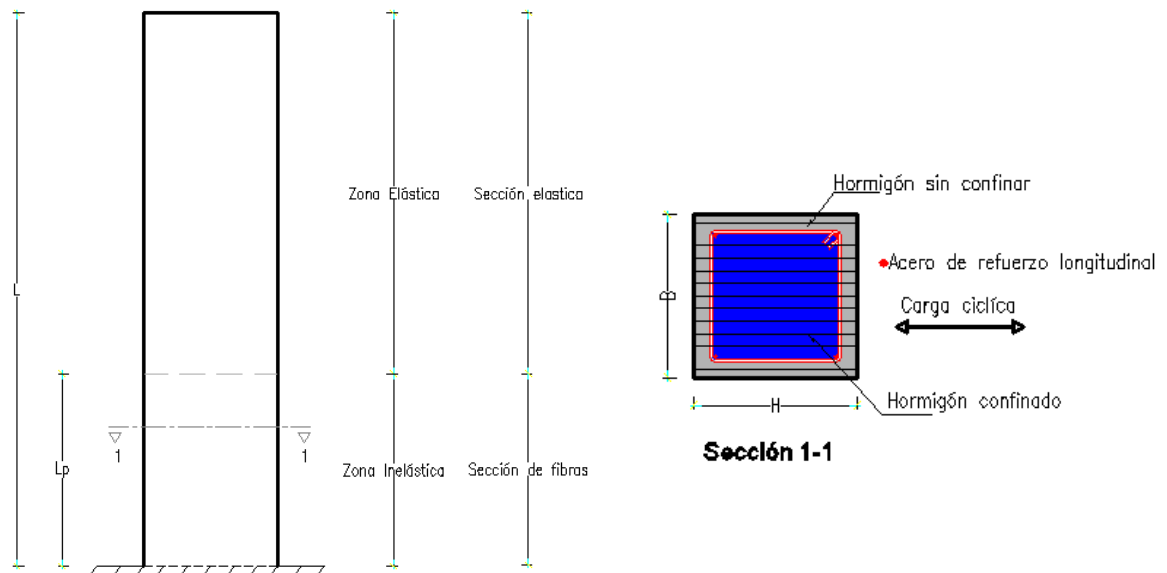


Fig. 25 Modelación de sección de fibras

2.6 Modelación del elemento

Para este tipo de modelación se requiere utilizar un elemento viga-columna para poder insertar la longitud de rótula plástica y así poder determinar las zonas elásticas y las zonas inelásticas de comportamiento en el elemento. Para poder definir el elemento viga-columnas se utilizó el comando Beam With Hinges Element.

2.7 Definición de Cargas

2.7.1 Carga axial

El peso propio del elemento no fue considerado en el modelo, además de que el Software utilizado OpenSees no calcula automáticamente el peso de los elementos en función de la geometría y materiales del elemento. Se consideró una carga axial en dirección de la gravedad **P** la cual está definida en cada ensayo, y se aplicó en el NODO2 como se muestra en la figura 26. Para definir este tipo de carga se utilizó el comando Patter Plain Linear para poder aplicar la carga en un nudo específico y en la dirección deseada.

2.7.2 Carga cíclica

Se consideró como carga cíclica una fuerza de 1.00 Kg en dirección del eje X y perpendicular a la base de la sección transversal del elemento, esta carga cíclica se aplicó en el NODO2 tal como se muestra en la figura 26. Para definir este tipo de carga se utilizó el comando Patter Plain Linear para poder aplicar la carga en un nudo específico y en la dirección deseada.

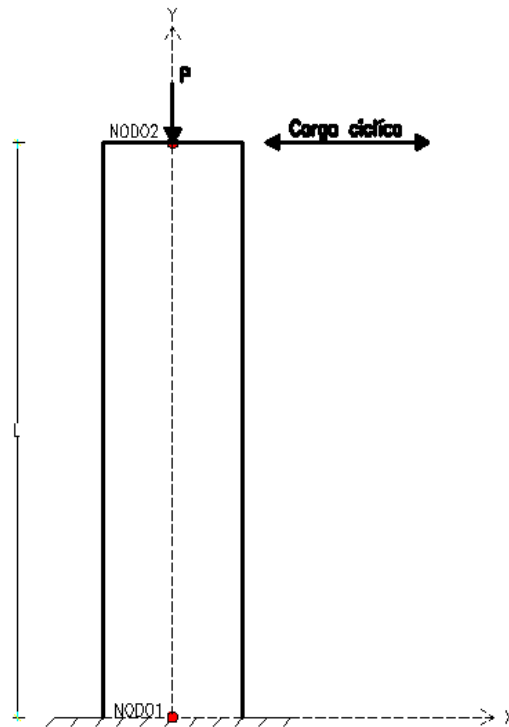


Fig. 26 Ubicación de Carga Axial y Cíclica

2.8 Tipo de Análisis

Para este tipo de modelo se utilizaron dos tipos de análisis, los cuales son: análisis gravitacional y análisis cíclico.

2.8.1 Análisis gravitacional

Este tipo de análisis considera las condiciones de borde del modelo, genera un sistema de ecuaciones para el equilibrio de fuerzas del modelo y utiliza el algoritmo de Newton para la resolución de los sistemas de ecuaciones generados.

2.8.2 Análisis Cíclico

Para poder ejecutar este tipo de análisis se debe determinar el nudo donde se van a leer los incrementos de desplazamientos “NODO2” y el grado de libertad de dicho incremento de desplazamiento “DOF1”.

Para definir los incrementos de desplazamientos se generó un script DINCR.tcl. Este script realiza la tarea de crear un vector con todos los incrementos de desplazamientos obtenidos de cada ensayo.

Para resolver el sistema de ecuaciones de este modelo se utilizan tres tipos de algoritmos los cuales son: algoritmo de Newton, algoritmo de Broyden y algoritmo de Newton modificado.

2.9 Metodología para la ejecución de un modelo.

Para poder ejecutar un modelo es indispensable que se instale el software OpenSees con todos sus complementos, este software se lo puede descargar de forma gratuita de la página web de OpenSees.

Debido a la cantidad de ensayos que se desean modelar, se realizó un programa en Matlab para la generación y ejecución de scripts en formato .tcl. Para poder ejecutar el programa de Matlab se debe tener predefinida la base de datos, la cual deberá constar con todos los parámetros establecidos en el capítulo 1 y los parámetros más fundamentales que requiere cada comando de OpenSees.

Una vez ejecutado el programa de Matlab, este pedirá que se ingrese el número del ensayo a modelar y automáticamente generará dos scripts en formato .tcl. El primero tendrá un nombre que va según el tipo de ensayo

(Cantiliver o Double-Curvature) y contendrá la codificación para poder ser ejecutado, y el segundo se llama DINCR.tcl, el mismo que contendrá un vector con los incrementos de desplazamientos iguales a los del ensayo seleccionado. Además se ejecutará automáticamente los scripts con formato .tcl dentro de OpenSees y generará una gráfica de histéresis Fuerza Cortante vs. Desplazamientos del ensayo (experimento) y del modelo (análisis).

El código del programa de Matlab se muestra en el apéndice A.

2.10 Aplicación de modelo estructural.

Se realizará un ejemplo por cada una de las condiciones de apoyo demostrando la aplicación del modelo desarrollado. Se realiza un análisis estático y cíclico para obtener como resultado una curva de histéresis de Fuerza Cortante vs. Deformación total.

2.10.1 Ejemplo 1.- Modelo Cantiliver

Se ejecutará un modelo estructural desarrollado para una columna en cantiliver (empotrada en un extremo). Este modelo consiste en una columna rectangular de hormigón armado con dimensiones de 55.0 x 55.0 cm y una longitud de 165.0 cm. La columna tiene una resistencia a la compresión del hormigón no confinado a los 28 días de 326 Kg/cm², una resistencia a la compresión del hormigón confinado de 538.41 Kg/cm², el acero de refuerzo longitudinal tiene una fluencia de 5210 Kg/cm² y el acero de refuerzo transversal tiene una fluencia de 3314.08 Kg/cm². El tipo de refuerzo transversal es de tipo RJ el cual está compuesto por un estribo perimetral y dos vinchas en forma de J paralelas a la base y a la altura de la columna.

Se procedió hacer el análisis considerando una carga axial de compresión de 98708.53 Kg y carga cíclica de 1.00 Kg.

Para este análisis se consideraron los coeficientes de Conffin-Manson, Fatiga y Reducción de Resistencia definidos en el capítulo dos.

Se ejecuta el modelo con las variables adecuadas mediante el programa de MATLAB, para obtener la gráfica de histéresis Fuerza Cortante Vs. Deformación total. En la figura 27 se observa el resultado del modelo junto con los del ensayo; estas gráficas ayudarán al proceso de calibración de los factores de degradación del modelo uniaxial del acero de refuerzo.

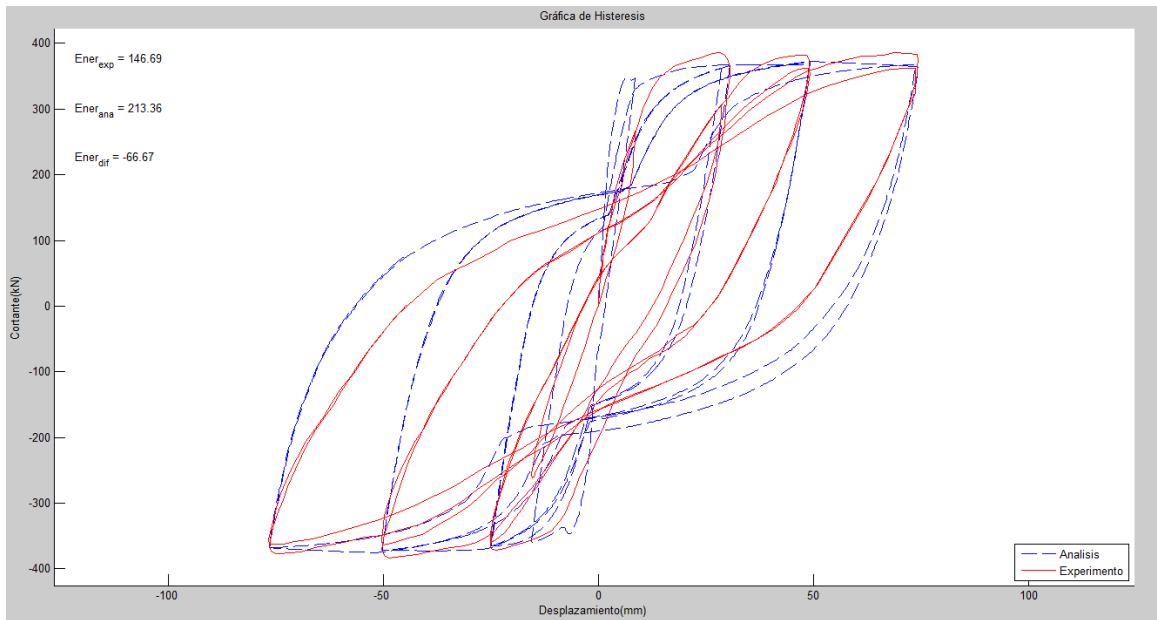


Fig. 27 Grafica de Histéresis Fuerza cortante vs. Desplazamiento total – Modelo Cantiliver

2.10.2 Ejemplo 2.- Modelo Double – Curvature

Se ejecutará un modelo estructural desarrollado para una columna double – curvature (doblemente empotrada). Este modelo consiste en una columna rectangular de hormigón armado con dimensiones de 20.0 x 20.0 cm y una longitud de 40.0 cm. La columna tiene una resistencia a la compresión del hormigón no confinado a los 28 días de 326.31 Kg/cm², una resistencia a la

compresión del hormigón confinado de 407.89 Kg/cm², el acero de refuerzo longitudinal tiene una fluencia de 3762.75 Kg/cm² y el acero de refuerzo transversal tiene una fluencia de 3222.30 Kg/cm². El tipo de refuerzo transversal es de tipo R el cual está compuesto por un estribo perimetral.

Se procedió hacer el análisis considerando una carga axial de compresión de 18660.81 Kg y carga cíclica de 1.00 Kg.

Para este análisis se consideró los coeficientes de Confin-Manson, Fatiga y Reducción de Resistencia definidos en el capítulo dos.

Se ejecuta el modelo con las variables adecuadas mediante el programa de MATLAB, para obtener la gráfica de histéresis Fuerza Cortante Vs. Deformación total.

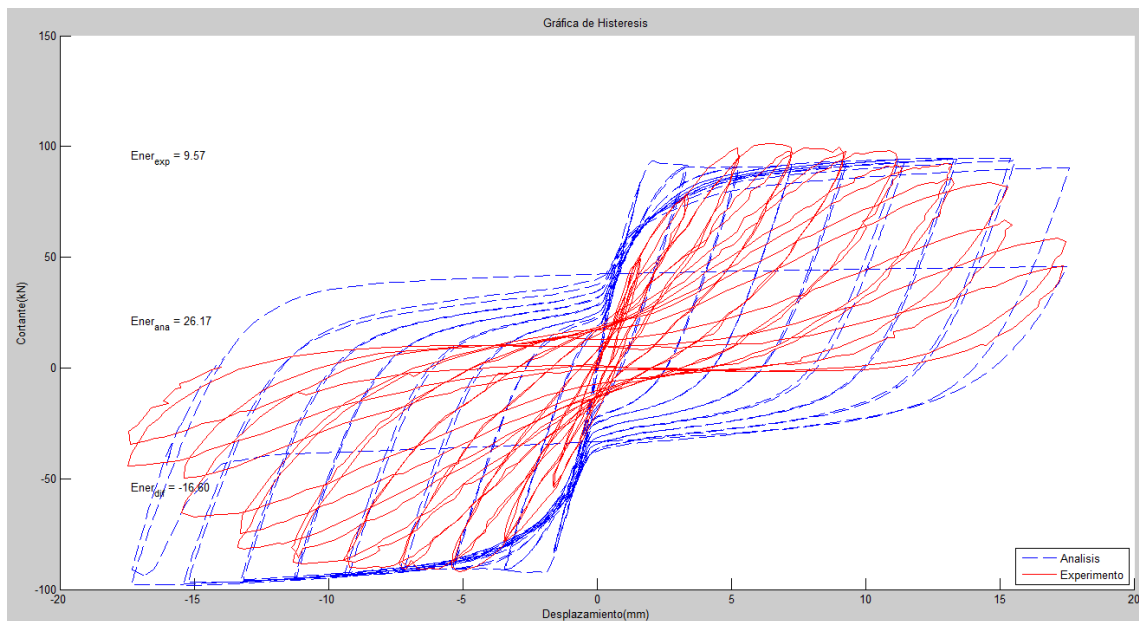


Fig. 28 Grafica de Histéresis Fuerza cortante vs. Desplazamiento total – Modelo Double-Curvature.

CAPÍTULO 3 PROGRAMA DE CALIBRACIÓN

3.1 Generalidades

Para realizar el programa de calibración se utilizó el software OpenSees junto con el Software Matlab. El software Matlab es un programa que funciona mediante la creación de scripts, este programa se utilizó para automatizar la creación de modelos y crear una interfaz gráfica que sea amigable para el usuario. El Software OpenSees es un programa de análisis estructural que funciona por medio de archivos de texto en el cual el usuario define los parámetros a utilizar en la creación del modelo.

3.2 Scripts OpenSees

Se definió una base de datos con 177 ensayos, dicha base de datos contiene toda la información necesaria de cada uno de los ensayos, con esta información se procedió a crear los script “base” para el análisis de cada tipo de ensayo, en que se definen las condiciones de apoyo, los materiales, cargas y el tipo de análisis a realizar.

3.3 Script Matlab

Es este script se generó una codificación la cual facilita y automatiza la generación y calibración de modelos mediante el ingreso de 5 datos fundamentales que son:

1. # de Ensayo
2. Conffin-Manson, Fatiga y Reducción de Resistencia
 - 2.1 Ductilidad (Cf)
 - 2.2 Coeficiente de daño (alpha)
 - 2.3 Coeficiente de reducción de resistencia (Cd)

3. Omega
4. Gamma
5. Número de Paso

3.3.1 # de Ensayo

El usuario deberá ingresar el número del ensayo a analizar, y automáticamente el script de Matlab (nombre del archivo Matlab) pedirá la información a la base de datos de todos los parámetros correspondientes al número de ensayo ingresado, para de esta forma poder generar el script de análisis de OpenSees.

3.3.2 Conffin-Manson, Fatiga y Reducción de Resistencia

El usuario deberá ingresar un valor aleatorio a los parámetros de Ductilidad (Cf), Coeficiente de daño (alpha) y Coeficiente de reducción de resistencia (Cd). Estos valores ingresados se introducirán dentro del comando Reinforcing Steel que se definió en el capítulo dos para así alterar el comportamiento del acero de refuerzo longitudinal.

3.3.3 Omega

Omega es un factor que deberá ingresar el usuario para modificar el coeficiente mayoración de resistencia del hormigón K definido en el capítulo 1. Para que omega modifique el valor de K deberá ser diferente de 1.

3.3.4 Gamma

El factor gamma sirve para aumentar o disminuir la resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal.

3.3.5 Número de paso

El usuario debe ingresar el número de paso para así poder comenzar con el análisis, el número de paso indica en cuantos sub-incrementos de desplazamientos vamos a dividir el incremento de desplazamientos que reportan los ensayos. Cabe recalcar que el script de programa de Matlab

(nombre del programa) genera un archivo con el nombre de DINCR.tcl en el cual se encuentra una historia de todos los incrementos de desplazamientos.

3.4 Interfaz Gráfica

Se generó una interfaz gráfica para el que programa de calibración sea amigable con el usuario, en esta interfaz se pide que el usuario ingrese los datos de número de ensayos, Conffin-Manson, Fatiga y Reducción de Resistencia y el número de paso, una vez definidos estos parámetros se deberá dar clic en el botón “EJECUTAR” y se mostrará como resultado la información del ensayo (autor del ensayo, y tipo de ensayo), geometría (altura, base y longitud) del ensayo y gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total.

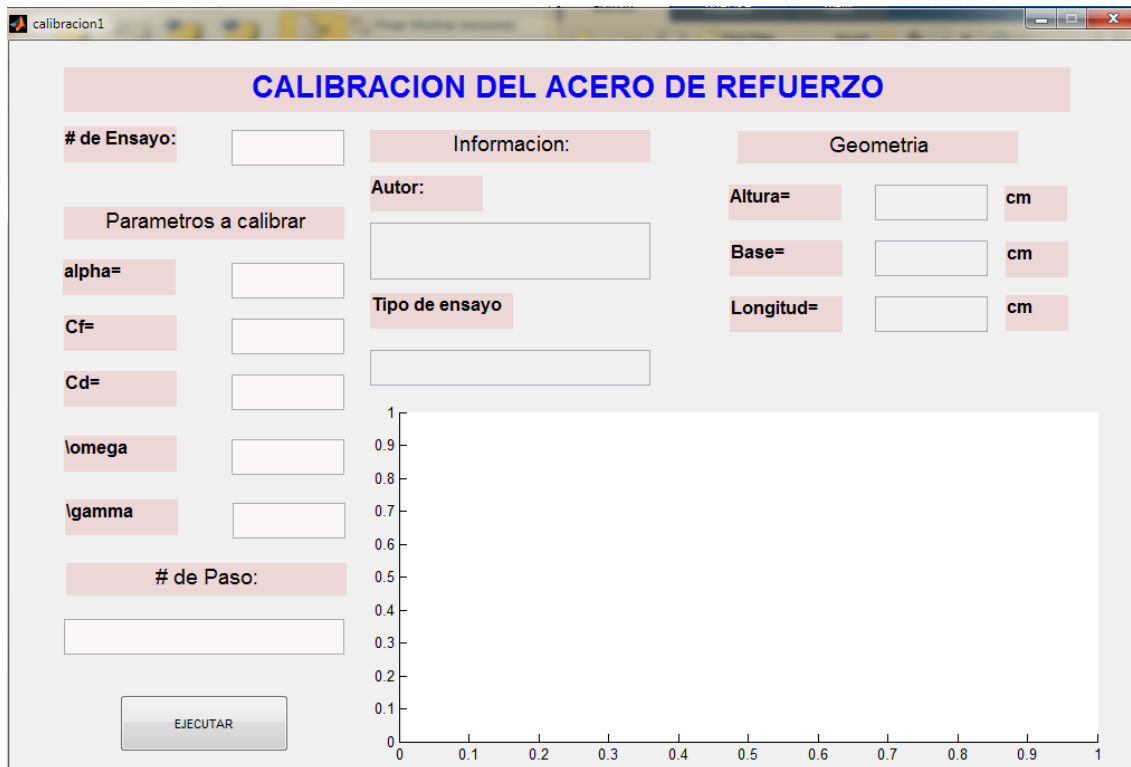


Fig. 29 Interfaz Gráfica, Programa de Calibración.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sobre el programa de calibración:

- El programa de calibración busca facilitar la calibración de los parámetros de resistencia y degradación del acero de refuerzo longitudinal de un elemento viga-columna. Sin embargo en el proceso de calibración es muy difícil estimar los valores correspondientes a los parámetros establecidos por Conffin-Manson, por tal motivo hay que realizar varias ejecuciones del análisis para obtener una buena aproximación entre la energía del experimento (ensayo) y la energía del modelo analizado.

Sobre resultados esperados:

- Se cumplió con todas las expectativas de la programación de la herramienta computacional, creando así una interfaz gráfica que sea amigable con el usuario y que muestre como resultados la curva de histéresis fuerza cortante vs deformación del experimento (ensayo) y del modelo de análisis.

Para futuras investigaciones:

Los ensayos que se analizaron son solamente dos pero la base de datos consta de 177 ensayos, por lo cual se deberán de realizar los 175 ensayos restantes para así tener una amplia gama de datos de los parámetros de Conffin-Manson los cuales servirán para encontrar una ecuación general para diferentes columnas con dimensiones, refuerzos longitudinales y transversales diferentes.

BIBLIOGRAFIA

- Berry, M., Parrish, M., & Eberhard, M. (2004). *PEER Structural Performance Database User's Manual (Version 1.0)*. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- FEMA/P695. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. California: nehrp.
- Filippou, F. C., D'Ambrisi, A., & Issa, A. (1992). *NONLINEAR STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SUBASSEMBLAGES*. California: Earthquake Engineering Research Center.
- Guevara , N. E., Osorio, S. A., & Vargas, E. A. (2006). *EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO DE LA BIBLIOTECA DE LAS INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA, UTILIZANDO ANÁLISIS ESTÁTICO NO LIENAL (PUSHOVER)*. El Salvador.
- Haselton, C. B., Goulet, C. A., Mitrani-Reiser, J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., . . . Taciroglu, E. (2008). *An Assessment to Benchmark the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced Concrete Moment-Frame Building*. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Ibarra, L. F., Medina, R. A., & Krawinkler, H. (2005). *Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- Karthik, M. M., & Mander, J. B. (2011). *Stress-Block Parameters for Unconfined and Confined Concrete Based on a Unified Stress-Strain Model*. JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING (C) ASCE.
- Mander, J. B. (2000). *Fragility CURve Development for Assessing the Seismic Vulnerability of Highway Bridges*. New York: University at Buffalo.
- Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*. Journal of Structural Engineering: ASCE.

- Moehle, J. (2015). *Seismic Desing of Reinforced Concrete Buildings*. United States: McGraw-Hill.
- Mohd, H., & Mohd, Y. (1994). *Nolinear Analysis of Prestressed Concrete Structures under Monotonic and Cycling Loads*. California: University of California, Berkeley.
- OpenSees. (16 de September de 2010). *OpenSees*. Obtenido de OpenSees: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Concrete02_Material_-_Linear_Tension_Softening
- OpenSees. (16 de June de 2010). *opensees.berkeley.edu*. Obtenido de opensees.berkeley.edu: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Reinforcing_Steel_Material
- OpenSees. (25 de June de 2014). *opensees.berkeley.ed*. Obtenido de opensees.berkeley.ed: http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Beam_With_Hinges_Element
- Paulay, T., & Priestley, M. J. (1992). *SEISMIC DESING OF REINFORCED CONCRETE AND MASONRY BUIDINGS*. JHON WILEY & SONS, INC.
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T., & Ueda, T. (2001). *Statistical Analysis of Fragility Curves*. Los Angeles, California 90089-2531: MCEER.
- Verri, A. D. (2003). *Modelación Numérica No-Lineal de Estructuras de Hormigón Armado Sometidas a Cargas Cíclicas*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

ANEXOS

APENDICE A

RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGON CONFINADO

Se calculó la resistencia a la compresión del hormigón confinado para todos 177 ensayos de la basa de datos.

Para el cálculo de esta resistencia se consideraron los siguientes parámetros: área gruesa de la sección de la columna, diámetros de las varillas del refuerzo longitudinal, recubrimiento, tipo confinamiento del acero de refuerzo transversal, diámetro del estribo y espaciamiento del estribo.

Para determinar la resistencia a la compresión del hormigón confinado, se utilizó una hoja de cálculo "HORMIGON CONFINADO" realizado en EXCEL.

Debido a que cada tipo de confinamiento del acero de refuerzo tiene características particulares se procedió hacer un análisis único para cada ensayo.

A continuación se presenta el cálculo para determinar la resistencia a la compresión del hormigón confinado para un ensayo siguiendo el procedimiento que recomienda Mander.

Ejemplo.- Determinación de la resistencia a la compresión del hormigón confinado.

Datos

de Ensayo: 1

Autor: Tanaka and Park 1990,
No.5

Base = 55.00 cm

Altura = 55.00 cm

Diámetro long = 2.00 cm

de varillas = 12 varillas

Recubrimiento = 4.00 cm

Tipo de confinamiento: RJ

de ramas por cortante: 4

Diámetro de estribo: 1.20 cm

Espaciamiento: 11.00 cm

Desarrollo

1.- Cálculo de b_c , es la distancia que existe entre los ejes del estribo en dirección X. Ver Figura 29.

2.- Cálculo de d_c , es la distancia que existe entre los ejes del estribo en dirección Y. Ver Figura 29.

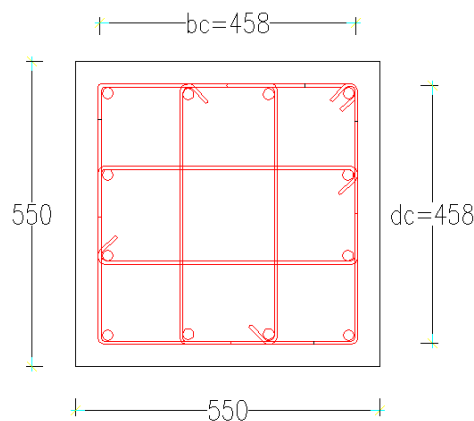


Fig. 30 Dimensiones del núcleo efectivo

3.- Cálculo de A_{sx} , es el área transversal del estribo multiplicado por el número de ramas de cortante en dirección X.

$$A_{sx} = 1.131 \times 4 = 4.524 \text{ cm}^2$$

$$\text{Donde: } A_v = \frac{\pi \times 1.2^2}{4} = 1.131 \text{ cm}^2$$

4.- Cálculo de A_{sy} , es el área transversal del estribo multiplicado por el número de ramas de cortante en dirección Y.

$$A_{sy} = 1.131 \times 4 = 4.524 \text{ cm}^2$$

5.- Cálculo de f_{lx} , es el esfuerzo de confinamiento lateral sobre el hormigón en dirección x.

$$f_{lx} = \frac{4.524}{11 \times 45.80} \times 3314.08 = 29.75 \text{ kg/cm}^2$$

Dónde:

- s: espaciamiento entre estribos.
- f_{yh} : Esfuerzo de fluencia del acero de estribo.

6.- Cálculo de f_{ly} , es el esfuerzo de confinamiento lateral sobre el hormigón en dirección y.

$$f_{ly} = \frac{4.524}{11 \times 45.80} \times 3314.08 = 29.75 \text{ kg/cm}^2$$

7.- Cálculo de w' , es la distancia que existe entre cara y cara de varilla longitudinal. Ver Figura 30

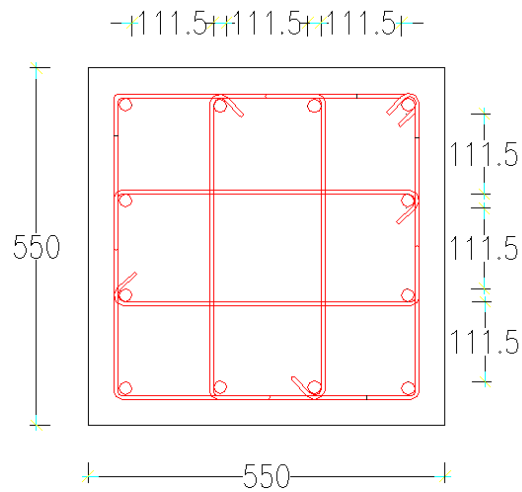


Fig. 31 Dimensión de w'

$w' = 11.15 \text{ cm}$ o 111.5 mm

8.- Cálculo de ρ_{cc} , cuantía de refuerzo longitudinal.

$$\rho_{cc} = \frac{37.69}{55 \times 48.80} = \mathbf{0.014}$$

9.- Cálculo de s' , espaciamiento entre cara y cara de estribo contiguos.

$$s' = 11 - (2 \times 1.2) = 8.6 \text{ cm}$$

10.- Cálculo de k_e , es el coeficiente efectivo de confinamiento para estribos rectangulares.

$$k_e = \frac{(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c}) (1 - \frac{s'}{2b_c}) (1 - \frac{s'}{2d_c})}{(1 - \rho_{cc})}$$

$$k_e = \frac{0.8129}{(1 - 0.014)} = 0.823$$

11.- Cálculo de f'_{lx} , es el esfuerzo de confinamiento efectivo lateral en dirección x.

$$f'_{lx} = \mathbf{0.823 \times 29.75 = 24.48 \text{ Kg/cm}^2}$$

12.- Cálculo de f'_{ly} , es el esfuerzo de confinamiento efectivo lateral en dirección y.

$$f'_{ly} = 0.823 \times 29.75 = 24.48 \text{ Kg/cm}^2$$

13.- Cálculo de K , es el coeficiente de mayoración de resistencia por confinamiento, este coeficiente se obtiene mediante el uso del nomograma de la figura 31.

$$\frac{f'_{lx}}{f'_{co}} = \frac{24.48}{326.31} = 0.08$$

$$\frac{f'_{ly}}{f'_{co}} = \frac{24.48}{326.31} = 0.08$$

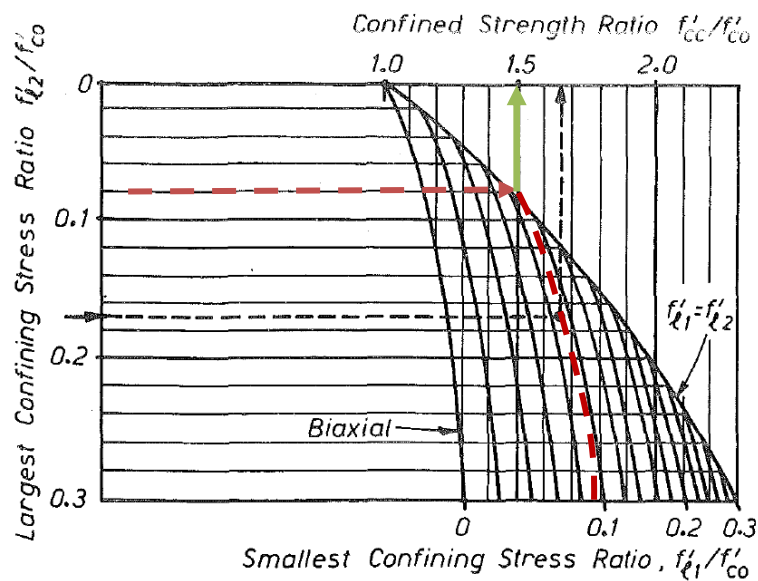


FIG. 4. Confined Strength Determination from Lateral Confining Stresses for Rectangular Sections

Fig. 32 Monograma de coeficiente de mayoración de resistencia K .
(Priestley, Mander and Park 1988)

$$K = 1.41$$

14.- Cálculo de f'_{cc} , es el esfuerzo de compresión del hormigón confinado.

$$f'_{cc} = 1.41 \times 326.31 = 460.09 \text{ Kg/cm}^2$$

Dónde:

- f_c : Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días.

APENDICE B

LONGITUD DE ROTULA PLASTICA

Para el análisis no lineal que se va a realizar en cada modelo generado, es necesario calcular la longitud de rotula plástica la cual determina la zona del elemento analizado que va a trabajar en la zona inelástica.

Para el cálculo de la longitud de rotula plástica se utilizó la ecuación recomendada por (Paulay & Priestley, 1992) la cual considera como variables independientes el diámetro de la varilla, longitud del elemento y esfuerzo de fluencia del acero.

Debido a las características son similares para cada ensayo se procedió a realizar una hoja de cálculo “LONGITUD DE ROTULAS PLASTICA” realizado en EXCEL.

A continuación se mostrara como ejemplo el procedimiento que se llevó para determinar la longitud de rotula plástica para un ensayo.

Ejemplo.- Determinación de rotula plástica.

Datos

de Ensayo: 1

Autor: Tanaka and Park 1990, No.5

L=1.65 m

Diámetro long = 0.02 m

$f_y = 511.00$ MPa

Desarrollo

$$l_p = 0.008l + 0.022d_b f_y \text{ (MPa)}$$

$$l_p = 0.008 \times (1.65) + 0.022(0.02) \times (511.00)$$

$$l_p = 35.68 \text{ cm}$$

APENDICE C

BASE DE DATOS

Generar una base de datos para este tipo de investigación es primordial puesto que de esta manera se puede almacenar la información de manera ordenar y poderla utilizarla de forma rápida para la generación de los modelos estructurales.

Para realizar la base de datos se utilizó el programa EXCEL creando así un archivo con el nombre de "ENSAYOS". La base de datos consta con 177 ensayos, la cual almacena los parámetros más característicos de cada ensayo, para obtener la información de dichos ensayos se procedió a buscar en la base de datos de PEER (PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER).

Además en esta base de datos se aprecia el autor que realizo el ensayo y el número de ensayo correspondiente a la base de datos de PEER.

Los valores de la base de datos de PEER estaban en las siguientes unidades: esfuerzos (MPa), Carga axial (kN), dimensiones (mm) por tal motivo se las transformo todas esas unidades a kilogramos (Kg) y centímetros (cm).

Adicionalmente se creó otra base de datos la cual tiene como información los valores de fuerza cortante (kN) y desplazamientos (mm), los cuales se utilizan para generar el diagrama de histéresis.

APENDICE D

SCRIPTS DE MODELOS EN OPENSSES DE LOS EJEMPLOS

Para la realización de las curvas de histéresis fuerza-cortante Vs. deformación mostradas en el capítulo 3, se utilizó el software OpenSees. Este software se ejecuta por medio de la codificación de scripts en los cuales el analista define toda la información correspondiente a los modelos a analizar, eligiendo así el tipo de análisis y el comportamiento de los elementos.

Para los dos tipos de análisis que se presentan en el capítulo 3 se utilizó el material ReinforcingSteel, el comportamiento a flexo-compresión de la columna corresponde un elemento Beam with Hinges.

A diferencia del análisis 2, en el análisis 1 se consideró que la condición de apoyo (Cantiliver).

Para los dos ejemplos se realizó un análisis con fibras en el cual considera la discretización de la sección de la columna en función a los materiales utilizados y estipulados en el capítulo 3.

En ambos ejemplos se consideró un análisis cíclico el cual consistió en asignar incrementos de desplazamientos en la parte superior de la columna por medio de un integrador basado en desplazamientos.