

Monografías de Ingeniería Sísmica

Editor A.H. Barbat

Pushover con Acoplamiento de CEINCI-LAB y OpenSees

R. Aguiar
B. Cagua
J. Pilatasig

Pushover con Acoplamiento de CEINCI-LAB y OpenSees

R. Aguiar^{1,2}
B. Cagua¹
J. Pilatasig¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador

² Facultad de Ingeniería
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí-ULEAM, Manta - Ecuador

Monografía CIMNE IS-77 2020

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería
Gran Capitán s/n, 08034 Barcelona, España

CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA
Edificio C1, Campus Norte UPC
Gran Capitán s/n
08034 Barcelona, España

MONOGRAFÍAS DE INGENIERÍA SÍSMICA

Editor A.H. Barbat

ISSN: 1134-3249

PUSHOVER CON ACOPLAMIENTO DE CEINCI-LAB Y OPENSEES

Monografía CIMNE IS-77

© Los autores

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS NO LINEAL	1
1.1	IMPLICACIONES DEL ANÁLISIS NO LINEAL	1
1.2	NO LINEALIDAD DEL MATERIAL	2
1.3	NO LINEALIDAD GEOMÉTRICA	8
1.4	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	13
1.5	LA TÉCNICA DEL PUSHOVER	14
1.6	DEFORMACIÓN DEL MATERIAL Y GEOMÉTRICA	17
1.6.1	Matriz de paso para Deformación del material	17
1.6.1	Matriz de paso para deformación geométrica	19
1.7	TRANSFORMACIONES GEOMÉTRICAS	20
2.	PUSHOVER BÁSICO CON CEINCI-LAB	24
2.1	DIAGRAMAS MOMENTO CURVATURA O MOMENTO ROTACIÓN	24
2.1.1	Punto de Fluencia para elementos de hormigón armado	25
2.1.2	Valores del ASCE/SEI para hallar punto U y residual en vigas	27
2.1.3.	Longitud plástica y curvaturas	28
2.1.4	Valores del ASCE/SEI para hallar punto U y residual en columnas	34
2.2	MODELO DE PLASTICIDAD DE GIBERSON	38
2.3	PUSHOVER BÁSICO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO	43
2.4	ESTRUCTURAS DE ACERO	59
2.4.1	Momento y curvatura de fluencia en perfil "I"	59
2.4.2	Rotación y Momento de fluencia	60
2.4.3	Importancia de la conexión para el cálculo del momento de fluencia	61
2.4.4	Tabla del ASCE/SEI para estructuras de acero	62
2.4.5	Programas en <i>CEINCI-LAB</i> para encontrar relaciones momento curvatura	63
3.	PUSHOVER NIVEL 1 CON CEINCI-LAB	70
3.1	ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO	70
3.1.1	Programas para hallar la relación Momento-Curvatura y Momento-Rotación	71
3.1.2	Comentario sobre modelo de cálculo	85
3.2	ESTRUCTURAS DE ACERO	85
3.2.1	Efecto $P - \Delta$	85
3.2.2	Modelo constitutivo para las diagonales de acero	93
3.2.3	Reforzamiento de estructuras con diagonales de acero	95
4.	ACOPLAMIENTO CEINCI-LAB y OPENSEES NIVEL 1: Estructuras de acero	98
4.1	MODELO CON ZONA DE PLASTICIDAD CONCENTRADA DE OPENSEES	98
4.1.1	Modelo de Ibarra-Medina-Krawinkler	102

Contenido

4.1.2	Definición de masa	105
4.1.3	Patrón de fuerzas laterales para Pushover monotónico	105
5.	ACOPLAMIENTO CEINCI-LAB y OPENSEES NIVEL 2: ESTRUCTURAS DE ACERO	115
6.	ACOPLAMIENTO CEINCI-LAB y OPENSEES NIVEL 2: ESTRUCTURAS DE ACERO CON IRREGULARIDADES	139
	REFERENCIAS	154
	Anexo A. Códigos para realizar ejercicios	158
	Anexo B. Código para Pushover del ejemplo 1 presentado en la sección 4	171
	Anexo C. Código para ejemplo de sección rectangular	175

RESUMEN

El análisis no lineal estático, conocido como Pushover, permite conocer el probable desempeño sísmico que va a tener una estructura, esto mediante la obtención de la curva de capacidad sísmica resistente que relaciona el cortante basal con el desplazamiento lateral en el tope de la edificación y no solo eso, sino que se determinan las secciones que van ingresando al rango no lineal; toda esta información es de gran utilidad para el Proyectista Estructural que podrá visualizar si el desempeño que va a tener la edificación está en concordancia con lo que esperaba de su diseño, caso contrario está a tiempo de hacer correcciones a su diseño, de esta manera se está optimizando el trabajo.

Por este motivo es que se decidió escribir la presente obra que sin lugar a duda será de gran utilidad para aquellos estudiantes que decidieron incursionar en el análisis no lineal estático (Pushover), tema bastante complejo si se quiere conocer a fondo la teoría de cálculo y no ser solamente usuario de programas.

En el análisis no lineal se tiene una linealidad del material y una linealidad geométrica; estos temas son abordados en el Capítulo 1, mediante la realización de dos ejemplos en los que se presenta con bastante detalle el cálculo en forma manual y en un Anexo se complementa con el desarrollo de un programa. De esta forma el lector tendrá una idea bastante amplia de que es la no linealidad de material y no linealidad geométrica.

El Capítulo 2, se ha denominado **Pushover Básico con CEINCI-LAB** debido a que se inicia el cálculo con la obtención de la relación Momento - Curvatura en cada elemento, la misma que debe ser determinada por el usuario utilizando las funciones de **CEINCI-LAB**. Esta relación solo se obtiene una vez al inicio del análisis, de tal manera que es aproximado el cálculo, se lo hizo de esta forma para que el estudiante pueda comprender como se resuelve un pórtico por el Método de los Desplazamientos utilizando el modelo de plasticidad concentrada de Giberson. A pesar de que es aproximado da buenos resultados.

El Capítulo 3, se llama **Pushover nivel uno con CEINCI-LAB** y ahora se determinan los diagramas momento curvatura o momento rotación en cada ciclo de carga, de igual manera se incorpora el efecto $P - \Delta$ que es básico para la técnica del Pushover. Tanto en el Pushover Básico como en el Pushover nivel uno, se obtiene la curva de capacidad sísmica de pórticos de acero o de hormigón armado ante cargas monotónicas. Las funciones de **CEINCI-LAB** que se utilizan permiten visualizar como se deforma la estructura y la secuencia de daño que presentan sus elementos.

CEINCI-LAB tiene una gran fortaleza y es la generación de estructuras complejas en forma muy sencilla, como se verá en lo posterior de esta obra y OpenSees tiene su fortaleza en que cuenta con funciones muy avanzadas para el análisis no lineal. Por esta razón se decidió hacer un acoplamiento entre estos dos

sistemas de computación, que se presenta en el Capítulo 4. En este capítulo se obtienen curvas de Capacidad Sísmica de estructuras de acero conformadas por vigas y columnas, que son vulnerables sísmicamente, y la curva de capacidad de estas estructuras reforzadas con diagonales concéntricas en forma de V invertida o en forma de X, que suben dos pisos. Las funciones de **CEINCI-LAB** permiten presentar en un solo gráfico las curvas de capacidad de una estructura sin y con reforzamiento. Inicialmente se trabajó con el modelo de plasticidad concentrada de Krawinkler en las vigas y un modelo bilineal en columnas y diagonales, las mismas que se utilizan en OpenSees.

En el Capítulo 4 todas las columnas tienen la misma sección y lo propio sucede con las vigas y diagonales; esto se lo hizo para que el usuario paulatinamente vaya aprendiendo, primero el uso de los programas de **CEINCI-LAB** y de OpenSees y segundo, que es lo más importante, la teoría que hay detrás de todo esto; el propósito es que se conozca a fondo los modelos constitutivos. Posteriormente, en el Capítulo 5 cuando el lector tiene una base bastante sólida puede obtener las curvas de capacidad sísmica trabajando con varios perfiles de acero en columnas y vigas, ya no está limitado a un solo tipo de sección.

Es verdad que la Técnica del Pushover, también conocida con el nombre de la Técnica del Empujón, está orientada a estructuras regulares en elevación donde su respuesta sísmica está dada por los primeros modos de vibración, sin embargo, con el propósito de que el lector conozca más como se trabaja con las funciones de **CEINCI-LAB** y de OpenSees, se presenta el cálculo de las curvas de capacidad sísmica en estructuras irregulares, en el Capítulo 6.

Mientras se escribía esta obra, el material se utilizó en los cursos de pregrado de Análisis Sísmico de Estructuras que se imparten en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), los estudiantes mostraron un gran interés ya que en forma bastante sencilla ellos visualizaban el desempeño de estructuras de acero sin y con diagonales concéntricas, estas diagonales se utilizan como mecanismo de reforzamiento.

También se utilizó en el curso de Post Grado de Estructuras que se dicta en la ESPE, en la materia de Peligrosidad Sísmica y Demanda, para que conozcan más a fondo como se determina el factor de reducción de las fuerzas sísmicas con el cual se pasa de espectro elástico al inelástico.

El arte de enseñar es presentar temas bastante complejos en forma muy sencilla y esto se logra con esta obra.

ABSTRACT

The static non-linear analysis allows us to know the probable seismic performance that a structure will have, this by obtaining the resistant seismic capacity curve that relates the basal shear with the lateral displacement at the top of the building and not only that, but that the sections that enter the non-linear range are determined. This information is very useful for the Structural Designer who will be able to visualize if the performance that the building is going to have is in accordance with what he expected from his design, otherwise it is time to make corrections to his design, in this way it will be you are optimizing work.

For this reason, it was decided to write this work, which will undoubtedly be very useful for those students who decided to venture into nonlinear static analysis (Pushover), a rather complex subject if you want to know in depth the theory of calculus and not just program user.

In nonlinear analysis, there is a Material linearity and a Geometrical linearity. These topics are addressed in Chapter 1, by carrying out two examples in which the calculation is presented in considerable detail manually and in an Annex, it is complemented by the development of a program. In this way the reader will have a fairly broad idea of what material nonlinearity is and geometric nonlinearity.

Chapter 2 denominated Basic Pushover with CEINCI-LAB because the calculation begins with obtaining the Moment-Curvature relation in each element, the same that must be determined by the user using the CEINCI-LAB functions. This relationship is only obtained once at the beginning of the analysis, in such a way that the calculation is approximate, it was done in this way so that the student can understand how a portal is solved by the Displacement Method using the concentrated plasticity model Giberson. Although it is approximate, it gives good results.

Chapter 3 is called Level One Pushover with CEINCI-LAB and now the curvature moment or rotation moment diagrams are determined in each load cycle, in the same way the P-Delta effect is incorporated, which is basic for the Pushover analysis. In both the Basic Pushover and the level one Pushover, the seismic capacity curve of steel or reinforced concrete frames is obtained under monotonic loads. The CEINCI-LAB functions used allow visualizing how the structure deforms and the sequence of damage that its elements present.

CEINCI-LAB has great strength and is the generation of complex structures in a very simple way, as will be seen in the later part of this work and OpenSees has its strength in that it has very advanced functions for non-linear analysis. For this reason, it was decided to make a coupling between these two computer systems, which is presented in Chapter 4. In this chapter, Seismic Capacity curves are obtained from steel structures made up of beams and columns, which are seismically vulnerable, and the curve capacity of these structures reinforced with concentric diagonals in the

form of an inverted V or in the form of an X, which go up two floors. The CEINCI-LAB functions allow the capacity curves of a structure without and with reinforcement to be presented in a single graph. Initially, we worked with the Krawinkler's concentrated plasticity model on the beams and a bilinear model on columns and diagonals, the same ones used in OpenSees.

In Chapter 4 all the columns have the same section and the same happens with the beams and diagonals; This was done so that the user gradually learns, first the use of the CEINCI-LAB and OpenSees programs and second, which is the most important thing, the theory behind all this; the purpose is to get to know the constitutive models in depth. Subsequently, in Chapter 5 when the reader has a fairly solid base you can obtain seismic capacity curves by working with various steel profiles on columns and beams, you are no longer limited to a single type of section.

It is true that the Pushover Analysis, also known as the Push Technique, is aimed at regular structures in elevation where its seismic response is given by the first modes of vibration, however, in order for the reader to know In addition to working with the CEINCI-LAB and OpenSees functions, the calculation of seismic capacity curves in irregular structures is presented in Chapter 6.

While this work was being written, the material was used in the Seismic Analysis of Structures undergraduate courses taught at the University of the Armed Forces ESPE and the Laica Eloy Alfaro University of Manabí (ULEAM), the students showed great interest since they quite simply visualized the performance of steel structures without and with concentric diagonals, these diagonals are used as a reinforcing mechanism.

It was also used in the Postgraduate Course on Structures that is dictated in the ESPE, in the field of Seismic Hazard and Demand, so that they know more deeply how the reduction factor of seismic forces is determined with which one passes from elastic to inelastic spectrum.

The art of teaching is to present quite complex subjects in a very simple way and this is achieved with this work.

1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS NO LINEAL

1.1 IMPLICACIONES DEL ANÁLISIS NO LINEAL

De forma simplificada el análisis lineal consiste en conocer las respuestas estructurales (desplazamientos, velocidad, aceleraciones, deformaciones y esfuerzos), asumiendo que se cumple con la ley de Hooke donde los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones (linealidad física o del material). Adicionalmente se considera que los desplazamientos son pequeños y pueden ser despreciadas las fuerzas inducidas productos de los mismos, es decir que el principio de superposición de efectos es válido.

Lo mencionado previamente es válido bajo ciertas hipótesis, que no siempre se cumplen, por ejemplo, no existe ningún material o elemento que se comporte siempre de forma lineal puesto que superado un cierto nivel de esfuerzo o deformación el material comienza a incursionar en la zona de no linealidad, que se manifiesta con daño o fluencia, o en el caso de materiales frágiles se presenta una falla prácticamente inmediata al superar este límite, en la figura 1.1 se muestra el comportamiento de un material frágil (azul) y de un material dúctil (roja).

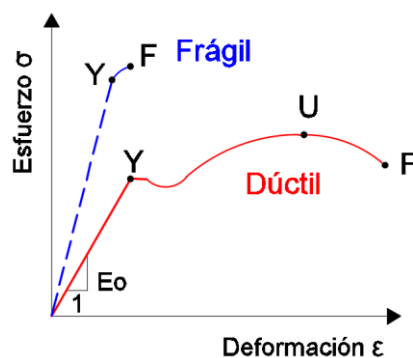


Figura 1.1 Gráfico esfuerzo vs deformación de un material frágil y de un material dúctil.

Debido a estas hipótesis el análisis lineal no es la mejor manera de representar el comportamiento de una estructura, no obstante, es muy empleado puesto que es sencillo de realizar y siempre que se limiten las deformaciones y esfuerzos puede ser una opción viable para su aplicación en ciertas estructuras.

El análisis no lineal tiene el mismo propósito que el análisis lineal, este objetivo es conocer las respuestas de una estructura ante la acción de diferentes cargas, pero

la diferencia es que intenta capturar de mejor manera el comportamiento de la estructura. Es importante indicar que por más complejos que sean nuestros modelos nunca se podrá capturar al 100% la realidad debido a que existen muchas variables. En algunas investigaciones se manifiesta que el análisis no lineal logra capturar de forma aceptable el comportamiento de una estructura, es por ello que actualmente es un tema de mucho interés en el campo de ingeniería estructural.

En una estructura la no linealidad puede ser debida al material, de forma que la matriz de rigidez de una estructura no será constante en todo el análisis y dependerá de los desplazamientos (ecuación 1.1), adicionalmente se tiene la no linealidad geometría que se relaciona con la posición de aplicación de las cargas, es decir que también depende de la condición deformada de la estructura (ecuación 1.2).

$$Q = K(q) \cdot q \quad (1.1)$$

$$Q(q) = K \cdot q \quad (1.2)$$

Siendo Q el vector de cargas, K es la matriz de rigidez de una estructura y q corresponde a los desplazamientos de una estructura.

Por didáctica se analizará la no linealidad del material y geometría por separado para que el lector pueda comprender los conceptos del análisis no lineal.

1.2 NO LINEALIDAD DEL MATERIAL

La no linealidad del material o también conocida como no linealidad física es un concepto sencillo de entender por el lector, debido a que es fácil de observar en fenómenos naturales o ensayos de laboratorio.

Un ejemplo clásico donde se observa este fenómeno es el ensayo de una barra de acero (dúctil) sometida a fuerzas de tracción (figura 1.2), en este caso si la barra es sometida a esfuerzos menores al esfuerzo de fluencia entonces es posible en esa etapa retirar la fuerza y el elemento se recupera a su condición "original", además existirá una proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación del elemento (comportamiento lineal); no obstante, pasado el límite de fluencia la barra presentará grandes deformaciones ante pequeñas variaciones de cargas hasta cierto límite de deformaciones y si se retira la carga en esta etapa entonces el elemento quedara con una deformación permanente.

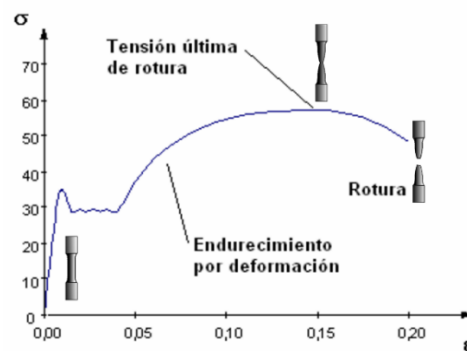


Figura 1.2 Grafico esfuerzo vs deformación en un ensayo de tracción de una barra de acero.

Con esta explicación el lector puede entender el concepto de no linealidad del material, no obstante, es adecuado presentar un ejemplo de análisis no lineal, donde únicamente se considera no linealidad del material y se desprecia efectos de segundo orden (en resumen, el equilibrio de la estructura se lo hace en la estructura sin deformar y se asume válido el principio de superposición de efectos).

Por facilidad de explicación, el análisis se lo realiza en una armadura plana conformada por 3 elementos (figura 1.3), donde se aplicará únicamente una fuerza horizontal en el nudo 1, se asume que las barras de esta estructura únicamente trabajarán axialmente y se desprecia otros efectos.

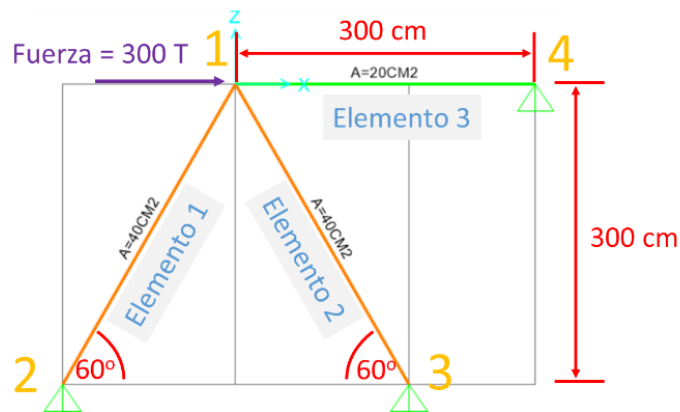


Figura 1.3 Esquema de la estructura.

El material para las barras de la armadura plana tiene un esfuerzo de fluencia de $3.5 \frac{T}{cm^2}$ y un módulo de elasticidad de $2000 \frac{T}{cm^2}$.

Para un primer análisis se asume que el material cumple con la proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones (figura 1.4a), es decir un análisis lineal y adicionalmente se desprecia efectos de pandeo en las barras sometidas a compresión (únicamente es un análisis didáctico). Entonces debido a esta acción y con las consideraciones dadas las fuerzas internas en cada elemento se presenta en la figura 1.4b.

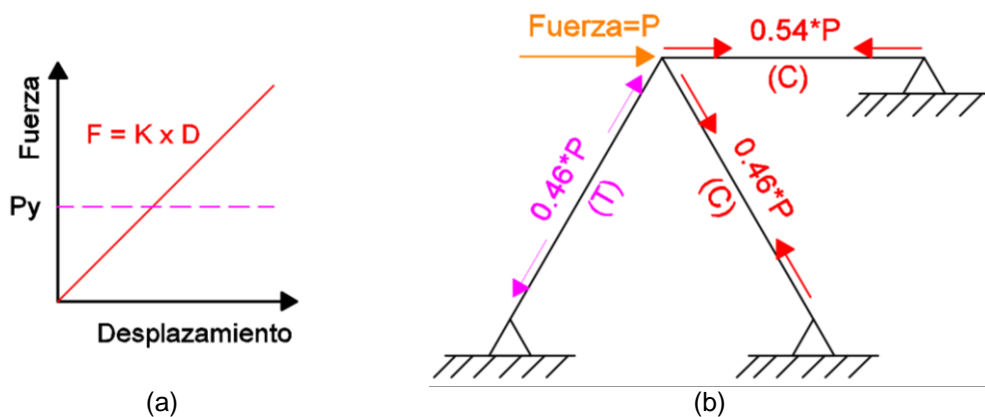


Figura 1.4 a) Comportamiento idealizado de un material elástico. b) Fuerzas internas en los elementos.

En este tipo de análisis ante una carga $P = 300 \text{ T}$ se tiene fuerzas internas en el elemento como se presenta en la figura 1.5.

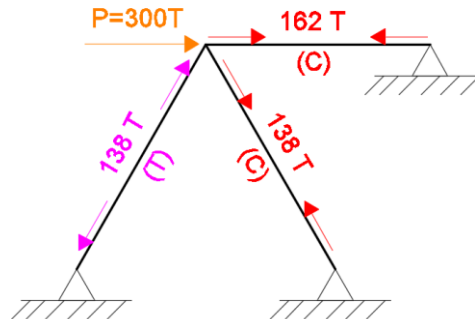


Figura 1.5 Fuerzas internas en los elementos.

Esto es correcto desde un punto de vista matemático, sin embargo, como ingenieros se debe analizar los esfuerzos en los elementos, en este caso se puede apreciar que con el área transversal de los elementos 1, 2 y 3 el esfuerzo en estos elementos supera el esfuerzo de fluencia del material entonces al retirar la carga se tendrá daño permanente en los elementos y esto no es lo más deseable. Una primera conclusión es que bajo esta condición de carga la estructura presentará daño, pero con este análisis no es posible conocer el mecanismo de daño en la estructura.

Como un primer intento de entender este mecanismo de falla de la estructura se puede asumir que el comportamiento del material no es siempre lineal, sino que al superar el esfuerzo de fluencia el elemento ingresa a una etapa en la cual no puede sostener una carga mayor y únicamente se deformará, por el momento se asume que tiene una capacidad ilimitada de deformación como se muestra en la figura 1.6 (esto no es real, pero me permite entender el mecanismo de falla).

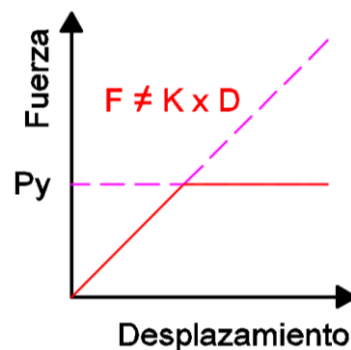


Figura 1.6 Comportamiento idealizado de un material elástico perfectamente plástico.

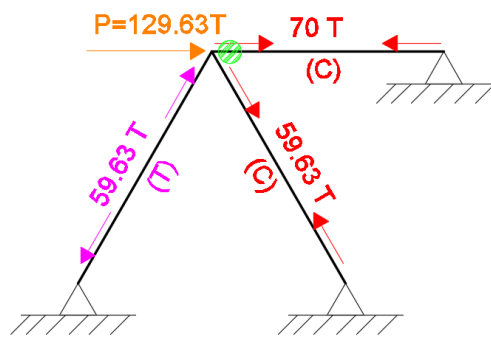
Por facilidad en el análisis no se considera efectos de pandeo en elementos a compresión, en este caso se puede obtener la fuerza axial en la cual cada elemento empieza la fluencia únicamente haciendo el producto del esfuerzo de fluencia por el área transversal del elemento ($P_y = F_y \cdot A$), en la tabla 1 se presenta la fuerza en la que cada elemento terminaría su comportamiento lineal.

Tabla 1.1 Fuerzas en la que empieza la fluencia en los elementos.

ELEMENTO	$Fy = 3.5 \frac{T}{cm^2}$	
	Área (cm^2)	Py (T)
1	40	140
2	40	140
3	20	70

Para el análisis inicial se cumple que las fuerzas internas en los elementos en función de una carga lateral P es igual a lo presentado en la figura 1.4, donde en el elemento 3 la fuerza interna es $0.54 \cdot P$ y para los elementos 1 y 2 la fuerza es $0.46 \cdot P$.

Adicionalmente en el elemento 3 la fuerza que puede resistir antes de empezar la fluencia es de $70 T$, entonces la fuerza P para esta condición debe ser de $P = \frac{70}{0.54} = 129.63 T$, en la figura 1.7 se presenta el diagrama de fuerzas internas para esta condición de carga.

**Figura 1.7** Fuerzas internas en los elementos.

En la figura 1.7 el elemento 3 con la fuerza de $70 T$ empieza a fluir, en este caso se coloca de color verde una “articulación plástica” únicamente como referencia porque en realidad “todo el elemento se encuentra en fluencia”. Después de esta etapa si se aumenta la carga lateral P entonces el elemento 3 ya no podrá soportar una carga mayor y únicamente mantendrá la carga de $70 T$ con un desplazamiento “ilimitado”. Las fuerzas internas en los elementos de la estructura con un incremento de carga P_2 se presenta en la figura 1.8a, en la misma se puede apreciar que los elementos 1 y 2 empezarán a fluir al mismo tiempo y para que eso ocurra la fuerza P_2 debe ser $P_2 = 140 - 59.63 = 80.37 T$ y en ese instante la estructura se convierte en un mecanismo donde la estructura ya no es estable ante cargas laterales (figura 1.8b).

Este ejemplo es didáctico, entonces si se realiza una gráfica de fuerza lateral en el nudo 1 en función del desplazamiento del mismo nudo se tiene “una curva de capacidad” de la estructura como se muestra en la figura 1.9 donde la resistencia máxima de esta estructura ante cargas laterales es de $210 T$ y luego de ese nivel de fuerzas para un incremento de carga la estructura únicamente se deformará.

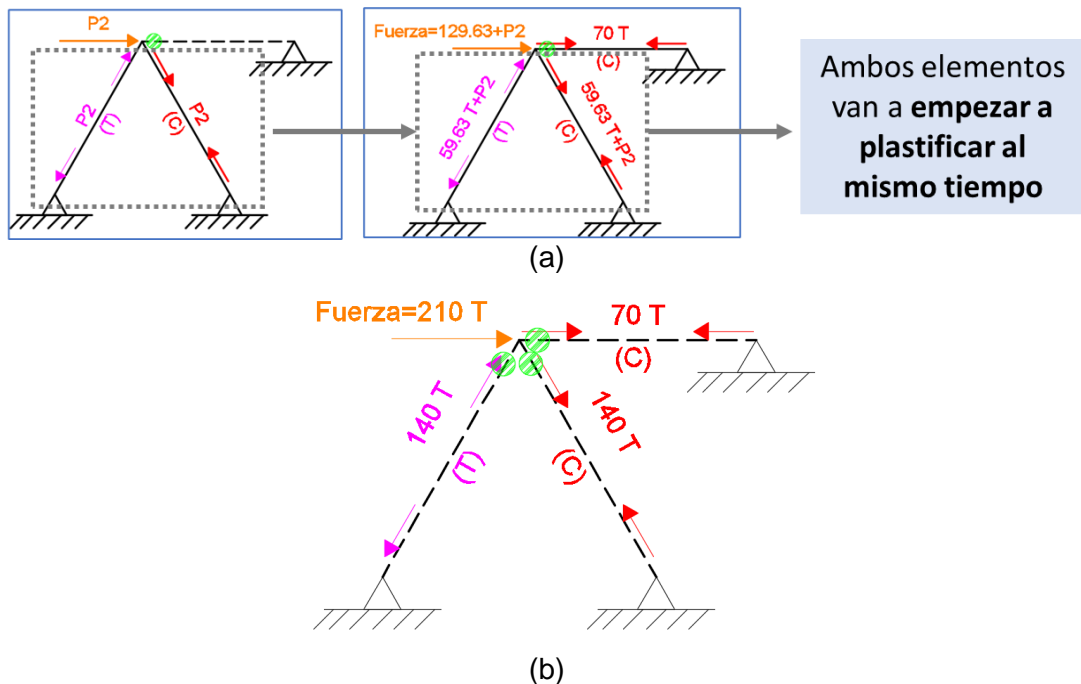


Figura 1.8 a) Fuerzas internas en los elementos. b) Fuerzas internas en los elementos en su condición límite de estabilidad.

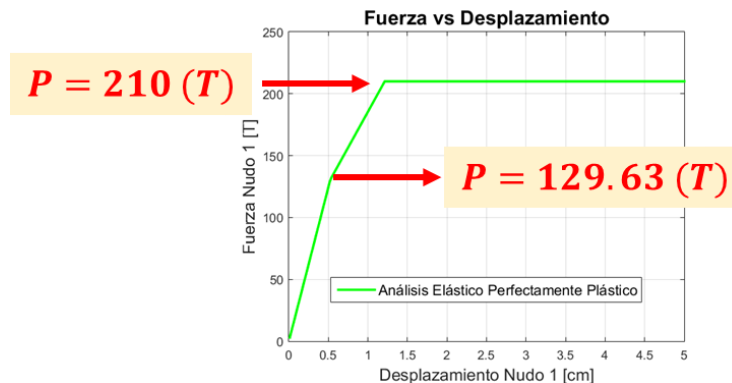


Figura 1.9 Fuerza en el nudo 1 vs Desplazamiento horizontal.

En el ejemplo anterior, a cada elemento estructural se le asigna de forma idealizada "rótulas plásticas", únicamente para entender el fenómeno; matemáticamente todo el elemento se encontraría en fluencia debido a que la carga axial es constante en toda sección del elemento (En anexo A, ejercicio 1 se tiene el código Tcl para ejecutar el análisis en OpenSees y el código en MATLAB para presentar los resultados).

Entonces en base a este ejemplo se puede entender que el comportamiento del material no es constante durante todo el análisis, sino que puede cambiar al superar un límite de esfuerzo o deformación. Actualmente todos los modelos son una idealización del comportamiento del material, pero algunos modelos son más complejos y capturan de mejor manera el comportamiento de los materiales, algunos de los modelos disponibles se ilustran en la figura 1.10.

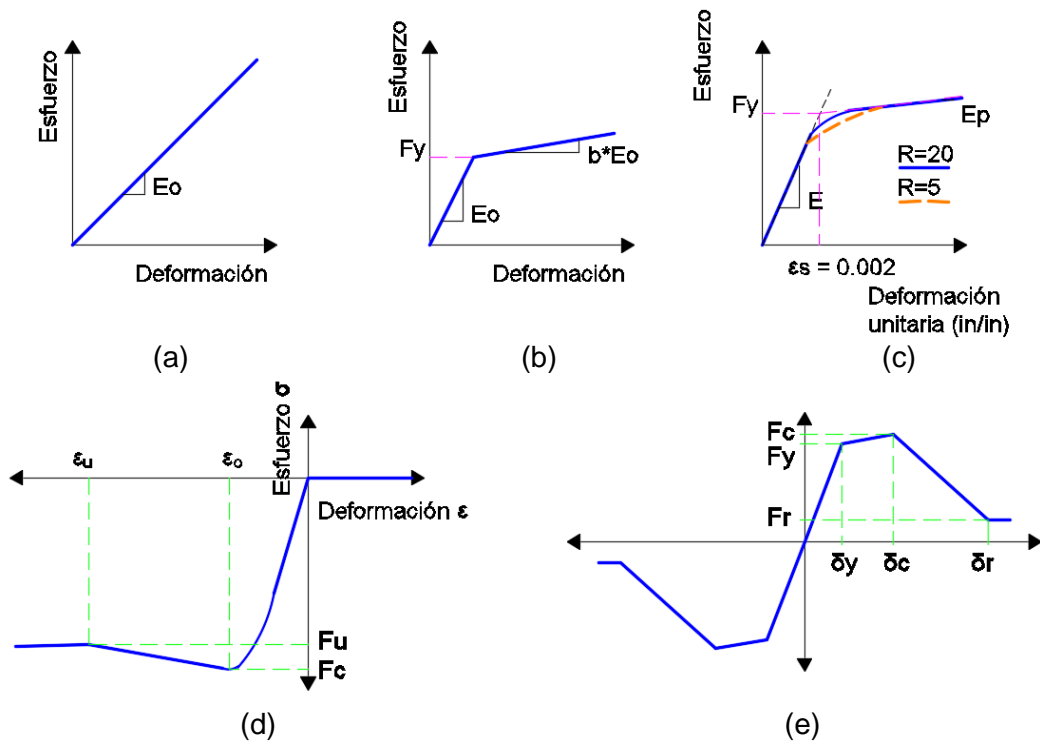


Figura 1.10 Gráficas esfuerzo vs deformación de los materiales; a) Modelo lineal elástico; b) Modelo Bilineal; c) Modelo de Giuffré-Menegotto-Pinto; d) Modelo concrete01 de OpenSees; e) curva envolvente (backbone curve) del comportamiento histerético.

Existen algunas opciones para modelar la no linealidad del material en los elementos, entre estas opciones se tiene las presentadas en la figura 1.11. Estos modelos se pueden clasificar en dos grupos denominados de plasticidad concentrada o plasticidad distribuida; los modelos de plasticidad concentrada son más simples y por ende el costo computacional es menor que al emplear plasticidad distribuida, no obstante, la precisión de los modelos también varía en función de la complejidad. Para poder llegar a resultados coherentes y con un costo computacional racional es posible generar modelos híbridos donde en algunas partes se emplee elementos con plasticidad concentrada y en otros elementos se asigne plasticidad distribuida, de modo que exista un balance entre la precisión del modelo y el esfuerzo de cómputo.

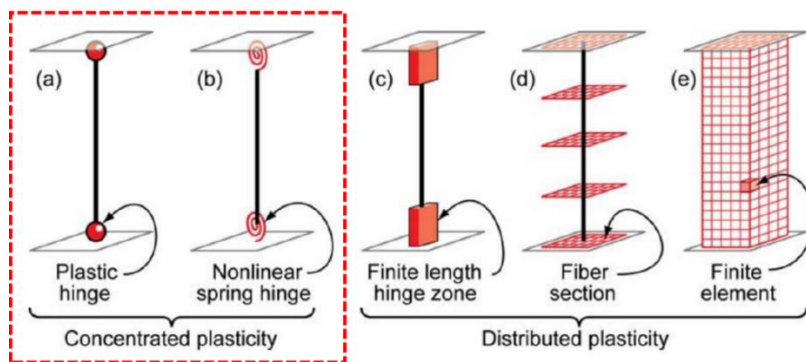


Figura 1.11 Modelos para elementos.

Fuente: Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. R. (2010).

El propósito de este documento es ser una guía para que el lector comprenda como empezar en el análisis no lineal de estructuras y que posteriormente pueda realizar modelos más complejos.

En los modelos de plasticidad concentrada a cada elemento estructural se le asigna zonas de plasticidad, es decir zonas donde es posible que se presente daños, cuando en estas zonas de plasticidad concentrada se agote su capacidad entonces en esta zona aparecen “rotulas o articulaciones plásticas” en función a su tipo de falla posible, estas rotulas indican que su capacidad cedente y última fue alcanzada y puede ser expresada en términos de curvaturas, rotaciones o desplazamiento de acuerdo al tipo de solicitaciones. En el ejemplo de la armadura plana presentado anteriormente la capacidad de los elementos estuvo dada en función de su capacidad axial, sin embargo, en un pórtico los elementos no necesariamente agotan su capacidad resistente en función de acciones axiales, sino que depende de cómo trabaja el elemento antes las solicitaciones.

En los pórticos planos sometidos a un Pushover monotónico se tiene cargas gravitacionales en las vigas y fuerzas laterales en cada piso del pórtico, entonces los elementos vigas trabajarán principalmente a flexión mientras que las columnas tendrán efectos de flexo compresión; pero en estos casos con cargas gravitacionales en un rango “normal de ocupación” es posible que el efecto predominante siga siendo la flexión en columnas y por ello para estos elementos se puede asumir que la capacidad resistente de las secciones se agotara en términos de momentos flectores y rotaciones relacionadas a los mismos. Por esta razón en la siguiente sección se presentará modelos de ASCE 7 y de Krawinkler para la consideración de la no linealidad física en elementos sometidos a flexión.

Es habitual en Ecuador que los pórticos sean reforzados para incrementar su resistencia, es por ello que se empleará modelos con elementos diagonales de acero, las mismas que al trabajar de manera axial su capacidad resistente estará en función de su resistencia ante cargas axiales. Los modelos de diagonales son complejos puestos que al ser elementos generalmente esbeltos al aplicar cargas de compresión se puede tener fenómenos de pandeo, pero para simplificar la explicación y el análisis estos efectos no se incluyen en los modelos presentados en esta monografía.

1.3 NO LINEALIDAD GEOMÉTRICA

Generalmente se considera la hipótesis de pequeños desplazamientos y pequeñas deformaciones, asumiendo que la geometría es independiente de las acciones externas (aproximación lineal), sin embargo, esta hipótesis no siempre puede cumplirse.

Para explicar la no linealidad geometría se presenta el análisis de una armadura plana como se presenta en la figura 1.12, en la cual se considera que el material es lineal elástico y se asume que los elementos únicamente trabajarán axialmente despreciando efectos de pandeo por facilidad.

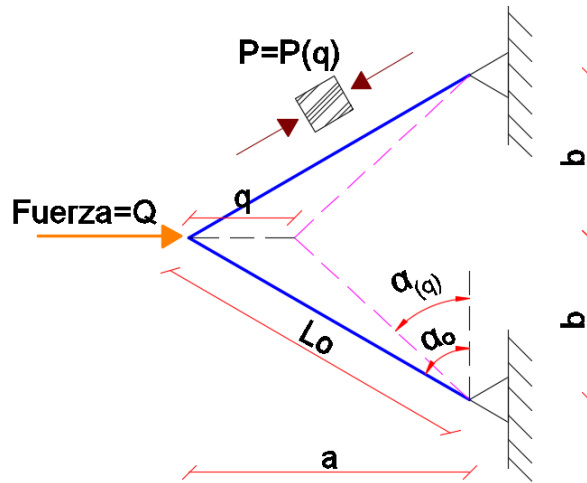


Figura 1.12 Esquema estructural.

1.3.1. Solución lineal: asumiendo pequeños desplazamientos

Al aplicar la fuerza lateral “P” en la dirección indicada en la figura 1.13 entonces la estructura presenta un desplazamiento horizontal “q” y por ende la longitud de las barras cambian en función de la carga P.

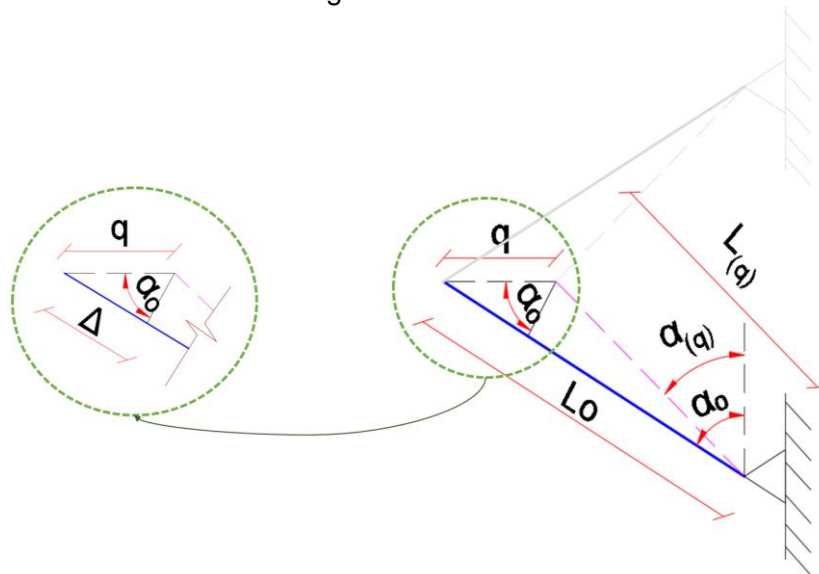


Figura 1.13 Esquema de la estructura deformada.

En base a la figura 1.13 es evidente que la barra presenta un giro, no obstante, con la suposición de pequeños desplazamientos se asume que $\alpha_{(q)} \approx \alpha_0$ y por ello el valor de la deformación axial de la barra es expresada en la ecuación 1.3; además la longitud de la barra bajo la nueva condición de deformación se ilustra en la ecuación 1.4. Las barras presentan un esfuerzo axial (Ec. 5.0), además como el material es elástico lineal entonces el esfuerzo es proporcional al módulo de elasticidad por la deformación unitaria, es decir la ecuación 1.6.

$$\Delta = q \cdot \text{sen}(\alpha_0) \tag{1.3}$$

$$L(q) = L_0 - \Delta \approx L_0 - q \cdot \text{sen}(\alpha_0) \quad (1.4)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.5)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.6)$$

La fuerza de compresión P a la que se encuentra sometida la barra se puede determinar en base a las ecuaciones 1.5 y 1.6, siendo esta fuerza P expresada como se indica en la ecuación 1.7 y a su vez la deformación unitaria en la barra se expresa con la ecuación 1.8.

$$P = E \cdot A \cdot \varepsilon \quad (1.7)$$

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L(q)}{L_0} \approx \frac{L_0 - (L_0 - q \cdot \text{sen}(\alpha_0))}{L_0} \approx q \cdot \frac{\text{sen}(\alpha_0)}{L_0} \quad (1.8)$$

Para el equilibrio se realiza el diagrama de cuerpo libre como se ilustra en la figura 1.14, donde la fuerza Q en función de P se representa en la ecuación 1.9.

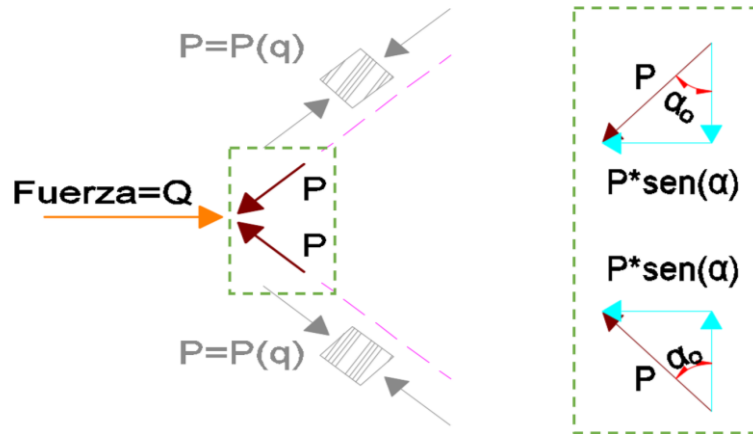


Figura 1.14 Diagrama de cuerpo libre para plantear el equilibrio.

$$Q = 2 \cdot P \cdot \text{sen}(\alpha_0) \quad (1.9)$$

La rigidez permite relacionar los desplazamientos y cargas, como se muestra en la expresión 1.10.

$$Q = K_L \cdot q \quad (1.10)$$

En este caso es posible encontrar la rigidez, siendo la rigidez la acción necesaria para producir un desplazamiento unitario ($q = 1$) entonces la rigidez lateral para esta armadura se presenta en la ecuación 1.11.

$$K_L = \frac{Q}{q} = \frac{Q}{1} = 2 \cdot P \cdot \text{sen}(\alpha_0) \quad (1.11)$$

En la ecuación 1.11, la fuerza P se puede expresar como se presentó en la ecuación 1.7 y a su vez la deformación unitaria se puede remplazar por su equivalente en la ecuación 1.8, recordando que en este caso $q = 1$, la rigidez se presente en la ecuación 1.12.

$$K_L = 2 \cdot E \cdot A \cdot \frac{\text{sen}(\alpha_o)}{L_o} \cdot \text{sen}(\alpha_o) \quad (1.12)$$

Simplificando la expresión 1.12 se tiene la ecuación 1.13, en función de las dimensiones de la estructura sin deformar.

$$K_L = 2 \cdot E \cdot A \cdot \frac{\left(\frac{a}{L_o}\right)^2}{\left(\frac{L_o}{L_o}\right)} = 2 \cdot E \cdot A \cdot \frac{a^2}{L_o^3} \quad (1.13)$$

En este punto se puede hallar los desplazamientos “q” en función de la carga aplicada “Q” y de la rigidez lateral “K_L”, con la ecuación 1.14.

$$q = \frac{K_L}{Q} \quad (1.14)$$

1.3.2. Solución no lineal: grandes desplazamientos

Como ya se mencionó anteriormente al aplicar la fuerza lateral “Q” en la dirección indicada en la figura 1.12 entonces la estructura presenta un desplazamiento horizontal “q” y por ende la longitud de las barras cambian en función de la carga Q. En este caso la nueva longitud de las barras se puede determinar con la ecuación 1.15 y en base a ello cambia la expresión para determinar la deformación unitaria como se ilustra en la ecuación 1.16.

$$L(q) = \sqrt{(a - q)^2 + b^2} \quad (1.15)$$

$$\varepsilon = \frac{L_o - L(q)}{L_o} = 1 - \frac{L(q)}{L_o} = 1 - \sqrt{\frac{(a - q)^2 + b^2}{a^2 + b^2}} \quad (1.16)$$

Es evidente que en este análisis se considera que $\alpha_{(q)} \neq \alpha_o$, entonces la expresión 1.17 se emplea para determinar el valor de $\alpha_{(q)}$ y el valor de seno de este ángulo se muestra en la ecuación 1.18.

$$\alpha_{(q)} = \arcsen\left(\frac{a - q}{L(q)}\right) \quad (1.17)$$

$$\text{sen}(\alpha_{(q)}) = \frac{a - q}{L(q)} \quad (1.18)$$

En este caso la ecuación 1.9 ya no debe hacer referencia al seno del ángulo inicial, sino que el ángulo depende del desplazamiento “q” entonces se tiene la ecuación 1.19 donde se plantea el equilibrio del sistema.

$$Q = 2 \cdot P \cdot \text{sen}(\alpha_{(q)}) = 2 \cdot P \cdot \left(\frac{a - q}{L(q)} \right) \quad (1.19)$$

El valor de P se mantiene como la ecuación 1.7 pero la deformación unitaria hace referencia a lo presentado en la ecuación 1.16, por esta razón la expresión para determinar la rigidez cambia como se muestra en la ecuación 1.20, en este análisis no es un valor constante, sino que dependerá del desplazamiento "q".

$$\begin{aligned} K_{NL}(q) &= \frac{Q}{q} = \frac{2 \cdot P \cdot \left(\frac{a - q}{L(q)} \right)}{q} \\ &= 2 \cdot E \cdot A \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{(a - q)^2 + b^2}{a^2 + b^2}} \right) \cdot \left(\frac{a - q}{\sqrt{(a - q)^2 + b^2}} \right) \cdot \frac{1}{q} \end{aligned} \quad (1.20)$$

La expresión 20.0 se puede simplificar.

$$\begin{aligned} K_{NL} &= 2 \cdot E \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(a - q)^2 + b^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \cdot (a - q) \cdot \frac{1}{q} \\ &= 2 \cdot E \cdot A \cdot \left(\frac{a^2}{(Lo)^3} \cdot \frac{(Lo)^3}{a^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(a - q)^2 + b^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \cdot (a - q) \cdot \frac{1}{q} \\ &= \left(2 \cdot E \cdot A \cdot \frac{a^2}{(Lo)^3} \right) \cdot \frac{(Lo)^3}{a^2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(a - q)^2 + b^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \cdot (a - q) \cdot \frac{1}{q} \end{aligned}$$

En la expresión anterior se puede identificar que el primer factor corresponde a la rigidez del análisis lineal (expresión 1.13) presentado en la sección 1.3.1, además por facilidad se puede presentar la rigidez en función de las dimensiones de la estructura como se indica en la ecuación 1.21.

$$K_{NL}(q) = K_L \cdot \frac{(Lo)^3}{a^2} \cdot \left(\frac{1}{L(q)} - \frac{1}{Lo} \right) \cdot (a - q) \cdot \frac{1}{q} \quad (1.21)$$

En la figura 1.15 se representa la variación de la carga generalizada en función de los desplazamientos generalizados para la estructura, se reporta la representación de las ecuaciones expuestas con el análisis lineal y no lineal, considerando pequeños y grandes desplazamientos respectivamente, además se modela la estructura en OpenSees considerando la propiedad lineal de armaduras (Truss element) y efectos corrotacionales para simular los efectos de grandes desplazamientos (Corotational Truss Element) para comparar las respuestas. En este caso, los resultados de forma analítica versus OpenSees son iguales y se puede ver que la hipótesis de pequeños desplazamientos se cumple en un rango limitado de desplazamiento.

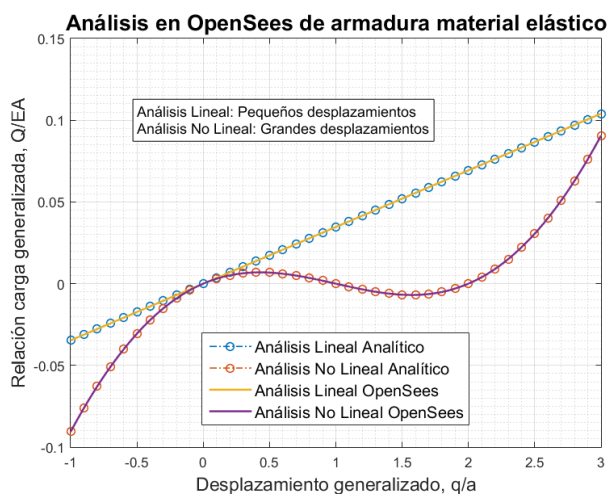


Figura 1.15 Variación de la carga generalizada en función de los desplazamientos generalizados para la estructura.

1.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En las secciones anteriores se mencionó que el propósito de todo análisis estructural es conocer la respuesta de la estructura, estas respuestas pueden ser expresada en términos de desplazamientos, velocidades, aceleraciones, deformaciones o esfuerzos; además se describió las implicaciones del análisis no lineal en función de las propiedades del material y geométrica de la estructura. En este punto es necesario describir el tipo de análisis en base a las solicitaciones, por ejemplo, las cargas en las estructuras pueden ser acciones estáticas o dinámicas en función de su aplicación en el tiempo.

Las acciones estáticas se refieren a cargas cuya variación en e tiempo no producen grandes aceleraciones en el sistema, entonces para fines prácticos se puede despreciar el efecto de las fuerzas inerciales. No obstante, cuando las fuerzas inerciales no puedan ser despreciables debido a que la velocidad de variación de estas acciones genera grandes aceleraciones en el sistema entonces las cargas son consideradas como acciones dinámicas.

El sismo y viento son acciones dinámicas, pero cuando se realiza análisis lineales convencionales, estas acciones pueden ser representadas como un estado límite en el cual se considera de forma simplificada únicamente un escenario de aplicación de cargas, donde estas cargas son hipotéticamente las de mayor magnitud que se pueden presentar y en base a ello se realizar generalmente los diseños de las estructuras.

Lo mencionado anteriormente no es real, pero para fines prácticos en estructuras convencionales puede presentar resultados aceptables; sin embargo, en la actualidad con el potencial computacional que se tiene ya se puede pensar en realizar análisis más complejos que capturen de mejor manera la respuesta de las estructuras en el tiempo y es allí que se presentan análisis dinámicos de estructuras. En la tabla 1.2 se presenta un resumen de los tipos de análisis estructurales en base al comportamiento de la estructura y el tipo de solicitaciones.

Tabla 1.2 Tipos de análisis estructurales.

Acciones	Comportamiento del material y geometría de elementos	
	Lineal	No lineal
Estáticas	Análisis Estático Lineal (Linear Static Analysis, LSA)	Análisis Estático No Lineal (Nonlinear Static Analysis, NLSA)
Dinámicas	Análisis Dinámico Lineal (Linear Dynamic Analysis, LDA)	Análisis Dinámico No Lineal (Nonlinear Dynamic Analysis, NLDA)

Los análisis estáticos lineales no permiten apreciar daños y predecir pérdidas, son simplificados y por ello se ven compensados en muchos casos por mayores factores de seguridad. A medida que los análisis incluyen mayores parámetros, consideraciones de variación de las cargas en el tiempo y efectos de no linealidad, el comportamiento de la estructura puede ser más cercano a la realidad, siempre y cuando los aspectos considerados sean racionales y concebidos con un criterio ingenieril adecuado. Es por ello que las investigaciones actuales se están enfocando cada vez más en consideraciones no lineales, en esta monografía se presenta únicamente el análisis no lineal estático, que si bien no es el análisis más complejo que podría desarrollarse, con estos resultados ya se puede tener una idea del probable comportamiento de la estructura.

1.5 LA TÉCNICA DEL PUSHOVER

La técnica del Pushover se enmarca dentro del análisis estático no lineal. Para su cálculo se resuelve por el método de los desplazamientos, para una determinada rigidez de la estructura que se considera constante en un ciclo de carga determinado; para otro ciclo de carga y de acuerdo a los esfuerzos que se tenga en la estructura, se modifica la matriz de rigidez y se vuelve a resolver estáticamente hasta que la estructura sea estable ante cargas laterales. El procedimiento de cálculo se describe en el documento ASCE/SEI 41-13, sección 7.4.3.

La Técnica del Pushover, también conocida como la Técnica del Empujón se emplea para encontrar la curva de capacidad sísmica ante la aplicación de cargas laterales a la estructura hasta llevarle a un desplazamiento objetivo o se alcance el colapso como se muestra en la figura 1.16, más adelante se detallará los criterios que pueden aplicarse para definir el desplazamiento de colapso.

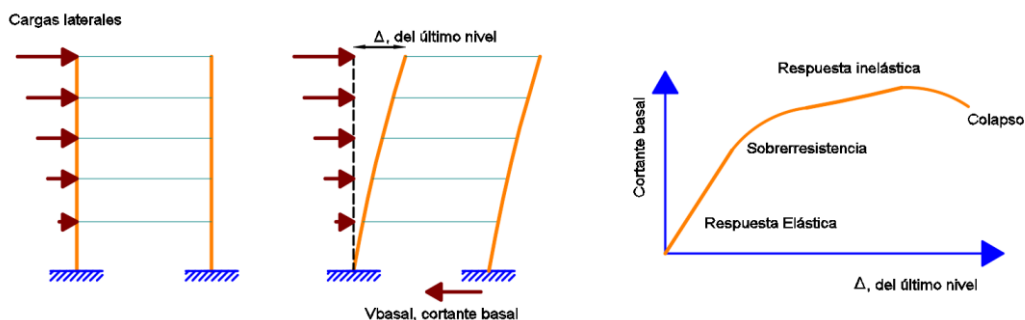
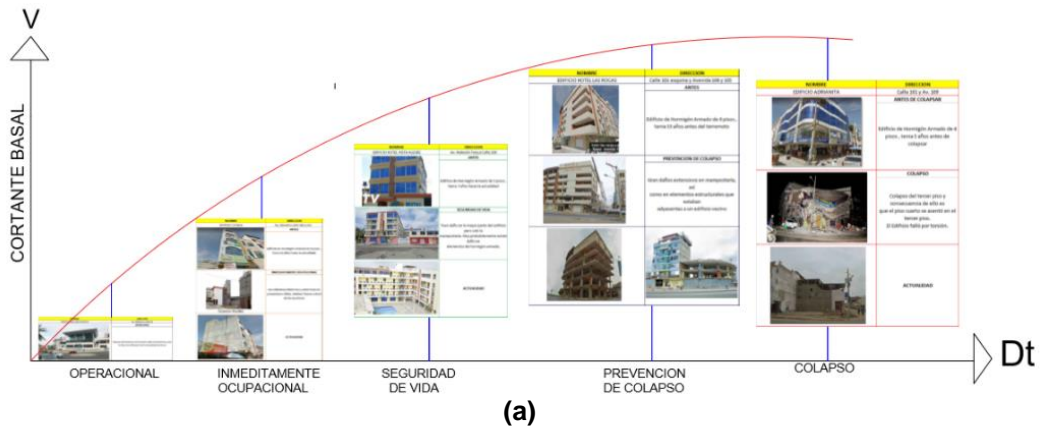


Figura 1.16 Secuencia de análisis Pushover.

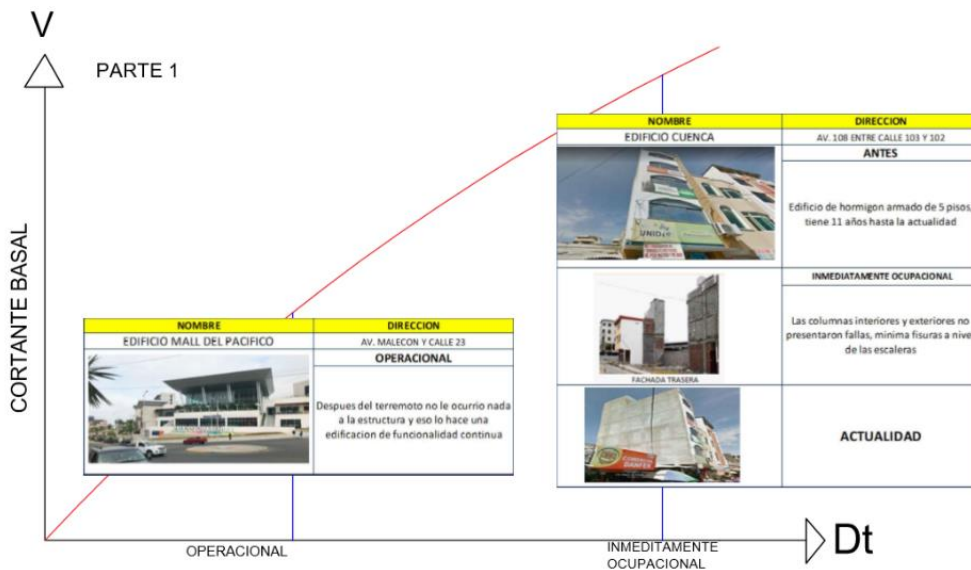
La curva de Desempeño de una estructura es muy importante puesto que se puede entender de forma visual el comportamiento de una estructura ante cargas laterales; en países ubicados en zonas de sismicidad moderada o alta el comportamiento de estructuras ante cargas laterales es muy importante puesto que estas acciones son las principales causantes de los colapsos estructurales.

En la figura 1.17, se presenta, el desempeño que tuvieron algunas estructuras de la ciudad de Manta, durante el terremoto de Pedernales de 2016, (M=7.8). Los niveles de desempeño que se han indicado son los de VISION 2000 (Operacional, Inmediatamente Ocupacional, Seguridad de Vida, Prevención de Colapso y Colapso).

Lo que se pretende indicar es qué, al tener la curva de capacidad sísmica de una estructura, uno puede ingresar a la misma por medio del desplazamiento lateral en el tope del edificio D_t que se espera para un determinado sismo u espectro y tener una idea del probable desempeño, en función del lugar donde se encuentra la estructura.



(a)



(b)

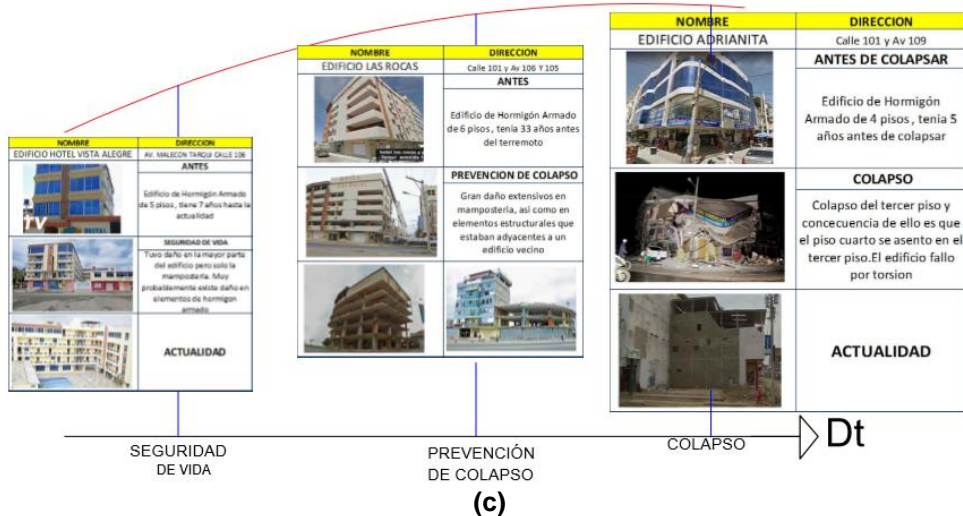


Figura 1.17 a) Desempeño de las estructuras en función del desplazamiento lateral máximo esperado; b) Vista ampliada del desempeño: Operacional e Inmediatamente Ocupacional; c) Desempeño: Seguridad de vida; Prevención de colapso y Colapso.

Otra aplicación que se tiene a partir de la curva de capacidad sísmica de la estructura es definir los factores de reducción del factor de las fuerzas sísmicas por ductilidad R_μ y del factor de sobre resistencia R_s que se indica en la figura 1.18. El factor de reducción de las fuerzas sísmicas R , permite pasar del espectro elástico al inelástico con el cual se realiza el diseño de la estructura de forma tradicional. Un valor alto de R , conducirá a diseñar la estructura con fuerzas sísmicas bajas y por tanto a tener una estructura frágil.

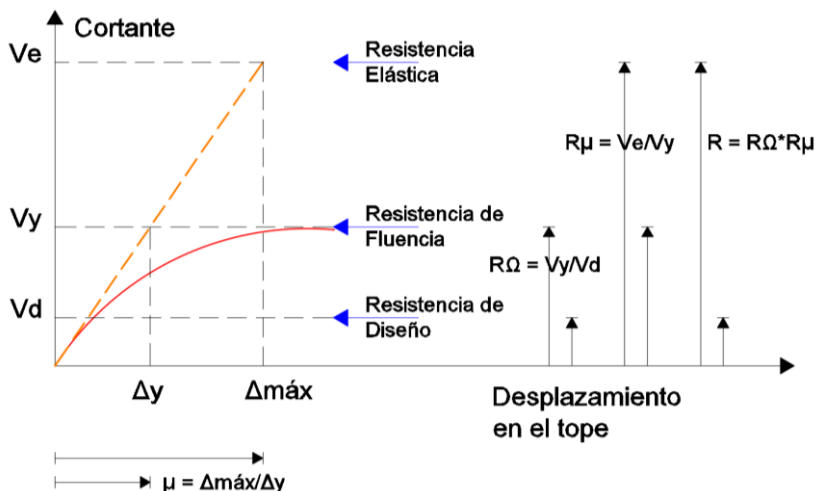


Figura 1.18 Capacidad sísmica resistente de una estructura, encontrada mediante análisis elástico (la rigidez no cambia) y mediante análisis no lineal-elástico (la rigidez cambia) y factores de reducción por ductilidad y sobre resistencia.

Por las razones expuestas interesa mostrar la forma como se obtiene la curva de capacidad sísmica resistente de una estructura aplicando un Pushover monotónico.

Tanto **CEINCI-LAB** como OpenSees pueden generar este análisis (Pushover) de forma directa sin la interacción entre ellos, sin embargo, al acoplar ciertas funciones de **CEINCI-LAB** el ingreso de datos y la presentación de resultados se facilita y el usuario puede enfocarse en entender el comportamiento de la estructura sin la complejidad que puede representar la programación en OpenSees.

1.6 DEFORMACIÓN DEL MATERIAL Y GEOMÉTRICA

En este apartado se analiza la matriz de transformación de coordenadas para dos casos: i) Pequeñas deformaciones, que corresponde al caso del análisis de estructuras ante cargas estáticas; ii) Grandes deformaciones, que puede darse en una estructura que ingresa al rango no lineal. Al primer caso se denomina *deformación del material* y al segundo *deformación geométrica*.

1.6.1 Matriz de paso para Deformación del material

En esta monografía se denomina Sistema 1 (**Q1-q1**) al presentado en la figura 1.19a, otros autores le suelen llamar Sistema base o Sistema Fundamental; en la figura 1.19 b, se muestra el sistema de coordenadas locales del elemento, denominado sistema 2 (**Q2-q2**).

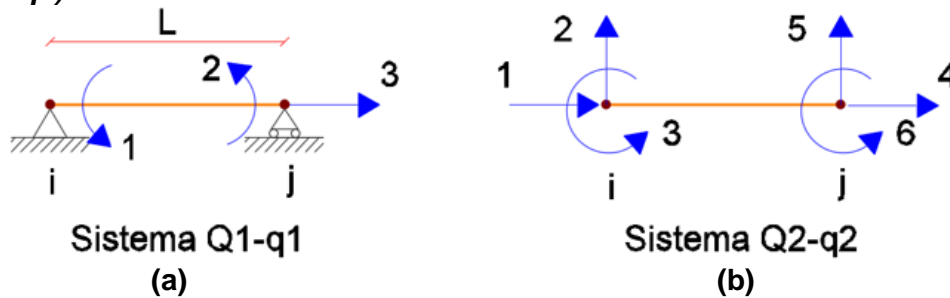


Figura 1.19 a) Sistema 1 o Sistema base; b) Sistema de coordenadas locales o Sistema 2.

En coordenadas locales las deformaciones son axial y transversal al eje del miembro, mientras que en coordenadas globales las deformaciones son horizontal y vertical.

En el Capítulo 5 del libro de Análisis Matricial de Aguiar, 2020, se estudia la matriz de transformación de coordenadas a nivel de elemento y a nivel de la estructura; en el caso de la figura 1.19 se tiene a nivel de elemento y es aplicable el siguiente teorema.

Teorema 1: Si $q = T q^* \rightarrow Q^* = T^t Q$

Se denomina T_{1-2} a la matriz de paso del sistema 1, al sistema 2, indicado en la figura 1.19; esta matriz se obtiene dibujando las deformadas elementales en el sistema 2 y se mide en el sistema 1. Esta matriz resulta:

$$T_{1-2} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & 1 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & -1/L & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Al aplicar el Teorema 1, con la nomenclatura indicada en la figura 1.19, se tiene:

$$Q_2 = T_{1-2}^t Q_1 \quad (1.23)$$

Para una viga horizontal, el sistema de coordenadas locales del elemento es igual al sistema de coordenadas globales, pero para el caso general (elemento inclinado) se tiene lo mostrado en la figura 1.20.

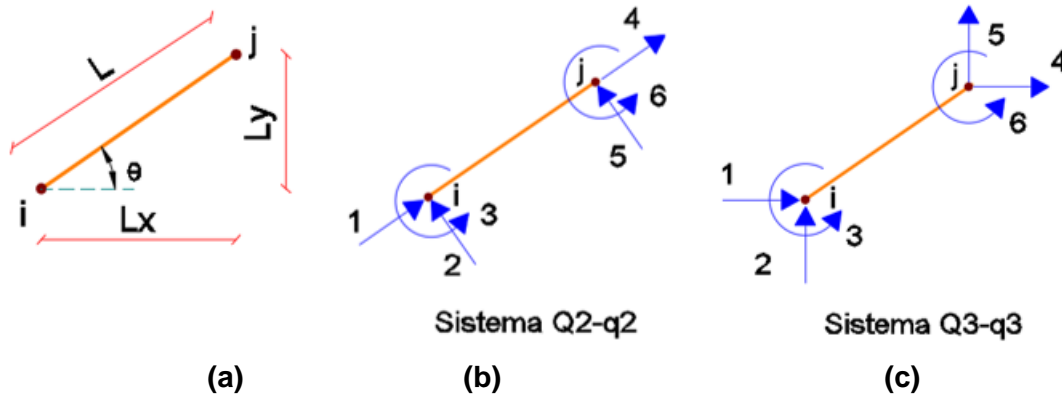


Figura 1.20 a) Nomenclatura de un elemento inclinado; b) Coordenadas Locales o Sistema 2; c) Coordenadas Globales o Sistema 3.

Ahora para pasar del sistema 2 al sistema 3 se requiere de la matriz de paso T_{2-3} conocida también con el nombre de matriz de rotación de coordenadas. Esta matriz que es ortogonal es la siguiente.

$$T_{2-3} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Al aplicar el teorema 1 entre los sistemas de coordenadas locales y globales, se tiene:

$$Q_3 = T_{2-3}^t Q_2 \quad (1.25)$$

$$Q_3 = T_{2-3}^t Q_2$$

$$Q_3 = T_{2-3}^t T_{1-2}^t Q_1$$

$$Q_3 = (T_{1-2} T_{2-3})^t Q_1$$

Sea:

$$T = T_{1-2} T_{2-3} \quad (1.26)$$

$$Q_3 = T^t Q_1 \quad (1.27)$$

En la figura 1.21a, se tiene las fuerzas y momentos en el Sistema 1, y en la figura 1.21b, las fuerzas y momentos en Sistema 3. Desde un punto de vista didáctico habría sido conveniente dibujar al elemento de la figura 1.21a, inclinado, ya que lo que se desea encontrar es como se obtiene Q_3 a partir de Q_1

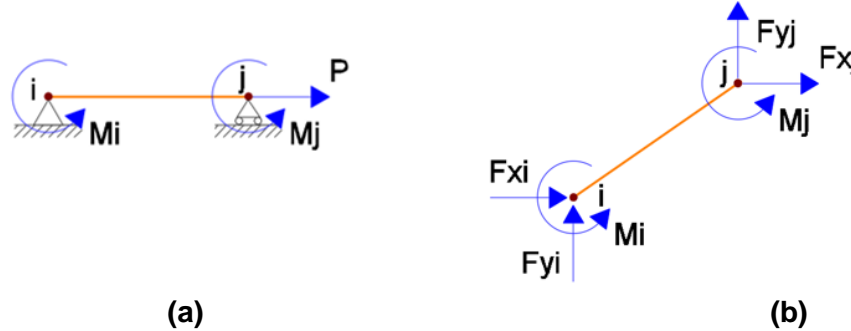


Figura 1.21 a) Fuerzas y momentos en Sistema de Coordenadas 1; b) Fuerzas y momentos en Sistema de coordenadas globales

1.6.1 Matriz de paso para deformación geométrica

En un terremoto, la estructura se deforma demasiado, en este caso es importante tener en cuenta lo que se conoce como deformación geométrica; lo propio se debe considerar este problema cuando se realiza un análisis Pushover.

Para este último caso, para cada incremento de carga se actualiza la ubicación de los nudos de la estructura, de tal forma que la longitud del elemento de la figura 1.21a, ya deja de ser L , y pasa a ser L_0 . Nótese que se cambia la posición de los nudos en función de los desplazamientos horizontal y vertical que se van obteniendo.

Ahora para el sistema base o sistema 1, solo se tiene deformación axial, por la forma del modelo, como se muestra en la figura 1.22a; el modelo no permite desplazamiento vertical y otra cosa para que el elemento se alargue la deformación axial en el nudo final Δy_j debe ser mayor que la deformación Δy_i , en este caso $L_0 > L$. Si $\Delta y_j < \Delta y_i$, el valor $L_0 < L$

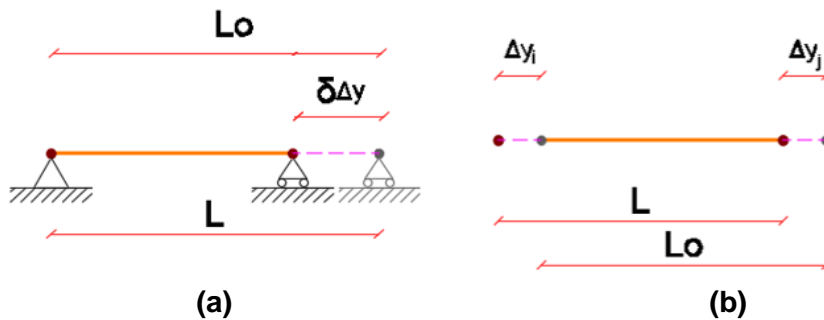


Figura 1.22 a) Deformación axial en Sistema 1; b) Deformación Axial en Sistema 2.

La matriz de paso del sistema 1 al sistema 2, resulta:

$$T_{1-2} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L_0 & 1 & 0 & -1/L_0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 & 0 & -1/L_0 & 1 \\ -1 & \delta\Delta y/L & 0 & 1 & -\delta\Delta y/L & 0 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

$$\delta\Delta y = \Delta y_j - \Delta y_i \quad (1.29)$$

Las matrices de paso indicadas sirven para calcular la matriz de rigidez de los elementos en coordenadas locales (con matriz T_{1-2}) y en coordenadas globales (con matriz T_{2-3})

1.7 TRANSFORMACIONES GEOMÉTRICAS

Es interesante verificar la influencia de la no linealidad geométrica en análisis Pushover; en la figura 1.23b se muestra la curva de capacidad de la estructura presentada en la figura 1.23a con diferentes consideraciones de transformaciones geométricas para los elementos. En este punto se debe destacar que un solo ejemplo no es suficiente para emitir conclusiones generales, pero particularmente en este caso se puede decir que la transformación geométrica lineal no es conservadora y que para columnas la transformación geométrica PDelta presenta valores de resistencia menores a los otros análisis. Este ejemplo corresponde al presentado en Cagua *et al.* (2020) modificando la transformación geométrica de los elementos.

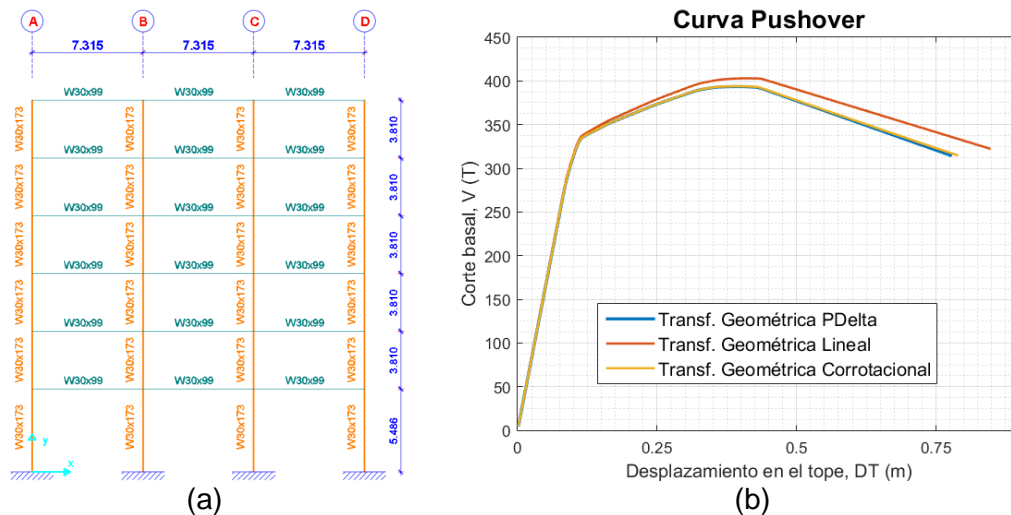


Figura 1.23 a) Esquema estructural. b) Curva del análisis Pushover monotónico.

Durante la definición de los elementos vigas, columnas y diagonales de acero es necesario definir el tipo de transformación de los parámetros estructurales de rigidez y fuerzas resultantes. Las transformaciones geométricas se emplean para pasar del sistema de coordenadas fundamentales a un único sistema de coordenadas globales como se puede visualizar en la figura 1.24.

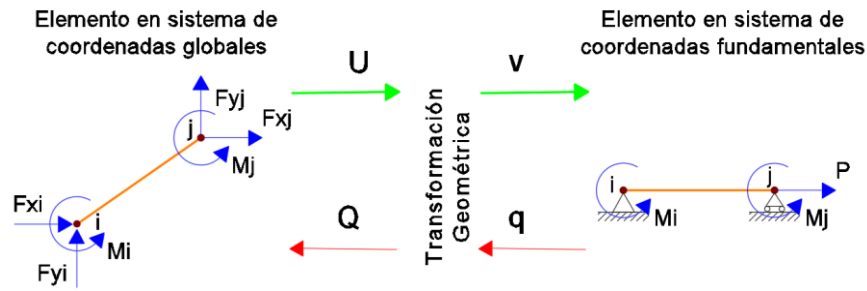


Figura 1.24 Cambio de sistemas de coordenadas mediante transformación geométrica.
Fuente: Cagua *et al.* (2020)

Para explicar las transformaciones geométricas se emplea el vector de fuerzas de un sistema global denominado Q_{global} , relacionado con el vector de fuerzas de un sistema fundamental $Q_{fundamental}$.

$$Q_{fundamental}^T = [P \ M_i \ M_j] \tag{1.22}$$

$$Q_{global}^T = [F_{xi} \ F_{yi} \ M_i \ F_{xj} \ F_{yj} \ M_j] \tag{1.23}$$

La matriz de transformación T , que relaciona los vectores de fuerzas se puede separar en dos transformaciones, una que realiza la transformación de coordenadas fundamentales a locales y otra que realiza la transformación de coordenadas locales a globales.

$$Q_{global} = T^T \cdot Q_{fundamental} \tag{1.24}$$

$$T = T_{a \ local} \cdot T_{a \ global} \tag{1.25}$$

En el trabajo de Denavit y Hajjar (2013), se estudia el tema de las transformaciones geométricas, en el mismo se presenta las matrices de transformación corrotacional al sistema de coordenadas global y local (matrices 1.26 y 1.27), donde los parámetros β y L corresponden al ángulo y la longitud de la barra como se muestra en la figura 1.25, los cuales con la transformación corrotacional varían en cada paso del análisis mientras que al emplear transformación geométrica lineal estos valores son los iniciales β_0 y L_0 (matrices 1.28 y 1.29).

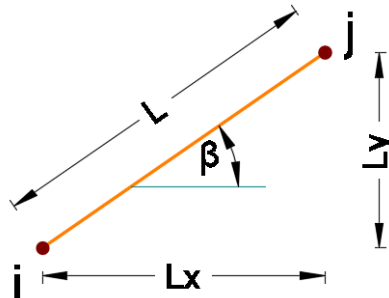


Figura 1.25 Geometría de un elemento tipo barra.

$$T_{a\ global} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \text{sen}(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta) & \text{sen}(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

$$T_{a\ local} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & 1 & 0 & -1/L & 0 \\ 0 & 1/L & 0 & 0 & 1/L & 1 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$T_{a\ global} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

$$T_{a\ local} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 1 & 0 & -1/L_0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 & 0 & 1/L_0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Las matrices de transformación P-Delta presentan la forma expuesta en 1.31 y 1.32, donde el término $\delta\Delta_y$ es la diferencia entre el desplazamiento transversal de los nudos, en el sistema local de coordenadas como se indica en la siguiente expresión.

$$\delta\Delta_y = \Delta_{y,nodo\ i} - \Delta_{y,nodo\ j} \quad (1.30)$$

$$T_{a\ global} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta_0) & \text{sen}(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

$$T_{a\ local} = \begin{bmatrix} -1 & \delta\Delta_y/L_0 & 0 & 1 & -\delta\Delta_y/L_0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 1 & 0 & -1/L_0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 & 0 & 1/L_0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Matemáticamente la matriz de transformación lineal es constante, por lo tanto, se calcula únicamente al inicio del análisis con base a la geometría original de los elementos, es decir sin deformar. El cálculo de la matriz de transformación P-Delta requiere de un esfuerzo computacional adicional ya que también depende de los desplazamientos de los nudos del elemento, en cada paso del análisis, y más aún la matriz de transformación corrotacional, que debe ser calculada en cada paso del análisis en base a la geometría del elemento en dicho instante. En la tesis de Del Rincón (2017), se menciona que “la transformación corrotacional toma en cuenta los cambios de longitud y posición del elemento en cada paso mientras que la transformación p-delta asume la teoría de los pequeños desplazamientos”.

OpenSees cuenta con estos tres métodos para realizar la transformación geométrica de los elementos, es decir: lineal, P-Delta y corrotacional.

En los modelos de las estructuras presentadas en esta monografía, debido a que el análisis es un Pushover monotónico y para optimizar el esfuerzo computacional se emplea la transformación geométrica lineal para vigas, asumiendo piso rígido (mismo desplazamiento horizontal en los nudos de las vigas); P-Delta para columnas porque básicamente se tiene desplazamientos laterales y la transformación geométrica corrotacional, en los elementos diagonales de acero, ya que las deformaciones son mayores y el cambio de su longitud es importante de considerar.

2. PUSHOVER BÁSICO CON CEINCI-LAB

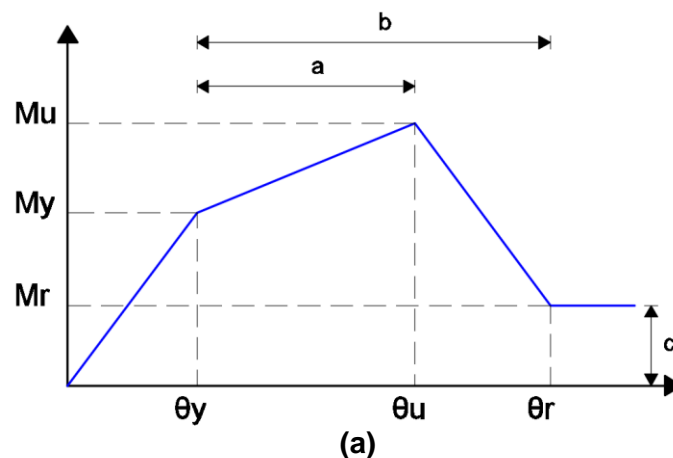
Lo que interesa en el presente Capítulo es mostrar la forma como se obtiene la curva de capacidad sísmica resistente de una estructura aplicando un Pushover monotónico y empleando el modelo de plasticidad concentrada de Giberson.

2.1 DIAGRAMAS MOMENTO CURVATURA O MOMENTO ROTACIÓN

Para encontrar la rigidez a flexión de las secciones de un elemento estructural, se necesita conocer el diagrama momento curvatura, $M - \phi$, o el diagrama momento rotación $M - \theta$. Para encontrar estos diagramas, se tienen varias formas de hacerlo, talvez la más empleada sea el método de las fibras o de las dovelas, que consiste en dividir a la sección transversal en una gran cantidad de dovelas y calcular para cada una de ellas, las deformaciones y fuerzas que en ellas se crean.

En este apartado se presenta, el modelo de cálculo del ASCE/SEI 41, en el cual, el usuario debe determinar el momento de fluencia M_y , y la curvatura de fluencia ϕ_y , o la rotación de fluencia θ_y y a partir de estos valores, el modelo le reporta valores de las variables a, b, c , que se indican en la figura 2.1a.

En el caso de una viga, el punto de fluencia se alcanza cuando la armadura a tracción llega al punto de fluencia, definido por el esfuerzo de fluencia f_y y por la deformación de fluencia ϵ_y en la figura 2.1 b. Por otra parte, el punto último se alcanza cuando el hormigón llega a su deformación máxima útil ϵ_u (caso más común) o cuando el acero a tracción llega a la rotura (valor de ϵ_{su}) o cuando la armadura longitudinal pandea.



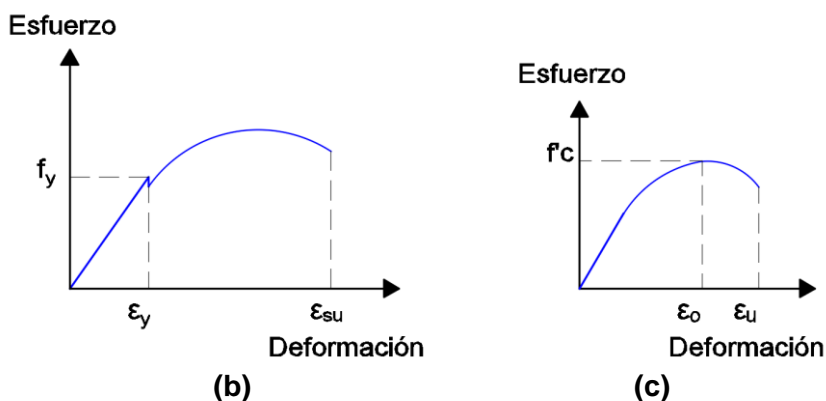


Figura 2.1 a) Modelo del ASCE/SEI 41 del diagrama momento rotación; b) Curva constitutiva del acero; c) Curva constitutiva del hormigón no confinado.

El momento residual M_r , no consideran los autores de esta monografía, para el cálculo de la capacidad sísmica de una estructura, debido a que el hormigón se encuentra sumamente dañado, pero es importante conocer que existe esta reserva de momento.

2.1.1 Punto de Fluencia para elementos de hormigón armado

En este apartado, se presenta el formulario de Park (1985) que tiene un respaldo analítico y experimental, para hallar el punto de fluencia, para vigas y columnas. Se destaca que la ubicación del eje neutro para vigas doblemente armadas se lo realiza aplicando compatibilidad de deformaciones y equilibrio, de tal manera que son conceptos generales.

En la figura 2.2 a, se presenta la nomenclatura para una viga doblemente armada que ayuda a entender las ecuaciones de cálculo que se indican a continuación.

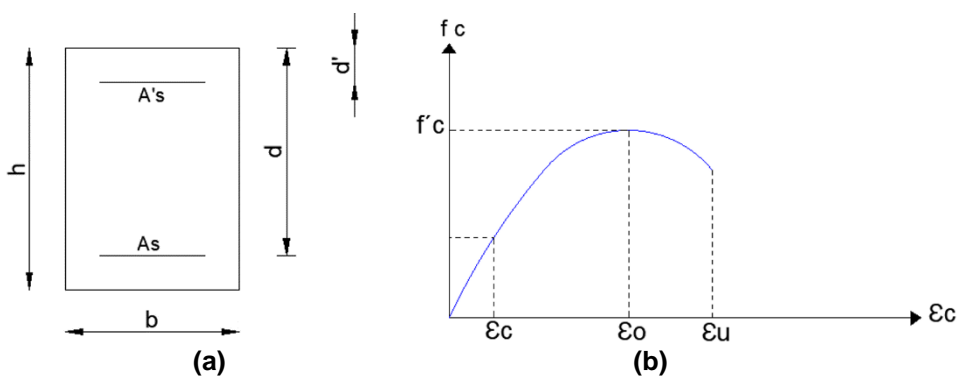


Figura 2.2 a) Sección transversal de una viga doblemente armada y nomenclatura; b) Deformación del hormigón ϵ_c , para vigas bien diseñadas este punto se encuentra debajo de la deformación ϵ_o

$$\beta_c = \frac{d'}{d}$$

$$p_t = \frac{A_s * f_y}{b * d * f'c} \quad (2.1)$$

$$p_t' = \frac{A_s' * f_y}{b * d * f'c} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad \varepsilon_o \approx 0.002 \quad \alpha_y = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_o}$$

$$k = \sqrt{\frac{(p_t + p_t')^2}{4\alpha_y^2} + \frac{(p_t + \beta_c * p_t')}{\alpha_y}} - \frac{(p_t + p_t')}{2\alpha_y} \quad (2.3)$$

$$C_1 = 1.05 \text{ si } p_t' \neq 0; \text{ caso contrario } C_1 = 1 + 1.9 * p_t'^{2.4}$$

$$C_2 = 1 + \frac{0.45}{0.84 + 2p_t' - p_t} = 1.4748$$

$$\eta_o = \frac{P_o}{b * d * f'c}$$

$$\phi_y = \left[C_1 + (C_2 - C_1) * \frac{\eta_o}{0.3} \right] * \frac{\varepsilon_y}{(1 - k) * d} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_c = \phi_y * d - \varepsilon_y \leq \varepsilon_u$$

$$\eta = \frac{0.75}{1 + \alpha_y} * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^{0.7}$$

$$\alpha_c = (1 - \beta_c) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_y} - \beta_c \leq 1$$

$$M_y = 0.5 * f'c * b * d^2 * [(1 + \beta_c - \eta)\eta_o + (2 - \eta) * p_t + (\eta - 2\beta_c) * \alpha_c * p_t'] \quad (2.5)$$

Donde: b, h, d, d' , son la base, altura, altura efectiva y distancia desde el eje de la armadura a compresión al borde; A_s, A_s' , corresponden a la sección transversal de la armadura a tracción y compresión, respectivamente (ver figura 2.2a). En la figura 2.2 b, se presenta la curva constitutiva del hormigón sin confinamiento. La deformación $\varepsilon_o \approx 0.002$, mientras que $\varepsilon_u = 0.003$, para diseño y $\varepsilon_u = 0.004$, para análisis. En esta gráfica se indica la probable deformación del hormigón (en una viga bien diseñada) para el punto de fluencia, es menor que ε_o

La curvatura de fluencia ϕ_y , se determina con la ecuación (2.4) y el momento de fluencia con la ecuación (2.5). La deducción de la rotación de fluencia θ_y , de acuerdo al ASCE/SEI 41, es tratada en el Capítulo 7 del libro de Aguiar (2020), llegando a la siguiente expresión.

$$\theta_y = \frac{L * M_y}{6 * E_h * I} \quad (2.6)$$

Donde L , es la longitud del elemento; M_y es el momento de fluencia; E_h es el módulo de elasticidad del hormigón; I es el momento de inercia, de la sección transversal.

2.1.2 Valores del ASCE/SEI para hallar punto U y residual en vigas

En la tabla 2.1, se presenta los valores de las variables a, b, c , que definen el diagrama momento rotación de acuerdo a lo indicado en la figura 2.1 a. Para ingresar a esta tabla se debe determinar en primer lugar la relación de cuantías de acero:

$$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$$

Tabla 2.1 Valores de a, b, c , para el cálculo del punto último U y del residual R, de una viga, Fuente: ASCE/SEI 41 de 2011.

i) Vigas controladas por flexión			a	b	c
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Refuerzo Transversal	$\frac{V(\text{pound})}{b_w(\text{in})d(\text{in})\sqrt{f'_c(\text{psi})}}$			
≤ 0.0	Confinado	≤ 3	0.025	0.05	0.2
≤ 0.0	Confinado	≥ 6	0.02	0.04	0.2
≥ 0.5	Confinado	≤ 3	0.02	0.04	0.2
≥ 0.5	Confinado	≥ 6	0.015	0.02	0.2
≤ 0.0	No Confinado	≤ 3	0.02	0.03	0.2
≤ 0.0	No Confinado	≥ 6	0.01	0.015	0.2
≥ 0.5	No Confinado	≤ 3	0.01	0.015	0.2
≥ 0.5	No Confinado	≥ 6	0.005	0.01	0.2
ii) Vigas controladas por corte					
Espaciamiento de estribos $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.2
Espaciamiento de estribos $> d/2$			0.0030	0.01	0.2

$$\rho = \frac{A_s}{b * d}$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{b * d}$$

$$\rho_b = \frac{0.85 * f'_c}{f} * \beta_1 * \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right)$$

La variable, todavía no definida es β_1 que vale 0.85 para hormigones con $f'_c \leq 280 \text{ kg/cm}^2$. Para hormigones con resistencia a la compresión mayores a 280 kg/cm^2 el valor de β_1 se halla con la siguiente ecuación: $1.05 - f'_c/1400$; el valor mínimo de esta expresión es 0.65.

Ahora se debe ver si la sección es confinada o no. Para que una sección sea confinada, debe cumplir que:

$$s \leq \frac{d}{3} \qquad V_s > \frac{3}{4} V \qquad V_s = \frac{A_{sv} f_{yv} d}{s}$$

Donde: s es el espaciamiento del refuerzo transversal; V_s , es el cortante que resiste el acero transversal; V es el cortante actuante en el elemento (demanda); A_{sv} es el área de la sección transversal del refuerzo transversal; f_{yv} es el esfuerzo de fluencia del acero del refuerzo transversal. Finalmente, se debe calcular la relación:

$$\frac{V(\text{pound})}{b(\text{in}) d(\text{in}) \sqrt{f'_c (\text{psi})}}$$

Cuando el cortante V se trabaja en Ton, las dimensiones de la viga en metros y la resistencia del hormigón en Ton/m^2 se debe multiplicar por 1.1926 para tener en pound/in y poder ingresar a la tabla 2.1.

Una vez que se ha identificado la fila en la cual se hallan los valores a, b, c , se procede de la siguiente forma:

$$\theta_u = \theta_y + a$$

$$\theta_r = \theta_y + b$$

$$M_r = c * M_y$$

2.1.3. Longitud plástica y curvaturas

De la resistencia de materiales, se recuerda que la rotación θ es la derivada de la ordenada de la elástica $v(x)$, y la curvatura, ϕ es la derivada de la rotación.

$$\theta(x) = \frac{d v(x)}{dx} \qquad \phi(x) = \frac{d \theta(x)}{dx} = \frac{d^2 v(x)}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

Ahora bien, de acuerdo al apartado anterior se tiene definido el diagrama momento-rotación, para el modelo de la figura 2.1 a. Para encontrar las curvaturas a partir de las rotaciones se procede como sigue.

$$\phi_u = \phi_y + \frac{\theta_u}{L_p} \qquad (2.7)$$

$$\phi_r = \phi_y + \frac{\theta_r}{L_p} \quad (2.8)$$

Donde L_p es la longitud plástica. A continuación, se presenta un modelo para calcular la longitud plástica o longitud dañada, durante un terremoto.

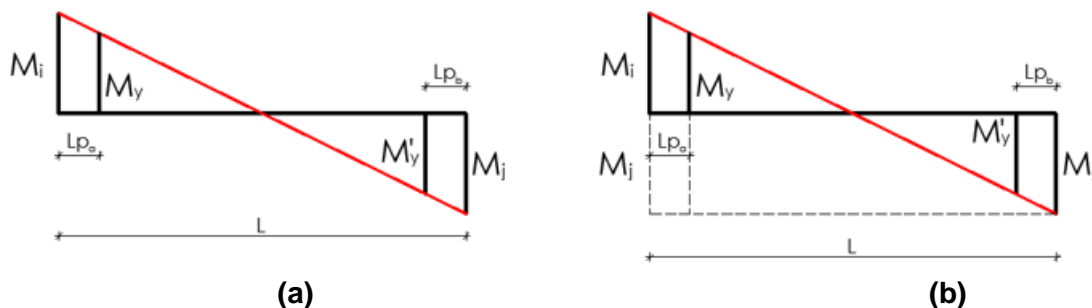


Figura 2.3 a) Diagrama momento curvatura de una viga, con momentos en los extremos M_i, M_j , que son mayores a los de fluencia; b) Diagrama que se requiere para deducir la longitud con daño denominada longitud plástica.

En un instante de tiempo, durante un terremoto, en una viga se tiene en los extremos momentos M_i, M_j , que son mayores que los momentos de fluencia M_y, M'_y (ver figura 2.3 a) de tal manera que se tiene una longitud de daño en el nudo inicial L_{pa} , y en el nudo final L_{pb} .

Para calcular las longitudes plásticas L_{pa}, L_{pb} , se traza con líneas entrecortadas la magnitud de momento M_j (ver figura 2.3 b). Ahora por triángulos semejantes se tiene:

$$\frac{M_i + M_j}{L} = \frac{M_y + M_j}{L - L_{pa}}$$

Al despejar se tiene:

$$L_{pa} = \left(\frac{M_i - M_y}{M_i + M_j} \right) L$$

Al proceder en forma similar en el nudo final, se halla

$$L_{pb} = \left(\frac{M_j - M'_y}{M_i + M_j} \right) L$$

• EJEMPLO 1

En la figura 2.4, se tiene una viga de 4 m, de longitud, de 20/30 cm, de hormigón armado con una armadura base de $2 \phi 14 \text{ mm}$, en la parte inferior y superior. Adicionalmente en los extremos se tiene un refuerzo negativo de $1 \phi 14 \text{ mm}$. Se ha colocado estribos de 10 mm, de diámetro espaciados cada 10 cm, en los extremos y cada 20 cm, en el centro de luz. El límite de fluencia del acero $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$; el

hormigón tiene una resistencia a la compresión de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. El módulo de elasticidad del acero se calcula con $E_c = 15100 \sqrt{f'_c} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$. El recubrimiento del hormigón es 6 cm. Se pide, encontrar los diagramas momento-rotación y momento curvatura; empleando el formulario de Park (1985) para encontrar el momento de fluencia M_y , y curvatura de fluencia ϕ_y . La rotación de fluencia hallar con la ecuación del ASCE 16; el diagrama momento rotación hallar con ASCE/SEI 41 y encontrar el diagrama momento curvatura. Para los dos casos, que se indican a continuación considerar que al inicio de cálculo $M_i = M_j = 0$, con lo cual la longitud de la rótula plástica es cero. Considerar además $V = 0$.

- i) Encontrar la relación momento curvatura en el nudo inicial considerando $A_s = 4.6181 \text{ cm}^2$ (3 \emptyset 14 mm) y $A'_s = 3.078 \text{ cm}^2$ (2 \emptyset 14 mm). Detallar el cálculo del momento y curvatura de fluencia; el cálculo de los coeficientes a, b, c , de la Tabla 2.1.
- ii) Encontrar la relación momento curvatura en el centro de luz, con $A_s = A'_s = 3.078 \text{ cm}^2$ (2 \emptyset 14 mm)

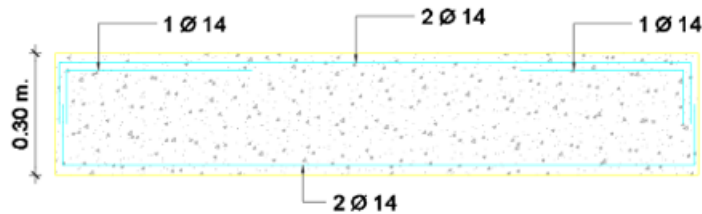


Figura 2.4 Armadura longitudinal de viga de sección constante de 20/30 cm, con estribos de 8 mm, de diámetro espaciados a 10 y 20 cm, en extremos y centro de luz.

• SOLUCIÓN

i) Cálculo en los extremos de la viga

• Cálculo de M_y, ϕ_y

$$\beta_c = \frac{d'}{d} = \frac{6}{24} = 0.25$$

$$p_t = \frac{A_s * f_y}{b * d * f'_c} = \frac{4.6181 * 4200}{20 * 24 * 240} = 0.1684$$

$$p'_t = \frac{A'_s * f_y}{b * d * f'_c} = \frac{3.078 * 4200}{20 * 24 * 240} = 0.1122$$

$$\alpha_y = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_o} = \frac{0.002}{0.0021} = 0.9524$$

$$k = \sqrt{\frac{(p_t + p'_t)^2}{4\alpha_y^2} + \frac{(p_t + \beta_c * p'_t)}{\alpha_y} - \frac{(p_t + p'_t)}{2\alpha_y}}$$

$$k = \sqrt{\frac{(0.1684 + 0.1122)^2}{4(0.9524)^2} + \frac{(0.1684 + 0.25 * 0.1122)}{0.9524} - \frac{(0.1684 + 0.1122)}{2(0.9524)}} = 0.3301$$

$$C_1 = 1.05$$

$$C_2 = 1 + \frac{0.45}{0.84 + 2p'_t - p_t} = 1 + \frac{0.45}{0.84 + 2(0.1122) - 0.1684} = 1.50223$$

$$\eta_o = \frac{P_o}{b * d * f'_c} = 0 \text{ porque es una viga}$$

$$\varepsilon_Y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{4200}{2100000} = 0.002$$

$$\phi_Y = \left[C_1 + (C_2 - C_1) * \frac{\eta_o}{0.3} \right] * \frac{\varepsilon_Y}{(1-k)*d} = \left[1.05 + (1.50223 - 1.05) * \frac{0}{0.3} \right] * \frac{0.002}{(1-0.3301)*24} = 0.000131$$

$$\varepsilon_c = \phi_Y * d - \varepsilon_Y = 0.000131 * 24 - 0.002 = 0.0011 \leq \varepsilon_U$$

$$\alpha_c = (1 - \beta_c) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_y} - \beta_c = (1 - 0.25) \frac{0.0011}{0.002} - 0.25 = 0.1756 \leq 1$$

$$\eta = \frac{0.75}{1 + \alpha_y} * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^{0.7} = \frac{0.75}{1 + 0.9524} * \left(\frac{0.0011}{0.0021} \right)^{0.7} = 0.2497$$

$$M_Y = 0.5 * f'_c * b * d^2 * [(1 + \beta_c - \eta)\eta_o + (2 - \eta) * p_t + (\eta - 2\beta_c) * \alpha_c * p'_t]$$

$$= 0.5 * 240 * 20 * 24^2 * [(1 + 0.25 - 0.2497) * 0 + (2 - 0.2497) * 0.1684 + (0.2497 - 2 * 0.25) * 0.1756 * 0.1122] = 4.0057 \text{ T.m}$$

$$M_Y = 4.0057 \text{ T.m}; \quad \phi_Y = 0.0122 \text{ 1/m}$$

- **Cálculo de coeficientes a, b, c de ASCE/SEI**

$$\rho = \frac{A_s}{b * d} = \frac{4.618}{20 * 24} = 0.0096$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{b * d} = \frac{3.078}{20 * 24} = 0.0064$$

$$\rho_b = \frac{0.85 * f'_c}{f_y} * \beta_1 * \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85 * 240}{4200} * 0.85 * \left(\frac{6120}{6120 + 4200} \right) = 0.0245$$

$$rp = \frac{\rho - \rho'}{\rho_b} = \frac{0.0096 - 0.0064}{0.0245} = 0.1310$$

La sección no es confinada, ya que el espaciamiento $s = 10 \text{ cm}$, que es mayor a $\frac{d}{3} = \frac{24}{3} = 8 \text{ cm}$.

Para estas condiciones de la tabla del ASCE/SEI se tiene:

- 1) Para $rp = 0$; Sección No confinada; $V = 0$. Los valores son: $a = 0.02$; $b = 0.03$; $c = 0.2$
- 2) Para $rp = 0.5$; Sección No confinada; $V = 0$. Los valores son: $a = 0.01$; $b = 0.015$; $c = 0.2$

Al interpolar para $rp = 0.1310$, se halla: $a = 0.01378$; $b = 0.02607$; $c = 0.2$

$$I = \frac{b h^3}{12} + \left(\frac{\pi * diam^2}{4} * 5 \right) = \frac{20 * 30^3}{12} + \left(\frac{\pi * 1.4^2}{4} * 5 \right) = 45007.70 \text{ cm}^4$$

$$= 0.000450077 \text{ m}^4$$

$$\theta_y = \frac{L M_y}{6 E_c * I} = \frac{4 * 4.0057}{6 * 2339281.94 * 0.000450077} = 0.0025 \text{ rad}$$

$$\theta_u = \theta_y + a = 0.0163 \text{ rad}$$

$$M_u = M_y + 0.05 * E_c * I * (\theta_u - \theta_y)$$

$$M_u = 4.0057 + 0.05 * 2339281.94 * 0.000450077 * (0.0163 - 0.0122) = 4.7310 \text{ T m}$$

Se ha considerado que la pendiente para el tramo de post fluencia es igual a 0.05.

$$\theta_r = \theta_y + b = 0.0025 + 0.02607 = 0.0286 \text{ rad}$$

$$M_r = c * M_y = 0.2 * 4.0057 = 0.8011 \text{ T m}$$

• Curvaturas

Como $L_p = 0$, no se puede utilizar las ecuaciones 2.7 y 2.8 Por lo que ϕ_u se calcula en base a los valores de ϕ_y, M_y, M_u y la pendiente post fluencia de $0.05 * E_c * I$

$$\phi_u = \phi_y + \frac{M_u - M_y}{0.05 * E_c * I} = 0.0025 + \frac{4.7310 - 4.0057}{0.05 * 2339281.94 * 0.000450077} = 0.0163 \frac{1}{m}$$

$$\phi_r = \phi_u * 1.0955 = 0.0163 * 1.0955 = 0.0179 \frac{1}{m}$$

Para calcular ϕ_r , se mayoró ϕ_u en la cantidad indicada. Todo esto por que $L_p = 0$. Se está iniciando el análisis y no se consideró daño en la viga; cuando ya exista daño se usará la ecuación 2.8. Finalmente, en la figura 2.5, se presenta en la parte superior el diagrama momento-rotación y en la parte inferior el diagrama momento-curvatura.

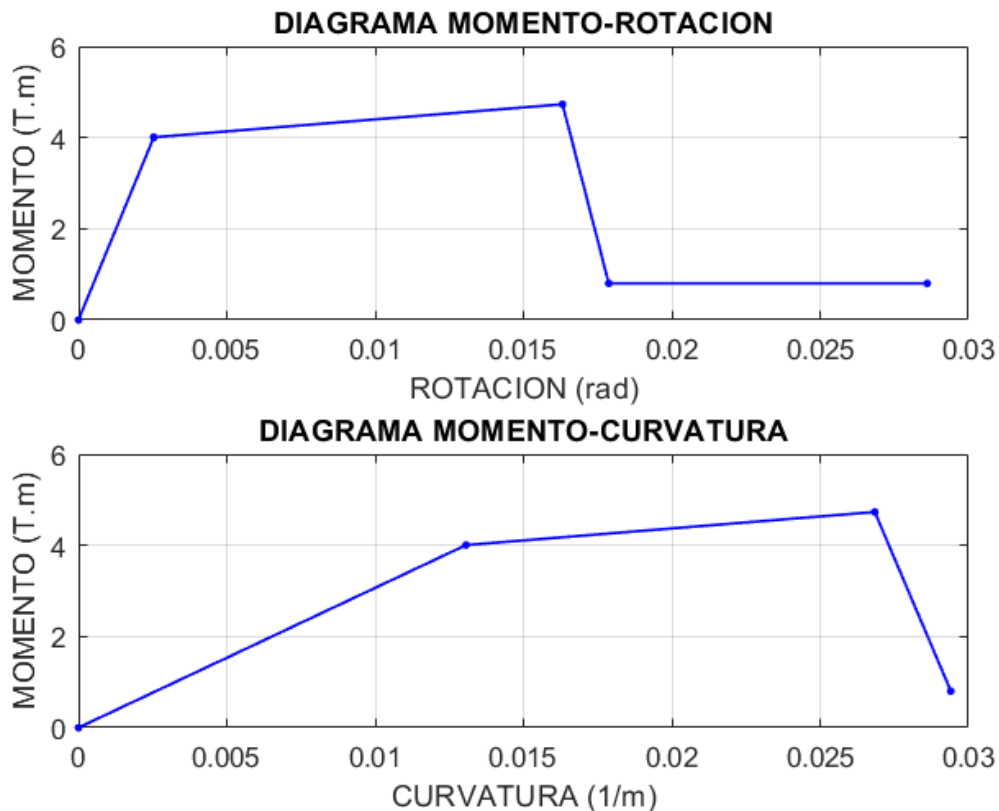


Figura 2.5 En la parte superior, el diagrama momento rotación y en la parte inferior el diagrama momento curvatura de viga en el extremo.

ii) Cálculo en el Centro de Luz

En el centro de luz el espaciamiento de los estribos $s = 20 \text{ cm}$. Luego $s > d/2$. Por lo tanto, la falla se va a dar por corte; luego los coeficientes (ver tabla 2.1) son:

$$a = 0.003 \quad b = 0.010 \quad c = 0.2$$

Los valores del diagrama momento-rotación son:

$$M_y = 2.7218 \text{ Tm} \quad \theta_y = 0.0017 \text{ r} \quad M_u = 2.8797 \text{ Tm} \quad \theta_u = 0.0047 \text{ r} \\ M_r = 0.5444 \text{ Tm} \quad \theta_r = 0.0117 \text{ r}$$

Los valores del diagrama momento-curvatura son:

$$M_y = 2.72 \text{ Tm} \quad \phi_y = 0.0122 \frac{1}{m} \quad M_u = 2.8797 \text{ Tm} \quad \phi_u = 0.0152 \frac{1}{m}$$

$$M_r = 0.54 Tm \quad \phi_r = 0.0167 \frac{1}{m}$$

En la figura 2.6, se presenta los diagramas: momento-rotación y momento-curvatura, para el centro de luz de la viga mostrada en la figura 2.4; que va a fallar primero por corte, en lugar de flexión.

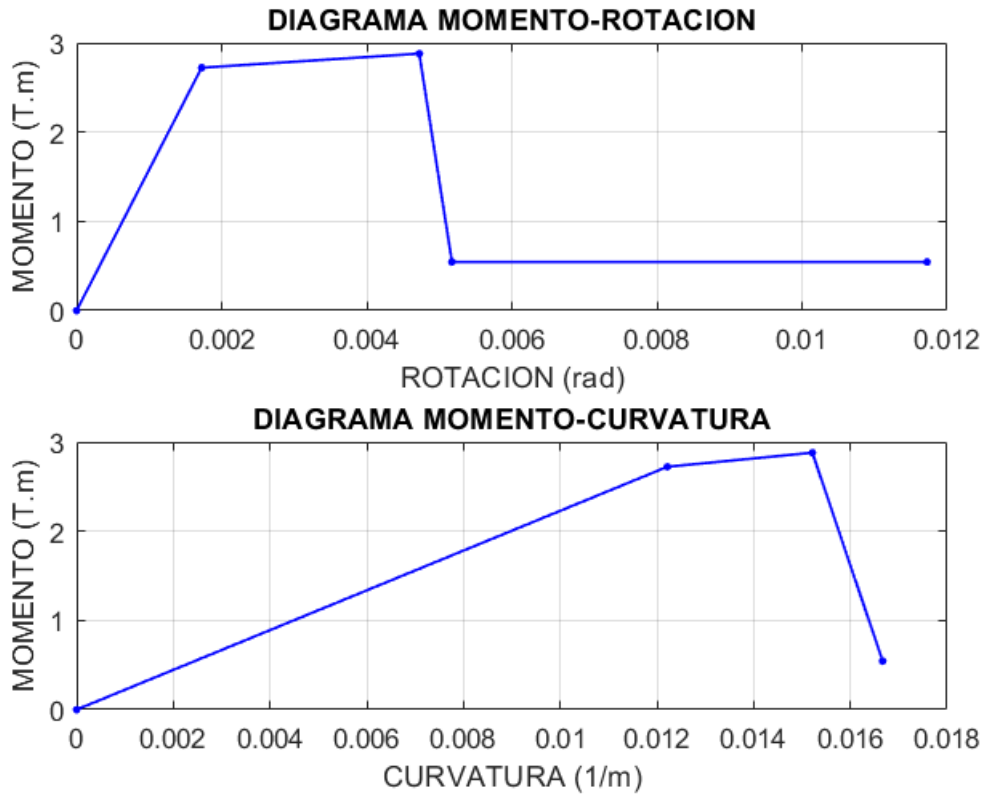


Figura 2.6 Diagrama momento-rotación y momento curvatura, para el centro de luz de la viga indicada en la figura 2.4.

2.1.4 Valores del ASCE/SEI para hallar punto U y residual en columnas

En forma similar a las vigas, hay tres controles que se deben realizar, antes de ingresar a la tabla 2.2 para encontrar los coeficientes a , b , c con los cuales se halla el diagrama momento rotación. El primer control es calcular la relación:

$$\frac{P}{A_g f'_c}$$

Donde P es la carga axial; A_g es el área de la sección transversal de la columna y f'_c es la resistencia máxima del hormigón a compresión. El segundo control tiene que ver con el confinamiento y el tercero con el cortante actuante; estos dos controles se realizan en forma similar a la presentada para vigas.

Si la columna está controlada por corte, ver última fila de la tabla 2.2, no se puede obtener los coeficientes a, b, c . Nótese que no se admite que el espaciamiento de los estribos $s \geq d/2$. Por lo tanto, en una columna de 30/30 cm, no se admite que el espaciamiento en la mitad sea cada 20 cm. Normalmente se coloca cada 10 cm, en los extremos y cada 20 cm, en la mitad, pero para que la columna sea controlada por flexión no se puede colocar estribos cada 20 cm, en la mitad.

Tabla 2.2 Parámetros y criterios de aceptación para procedimientos no lineales en columnas de hormigón armado. Fuente: ASCE/SEI 41 de 2011

ii.i) Columnas controladas por flexión			a	b	c
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Refuerzo Transversal	$\frac{V(Ksi)}{b_w(in)d(in)\sqrt{f'_c(ksi)}}$			
≤ 0.1	Confinado	≤ 3	0.02	0.03	0.2
≤ 0.1	Confinado	≥ 6	0.016	0.024	0.2
≥ 0.4	Confinado	≤ 3	0.015	0.025	0.2
≥ 0.4	Confinado	≥ 6	0.012	0.02	0.2
≤ 0.1	No Confinado	≤ 3	0.006	0.015	0.2
≤ 0.1	No Confinado	≥ 6	0.005	0.012	0.2
≥ 0.4	No Confinado	≤ 3	0.003	0.01	0.2
≥ 0.4	No Confinado	≥ 6	0.002	0.008	0.2
ii.ii) Columnas controladas por corte					
Espaciamiento de estribos $\leq \frac{d}{2}$, o $\frac{P}{A_g f'_c} \leq 0.1$			No se permitirá		

• EJEMPLO 2

Se tiene una columna de 30/30 cm, sobre la que gravita, al inicio del análisis, una carga axial de 4 T., el hormigón es de $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$; el acero tiene un límite de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$. El recubrimiento de la armadura es de 6 cm. En la figura 2.7a, se presenta la sección transversal de la columna que tiene una armadura longitudinal compuesta por $8 \text{ } \emptyset 14 \text{ mm}$, y una armadura transversal de $1 \text{ } \emptyset 10 \text{ mm} @ 10 \text{ cm}$ en toda su longitud de 3.50 m. Se pide calcular el diagrama momento-rotación y momento-curvatura, utilizando las ecuaciones propuestas por Park (1985) para el punto de fluencia y la tabla 2.2, propuesta por ASCE/SEI 41 de 2011, para encontrar los puntos notables de los diagramas indicados. Calcular para un punto en que los momentos actuantes en las columnas son nulos y para cortante actuante nulo.

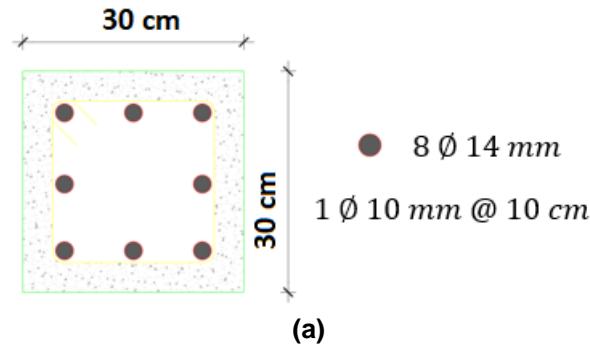


Figura 2.7 a) Columna de 30/30 cm, con 8 $\emptyset 14$ mm y armadura transversal de 1 $\emptyset 10$ mm espaciado cada 10 cm. Longitud de la columna de hormigón armado 3.50 m.

- **SOLUCIÓN**

- **Punto de fluencia**

$$\beta_c = \frac{d'}{d} = \frac{6}{24} = 0.25$$

$$p_t = \frac{A_s * f_y}{b * d * f'_c} = \frac{6.1575 * 4200}{30 * 24 * 210} = 0.1497$$

$$p'_t = \frac{A_s' * f_y}{b * d * f'_c} = \frac{6.1575 * 4200}{30 * 24 * 210} = 0.1497$$

$$\alpha_y = \frac{\varepsilon_Y}{\varepsilon_o} = \frac{0.002}{0.0021} = 0.9524$$

$$k = \sqrt{\frac{(p_t + p'_t)^2}{4\alpha_y^2} + \frac{(p_t + \beta_c * p'_t)}{\alpha_y}} - \frac{(p_t + p'_t)}{2\alpha_y} = 0.3131$$

$$C_1 = 1.05 \text{ si } p'_t \neq 0;$$

$$C_2 = 1 + \frac{0.45}{0.84 + 2p'_t - p_t} = 1 + \frac{0.45}{0.84 + 2 * 0.1497 - 0.1497} = 1.4547$$

$$\eta_o = \frac{P_o}{b * d * f'_c} = \frac{4000}{30 * 24 * 240} = 0.0231$$

$$\phi_y = \left[C_1 + (C_2 - C_1) * \frac{\eta_o}{0.3} \right] * \frac{\varepsilon_Y}{(1 - k) * d}$$

$$= \left[1.05 + (1.4547 - 1.05) * \frac{0.0231}{0.3} \right] * \frac{0.002}{(1 - 0.3131) * 24} = 0.0131 \frac{1}{m}$$

$$\varepsilon_c = \phi_Y * d - \varepsilon_Y = 0.00010 \leq \varepsilon_U \quad \rightarrow \quad \varepsilon_c = 0.0131 * 0.24 - 0.002 = 0.0011 \leq 0.004$$

$$\eta = \frac{0.75}{1 + \alpha_y} * \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \right)^{0.7} = \frac{0.75}{1 + 0.9524} * \left(\frac{0.0011}{0.0021} \right)^{0.7} = 0.2517$$

$$\alpha_c = (1 - \beta_c) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_y} - \beta_c = 0.1805 \leq 1$$

$$M_Y = 0.5 * f'_c * b * d^2 * [(1 + \beta_c - \eta)\eta_0 + (2 - \eta) * p_t + (\eta - 2\beta_c) * \alpha_c * p_t']$$

$$M_Y = 5.7656 \text{ T.m}; \quad \phi_Y = 0.0021 \text{ 1/m}$$

- **Cálculo de a, b, c, según ASCE/SEI y puntos notables**

Otra vez, la sección no es confinada, debido a que el espaciamiento de estribos es de 10 cm, para ser confinada se requiere que sea de 8 cm (d/3). Por otro lado, se tiene:

$$\frac{P}{A_g f'_c} = \frac{4000}{30 * 30 * 240} = 0.0185$$

El cortante actuante vale cero, luego se tiene:

$$a = 0.006; \quad b = 0.015; \quad c = 0.2;$$

Se procede en forma similar al Ejemplo 1, y se hallan los puntos notables del diagrama momento-rotación.

$$M_y = 5.7656 \text{ Tm} \quad \theta_y = 0.0021 \text{ r} \quad M_u = 6.2393 \text{ Tm} \quad \theta_u = 0.0081 \text{ r}$$

$$M_r = 1.1531 \text{ Tm} \quad \theta_r = 0.0171 \text{ r}$$

Los puntos notables del diagrama momento-curvatura, son:

$$M_y = 5.77 \text{ Tm} \quad \phi_y = 0.0131 \frac{1}{m} \quad M_u = 6.2393 \text{ Tm} \quad \phi_u = 0.0191 \frac{1}{m}$$

$$M_r = 1.15 \text{ Tm} \quad \phi_r = 0.0209 \frac{1}{m}$$

En la figura 2.7 b, se indican los diagramas momento-rotación y momento-curvatura de la columna analizada.

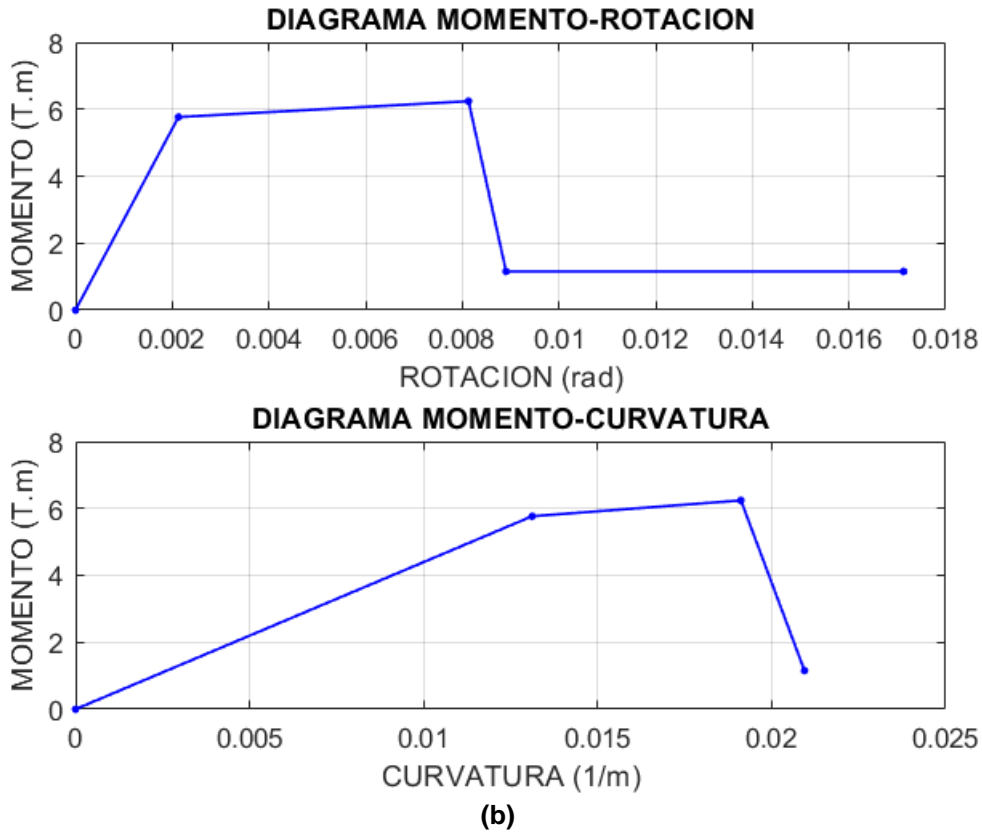


Figura 2.7 b) Diagramas: Momento-rotación y Momento-curvatura, de columna de Ejemplo 2.

2.2 MODELO DE PLASTICIDAD DE GIBERSON

La viga de la figura 2.4, y la columna de la figura 2.7 a, son del pórtico de hormigón armado que se presenta en la figura 2.8, que tiene una luz de 4.0 m, y una altura de 3.5 m, solo se ha indicado el momento de fluencia M_y , y la curvatura de fluencia ϕ_y , valores con los cuales se obtiene la curva de capacidad sísmica para los primeros instantes de carga.

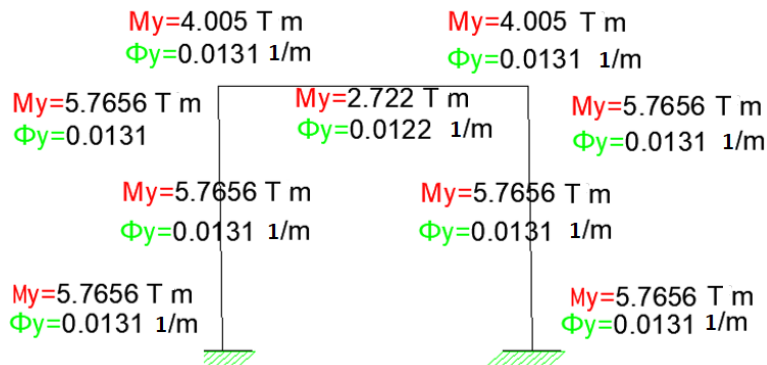


Figura 2.8 Momento de fluencia y curvatura de fluencia, para estructura de hormigón armado con columnas de 30/30 cm, y viga de 20/30 cm. Modelo sin nudo en mitad de viga.

Nótese que la viga es de sección constante y sin embargo se tiene que en el centro de luz el momento y curvatura de fluencia son diferentes a los extremos por la armadura longitudinal que es diferente (ver figura 2.4) y por la separación de los estribos.

Lo cierto es que, en la estructura de la figura 2.4, se deben aplicar cargas laterales y resolver la estructura. ¿Cómo hacerlo si se tiene diferente rigidez a flexión? La respuesta es utilizando algún modelo de plasticidad concentrada. En Aguiar (2002) se encuentran algunos modelos de plasticidad concentrada entre ellos el modelo de Giberson que se va a emplear en el siguiente ejemplo.

• EJEMPLO 3

El primer estado de carga que se resuelve en el Pushover es solo carga vertical y después se va aplicando la carga lateral en forma creciente, pero en el Ejemplo 3 se resuelven estos dos estados de carga en uno solo y es el que se presenta en la figura 2.9 a, Ahora al dividir el momento para la curvatura en el punto de fluencia se encuentra la rigidez a flexión EI que se indica en la figura 2.9 b, para el nudo inicial, centro de luz y nudo final (Considerar nudo en la mitad de la viga). Se pide resolver la estructura, empleando el modelo de Giberson y presentar los momentos y fuerzas en los elementos.

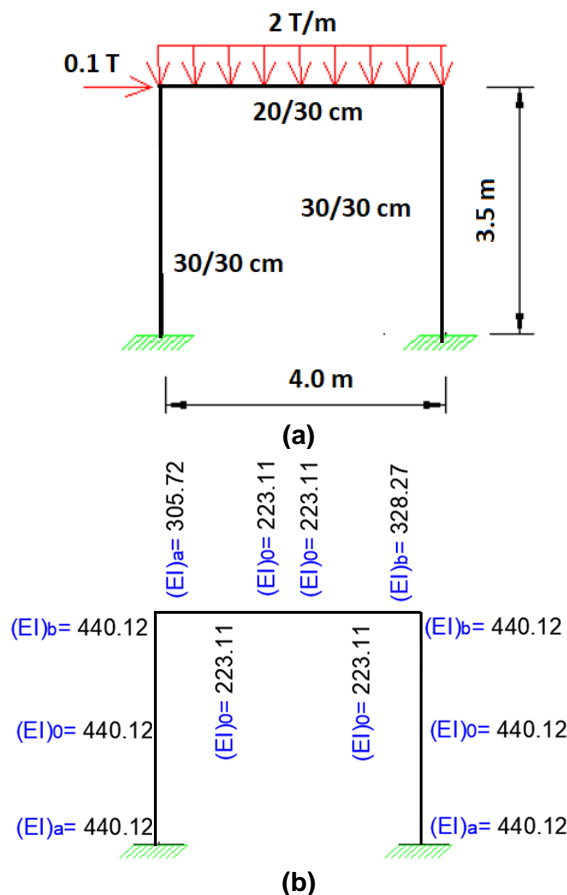


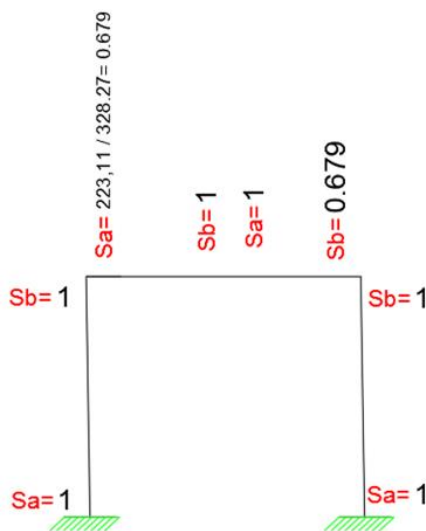
Figura 2.9 a) Geometría del Pórtico, con estado de carga vertical y lateral; b) Rigidez a flexión hallada dividiendo el momento para la curvatura en el punto de fluencia, se va a resolver considerando nudo en la mitad de la viga.

• SOLUCIÓN

En el capítulo 7 de Aguiar (2020), se presenta el modelo de Giberson para cuatro casos, a saber: i) sin articulación a los dos lados; ii) con articulación al lado izquierdo; iii) con articulación al lado derecho; iv) con articulación en los dos lados del elemento. A continuación, se indica la matriz de flexibilidad f , para el primer caso, en el sistema de coordenadas 1.

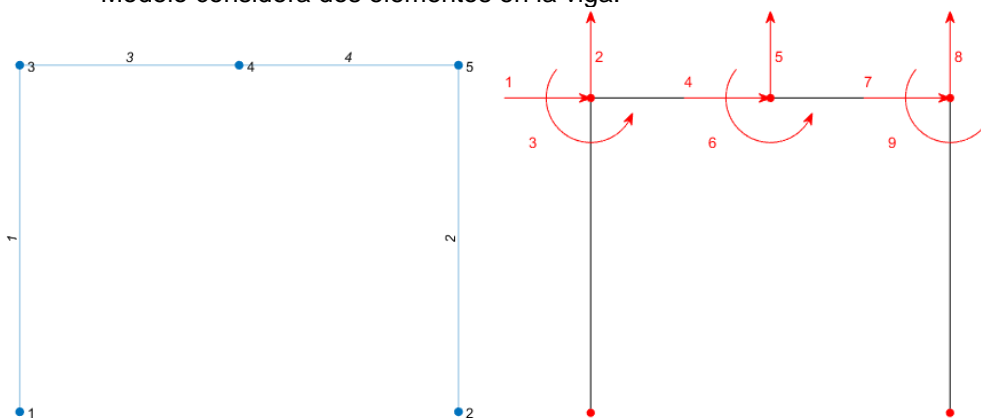
$$f = \frac{L}{6(EI)_0} \begin{bmatrix} (1 + S_a) & -1 & 0 \\ -1 & (1 + S_b) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6(EI)_0}{EA} \end{bmatrix}$$

$$S_a = \frac{(EI)_0}{(EI)_a} \quad S_b = \frac{(EI)_0}{(EI)_b}$$



(c)

Figura 2.9 c) Coeficientes S_a , S_b , del modelo de Giberson para determinar la matriz de flexibilidad en sistema 1 (sin considerar desplazamientos como cuerpo rígido). Modelo considera dos elementos en la viga.



(d)

(e)

Figura 2.9 d) Numeración de nudos y elementos; e) Numeración de grados de libertad para análisis estático.

En la figura 2.9 d, se tiene la numeración de nudos y elementos, considerando nudo en la mitad de la viga. En la figura 2.9 e) se indican los grados de libertad para el análisis estático. A continuación, se lista el programa con el cual se halló los desplazamientos y fuerzas y momentos en los elementos.

Código: Ejercicio 3 con modelo de Giberson

```
% Ej_4_Giberson_ULEAM
clc; clear all
%.....
sv =[4.0]; %Ingresar un vector con la logitud de vanos en (metros)
sp =[3.5]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
nr=2; RES=[1 1 1 1;2 1 1 1];nod=5;Eh=2400000;
area1=0.3*0.3;EA1=area1*Eh;area2=0.2*0.3;EA2=area2*Eh; % rigidez axial
ELEM=[440.12 440.12 440.14 EA1; % Rigidez a flexión en NI, CL, NF, y rigidez
axial.
    440.12 440.12 440.14 EA1; % Datos de Columna derecha
    328.27 223.11 223.11 EA2; 223.11 223.11 328.27 EA2]; % Datos en vigas 3
y 4
%% Funciones para generar geometría del Pórtico,
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr); %coordenadas
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg (nod,nr,RES);
% dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
%dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
%% Matriz de rigidez de estructura
[L,seno,coseno]=longitud (X,Y,NI,NJ); %Longitud seno y coseno de elementos
[VC]=vc(NI,NJ,CG); % Vector de colocación de elementos
[K]=krigidez_Giberson(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC); %Ensamblaje de K
%% Vector de Cargas Generalizadas
njc=1;nmc=2;datos=0;
F=[3 0.1 0 0]; % Carga lateral
Fm=[3 2.0 1 1 1]; % Cargas verticales
[Q,Q2]=cargas(njc,nmc,ngl,L,seno,coseno,CG,VC,F,Fm,datos);
%% Solución de Ecuaciones y Cálculo de Fuerzas y Momentos en elementos
q=K\Q
[FF]=fuerzas_giberson(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,Eh,q,Q2)
```

El programa que determina la matriz de rigidez de la estructura, para el modelo de Giberson, se llama: **krigidez_giberson**, en este programa la matriz **ELEM** para cada elemento contiene para cada elemento la siguiente información.

$$(EI)_a \quad (EI)_o \quad (EI)_b \quad EA$$

Que son la rigidez a flexión en el nudo inicial, centro de luz, nudo final y la rigidez axial. Se está calculando un punto de la curva de capacidad sísmica de la estructura, conforme se vaya incrementando la carga lateral (Pushover monotónico) los momentos en los elementos se van a incrementar y el momento que sobrepase el momento de fluencia se cambia la rigidez a flexión.

Lo importante es destacar que se resuelve un problema estático, en cada incremento de carga. Para esto se debe determinar la matriz de rigidez de la estructura K ; el vector de coordenadas generalizadas Q ; los desplazamientos y giros que están agrupados en el vector de coordenadas generalizadas q ; para esto se resuelve un sistema de ecuaciones lineales. Finalmente se determinan las fuerzas y momentos en coordenadas locales que en el programa se ha denominado FF , mediante el programa *fuerzas_giberson*

En la figura 2.9 f, se tiene el estado de cargas que se resolvió, el desplazamiento lateral que se genera $d_t = 0.0007 m$. El cortante en la base $V = 0.1 T$. Con esto se tiene el primer punto de la curva de capacidad sísmica que relaciona el cortante basal V , con el desplazamiento lateral máximo d_t .

Por último, en la figura 2.9 g, se muestran las fuerzas y momentos en cada uno de los elementos, correspondientes al estado de cargas indicado en la figura 2.9 f. En la viga 3, el momento que se genera es $M_i = 2.18 Tm$, en el nudo inicial; $M_j = 1.75 Tm$; el cortante $V_i = 3.97 T$, para el nudo inicial y $V_j = 0.03 T$, para el nudo final. Con estos valores se hallan los nuevos momentos y curvaturas para el siguiente estado de carga.

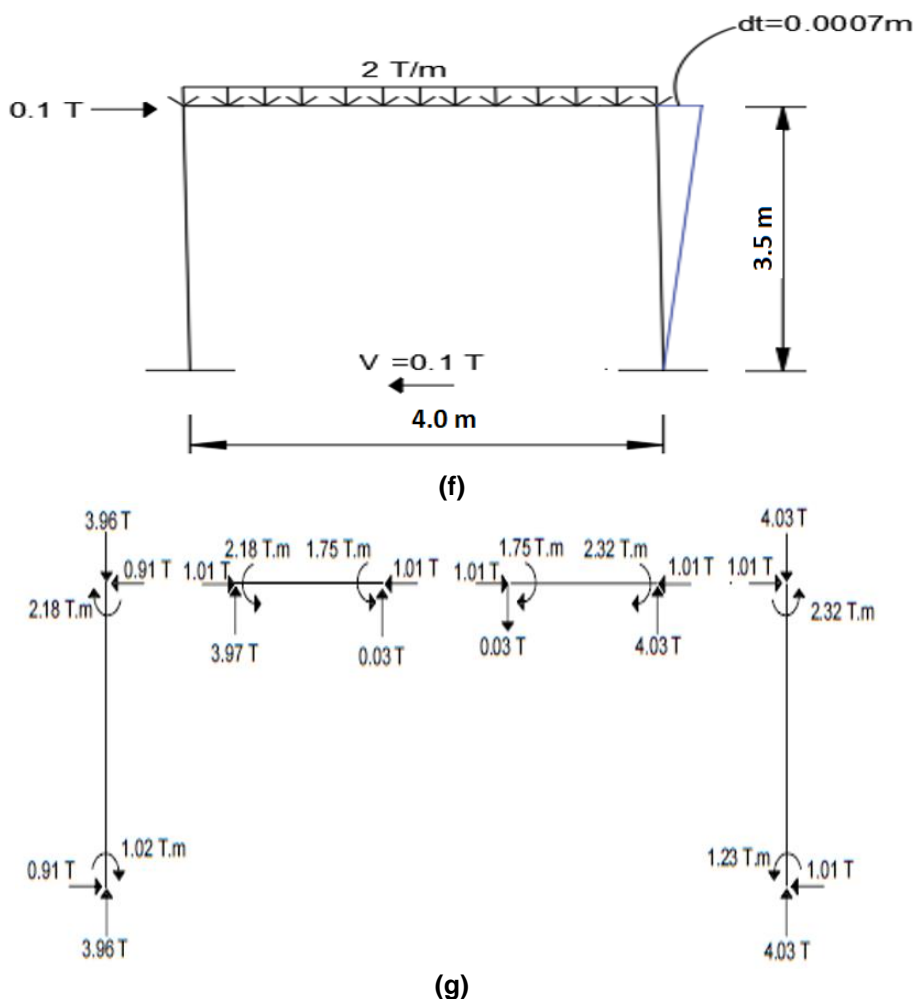


Figura 2.9 f) Carga vertical de 2 T/m; lateral de 0.1 T que genera un cortante $V = 0.1 T$, y un desplazamiento lateral $d_t = 0.0007 m$; g) Fuerzas y momentos en los elementos.

Para el siguiente estado de carga, solo se aplica la carga lateral, los resultados que se obtienen se van acumulando y se tienen nuevos puntos de la curva de capacidad sísmica resistente.

Es importante destacar que este modelo con nudo en la mitad de la viga no es se debe utilizar cuando se trabaja con el modelo de plasticidad de Giberson, debido a que, al considerar nudo en el centro de luz, este pasa a ser el nudo final, el mismo que tiene poca armadura con respecto al nudo inicial y se convierte en una sección débil.

El programa se ejecuta, cuando se considera nudo en la mitad de la viga, pero los resultados no son lógicos debido a que indican que se forma rótula plástica en la mitad de la viga y esto no es cierto.

Esto debe ser como un llamado de atención a ser más cuidadoso con el modelo de plasticidad que se considere en el análisis y al modelo con el cual se calcula (con o sin nudo en la mitad), lo indicado es válido para elementos de hormigón armado en que se tiene diferente armadura a lo largo de la viga, para elementos de acero si se puede trabajar con nudo en la mitad de la viga.

2.3 PUSHOVER BÁSICO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Se ha denominado Pushover básico, a aquel que utiliza el modelo de Giberson para hallar la matriz de rigidez de la estructura ya que este modelo de plasticidad concentrada es muy elemental y la mejor forma de entender cómo se obtiene la curva de capacidad sísmica de una estructura, por medio del Pushover es describiendo este programa.

- ***[SS,icon,iconu,Tabla3,VC,ngl]=krigidez_giberson_po_2(ngl,Tabla1,Tabla2,Tabla3,L,seno,coseno,VC,icon,iconu,jj)***

Los datos de entrada de este programa son: ***ngl*** es el número de grados de libertad.

Tabla1, es una matriz de 13 columnas y ***mbr*** filas, siendo ***mbr*** el número de elementos de la estructura. Para cada elemento se indica: M_y, M_u, ϕ_y, ϕ_u en el nudo inicial, centro de luz y nudo final, a más de ello se da la rigidez axial EA/L . El usuario puede crear esta tabla indicando la información para cada uno de los elementos (demasiado largo) otra forma es dar esta información para pocos elementos y elaborar un pequeño programa que genere para el resto de la estructura.

Tabla2 es una matriz de 6 columnas y ***mbr*** filas que contiene: la carga axial N , el cortante V , el momento M , en el nudo inicial y lo propio en el nudo final que se va generando en cada elemento conforme se va incrementando la carga axial. Resumiendo, ***Tabla2*** contiene: N, V, M, N', V', M' .

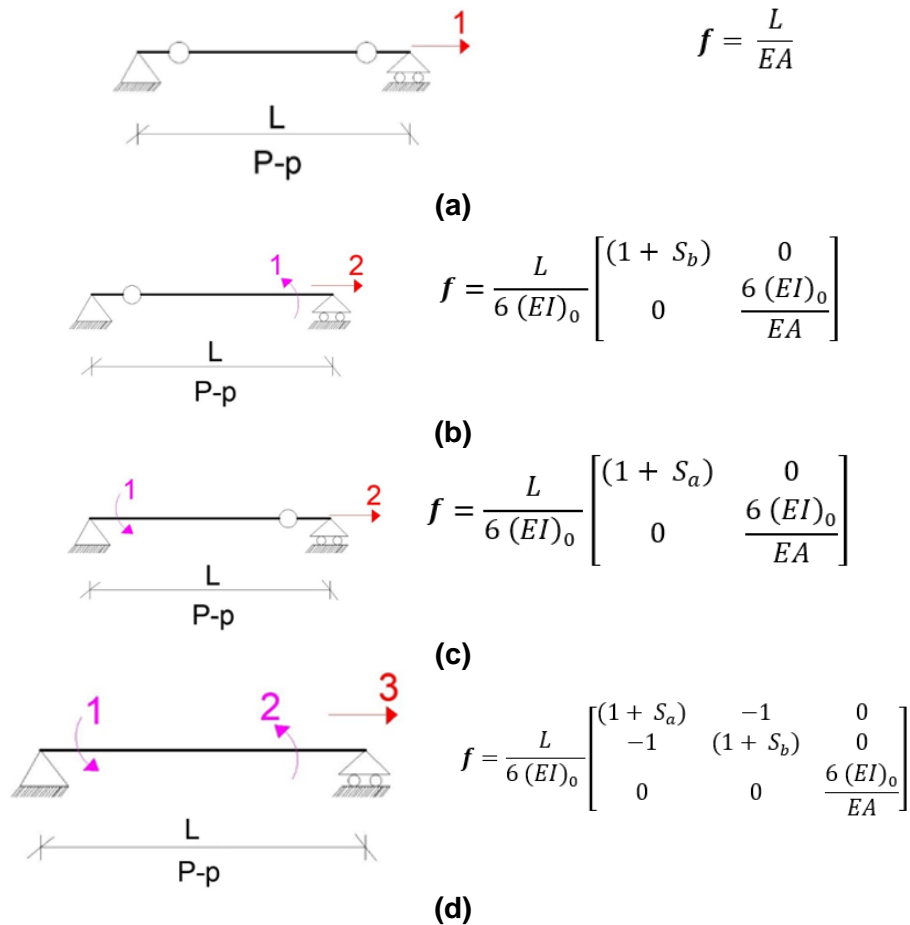


Figura 2.10 Casos que se consideran para el cálculo de la matriz de rigidez de un elemento; a) El nudo inicial y final llegaron a los valores máximos de M_u, M'_u ; b) Solo el nudo inicial alcanzó el valor de M_u ; c) Solo el nudo final alcanzó el valor de M'_u ; d) Los momentos en los extremos no llegan a sus valores máximos. Para los cuatro casos se presenta la matriz de flexibilidad en sistema 1.

Tabla3 es una matriz de 8 columnas y mbr filas que contiene: el instante del ciclo de carga en que se pasa M_y en el nudo inicial; instante del ciclo de carga en que se pasa M'_y en el nudo final; instante del ciclo de carga en que se pasa M_u en el nudo inicial; instante del ciclo de carga en que se pasa M'_u en el nudo final; en la quinta columna se indica la secuencia con que las secciones superan M_y en el nudo inicial; en la sexta la secuencia para M'_y en el nudo inicial; en la séptima la secuencia en que llegan las secciones a M_u en el nudo inicial; en la octava la secuencia en que llegan a M'_u en el nudo final.

Continuando con los datos de entrada, se tiene: L un vector con las longitudes de los elementos; $seno$ un vector con el ángulo seno de los elementos; $coseno$ vector con el coseno de los elementos; VC matriz con los vectores de colocación de los elementos; $icon$ es un contador con el cual ingresan las secciones al rango no lineal, cuando superan el momento de fluencia en nudo inicial o final; $iconu$ es un contador

para cuando las secciones sobrepasan el momento último en el nudo inicial y final; **jj** es el ciclo de carga.

Para cada ciclo de carga lateral, se encuentran las fuerzas y momentos en los elementos, los mismos que se van sumando. Al principio todos los elementos trabajan con el modelo indicado en la figura 2.10 d, la rigidez a flexión se inicia calculando con las siguientes ecuaciones.

- Momentos M_i, M_j , son menores de los de fluencia.

$$M_i \leq M_y \quad \rightarrow (EI)_a = \frac{(M_y)_a}{(\phi_y)_a}$$

$$M_j \leq M'_y \quad \rightarrow (EI)_b = \frac{(M_y)_b}{(\phi_y)_b}$$

$$(EI)_o = \frac{(M_y)_o}{(\phi_y)_o}$$

$$S_a = \frac{(EI)_o}{(EI)_a} \quad S_b = \frac{(EI)_o}{(EI)_b}$$

Donde M_i, M_j , son los momentos que se han generado en el nudo inicial y final por la aplicación de las cargas laterales. Luego se obtiene la matriz de flexibilidad indicada en la figura 2.10 d, y después se halla la matriz de rigidez en coordenadas globales. Esto se realiza con el programa ***kmiembro_giberson_po***

- Momentos M_i, M_j , son mayores al momento de fluencia, pero menores al momento último.

$$M_y < M_i \leq M_u \quad \rightarrow (EI)_a = \frac{(M_u)_a - (M_y)_a}{(\phi_u)_a - (\phi_y)_a} \quad (2.9)$$

$$M'_y < M_j \leq M'_u \quad \rightarrow (EI)_b = \frac{(M_u)_b - (M_y)_b}{(\phi_u)_b - (\phi_y)_b} \quad (2.10)$$

Con estas nuevas rigideces, se procede con el cálculo empleando ***kmiembro_giberson_po***

Por cierto, es el programa ***krigidez_giberson_po_2***, quien controla los momentos en las secciones exteriores y determina la rigidez a flexión, en función de la rama del modelo constitutivo en que se encuentra y determina que programa debe usar para encontrar la matriz de rigidez del elemento en coordenadas globales.

Si el momento en el nudo inicial $M_i = M_u$ y en el nudo final el momento $M_j = M'_u$, se tiene el caso indicado en la figura 2.10 a, y se calcula con ***kmiembro_giberson_po_sinSasinSb***.

Si solo el momento en el nudo inicial $M_i = M_u$ y en el nudo final el momento M_j puede ser menor a M'_y o a M'_u , se tiene el caso de la figura 2.10 b, y se usa **kmiembro_giberson_po_sinSa**

También puede darse el caso que el momento en el nudo inicial M_i sea menor que M_y o que sea menor que M_u pero en el nudo final $M_j = M'_u$. En este caso se tiene el caso mostrado en la figura 2.10 c, y se usa el programa **kmiembro_giberson_po_sinSb**

- **[Q,V,Q2]=cargas_po(Qa,ngl,Fm,L,seno,coseno,VC)**

El programa **cargas_po** es una variante del programa **cargas** con el cual se halla el vector de cargas generalizadas Q . Variante adaptada al Pushover en el sentido de que en el primer ciclo de carga ($j = 1$) se resuelve solo con cargas verticales y en los restantes ciclos solo con carga horizontal aplicada en los nudos, para ello en el segundo ciclo de carga ($j = 2$), la matriz **Fm** se encera.

En el análisis sísmico se distinguen dos tipos de coordenadas, a saber: las principales (que son las coordenadas laterales, una por piso ya que se trabaja con un modelo en que se considera que las vigas son completamente rígidas) y las coordenadas secundarias (desplazamientos verticales y rotaciones). A las coordenadas principales en el programa se denomina Q_a y a las coordenadas secundarias Q_b , de tal manera que el vector Q es igual a:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \end{bmatrix}$$

Para el primer ciclo de carga $Q_a = 0$ pero para los restantes ciclos de carga ($j \geq 2$) el vector Q_a se calcula con la siguiente ecuación.

$$Q_a = \frac{\text{diag}(M) \phi^{(1)}}{\sum_{i=1}^{np} M_T \phi^{(1)}} \Delta q \quad (2.11)$$

Donde M es la matriz de masas que es diagonal para el caso plano, compuesta por las masas de cada piso; $\phi^{(1)}$ es el primer modo de vibración; Δq es el incremento de carga lateral que se impone el usuario del programa, es un solo número.

Con esta explicación, la entrada de datos del programa **cargas_po** es la siguiente: Q_a vector con las cargas laterales en cada piso, el usuario puede usar la ecuación (2.11) o simplemente imponerse el vector Q_a , para lo que debe dejar de usar la ecuación (2.11), que está programada casi al final del programa; **ngl** es el número de grados de libertad; **Fm** es una matriz que contiene el número de elemento cargado y el valor de la carga uniforme distribuida, 2 valores por fila. Se trabaja con esta matriz solo en el primer ciclo de carga ($j=1$) para los restantes ciclos de carga (laterales) se encera esta matriz; **L** vector con la longitud de los elementos; **seno, coseno**, vectores con los valores de seno y coseno de los elementos; **VC** matriz con los vectores de colocación de cada elemento.

El programa **cargas_po** reporta: Q el vector de cargas generalizadas; V el cortante basal para el ciclo de carga se halla sumando las cargas laterales que se aplican a la estructura y que se encuentran en el vector Q_a ; reporta también **Q2** matriz con las acciones de empotramiento perfecto de los elementos cargados, solo tiene valores diferentes de cero en el primer ciclo de carga.

- **[Mt,M]=masas(Fm,Nl,Y,L,np)**

El programa **masas** determina la matriz de masas M , para el caso plano es una matriz diagonal, con el valor de la masa en cada piso; Mt es la masa total de la estructura es igual a la suma de las masas totales de cada piso: Los datos de entrada son: **Fm** matriz que contiene el número del elemento cargado y el valor de la carga uniforme (ya explicado); **Y** es un vector con las coordenadas Y, de cada uno de los pisos; **L** vector con la longitud de los elementos; **np** es el número de pisos.

- **[Sdd,Saa,fi1]=espe_cap(K,M,Mt,np,ngl,Dtt,VV);**

El programa **espe_cap** determina el espectro de capacidad de la estructura, la misma que se obtiene a partir de la curva de capacidad sísmica resistente, pero la construcción del Pushover que se está estudiando solo se requiere conocer el primer modo de vibración que se denomina **fi1** y se lo emplea en la ecuación 2.11.

Los datos de entrada son **K**, la matriz de rigidez de la estructura; **M** la matriz de masas; M_T la masa total; **np** es el número de pisos; **ngl** es el número de grados de libertad; **Dtt** es el desplazamiento lateral máximo acumulado; **VV** es el cortante basal acumulado.

$$D_{tt} = D_{tt} + D_t \quad VV = VV + V$$

Donde D_t es el desplazamiento lateral máximo acumulado que se determina en cada ciclo de carga, mediante la solución de la ecuación básica de matricial.

$$Q = K q$$

Donde Q es el vector de cargas; **K** es la matriz de rigidez de la estructura; q es el vector de desplazamientos y giros. En MATLAB este vector se halla de la siguiente manera $q = K \backslash Q$. Del vector q se encuentra D_t ; el cortante basal en cada ciclo de carga se halla con la función **cargas_po**

A más del primer modo de vibración $\phi^{(1)}$, el programa reporta los vectores de desplazamientos espectrales **Sdd** y de aceleraciones espectrales **Saa** con los cuales se dibuja el espectro de capacidad sísmica resistente.

- **[FF]=fuerzas_po_2(ngl,Tabla1,Tabla2,Tabla3,L,seno,coseno,VC,q,Q2)**

Los datos de entrada del programa **fuerzas_po_2** han sido ya indicados en otras funciones que se han presentado, solo resta indicar que en el programa se determina: i) Deformaciones en cada uno de los elementos en coordenadas globales p_g ; ii) Se determina la matriz de rigidez del elemento k_3 teniendo en cuenta si se han formado

rótulas plásticas en los extremos o no (esto ya fue explicado cuando se estudió el programa *krigidez_giberson_po_2*); iii) Se halla el vector de fuerzas y momentos en coordenadas globales de cada elemento $P_g = k_3 * p_g$; iv) Se pasan las fuerzas y momentos de coordenadas globales a locales $P_L = T_{2-3} P_g$; v) Se encuentran las fuerzas finales en cada elemento **FF** sumando el vector P_L (Problema complementario) a **Q2** que contiene las acciones de empotramiento perfecto (Problema primario)

Las fuerzas **FF** encontradas en cada ciclo de carga se acumulan en la matriz Tabla2.

$$\mathbf{Tabla2} = \mathbf{FF}(:, :, j) + \mathbf{Tabla2}$$

Donde j es el ciclo de carga.

• EJEMPLO 4

La estructura de 2 pisos indicada en la figura 2.11 a, tiene una luz de 5.0 m, y la altura de cada piso es de 3.50 m. Las columnas son de 40/40 cm y está armada con 8 varillas longitudinales de 16 mm, de diámetro y estribos de 10 mm espaciados a 10 cm, en toda su longitud, ver figura 2.11 b. La armadura de las vigas se indica en la figura 2.11 c, tiene una armadura base compuesta por 2 varillas de 14 mm, en la parte inferior y en la parte superior; los estribos son también de 10 mm, de diámetro espaciados cada 5 cm, en los extremos y 10 cm, en el centro. El recubrimiento, tanto para vigas como para columnas es de 5 cm.

La carga vertical que gravita en el primer piso es $P_o = 2 T/m$, y en el segundo piso, $P_o = 1.5 T/m$. Para calcular el diagrama momento curvatura considerar una carga axial de 5 T, para las columnas del primer piso y de 2.5 T., para las columnas del segundo piso. La resistencia del hormigón a compresión es $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$. Calcular el módulo de elasticidad con $E_h = 15100 \sqrt{f'_c} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$. Se pide:

- i) Calcular los diagramas momento curvatura de vigas considerando cortante actuante nulo y momentos en los extremos nulos; empleando el formulario de Young Park (1985) para el punto de fluencia y las tablas del ASCE/SEI 41 para el punto U.
- ii) Tanto para vigas y columnas solo determinar el momento y la curvatura en el punto Y, y el punto U. De igual manera empleando Park (1985) y ASCE/SEI 41.
- iii) Presentar la curva de capacidad sísmica resistente empleando un Pushover monotónico **sin considerar** nudo en la mitad de las vigas y utilizando el modelo de plasticidad concentrada de Giberson (Pushover básico) para una deriva global $\gamma_g = 0.04$. Se define la deriva global como la relación entre el desplazamiento lateral máximo en el tope D_t dividida para la altura total H
- iv) Presentar la curva de capacidad para un Pushover totalmente elástico. Es decir, la rigidez no cambia en ningún instante de carga y para un Pushover inelástico (análisis no lineal estático) hasta llegar a $\gamma_g = 0.04$

- v) Presentar el programa de cálculo usando las funciones de **CEINCI-LAB**

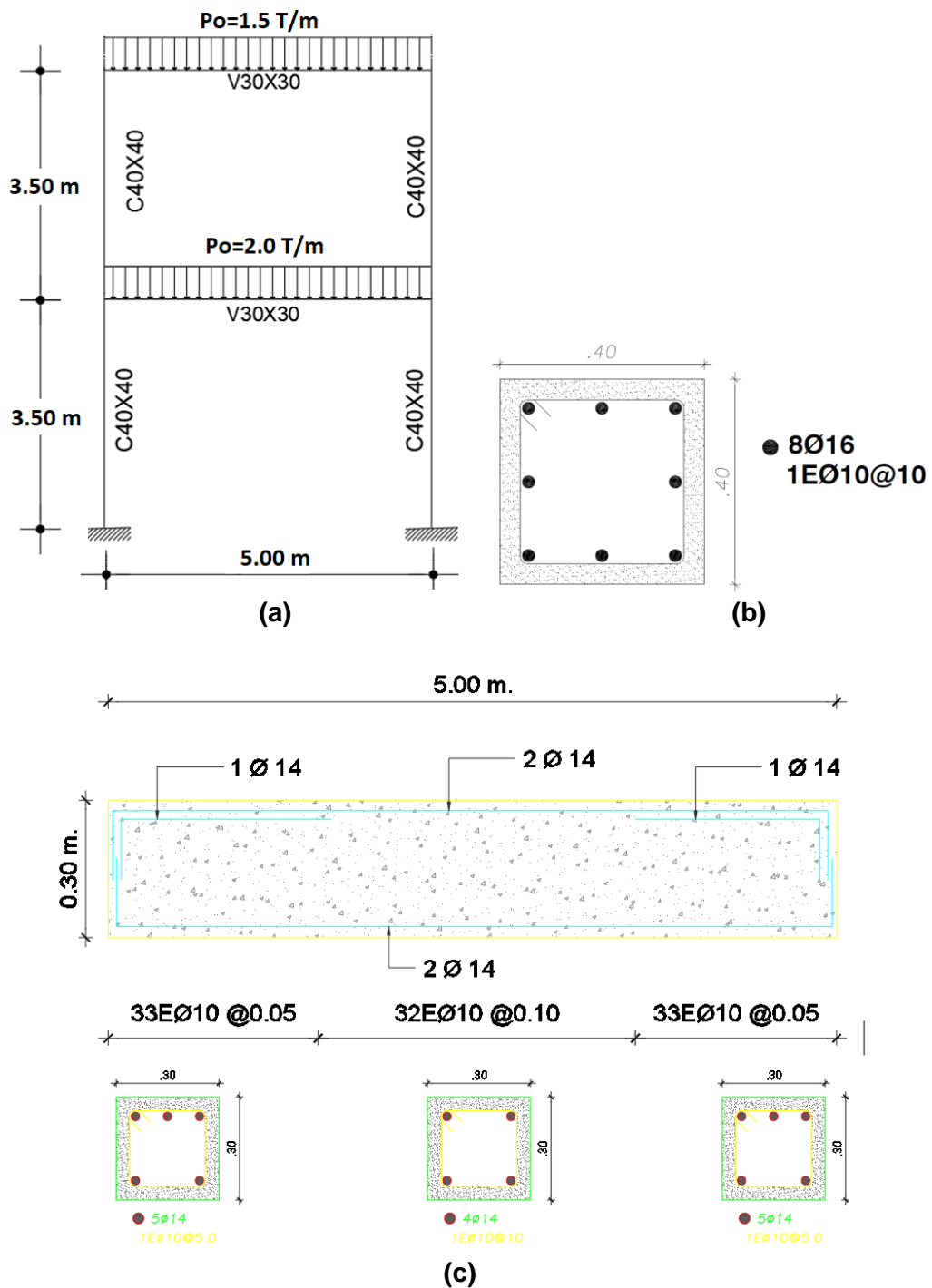


Figura 2.11 a) Geometría del Pórtico de hormigón armado de dos pisos; b) Armadura longitudinal y transversal de una columna; c) Armado de las vigas de primer piso igual a segundo piso, en nudo inicial, centro de luz y nudo final.

- **SOLUCIÓN**

- i) **Diagrama Momento-Curvatura en vigas**

En la tabla 2.3 a, se muestran los coeficientes a, b , que se hallan interpolando los valores indicados en la tabla 2.1. Por cierto, la tabla 2.1, no es completa ya que hay casos en los cuales no están definidos los valores. Por ejemplo, para el siguiente caso:

$$0 < \frac{\rho - \rho'}{\rho_b} < 0.5$$

$$3 < \frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}} < 6$$

Tanto para la sección confinada, como no confinada, no hay valores. Por lo que se deja a criterio del lector seguir trabajando con las tablas del ASCE/SEI 41 o emplear otra forma de cálculo para hallar la relación Momento-Curvatura. Retomando en ejemplo, en la tabla 2.3 a, se indica en las cuatro últimas columnas el momento de fluencia, el momento último, la curvatura de fluencia y la curvatura última, de las vigas.

Tabla 2.3 a) Valores de momento de fluencia, último, curvatura de fluencia, último, en vigas.

Nudo	a	b	$M_y (T m)$	$M_u (T m)$	$\phi_y \left(\frac{1}{m}\right)$	$\phi_u \left(\frac{1}{m}\right)$
Exterior	0.0192	0.037	4.2845	6.1873	0.0116	0.0357
Centro	0.02	0.03	2.8978	4.4769	0.0110	0.0310

- ii) **Diagrama Momento-Curvatura en columnas**

En la tabla 2.3 b, se presentan los coeficientes a, b , y los puntos notables que se requieren para calcular con los programas denominados básico de Pushover monotónico.

Tabla 2.3 b) Valores de momento de fluencia, último, curvatura de fluencia, último, en columnas.

Piso	a	b	$M_y (T m)$	$M_u (T m)$	$\phi_y \left(\frac{1}{m}\right)$	$\phi_u \left(\frac{1}{m}\right)$
1	0.02	0.03	11.2921	16.2826	0.0082	0.0282
2	0.02	0.03	11.1032	16.0937	0.0082	0.0282

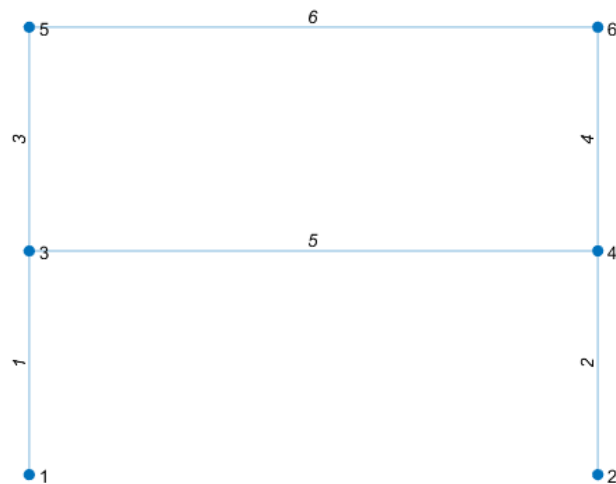
En el archivo ***Ej_6_MC_viga_columna_ULEAM*** se encuentra el cálculo de los puntos notables del diagrama momento-curvatura.

- iii) **Curva de capacidad sísmica resistente**

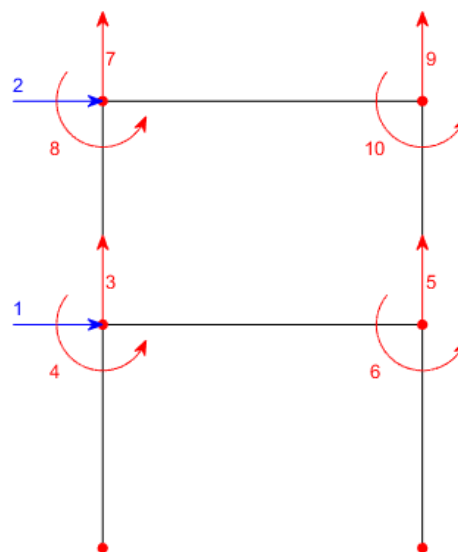
Para entender el programa, que se listara posteriormente (entrada de datos) en la figura 2.11 d, se muestra la numeración de nudos y elementos. Nótese que no se considera nudo en la mitad de la viga. Por otra parte, primero se han numerado las columnas (de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba) luego las vigas (en el mismo orden).

En la figura 2.11 e, se indican los grados de libertad, un corrimiento horizontal por piso, los mismos que se numeran al principio, estos desplazamientos laterales (1 y 2) son las coordenadas **a** (principales) y las restantes coordenadas (3 al 10) son las coordenadas **b** (secundarias).

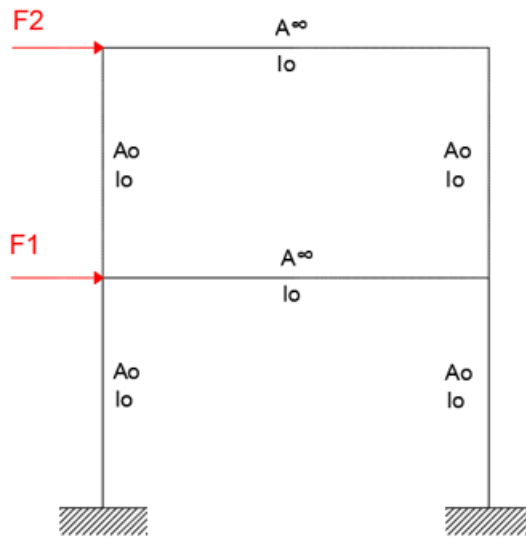
Para tener un grado lateral por piso, se considera que las vigas son axialmente rígidas ($A = \infty$) esto se indica en la figura 2.11 f, lo demás es completamente flexible, las vigas trabajan a flexión. Se ha denominado $F1, F2$, las fuerzas laterales que se aplican a partir del segundo ciclo de carga. En el primer ciclo gravita la carga vertical.



(d)



(e)



(f)

Figura 2.11 d) Numeración de nudos y elementos; e) Numeración de grados de libertad, con azul las coordenadas principales (laterales) y con rojo las secundarias; f) Hipótesis de cálculo, las vigas son axialmente rígidas y se aplican fuerzas laterales en los pisos.

Con esto el vector de cargas generalizadas Q , para el segundo ciclo de carga y siguientes, donde su valor es:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \end{bmatrix} \quad Q_a = \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \end{bmatrix} \quad Q_b = 0$$

Para el ejemplo Q_b tiene 8 ceros. Ya se explicó cómo se calcula el vector Q_a (ecuación 2.11) y se indicó el procedimiento de cálculo por el método de los desplazamientos, por lo que se indican los resultados.

A la izquierda de la figura 2.11 g, se tiene la curva de capacidad sísmica resistente de la estructura hallada hasta una deriva global $\gamma_g = 0.04$. En el eje X, se tienen los desplazamientos laterales en el tope en metros y en el eje Y, el cortante basal en Toneladas. A la derecha, se muestra la estructura y con unos cuadrados se indica la ubicación de las rótulas plásticas hasta llegar a la deriva global.

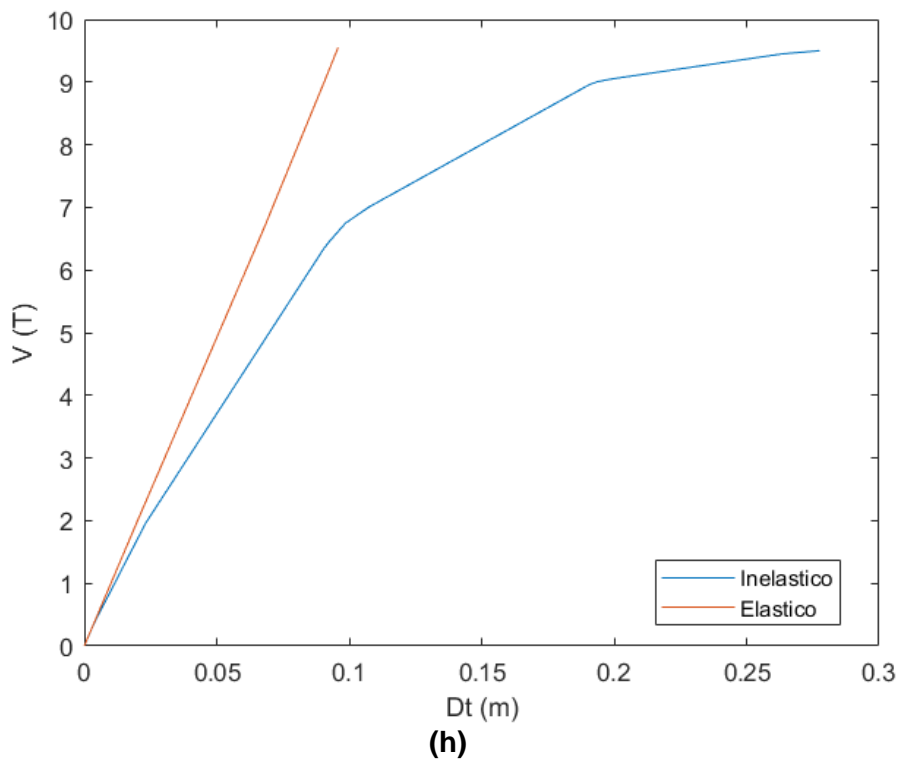
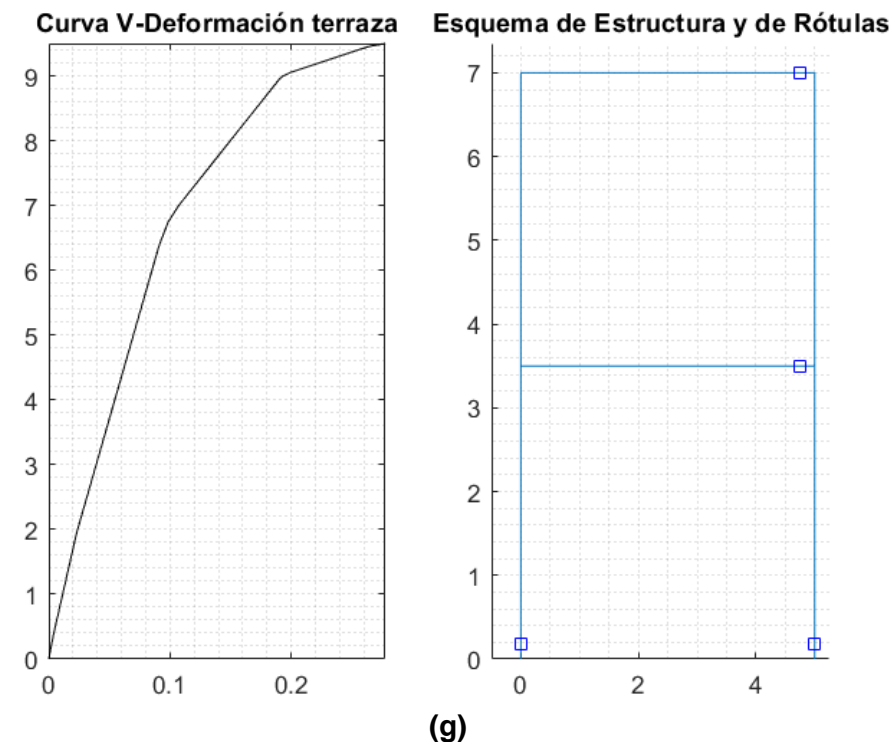


Figura 2.11 g) Curva de capacidad sísmica resistente, a la izquierda y rótulas plásticas (cuadrados) en la estructura; h) Comparación de la curva de capacidad sísmica al considerar la rigidez constante (curva recta de color rojo) y al considerar la rigidez variable (curva de color azul, Pushover).

A la derecha de la figura 2.11 g, se indican los sitios donde se va a formar las rótulas plásticas, pero todavía no se sabe cuál fue la primera rótula (momento actuante llegó a M_u) ni tampoco se sabe que otros elementos sufrieron daño (superaron el valor de M_y). Esta información reporta el programa en la **Tabla 3**, que se copia en la Tabla 2.3 c; las cuatro primeras indican el ciclo de carga, en que se pasó el momento de fluencia (las dos primeras) y se llegó al momento último (la tercera y la cuarta). En todas ellas **NI** es el nudo inicial y **NJ** es el nudo final.

Las cuatro últimas columnas de la tabla 2.3 c, indican el orden como se dañó la estructura (columnas 5 y 6) y el orden de la formación de las rótulas plásticas (columnas 7 y 8). Cada fila de datos corresponde a un elemento. Así la primera rótula plástica se formó en el nudo final de la viga del primer piso, en el ciclo de carga 130; la segunda rótula se dio en el nudo final de la viga del segundo piso en el ciclo de carga 141; la tercera se da en el nudo inicial de la columna derecha en el ciclo de carga 180 y la cuarta se da en el nudo inicial de la columna izquierda en el ciclo de carga 181.

Es importante destacar que la estructura llegó al colapso (deriva global igual a 0.04) en el ciclo de carga 191, de tal forma que se formaron rótulas plásticas en las columnas cuando la deriva global fue superior a 0.03.

Tabla 2.3 c) Ciclos de carga lateral cuando se genera daño en los elementos (cuatro primeras columnas), secuencia del daño (quinta y sexta columna) y secuencia de la formación de rótulas plásticas (dos últimas columnas)

Ciclo para M_y en NI	Ciclo para M_y en NJ	Ciclo para M_u en NI	Ciclo para M_u en NJ	Secuencia M_y en NI	Secuencia M_y en NJ	Secuencia M_u en NI	Secuencia M_u en NJ
136	0	181	0	4	0	4	0
128	0	180	0	3	0	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
190	8	0	130	6	1	0	1
182	40	0	141	5	2	0	2

Ahora si se desea saber al final del cálculo cuando se llegó a la deriva global igual a 0.04, las fuerzas y momentos en los elementos, se debe imprimir **Tabla 2**. Por cierto, el usuario del programa debe indicar al final del cálculo, antes de los gráficos lo que desea ver. En la tabla 2.3 d, se indican los valores de la fuerza axial N , del corte V , del momento M , en el nudo inicial; de la fuerza axial N' , del corte V' y del momento M' en el nudo final.

Tabla 2.3 d) Fuerza axial, corte y momento, en el nudo inicial y nudo final, al final del análisis. NC significa que modelo de cálculo no lo hallo, se debe encontrar por equilibrio.

Elemento	N (T.)	V (T.)	M (T.m)	N' (T.)	V' (T.)	M' (T.m)
1	4.34	4.64	16.31	-4.34	-4.64	-0.07
2	13.16	4.81	16.31	-13.16	-4.81	0.53
3	1.49	2.77	4.60	-1.49	-2.77	5.11

4	6.01	3.39	5.68	-6.01	-3.39	6.20
5	NC	2.85	-4.53	NC	7.15	-6.20
6	NC	1.49	-5.11	NC	6.01	-6.20

Al considerar que las vigas son axialmente rígidas, el modelo numérico de cálculo no obtiene la fuerza axial, por ese motivo se ha escrito NC, pero se puede hallar mediante equilibrio de elementos y juntas, manualmente.

iv) Curva de capacidad encontrada con teoría elástica e inelástica

En los primeros cursos de Estructuras, a nivel de pregrado, se calcula con teoría elástica, esto significa que la rigidez es constante, no cambia por más fuerza lateral que se la coloque, la rigidez de la estructura es la misma si se tiene grandes fuerzas laterales o pequeñas fuerzas laterales. Evidentemente que esto no es cierto, ya que, si se aplican fuerzas laterales altas a la estructura, esta se va a dañar y va a disminuir la rigidez. **Por lo tanto, la teoría elástica** es válida para pequeñas deformaciones.

Para grandes deformaciones se considera el daño en los elementos y la rigidez disminuye, esto se lo estudia en Teoría Inelástica o No lineal, y es lo que se ha visto en este capítulo; cuando se supera el momento de fluencia M_y , la rigidez disminuye y se calcula las nuevas rigideces a flexión con las ecuaciones 2.9 o con la 2.10.

En la figura 2.11 h, se presentan las dos curvas de capacidad, la una es lineal (rigidez no cambia. Teoría Elástica) y la otra es no lineal (rigidez cambia. Teoría Inelástica) En los dos análisis se aplicó las mismas fuerzas en cada ciclo de carga sin embargo de ello, en el modelo no lineal los desplazamientos laterales son mayores debido a que la rigidez disminuye.

Esta gráfica es la base para encontrar el factor de reducción de las fuerzas sísmicas R , con el cual se pasa del espectro elástico al inelástico y se habló ligeramente en el apartado 1.5, ver figura 1.18. De ahí la importancia de conocer estas dos gráficas.

v) Programa en CEINCI-LAB

El programa que se lista se halla en el archivo: ***Ej_8_Pushover_monotonico_ULEAM***

```

Código: Ejercicio 4, Pushover Monotónico
% Ej_8_Pushover_monotonico_ULEAM
%Tabla1 (datos para análisis No lineal)
%      Inicio      Medio      Final      Axial
%      de elem     de elem     de elem
%Tabla1=[(My)a (Mu)a (fiy)a (fiu)a (My)o (Mu)o (fiy)o (fiu)o (My)b (Mu)b (fiy)b (fiu)b EA
%      (My)a (Mu)a (fiy)a (fiu)a (My)o (Mu)o (fiy)o (fiu)o (My)b (Mu)b (fiy)b (fiu)b EA
%      ....
%      (My)a (Mu)a (fiy)a (fiu)a (My)o (Mu)o (fiy)o (fiu)o (My)b (Mu)b (fiy)b (fiu)b EA]
%ELEM (datos para análisis lineal)
%ELEM=[%Ela Elo Elb EA; de elemento 1
%      Ela Elo Elb EA;
%      Ela Elo Elb EA];
%.....Datos.....

```



```

%.....
clear; clc
format bank
Tabla1_Col=[12.2921 16.2826 .0082 .0282 12.2921 16.2826 .0082 .0282 12.2921 16.2826
.0082 .0282 374285.11;
    12.2921 16.2826 .0082 .0282 12.2921 16.2826 .0082 .0282 12.2921 16.2826 .0082
.0282 374285.11;
    11.1032 16.0937 0.0082 0.0282 11.1032 16.0937 0.0082 0.0282 11.1032 16.0937
0.0082 0.0282 374285.11;
    11.1032 16.0937 0.0082 0.0282 11.1032 16.0937 0.0082 0.0282 11.1032 16.0937
0.0082 0.0282 374285.11];
Tabla1_Viga1=[4.2845 6.1873 0.0116 0.0357 2.8978 4.4769 0.0110 0.0310 4.2845 6.1873
0.0116 0.0357 210535.37;
    4.2845 6.1873 0.0116 0.0357 2.8978 4.4769 0.0110 0.0310 4.2845 6.1873 0.0116
0.0357 210535.37];
Tabla1=[Tabla1_Col;Tabla1_Viga1];
ELEM=[12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 374285.11; %Ela Elo Elb EA de
elemento 1
    12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 374285.11;
    12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 374285.11;
    12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 12.2921/0.0082 374285.11;
    4.2845/0.0116 2.8978/0.0110 4.2845/0.0116 210535.37;
    4.2845/0.0116 2.8978/0.0110 4.2845/0.0116 210535.37];
%% Geometría del pórtico
NUDOS=[1 0.0 0.0 2 2 0.0 3.5;
    2 5.0 0.0 2 2 0.0 3.5];
GEN=[1 1 3 1 1 1 1;
    3 3 5 1 1 1 1;
    5 3 4 1 1 2 2];
Fm=[5 2.0; 6 1.5];%[N de miembro cargado , Carga repartida]-->Carga Muerta y Carga
Viva
nod=6;np=2;nr=2;
DeltaQ=0.05;%incremento de carga horizontal. La carga en cada piso es función de M, fi1,
DeltaQ
ND=1;%Nivel de diseño es para Espectro de Capacidad
[NI,NJ]=gn_portico(GEN); %Vector de nudo inicial y final
[X,Y]=glinea_portico(NUDOS); %Coordenadas X, Y de los nudos
%.....
%.....Programas.....
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr, Y);
%.....
% dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
% dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
[L,seno,coseno]=longitud (X,Y,NI,NJ);% Longitud, seno y coseno de elementos
[VC]=vc(NI,NJ,CG); %Vector colocación de elementos
mbr=length(L); %Número de miembros
Tabla2=zeros(mbr,6); %Se inicializa con ceros xq aun no se aplican cargas
Tabla3=zeros(mbr,8); %Se inicializa con ceros resultados de Pushover
icon=0;iconu=0;
Ht=max(Y); %Altura total
%.....Se inicia Pushover.....
%.....
[Mt,M]=masas(Fm,NI,Y,L,np); % Reporta matriz de masas M y masa total Mt
derg=0;Qa=zeros(np,1);j=0;cont1My=0;
VV=0;Dtt=0; %Para cálculo inelástico

```

```

VVE=0;DttE=0; %Para cálculo elástico
while j>=0 %Comienza bucle infinito, se detiene cuando la estructura colapsa
    j=j+1;

[K,icon,iconu,Tabla3,VC,ngl]=krigidez_giberson_po_2(ngl,Tabla1,Tabla2,Tabla3,L,seno,c
oseno,VC,icon,iconu,j);%Matriz de Rigidez
[KE]=krigidez_Giberson(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC);
if det(K)<=1e-10%Se detiene el calculo si la matriz es singular
    fprintf(' Matriz Singular --> Colapso por Estructura Inestable\n');
    [Q,V,Q2]=cargas_po(Qa(:,j),ngl,Fm,L,seno,coseno,VC); %Vector de cargas y cortante
basal
    Vac(j)=V+Vac(j-1);
    break
end
if j==2
    Fm(1:size(Fm,1),2)=zeros(size(Fm,1),1);
end
[Q,V,Q2]=cargas_po(Qa(:,j),ngl,Fm,L,seno,coseno,VC); %Vector de cargas y cortante
basal
q=K\Q; %Vector de coordenadas generalizadas inelastico
qE=KE\Q; %Vector de coordenadas generalizadas elástico
Dt=q(np); %Desplazamiento en el tope inelastico
DtE=qE(np); %Desplazamiento en el tope elastico
VV=VV+V;Dtt=Dtt+Dt; %Valores acumulados inelásticos
VVE=VVE+V;DttE=DttE+DtE; % Valores acumulados elásticos
derg=Dtt/Ht; %Deriva total
Vac(j)=VV;Dtac(j)=Dtt;% Vector de cortante y desplazamientos inelásticos
VacE(j)=VVE;DtacE(j)=DttE; % Vector de cortantes y desplazamientos elásticos
%.....Espectro de capacidad.....
[Sdd,Saa,fi1]=espe_cap(K,M,Mt,np,ngl,Dtt,VV);
if abs(derg)>=0.04%Se deja de calcular cuando se sobrepasa la deriva global límite
    fprintf(' Colapso por Deriva global>=0.04\n');
    Vac(j)=Vac(j-1);Dtac(j)=Dtac(j-1);
break
end
[FF(:,j)]=fuerzas_po_2(ngl,Tabla1,Tabla2,Tabla3,L,seno,coseno,VC,q,Q2);% F y M en
cada elem.

Tabla2=FF(:,j)+Tabla2;%Para siguientes ciclos de carga

% Iteración para encontrar el punto donde fluye el primer elemento
if icon>0 && cont1My<3
    cont1My=cont1My+1;
end
if cont1My==1
    cont1My=cont1My+1;
    DeltaQ=DeltaQ/100;
    Tabla2=Tabla2-FF(:,j-1);Tabla3=zeros(mbr,8);icon=0;iconu=0;
    j=j-2;
end
if cont1My==3
    cont1My=cont1My+1;
    DeltaQ=DeltaQ*100;
    Vac(j)=Vac(j-1);Dtac(j)=Dtac(j-1);

```

```

    Vacy=Vac(j-1);Dtacy=Dtac(j-1);FFy=FF(:,j-1);%Punto inmediatamente anterior a la
    fluencia
    end
    Qa(:,j+1)=(sum(M)'.*fi*DeltaQ)/sum(sum(M)'.*fi); %Cargas estáticas
    % Qa(:,j+1)=ones(np,1)*DeltaQ; %Si deseo aplicar cargas laterales constantes.
    %No hay equilibrio de fuerzas axiales xq el elemento es axialmente rígido
    end
    %.....
    %.....Resultados de Tabla3.....
    %.....
    Tabla3_para_V=Tabla3(:,1:4); %En Tabla3 en las 4 1ras columnas se reemplaza 0 por 1
    para no tener indices cero
    for i=1:size(Tabla3,1)*4
        if Tabla3_para_V(i)==0
            Tabla3_para_V(i)=1;
        end
    end
    fprintf(' Nudo_Inic Nudo_Final Nudo_Inic Nudo_Final Nudo_Inic Nudo_Final Nudo_Inic
    Nudo_Final\n');
    fprintf(' V_para_My V_para_My V_para_Mu V_para_Mu Secu_My Secu_My
    Secu_Mu Secu_Mu\n');%Los primeros términos indican el cortante basal donde el
    elemento llegó a My y Mu
    fprintf('%10.3f %10.3f %10.3f %10.3f %10.3f %10.3f %10.3f
    %10.3f\n',[Vac(Tabla3_para_V(:,1)),Vac(Tabla3_para_V(:,2)),Vac(Tabla3_para_V(:,3))',...
    Vac(Tabla3_para_V(:,4)),Tabla3(:,5:8)]);%Resultados de Tabla3
    %..... Las siguientes sentencias son Opcionales si se quiere ver
    Tabla3 % Ciclos de carga y secuencia de formación de rótulas plásticas
    Tabla2 % Fuerzas y Momentos en los elementos al final del análisis
    j % Ciclo de carga hasta el cual llegó el análisis
    %.....
    %.....Gráficos.....
    %.....
    hold off
    set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
    subplot(1,2,1);plot(Dtac,Vac(1,1:length(Dtac)), 'color','black');axis([0, max(Dtac), 0,
    max(Vac(1,1:length(Dtac)))]);grid minor;title('Curva V-Deformación terraza')
    subplot(1,2,2);
    set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
    title('Esquema de Estructura y de Rótulas')
    for i=1:mbr
        line([X(NI(i)) X(NJ(i))], [Y(NI(i)) Y(NJ(i))]) %Grafica a la estructura
        hold on
        if Tabla3(i,7)~=0 %Grafica las rótulas en nudo inicial
            plot(X(NI(i))+.05*L(i)*coseno(i), Y(NI(i))+.05*L(i)*seno(i), 'bs')
        end
        if Tabla3(i,8)~=0 %Grafica las rótulas en nudo final
            plot(X(NJ(i))-.05*L(i)*coseno(i), Y(NJ(i))-.05*L(i)*seno(i), 'bs')
        end
    end
    end
    axis([-0.5, max(X)*1.05, 0, max(Y)*1.05]);
    grid minor; hold off
    figure (2)
    plot (Dtac,Vac,DtacE,VacE)
    legend('Inelastico','Elastico');xlabel ('Dt (m)');ylabel ('V (T)')

```

2.4 ESTRUCTURAS DE ACERO

En estructuras de acero es más fácil el cálculo del momento y curvatura de fluencia. Esto se lo va a demostrar calculando este punto para la viga tipo "I" indicada a la izquierda de la figura 2.12 a.

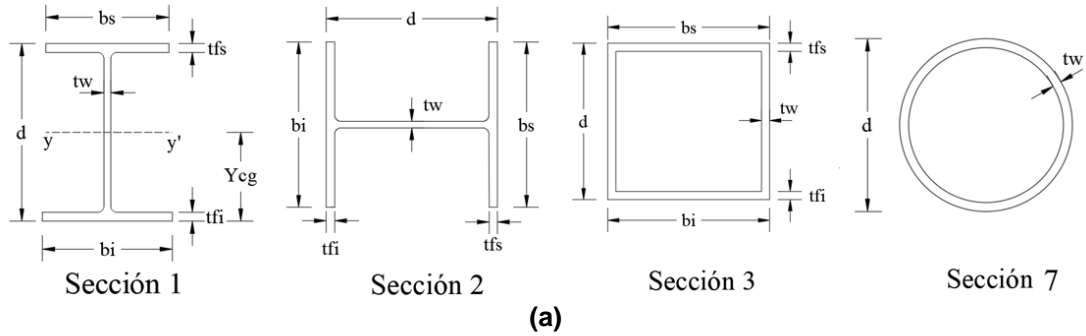


Figura 2.12 a) Secciones que considera el sistema de computación **CEINCI-LAB** para el análisis no lineal estático (Pushover).

2.4.1 Momento y curvatura de fluencia en perfil "I"

En base a la nomenclatura indicada para la Sección tipo 1, se determina a continuación el área de la sección transversal A , y el centro de gravedad de la sección Y_{cg} .

$$A = d * t_w + (b_s - t_w)t_{fs} + (b_i - t_w)t_{fi}$$

$$Y_{cg} = \frac{(b_s - t_w)t_{fs} * \left(d - \frac{t_{fs}}{2}\right) + d * t_w * \frac{d}{2} + (b_i - t_w)t_{fi} * \left(\frac{t_{fi}}{2}\right)}{A}$$

A continuación, se calcula el momento estático Z_i de la sección inferior (bajo el eje de referencia $y-y'$) y del momento estático Z_s de la parte superior al eje de referencia.

$$Y_s = d - Y_{cg}$$

$$Z_i = (b_i - t_w)t_{fi} * \left(Y_{cg} - \frac{t_{fi}}{2}\right) + Y_{cg} * t_w * \frac{Y_{cg}}{2}$$

$$Z_s = (b_s - t_w)t_{fs} * \left(Y_s - \frac{t_{fs}}{2}\right) + Y_s * t_w * \frac{Y_s}{2}$$

$$Z = Z_i + Z_s$$

El momento de fluencia M_y es igual al momento estático por el esfuerzo de fluencia f_y .

$$M_y = Z * f_y \quad (2.12)$$

Para calcular la curvatura de fluencia ϕ_y se necesita calcular primero el momento de inercia de la viga con respecto al eje Y (ver figura izquierda de 2.12 a)

$$I_y = \frac{(b_i - t_w)t_{fi}^3}{12} + (b_i - t_w)t_{fi} * \left(Y_{cg} - \frac{t_{fi}}{2}\right)^2 + \frac{(b_s - t_w)t_{fs}^3}{12} + (b_s - t_w)t_{fs} * \left(Y_s - \frac{t_{fs}}{2}\right)^2 + \frac{t_w d^3}{12} + d * t_w \left(\frac{d}{2} - Y_{cg}\right)^2$$

$$\phi_y = \frac{M_y}{E_s * I_y} \quad (2.13)$$

2.4.2 Rotación y Momento de fluencia

Para el caso de flexión en vigas, la rotación de fluencia se calcula con la siguiente ecuación.

$$\theta_Y = \frac{L z f_y}{6 E I_y} \quad (2.14)$$

Todas las variables han sido ya indicadas, por lo que a continuación se indica como se obtiene θ_Y para columnas.

$$\theta_Y = \frac{L z f_y}{6 E I} \left(1 - \frac{P}{P_{CL}}\right) \quad (2.15)$$

Donde P es la carga axial que gravita en la columna; P_{CL} es la carga crítica de pandeo. De acuerdo al ASCE 41, la carga crítica se calcula de la siguiente manera.

Se determina la relación L/r . Donde L es la longitud del elemento; r es el radio de giro. Se debe verificar que:

$$\frac{L}{r} \leq 108$$

Si la relación L/r es menor a 108; el esfuerzo del material F_{cr} es 12 (psi); caso contrario vale:

$$F_{cr} = \frac{1.4 * 10^5}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (psi)$$

Para pasar de (psi) a (T/m²) se debe multiplicar por 703.069. Finalmente, la carga crítica de pandeo se halla multiplicando el área de la sección transversal A , por F_{cr}

$$P_{CL} = A F_{cr}$$

Para columnas se tiene una reducción del momento de fluencia por la interacción carga-momento, la misma que viene dada por:

$$M_y = Z f_y \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \quad (2.16)$$

$$P_y = A * f_y$$

Ahora, hay importantes investigaciones, en las que indican que **cuando se trabaja con un modelo de plasticidad concentrada** se recomienda trabajar con M_{pr} en lugar de M_y (ATC 2017)

$$M_{pr} = C_{pr} R_y Z f_y \quad (2.17)$$

$$C_{pr} = \frac{f_y + f_u}{2 f_y} \leq 1.2 \quad (2.18)$$

Donde M_{pr} es el máximo momento probable en la rótula plástica; C_{pr} factor para tener en cuenta la capacidad máxima de la conexión, incluyendo el endurecimiento por tensión, restricciones locales, el refuerzo adicional y otras condiciones de conexión; R_y es la relación entre la tensión de fluencia esperada y la fluencia mínima. Las otras variables han sido ya indicadas.

Kitayama y Constantinou (2017) proponen calcular el **momento de fluencia en columna** con la siguiente ecuación.

$$M_y = \begin{cases} C_{pr} R_y Z f_y \left(1 - \frac{P}{2 P_{ye}} \right) & \text{si } \frac{P}{P_{ye}} \leq 0.2 \\ C_{pr} R_y Z f_y * \frac{9}{8} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}} \right) & \text{si } \frac{P}{P_{ye}} > 0.2 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$P_{ye} = R_y * A * f_y \quad y \quad C_{pr} = 1.15 \quad (2.20)$$

2.4.3 Importancia de la conexión para el cálculo del momento de fluencia

Evidentemente que no da lo mismo calcular el momento de fluencia en una viga que está soldada a una columna y en otra viga que tiene una conexión precalificada como la indicada en la figura 2.13, que tiene placas de flexión (horizontales, sobre y debajo de perfil) que tiene placa de corte soldada a la columna a tope y unida a la viga con pernos de alta resistencia A425.

Las placas de flexión de la conexión BFP, mostrada en la figura 2.13 tienen 30 mm, de espesor y una longitud de 50 cm, de tal manera que aportan al incremento de la flexión en el elemento. Este aporte se lo considera en el factor C_{pr} . **Para vigas de acero con conexiones precalificadas** el momento de fluencia se calcula de la siguiente manera en los programas de **CEINCI-LAB**

$$M_y = C_{pr} * Z * f_y \quad (2.21)$$

El valor de C_{pr} se encuentra con la ecuación (2.18). Ahora, en los programas de **CEINCI-LAB**, para columnas de acero con conexiones precalificadas, se tiene:

$$M_y = C_{pr} * Z * f_y \left(1 - \frac{P}{P_y} \right) \quad (2.22)$$

$$P_y = C_{pr} * A * f_y \quad (2.23)$$



Figura 2.13 Conexión Precalificada BFP (Bolted Flange Plate) en un nudo con placas de flexión y de corte apernadas al perfil IPE.

2.4.4 Tabla del ASCE/SEI para estructuras de acero

En la tabla 2.4 se presentan las relaciones propuestas por ASCE/SEI para encontrar la rotación última (valor **a**), rotación residual (valor **b**) y momento residual (valor **c**). Para ingresar a la tabla 2.4 se deben controlar algunas relaciones geométricas como $\frac{b_f}{2t_f}$, no hay problema con las unidades, pero en las relaciones donde interviene f_{ye} se debe colocar la fluencia del acero en ksi. Para pasar de T/m^2 a ksi, se debe multiplicar por 0.0014223316

La parte inferior de la tabla 2.4, corresponde a **columnas** (flexo compresión); primero se debe controlar la relación $\frac{P}{P_{CL}}$, donde P es la carga axial que gravita en la columna y P_{CL} es la carga crítica de pandeo. Cuando la relación $\frac{P}{P_{CL}} > 0.5$ debe calcularse como elementos sujetos solo a fuerza axial.

Una vez que se ha clasificado con el valor de $\frac{P}{P_{CL}}$, se pasa a controlar los parámetros relacionados con la geometría de la sección, en forma similar a lo que se hizo con las vigas y nuevamente es probable que se tenga que interpolar.

Tabla 2.4 Parámetros y criterios de aceptación para procedimientos no lineales en vigas y columnas de acero.

Vigas - Flexión	a	b	c
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ y } \frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{f_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0.6
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{f_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0.2
c. Otros	Interpolación lineal, se usará el resultado menor.		
Columnas - Flexión	a	b	c
Para $P/P_{CL} < 0.2$			
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ y } \frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{f_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0.6
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{f_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0.2
c. Otros	Interpolación lineal, se usará el resultado menor.		
Para $0.2 \leq P/P_{CL} \leq 0.5$			
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ y } \frac{h}{t_w} \leq \frac{260}{\sqrt{f_{ye}}}$	$11 \left(1 - \frac{5}{3} \frac{P}{P_{CL}}\right) \theta_y$	$17 \left(1 - \frac{5}{3} \frac{P}{P_{CL}}\right) \theta_y$	0.6
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{f_{ye}}} \text{ o } \frac{h}{t_w} \geq \frac{400}{\sqrt{f_{ye}}}$	$1\theta_y$	$1.5\theta_y$	0.2
c. Otros	Interpolación lineal, se usará el resultado menor.		

* Columnas con $P/P_{CL} > 0.5$ deberán ser controladas por fuerza axial.

2.4.5 Programas en CEINCI-LAB para encontrar relaciones momento curvatura

Se presentan tres programas con los cuales se encuentra la relación momento curvatura y momento rotación en los tres tipos de perfiles indicados en la figura 2.12, se destaca también que se puede trabajar con perfiles tubulares circulares (Tipo 7)

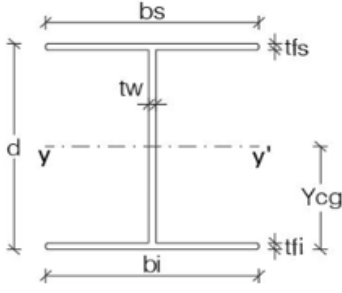
- **[Ely,EA,G,A_f,Z,A,I,S,alfa,tww,bss,My,fiy,tetay]=Geom_acero(Section,L,cpc)**

El programa **Geom_acero** determina para una sección de acero; la rigidez a flexión **Ely**, para una viga "I" en la figura 2.12, se indica el eje y-y' con respecto al cual se calcula el momento de inercia; **EA** la rigidez axial; **G** es el módulo de corte; **A_f** es el valor de la relación entre el área de la sección total y el área del alma del perfil; **S** es la relación entre el momento de inercia de la sección y el valor de Y_{cg} , distancia al centro de gravedad; **alfa** es la relación entre el área del alma para el área del ala; **tww** es el espesor del alma; **bss** es el ancho del perfil, **My** es el momento de fluencia; **fiy** es la curvatura de fluencia; **tetay** es la rotación de fluencia. El lector va a tener los programas y verá con mayor precisión el significado de algunas variables como **tww** de acuerdo al perfil.

La mejor forma de explicar los datos del vector **Section**, es con un ejemplo. En la tabla 2.5 se indica las dimensiones para una viga W30x99, y se muestra la nomenclatura. Normalmente el ancho y espesor del ala superior es igual al del

inferior, pero puede darse el caso de que sean diferentes, esta opción se contempla en el programa.

Tabla 2.5 Descripción de las secciones de los elementos estructurales. Fuente: Cagua *et al.* (2020)

	Color	Elemento	Dimensiones (mm) d x b x tf x tw
	SECCIÓN TIPO 1		Columnas <u>W30x173</u>
		Vigas <u>W30x99</u>	754x268x17x13

Material=1;Type=1;d=0.754;tw=0.013;bs=0.268;bi=0.268;tfs=0.017;tfl=0.017;
SectionW30x99=[Material,fy ,fu,Ey ,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfl];

Al vector **Section**, se ha denominado **SectionW30x99** pero se puede asignar cualquier nombre. Los datos que faltan por definir son: la fluencia del acero f_y , el esfuerzo de rotura del acero f_u , el módulo de elasticidad del acero E_y .

A más **Section** se debe indicar la longitud del elemento L y el coeficiente **cpc** que vale 1, cuando el nudo tiene conexión precalificada y vale 0 cuando no lo tiene.

- $[a,b,c,EA,My,fiy,Mu,fiu]=Mom_Rot_ASCE41_vigas(Section,L,Lp,M,teta,cpc)$

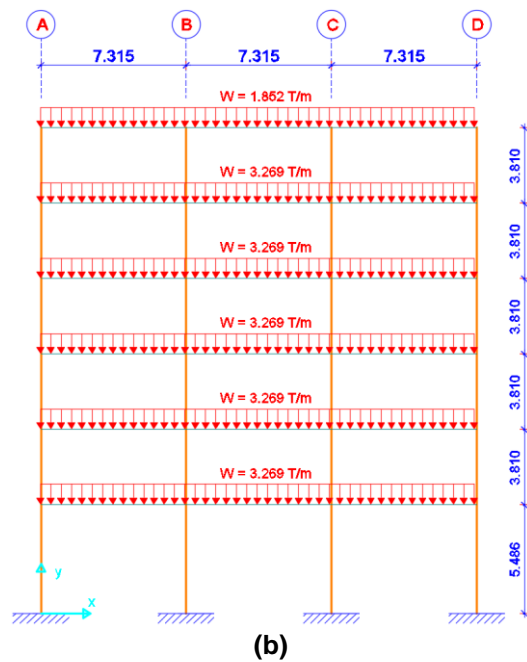
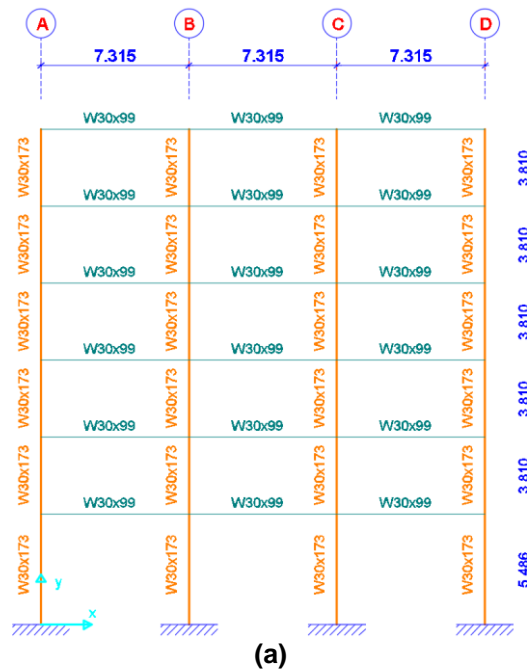
El programa **Mom_Rot_ASCE41_vigas** determina los momentos My, Mu , las curvaturas fiy, fiu , la rigidez axial EA y los valores a, b, c , indicados en la tabla 2.4, para flexión. Los datos de ingreso son el vector **Section**, explicado en la función anterior; la longitud del elemento L ; la longitud de la viga con daño Lp , el momento actuante M ; el giro actuante para el ciclo de carga $teta$ y el valor de **cpc** que vale la unidad si es conexión precalificada o vale 0 si no lo es.

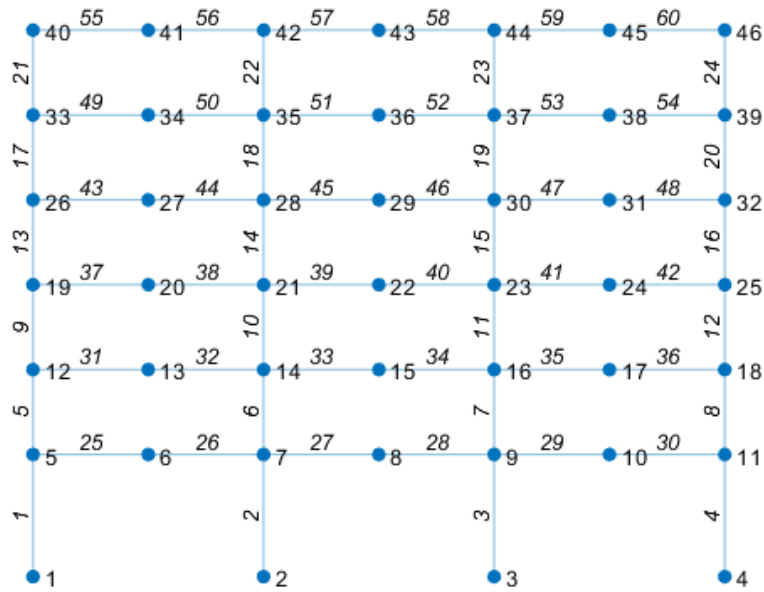
- $[a,b,c,EA,My,fiy,Mu,fiu]=Mom_Rot_ASCE41_columns(Section,L,Lp,M,Pa,teta,cpc)$

El programa **Mom_Rot_ASCE41_columns** determina el momento y la curvatura, al igual que la rigidez axial en columnas, el significado de las variables es el mismo de la función anterior al igual que los datos de entrada, faltando indicar Pa que es la carga axial actuante en la columna.

• EJEMPLO 5

Explicar con detenimiento la entrada de datos, para encontrar para encontrar la curva de capacidad sísmica resistente de la estructura de acero indicada en la figura 2.14 a, de seis pisos cuyas vigas son W30x99 y cuyas columnas W30x173 (ver tabla 2.5). La carga vertical actuante se indica en la figura 2.14 b, en la figura 2.14 c, se presenta la numeración de nudos y elementos.





(c)

Figura 2.14 a) Geometría de la estructura de acero de 6 pisos; b) Carga vertical para el primer ciclo de carga; c) Numeración de nudos y elementos.

• SOLUCIÓN

El programa desarrollado se llama: ***Ej_acero_sin_diagonales*** y se encuentra en la carpeta ***Pushover Elemental*** de la partición de Research Gate del primer autor, pero también se logra tener el programa completo, uniendo las sentencias que se van a ir indicando a continuación, de la entrada de datos y añadir los cálculos, cuyas sentencias son las mostradas en el Pushover del pórtico de hormigón armado de 2 pisos.

El primer grupo de datos conduce al cálculo del momento y curvatura en los puntos Y, U, de las vigas y columnas de acero. Los mismos que han sido agrupados en 2 vectores ***Tabla1_col*** y ***Tabla1_Viga***. Se recuerda que en el Pushover Elemental para cada elemento se debe indicar:

$$(M_y)_a \quad (M_u)_a \quad (\phi_y)_a \quad (\phi_u)_a \quad (M_y)_o \quad (M_u)_o \quad (\phi_y)_u \quad (\phi_u)_u \quad (M_y)_b \quad (M_u)_b \quad (\phi_y)_b \quad (\phi_u)_b \quad EA$$

Código: Ejercicio 4

```

Ey=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad del acero en T/m2
fy=25310.505; %Esfuerzo de fluencia en T/m2
fu=40778.036; %Esfuerzo último en T/m2
Material=1;Type=1;d=0.754;tw=0.013;bs=0.268;bi=0.268;tfs=0.017;tfi=0.017;
SectionW30x99=[Material,fy,fu,Ey,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi];
Material=1;Type=1;d=0.773;tw=0.017;bs=0.381;bi=0.381;tfs=0.027;tfi=0.027;
SectionW30x173=[Material,fy,fu,Ey,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi];
teta=0;M=0;Lp=0;Lv=7.31/2; % Lp longitud de rótula plástica; L longitud del elemento
cpc=1; % Si la conexión es precalificada cpc es igual a 1, caso contrario cero

```

```
Pa=0;Lc=3.5; % Carga axial nula en columna
[av,bv,cv,EAv,Myv,fiyv,Muv,fiuv]=Mom_Rot_ASCE41_Vigas(SectionW30x99,Lv,Lp,M,teta,
cpc); %Vigas
[ac,bc,cc,EAc,Myc,fiyc,Muc,fiuc]=Mom_Rot_ASCE41_columnas(SectionW30x173,Lc,Lp,
M,Pa,teta,cpc);
Tabla1_Col=[Myc Muc fiyc fiuc Myc Muc fiyc fiuc Myc Muc fiyc fiuc EAc];
Tabla1_Viga=[Myv Muv fiyv fiuv Myv Muv fiyv fiuv Myv Muv fiyv fiuv EAv];
```

Una vez que se han indicado los momentos de fluencia, último, curvatura de fluencia, última en el nudo inicial, centro de luz y nudo final, y la rigidez axial se dan los datos que conducen a obtener un Pushover estático. Esto es opcional, si solo se desea la curva de capacidad sísmica resistente hallada con un análisis estático no lineal, no se requieren estos datos.

Código: Ejercicio 4

```
ELEM_Col=[Myc/fiyc Myc/fiyc Myc/fiyc EAc];
ELEM_Viga=[Myv/fiyv Myv/fiyv Myv/fiyv EAv];
```

Al dividir el momento en el punto de fluencia para la curvatura en el punto de fluencia se determina la rigidez a flexión EI , para el modelo de Giberson se necesita:

$$(EI)_a \quad (EI)_o \quad (EI)_b \quad EA$$

Tanto el momento y curvatura como la rigidez a flexión, se debe dar de cada elemento, esto se lo hace más adelante con un pequeño programa que se indicará.

Ahora se debe definir la geometría, esto se consigue con dos datos que son:

Código: Ejercicio 4

```
sv=[7.315;7.315;7.315]; % Luces de los vanos
sp=[5.486;3.810;3.810;3.810;3.810;3.810]; % Alturas de cada piso
```

Se destaca que con solo **sv** y **sp** a secas sirve para pórticos regulares en altura. A continuación, se indica el elemento cargado y la carga uniforme distribuida, para eso se debe tener en cuenta la numeración de elementos mostrada en la figura 2.14 c, y la carga vertical que se encuentra en la figura 2.14 b.

Código: Ejercicio 4

```
Fm=[25 3.269; 26 3.269; 27 3.269; 28 3.269; 29 3.269; 30 3.269;
31 3.269; 32 3.269; 33 3.269; 34 3.269; 35 3.269; 36 3.269;
37 3.269; 38 3.269; 39 3.269; 40 3.269; 41 3.269; 42 3.269;
43 3.269; 44 3.269; 45 3.269; 46 3.269; 47 3.269; 48 3.269;
49 3.269; 50 3.269; 51 3.269; 52 3.269; 53 3.269; 54 3.269;
55 1.8517; 56 1.8517; 57 1.8517; 58 1.8517; 59 1.8517; 60 1.8517;];
```

Ahora se obtiene el número de vanos, **nv**, número de pisos **np**, el número total de elementos **nudt**, el número total de columnas **nudcol**, el número total de vigas **nudvg**, el número de nudos **nod** y el número de nudos restringidos **nr**, con la función **geometría_nudo_viga**. Los datos de entrada son los vectores **sv** y **sp**

Código: Ejercicio 4

```
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
```

Para la entrada de datos de las propiedades de cada elemento solo se necesita conocer el número total de elementos **nudt** y el número total de columnas **nudcol**,

Código: Ejercicio 4

```
Tabla1=zeros(nudt,13);

for e=1:nudt
    if e<=nudcol
        Tabla1(e,1:13)=Tabla1_Col;
    else
        Tabla1(e,1:13)=Tabla1_Viga;
    end
end
for e=1:nudt
    if e<=nudcol
        ELEM(e,1:4)=ELEM_Col;
    else
        ELEM(e,1:4)=ELEM_Viga;
    end
end

DeltaQ=0.05;%incremento de carga horizontal. La carga en cada piso es función de M, fi1,
DeltaQ
```

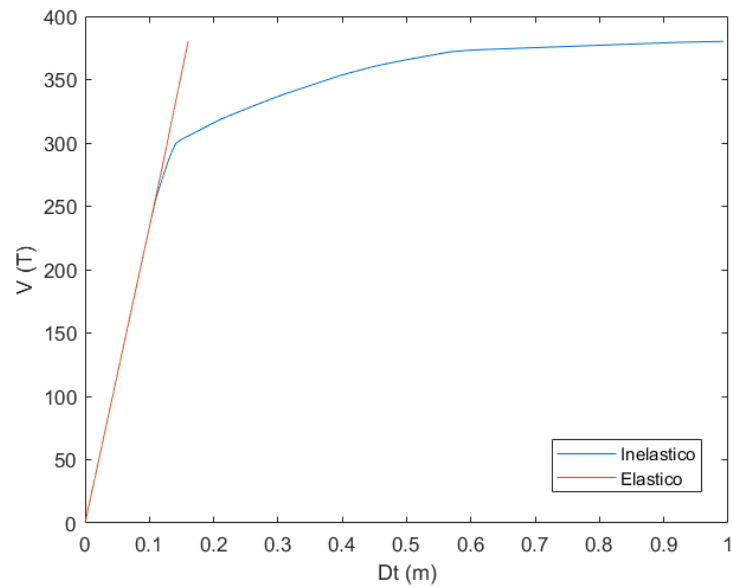
Con esto se tiene:

$$(M_y)_a \quad (M_u)_a \quad (\phi_y)_a \quad (\phi_u)_a \quad (M_y)_o \quad (M_u)_o \quad (\phi_y)_u \quad (\phi_u)_u \quad (M_y)_b \quad (M_u)_b \quad (\phi_y)_b \quad (\phi_u)_b \quad EA$$

En todos los elementos en la matriz denominada **Tabla1**. Adicionalmente se tiene:

$$(EI)_a \quad (EI)_o \quad (EI)_b \quad EA$$

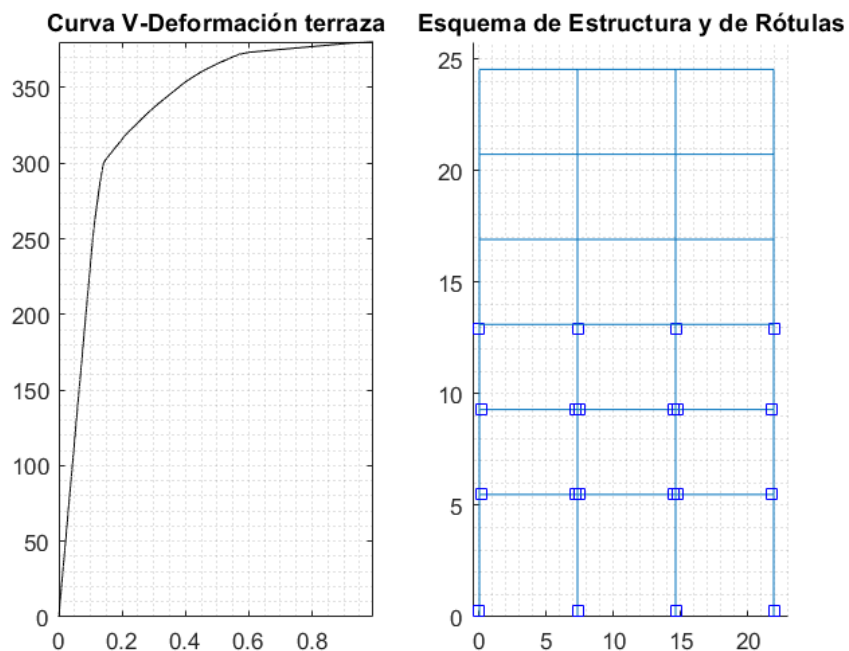
En todos los elementos en la matriz denominada **ELEM**, el resto de sentencias, son las mismas del ejemplo del Pushover en el pórtico de hormigón armado de 2 pisos.



(a)

Figura 2.15 a) Curva de capacidad sísmica de estructura de acero de 6 pisos, hallada con modelo elástico en que no cambia la rigidez de los elementos y con modelo inelástico en que cambia la rigidez de los elementos.

En la figura 2.15 a, se presenta la curva de capacidad sísmica de la estructura, ante cargas monotónicas proporcionales al primer modo de vibración, encontradas con los dos modelos: elástico, sin cambiar la rigidez de los elementos e inelástico cambiando la rigidez de los elementos de acuerdo al grado de daño.



(b)

(c)

Figura 2.15 b) Curva de capacidad sísmica resistente con análisis no lineal elástico; b) ubicación de rótulas plásticas en los elementos para una deriva global $\gamma_g = 0.05$

3. PUSHOVER NIVEL 1 CON CEINCI-LAB

3.1 ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO

En la sección anterior se realizó el Pushover en una estructura de hormigón armado, de un vano y dos pisos, sin modificar las relaciones momento curvatura, las mismas que fueron obtenidas utilizando la propuesta del ASCE/SEI 41, propuesta que toma en cuenta la carga axial que gravita en las columnas, que va cambiando durante el análisis.

Por otra parte, para pasar de la rotación a la curvatura se requiere saber la longitud de daño L_p que es función de los momentos actuantes M_i (en el nudo inicial) y M_j (en el nudo final) para el modelo de análisis. Estas tres variables cambian durante el análisis del Pushover y por donde cambia su curvatura.

En el ejemplo que se desarrolla en este apartado, se trabaja con el modelo de Giberson y como se indicó las relaciones momento curvatura se obtienen con modelo de Park (1985) para el punto de fluencia y con ASCE/SEI los puntos U y R. En la curva 3.1, se indica el modelo constitutivo con el que se está trabajando en función del momento M , y de la curvatura ϕ ; en la figura 3.1 al lado derecho, se presenta el diagrama con los coeficientes **a**, **b**, **c**, como lo propone el ASCE/SEI, en el eje X, se tiene rotaciones o desplazamientos. Mora (2015).

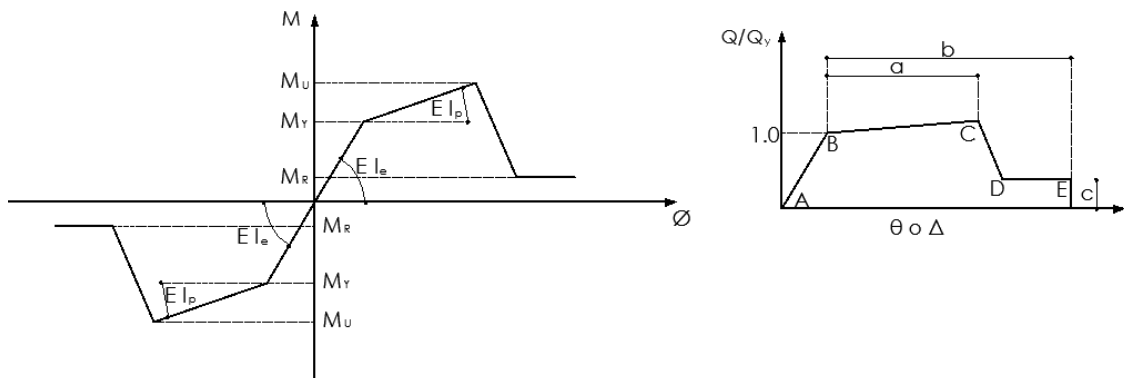


Figura 3.1 Modelo Bilineal para la relación Momento-Curvatura, con que trabaja **CEINCI-LAB** para Pushover en Nivel Elemental y 1.

3.1.1 Programas para hallar la relación Momento-Curvatura y Momento-Rotación

Los programas para hallar la relación momento curvatura y momento rotación en vigas se llama: **Momento_Rotacion_AceroASCE41B**, y **Momento_Rotacion_AceroASCE41C**, para columnas; llama la atención que en los nombres aparezca la palabra **Acero** y esto se debe a que estos programas calculan la relación momento curvatura de elementos de hormigón armado y acero siguiendo los lineamientos del ASCE/SEI 41 presentados en el Capítulo anterior.

- **Hormigón Armado**

La información para definir las secciones de las vigas y columnas de los elementos de hormigón armado, se indican en la tabla 3.1 y en la figura 3.2. De igual manera se indican tres vectores de datos por cada elemento, para el nudo inicial, centro de luz y nudo final, con los datos indicados en la tabla 3.1, para el caso de vigas o columnas de hormigón armado. Estos tres vectores se dan en **Table1**

En la tabla 3.1, se tiene: **Tipo de material** es una variable indicadora que vale 1 para elementos de hormigón armado y 0 para elementos de acero. Otra variable indicadora es **Tipo de sección** que vale 1 para vigas y columnas de hormigón armado; posteriormente se indica los valores de esta variable para algunos perfiles de acero.

Aspecto fundamental es que los vectores de datos deben tener el mismo número de columnas, caso contrario va a reportar error (En Matlab todas las filas de una matriz deben tener el mismo número de columnas). En vigas solo se indica la armadura longitudinal superior e inferior, pero en columnas a más de lo indicado se indica la armadura intermedia. Por lo tanto, para que los vectores tengan el mismo número de columnas se colocan ceros.

Tabla 3.1 Datos para describir una sección de una viga o columna de hormigón. Fuente: Aguiar *et al.* (2016).

Nombre de la sección	=	Tipo de material	f_c	E_y	f_y	Tipo de sección	h	b	b_w	t_f
A definir por el usuario	=	Según Tabla 1	Resistencia del hormigón	Módulo de Young del acero de refuerzo	Resistencia del acero de refuerzo	Según tabla 1	Alto de la sección	Ancho de la sección	Espesor del alma	Espesor de la alas

d'	A_{s_sup}	A_{s_inf}	Stirrup separation	A_v	A_{s1}
Recubrimiento o alto efectivo a compresión	Area de acero superior	Area de acero inferior	Separación de estribos	Area de las ramas de estribos	Area de acero en el medio de la sección en el caso de columnas

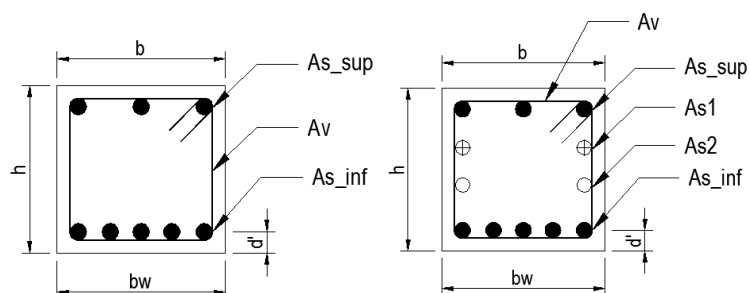


Figura 3.2 Nomenclatura de vigas (izquierda) y columnas (derecha) de hormigón armado.

• Acero

Para definir una sección de acero, sea una viga o columna, se utilizarán los campos indicados en la tabla 3.2. En la figura 3.3, se indica las secciones transversales consideradas, con su respectiva nomenclatura. De igual manera se debe cumplir que el número de columnas de la matriz de datos sean los mismos

Tabla 3.2 Datos para describir una sección de una viga o columna de acero. Fuente: Aguiar *et al.* (2016).

Nombre de la sección	=	Tipo de material	f_y	f_u	E_y	Tipo de sección	d	t_w	b_s	b_i	t_{fs}	t_{fi}
A definir por el usuario	=	Según Tabla 1	Límite elástico del acero	Esfuerzo último del acero	Módulo de Young	Según tabla 1	Alto de la sección	Espesor del alma	Ancho superior de las alas	Ancho inferior de las alas	Espesor superior de las alas	Espesor inferior de las alas

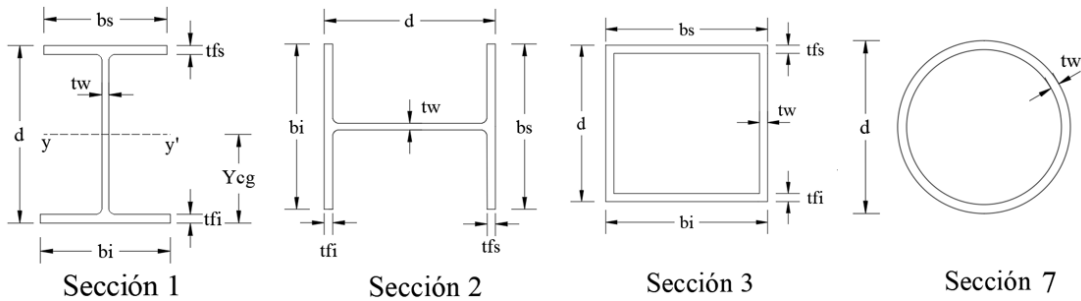
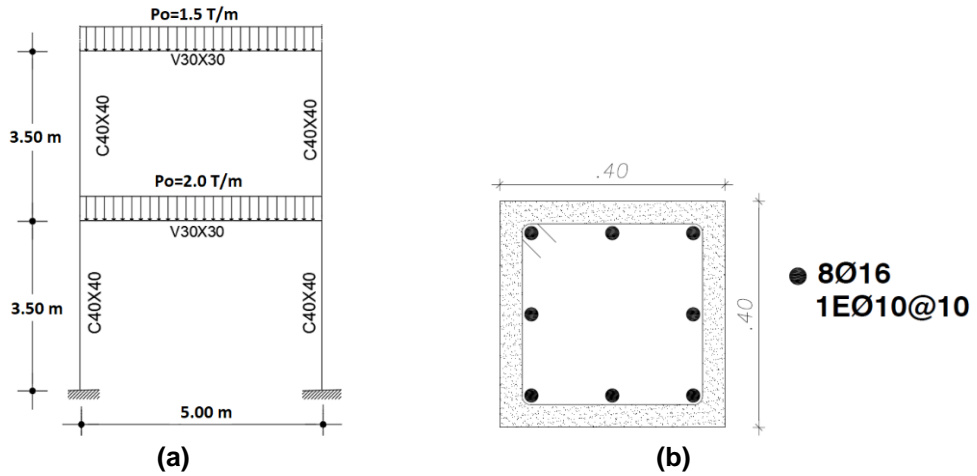


Figura 3.3 Secciones transversales consideradas, para elementos de acero.

• EJEMPLO 1

Describir la entrada de datos para encontrar la curva de capacidad sísmica resistente de la estructura de hormigón armado que se indica en la figura 3.4, la misma que se resolvió en el capítulo anterior sin cambiar las relaciones momento-curvatura; ahora se pide que en cada ciclo de carga se obtengan las relaciones momento curvatura de acuerdo a la carga axial que va variando en las columnas y a la longitud de las zonas que se van dañando.



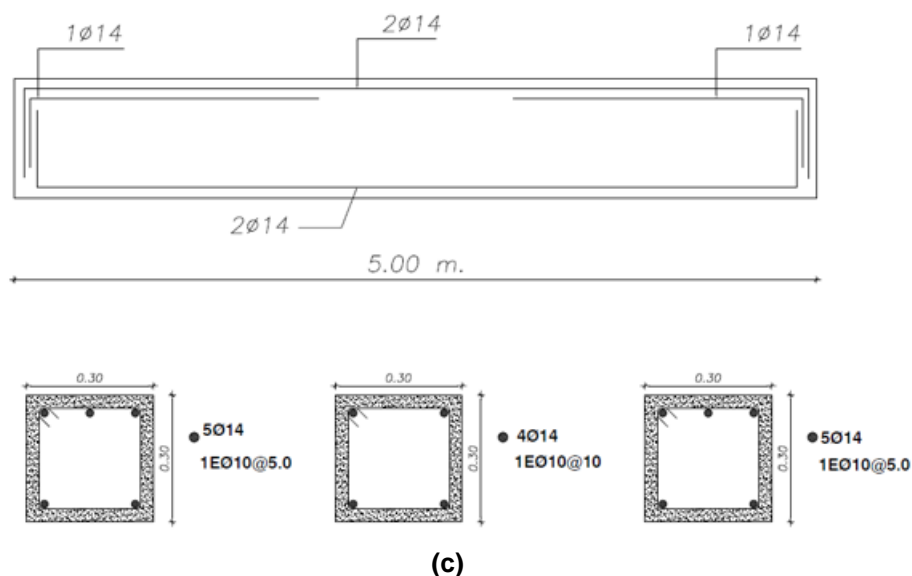


Figura 3.4 a) Estructura de hormigón armado de 2 pisos con $f'_c = 240 \frac{kg}{cm^2}$; b) Armadura de columna tipo; c) Armadura de viga tipo.

• SOLUCIÓN

El archivo, que resuelve el Ejemplo se llama: **Ej_portico_hormigon** y se halla en la carpeta **Pushover Nivel 1**. Las primeras instrucciones son las siguientes (ver figura 3.4 b y Tabla 3.1. Nótese que el archivo **Col40x40** tiene 15 columnas, luego si los otros archivos no tienen 15 columnas se completa con ceros.

Código de CEINCI-LAB: Pórtico de Hormigón Armado

```
% Ej_portico_hormigon
%Unidades en T-m
fpc=2400;
Ey=151000*(fpc/10)^0.5;%Steel modulus of elasticity
fy=42000;%Debería ser por 1.25 %Yield steel stress
Material=2;Type=1;h=0.4;b=0.4;bw=0.4;tf=0;dp=0.06;As=3*0.016^2*pi/4;
Asp=3*0.016^2*pi/4;S=0.1;Av=2*0.01^2*pi/4;As1=2*0.016^2*pi/4;
Col40x40=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,As1];
```

La variable denominada **Material=2** para elementos de hormigón armado y **Material=1** para elementos de acero. Por otro lado, para columnas y vigas rectangulares el **Tipo=1**. El último dato As1 es la armadura intermedia de la columna. A continuación, se dan dos archivos, uno para la armadura de la viga en el nudo inicial (**Vig30x30Extr**) y otro para el centro de luz (**Vig30x30Med**)

Código de CEINCI-LAB: Pórtico de Hormigón Armado

```
Material=2;Type=1;h=0.3;b=0.3;bw=0.3;tf=0;dp=0.06;As=2*0.014^2*pi/4;
Asp=3*0.014^2*pi/4;S=0.1;Av=2*0.01^2*pi/4;
Vig30x30Extr=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,0];

Material=2;Type=1;h=0.3;b=0.3;bw=0.3;tf=0;dp=0.06;As=2*0.014^2*pi/4;
```

```
Asp=2*0.014^2*pi/4;S=0.1;Av=2*0.01^2*pi/4;
Vig30x30Med=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,0];
```

La variable **dp** es el recubrimiento. En este caso los vectores **Vig30x30Extr**, **Vig30x30Med**, tienen 14 columnas, pero el vector de datos **Col40x40**, tiene 15 columnas. Por esta razón en los vectores que contienen los datos de la viga se coloca al final un cero, para así tener 15 columnas. A continuación, en la matriz de datos **Table1** se indican tres vectores con los datos de la geometría de las secciones en el nudo inicial, centro de luz y nudo final; esto se da para cada elemento; la instrucción **repmat** facilita la entrada de datos (repite los datos, entre corchetes se indica cuantas veces se desea repetir y el ancho del campo).

Código de CEINCI-LAB: Pórtico de Hormigón Armado

```
Table1=[
repmat([Col40x40,Col40x40,Col40x40],[4,1]);%elem 1 to 4
repmat([Vig30x30Extr,Vig30x30Med,Vig30x30Extr],[2,1])%elem 5 and 6
];
```

Se está trabajando con el modelo de plasticidad de Giberson, con este modelo no se puede considerar nudo intermedio en la viga, por lo que la entrada de datos tendiente a obtener las coordenadas de los nudos **X, Y**, y de los vectores que contienen al nudo inicial y final **NI, NJ**, de los elementos, es como sigue. (Se recomienda ver el Capítulo 15 para comprender la entrada de datos)

Código de CEINCI-LAB: Pórtico de Hormigón Armado

```
GEN=[1 1 3 3 1 1 1
      5 3 4 1 1 2 2];
NODE=[1 0 0 2 2 0 3.5
      2 5 0 2 2 0 3.5];
[NI,NJ]=gn_portico(GEN);
[X,Y]=glinea_portico(NODE);
nod=6;nr=2;np=2;
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y);
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
```

Ahora se indica, la carga vertical que actúa en los elementos; para ello se da el número del elemento cargado y el valor de la carga uniforme distribuida en el arreglo **Fm**

Código de CEINCI-LAB: Pórtico de Hormigón Armado

```
%Cargas en los elementos
Fm=[5 2
    6 1.5];
```

A continuación, en el programa **Structure_Geom_2D_v2** se generan los datos de la estructura como longitud, seno y coseno de cada uno de los elementos; el vector de colocación; información que se necesita para en el Programa **Pushover_2** realizar el análisis no lineal estático (Pushover). La siguiente sentencia es: **maxderg** que es la deriva global máxima hasta la cual se realiza el cálculo en este caso hasta $\gamma_g = 0.04$. También se indica la deriva de piso máxima admisible en el análisis **LimitDrift** que se ha colocado 4, significa que la deriva máxima de piso es $\gamma = 0.04$

En resumen, se indica **maxderg** y **LimitDrift** en **porcentaje**.

Código de CEINCI-LAB: Pórtico de Hormigón Armado

```
%-----Used Programs-----
Structure_Geom_2D_v1%Define structure geometry
maxderg=4;LimitDrift=4;
Pushover_2%Define Capacity Curve
plot(Dtac,Vac(1,1:length(Dtac)),'color','black','LineWidth',2);
```

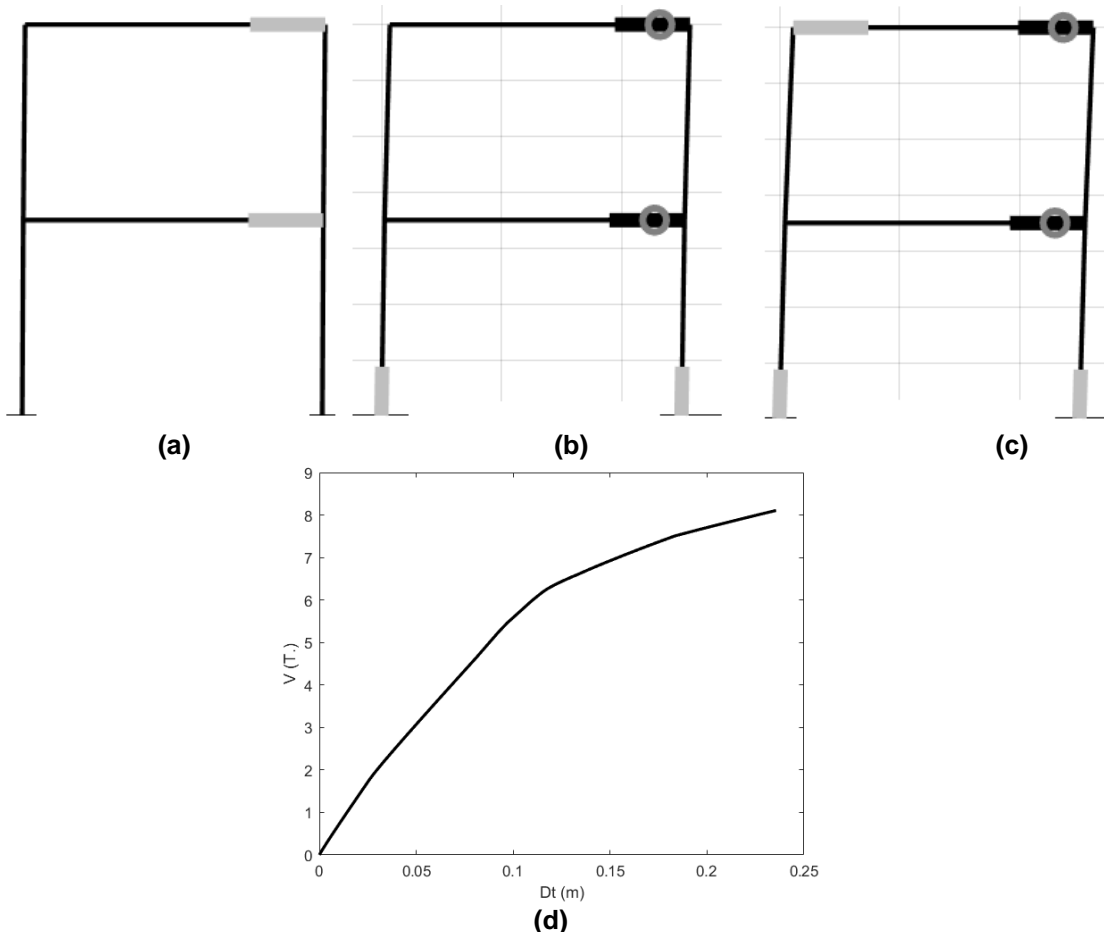


Figura 3.5 a) Las vigas en el nudo final sobrepasan el momento de fluencia; b) las columnas de planta baja en el nudo inicial sobrepasan el momento de fluencia y las vigas en el nudo final sobrepasan el momento último y se forman rótulas plásticas; c) La viga superior en el nudo inicial sobrepasa el momento de fluencia; d) Curva de capacidad sísmica resistente.

Los criterios de colapso, con el cual se da por terminado el Pushover, están indicados en la función **Pushover_2** y son los siguientes:

- i) El determinante de la matriz de rigidez es negativo (Línea 45)
- ii) Se llegó a la deriva máxima global (Línea 66)
- iii) Si se alcanza la deriva de piso (Línea 71)
- iv) Si la curva de capacidad sísmica empieza a retroceder (Línea 109)

Estas líneas pueden cambiar dependiendo si se hace o no modificaciones al programa **Pushover_2**, por lo que su carácter es referencial.

El programa reporta la secuencia como las diferentes secciones de la estructura van llegando y sobrepasando el momento de fluencia y después el momento último para formarse rótula plástica, identificado con un círculo. En las figuras 3.5 a, b, c, se indica la secuencia como la estructura se va dañando. El programa también va deformando a la estructura.

Finalmente, en la figura 3.5 d, se indica la curva de capacidad sísmica resistente de la estructura, se deja al lector que compare esta curva con la que se obtuvo en el capítulo anterior.

• EJEMPLO 2

En la estructura de hormigón amado indicada en la figura 3.6 a; las columnas exteriores son rectangulares y la central es cuadrada; las vigas son pérdidas en la losa (vigas banda) y tienen un peralte de 25 cm y 40 cm de ancho. Considerar que la deriva global máxima es $\gamma_g = 0.04$ y $\gamma = 0.04$

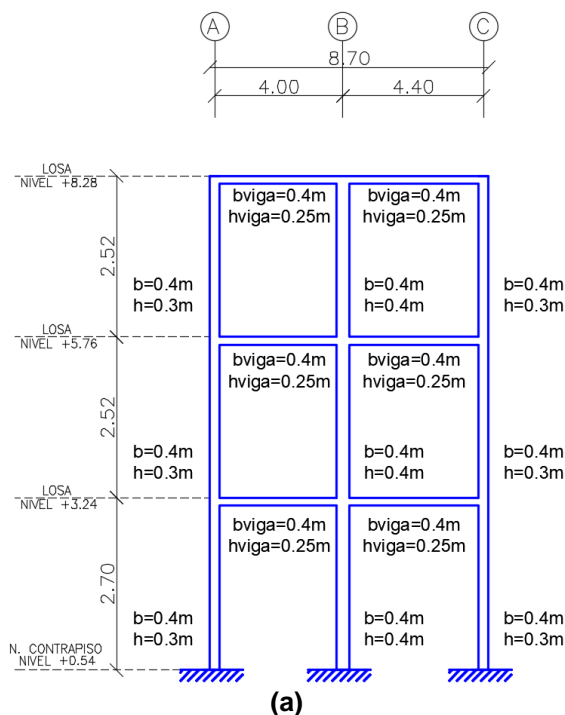
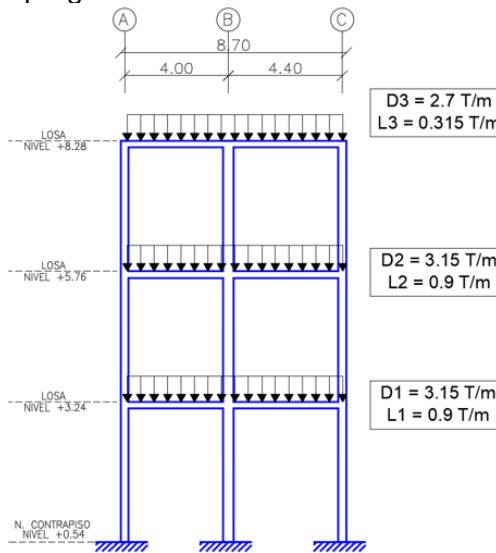


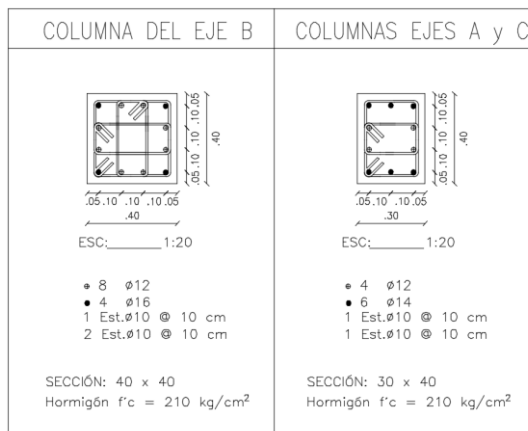
Figura 3.6 a) Geometría del Pórtico a analizar con vigas rectangulares, cuadradas y vigas banda.

En la figura 3.6 b, se presenta la carga muerta D y la carga viva L, en cada uno de los pisos, es carga uniforme distribuida, para el Pushover considerar el 25% de la carga viva. En la figura 3.6 c, se observa la armadura longitudinal y transversal de las columnas y en la figura 3.6 d, se tiene el armado de las vigas. El recubrimiento para vigas y columnas es de 5 cm. El hormigón tiene una resistencia a la compresión $f'_c = 210 \frac{kg}{cm^2}$. Calcular el módulo de elasticidad con la siguiente ecuación $E = 12000 \sqrt{f'_c}$ en $\frac{kg}{cm^2}$. No se detalla el armado debido a que lo está muy explícito en las figuras. Se pide presentar:

- i) La secuencia como las secciones van ingresando al rango no lineal.
- ii) La curva de capacidad sísmica resistente de la estructura
- iii) Las curvas de capacidad que relacionan el cortante de piso con el desplazamiento de piso.
- iv) En base a los resultados del numeral anterior, encontrar la rigidez de piso.
- v) Indicar el programa utilizado.

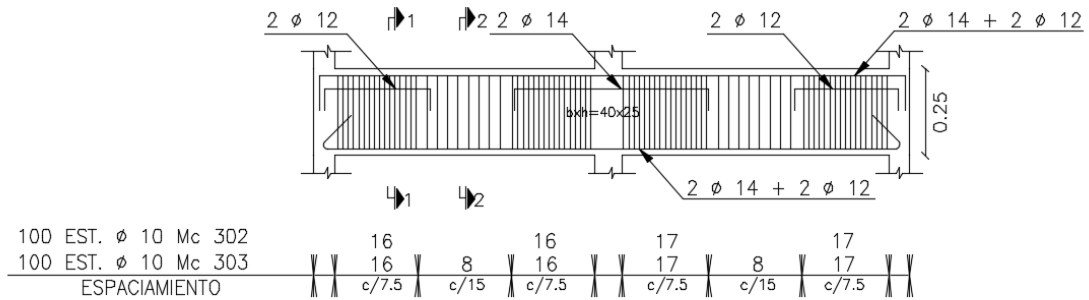


(b)



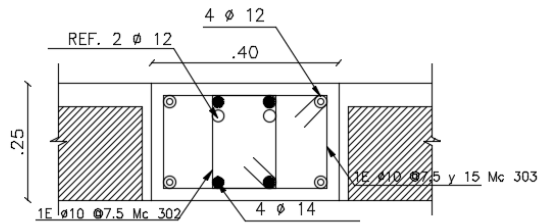
(c)

Figura 3.6 b) Carga vertical uniforme repartida que gravita en cada piso; c) Armadura longitudinal y transversal de las columnas.



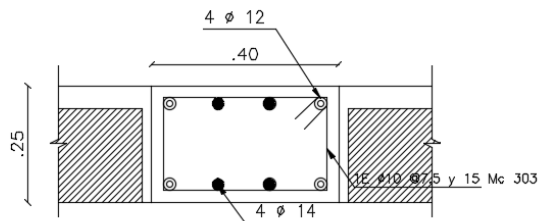
DETALLE DE ARMADURA LONGITUDINAL

ESC.H.: _____ 1:100
ESC.V.: _____ 1:20



VIGA BANDA 40X25 CORTE 1-1

ESCALA: _____ 1:10



VIGA BANDA 40X25 CORTE 2-2

ESCALA: _____ 1:10

(d)

Figura 3.6 d) Armadura longitudinal de la viga banda tipo con cortes en los extremos y centro de luz.

• SOLUCIÓN

i) Secuencia de formación de ingreso de secciones a rango ni lineal

Para no alargar la exposición se presentan solo tres gráficas de la secuencia con que las secciones ingresan al rango no lineal. En la figura 3.7 a, se ve que los nudos exteriores de las vigas han superado el momento de fluencia; esto es lo que se espera en un diseño sísmico, que primero ingresen al rango no lineal las vigas y en la mayor parte de sitios.

En la figura 3.7 b, se presenta un estado de daño en el cual algunos elementos han superado el momento último (color negro) y en otros han llegado al momento de reserva y se ha formado una rótula plástica; en la figura 20.7 c, se muestra el estado en que queda la estructura una vez que ha llegado a una deriva global de 0.04.

En la figura 3.7 d, se observa el diagrama momento-curvatura y la simbología empleada para indicar el daño, con color gris claro se tiene cuando la sección llega a M_y para luego sobrepasarlo; con color negro cuando se pierde la resistencia ante cargas laterales, llega a M_u . Finalmente, el círculo significa que la sección terminó con la reserva residual y se forma una rótula plástica.

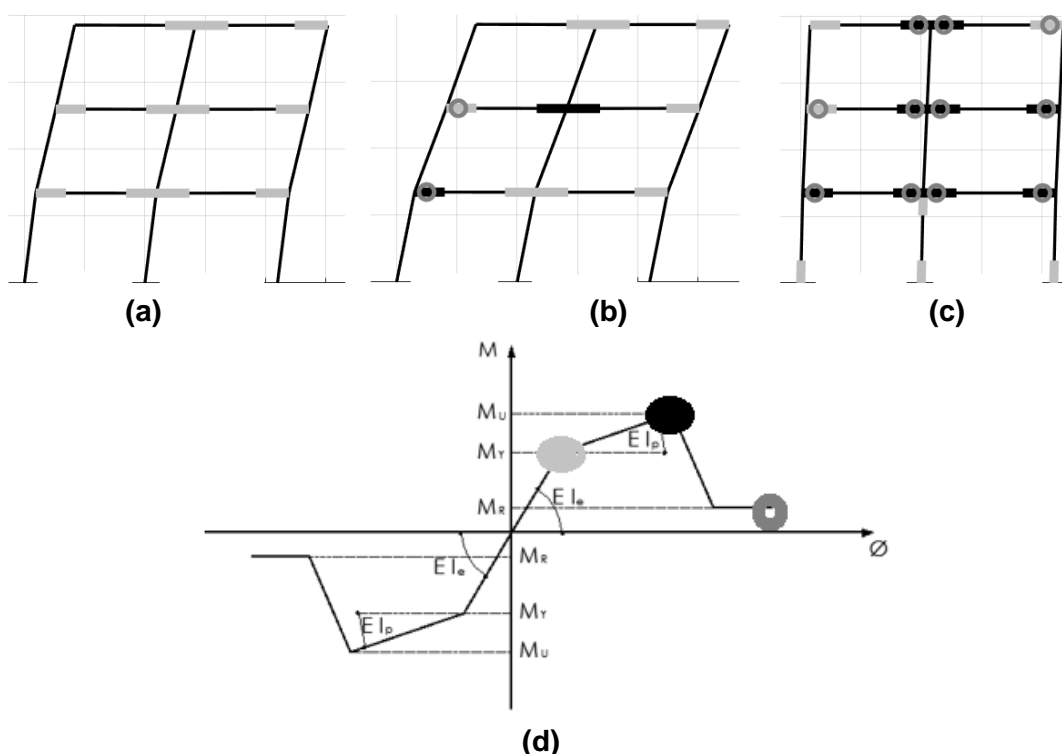


Figura 3.7 a) La mayor parte de las vigas han superado el momento de fluencia; b) Vigas centrales del segundo piso, llegaron al punto U (pérdida de resistencia a carga lateral) y las vigas con círculo llegaron al momento residual; c) Estado final de daño; d) Significado de colores y formas de daño.

ii) Curva de capacidad sísmica de la estructura

La curva de capacidad sísmica resistente de la estructura se muestra en la figura 3.7 e. En los vectores **Dtac**, **Vac**, se tiene los desplazamientos y cortantes acumulados con los cuales se halla la gráfica. Al analizar la curva se ve que en el último tramo se incrementa la rigidez de la estructura, ya que la pendiente es mayor que en el tramo anterior, que es casi recto. Por lo tanto, se recomienda no considerar el último tramo, se recuerda que, en el rango no lineal, cuando la estructura sufre demasiado daño ante una mínima fuerza lateral esta se desplaza lateral bastante.

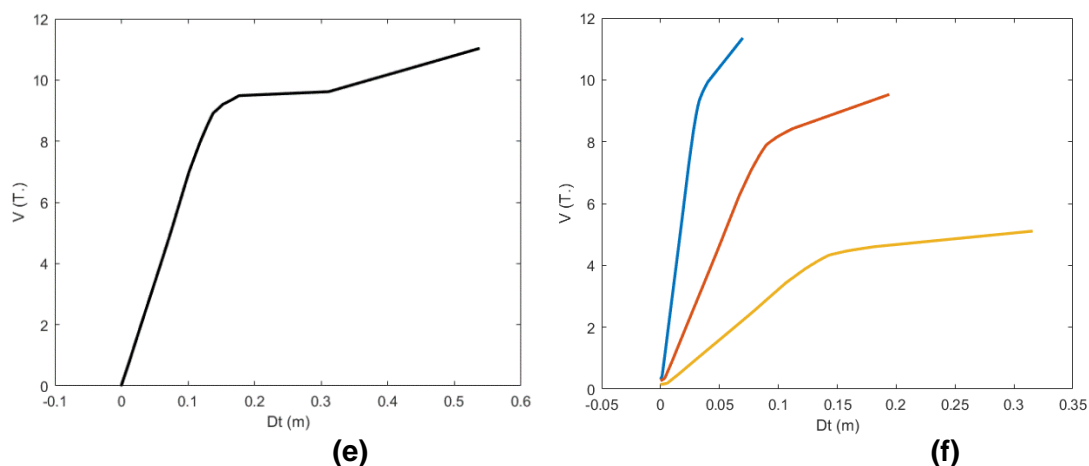


Figura 3.7 e) Curva de capacidad sísmica de la estructura, que relaciona el cortante basal con el desplazamiento lateral máximo; f) Curvas de capacidad sísmica de cada piso.

iii) Curva de capacidad sísmica de cada piso

Es muy interesante esta gráfica que relaciona el desplazamiento lateral con el cortante en un piso, la curva que se desplaza menos corresponde al primer piso y la que se desplaza más al tercer piso (ver figura 3.7 f) Nótese también que el desplazamiento lateral máximo en el tercer piso está alrededor de los 30 cm, con esto queda claro que la curva de capacidad sísmica de la estructura (figura 3.7 e) no llega al último tramo inclinado.

De tal forma que las figuras 3.7 e, 3.7 f, se complementan para definir de la mejor forma la curva de capacidad sísmica resistente de la estructura.

iv) Rigidez de piso

En las matrices: ***Dpisos_acum***, ***Vpisos_acum***, se tienen los desplazamientos laterales y cortantes en cada uno de los pisos; la primera fila de resultados es para el primer piso, la segunda fila para el piso 2 y la tercera para el piso 3. Al observar la figura 3.7 f, se ve que la línea recta termina aproximadamente con un cortante asociado a 9.25 T, con este dato referencial se ingresa en las matrices indicadas al principio del párrafo y se hallan los siguientes valores.

Tabla 3.3 Cortante de piso V , desplazamiento lateral de piso d , rigidez de piso K_i

Piso	V (T.)	d (m)	K_i ($\frac{T}{m}$)
1	9.28	0.032	290.00
2	7.88	0.089	88.54
3	4.32	0.143	30.21

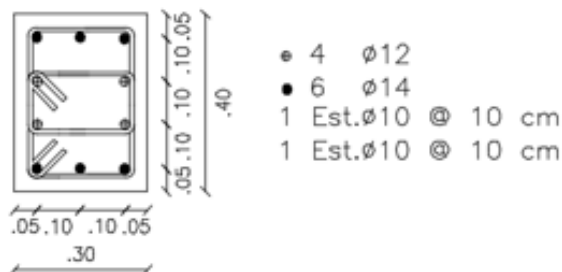
Aquí se ha obtenido la rigidez de piso K_i , de un pórtico, se debe proceder en forma similar con los restantes pórticos de la estructura y ver si la estructura tiene problemas de torsión.

v) Listado del programa

El programa desarrollado se llama **Ej_portico_hormigon_3pisos** y se encuentra en la carpeta Pushover nivel 1. A continuación se lista el programa por partes, con explicación gráfica y tablas.

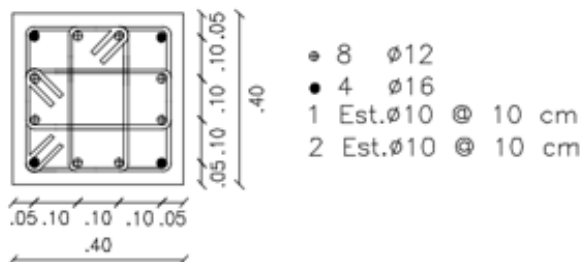
Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

```
% Ej_portico_hormigon_3pisos
%Unidades en T-m
fpc=2100;
Ey=120000*(fpc/10)^0.5;%Steel modulus of elasticity
fy=42000;%Debería ser por 1.25 %Yield steel stress
Material=2;Type=1;h=0.3;b=0.4;bw=0.4;tf=0;dp=0.05;As=3*0.016^2*pi/4;
Asp=3*0.016^2*pi/4;S=0.1;Av=2*0.01^2*pi/4;As1=2*0.012^2*pi/4;As2=2*0.012^2*pi/4;
Col40x30=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,As1,As2];%16 datos
```



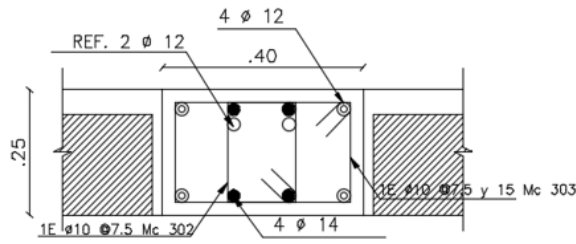
Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

```
Material=2;Type=1;h=0.4;b=0.4;bw=0.4;tf=0;dp=0.05;
As=2*0.016^2*pi/4+2*0.012^2*pi/4;Asp=2*0.016^2*pi/4+2*0.012^2*pi/4;
S=0.1;Av=4*0.01^2*pi/4;As1=2*0.012^2*pi/4;As2=2*0.012^2*pi/4;
Col40x40=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,As1,As2];%16 datos
```



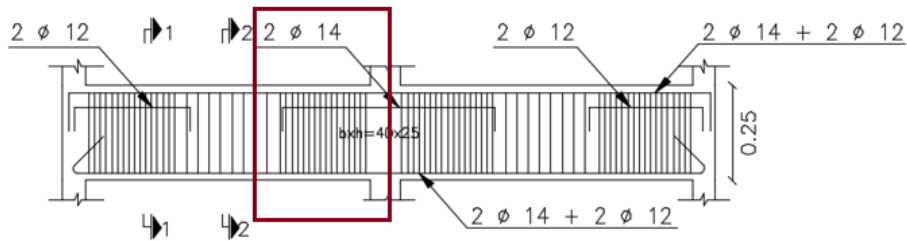
Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

```
Material=2;Type=1;h=0.25;b=0.4;bw=0.4;tf=0;dp=0.05;
As=4*0.012^2*pi/4+2*0.014^2*pi/4;
Asp=2*0.012^2*pi/4+2*0.014^2*pi/4;S=0.075;Av=4*0.01^2*pi/4;% 14 datos
Vig40x25Ext=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,0,0];
```



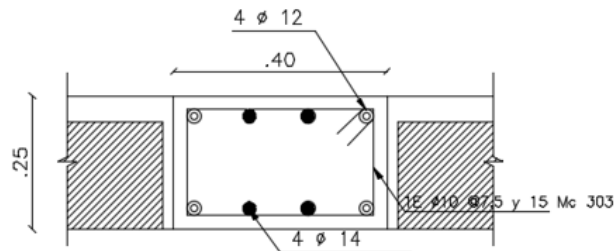
Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

Material=2;Type=1;h=0.25;b=0.4;bw=0.4;tf=0;dp=0.05;
 $As=2*0.012^2*pi/4+4*0.014^2*pi/4$;
 $Asp=2*0.012^2*pi/4+2*0.014^2*pi/4$;S=0.075;Av=4*0.01^2*pi/4;% 14 datos
 Vig40x25Int=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,0,0];



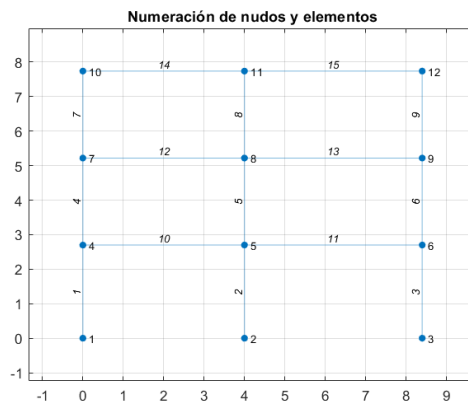
Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

Material=2;Type=1;h=0.25;b=0.4;bw=0.4;tf=0;dp=0.05;
 $As=2*0.014^2*pi/4+2*0.012^2*pi/4$;
 $Asp=2*0.014^2*pi/4+2*0.012^2*pi/4$;S=0.15;Av=2*0.01^2*pi/4;
 Vig40x25Med=[Material,fpc,Ey,fy,Type,h,b,bw,tf,dp,As,Asp,S,Av,0,0];



Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

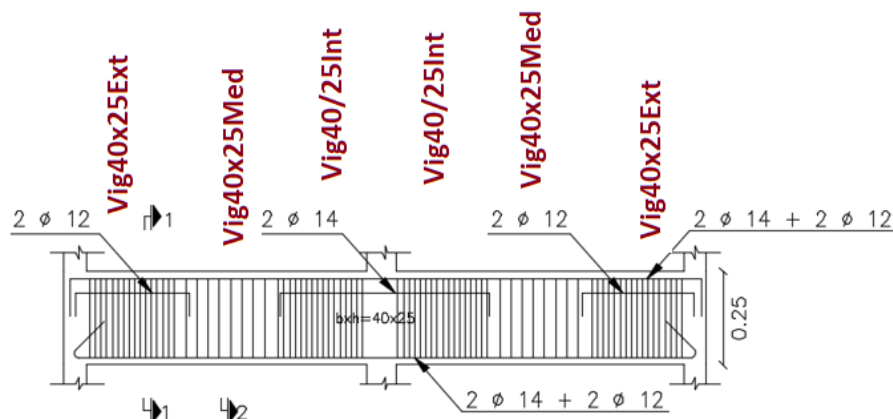
Table1_col=[Col40x30,Col40x30,Col40x30; % Columna 1 (NI, CL, NF)
 Col40x40,Col40x40,Col40x40;% Columna 2 (NI, CL, NF)
 Col40x30,Col40x30,Col40x30;% Columna 3 (NI, CL, NF)
 Col40x30,Col40x30,Col40x30;% Columna 4 (NI, CL, NF)
 Col40x40,Col40x40,Col40x40;% Columna 5 (NI, CL, NF)
 Col40x30,Col40x30,Col40x30;% Columna 6 (NI, CL, NF)
 Col40x30,Col40x30,Col40x30;% Columna 7 (NI, CL, NF)
 Col40x40,Col40x40,Col40x40;% Columna 8 (NI, CL, NF)
 Col40x30,Col40x30,Col40x30];% Columna 9 (NI, CL, NF)



Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

```

Table1_vig=[Vig40x25Ext,Vig40x25Med,Vig40x25Int; %Viga 10 (NI, CL, NF)
Vig40x25Int,Vig40x25Med,Vig40x25Ext; % Viga 11 (NI, CL, NF)
Vig40x25Ext,Vig40x25Med,Vig40x25Int; %Viga 12 (NI, CL, NF)
Vig40x25Int,Vig40x25Med,Vig40x25Ext; %Viga 13 (NI, CL, NF)
Vig40x25Ext,Vig40x25Med,Vig40x25Int; %Viga 14 (NI, CL, NF)
Vig40x25Int,Vig40x25Med,Vig40x25Ext]; %Viga 15 (NI, CL, NF)
    
```



Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 3 pisos H.A.

```

Table1=[Table1_col; Table1_vig]; % Datos de las secciones de todos los
elementos

GEN=[1 1 4 2 1 1 1; 4 4 7 2 1 1 1; 7 7 10 2 1 1 1; % Elem, ni, nj, elem a gen,
incre ele, in ni, in nj
10 4 5 2 2 3 3; 11 5 6 2 2 3 3];
NODE=[1 0 0 1 1 4.0 0.0; 3 8.4 0 0 0 0 0; % nudo, cord X, cord Y, nud a gen,
incr num, DX, Dy
4 0.0 2.7 2 3 0.0 2.52; 5 4.0 2.7 2 3 0.0 2.52;
6 8.4 2.7 2 3 0.0 2.52];
[NI,NJ]=gn_portico(GEN); % Vector con nudos iniciales y finales de elementos
[X,Y]=glinea_portico(NODE);
    
```

```

nod=12;nr=3;np=3; %Número de nudos, nudos restringidos, número de pisos
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); % Coordenadas Generalizadas y grados de libertad
dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
%Cargas en los elementos
D1=3.15;L1=0.9;PP1=D1+0.25*L1;
D2=3.15;L2=0.9;PP2=D2+0.25*L2;
D3=2.7;L3=0.315;PP3=D3+0.25*L3;
Fm=[10 PP1; 11 PP1; % Elemento cargado y valor de la carga uniforme distribuida
    12 PP2; 13 PP2;
    14 PP3; 15 PP3];
%-----Uso de Programas-----
Structure_Geom_2D_v1% Se define geometría de estructura
maxderg=4;LimitDrift=4;
Pushover_2% Cálculo de Curva de Capacidad Sísmica de cada piso
figure(2);
plot(Dpisos_acum',Vpisos_acum','LineWidth',2) % Dibujo de Curva de Capacidad por piso
xlabel ('Dt (m)'); ylabel ('V (T.)');
figure (3)
plot(Dtac,Vac(1,1:length(Dtac)),'color','black','LineWidth',2); % Curva de Capacidad Estructura
xlabel ('Dt (m)'); ylabel ('V (T.)');

```

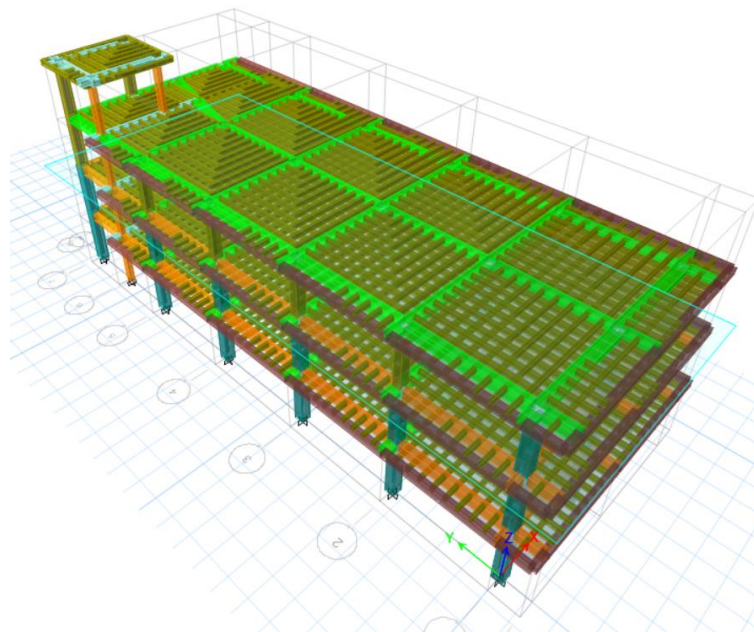


Figura 3.7 g) Estructura en tres dimensiones construida en la ciudad de Quito, se ha analizado un pórtico transversal.

El pórtico analizado, forma parte de la estructura de 3 pisos de hormigón armado construida en la ciudad de Quito y a criterio del primer autor de este trabajo representa la forma como se construye en Ecuador, con la gran interrogante si habrán colocado los estribos a la separación indicada en los planos.

3.1.2 Comentario sobre modelo de cálculo

Las funciones del sistema de computación **CEINCI-LAB** permiten considerar nudo en la mitad de la viga, pero en los dos Ejemplos desarrollados, no se ha considerado nudo en la mitad de la viga, por el modelo de Giberson, que se está utilizando. Lo importante que se quiere destacar es lo siguiente:

- Si no se considera nudo en la mitad de la viga, se debe utilizar **Structure_Geom_2D_v1** para definir las coordenadas de los nudos.
- Si se considera nudo en la mitad de la viga se debe emplear **Structure_Geom_2D_v2** para hallar las coordenadas de los nudos.

3.2 ESTRUCTURAS DE ACERO

En la carpeta denominada **PUSHOVER NIVEL 1** que se encuentra en la partición de Research Gate del primer autor pueden bajarse fácilmente los programas; en este caso se considera dos cosas que no se tomó en cuenta en la carpeta **PUSHOVER ELEMENTAL** y son las siguientes:

- En cada ciclo de carga se actualiza el diagrama momento curvatura y se encuentran nuevas rigideces a flexión en el nudo inicial, centro de luz y nudo final de cada elemento.
- Se considera el modelo constitutivo del ASCE/SEI 41, el mismo que termina en el momento residual M_r , ver figura 3.1.
- Considera el efecto $P - \Delta$, en el análisis.

Los programas de las carpetas: **PUSHOVER ELEMENTAL** y **PUSHOVER NIVEL 1** tienen en común lo siguiente:

- Los diagramas momento rotación y momento curvatura se encuentran con ASCE/SEI 41
- Se realiza un análisis monotónico con las cargas aplicadas en cada ciclo de carga proporcional al primer modo de vibración.

Lo que se acaba de indicar es válido para estructuras de hormigón armado y estructuras de acero.

3.2.1 Efecto $P - \Delta$

En el Pushover se aplican cargas laterales monotónicas hasta llevar a la estructura a uno de los criterios de colapso, que se han considerado. En los primeros ciclos de carga no es importante el efecto $P - \Delta$, pero conforme se van incrementando esos desplazamientos empieza a ser importante el efecto $P - \Delta$, tema que se lo aborda en este apartado.

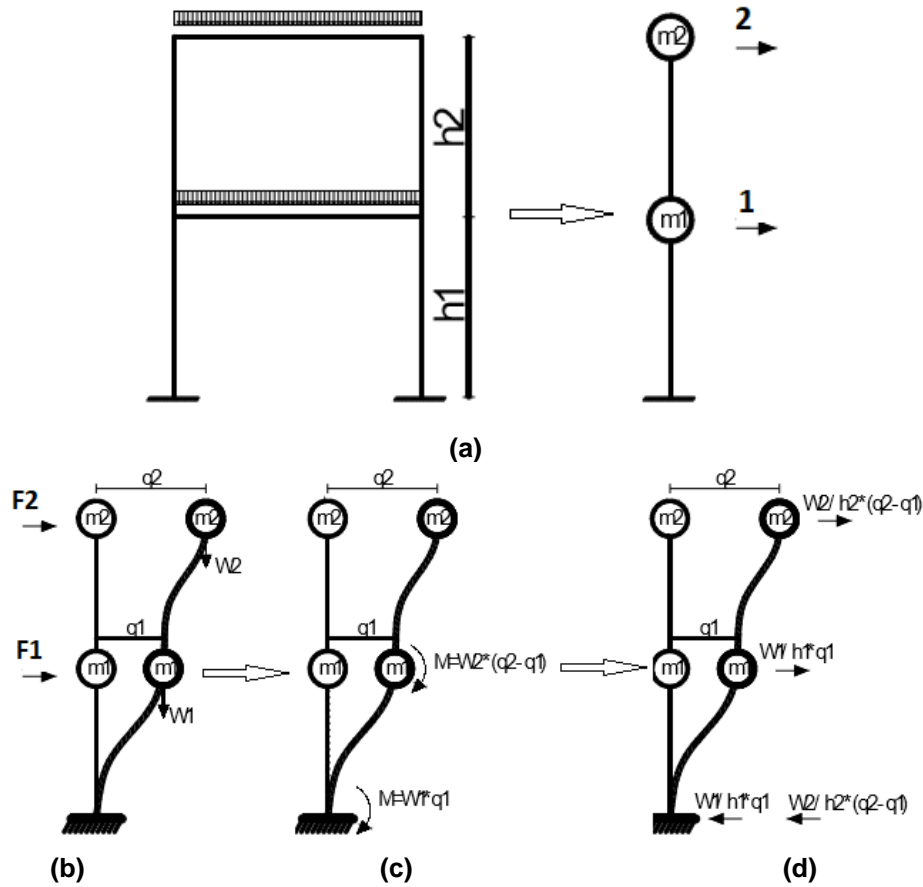


Figura 3.8 Descripción de efecto $P - \Delta$; a) Pórtico de ilustración y modelo de masas puntuales con grados de libertad; b) Cargas laterales aplicadas, las mismas que generan desplazamientos horizontales; c) Momentos de vuelcamiento que se generan debido al peso vertical y al desplazamiento lateral; d) Cortantes que producen los momentos de vuelcamiento. Fuente: Mora (2015)

La explicación de la forma como se considera el efecto $P - \Delta$, se lo realiza en base al pórtico de 2 pisos, indicado en la figura 3.8 a, donde se tiene una carga vertical uniformemente distribuida la misma que actúa en el primer ciclo de carga, pero el peso W_i donde i representa el piso, se mantiene y es la que genera el efecto $P - \Delta$.

En el análisis se considera que las vigas son axialmente rígidas para que los desplazamientos de un piso sean los mismos en los nudos. La estructura de la figura 10 a, tiene 12 grados de libertad, se numera primero las coordenadas laterales que se han llamado Q_a (para ejemplo es un vector de 2 cantidades) y luego se numeran los restantes grados de libertad (desplazamientos verticales y giros) al vector de cargas se llama Q_b , en el primer ciclo de carga $Q_b \neq 0$, y en los demás ciclos de carga lateral vale cero.

A la derecha de la figura 3.8 b, se tiene un modelo con dos masas puntuales y las coordenadas principales a . Al multiplicar las masas por la gravedad se tiene el peso W_1 . En cada ciclo la carga lateral viene dada por la siguiente expresión, para las coordenadas laterales.

$$\mathbf{Q}_{a1} = \begin{bmatrix} \frac{M_i \phi_1^{(i)} \Delta V}{\sum(M_i \phi_1^{(i)})} (\Gamma_1^{(i)}) \\ \frac{M_i \phi_1^{(i)} \Delta V}{\sum(M_i \phi_1^{(i)})} (\Gamma_1^{(i)}) \\ \vdots \\ \frac{M_n \phi_1^{(i)} \Delta V}{\sum(M_i \phi_1^{(i)})} (\Gamma_1^{(i)}) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Donde \mathbf{Q}_{a1} es el vector de cargas en las coordenadas principales (laterales) debido a las fuerzas laterales que se aplican en cada piso; M_i es la masa en el piso i ; $\phi_1^{(i)}$ es el modo de vibración uno en el piso i ; ΔV es el incremento del cortante basal (se encuentra al principio del programa Pushover_2 (el coeficiente puede ser cambiado); $\Gamma_1^{(i)}$ es el factor de participación del primer modo en el piso i .

Hay algunas cosas que explicar antes de seguir adelante, una de ellas es que se encuentra la matriz de rigidez con todos los grados de libertad y se condensa a las coordenadas laterales; luego se encuentra la matriz de masas, para el modelo indicado en la figura 3.8 a. Con la matriz de rigidez lateral y la matriz de masas se encuentran los períodos y modos de vibración. **Se está trabajando solo con el primer modo ϕ_1 ; luego se halla el factor de participación modal Γ_1 .** Con estos valores se aplica la ecuación (3.1) y se tiene el incremento de cargas laterales \mathbf{Q}_{a1} ; el vector $\mathbf{Q}_{b1} = \mathbf{0}$.

Se resuelve un problema estático en el que solo actúan las fuerzas horizontales \mathbf{Q}_{a1} en cada piso y se hallan los desplazamientos laterales \mathbf{q} , mostrados en la figura 3.8 b; Ahora el efecto del peso vertical de cada piso W , multiplicado por los desplazamientos laterales producen los momentos de volteo que se observan en la figura 3.8 c.

Finalmente, los momentos de volteo han sido reemplazados por fuerzas horizontales aplicadas en los pisos, las mismas que se ven en la figura 3.8 d. Para que exista equilibrio de fuerzas es que en la base se acumulan una de sus componentes. Por lo tanto, el efecto $P - \Delta$ genera en cada ciclo, un nuevo estado de cargas que se llama \mathbf{Q}_{a2} , como se indica en la ecuación 3.2

$$\mathbf{Q}_{a2} = \begin{bmatrix} \frac{W_1 * q_1}{h_1} \\ \frac{W_2 * (q_2 - q_1)}{h_2} \\ \vdots \\ W_n = \frac{(q_n - q_{n-1})}{h_n} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

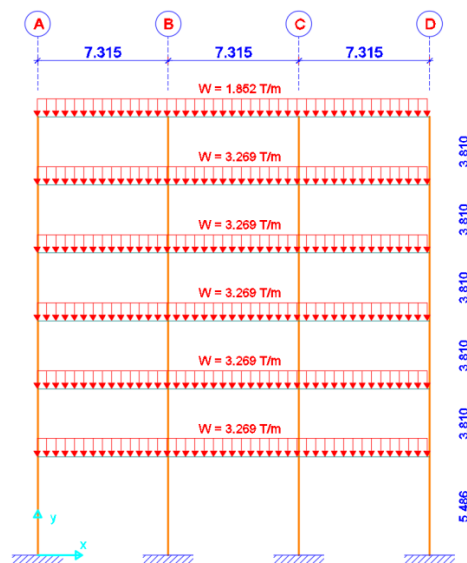
Luego el vector de fuerzas laterales \mathbf{Q}_a , vale:

$$\mathbf{Q}_a = \mathbf{Q}_{a1} + \mathbf{Q}_{a2}$$

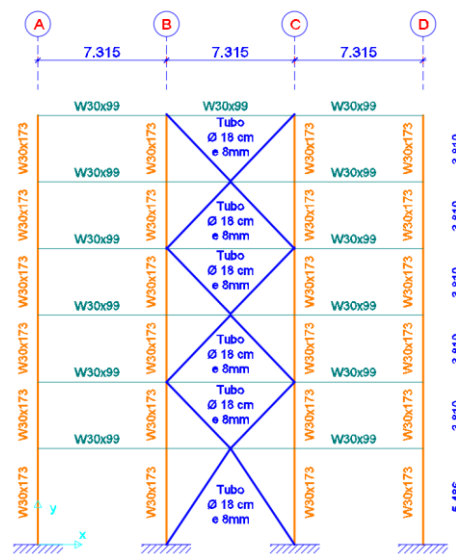
• EJEMPLO 3

En el capítulo anterior, se encontró la curva de capacidad sísmica resistente de la estructura de acero de 6 pisos, de la figura 3.9 a. Ahora esta estructura ha sido reforzada con diagonales circulares de 18 cm, de diámetro y 8 mm, de espesor, en forma de "X". Las vigas son W30x99 y las columnas W30x173, se mantienen las dimensiones al igual que la carga vertical. Se pide, aplicando cargas laterales monotónicas en una dirección, presentar:

- Secuencia de daño
- Curva de capacidad sísmica resistente de la estructura.
- Curva de capacidad sísmica a nivel de piso.
- Presentar en forma didáctica el programa desarrollado utilizando **CEINCI-LAB**



(a)



(b)

Figura 3.9 a) Estructura de acero sin reforzamiento; b) Estructura reforzada con diagonales en forma de "X" que suben de piso a piso.

- **SOLUCIÓN**

- i) **Secuencia de daño**

La sección transversal de las diagonales es insuficiente razón por la cual fueron las que primero superaron el punto de fluencia y se formaron rótulas plásticas, en la primera diagonal que ingresó al rango no lineal. En la figura 3.9 c, se presenta de izquierda a derecha la secuencia de daño en la estructura de acero.

En la gráfica central de la figura 3.9 c, se observa que la diagonal de la planta baja, se rotuló en el nudo inicial y final, este comportamiento puede llevar a que la viga se dañe (eso no considera el programa) ya que la fuerza a compresión de la diagonal es muy alta y está jalando a la viga.

Una vez que el Proyectista Estructural ve este comportamiento inadecuado, tiene la posibilidad de incrementar la sección del tubo circular para que esto no suceda. El programa Pushover_2 presenta esta secuencia que es muy útil en el diseño. En la figura 3.9 d, se continúa con la secuencia de daño y se ve que algunas vigas del primer piso ingresaron al rango no lineal.

Se deja al lector que siga interpretando la secuencia de daño mostrada en figuras 3.9 c y d.

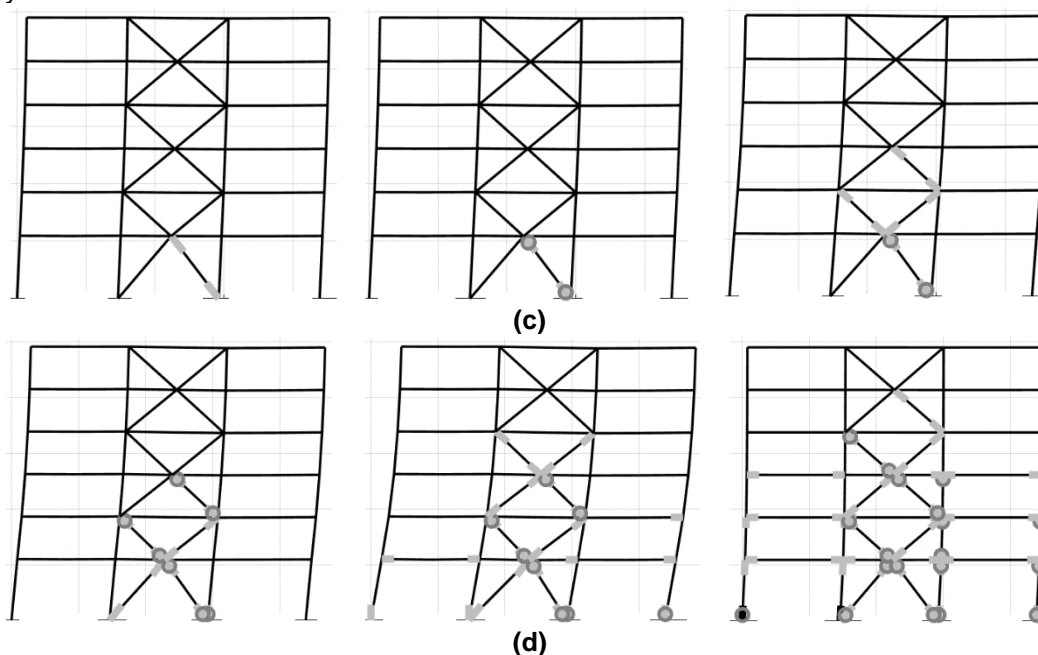


Figura 3.9 c) Primeros instantes de daño que se registra en las diagonales; b) Continuación del daño y el gráfico final es como terminó la estructura cuando alcanzo una deriva de piso de 0.04, que es un valor muy alto.

- ii) **Capacidad Sísmica resistente de la estructura**

La curva de capacidad sísmica resistente se presenta en la figura 3.9 e, se ve que supera ligeramente las 500 T, asociada a un desplazamiento lateral que está alrededor del 0.39 m. Se recuerda que es importante visualizar también las curvas

de capacidad sísmica por piso, para ver si efectivamente en el sexto piso se llegó al desplazamiento lateral de 0.39 m.

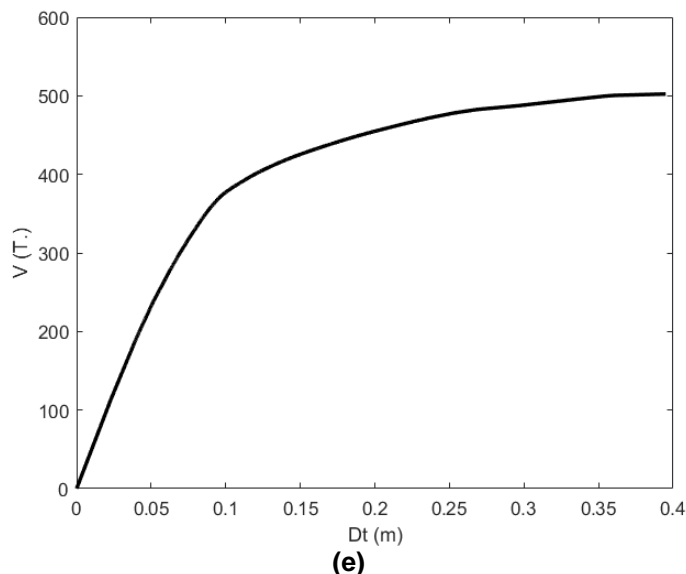


Figura 3.9 e) Curva de capacidad sísmica resistente de la estructura que relaciona el cortante basal V con el desplazamiento lateral en el tope de la estructura Dt .

iii) Capacidad Sísmica resistente por piso

En la gráfica superior de la figura 3.9 f, se observa que el cortante basal sobrepasa ligeramente las 500 T., (la gráfica superior es la curva de capacidad sísmica del primer piso) y se ve que la curva inferior tiene un desplazamiento lateral alrededor de 0.39 m. Por lo tanto, la curva de capacidad sísmica de la estructura presentada en la figura 3.9 e, es adecuada.

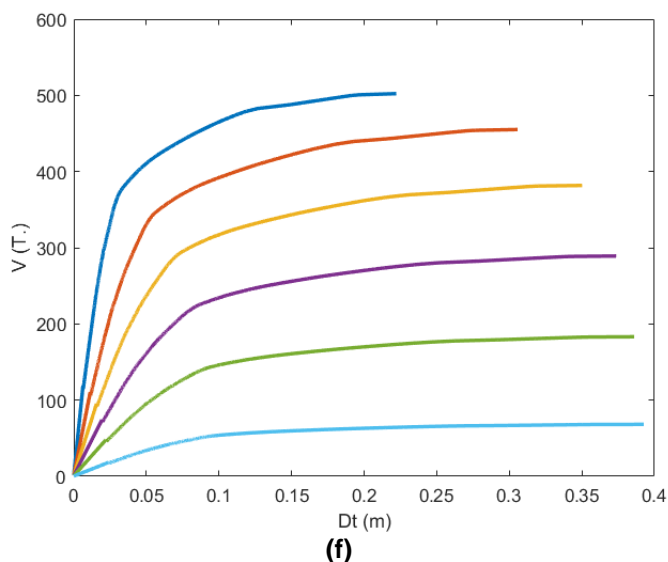


Figura 3.9 f) Capacidad Sísmica por piso, la curva superior corresponde al primer piso y la inferior al último piso.

iv) Listado del programa

El archivo se llama **Ej_acero_con_diagonales** y se encuentra en la carpeta **Pushover Nivel 1**, en la partición de Research Gate del primer autor del libro.

```

Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 6 pisos * Acero.

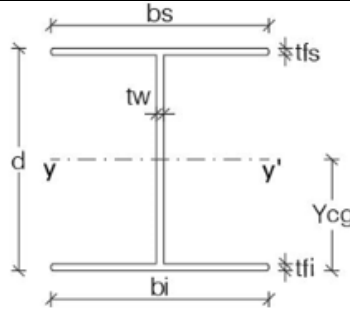
% Ej_acero_con_diagonales
%Unidades en T-m

Ey=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad del acero
fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia del acero
fu=40778.036; % Esfuerzo último del acero

Material=1;Type=1;d=0.754;tw=0.013;bs=0.268;bi=0.268;tfs=0.017;tfi=0.017;
SectionW30x99=[Material,fy ,fu,Ey ,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]; % 11 datos

Material=1;Type=1;d=0.773;tw=0.017;bs=0.381;bi=0.381;tfs=0.027;tfi=0.027;
SectionW30x173=[Material,fy ,fu,Ey ,Type,d,tw,bs,bi,tfs,tfi]; % 11 datos
    
```

Tabla 3.4 Perfiles de columnas y vigas utilizados en el Ejemplo.

	Color	Elemento	Dimensiones (mm) d x b x tf x tw
		Columnas <u>W30x173</u>	773x381x27x17
		Vigas <u>W30x99</u>	754x268x17x13

SECCIÓN TIPO 1

```

Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 6 pisos * Acero.

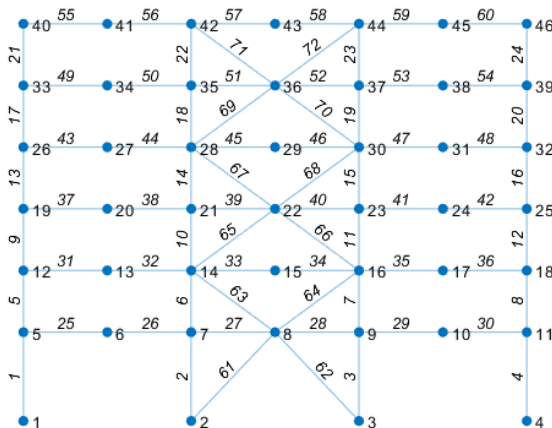
Material=1.1;Type=7;d=0.18;tw=0.008;
Diagonal=[Material,fy ,fu,Ey ,Type,d,tw,0,0,0,0]; % 7 datos por lo que se completa con
4 ceros
    
```

Tabla 3.5 Matriz de datos para crear diagonales circulares o cuadradas

Nombre de la sección	=	Tipo de material	f_y	f_u	E_y	Tipo	d	t_w
A definir por el usuario	=	1.1	Límite fluencia	Límite plástico	Módulo de Elasticidad	7 (Circular) 3 (Cuadrado)	Diámetro (7) Lado (3)	espesor

Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 6 pisos * Acero.

```
Table1=[
repmat([SectionW30x173,SectionW30x173,SectionW30x173],[24,1]);% elementos 1 al 24
repmat([SectionW30x99,SectionW30x99,SectionW30x99],[36,1]);% elementos 25 al 60
repmat([Diagonal,Diagonal,Diagonal],[12,1]);%elementos 61 al 72
];
```



(g)

Figura 3.9 g) Numeración de nudos y elementos. En **CEINCI-LAB** primero se numeran las columnas, luego las vigas y finalmente las diagonales.

Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 6 pisos * Acero.

```
sv=[7.315;7.315;7.315]; % Luces de los vanos
sp=[5.486;3.810;3.810;3.810;3.810;3.810]; % Alturas de cada piso
mar=[2;8;14]; % Número de vano con "V" invertida (opcional)
marv=[5;11;17]; % Número de vano con "V" (opcional)
```

16	17	18
13	14	15
10	11	12
7	8	9
4	5	6
1	2	3

(h)

Figura 3.9 h) Numeración de los vanos para ingreso de diagonales. Vanos con diagonales en forma de "V" invertida son 2, 8, 14; los vanos con diagonales en forma de "V" son 5, 11 y 14

Código de CEINCI – LAB: Pórtico de 6 pisos * Acero.

```

% Carga vertical en los elementos, ver figura 3.9 a, y figura 3.9 g.
Fm=[(25:54)' ones(30,1)*3.269
    (55:60)' ones(6,1)*1.852];

%-----Used Programs-----
Structure_Geom_2D_v2%Define structure geometry
Pushover_2%Define Capacity Curve

figure(3);plot(Dpisos_acum',Vpisos_acum','LineWidth',2)
xlabel ('Dt (m)'); ylabel ('V (T.)');

%figure (4)
%plot(Dtac,Vac(1,1:length(Dtac)), 'color','black','LineWidth',2);
%xlabel ('Dt (m)'); ylabel ('V (T.)');

```

3.2.2 Modelo constitutivo para las diagonales de acero

En la parte superior de la tabla 3.5, se presenta el cálculo de la relación fuerza-desplazamiento **para diagonales de acero que trabajan a compresión**, las mismas que están en función del desplazamiento de fluencia Δ_c , que se calcula con la siguiente relación

$$\Delta_c = \frac{\text{menor}(P_y, P_{cl})}{E * A} \quad (3.3)$$

$$P_y = A * f_y \quad (3.4)$$

$$P_{cl} = A * F_{cr} \quad (3.5)$$

Donde P_y es la fuerza axial de fluencia; P_{cl} es la carga axial de pandeo; E es el módulo de elasticidad del acero; A es el área de la sección transversal; f_y es el límite de fluencia del acero y F_{cr} es el esfuerzo crítico de pandeo que se halla como sigue de acuerdo al AISC 360-10

Primero se determina el esfuerzo elástico por pandeo F_e , el mismo que es función del factor de longitud efectiva k , de la longitud del elemento L , del radio de giro r y del módulo de elasticidad del acero E

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} \quad (3.6)$$

El cálculo del esfuerzo crítico de pandeo F_{cr} se lo hace en función de la relación de esbeltez $\frac{kL}{r}$ de la siguiente manera.

$$\frac{k L}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \rightarrow \quad F_{cr} = \left[0.658^{\frac{f_y}{F_e}} \right] f_y \quad (3.7)$$

$$\frac{k L}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \rightarrow \quad F_{cr} = 0.877 F_e \quad (3.8)$$

Existen expresiones de otros investigadores que también se emplean para relacionar el esfuerzo con la esbeltez en elementos sometidos a compresión, para que el lector tenga una referencia de esta relación se presenta la figura 3.10 y en el anexo A se adjunta el código para generar esta gráfica, en este caso se asumen $E_s = 2038901.916$ [Kg /cm²] y un valor de $F_y = 2530$ [Kg /cm²].

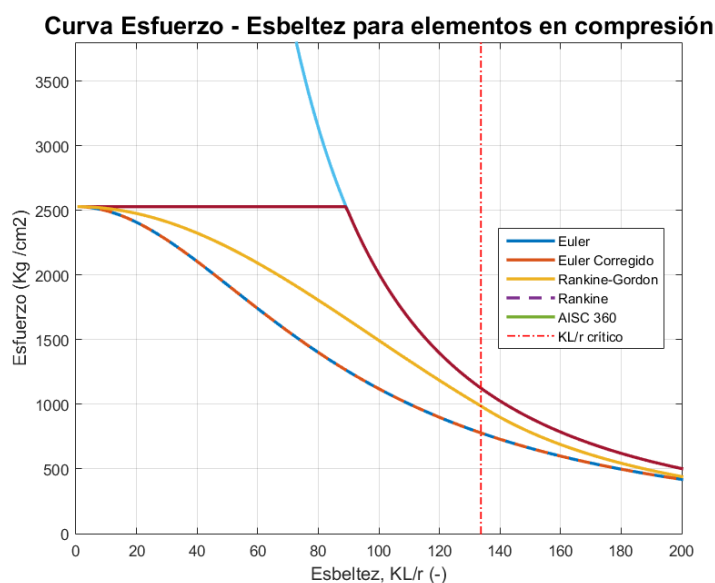


Figura 3.10 Curva esfuerzo versus esbeltez

El cálculo indicado es válido en secciones que no sean esbeltas, razón por la que primero la relación ancho-espesor de acuerdo a las tablas del AISC 360-10, de acuerdo al tipo de perfil (tema un tanto complicado de cumplir).

Tabla 3.6 Parámetros **a**, **b**, **c**, para encontrar la relación fuerza desplazamiento en diagonales de acero

Diagonal Rigidizadora en Compresión	a	b	c
a. Para Secciones Esbeltas $Kl/r \geq 4.2\sqrt{E/f_y}$			
1. Secciones W,I,2L,2C en plano	$0.5\Delta_c$	$10\Delta_c$	0.3
2. 2L, 2C fuera de plano	$0.5\Delta_c$	$9\Delta_c$	0.3
3. HSS, Tubos redondos y rectangulares	$0.5 \Delta_c$	$9 \Delta_c$	0.3

b. Para Secciones compactas $Kl/r \leq 2.1\sqrt{E/fy}$			
1. Secciones W,I,2L,2C en plano	$1\Delta_C$	$8\Delta_C$	0.3
2. 2L, 2C fuera de plano	$1\Delta_C$	$7\Delta_C$	0.5
3. HSS, Tubos redondos y rectangulares	$1\Delta_C$	$7\Delta_C$	0.3
Diagonal Rigidizadora en Tensión	$11\Delta_T$	$14\Delta_T$	0.8
Vigas, Columnas en tensión	$5\Delta_T$	$7\Delta_T$	1.0

Cuando una **diagonal trabaja a tracción** el cálculo es directo y está en función del desplazamiento de fluencia a tracción Δ_T , el mismo que se halla con la siguiente ecuación.

$$\Delta_T = \frac{P_y}{E A}$$

Todas las variables han sido ya definidas. Se destaca que el programa **Braces_AceroASCE41** determina los coeficientes **a, b, c**, para los casos que no están explícitos en la tabla 20.5, es decir que realiza una interpolación de los valores.

3.2.3 Reforzamiento de estructuras con diagonales de acero

Una forma de reforzar una estructura de hormigón armado o acero es mediante la incorporación de diagonales de acero en forma de “V” invertida o en forma de “X” pero que suban de piso a piso.

Existen Proyectistas Estructurales, a quienes no les gusta reforzar estructuras de hormigón o acero con diagonales, en forma de “V” invertida, cómo la estructura indica en la figura 3.11 a. No les gusta porque en un sismo una de las diagonales trabaja a compresión y la otra trabaja a tracción, como el sismo es reversible este comportamiento en las diagonales en forma de “V” se cambia. El problema se da cuando una de las diagonales que trabaja a compresión ingresa al rango no lineal y pandea, esta falla puede llevar a un fallo de la viga. Este tema amerita una mayor explicación, pero antes se debe indicar que la estructura de la figura 3.11 a, fue diseñada en acero con diagonales en forma de “V” invertida.



(a)

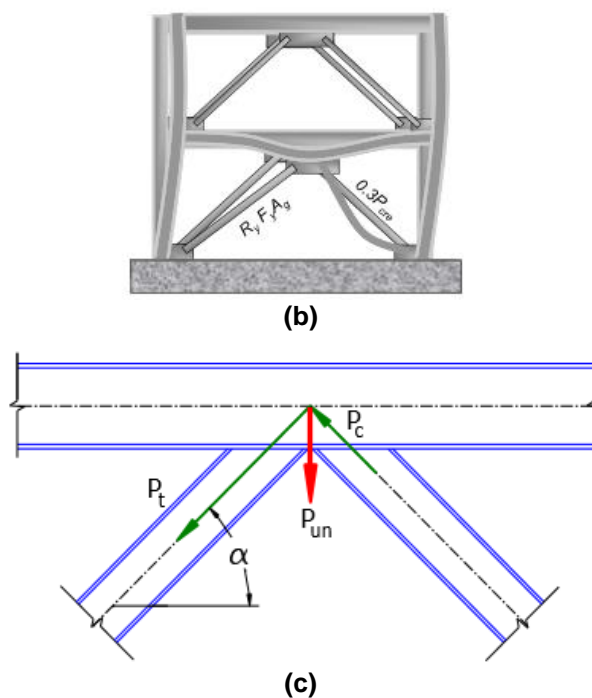


Figura 3.11 a) Reforzamiento de una estructura de hormigón armado con diagonales de acero en forma de “V” invertida; b) Problema que puede darse cuando la diagonal que trabaja a compresión ingresa en el rango no lineal; c) No hay equilibrio cuando una de las diagonales ingresa al rango no lineal y se genera la fuerza P_{un} que tiende a dañar la viga.

Cuando una estructura con diagonales en forma de “V” trabaja en el rango elástico, una diagonal trabaja a tracción y la otra a compresión, son valores son parecidos de tal forma que al descomponer las fuerzas en sus componentes horizontal y vertical; las fuerzas en sentido vertical prácticamente se anulan y transmiten una carga vertical muy baja al punto medio de la viga.

Pero el problema puede darse si la diagonal que trabaja a compresión ingresa al rango no lineal y pierde considerablemente su capacidad a compresión, llegando al caso extremo de que solo soporte el 30% de su capacidad a compresión mientras que la otra diagonal que trabaja a tracción está sujeta a una fuerza extremadamente grande (ver figura 3.11 b) al descomponer estas fuerzas que se indican en la figura 3.11 c, no hay equilibrio y se genera una fuerza vertical P_{un} , es esta fuerza la que trata de llevar al colapso o generar gran daño en la viga, esto es lo que se trata de ilustrar en la figura 3.11 b.

Pero este es un problema conocido razón por la cual el AISC emite un **diseño especial para las vigas con conexión concéntrica**, para evitar este problema se quiere que la viga sea muy rígida. Otro aspecto digno de mencionar es que no siempre se reduce sustancialmente la fuerza a compresión al 30%, depende de la relación de esbeltez de las diagonales, pudiendo que la capacidad a compresión sea un valor significativamente, más altos.

Dos soluciones, adicionales se han dado para evitar este problema y son las indicadas en las figuras 3.11 d y e; la primera es colocar diagonales en forma de “X”, ahí se minimiza el problema del equilibrio de fuerzas en el punto central de la viga, pero se debe chequear con las fuerzas que se transmiten a la columna, pero en todo caso esta es una buena solución.

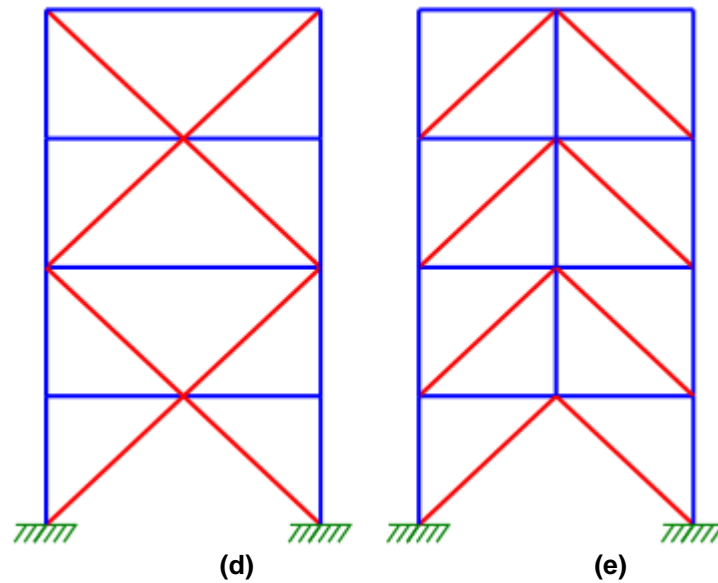


Figura 3.11 d) Reforzamiento con diagonales en forma de "X"; e) Colocación de la columna Zipper. Fuente: Crisafulli (2018)

La otra opción es colocar las famosa columna Zipper, que se ilustra en la figura 3.11 e, en realidad este eje de columnas van a trabajar como un tensor; si una de las diagonales de la planta baja pierde considerablemente su capacidad a compresión estos tensores van a sostener a la viga de la planta baja y los tensores de los pisos superiores harán lo propio con esto se logra una mejor repartición de las fuerzas y en lugar de tener un daño severo en la planta baja todas las diagonales de los pisos superiores que trabajan a compresión pueden tener un menor daño o a lo mejor no lo tienen.

4. ACOPLAMIENTO CEINCI-LAB Y OPENSEES NIVEL 1: ESTRUCTURAS DE ACERO

CEINCI-LAB es un sistema de computación que permite el análisis estático o dinámico de estructuras, en las secciones anteriores se presentó parte de su potencial para realizar un análisis Pushover, tanto en estructuras de hormigón armado como de acero, e incluso con la inclusión de diagonales de acero. En esta sección de la monografía se presenta la interacción de las funciones de **CEINCI-LAB** con comandos de OpenSees para el desarrollo del análisis estático no lineal mediante la técnica de Pushover de una estructura de acero.

OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation, es un sistema de computación de gran capacidad para el análisis no lineal de estructuras y problemas geotécnicos.

Tanto **CEINCI-LAB** como OpenSees pueden generar este análisis (Pushover) de formar directa sin la interacción entre ellos, sin embargo, para facilitar el análisis se puede utilizar la fortaleza de ambos sistemas computacionales; en este caso, OpenSees cuenta con programas muy avanzados para el análisis no lineal y **CEINCI-LAB** presenta la ventaja que es más utilizado en Ecuador, además se tiene la facilidad para ingresar datos y mostrar los resultados en forma gráfica.

4.1 MODELO CON ZONA DE PLASTICIDAD CONCENTRADA DE OPENSEES

Para el análisis Pushover no lineal en OpenSees es posible emplear modelos de plasticidad distribuida o simplificar el problema con un modelo de plasticidad concentrada y para ello se utiliza elementos de longitud cero para simular secciones en las cuales se puede asignar materiales que consideren la no linealidad del mismo, por ello es necesario generar un modelo con la ubicación de las zonas de plasticidad concentrada. Ibarra *et al.* (2005)

Para explicar este modelo se muestra un pórtico de 2 vanos y 1 piso, donde se tiene 3 columnas y 4 vigas, considerando que en cada vano existen 2 vigas de igual longitud. La generación del nudo en el medio del vano es útil para incluir elementos diagonales de acero o disipadores de energía como TADAS o ADAS. Luego cada columna y cada viga mostrada en la figura 4.1a es dividida en 5 partes como se muestra en la figura 4.1b donde a los extremos se tiene: elementos rígidos luego una rótula plástica de longitud nula seguido de un elemento elástico. Lignos y Krawinkler (2007, 2009, 2011), Lignos *et al.* (2011).

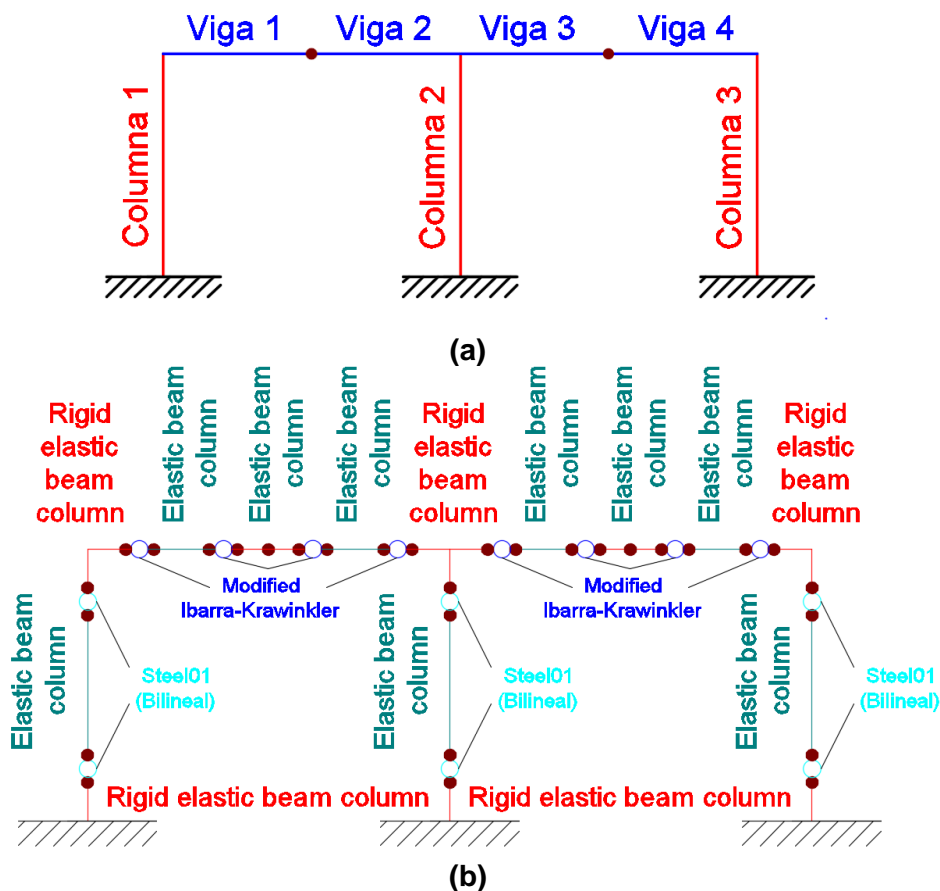
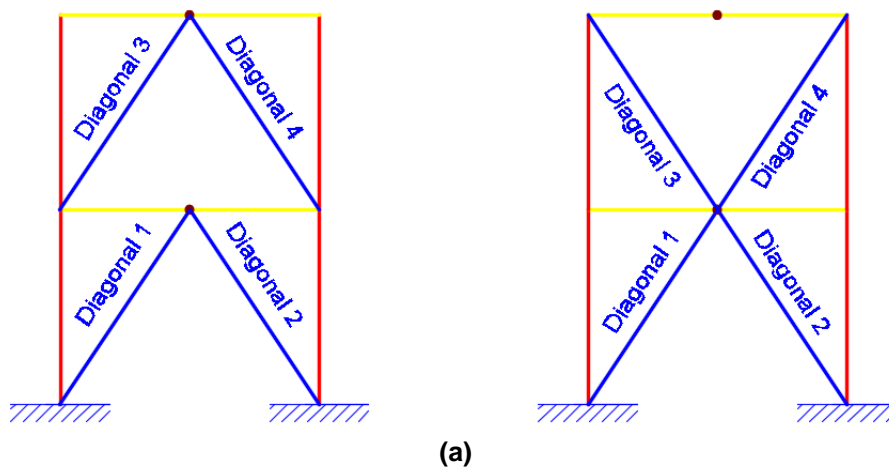


Figura 4.1 a) Modelo generado en **CEINCI-LAB** b) Modelo para el análisis Pushover no lineal en OpenSees.

Al modelar pórticos con diagonales en OpenSees considerando plasticidad concentrada en las diagonales para el análisis Pushover, entonces cada diagonal se divide en 5 partes como se muestra en la figura 4.2 a, donde a los extremos se tiene elementos rígidos, luego una rótula plástica de longitud nula, seguido de un elemento con propiedades de inelasticidad de tipo armadura, es decir que trabaja a compresión y tracción.



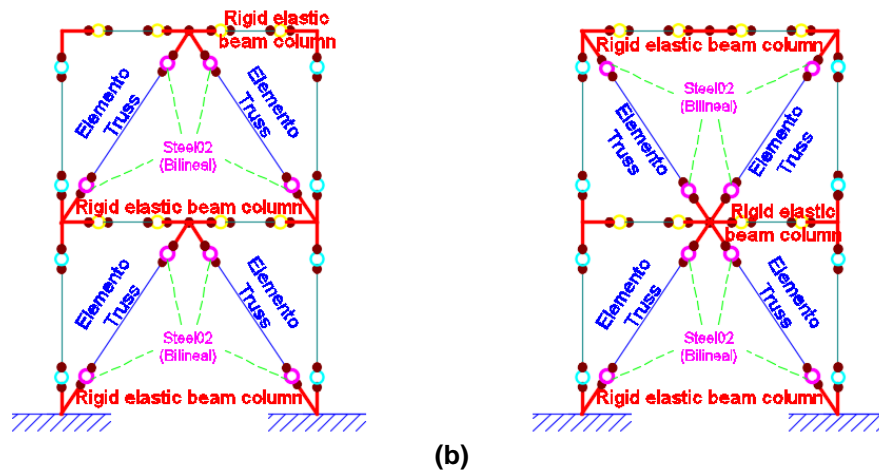


Figura 4.2 a) Modelo generado en **CEINCI-LAB** b) Modelo para el análisis Pushover no lineal en OpenSees.

En la figura 4.3 se puede visualizar la ubicación de las zonas de plasticidad concentrada. Las zonas de plasticidad concentrada de las vigas se colocaron en las caras de la columna. Es decir, a una distancia de la mitad del ancho de las columnas desde la línea central de la columna. Además, se colocaron las zonas de plasticidad concentrada en columnas a una distancia de la mitad del ancho de la viga desde la línea central de la viga. Para las diagonales de acero se tiene 3 materiales; en la figura 4.3 se puede visualizar la ubicación de las zonas de plasticidad concentrada. Estas zonas de plasticidad concentrada, de los elementos diagonales de acero, se formarán a una distancia L_{rig} .

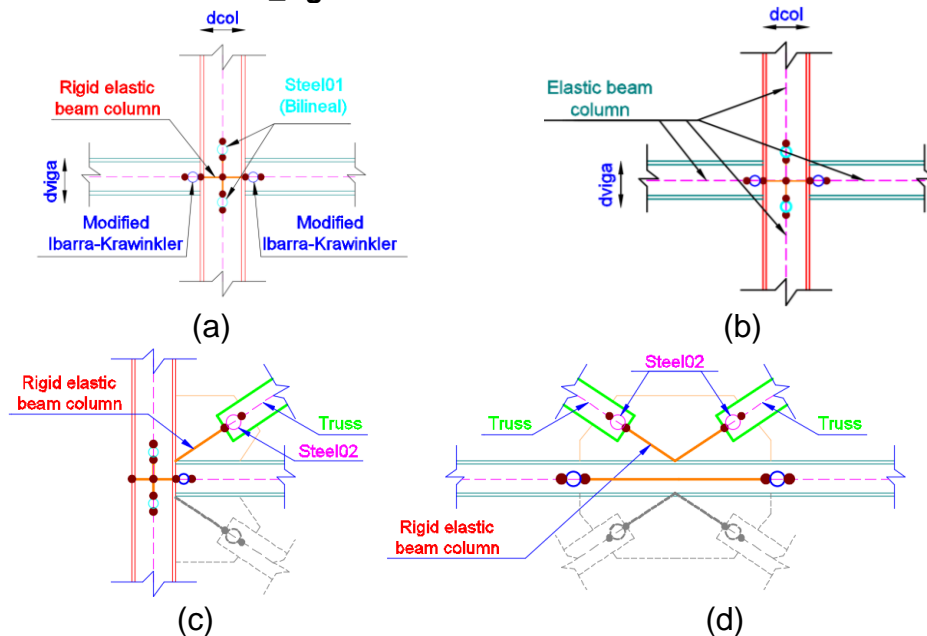


Figura 4.3 a) Zonas de plasticidad concentrada en vigas y columnas e identificación de la zona rígida del elemento; b) Elementos elásticos. c) Zonas de plasticidad concentrada en elementos diagonales de acero en la conexión viga - columna. d) Zonas de plasticidad concentrada en elementos diagonales de acero en el nudo medio de la viga. Fuente: Cagua *et al.* (2020)

OpenSees tiene muchos modelos para caracterizar el comportamiento no lineal de los elementos, no obstante, para estos primeros modelos en el acoplamiento de CEINCI-LAB con OpenSees se emplea las propiedades de los materiales que se muestran en la figura 4.4.

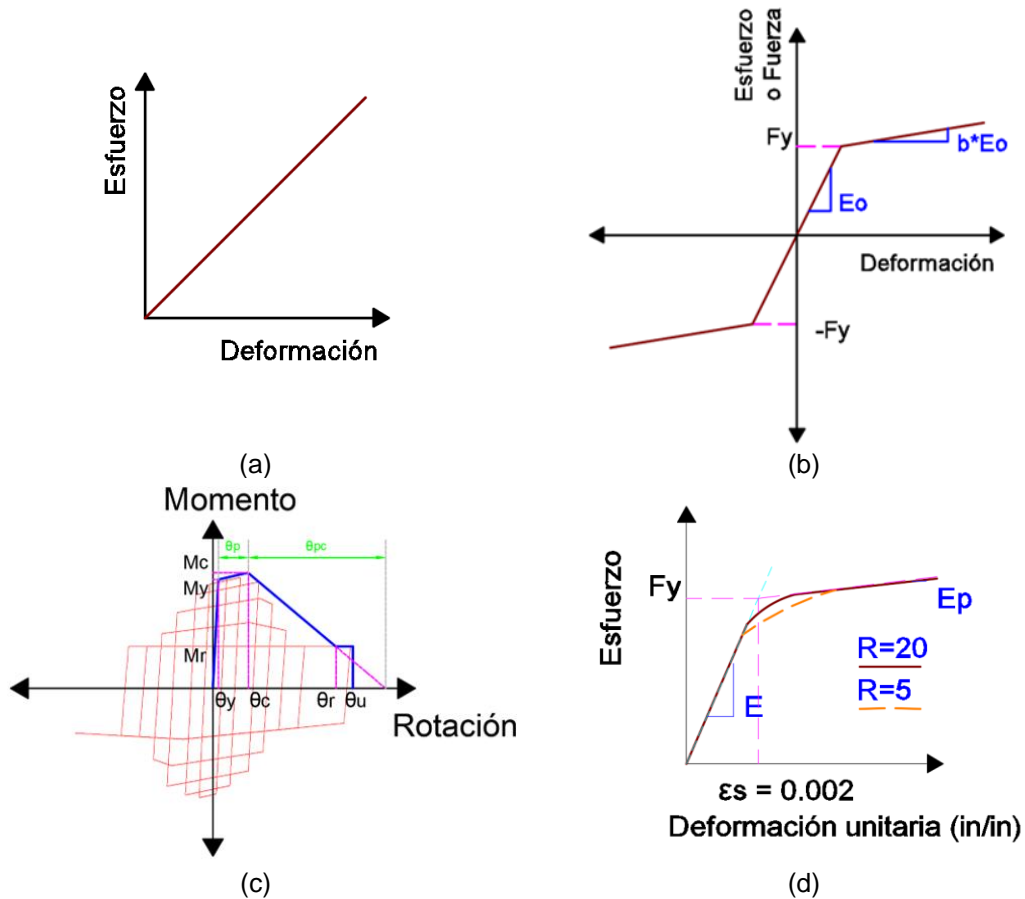


Figura 4.4 Materiales considerados para modelo de OpenSees; a) Material para comportamiento elástico de los elementos b) Constitutiva para zonas de daño en columnas; c) Constitutiva para zona de daño en vigas; d) Material para zonas de daño de las diagonales de acero. Fuente: Cagua *et al.* (2020).

En este modelo de plasticidad concentrada cada elemento, viga o columna, es considerado como un elemento elástico, conectado en serie por zonas de plasticidad concentrada como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5 Distribución de rigidez en un elemento.

Acorde a la tesis de Barrera (2018), las propiedades estructurales de cada miembro son una combinación de propiedades de tres subelementos; estos elementos son, las zonas de plasticidad concentrada en los extremos con propiedades no lineales y del elemento viga o columna con propiedades elásticas. Sin embargo, para mantener la rigidez equivalente del conjunto de forma consistente con la rigidez del elemento verdadero es necesario modificar la rigidez de estos subelementos.

El modelo idealizado en la figura 20, muestra que la rigidez de cada subelemento se puede relacionar con la rigidez de un elemento de la siguiente manera:

$$\frac{1}{K_{elem}} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_{bc}} \quad (4.1)$$

Además, la rigidez rotacional de un elemento sometido a doble curvatura se puede determinar por:

$$K_{elem} = \frac{6 \cdot E \cdot I_y}{L_{elem}} \quad (4.2)$$

Con el propósito de resolver la ecuación de rigidez en serie de las subelementos que conforman a cada miembro y para evitar problemas de inestabilidad inelástica numérica, los autores Ibarra y Krawinkler proponen usar modelos con zona de plasticidad concentrada con una rigidez “n” veces mayor que la rigidez rotacional del elemento elástico (Ibarra & Krawinkler, 2005), generalmente se emplea valores de n cercanos a 10.

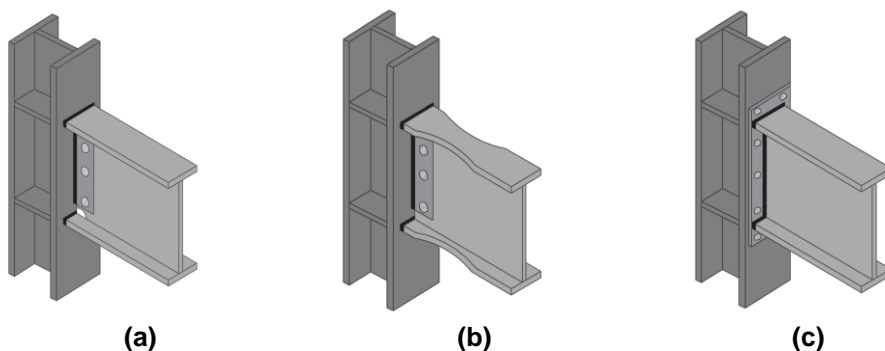
De esta forma, la rigidez elástica de las zonas de plasticidad concentrada (K_s) y del elemento elástico (K_{bc}) deben ser modificadas por este valor n, considerando las siguientes ecuaciones:

$$K_{bc} = \frac{n+1}{n} \cdot K_{elem} \quad (4.3)$$

$$K_s = (n+1) \cdot K_{elem} \quad (4.4)$$

4.1.1 Modelo de Ibarra-Medina-Krawinkler

En **CEINCI-LAB**, se han presentado modelos constitutivos de acero para zonas de plasticidad concentrada en base a las recomendaciones del ASCE/SEI 41. En este caso se presentarán las ecuaciones necesarias para desarrollar este diagrama en base al modelo de Ibarra-Medina-Krawinkler, que se abrevia como IMK. Las expresiones necesarias para determinar los parámetros del modelo momento-rotación IMK dependen de la conexión que existe en las vigas con las columnas; de las conexiones precalificadas en el AISC 358 se tiene:



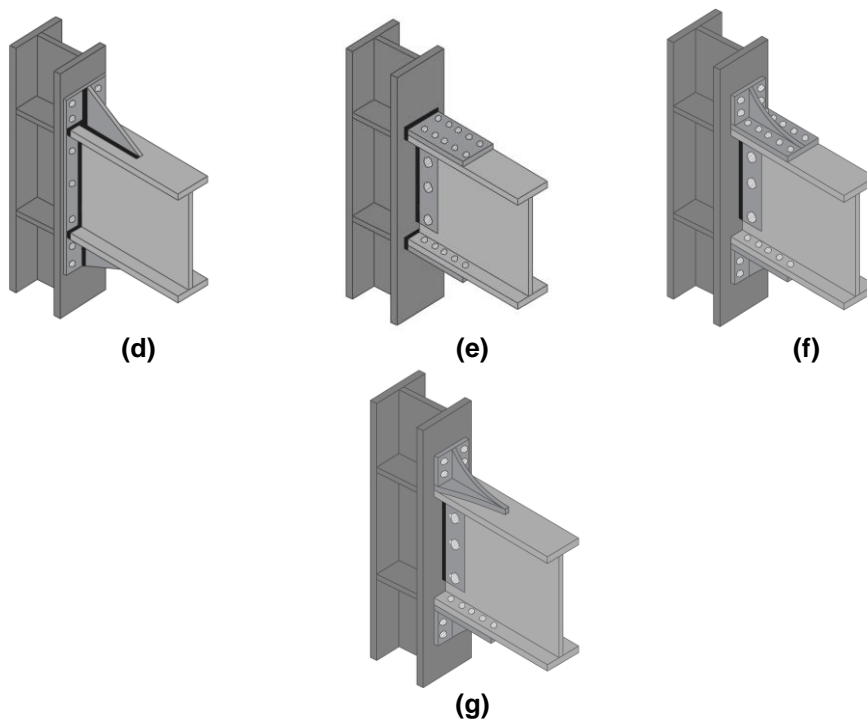


Figura 4.6 (a) Conexión de Patín Soldado Sin Refuerzo y Alma Soldada (WUF-W); (b) **Conexión de Sección de Viga Reducida (RBS)**; (c) Conexión de Placa Extrema Empernada Sin Rigidizar (BUPE) y (d) rigidizada (BSEP); (e) Conexión de Placa Empernada (BFP); (f) Conexión Kaiser con Soporte Atornillado y (g) Soldado (KBB).

En las siguientes ecuaciones se requiere ingresar el valor de F_y en unidades de Megapascal y para parámetros de longitud debe utilizarse milímetros, en estos casos los coeficientes c_{unit1} y c_{unit2} son 1. La relación de M_c / M_y es, en promedio, 1.10.

▪ **Conexión viga-columna diferente a la RBS:**

La rotación que existe en el rango de fluencia se determina en base a la ecuación 4.5 y la rotación en el rango de post fluencia con la ecuación 4.6.

$$\theta_p = 0.0865 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.365} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.14} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.34} \cdot \left(\frac{c_{unit}^1 \cdot d}{533}\right)^{-0.721} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{355}\right)^{-0.23} \quad (4.5)$$

$$\theta_{pc} = 5.63 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.565} \cdot \left(\frac{b_f}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.8} \cdot \left(\frac{c_{unit}^1 \cdot d}{533}\right)^{-0.28} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{355}\right)^{-0.43} \quad (4.6)$$

Donde θ_p , es la rotación plástica pre-capping (rad); θ_{pc} , es la rotación plástica post-capping (rad); d , altura total de la viga (mm); h , es la altura del alma de la viga (mm); t_w , es el espesor del alma de la viga (mm); b_f , es el ancho del patín de la viga (mm); t_f , es el espesor del patín de la viga (mm); L , es la longitud de la viga (mm); F_y , es el esfuerzo de fluencia (MPa); $c_{unit}^1=1$; $c_{unit}^2=1$.

▪ **Conexión viga-columna RBS:**

De manera similar al caso de vigas con conexión diferente a la RBS, se tiene la ecuación 4.7 y 4.8 para determinar la rotación que existe en el rango de fluencia y de post fluencia respectivamente.

$$\theta_p = 0.19 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.314} \cdot \left(\frac{bf}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.10} \cdot \left(\frac{L_b}{r_y}\right)^{-0.185} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.113} \cdot \left(\frac{c_{unit}^1 \cdot d}{533}\right)^{-0.76} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot Fy}{355}\right)^{-0.07} \quad (4.7)$$

$$\theta_{pc} = 9.52 \cdot \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.513} \cdot \left(\frac{bf}{2 \cdot t_f}\right)^{-0.863} \cdot \left(\frac{L_b}{r_y}\right)^{-0.108} \cdot \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot Fy}{355}\right)^{-0.36} \quad (4.8)$$

Algunos términos de las ecuaciones fueron descritos previamente, restando indicar: L_b , que es la longitud de la viga sin arriostamiento (mm); r_y es el radio de giro en (mm). Por otra parte, se debe cumplir:

$$\frac{L_b}{r_y} \leq 70 \quad (4.9)$$

Para el modelo IMK en vigas se puede entender de manera conservadora que el valor de M_y es el producto del módulo plástico de la sección por el esfuerzo de fluencia del material, sin embargo, cuando se emplean conexiones precalificadas este valor puede ser multiplicado por un factor que toma en cuenta el endurecimiento por deformación denominado C_{pr} , siendo este valor calculado con la siguiente ecuación.

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2 \cdot F_y}; \quad C_{pr} \leq 1.2 \quad (4.10)$$

Donde F_y , es el esfuerzo de fluencia del material (ksi); F_u , es el esfuerzo último del material (ksi).

El valor de la rotación donde termina el rango elástico se denomina θ_y , este valor puede ser calculado en base a la ecuación del ASCE/SEI 41, como:

$$\theta_y = \frac{M_p \cdot L}{6 \cdot E \cdot I_y} \quad (4.11)$$

Donde, M_p es el momento plástico (T.m); L es la longitud de la viga en (m); E , es el módulo de elasticidad del material; I_y , es el momento de inercia de la sección respecto al eje de giro (m^4).

Para calcular el momento residual, M_r , se recomienda utilizar la relación de la ecuación 4.12, aunque en ocasiones conviene colocar un valor cercano a cero y despreciar la capacidad residual de la sección como un factor de seguridad.

$$\frac{M_r}{M_y} = 0.4 \quad (4.12)$$

4.1.2 Definición de masa

En el análisis estructural la matriz de masa es importante, porque la respuesta del análisis depende de este parámetro. Entre las opciones para modelar estas matrices se tiene, las matrices de masas concentradas (Lumped Mass Matrix) y matrices de masas consistentes (Consistent Mass Matrix).

En una matriz de masas concentradas, la masa de una parte de la estructura analizada es asignada al grado de libertad asociado, que está definido por un término de la diagonal de la matriz (García, 2013).

Las matrices de masas consistentes, resultan de análisis variacional y tienen valores diferentes de cero, en la diagonal principal y fuera de ella (Paz, 1992). Para la definición de esta matriz se debe recurrir a la formulación de elementos finitos (Felippa, 2004), considerando la energía cinética del sistema e interpolando las velocidades, de forma similar a la que se interpolan los desplazamientos para la formulación de la matriz de rigidez.

Para los modelos planteados en esta monografía se emplea la matriz de masa concentrada (Lumped Mass Matrix), es decir que se asigna la masa de los elementos y cargas distribuidas a los nudos, de la unión viga-columna, para facilitar el análisis con OpenSees.

De forma general se calcula la carga colaborante a cada nudo (unión viga-columna), multiplicando la carga uniforme distribuida por el ancho colaborante, para este caso se define, de forma simplificada, como la mitad de la luz de cada vano que se une al nudo considerado; luego se halla la masa, dividiendo esta carga para el valor de la aceleración de la gravedad. Sumando los pesos de cada piso se halla el peso total del edificio.

4.1.3 Patrón de fuerzas laterales para Pushover monotónico

Según Carr (2009), la capacidad de la estructura depende del patrón de carga utilizado, es por ello que este es uno de los aspectos centrales en el análisis Pushover. La distribución de fuerza sísmica típica, que se encuentran en los códigos de diseño o que recomiendan autores en artículos de investigación, dependerá de la masa en cada nivel. Esta masa se distribuirá en la altura de la estructura en base a la siguiente ecuación.

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (4.13)$$

Donde C_{vx} es un factor de distribución vertical de fuerzas laterales; w_i es la parte del peso total en la posición i , es decir en el nivel i ; w_x es la porción del peso total en la posición x , de igual modo esta posición representa el nivel x ; h_i es la altura del nivel i desde la base; h_x es la altura del nivel x medido desde la base y el factor k depende del método de distribución de fuerzas laterales.

Para el modelo de análisis se debe definir cómo se realizará la distribución de fuerzas laterales en cada piso de la edificación, esto se lo indica con la variable

Dis_Fuerzas_Laterales. El valor que esta variable puede tomar se encuentra entre 1 y 4, donde 1 corresponde a una distribución en base al primer modo de vibración de la estructura (en la ecuación 4.13, $k = 1$ y en lugar de emplear el peso de la estructura se emplea el patrón de deformada del primer modo de vibrar); 2 es una distribución de fuerzas parabólica, donde k varía en función del periodo fundamental de la estructura, es decir que $k = 1$ para $T \leq 0.5$ (s) o $k = 2$ para $T \geq 2.5$ (s), para periodos en el rango de 0.5 a 2.5 (s) se empleara una variación lineal para estimar k en función del periodo fundamental; para un valor de 3, se tiene una distribución triangular, en este caso $k=1$; finalmente si la variable **Dis_Fuerzas_Laterales** es 4 la distribución será uniforme, es decir que las fuerzas en cada piso serán iguales.

• EJEMPLO 1

Determinar la curva de capacidad sísmica resistente, mediante un Pushover monotónico, de la estructura de acero de 6 pisos mostrada en la figura 20.16 a, todas las columnas tienen un perfil W30x173 y todas las vigas un perfil W30x99. En la figura 20.16 b, se tiene la carga vertical actuante. Considerar las curvas constitutivas de OpenSees que se han indicado en los apartados 20.4 y 20.5.

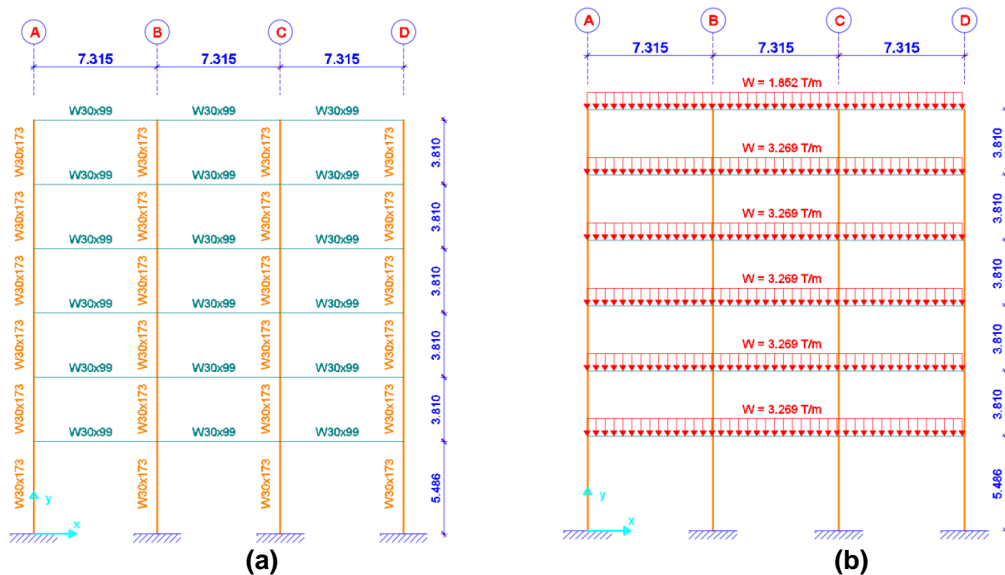


Figura 4.7 Estructura de acero de 6 pisos, con columnas W30x173 y vigas W30x99; b) Cargas verticales consideradas para el análisis. Fuente: Cagua *et al.* (2020)

• SOLUCIÓN

La solución detallada de este ejemplo se encuentra en el artículo de Cagua *et al.* (2020), no obstante, se presentará de forma resumida los pasos para este análisis. Lo primero es definir variables comunes que se van a utilizar en los programas de OpenSees y de **CEINCI-LAB**

Luego se indica la distancia entre vanos sv y las alturas de los pisos sp con estas dos variables se dibuja la estructura; además la aceleración de la gravedad y en el vector qp la carga uniforme distribuida en cada piso (ver figura 4.7)

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```

%% Variables comunes para CEINCI-LAB y OpenSees
global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno Es Abeam Ibeam Mybeam qp
global Acol Icol Mycol num_elem Tabla_Elem_Nud
global DP DN th_pP th_pN th_pcP th_pcN Dis_Fuerzas_Laterales T W fi

%% Geometría del pórtico
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en
(metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en cada
piso T/m

```

A continuación, se indica las propiedades del acero y se determina el factor C_{pr} que sirve para calcular el momento de fluencia.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```

%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=21000000; %Módulo de elasticidad del acero, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
Cpr=(Fy+Fu)/(2*Fy); % Factor que toma en cuenta la resistencia máxima de la conexión.
if Cpr < 1.2
    Cpr=Cpr;
else
    Cpr =1.2;
end

```

En la tabla 2.5, se indican las dimensiones de los perfiles W30x173 y W30x99, con las cuales puede encontrar el módulo estático Z_x , el área e inercia de los perfiles, utilizando el programa **geom_acero** o cualquier otro; además estos valores se encuentran en las tablas que ofrecen los fabricantes del acero; se determina el momento de fluencia y se tiene la altura de los perfiles. Nótese que se está trabajando en Toneladas y metro.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```

%% Secciones de los elementos
% Tipo I _ Steel Section: [d,tw,bs,bi,tfs,tfi]
% Column section % W30x173
Zx = 0.0098;
Acol = 0.0326;
Icol = 0.0034;
Mycol =Fy*Zx*Cpr;
d_col= 773.2 / 1000.0;
% beam section % W30x99
Zx = 0.0051;

```

```
Abeam = 0.0186;
lbeam = 0.0017;
Mybeam = Fy*Zx*Cpr;
d_beam = 754.4 / 1000.0;
```

Se dan valores para definir el modelo constitutivo de Krawinkler (IMK) se recomienda estudiar un poco más el modelo para poder comprender como modificar estos valores.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```
%% beam springs at Floor 2 # % W30x99
DP= 0.886; % rate of cyclic deterioration for pos loading
DN= 0.886; % rate of cyclic deterioration for neg loading

th_pP= 0.0204; % plastic rot capacity for pos loading
th_pN= 0.0204; % plastic rot capacity for neg loading

th_pcP= 0.1001; % post-capping rot capacity for pos loading
th_pcN= 0.1001; % post-capping rot capacity for neg loading
```

Hasta aquí se tienen los datos que se dan a la estructura para encontrar la curva de capacidad sísmica. Lo que viene a continuación son los programas de **CEINCI-LAB** con los cuales se obtienen los datos necesarios para calcular la matriz de rigidez, el peso en cada piso, el peso total del edificio, la matriz de masas y las masas concentradas en cada nudo que sirven para el cálculo del efecto $P - \Delta$

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```
%% Geometría del Pórtico con CEINCI-LAB y Peso en cada piso...
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[Ni,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(Ni,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,Ni,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
% .....
%% Masas
W=zeros(np,1);
for t=1:np
sum=0;
for r=1:nv
sum=-qp(t,1)*sv(r,1);
W(t,1)=W(t,1)+sum;
end
end
sum=0;
WBuilding=0;
for i=1:np
```

```

WBuilding=WBuilding+W(i,1); %Peso total en T
for ij=1:nv+1
    if ij==1
        NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
    elseif ij==nv+1
        NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(nv,1)/2;
    else
        NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij-1,1)/2+(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
    end
    masa_nudo(i,ij)=NodalMass;
end
MASA(i,i)=W(i,1)/g;
end

```

El usuario tiene la posibilidad de seleccionar que tipo de carga lateral quiere aplicar al Pushover mediante un código el mismo que se indica a continuación, para el ejemplo las fuerzas laterales se obtendrán en forma proporcional al primer modo de vibración. También tiene opción de seleccionar que tipo de gráfico desea dibujar, se recomienda si selecciona uno de ellos colocar a continuación **return** para que el programa se detenga y el usuario puede verificar si efectivamente los datos que ha dado conducen a la estructura que está analizando y de paso ver la numeración de nudos y elementos (con el programa **dibujoplano**)

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```

% Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
% Dis_Fuerzas_Laterales = 2; % 2 Distribución parabólica
% Dis_Fuerzas_Laterales = 3; % 3 Distribución triangular
% Dis_Fuerzas_Laterales = 4; % 4 Distribución uniforme
Dis_Fuerzas_Laterales = 1;
% % Dibujo de la Estructura 2D
% dibujoplano(X,Y,NI,NJ)
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
% dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
% dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)

```

A continuación, se determina las propiedades dinámicas de la estructura (matriz de rigidez lateral, la matriz de masas ya se había determinado y se encuentran los períodos y modos de vibración) también se encuentran los factores de participación modal. **Prop_Dinamicas_Estructuras_2D** es el nombre de la carpeta que se abre para ir almacenando resultados.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```

%% Propiedades dinámicas
[Seccion]=Unica_Vg_COL(nudt,coseno,Acol,lcol,Abeam,lbeam);
%Seccion=[ELEMENTO, BASE, ALTURA, NUMEROS DE ELEMENTOS A CREAR,
INCREMENTO EN NUMERO DE ELEMENTO]
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
% Matriz de Rigidez
[K]=krigidez_acero(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,Es);

```

```

%.....
KTT=K; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (T/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
%.....
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:');
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez
Masa_Rigidez = [MASA,KL];
mkdir Prop_Dinamicas_Estructuras_2D
save(['Prop_Dinamicas_Estructuras_2D\EST_1_M_K.txt'],['Masa_Rigidez'],'-ascii');

```

Ahora se empieza a preparar los datos para usar los programas relacionados con el modelo de plasticidad concentrada para hallar el Pushover. En el apartado anterior se indicó que se tienen dos numeraciones de nudos y elementos, una para el **CEINCI-LAB** y otra para OpenSees; se pasa de la una a la otra con el programa **ElementosNudos**. Se recuerda que a cada elemento se lo debe dividir en 5 partes como se muestra en la figura 4.8, con el objetivo de asignar diferentes propiedades no lineales a cada sección.

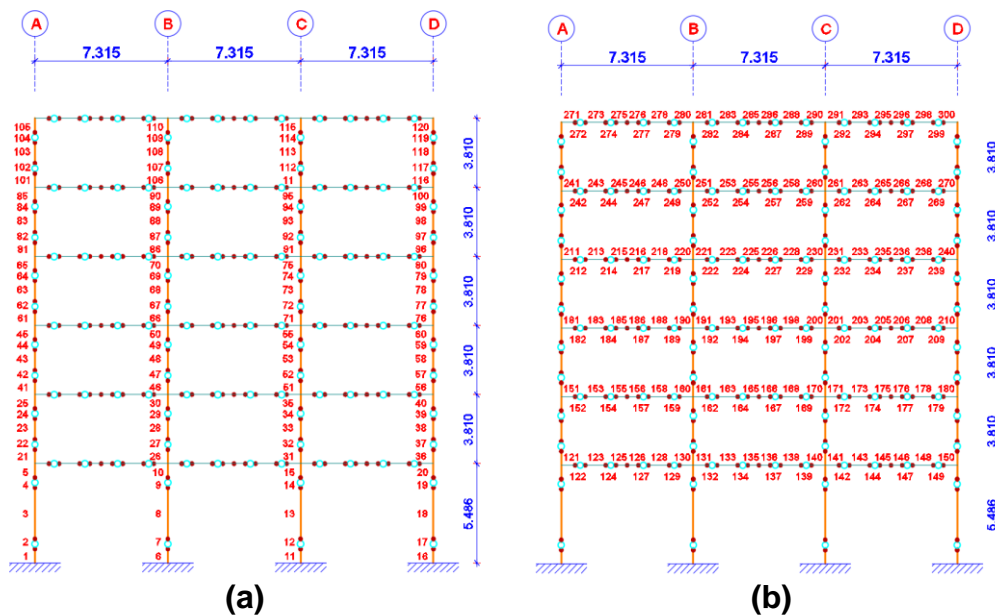


Figura 4.8 a) Numeración de elementos columnas; b) Numeración de elementos vigas.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```

%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,d_col,d_beam);
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2)';
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3)';
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
% .....
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
%% Dibujos
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)

```

El programa **Pushover_Opensees** está en Matlab y vale la pena de que el usuario ingrese y vea como se preparan los datos para los modelos constitutivos e información que requiere el programa **Pushover_Estructura.tcl** que está escrito en el lenguaje Tcl para el análisis en OpenSees. De igual manera se recomienda mirar este programa para entender la forma de cálculo del Pushover.



Figura 4.9 Diagrama de proceso de la función **Pushover_OpenSees()**

El programa se ejecuta en OpenSees con la sentencia: **OpenSees.exe seguido del nombre del programa**. Es importante que se cuente en la carpeta con el programa ejecutable del OpenSees y las rutinas que se hacen referencia en Pushover_Opensees.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```

Pushover_Opensees()
! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl

```

Una vez que se ha realizado el cálculo del Pushover Monotónico con la curva constitutiva de Krawinkler para el modelo de plasticidad concentrada de las vigas y con el modelo bilineal para la plasticidad concentrada en columnas, se regresan los resultados a **CEINCI-LAB** para proceder a realizar los dibujos.

Para que el análisis se desarrolle de forma correcta, en la carpeta junto al programa **Pushover_Estructura.tcl** se debe encontrar los archivos con los modelos de materiales y tipos de elementos, a más de los programas con extensión (.tcl) necesarios para el análisis de OpenSees.exe, es decir los archivos que se muestran en la figura 4.10 (estos programas serán almacenados en los perfiles de ResearchGate de los autores cuando se publique el artículo).

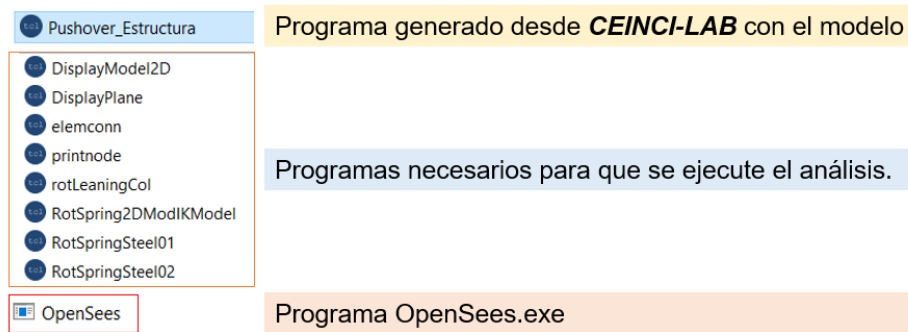


Figura 4.10 Programas necesarios para que se ejecute el análisis en OpenSees.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover

```
%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread("Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out");
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover2(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];
%% Grabar los archivos
mkdir Pushover_Estructuras_2D
save(['Pushover_Estructuras_2D\EST_1.txt'],['Resultados'],'-ascii');
```

La función **Graficar_Pushover2.m** es la que genera la gráfica con desplazamiento en el tope y cortante basal, es decir la curva del análisis Pushover, como se muestra en la figura 31b. La metodología para determinar el desplazamiento efectivo de fluencia $\delta_{y_{eff}}$ y desplazamiento último δ_u es la que se presenta en el FEMA P695, donde el desplazamiento último es el valor de desplazamiento para el cual se ha tenido una pérdida del 20% de resistencia, es decir el valor para el cual el cortante baja a $0.8 \cdot V_{máx}$. El desplazamiento efectivo de fluencia se puede calcular en base a la ecuación 4.14.

$$\delta_{y_{eff}} = \Gamma_1 \cdot \frac{V_{máx}}{W} \cdot \left(\frac{g}{4 \cdot \pi^2} \right) \cdot T_1^2 \quad (4.14)$$

Donde Γ_1 es el factor de participación modal del primer modo de vibración bajo condiciones elásticas; T_1 es el periodo fundamental de vibración de la estructura; g es la gravedad; $V_{máx}$ es el cortante máximo del análisis Pushover; W es la carga reactiva total del sismo.

En la figura 4.11 a, se indican los nudos y elementos que se consideran para el modelo constitutivo de plasticidad concentrada, con los cuales se halló la curva de capacidad sísmica que se presenta en la figura 4.11 b. Para poder comparar con las curvas encontradas cuando se trabaja solo con **CEINCI-LAB** es necesario indicar el punto U, el mismo que se alcanza normalmente cuando se llega a una deriva global máxima definida o una deriva de piso máxima. Por esto con líneas entrecortadas, se muestran los puntos Y (cuando ingresa al rango no lineal) y el punto U, cuando se llega a uno de los criterios de colapso.

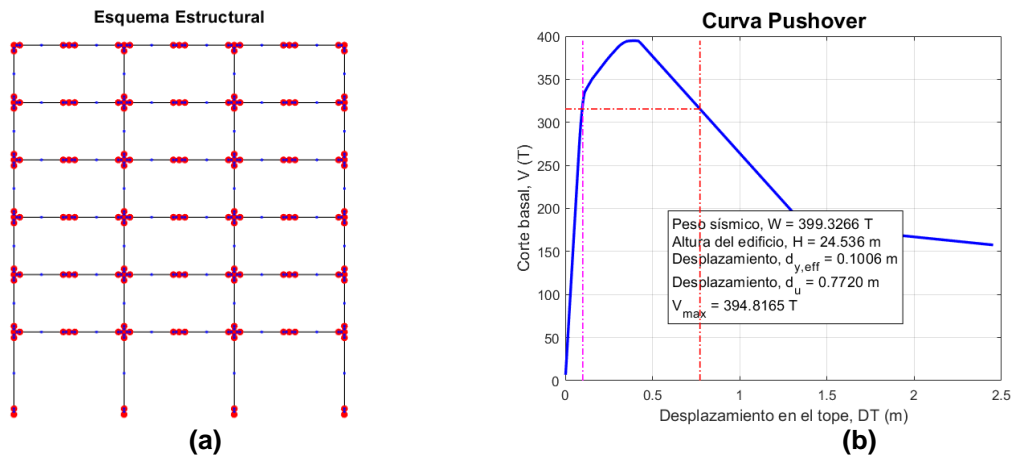


Figura 4.11 Resultados: a) Nudos y elementos para el modelo constitutivo de Krawinkler; b) Curva de capacidad sísmica resistente con línea continua y con entrecortada se indican los puntos de fluencia y último asociado a un criterio de colapso.

Nótese que a partir del Punto U, la estructura se deforma demasiado y está trabajando en la zona residual.

El pórtico presentado anteriormente se refuerza con diagonales de acero en forma de “V invertida” o “X de múltiples pisos” como se muestra en la figura 4.12.

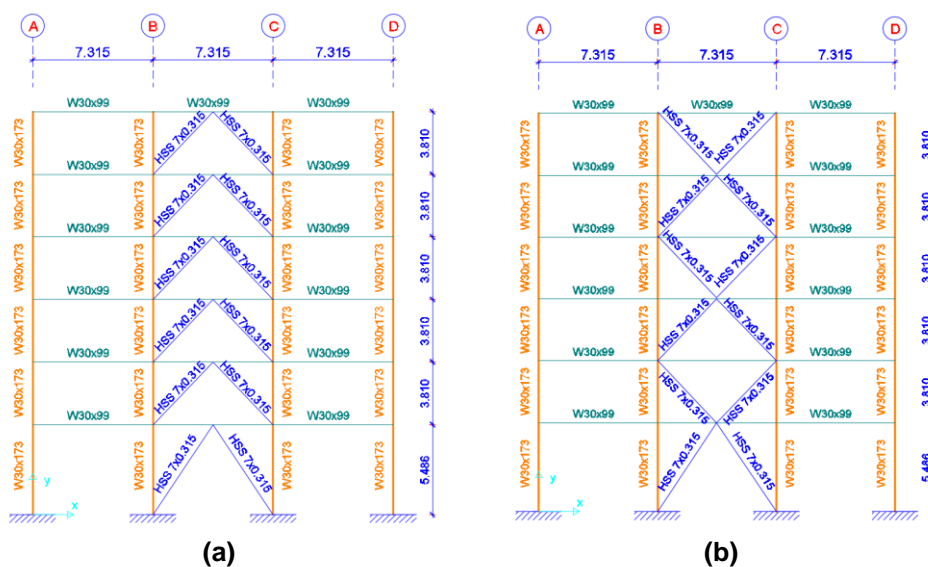


Figura 4.12 Estructura con diagonales a) en V invertida; b) en X de múltiples pisos.

Se adjunta el código para generar el análisis Pushover de estas estructuras en el anexo B para que el lector pueda revisar con detalle el procedimiento, no obstante, se manifiesta que es similar a lo presentado anteriormente. En este caso se destaca la utilización de una nueva función denominada **ElementosNodosDiagonales** que permite generar el modelo dividiendo los elementos en 5 partes como se muestra en la figura 4.13.

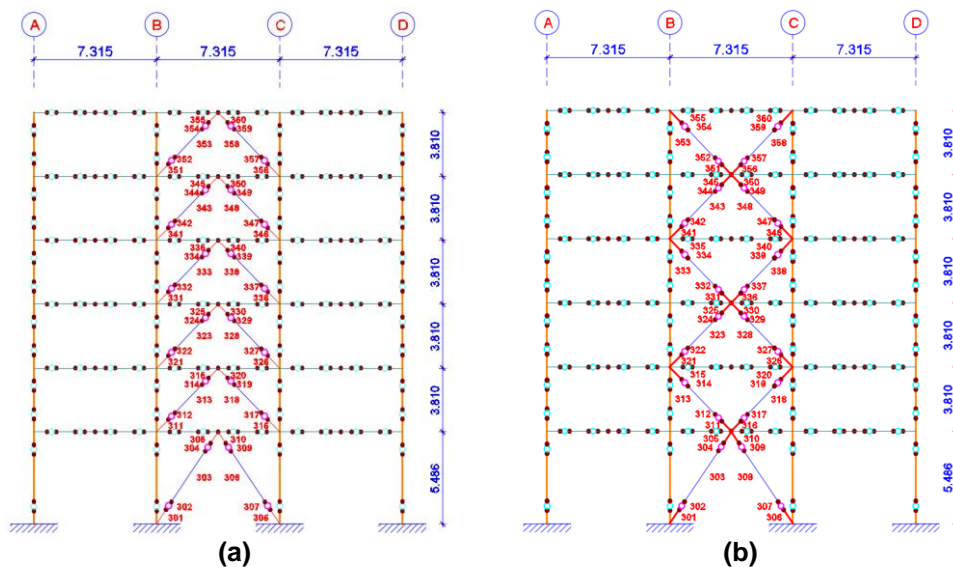


Figura 4.13 Numeración de elementos; a) Pórticos de diagonales en forma de V invertida; b) Pórticos de diagonales en forma de X de múltiples pisos.

Otra diferencia en el caso de estructuras con diagonales es la función que se utiliza para generar el archivo con el código Tcl, en este caso es **Pushover_OpenSees_Diag()**, la función tiene un objetivo similar al presentado en la figura 4.10 y el archivo que genera tiene por nombre **Estructura_Pushover_Ref.tcl**.

Al ejecutarse OpenSees desde Matlab se generan los cálculos del Pushover del modelo propuesto y aparece una ventana emergente con la simulación del análisis como se muestra en la figura 4.14.

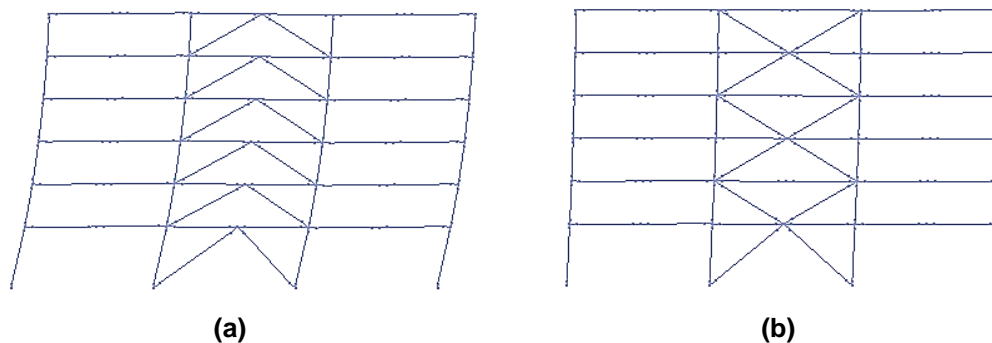


Figura 4.14 Ventana con la simulación del análisis Pushover en OpenSees. a) Estructura con diagonales en V invertida; b) Estructura con diagonales en X de múltiples pisos.

No se presenta los resultados porque se espera que el lector se motive por ejecutar el programa y pueda emitir conclusiones sobre este tipo de reforzamiento.

5. ACOPLAMIENTO CEINCI-LAB Y OPENSEES NIVEL 2: ESTRUCTURAS DE ACERO

En la sección anterior se ilustra la ventaja de emplear los dos sistemas computacionales para el análisis estructural, tanto **CEINCI-LAB** para la gestión de datos y resultados de forma sencilla como el potencial de OpenSees en cuanto a los modelos de no linealidad que considera.

En el acoplamiento de estos sistemas computacionales nivel 1 existen algunas limitaciones, en cuanto a las secciones de los elementos y es por ello que en esta sección se presentará nuevas funciones para variar secciones de elementos en un mismo pórtico, para ilustrar las mismas se desarrollará el análisis Pushover de la estructura indicada en la figura 5.1; cabe indicar que es la misma estructura analizada en la sección 4, pero con la diferencia de tener varias secciones de vigas y columnas asignadas al modelo.

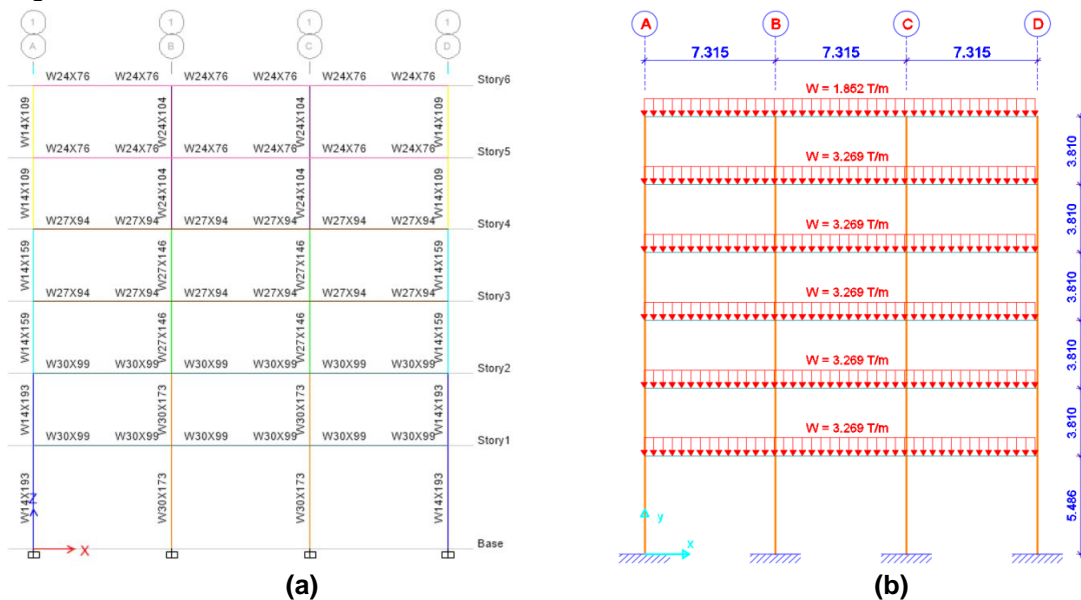
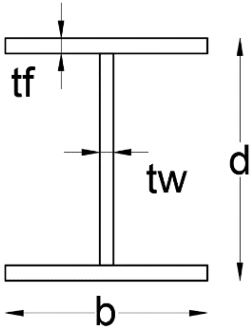











Figura 5.1 Estructura de acero de 6 pisos, secciones de los elementos columnas y vigas; b) Cargas verticales consideradas para el análisis. Fuente: Cagua *et al.* (2020)

Las siguientes propiedades de material para modelar el pórtico: ASTM A36, $F_y = 36$ ksi, $F_u = 58$ ksi y $E = 29000$ Ksi. Las dimensiones de las columnas y vigas se definen en la Tabla 5.1, donde la identificación del color es consistente con la figura 5.1.

Tabla 5.1 Descripción de las secciones de los elementos estructurales (Simétricas).


Color	Elemento	Dimensiones (mm) d x b x tf x tw
	Columnas W30x173	773x381x27.2x17.2
	Columnas W14x193	394x399x22.6x36.6
	Columnas W27x146	696x355.6x24.8x24.8
	Columnas W14x159	381x370x30.2x30.2
	Columnas W24x104	612x325x19.05x19.05
	Columnas W14x109	363x371x21.8x21.8
	Vigas W30x99	754x268x17x13
	Vigas W27x94	683x254x18.9x18.9
	Vigas W27x76	607x228x17.3x17.3

El programa inicia con la definición de las variables globales, nótese que no son las mismas que para programas anteriores, en este caso se elimina algunas y se incluye otras variables para hacer más ágil el análisis, por didáctica las nuevas variables y funciones se muestran de color rojo. La geometría es la misma que ya se presentó anteriormente, se recuerda que únicamente depende de la separación de vanos **sv** y la altura de entrepisos **sp**.

En este caso debido a que el modelo de Krawinkler para la zona de daños en las vigas depende de la conexión entonces se presenta la variable **Uso_Conexion** que puede ser 1 si es una conexión RBS (figura 4.6 b), 2 en caso de ser otra conexión precalificada de las presentadas en la figura 4.6 y en el caso de no ser una conexión precalificada se coloca 3, no se recomienda utilizar conexiones que no han sido probadas experimentalmente y demostrado un buen desempeño pero a veces en el medio se lo hace y por ello se decide incluirlo en el programa (para este caso el momento esperado es menor que en el caso de conexiones precalificadas como un factor de seguridad, esta consideración es académica).

Un dato adicional que se requiere en este programa es la deriva global máxima (**Deriva_Global**) hasta la cual se calculará la curva Pushover, esto para limitar el análisis en un rango donde el ingeniero o estudiante desea conocer el probable comportamiento que tiene la estructura ante cargas laterales. En este caso se limita el análisis hasta la deriva global de 4% de la altura total de la estructura, por ello en MATLAB se debe ingresar el valor de 0.04.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno qp num_elem Tabla_Elem_Nud Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
global Es Fy Fu Sec_AIZ th_Sec Uso_Conexion L2 Deriva_Global Nud_Xsimilares
```

```

%% Geometría del pórtico
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en
(metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en cada
piso T/m
Uso_Conexion = 1; %Uso_Conexion = # % Conexion Precalificada RBS 1, Conexion
Precalificada diferente que RBS 2, No Precalificada 3.
Deriva_Global = 0.04; % Fracción de la altura total de la estructura

```

A continuación, se muestra el código que permite generar la geometría del pórtico considerando nudo en medio de la viga con la numeración de los elementos de la figura 2.14 c mostrada en la sección 2. En la variable **Nud_Xsimilares** se registra el número de nudo de la unión viga-columna que tienen las mismas coordenadas en “Y”, es decir en un mismo piso, esto sirva para definir que las vigas trabajaran como elementos axialmente rígidos y que los desplazamientos horizontales de un piso son iguales en los nudos de cada nivel.

En estos programas nivel 2 se introduce una nueva función [**MASA, masa_nudo, WBuilding, W**]=**masa_carga_reactiva(np, nv, qp, sv, g)**; como datos se tiene el número de pisos, **np**; número de vanos, **nv**; la carga uniforme en las vigas que componen a la carga reactiva, **qp**; la separación de los vanos, **sv**; y la gravedad, **g**. El principio para asignar las cargas es el mismo que se explicó en la sección 4.1.2 y como resultados de esta función se tiene: Matriz de masa considerando 1 gdl por piso, en la matriz **MASA**; las masas asignadas en cada nudo, **masa_nudo**; el peso reactivo del edificio, **WBuilding**; y la carga reactiva en cada piso, **W**.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```

[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[Ni,Nj]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(Ni,Nj,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,Ni,Nj); %long. de @elem, seno y coseno
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
Nud_Xsimilares=zeros(nr,np);
for k = 1:nr
a=find(Xcol(1,k)==X);
Nud_Xsimilares(k,1:length(a))=a;
end
%% Masas
[MASA, masa_nudo, WBuilding, W]=masa_carga_reactiva(np, nv, qp, sv, g);

Dis_Fuerzas_Laterales = 1;
% % Dibujo de la Estructura 2D
% dibujo(X,Y,Ni,Nj)
dibujoNudElem(X,Y,Ni,Nj,CG)
% dibujogdl(X,Y,Ni,Nj,CG)

```

En este nuevo nivel de acoplamiento se asigna diferentes secciones de vigas y columnas, este programa funciona para secciones tipo I de acero, pero un usuario con conocimientos de programación Tcl puede modificar el archivo final, resultante de **CEINCI-LAB** y cambiar las propiedades asignadas en el programa.

Para hacer fácil la asignación de secciones en los modelos se emplea la matriz **Sec_VG_COL**, esta matriz contiene los tipos de secciones en cada fila y 7 columnas, la primera es el tipo de sección, seguido de esto se colocan las dimensiones de la sección en milímetros siguiendo la nomenclatura mostrada en la tabla 5.1; las dimensiones son peralte, **d**; espesor del alma, **tw**; ancho del patín superior, **bs** e inferior **bi**; espesor de los patines superior **tfs** e inferior **tfi**.

Para asignar cada sección a los elementos correspondientes se emplea la matriz **Elem_Sec_VG_COL** que tiene en la primera columna el tipo de sección y seguido a esta columna se debe escribir el número de elemento a la cual se asignara la misma (la identificación de los elementos se puede obtener con la función de **CEINCI-LAB dibujoNudElem** que presenta la figura 2.14 c); por ejemplo, la sección 4 se asignará a los elementos 2, 6, 3 y 7 (color rojo y subrayado de amarillo en el código), se completa con ceros para que no haya problemas en la definición de las matrices en MATLAB puesto que el número de columnas en todas las filas de una matriz debe ser las mismas.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2

% Sec_VG_COL = Elementos I =[tipo#, d,tw,bs,bi,tfs,tfi]... En milímetros!
Sec_VG_COL=[1 393.7, 22.6, 398.8, 398.8, 36.6, 36.6 ; % Tipo 1 es W14x193
            2 381.0, 18.9, 396.2, 396.2, 30.2, 30.2 ; % Tipo 2 es W14x159
            3 363.2, 13.3, 370.8, 370.8, 21.8, 21.8 ; % Tipo 3 es W14x109
            4 772.2, 16.6, 381.0, 381.0, 27.2, 27.2 ; % Tipo 4 es W30x173
            5 696.0, 15.4, 355.6, 355.6, 24.8, 24.8 ; % Tipo 5 es W27x146
            6 612.14,12.7, 325.12, 325.12, 19.05, 19.05 ; % Tipo 6 es W24x104
            7 754.4, 13.2, 266.7, 266.7, 17.0, 17.0 ; % Tipo 7 es W30x99
            8 683.3, 12.4, 254.0, 254.0, 18.9, 18.9 ; % Tipo 8 es W27x94
            9 607.1, 11.2, 228.3, 228.3, 17.3, 17.3]; % Tipo 9 es W27x76;

% Elem_Sec_VG_COL = ["tipo# respecto de Sec_VG_COL", Identificador de los
elementos]
Elem_Sec_VG_COL=[1 1, 5, 4, 8 0, 0;
                2 9, 13, 12, 16 0, 0;
                3 17, 21, 20, 24 0, 0;
                4 2, 6, 3, 7 0, 0;
                5 10, 14, 11, 15 0, 0;
                6 18, 22, 19, 23 0, 0;
                7 25, 26, 27, 28, 29, 30;
                7 31, 32, 33, 34, 35, 36;
                8 37, 38, 39, 40, 41, 42;
                8 43, 44, 45, 46, 47, 48;
                9 49, 50, 51, 52, 53, 54;
                9 55, 56, 57, 58, 59, 60];
```


Hasta este punto se colocan los datos, como puede apreciar el lector es muy sencillo ingresar los datos y ensamblar un pórtico plano en **CEINCI-LAB**, esta ventaja es aprovechada para facilitar el análisis no lineal con OpenSees. Seguido de esta sección se muestra el código para generar los requerimientos que necesita OpenSees y como la metodología es similar a la presentada en la sección 4 entonces únicamente se explicará las nuevas rutinas.

Como en este caso se tiene diferentes secciones entonces la función **Diferentes_Vg_COL** se utilizará para definir las nuevas secciones en cada elemento a partir de las matrices **Sec_VG_COL** y **Elem_Sec_VG_COL**, como resultados se tiene una matriz con el área e inercia de la sección en cada elemento, Sección; luego a cada elemento se lo enlaza con un tipo de sección en la matriz **Elem_Tipo_Prop2**; se calcula el módulo plástico de la sección en **Z_ELEM** y como se utiliza el modelo de Krawinkler (IMK) entonces se determina en base a las ecuaciones de la sección 4 los valores de las **rotaciones denominadas como fluencia y post fluencia (θ_p y θ_{pc} , en radianes)**; se debe recordar que estas funciones tienen validez para secciones simétricas y se asume que el comportamiento en compresión es similar al de tracción (simetría en el modelo de Krawinkler, es por ello que se presenta 4 valores en **th_ELEM**). Las hipótesis del modelo de Krawinkler se presentan únicamente porque las rutinas de **CEINCI-LAB** están calculando modelos simplificados hasta este punto, pero en un futuro se podrá incorporar un modelo más complejo.

Lo que sigue del código es ensamblar la estructura y determinar las matrices de rigidez y masas con **CEINCI-LAB** en base a un modelo de 1gdl por piso; con estas propiedades dinámicas de la estructura se puede determinar los periodos y modos de vibración, es importante mencionar que con el primer modo de vibración se puede hacer la distribución de cargas laterales para el Pushover y también es importante para determinar el desplazamiento efectivo de fluencia con la metodología del FEMA P695.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
%% Propiedades dinámicas
[Seccion,Elem_Tipo_Prop2,Z_ELEM,th_ELEM]=Diferentes_Vg_COL(nudt,Sec_VG_C
OL,Elem_Sec_VG_COL,Usos_Conexion,Fy,Es,L);
%Seccion=[ELEMENTO, Área, Inercia, NUMEROS DE ELEMENTOS A CREAR,
INCREMENTO EN NUMERO DE ELEMENTO]
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
% Matriz de Rigidez
[K]=krigidez_acero(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,Es);
%.....
KTT=K; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (T/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
%.....
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
```



```

fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
    FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez
Masa_Rigidez = [MASA,KL];
mkdir Prop_Dinamicas_Estructuras_2D
save(['Prop_Dinamicas_Estructuras_2D\EST_1_M_K.txt'],[Masa_Rigidez'],'-ascii');
%.DATO:Dirección carpeta

```

El modelo propuesto para el análisis en OpenSees es un modelo que simula plasticidad concentrada, como ya se manifestó en la sección 4. Entonces se requiere dividir a cada elemento en 5 partes, esta división se lo hace de forma automática con **ElementosNudos_V2** que es similar a la función **ElementosNudos** pero para diferentes secciones de elementos, el modelo resultante es similar al mostrado en la figura 5.2.

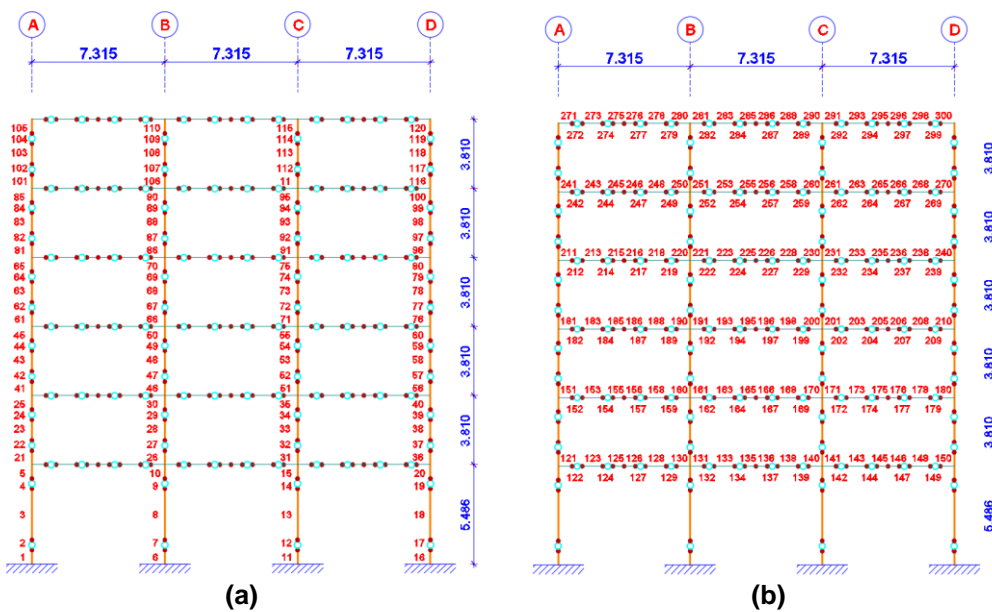


Figura 5.2 a) Numeración de elementos columnas; b) Numeración de elementos vigas.

En este nuevo modelo se puede visualizar 300 elementos, es por ello que la matriz denominada **Tabla_Elem_Nud** tiene 300 filas donde cada una de ellas corresponde a un elemento. Esta matriz tiene 4 columnas donde la primera es una etiqueta, es decir el primer número corresponde al elemento original (figura 2.14 c) seguido de 2 ceros y el último número, del 1 al 5, representa el segmento del elemento que fue dividido; la columna 2 y 3 corresponde al nudo inicial y final de cada nuevo elemento, la columna 4 es una etiqueta para identificar el tipo de propiedad que corresponde a cada elemento. La etiqueta de la columna 4 puede ser 0 para elementos rígidos (misma propiedad que un elemento elástico, pero con área e inercia multiplicada por 10), luego 1 para elementos elásticos, 2 para zonas de plasticidad concentrada con

propiedades de un elemento bilineal steel01 y 3 para las zonas de plasticidad concentrada de vigas con propiedad del modelo Ibarra-Medina-Krawinkler.

Es importante mencionar que los nuevos nudos con coordenadas X, Y tienen en consideración las dimensiones de cada elemento para el nudo rígido en el cual fuera de esa zona se puede plastificar las vigas y columnas, esto con la nueva función **[drig]=Longitud_rigida(NI,NJ,nudcol,oi,tipo_elem,Elem_Tipo_Prop2,d)** que se requiere internamente en ElementosNudos_V2.

Seguido de esto se debe tener en cuenta que los elementos se dividieron, entonces se debe asignar las propiedades de los elementos con los modelos de **CEINCI-LAB** a unas nuevas matrices considerando que se incrementaron en 5 veces el número de elementos. En este caso la matriz **Sec_AIZ** contiene el área, inercia y módulo de plasticidad de las secciones de cada elemento; la matriz **th_Sec** almacena las rotaciones en base a las ecuaciones de Krawinkler y **L2** es una matriz con las longitudes del elemento original, es decir sin dividir; se requiere esta porque en **Pushover_Opensees_V2()** se determina la rigidez a flexión de los elementos que depende de la longitud del elemento para hacer la corrección de rigidez como se indica en la sección 4. Para el lector es evidente que la función principal de todo este proceso es **Pushover_Opensees_V2()** ya que esta función es la que traduce del lenguaje (MATLAB) con las funciones de **CEINCI-LAB** al lenguaje Tcl que requiere OpenSees para ejecutarse, entonces esta función tiene el mismo propósito que **Pushover_Opensees** explicado en la figura 4.9.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos_V2(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,Sec_V
G_COL,Elem_Tipo_Prop2);

[Sec_AIZ,th_Sec, L2]=Secciones_Mod_OpenSees(nudt,ELEM, Z_ELEM,th_ELEM, L);
% Area, Inercia, Modulo Plastico Z
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2);
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
% .....
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
%% Dibujos
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)
Pushover_Opensees_V2()

! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl
```

Al ejecutarse OpenSees (! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl) entonces el análisis Pushover empieza y automáticamente aparece un gráfico con el desarrollo del análisis como se puede evidenciar en la figura 5.3 b.

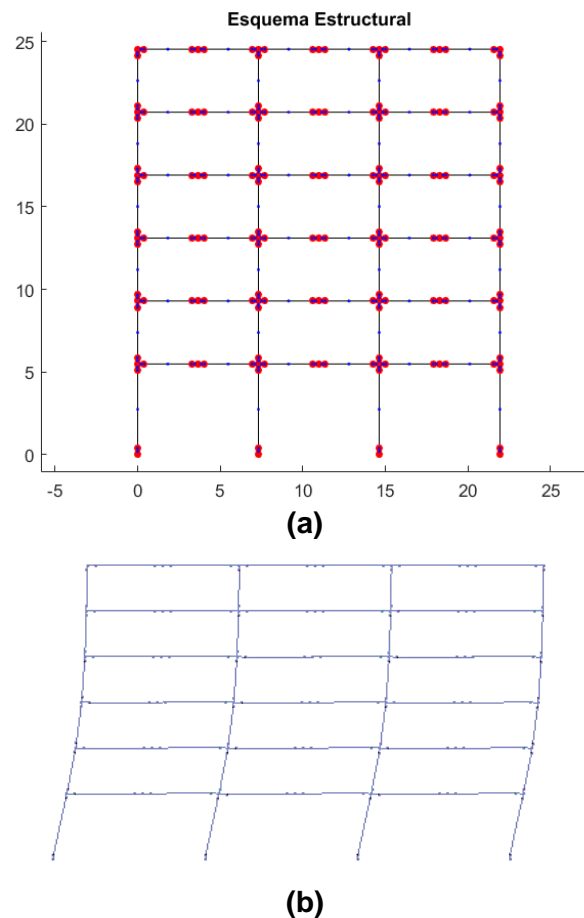


Figura 5.3 a) Modelo de vigas y columnas generado en CEINCI-LAB. b) Ventana con la simulación del análisis Pushover en OpenSees.

Los resultados del análisis Pushover se almacenan en una carpeta que es generada de forma automática por OpenSees, esta carpeta tiene por nombre **Concentrated-Pushover-Output** y almacena en este caso 5 archivos de texto con extensión **.out**, estos archivos son Desplazamiento en el tope **Disp_Roof**, y para cada nudo de la base se genera un archivo denominado **Vbase#** con información del cortante experimentado como reacción ante las cargas laterales aplicadas.

La función **Graficar_Pushover2.m** es la que genera la gráfica con desplazamiento en el tope y cortante basal, es decir la curva del análisis Pushover, como se muestra en la figura 5.4. La metodología para determinar el desplazamiento efectivo de fluencia $\delta_{y_{eff}}$ y desplazamiento último δ_u es la que se presenta en el FEMA P695, que se explicó en la sección 4 de este trabajo.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread('Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out');
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover2(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];
```

```
%% Grabar los archivos
mkdir Pushover_Estructuras_2D
save(['Pushover_Estructuras_2D\EST_1.txt'], ['Resultados'], '-ascii'); %DATO: Dirección
carpeta
```

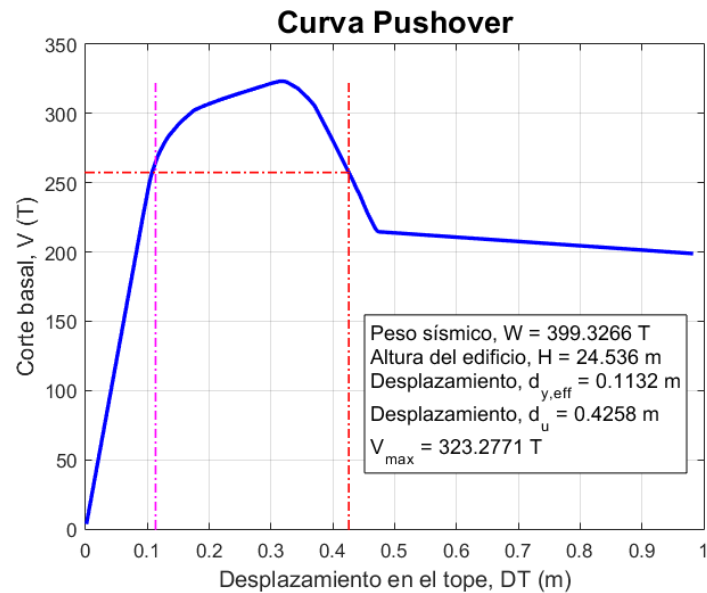


Figura 5.4 Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OPENSEES (Distribución de cargas en función del 1er modo de vibración).

La tendencia de la curva Pushover es similar a la presentada en la sección anterior para el mismo pórtico con secciones únicas, en esta sección se procederá a incluir diagonales de acero en el vano central del pórtico, además es adecuado que el código pueda incluir diferentes secciones de diagonales como se presenta en la figura 5.5.

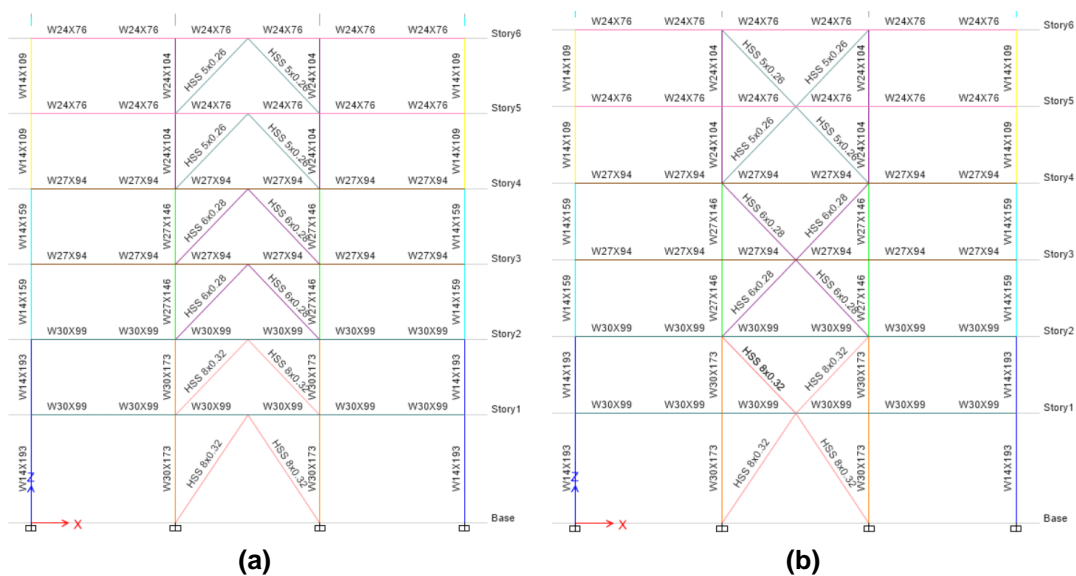
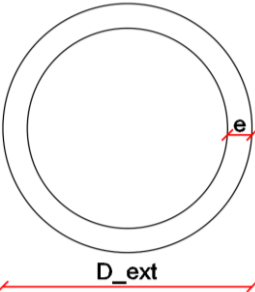


Figura 5.5 Estructura con diagonales a) en V invertida; b) en X de múltiples pisos.

Tabla 5.2 Descripción de las secciones de los elementos diagonales.

	Color	Elemento	Dimensiones (mm) D_ext x e
		Diagonal Piso 1 <u>HSS 8x0.32</u>	219.10x8.18
	Diagonal Piso 2 <u>HSS 6x0.28</u>	168.30x7.11	
	Diagonal Piso 3 <u>HSS 5x0.26</u>	141.30x6.55	

El programa para incluir diagonales de acero como mecanismo de reforzamiento se presentará a continuación; los autores en la sección anterior dejamos los códigos para realizar el análisis Pushover del pórtico con diagonales de acero colocadas en forma de V invertida y X de múltiples pisos, no obstante, las rutinas son de nivel 1, es decir con limitaciones en la asignación de secciones de estos elementos.

En esta sección se presenta la modificación del código principal de **CEINCI-LAB** para incluir estos elementos estructurales, el código es similar al analizado al inicio de esta sección y se indicará de color rojo las actualizaciones.

En el programa se comienza definiendo variables globales para incluir diagonales, además la inclusión de estos elementos se lo realiza con los vectores **mar2** y **marv** donde en el primer vector **mar2** se coloca los vanos en los que se desea colocar diagonales en forma de V invertida y en **marv** las diagonales en forma de V; cuando se desea colocar X de múltiples pisos como en la figura 5.5 b el contenido de estos vectores es indicado en color morado dentro del código.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```

global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno qp num_elem Tabla_Elem_Nud Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
global Es Fy Fu Sec_AIZ th_Sec Uso_Conexion L2 Deriva_Global Nud_Xsimilares
global nod_Diag X_Diag Y_Diag NI_Diag NJ_Diag
global Fy_brace Es_brace Sec_AI_Diag num_Diag Tabla_Elem_Nud_Diag

%% Geometría del pórtico
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en
(metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en cada
piso T/m
Uso_Conexion = 1;
%Uso_Conexion = # % Conexion Precalificada RBS 1, Conexion Precalificada diferente
que RBS 2, No Precalificada 3.
Deriva_Global = 0.04; % Fracción de la altura total de la estructura
% .....
mar2 = [2;5;8;11;14;17];
marv=0;
% mar2 = [2;8;14]; % Diagonales en forma de V invertida
% marv = [5;11;17]; % Diagonales en forma de V

```

```

% .....
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
Nud_Xsimilares=zeros(nr,np);
for k = 1:nr
a=find(Xcol(1,k)==X);
Nud_Xsimilares(k,1:length(a))=a;
end
% .....
[GEN]=geometria2_nudo_diagonales(nv, np, nudt,mar2,marv);
[NI2,NJ2]=gn_portico(GEN);
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
[VC_Diag]=vc(NI_Diag,NJ_Diag,CG);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag); %long. de
@elem, seno y coseno

```

Para los lectores que han revisado con detenimiento los avances de CEINCI-LAB y los artículos de los autores respecto al acoplamiento de este sistema computacional con OpenSees es fácil asimilar que hasta este punto se definen las coordenadas de los nudos **X**, **Y** junto con la definición de los elementos, cada elemento es definido por el nudo inicial **NI** y por el nudo final **NJ**, además se entiende por las siglas **Diag** a los vectores que contiene información de los elementos con las diagonales.

A continuación, se debe definir las masas, la distribución de las cargas laterales para el Pushover monotónico, los dibujos y las propiedades de los elementos vigas y columnas. En caso de requerir realizar los dibujos del pórtico con las diagonales entonces el usuario debe emplear las funciones de dibujo con las variables con el nombre **Diag**.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```

%% Masas
[MASA, masa_nudo, WBuilding, W]=masa_carga_reactiva(np, nv, qp, sv, g);
% Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
% Dis_Fuerzas_Laterales = 2; % 2 Distribución parabólica
% Dis_Fuerzas_Laterales = 3; % 3 Distribución triangular
% Dis_Fuerzas_Laterales = 4; % 4 Distribución uniforme
Dis_Fuerzas_Laterales = 1;
% % .....
% % Dibujo de la Estructura 2D
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
% dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
% dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
% % .....
% % Dibujo de la Estructura 2D
% dibujo(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag)
dibujonudElem(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag,CG)

```

```

% dibujogdl(X,Y,Nl_Diag,NJ_Diag,CG)
%% .....SECCIONES
%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
Fy_brace=Fy;
Es_brace=Es;
% Sec_VG_COL = Elementos I =[tipo#, d,tw,bs,bi,tfs,tfi]... En milímetros!!
Sec_VG_COL=[1 393.7, 22.6, 398.8, 398.8, 36.6, 36.6 ; % Tipo 1 es W14x193
2 381.0, 18.9, 396.2, 396.2, 30.2, 30.2 ; % Tipo 2 es W14x159
3 363.2, 13.3, 370.8, 370.8, 21.8, 21.8 ; % Tipo 3 es W14x109
4 772.2, 16.6, 381.0, 381.0, 27.2, 27.2 ; % Tipo 4 es W30x173
5 696.0, 15.4, 355.6, 355.6, 24.8, 24.8 ; % Tipo 5 es W27x146
6 612.14,12.7, 325.12, 325.12, 19.05, 19.05 ; % Tipo 6 es W24x104
7 754.4, 13.2, 266.7, 266.7, 17.0, 17.0 ; % Tipo 7 es W30x99
8 683.3, 12.4, 254.0, 254.0, 18.9, 18.9 ; % Tipo 8 es W27x94
9 607.1, 11.2, 228.3, 228.3, 17.3, 17.3]; % Tipo 9 es W27x76;
% Elem_Sec_VG_COL = ["tipo# respecto de Sec_VG_COL", Identificador de los
elementos]
Elem_Sec_VG_COL=[1 1, 5, 4, 8 0, 0;
2 9, 13, 12, 16 0, 0;
3 17, 21, 20, 24 0, 0;
4 2, 6, 3, 7 0, 0;
5 10, 14, 11, 15 0, 0;
6 18, 22, 19, 23 0, 0;
7 25, 26, 27, 28, 29, 30;
7 31, 32, 33, 34, 35, 36;
8 37, 38, 39, 40, 41, 42;
8 43, 44, 45, 46, 47, 48;
9 49, 50, 51, 52, 53, 54;
9 55, 56, 57, 58, 59, 60];

```

Las funciones de **CEINCI-LAB** denominadas dibujo, dibujoNudElem y dibujogdl permiten elaborar las gráficas indicadas a continuación en las figuras 5.6a, 5.6b y 5.6c.

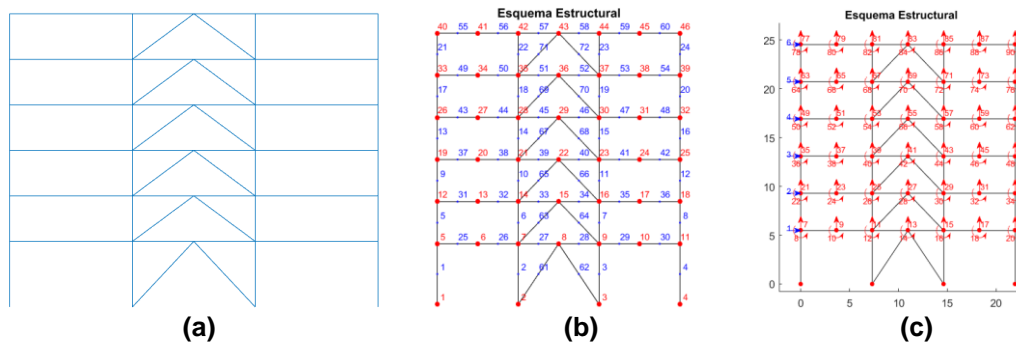


Figura 5.6 a) Esquema estructural; b) Numeración de nudos y elementos; c) Grados de libertad a empleados por CEINCI-LAB (Para OpenSees se tiene 3 gdl por nudo, pero no con coordenadas principales).

A continuación, se presenta el código para incluir las secciones de las diagonales, si bien todo es nuevo solo se resalta de color rojo lo que es relevante para el programa, esto es la matriz denominada **Sec_Diag**; esta matriz contiene la información de área e inercia para los elementos diagonales, siempre tiene 5 columnas de las cuales la primera es el nombre del elemento diagonal a generar, en este caso elemento 61 acorde a la figura 5.5

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
% .....
% Secciones para las diagonales * Nota lo importante es el área e inercia
% Tipo 1
diae=0.22; %Diámetro exterior
diai=0.22-8*2/1000; %Diámetro interior
A1=pi*diae^2/4-pi*diai^2/4; % área
I1=pi*diae^4/64-pi*diai^4/64; % inercia
% Tipo 2
diae=0.17; %Diámetro exterior
diai=0.17-7*2/1000; %Diámetro interior
A2=pi*diae^2/4-pi*diai^2/4; % área
I2=pi*diae^4/64-pi*diai^4/64; % inercia
% Tipo 3
diae=0.14; %Diámetro exterior
diai=0.14-6.5*2/1000; %Diámetro interior
A3=pi*diae^2/4-pi*diai^2/4; % área
I3=pi*diae^4/64-pi*diai^4/64; % inercia
% .....
% Sec_Diag =[Elem Area Inercia num_ele_generar Inc_ID *** Acero];
Sec_Diag = [61 A1 I1 3 1;
65 A2 I2 3 1;
69 A3 I3 3 1];
```

La matriz de rigidez de la estructura con diagonales en **CEINCI-LAB** se lo hace con las aportaciones de la rigidez del pórtico principal **KH**, es decir la rigidez de columnas y vigas, además se considera la aportación de la rigidez de los elementos diagonales con la matriz **KA**.

Se describe el calculo de la matriz de rigidez y de propiedades dinámicas de la estructura como periodos y modos de vibración, esto se hace con las funciones de CEINCI-LAB y posteriormente el usuario puede comparar el periodo de la estructura en el análisis con OpenSees, es evidente que debido a los elementos con mayor rigidez (ver sección 4.1) el periodo calculado por OpenSees es menor que el presentado por CEINCI-LAB, sin embargo, los valores son relativamente cercanos y se pueden considerar ambos como aceptados de acuerdo a cada modelo.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
%% Propiedades dinámicas
% Para el pórtico: Vigas y Columnas
[Seccion,Elem_Tipo_Prop2,Z_ELEM,th_ELEM]=Diferentes_Vg_COL(nudt,Sec_VG_COL,
Elem_Sec_VG_COL,Uso_Conexion,Fy,Es,L);
%Seccion=[ELEMENTO, Área, Inercia, NUMEROS DE ELEMENTOS A CREAR,
INCREMENTO EN NUMERO DE ELEMENTO]
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
```



```

% Para las diagonales
[ELEM_Diag]=gelem_portico(Sec_Diag);
ELEM=[ELEM;ELEM_Diag(length(NI)+1:end,:)];
% Matriz de Rigidez
ELEMH=ELEM(1:length(NI),:);
[KH]=krigidez_acero(ngl,ELEMH,L,seno,coseno,VC,Es); % Del pórtico principal
%Contribucion de elementos Diagonales de Acero.....
ELEMA=ELEM(length(NI)+1:end,:);
LA=L_Diag(length(NI)+1:end); senoA=seno_Diag(length(NI)+1:end);
cosenoA=coseno_Diag(length(NI)+1:end); VCA=VC_Diag(length(NI)+1:end,:);
num_Diag=length(LA);
%%%%%%%%%%%% UNIDADES cm
Est = Es/10; % Módulo de elasticidad, (kg/cm2)
H=sp*100;
d_col = 0.0; % De forma conservadora y por facilidad ** Esto puede cambiar el
usuario
d_beam = 0.0; % De forma conservadora y por facilidad ** Esto puede cambiar el
usuario
hci=d_col*100;hcd=d_col*100;hdis=0;Lon=sv(2,1)*100;hv=d_beam*100;
Kef=zeros(np,1);
for ie=1:np
pos =length(NI)+1+2*(ie-1)+1; % Posición del área de cada diagonal en la matriz
ELEM
[Kdiag(ie),Kef(ie)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(ie),Kef(ie),EL
EM(pos,1)*10000,Est);
end
Kdiag=Kdiag/10; % Para tener en T/m
ELEM_Diag=[Kdiag(1);Kdiag(1);
           Kdiag(2);Kdiag(2);
           Kdiag(3);Kdiag(3);
           Kdiag(4);Kdiag(4);
           Kdiag(5);Kdiag(5);
           Kdiag(6);Kdiag(6)];
[KA]=krigidez_tadas(num_Diag,ngl,ELEM_Diag,senoA,cosenoA,VCA); %Rigidez de
Diagonales
%%%%%%%%%%%%
KTT=KH+KA; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (Tn/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
%.....
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez

```

```
Masa_Rigidez = [MASA,KL];
mkdir Prop_Dinamicas_Estructuras_2D
save(['Prop_Dinamicas_Estructuras_2D\EST_1_M_K.txt'],[Masa_Rigidez'],'-ascii');
%.DATO: Dirección carpeta
```

En la siguiente parte del código se describe como se realiza el modelo de plasticidad concentrada necesario para el análisis no lineal con OpenSees, se destaca de color rojo la parte del código que se relaciona con las diagonales, esto es similar a lo que se realiza en la sección 4. En esta parte se debe destacar que la zona rígida para los elementos diagonales se mantiene constante por facilidad, es decir la longitud que se relaciona con las placas de conexión es la misma para todas las diagonales que se deben colocar en el modelo (ver figura 4.3).

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos_V2(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,Sec_VG_C
OL,Elem_Tipo_Prop2);
[Sec_AIZ,th_Sec, L2]=Secciones_Mod_OpenSees(nudt,ELEM, Z_ELEM,th_ELEM, L); %
Area, Inercia, Modulo Plastico Z
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2);
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
%.....
L_rig=0.6; % Longitud para la zona rigida en las diagonales debido a las placas
NI2=[zeros(1,length(NI)), NI2(1,end-num_Diag+1:end)];
NJ2=[zeros(1,length(NI)), NJ2(1,end-num_Diag+1:end)];
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
num_COL_VG=length(NI)/5; % Elementos columnas y vigas del modelo original
[Tabla_Elem_Nud_Diag,nod_Diag,X_Diag,Y_Diag]=ElementosNudosDiagonales(nod
,num_COL_VG,num_Diag,NI_Diag,NJ_Diag,X,Y,L_rig);
NI_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,2);
NJ_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,3);
[L_Diag, seno_Diag, coseno_Diag]=longitud(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag);
%long. de @elem, seno y coseno
NI_Diag=[NI,NI_Diag];
NJ_Diag=[NJ,NJ_Diag];
% .....
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
%% Dibujos
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
% dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)
dibujonudElemMODPUSH(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag)
Sec_AI_Diag=ELEMA; % Área e inercia de diagonales
```

Con el código hasta este punto se tiene el modelo de OpenSees para el análisis, pero aún se encuentra en MATLAB y como el lector conoce es necesario pasar este código a lenguaje Tcl para que se ejecute el análisis en OpenSees. Entonces para realizar

esta tarea se tiene la función **Pushover_Opensees_Diag_V2()** cuyo propósito es generar un archivo con el código Tcl del modelo (el nombre del archivo es **Pushover_Estructura_Ref.tcl**), como se explicó en la figura 4.9.

Al ejecutarse OpenSees (! **OpenSees.exe Pushover_Estructura_Ref.tcl**) entonces el análisis Pushover empieza y automáticamente aparece un gráfico con el desarrollo del análisis como se puede evidenciar en la figura 5.6 b.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

Pushover_Opensees_Diag_V2()

! **OpenSees.exe Pushover_Estructura_Ref.tcl**

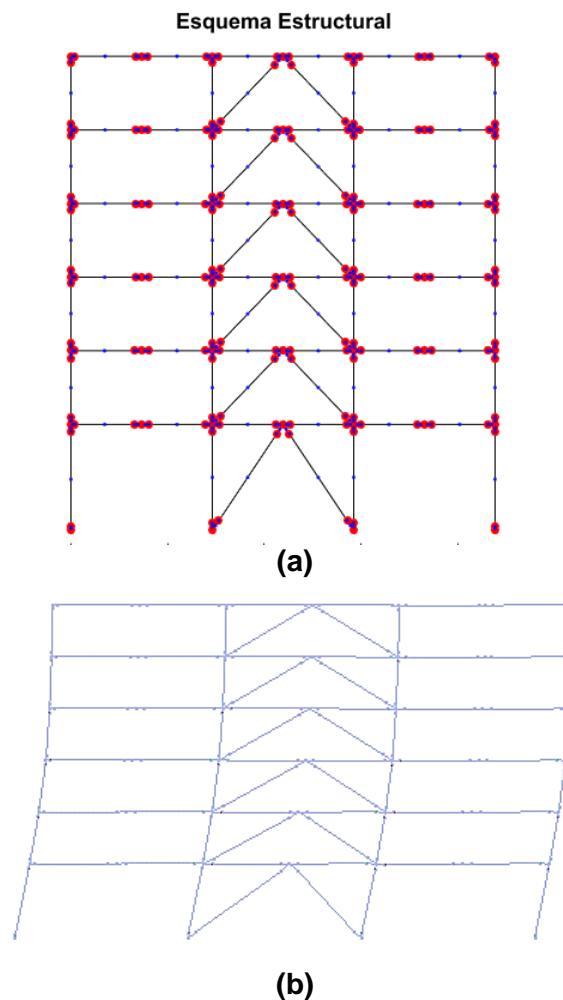


Figura 5.7 a) Modelo con diagonales generado en CEINCI-LAB. b) Ventana con la simulación del análisis Pushover en OpenSees.

El código principal de OpenSees no ejecuta directamente la gráfica del Pushover, además la presentación de las mismas en OpenSees directamente no es aconsejable debido a la dificultad de su programación y limitación de manipular las mismas,

entonces se aconseja generar las graficas en MATLAB y para ello ya se han presentado funciones de **CEINCI-LAB** que permiten presentar la curva Pushover como se muestra en la figura 5.8.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 1 para Pushover Nivel 2

```
%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread('Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out');
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover2(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];
%% Grabar los archivos
mkdir Pushover_Estructuras_2D
save(['Pushover_Estructuras_2D\EST_3.txt'],['Resultados'],'-ascii');
```

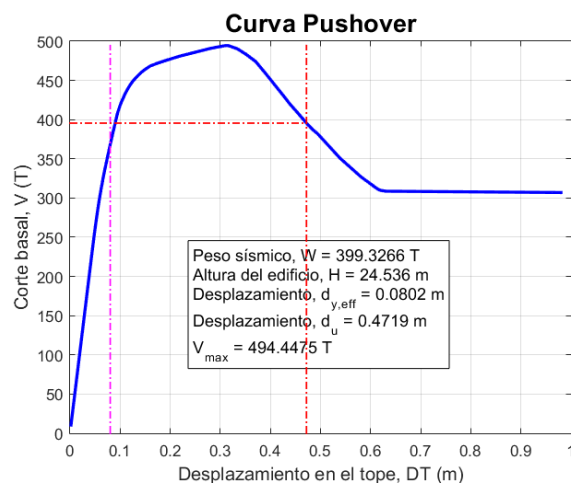


Figura 5.8 Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OPENSEES (Distribución de cargas en función del 1^{er} modo de vibración).

El procedimiento para el análisis de la estructura con diagonales colocadas en forma de X de múltiples pisos no se presenta a detalle, no obstante, es un procedimiento similar, únicamente se debe considerar el código en color morado con la inclusión de valores en **mar2** y **marv**.

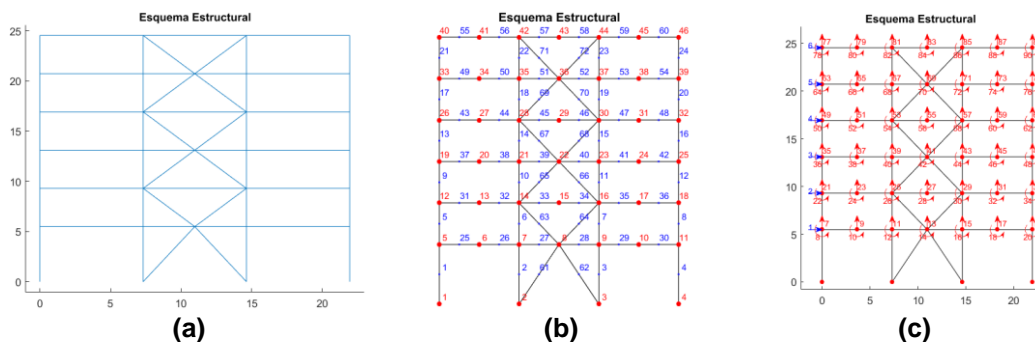


Figura 5.9 a) Esquema estructural; b) Numeración de nudos y elementos; c) Grados de libertad a empleados por CEINCI-LAB (Para OpenSees se tiene 3 gdl por nudo, pero no con coordenadas principales).

En la figura 5.10 se puede observar que las estructuras con diagonales aumentan la rigidez y resistencia ante cargas laterales.

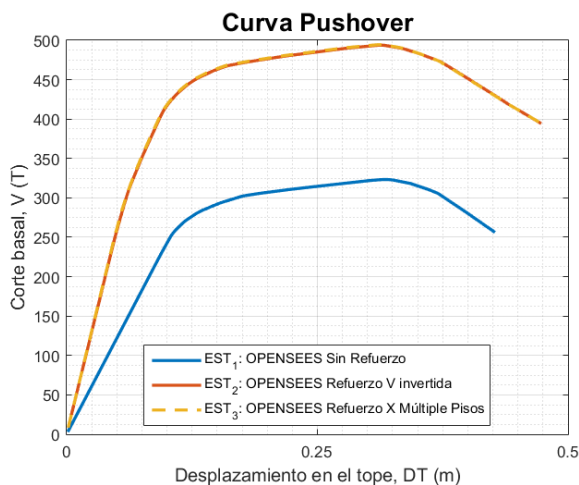


Figura 5.10 Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OpenSees.

En este capítulo se ilustró como realizar el análisis Pushover de estructuras de acero, los elementos vigas y columnas fueron secciones tipo "I", no obstante, para columnas es posible emplear otros tipos de secciones (para vigas únicamente es posible emplear secciones "I" con los modelos definidos en las rutinas automatizadas).

En la práctica es común encontrar columnas de sección rectangular o circular entonces de forma académica resulta importante indicar como proceder para el análisis Pushover en este tipo de casos. Se aclara que el análisis Pushover en este trabajo asume que asume que la conexión viga-columna trabaja de forma adecuada y por lo tanto al usar cualquier perfil para columnas se debe garantizar esto.

Debido a que los datos para el modelo de plasticidad concentrada en columnas únicamente dependen del módulo plástico de la sección y el esfuerzo de fluencia del material, además para el elemento con comportamiento rígido y elástico se requiere únicamente del área e inercia, entonces en columnas es posible cambiar de forma fácil de una sección tipo "I" a una sección rectangular, como se puede apreciar en la figura 5.11 una sección rectangular es equivalente a una sección tipo "I" donde el espesor del alma de la viga tipo "I" es el doble del espesor del alma de las sección rectangular, esto no modifica el área, inercia o modulo plástico.

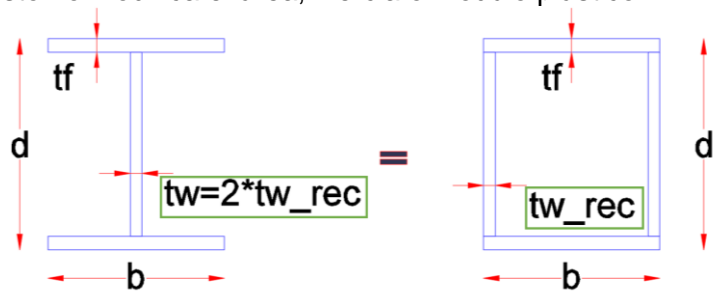


Figura 5.11 Secciones equivalentes para columnas tipo "I" y rectangular.

A continuación, se presenta el análisis Pushover de una estructura de 2 pisos como se muestra en la figura 5.12, en este caso las vigas son de diferentes secciones, perfiles W10x22 en el vano con mayor longitud libre y W8x15 en los vanos restantes, las columnas son perfiles HSS8x7x1/4, un detalle de estas secciones se muestra en la tabla 5.3

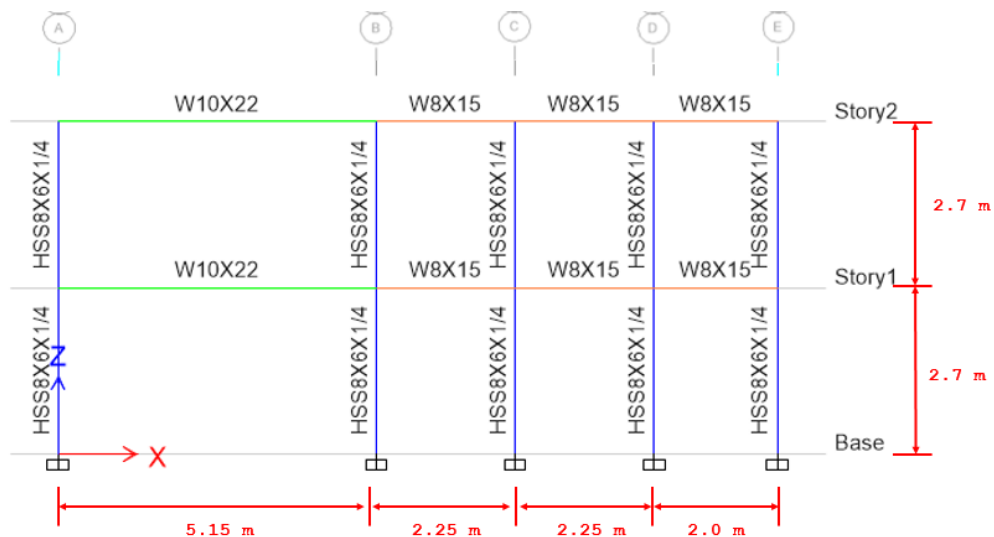
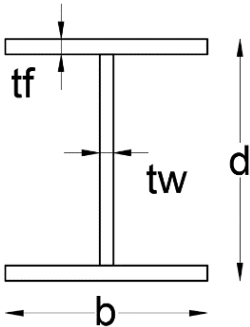
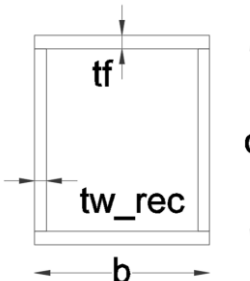


Figura 5.12 Estructura de acero de 5 pisos (secciones de columnas y vigas).

Para los perfiles metálicos se tiene las propiedades del material ASTM A36, $F_y = 36$ ksi, $F_u = 58$ ksi y $E = 29000$ Ksi.

Tabla 5.3 Descripción de las secciones de los elementos estructurales (Simétricas).

	Color	Elemento	Dimensiones (mm) d x b x tf x tw
		Vigas <u>W8x15</u>	210x140x10x6
		Vigas <u>W10x22</u>	260x100x8x6
	Color	Elemento	Dimensiones (mm) d x b x tf x tw_rec
		Columnas <u>HSS8x6x1/4</u>	200x140x6x6

El lector que ha llegado a este punto de la monografía ya conoce como ingresar los datos de sección para definir la geometría en **CEINCI-LAB**, es decir los datos de los vectores **sv** y **sp**, también comprende que los datos en **qp** son las cargas uniformemente distribuidas en las vigas del primero y segundo piso correspondientemente.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 2 para Pushover Nivel 2

```

global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno qp num_elem Tabla_Elem_Nud Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
global Es Fy Fu Sec_AIZ th_Sec Uso_Conexion L2 Deriva_Global Nud_Xsimilares
%.....
%% Geometría del pórtico
sv =[5.15;2.25;2.25;2]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[2.7; 2.7]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-2.3;-1.5]; % carga distribuida en vigas en cada piso T/m
Uso_Conexion = 2;
Deriva_Global = 0.04; % Fracción de la altura total de la estructura
% .....
[inv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
Nud_Xsimilares=zeros(nr,np);
for k = 1:nr
a=find(Xcol(1,k)==X);
Nud_Xsimilares(k,1:length(a))=a;
end
% .....
%% Masas
[MASA, masa_nudo, WBuilding, W]=masa_carga_reactiva(np, nv, qp, sv, g);
Dis_Fuerzas_Laterales = 1;
% % .....
% % Dibujo de la Estructura 2D
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
% dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)

```

Siempre es recomendable realizar los gráficos de la estructura para poder identificar si la geometría es correcta o si debe modificarse, esto antes de continuar con el análisis (se motiva al lector ejecutar el código y corroborar estos gráficos). Posterior a la definición de la geometría se tiene que ingresar las propiedades del material, es decir el esfuerzo de fluencia, módulo de elasticidad y esfuerzo última. Adicionalmente se requiere ingresar las secciones de los elementos, como el programa que calcula el módulo de elasticidad, el área e inercia solo está programado para secciones tipo "I" entonces el usuario al ingresar el dato del espesor del alma de una rectangular hueca en la matriz **Sec_VG_COL** debe tener en cuenta que este valor será ingresado como el doble ($tw=2*tw_rec$), para que sea equivalente a una sección tipo "I" con espesor

del alma de 2 veces el espesor del alma de la sección rectangular (ver figura 5.11). El ingreso de estas propiedades se ilustra en el código y se resalta con color rojo este cambio.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 2 para Pushover Nivel 2

```
%% .....SECCIONES
%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
% Sec_VG_COL = Elementos I =[tipo#, d,tw,bs,bi,tfs,tfi]... En milímetros!!
Sec_VG_COL=[1 200, 12, 150, 150, 6, 6; % Tipo 1 COL.. HSS8X6X1/4
            2 260, 6, 120, 120, 12, 12; % Tipo 2 VPA.. W10x22
            3 210, 6, 100, 100, 8, 8]; % Tipo 3 VPB.. W8x15

% Elem_Sec_VG_COL = ["tipo# respecto de Sec_VG_COL", Identificador de los
elementos]
Elem_Sec_VG_COL=[ 1 1, 2, 3, 4, 5;
                  1 6, 7, 8, 9, 10;
                  2 11, 12, 19, 20, 0;
                  3 13, 14, 15, 16, 17;
                  3 18, 21, 22, 23, 24;
                  3 25, 26, 0, 0, 0];

% .....
```

Los autores no modificamos las rutinas porque en un futuro se presentará modelos de plasticidad distribuida con modelos de secciones definidas en base a fibras, además la intención es que el usuario pueda ir adquiriendo la destreza de revisar y modificar las rutinas que se presentan.

La continuación de este código para realizar el análisis Pushover tiene el mismo esquema presentado al inicio de este capítulo, en el ejemplo 1 para Pushover Nivel 2, también se describe el código completo en el anexo C. La grafica del análisis Pushover con OpenSees se presenta en la figura 5.13a y la curva de capacidad de esta estructura se muestra en la figura 5.13 b

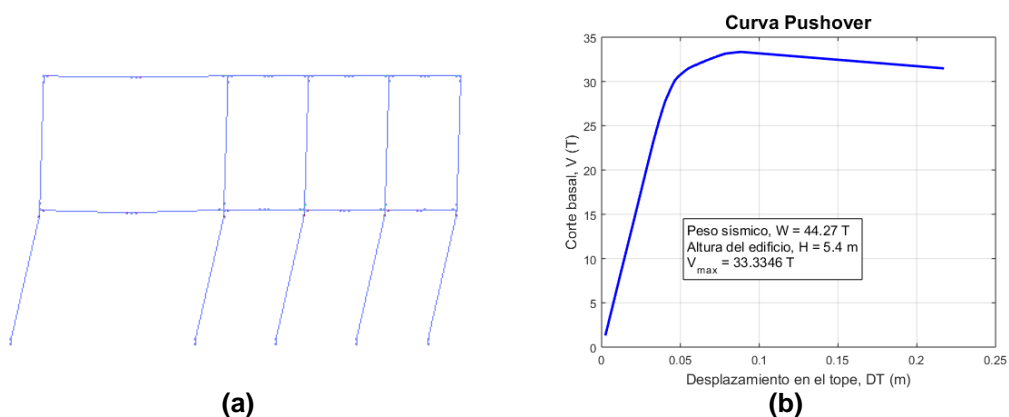


Figura 5.13 a) Modelo en ejecución OpenSees; b) Curva Pushover.

De forma académica se va a asumir que las columnas del piso 1 y 2 en el eje E de la estructura presentada en la figura 5.12 se desea cambiar a una sección circular, la sección circular es de diámetro 8.625 in y espesor de $\frac{1}{4}$ in, es decir una sección HSS8.625X0.250. Para realizar este cambio el usuario debe modificar en primer lugar la matriz de secciones **Sec_VG_COL** y la matriz que asigna las secciones a cada elemento **Elem_Sec_VG_COL**, para hacer este cambio el lector debe conocer a que elementos se refiere, entonces se recomienda graficar el esquema estructural donde se muestre la numeración de nudos y elementos como se presenta en la figura 5.14, esto se lo hace con la función de CEINCI-LAB **dibujoNudElem**.



Figura 5.13 Numeración de nudos y elementos de la estructura.

El código se mantiene similar al presentado en el ejemplo anterior, pero modificando las matrices que se indican a continuación. En la matriz **Sec_VG_COL** se incluye la **sección 4** donde el valor importante es el peralte de la sección que debe corresponder al **diámetro de la sección circular**, los datos de ancho y espesor puede dejarse como la unidad para que, al calcular las áreas, inercias y módulo plástico de la sección no se tenga problemas numéricos, no obstante, estos cálculos no se los hace con la sección circular entonces debe cambiarse más adelante estos valores. En la matriz **Elem_Sec_VG_COL**, se debe indicar que la sección 4 se asignará a los elementos 5 y 10.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 2 para Pushover Nivel 2

```
Sec_VG_COL=[1 200, 12, 150, 150, 6, 6; % Tipo 1 COL.. HSS8X6X1/4
            2 260, 6, 120, 120, 12, 12; % Tipo 2 VPA.. W10x22
            3 210, 6, 100, 100, 8, 8;
            4 220, 1, 1, 1, 1, 1;]; % Tipo 4 COL.. HSS8.625X0.250

% Elem_Sec_VG_COL = ["tipo# respecto de Sec_VG_COL", Identificador de los
% elementos]
Elem_Sec_VG_COL=[1 1, 2, 3, 4, 0;
                 1 6, 7, 8, 9, 0;
                 2 11, 12, 19, 20, 0;
                 3 13, 14, 15, 16, 17;
                 3 18, 21, 22, 23, 24;
                 3 25, 26, 0, 0, 0;
                 4 5, 10, 0, 0, 0;];

% .....
```

Luego de estas líneas de código se tiene la función **Diferentes_Vg_COL**, como ya se explicó anteriormente esta función determina propiedades de las secciones como área e inercia y las presenta en la matriz denominada **Seccion**, además presenta el módulo plástico de cada sección y de cada elemento en la matriz **Z_ELEM** entre otras matrices relevantes para el análisis, sin embargo, en columnas lo que es importante cambiar son las mencionadas. Para modificar estas propiedades entonces el usuario debe calcular estas propiedades de forma independiente, con las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3.

$$A = \pi \cdot (r^2 - (r - tw)^2) \quad (5.1)$$

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot (r^4 - (r - tw)^4) \quad (5.2)$$

$$Z = \frac{4}{3} * (r^3 - (r - tw)^3) \quad (5.3)$$

En estas ecuaciones el área es **A**; la inercia, **I**; el módulo plástico, **Z**; lo que se requiere para los cálculos es el radio exterior **r** y el espesor **tw**.

Una vez calculadas estas propiedades para la sección circular entonces se debe sustituir ese valor en las posiciones correspondientes dentro de las matrices **Seccion** y **Z_ELEM** en este caso se requiere cambiar para los elementos 5 y 10, esto se lo hace como se indica en el código a continuación.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 2 para Pushover Nivel 2

```
%% Propiedades dinámicas
[Seccion,Elem_Tipo_Prop2,Z_ELEM,th_ELEM]=Diferentes_Vg_COL(nudt,Sec_VG_COL,
Elem_Sec_VG_COL,Usos_Conexion,Fy,Es,L);
%% Modificación debido a sección circular
r = 220/2*1/1000; % Radio de la sección circular en metros
tw = 6.35/1000; % Espesor de la sección circular en metros
A=pi*(r^2-(r-tw)^2);
I=pi/4*(r^4-(r-tw)^4);
Z=4/3*(r^3-(r-tw)^3);

Seccion([5,10],2)=A;

Seccion([5,10],3)=I;

Z_ELEM([5,10],1)=Z;
```

Estos son los cambios que se requieren para el análisis Pushover con secciones circulares en columnas, no obstante, esto solo es posible hacer en columnas. Los modelos para el análisis Pushover considerados en esta monografía son modelos de plasticidad concentrada, además en vigas la asignación de la no linealidad del material se lo realiza en función del modelo de Krawinkler, en este modelo las ecuaciones para las rotaciones, momentos de fluencia y otros parámetros relevantes para la no linealidad son calibradas para vigas de sección "I".

El código para el análisis de este pórtico se mantiene como en el ejemplo anterior y el lector puede encontrarlo en el anexo C, los resultados del análisis se muestra en la figura 5.14.

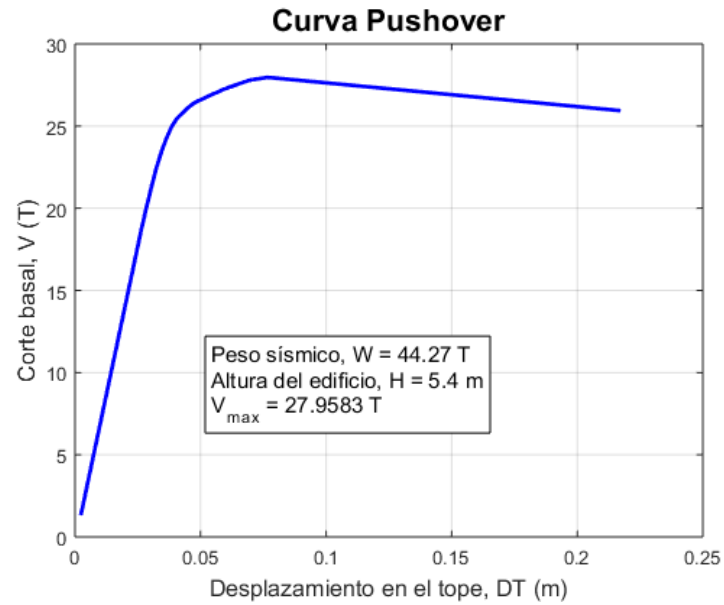


Figura 5.14 Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OPENSEES (Distribución de cargas en función del 1^{er} modo de vibración).

6. ACOPLAMIENTO CEINCI-LAB Y OPENSEES NIVEL 2: ESTRUCTURAS DE ACERO CON IRREGULARIDADES

Las estructuras presentadas en las secciones anteriores comparten la característica de ser regulares, no obstante, en muchas ocasiones las estructuras presentan irregularidades y por ello se ve la necesidad de tratar este tema en esta monografía. En primer lugar, los autores no recomendamos el análisis estático no lineal de estructuras irregulares solo con un análisis en el plano, puesto que esto no refleja de forma adecuada los problemas estructurales que se pueden tener en este tipo de estructuras, en especial la torsión en planta. Sin embargo, de forma académica se presenta en esta sección las funciones para el análisis Pushover de este tipo de estructuras mediante el acoplamiento de CEINCI-LAB y OpenSees.

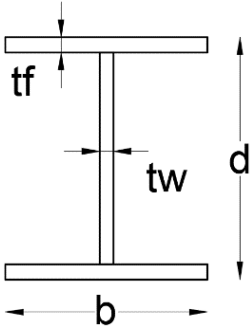





La estructura en análisis es conformada por elementos de acero, en los primeros tres pisos se tiene 5 vanos con longitudes de 6 y 7 metros, luego en los pisos 4 y 5 se reduce un vano de la estructura del lado derecho e izquierdo como se muestra en la figura 6.1.



Figura 6.1 Estructura de acero de 5 pisos (secciones de columnas y vigas).

Las siguientes propiedades de material para modelar el pórtico: ASTM A36, $F_y = 36$ ksi, $F_u = 58$ ksi y $E = 29000$ Ksi. Las dimensiones de las columnas y vigas se definen en la Tabla 5.1, donde la identificación del color es consistente con la figura 6.1.

Tabla 6.1 Descripción de las secciones de los elementos estructurales (Simétricas).

	Color	Elemento	Dimensiones (mm) d x b x tf x tw
	Columnas	W30x173	773x381x27.2x17.2
	Columnas	W14x193	394x399x22.6x36.6
	Columnas	W27x146	696x355.6x24.8x24.8
	Vigas	W30x99	754x268x17x13
	Vigas	W27x94	683x254x18.9x18.9

El programa principal para definir la geometría y parámetros de análisis tiene el mismo esquema general que los mostrados en las secciones anteriores (4 y 5). En este caso que se tiene un pórtico con geometría irregular se utilizará las funciones de **CEINCI-LAB** presentadas por Cagua *et al.*, 2020 (2).

La estructura en la figura 6.1 con las irregularidades indicadas, puede ser generada desde 2 bloques o partes que componen la estructura como se indica en la figura 6.2, no obstante la forma para definir la geometría de una estructura es a criterio del usuario, es decir que dependerá de cada usuario la forma de proceder pero se debe respetar que los bloques sean generados desde la base hacia la cubierta para que sean útiles las rutinas del análisis de estructuras regulares detalladas en artículos publicados anteriormente por los autores.

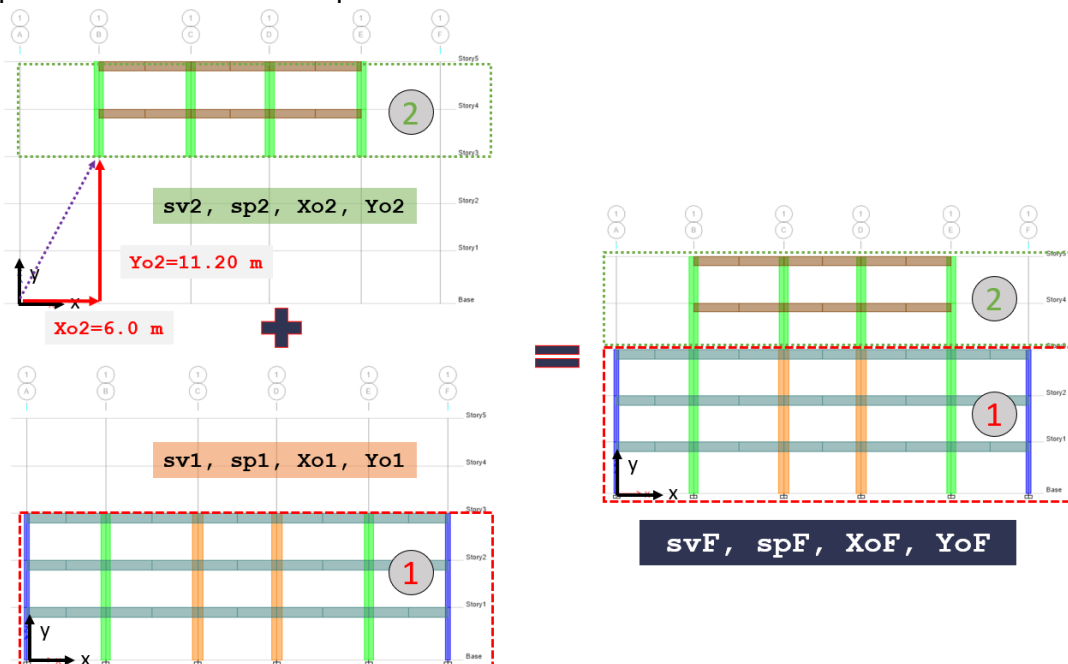


Figura 6.2 Composición del pórtico en análisis.

Los pórticos de la parte 1 del Bloque Estructural tiene 5 vanos de 6.0 m y 7.0 m; esa información se da en la variable “sv1”; la altura de cada piso es de 4.0 m para el primer piso y 3.60 para el nivel 2 y 3, esto se da en la variable “sp1”. Los valores de Xo1 y Yo1 son ceros debido a que este bloque estructural no será desplazado respecto al eje de coordenadas X=0, Y=0.

Para el bloque 2 que en la figura 6.2 se muestra encerrado en color verde debe ingresar la separación de vanos y alturas de pisos en los vectores sv2, y sp2, esto se lo hace como si fueran pórticos regulares y posteriormente para ubicarlos en las posiciones que corresponden se debe ingresar la información de desfase en Xo2, y Yo2. Para la parte 2 se puede notar que Xo2 y Yo2 no es cero debido a que el pórtico debe ser desfasado en sentido horizontal y vertical, es decir asignar el valor Xo2 como 6 y Yo2 como 11.2 m.

El programa **Combinar_Vectores** tiene por objetivo agrupar la información de separación de vanos, alturas de pisos y coordenadas de desfase en matrices finales que contengan la información completa de la estructura de forma resumida. Se puede notar en el código descrito a continuación que existen 8 ceros luego de sv2, sp2, Xo2, Yo2, esto se debe a que se pueden combinar hasta 10 partes y en este caso únicamente se tienen 2, con el objetivo que funcione la rutina de Matlab debe completarse con ceros estos “vacíos”.

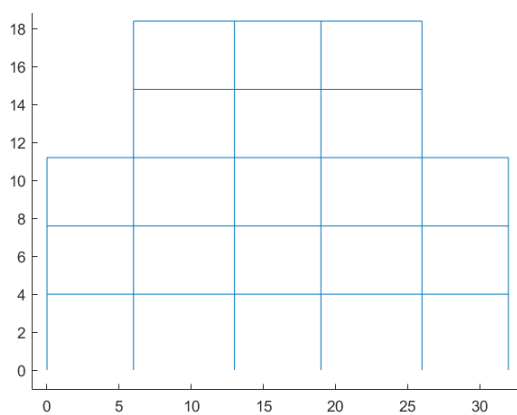
Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```
global DOF nod Nud_Xsimilares np nr X Y NI NJ masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno qp num_elem Tabla_Elem_Nud Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
global Es Fy Fu Sec_AIZ th_Sec Uso_Conexion L2 Deriva_Global
%.....
%% Geometría del pórtico
%% Geometría del pórtico PARTE 1
sv1 =[6;7;6;7;6]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp1 =[4.0;3.6;3.6]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
Xo1 =0; Yo1 =0; % Coordenadas para desfase del sistema de coordenadas 0,0 en
(metros).
%% Planta alta con irregularidad PARTE 3
sv2 =[7;6;7]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp2 =[3.6;3.6]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
Xo2 =6; Yo2 =11.2;% Coordenadas para desfase del sistema de coordenadas 0,0 en
(metros).
%% Combinar las vectores de cada bloque que forman la estructura
Num_Comb=2; % Hace referencia a la cantidad de bloques que forman la estructura
[svF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sv1,sv2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[spF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sp1,sp2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[XoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Xo1,Xo2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[YoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Yo1,Yo2,0,0,0,0,0,0,0,0);
nr_Bloque=svF(1,:)+1;
%% Geometría de la estructura en 2D
[nr,nod,np,nELEM,X,Y,NI,NJ]=geom_2D_Irreg(Num_Comb,svF,spF,XoF,YoF);
%% Cálculos de Grados de libertad e información relevante de la estructura
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
[VC]=vc(NI,NJ,CG); %Vector de colocación
```

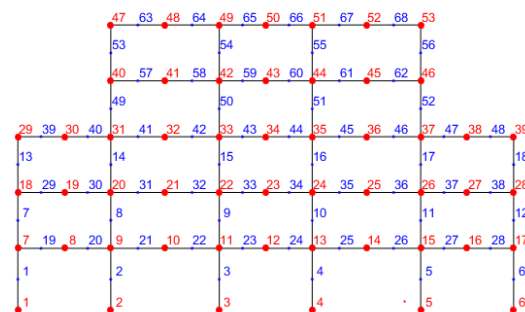
Es importante graficar el esquema estructural, también el lector debe interesarse por conocer la numeración de nudos, elementos y grados de libertad, esto lo puede hacer con las funciones de CEINCI-LAB como se muestra a continuación en el código y se presenta en las figuras 6.3 a, b y c.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

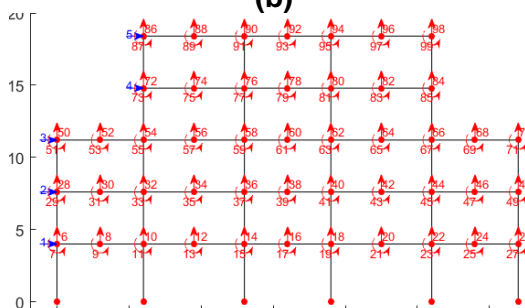
```
%% %% Dibujo de la Estructura 2D
dibujo(X,Y,NI,NJ)
dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
```



(a)



(b)



(c)

Figura 6.3 a) Esquema estructural; b) Numeración de nudos y elementos; c) Grados de libertad a empleados por CEINCI-LAB.

Las masas de la estructura se consideran como concentradas en los nudos de la unión viga-columna, esto se lo hace automáticamente con la rutina **masa_carga_reactiva_Irreg**, se resalta de color rojo en el código para que el usuario puede identificar que esta es una nueva rutina de CEINCI-LAB. Esta rutina requiere de datos el número de nudos restringidos, **nr**; el número de pisos, **np**; los nudos con coordenadas en X iguales (coordenadas de las columnas), **Nud_Xsimilares**; el vector de cargas distribuida uniformemente en las vigas de cada piso, **qp** (ver figura 6.4); el valor de la aceleración de la gravedad, **g**; finalmente las coordenadas de los nudos en **X**.

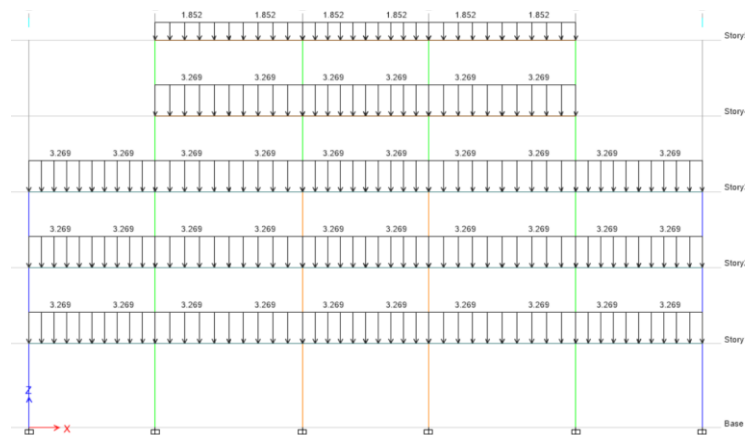


Figura 6.4 Cargas verticales consideradas para el análisis.

En este caso se utilizará la distribución de cargas laterales en función de una distribución triangular; en estructuras irregulares es posible que la distribución de fuerzas laterales en función del primer modo de vibración no sea conveniente.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```
%% Cargas
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en cada piso T/m
Uso_Conexion = 1;
%Uso_Conexion = # % Conexion Precalificada RBS 1, Conexion Precalificada diferente
que RBS 2, No Precalificada 3.
Deriva_Global = 0.04; % Fracción de la altura total de la estructura
% .....
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
Nud_Xsimilares=zeros(nr,np);
for k = 1:nr
a=find(Xcol(1,k)==X);
Nud_Xsimilares(k,1:length(a))=a;
end
% .....
%% Masas

[MASA, masa_nudo, WBuilding, W]=masa_carga_reactiva_Irreg(nr, np,
Nud_Xsimilares, qp, g, X);
```



```

% Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
% Dis_Fuerzas_Laterales = 2; % 2 Distribución parabólica
% Dis_Fuerzas_Laterales = 3; % 3 Distribución triangular
% Dis_Fuerzas_Laterales = 4; % 4 Distribución uniforme
Dis_Fuerzas_Laterales = 3;

```

Para las propiedades de los elementos y secciones se emplea la metodología explicada en la sección 5 de la monografía, es decir con que primero se utiliza **Sec_VG_COL**, esta matriz contiene los tipos de secciones en cada fila y 7 columnas, la primera es el tipo de sección, seguido de esto se colocan las dimensiones de la sección en milímetros siguiendo la nomenclatura mostrada en la tabla 6.1; las dimensiones son peralte, **d**; espesor del alma, **tw**; ancho del patín superior, **bs** e inferior **bi**; espesor de los patines superior **tfs** e inferior **tfi**.

Para asignar cada sección a los elementos correspondientes se emplea la matriz **Elem_Sec_VG_COL** que tiene en la primera columna el tipo de sección y seguido a esta columna se debe escribir el número de elemento a la cual se asignara la misma (la identificación de los elementos se puede obtener con la función de **CEINCI-LAB dibujoNudElem** que presenta la figura 6.3 c); por ejemplo, la sección 2 se asignará a los elementos 3, 4, 9, 10, 15 y 16 (color rojo y subrayado de amarillo en el código), se completa con ceros para que no haya problemas en la definición de las matrices en MATLAB puesto que el número de columnas en todas las filas de una matriz debe ser las mismas.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```

%% .....SECCIONES
%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
% Sec_VG_COL = Elementos I =[tipo#, d,tw,bs,bi,tfs,tfi]... En milímetros!!
Sec_VG_COL=[1 393.7, 22.6, 398.8, 398.8, 36.6, 36.6 ; % Tipo 1 es W14x193*
  2 772.2, 16.6, 381.0, 381.0, 27.2, 27.2 ; % Tipo 2 es W30x173*
  3 696.0, 15.4, 355.6, 355.6, 24.8, 24.8 ; % Tipo 3 es W27x146*
  4 754.4, 13.2, 266.7, 266.7, 17.0, 17.0 ; % Tipo 4 es W30x99
  5 683.3, 12.4, 254.0, 254.0, 18.9, 18.9]; % Tipo 5 es W27x94
% Elem_Sec_VG_COL = ["tipo# respecto de Sec_VG_COL", Identificador de los
elementos]
Elem_Sec_VG_COL=[1 1, 7, 13, 6, 12, 18, 0, 0, 0, 0;
  2 3, 4, 9, 10, 15, 16, 0, 0, 0, 0;
  3 2, 8, 14, 49, 53, 5, 11, 17, 52, 56;
  3 50, 51, 54, 55, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
  4 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28;
  4 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38;
  4 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48;
  5 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66;
  5 67, 68 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
% .....

```

En CEINCI-LAB con la definición de la geometría y las propiedades de cada elemento se puede calcular la matriz de rigidez y masas para encontrar con ello la respuesta de las propiedades dinámicas de la estructura, se presenta el código para hacer esto.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```
%% Propiedades dinámicas
nudt=nELEM;
nudcol=28;
[Seccion,Elem_Tipo_Prop2,Z_ELEM,th_ELEM]=Diferentes_Vg_COL(nudt,Sec_VG_COL,
Elem_Sec_VG_COL,Usos_Conexion,Fy,Es,L);
%Seccion=[ELEMENTO, Área, Inercia, NUMEROS DE ELEMENTOS A CREAR,
INCREMENTO EN NUMERO DE ELEMENTO]
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
% Matriz de Rigidez
[K]=krigidez_acero(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,Es);
%.....
KTT=K; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (T/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
%.....
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez
Masa_Rigidez = [MASA,KL];
```

Para estructuras irregulares es necesario definir la separación de vanos de cada piso, esto se lo hace en la matriz **s_vanos**; posteriormente para el análisis en OpenSees se requiere de un modelo que simula plasticidad concentrada, como ya se manifestó en la sección 4. Entonces se requiere dividir a cada elemento en 5 partes, esta división se lo hace de forma automática con **ElementosNudos_V2_Irreg** que es similar a la función ElementosNudos y ElementosNudos_V2 pero para diferentes secciones de elementos y en estructuras irregulares.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```
%% Elementos y nudos
s_vanos=zeros(nr-1,np);
for t=1:np
num_vanos(t,1)=length(nonzeros(Nud_Xsimilares(:,1+t)))-1;
matriz=nonzeros(Nud_Xsimilares(:,t+1));
```

```

for l=1:num_vanos(t,1)
    s_vanos(l,t)=X(1,matriz(l+1,1))-X(1,matriz(l,1));
end
end

%%
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos_V2_Irreg(nr_Bloque,nod,NI,NJ,X,Y,Se
c_VG_COL,Elem_Tipo_Prop2, coseno);
[Sec_AIZ,th_Sec, L2]=Secciones_Mod_OpenSees(nudt,ELEM, Z_ELEM,th_ELEM, L); %
Area, Inercia, Modulo Plastico Z
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2)';
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3)';
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
% .....
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL_Irreg(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);

```

En este punto el lector reconoce que la función principal de todo este proceso es **Pushover_Opensees_V2()** ya que esta función es la que traduce del lenguaje (MATLAB) con las funciones de **CEINCI-LAB** al lenguaje Tcl que requiere OpenSees para ejecutarse, entonces esta función tiene el mismo propósito que **Pushover_Opensees**.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

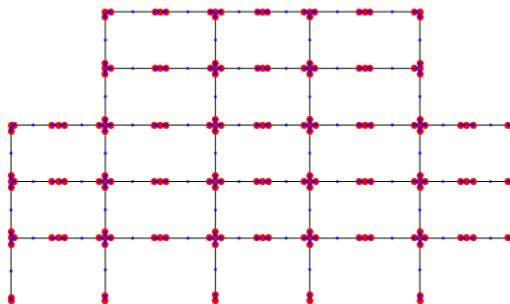
```

dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)
Pushover_Opensees_V2()

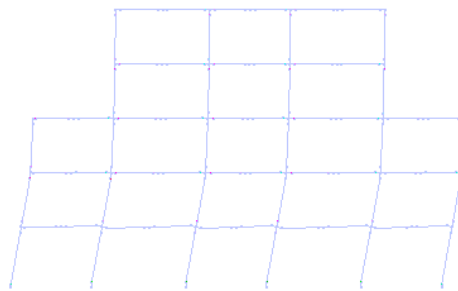
! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl
%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread("Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out");
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover2(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];

```

Al ejecutarse OpenSees (! **OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl**) entonces el análisis Pushover empieza y automáticamente aparece un gráfico con el desarrollo del análisis como se puede evidenciar en la figura 6.5 b.



(a)



(b)

Figura 6.5 a) Modelo de vigas y columnas generado en CEINCI-LAB. b) Ventana con la simulación del análisis Pushover en OpenSees.

Los resultados del análisis Pushover se almacenan en una carpeta que es generada de forma automática por OpenSees, esta carpeta tiene por nombre **Concentrated-Pushover-Output** y almacena en este caso 7 archivos de texto con extensión **.out**, estos archivos son Desplazamiento en el tope **Disp_Roof**, y para cada nudo de la base se genera un archivo denominado **Vbase#** con información del cortante experimentado como reacción ante las cargas laterales aplicadas.

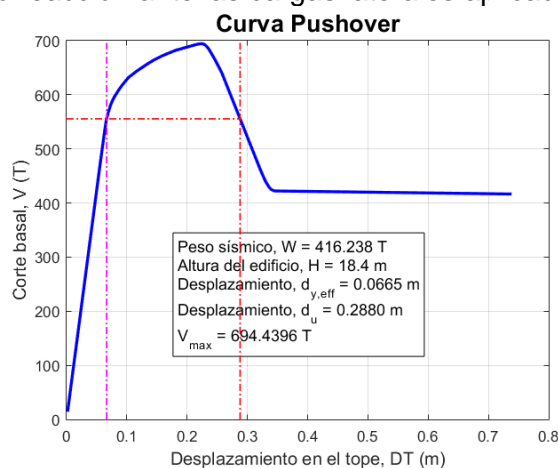
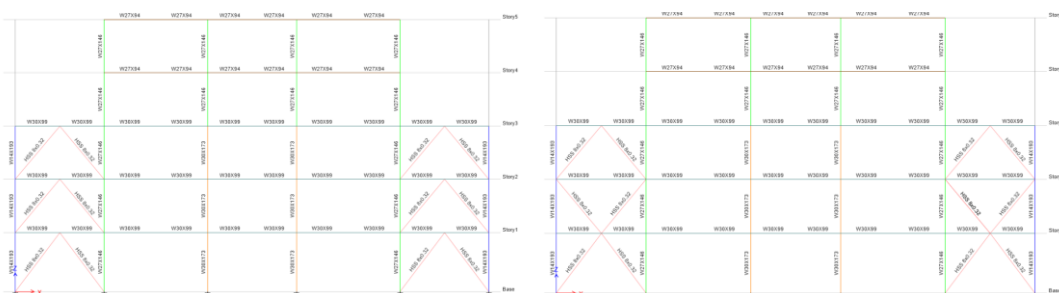


Figura 6.6 Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OPENSEES (Distribución de cargas laterales con patrón triangular).

En las secciones anteriores de la monografía se han empleado diagonales de acero colocadas en forma de V invertida y X de múltiples pisos (ver figura 6.7).

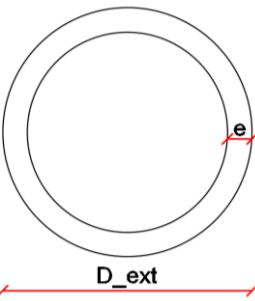



(a)

(b)

Figura 6.7 Estructura con diagonales a) en V invertida; b) en X de múltiples pisos.

Tabla 6.2 Descripción de las secciones de los elementos diagonales.

	Color	Elemento	Dimensiones (mm) D_ext x e
		Diagonal Piso 1 <u>HSS 8x0.32</u>	219.10x8.18

El código para incluir las diagonales es similar al presentado anteriormente, no obstante, no existe rutinas para definir el nudo inicial y final de estos elementos en función de los vanos de la estructura debido a su condición de irregular. En este caso se emplea directamente los vectores **NI2** y **NJ2** en los cuales se incluye los nudos inicial y final para cada elemento, para esta numeración de los nudos se recomienda primero generar el pórtico sin diagonales y con esa numeración colocar las diagonales (ver numeración de nudos y elementos en la figura 6.3 b).

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```

global DOF nod Nud_Xsimilares np nr X Y NI NJ masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno qp num_elem Tabla_Elem_Nud Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
global Es Fy Fu Sec_AIZ th_Sec Uso_Conexion L2 Deriva_Global
global nod_Diag X_Diag Y_Diag NI_Diag NJ_Diag
global Fy_brace Es_brace Sec_AI_Diag num_Diag Tabla_Elem_Nud_Diag
%.....
%% Geometría del pórtico
%% Geometría del pórtico PARTE 1
sv1 =[6;7;6;7;6]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp1 =[4.0;3.6;3.6]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
Xo1 =0; Yo1 =0; % Coordenadas para desfase del sistema de coordenadas 0,0 en
(metros).
%% Planta alta con irregularidad PARTE 3
sv2 =[7;6;7]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp2 =[3.6;3.6]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
Xo2 =6; Yo2 =11.2;% Coordenadas para desfase del sistema de coordenadas 0,0 en
(metros).
%% Combinar las vectores de cada bloque que forman la estructura
Num_Comb=2; % Hace referencia a la cantidad de bloques que forman la estructura
[svF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sv1,sv2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[spF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,sp1,sp2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[XoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Xo1,Xo2,0,0,0,0,0,0,0,0);
[YoF]=Combinar_Vectores(Num_Comb,Yo1,Yo2,0,0,0,0,0,0,0,0);
nr_Bloque=svF(1,:)+1;
%% Geometría de la estructura en 2D
[nr,nod,np,nELEM,X,Y,NI,NJ]=geom_2D_Irreg(Num_Comb,svF,spF,XoF,YoF);
%% Diagonales
%.....
num_Diag = 12;
NI2(1,nELEM+1:nELEM+num_Diag)=[1,7,18,2,9,20,5,15,26,6,17,28];
NJ2(1,nELEM+1:nELEM+num_Diag)=[8,19,30,8,19,30,16,27,38,16,27,38]';

```

```

% NI2(1,nELEM+1:nELEM+num_Diag)=[1,18,18,2,20,20,5,26,26,6,28,28];
% NJ2(1,nELEM+1:nELEM+num_Diag)=[8,8,30,8,8,30,16,16,38,16,16,38]';
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
%% Cálculos de Grados de libertad e información relevante de la estructura
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
[VC]=vc(NI,NJ,CG); %Vector de colocación
% .....
[VC_Diag]=vc(NI_Diag,NJ_Diag,CG);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag); %long. de
@elem, seno y coseno
    
```

En el código anterior se muestra de color morado los vectores para el nudo inicial y final de elementos que definen la configuración de la figura 6.7 b, se encuentra comentado para que MATLAB no ejecute estas líneas, pero con este ejemplo el usuario puede definir estos elementos. A continuación, se presenta las líneas de código para generar las gráficas de los pórticos como se muestra en la figura 6.8.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```

% % .....
% % Dibujo de la Estructura 2D
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
% dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
% dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
% % .....
% % Dibujo de la Estructura 2D
dibujo(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag)
dibujoNudElem(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag,CG)
dibujogdl(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag,CG)
    
```

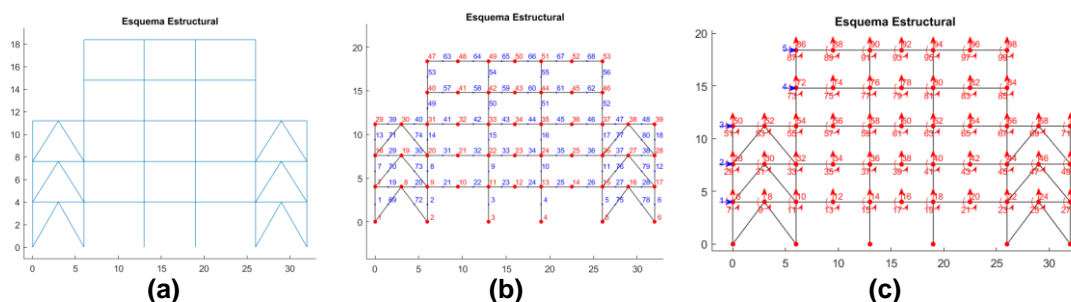


Figura 6.8 a) Esquema estructural; b) Numeración de nudos y elementos; c) Grados de libertad a empleados por CEINCI-LAB (Para OpenSees se tiene 3 gdl por nudo, pero no con coordenadas principales).

Las cargas uniformemente distribuidas en las vigas se asignan en el vector **qp**, en base a estas acciones se define las masas concentradas y que se requieren para el análisis no lineal estático (Pushover). En este caso por ser un pórtico irregular la distribución de cargas laterales para el Pushover se lo realiza con una forma triangular, puede también emplearse la distribución en función de las recomendaciones del ASCE con un patrón “parabólico”.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```

%% Cargas
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en cada piso T/m
Uso_Conexion = 1;
%Uso_Conexion = # % Conexion Precalificada RBS 1, Conexion Precalificada diferente
que RBS 2, No Precalificada 3.
Deriva_Global = 0.04; % Fracción de la altura total de la estructura
% .....
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
Nud_Xsimilares=zeros(nr,np);
for k = 1:nr
a=find(Xcol(1,k)==X);
Nud_Xsimilares(k,1:length(a))=a;
end
% .....
%% Masas
[MASA, masa_nudo, WBuilding, W]=masa_carga_reactiva_Irreg(nr, np,
Nud_Xsimilares, qp, g, X);
% Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
% Dis_Fuerzas_Laterales = 2; % 2 Distribución parabólica
% Dis_Fuerzas_Laterales = 3; % 3 Distribución triangular
% Dis_Fuerzas_Laterales = 4; % 4 Distribución uniforme
Dis_Fuerzas_Laterales = 3;

```

Se recomienda revisar las secciones anteriores de la monografía para entender como se procede cuando en un pórtico se debe incluir diagonales, se resalta de color rojo lo que es relevante para el programa.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```

%% .....SECCIONES
%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
Fy_brace=Fy;
Es_brace=Es;
% Sec_VG_COL = Elementos I =[tipo#, d,tw,bs,bi,tfs,tfi]... En milímetros!!
Sec_VG_COL=[1 393.7, 22.6, 398.8, 398.8, 36.6, 36.6 ; % Tipo 1 es W14x193*
2 772.2, 16.6, 381.0, 381.0, 27.2, 27.2 ; % Tipo 2 es W30x173*
3 696.0, 15.4, 355.6, 355.6, 24.8, 24.8 ; % Tipo 3 es W27x146*
4 754.4, 13.2, 266.7, 266.7, 17.0, 17.0 ; % Tipo 4 es W30x99
5 683.3, 12.4, 254.0, 254.0, 18.9, 18.9]; % Tipo 5 es W27x94
% Elem_Sec_VG_COL = ["tipo# respecto de Sec_VG_COL", Identificador de los
elementos]
Elem_Sec_VG_COL=[1 1, 7, 13, 6, 12, 18, 0, 0, 0, 0;
2 3, 4, 9, 10, 15, 16, 0, 0, 0, 0;
3 2, 8, 14, 49, 53, 5, 11, 17, 52, 56;
3 50, 51, 54, 55, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
4 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28;
4 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38;

```

```

4 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48;
5 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66;
5 67, 68 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;

% .....
% Secciones para las diagonales * Nota lo importante es el área e inercia
% Tipo 1
diae=0.22; %Diámetro exterior
diai=0.22-8*2/1000; %Diámetro interior
A1=pi*diae^2/4-pi*diai^2/4; % área
I1=pi*diae^4/64-pi*diai^4/64; % inercia
Sec_Diag = [69 A1 I1 11 1];
%% Propiedades dinámicas
nudt=nELEM;
nudcol=28;
[Seccion,Elem_Tipo_Prop2,Z_ELEM,th_ELEM]=Diferentes_Vg_COL(nudt,Sec_VG_COL,
Elem_Sec_VG_COL,Uso_Conexion,Fy,Es,L);
%Seccion=[ELEMENTO, Área, Inercia, NUMEROS DE ELEMENTOS A CREAR,
INCREMENTO EN NUMERO DE ELEMENTO]
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
% Para las diagonales
[ELEM_Diag]=gelem_portico(Sec_Diag);
ELEM=[ELEM;ELEM_Diag(length(NI)+1:end,:);]
% Matriz de Rigidez
% Matriz de Rigidez
ELEMH=ELEM(1:length(NI),:);
[KH]=krigidez_acero(ngl,ELEMH,L,seno,coseno,VC,Es); % Del pórtico principal
%Contribucion de elementos Diagonales de Acero.....
ELEMA=ELEM(length(NI)+1:end,:);
LA=L_Diag(length(NI)+1:end); senoA=seno_Diag(length(NI)+1:end);
cosenoA=coseno_Diag(length(NI)+1:end); VCA=VC_Diag(length(NI)+1:end,:);
num_Diag=length(LA);
%%%%%%%%%%%% UNIDADES cm
Est = Es/10; % Módulo de elasticidad, (kg/cm2)
for ie=1:np
    if ie==1
    spFin(ie,1)=Ypisos(ie,1)-0.0;
    else
    spFin(ie,1)=Ypisos(ie,1)-Ypisos(ie-1,1);
    end
end
H=spFin*100;
d_col = 0.0; % De forma conservadora y por facilidad ** Esto puede cambiar el usuario
d_beam = 0.0; % De forma conservadora y por facilidad ** Esto puede cambiar el usuario
hci=d_col*100;hcd=d_col*100;hdis=0;Lon=sv1(1,1)*100;hv=d_beam*100;
Kef=zeros(np,1);
for ie=1:np
    pos =length(NI)+1+2*(ie-1)+1; % Posición del área de cada diagonal en la matriz ELEM
    [Kdiag(ie),Keq(ie)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(ie),Kef(ie),ELEM(p
os,1)*10000,Est);
end
Kdiag=Kdiag/10; % Para tener en T/m
ELEMT_Diag=[Kdiag(1);Kdiag(1); Kdiag(1);Kdiag(1);
Kdiag(2);Kdiag(2); Kdiag(2);Kdiag(2);
Kdiag(3);Kdiag(3); Kdiag(3);Kdiag(3)];

```



```

[KA]=krigidez_tadas(num_Diag,ngl,ELEMT_Diag,senoA,cosenoA,VCA); %Rigidez de
Diagonales
%%%%%%%%%%
%.....
KTT=KH+KA; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (Tn/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
%.....
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez
Masa_Rigidez = [MASA,KL];

```

El código restante del programa es similar al presentado en la sección 5 con algunas secciones importantes indicadas en color rojo.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 3 para Pushover Nivel 2

```

%% Elementos y nudos
s_vanos=zeros(nr-1,np);
for t=1:np
num_vanos(t,1)=length(nonzeros(Nud_Xsimilares(:,1+t)))-1;
matriz=nonzeros(Nud_Xsimilares(:,t+1));
for l=1:num_vanos(t,1)
s_vanos(l,t)=X(1,matriz(l+1,1))-X(1,matriz(l,1));
end
end

%%
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos_V2_Irreg(nr_Bloque,nod,NI,NJ,X,Y,Se
c_VG_COL,Elem_Tipo_Prop2, coseno);
[Sec_AIZ,th_Sec, L2]=Secciones_Mod_OpenSees(nudt,ELEM, Z_ELEM,th_ELEM, L); %
Area, Inercia, Modulo Plastico Z
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2)';
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3)';
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
%.....
L_rig=0.6; % Longitud para la zona rigida en las diagonales debido a las placas
NI2=[zeros(1,length(NI)), NI2(1,end-num_Diag+1:end)];

```

```

NJ2=[zeros(1,length(NI)), NJ2(1,end-num_Diag+1:end)];
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
num_COL_VG=length(NI)/5; % Elementos columnas y vigas del modelo original
[Tabla_Elem_Nud_Diag,nod_Diag,X_Diag,Y_Diag]=ElementosNudosDiagonales(nod
,num_COL_VG,num_Diag,NI_Diag,NJ_Diag,X,Y,L_rig);
NI_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,2)';
NJ_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,3)';
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag);
%long. de @elem, seno y coseno
NI_Diag=[NI,NI_Diag];
NJ_Diag=[NJ,NJ_Diag];
% .....
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL_Irreg(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
%% Dibujos
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
Sec_AI_Diag=ELEMA; % Área e inercia de diagonales
Pushover_Opensees_Diag_V2()

! OpenSees.exe Pushover_Estructura_Ref.tcl

%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread('Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out');
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover2(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];

```

En la figura 6.9 se presenta las curvas Pushover para las estructuras irregulares sin y con diagonales, las diagonales permiten que se eleve la resistencia y rigidez de las estructuras.

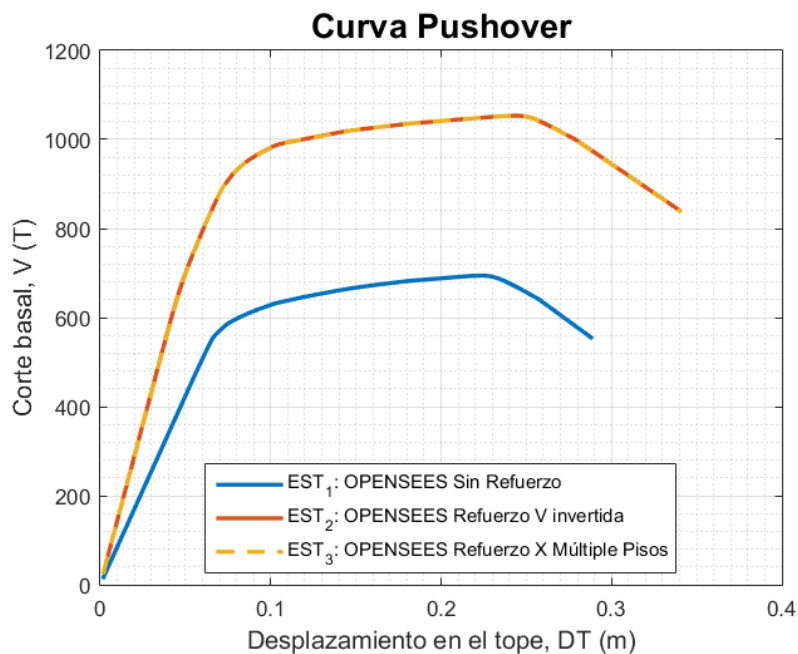


Figura 6.9 Curva Pushover generada por CEINCI-LAB mediante el acoplamiento con OpenSees.

REFERENCIAS

- Aguiar, R., Cagua, B., Pilatasig, J. & Zambrano, E. (2019). Interfase ICEINCI-LAB y nuevas funciones. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(2), 167-199.
- Aguiar, R., Cagua, B. & Pilatasig, J. (2019). Nuevas funciones del sistema CEINCI-LAB para análisis sísmico espacial. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(3), 259-276.
- Aguiar, R., Mora, D. & Rodríguez, M. (2015). Diagrama momento curvatura y momento-rotación para elementos de hormigón armado y acero con ASCE/SEI 41 y sistema de computación CEINCI-LAB. *Revista Ciencia*, 17(2), 191-228.
- Applied Technology Council & United States Federal Emergency Management Agency (2009). Quantification of building seismic performance factors. US Department of Homeland Security, FEMA.
- Arango, S., Paz, A. & Del Pilar Duque, M. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica. *Revista EIA*, 6(12), 139-154.
- ASCE 41 (2013). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE Standard ASCE/SEI 41-13, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Astudillo, B. (2018). Modelación y análisis por desempeño de una estructura de acero, considerando deterioro para la predicción del colapso.
- Barrera D., (2018). Modelación elasto-plástica y análisis no lineal de una estructura especial de acero utilizando OpenSees, Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca.
- Bosco, M., Ferrara, E., Ghersi, A., Marino, E. & Rossi, P. P. (2014). Improvement of the Model Proposed by Menegotto and Pinto for Steel. *European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*(2), 25-29.
- Cagua, B., Aguiar, R., Pilatasig, J. & Mora, D. (2020). ACOPLAMIENTO DE OPENSEES CON CEINCI-LAB PARA ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL.

PRIMERA PARTE: REFORZAMIENTO SÍSMICO CON DIAGONALES DE ACERO. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25(3), 367-420.

- Cagua, B., Pilatasig, J. & Aguiar, R. (2020). NUEVAS FUNCIONES DEL SISTEMA CEINCI-LAB PARA ANÁLISIS SÍSMICO ESPACIAL DE ESTRUCTURAS IRREGULARES. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25(1), 61-95.
- Carr, A. (2009). RUAUMOKO theory manual. University of Canterbury, New Zealand.
- Chopra, A. (2012). Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 4th Edition. University of California at Berkeley. USA.
- Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. R. (2010). Nonlinear structural analysis for seismic design. NEHRP seismic design technical brief, 4, 1-36.
- Denavit, D. M., Hajjar, F.J. (2013). "Description of geometric nonlinearity for beamcolumn analysis in OpenSees", Report NEU-CEE-2013-02, Department of Civil and Environmental Engineering, Northeastern University, Boston, Massachusetts. <http://hdl.handle.net/2047/d20003280>.
- Del Rincón, A. (2017). Contravientos en la respuesta sísmica de edificios regulares (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.).
- Del Valle E., Lobo W., Vielma J. C. (2014) "Análisis comparativo de la capacidad de disipación de energía de edificios de acero con diagonales concéntricas y excéntricas", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19 (2), 143-171
- Díaz L., Moscoso M., Campbell J., Durán M., Aguiar R. (2015). "Estudio Experimental de pórticos de hormigón armado solicitado a cargas laterales crecientes", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 20 (1), 101-113.
- Felippa, C. (2004). "Introduction to Finite Element Methods", Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures University of Colorado Boulder, Colorado.
- FEMA 356 (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Prepared by the American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Emergency Management Agency (FEMA). Washington D.C., USA.
- García, S. (2013). Modelo simplificado de pocos grados de libertad, para simular el impacto de una roca sobre una viga de hormigón armado. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Madrid.

- García, Ó. R., García, L. M. J., Castelló, L. P., Aparicio, A. G. & Vidal, A. P. (2018). MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica. Universidad Miguel Hernández.
- Godínez E., López Almansa F. (2014), “Importancia del diseño de las conexiones viga columna en la capacidad sismo resistente de edificios dúctiles de concreto reforzado en México”, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19 (2), 113-142.
- Godínez E., Tena A. (2014), “Efectos de modos superiores en la respuesta no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo metálico tipo Crevrón. Caso de Estudio”. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 19 (2), 173-185.
- Herrera, M., Parra, K., Palacios, P., Palacios, P., Olmedo, J., Cagua, B., Pilatasig, J. & Palma, D. (2019). Análisis sísmico espacial de estructuras reforzadas con diagonales de acero utilizando CEINCI-LAB. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(4), 343-363.
- Hughes, T. (1987). “The Finite Element Method. Linear Static and Dinamic Finite Element Analysis”, ISBN 0-13-317017-9, Prentice-Hall.
- Ibarra L.F., Medina R. A. and Krawinkler H. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(12), 1489-1511. Stanford University, Stanford, CA. USA.
- Lignos, D. G. & Krawinkler, H. (2007). A database in support of modeling of component deterioration for collapse prediction of steel frame structures. In *Structural Engineering Research Frontiers* (pp. 1-12).
- Lignos D, Krawinkler H. (2009). Sidesway Collapse of Deteriorating Structural Systems under Seismic Excitations. Report No. TR-172, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University, California. USA.
- Lignos, D. G., Krawinkler, H. & Whittaker, A. S. (2011). Prediction and validation of sidesway collapse of two scale models of a 4-story steel moment frame. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(7), 807-825.
- Lignos, D. G. & Krawinkler, H. (2011). Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading. *Journal of Structural Engineering*, 137(11), 1291-1302.
- Mora D., Aguiar R. (2015,1), “Modelación de diagrama momento-curvatura y momento-rotación en secciones de acero estructural”, *Revista Ciencia*, 17 (1), 99-124. Universidad de Fuerzas Armadas, ESPE, Quito, Ecuador.

- Mora D., Aguiar R. (2015, 2), "Pushover multimodal en estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 20 (2), 157-197.
- Paz, M. (1992). *Dinámica estructural: teoría y cálculo*. Reverté.
- Rogac, M. (2012). "Plastic Analysis of Steel Frame Structure", *Civil Engineering Forum*, Volume XXI/2.
- Kitayama, S. & Constantinou, M. C. (2017). *Seismic Performance Evaluation -A Primer*.
- Tapia E., Gutiérrez S. (2016). "Respuesta inelástica de edificios de acero usando diferentes patrones de carga lateral", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21 (1), 105-122.
- Zaradnik, R.; Raichman, S. & Mirasso, A. (2006). "Formulación de matrices de masas concentradas para análisis dinámico de estructuras de materiales compuestos". II Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería (EnIDI 2006), Mendoza, 2006. En: *Desarrollos e Investigaciones Científico Tecnológicas en Ingeniería*, pp. 267 a 273, ISBN 987-05-1360-3.
- Zaradnik, R. (2009). "Análisis de Estructuras con Materiales Compuestos". Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Zaradnik, R., Raichman, S. & Mirasso, A. E. (2009). Comparación de Diversas Matrices de Masas Concentradas con Similitud de Modos Propios. *Mecánica Computacional*, 28(10), 853-869.

Anexo A. Códigos para realizar ejercicios

Ejercicio 1:

Analizar la variación de los desplazamientos horizontales en el nudo 1 en función de la variación de la fuerza horizontal, hasta que la fuerza llegue a 300 T.

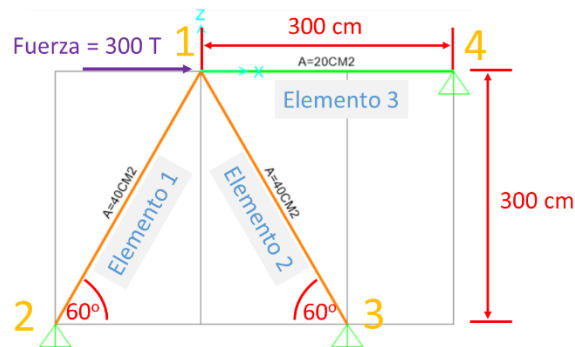


Figura A.1. Esquema de la estructura.

El material para las barras de la armadura plana tiene un esfuerzo de fluencia de $3.5 \frac{T}{cm^2}$ y un módulo de elasticidad de $2000 \frac{T}{cm^2}$. Por didáctica se realizará el análisis considerando un comportamiento lineal elástico de los materiales y posteriormente el mismo análisis considerando un comportamiento elasto



Figura A.2 a) Comportamiento idealizado de un material elástico. b) Comportamiento idealizado de un material elástico perfectamente plástico.

Por facilidad en este ejercicio se desprecian efectos de segundo orden.

Se recomienda al lector emplear algún editor de lenguaje tcl para definir los modelos:

Código tcl para el modelo: Armadura_Ej_1

```

#-----
# Ejemplo 1: Armadura
# Código con: MATERIAL Elástico y Elástico Perfectamente Plástico
# Problema para entender la no linealidad de material
# Programa por: Ing. Brian Cagua, MDO. (CEINCI-LAB)
# Monografía escrita por: Dr. Roberto Aguiar, Ing. Brian Cagua, Ing. Julia
# Pilatasig
# Fecha: 4/6/2020
#-----

# 1_Definir modelo
# model BasicBuilder -ndm $ndm <-ndf $ndf>
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 2

# 2_Definir Geometria
# Definir nodos
# node $nodeTag (ndm $coords) <-mass (ndf $massValues)>
# node (numero de nudo) "X" "Y"
node 1      0      0
node 2      [expr -300/tan(60*3.1416/180)] -300
node 3      [expr +300/tan(60*3.1416/180)] -300
node 4      300    0
puts "Nudos definidos"
# Soporte o condiciones de borde
# fix $nodeTag (ndf $constrValues)
#(0= no tiene restriccion; 1= si tiene restriccion)
fix 2 1 1
fix 3 1 1
fix 4 1 1
puts "Apoyos definidos"
# Definir materiales
# Material
# elástico.....
# uniaxialMaterial Elastic $matTag $E <$eta> <$Neg>
set matTag1 1;
set E 2000. ; #Ton/cm2

uniaxialMaterial Elastic $matTag1 $E

# Material
# Inelástico.....
# uniaxialMaterial Steel01 $matTag $Fy $E0 $b <$a1 $a2 $a3 $a4>
set matTag2 2;
set E0 2000. ; #Ton/cm2
set Fy 3.5; #Ton/cm2
set b 0.00001;
uniaxialMaterial Steel01 $matTag2 $Fy $E0 $b
puts "Materiales definidos"
# Definir propiedades de los elementos (áreas)

```



```

set A1 40.; #cm2
set A2 20.; #cm2
# Armaduras
# element truss $eleTag $iNode $jNode $A $matTag <-rho $rho> <-cMass $cFlag> <-
doRayleigh $rFlag>
# .....
# En esta etapa podemos asignar matTag1 o matTag2 ..... IMPORTANTE
# .....
# En el caso de estar asignando propiedades matTag1 usar estos elementos
element truss 1 1 2 $A1 $matTag1
element truss 2 1 3 $A1 $matTag1
element truss 3 1 4 $A2 $matTag1
## En el caso de estar asignando propiedades matTag2 usar estos elementos
#element truss 1 1 2 $A1 $matTag2
#element truss 2 1 3 $A1 $matTag2
#element truss 3 1 4 $A2 $matTag2
puts "Elementos definidos"
# .....
# Definir cargas
# Definir variación de carga (Time Series) y Patron de cargas (D, L, S)

# Variacion de carga
timeSeries Linear 1
timeSeries Constant 2
# Patron de carga
# pattern Plain $patternTag $tsTag <-fact $cFactor> {
set Lateral 1
pattern Plain $Lateral 1 {
    #load $nodeTag (ndf $LoadValues)
    load 1 300 0
}
puts "Cargas definidas"
# Recorders ..... IMPORTANTE .....
# recorder Node <-file $fileName> <-xml $fileName> <-binary $fileName> <-tcp
$inetAddress $port> <-precision $nSD> <-timeSeries $tsTag> <-time> <-dT
$deltaT> <-closeOnWrite> <-node $node1 $node2 ...> <-nodeRange $startNode
$endNode> <-region $regionTag> -dof ($dof1 $dof2 ...) $respType'
# .....
# En el caso de estar asignando propiedades matTag1 usar estos recorders
file mkdir Resultados_Elastico ; #Comado que crea carpeta
recorder Node -file Resultados_Elastico/Nodo1_X.out -time -node
1 -dof 1 disp
# recorder Element <-file $fileName> <-xml $fileName> <-binary $fileName> <-
precision $nSD> <-time> <-closeOnWrite> <-dT $deltaT> <-ele ($ele1 $ele2 ...)>
<-eleRange $startEle $endEle> <-region $regTag> $arg1 $arg2 ...
recorder Element -file Resultados_Elastico/FuerzasAxi.out -time -ele 1 2
3 axialForce
recorder Element -file Resultados_Elastico/Fuerzas.out -time -ele 1 2 3
forces
# .....
# En el caso de estar asignando propiedades matTag2 usar estos recorders
#file mkdir Resultados_Elastico_Pepect_Plast ; #Comando que crear carpeta

```

```

#recorder Node      -file  Resultados_Elastico_Pefect_Plust/Nodo1_X.out
-time -node 1      -dof 1 disp
## recorder Element <-file $fileName> <-xml $fileName> <-binary $fileName> <-
precision $nSD> <-time> <-closeOnWrite> <-dT $deltaT> <-ele ($ele1 $ele2 ...)>
<-eleRange $startEle $endEle> <-region $regTag> $arg1 $arg2 ...
#recorder Element  -file  Resultados_Elastico_Pefect_Plust/FuerzasAxi.out
-time -ele 1 2 3    axialForce
#recorder Element  -file  Resultados_Elastico_Pefect_Plust/Fuerzas.out  -
time -ele 1 2 3     forces
## .....

# 4_Análisis

#4.1 CosntrainHandler:      Método utilizado para definir restricciones
constraints Plain
#4.2 DOF_Numberer:         Método para numerar grados de libertad
numberer Plain
#4.3 systemOfEqn/Solver:    Método para almacenar matrices de F=KU
system BandGeneral
#4.4 Convergence Test:
test EnergyIncr 1.e-006 1000
#4.5 Algorithm
algorithm Newton
#4.6 Integrator
integrator LoadControl 0.01; # % de Aplicación de la carga (define # de pasos)
#4.7 Analysis
analysis Static
# Realiza el analisis
analyze 100; #Relacionado con integrator LoadControl = 0.01, incrementos de
carga
remove recorders ; # Permite no cerrar el OpenSees para generar resultados

```

Debido a que es el primer ejemplo se explicará como ejecutar el código Tcl en OpenSees, para ello seguir los pasos:

1. Acciones preliminares para ejecutar los modelos con OpenSees:

Cuando sea la primera vez que se quiera ejecutar un código Tcl en OpenSees se requiere activar el lenguaje Tcl, para descargar el programa que permite activar este lenguaje Tcl se recomienda visitar el enlace:

<https://www.activestate.com/products/tcl/downloads/>

Además, descargar OpenSees en:

<https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/user/download.php>

2. Ejecutar el modelo:

En una carpeta se debe tener el script del ejercicio en Tcl junto con OpenSees, luego iniciar OpenSees y ejecutar el script 1 (**source Armadura_Ej_1.tcl** y enter) entonces se genera una carpeta con los resultados del modelo como se muestra a continuación en la figura A.3, realizar esto cambiando el tipo de material para tener 2 carpetas.

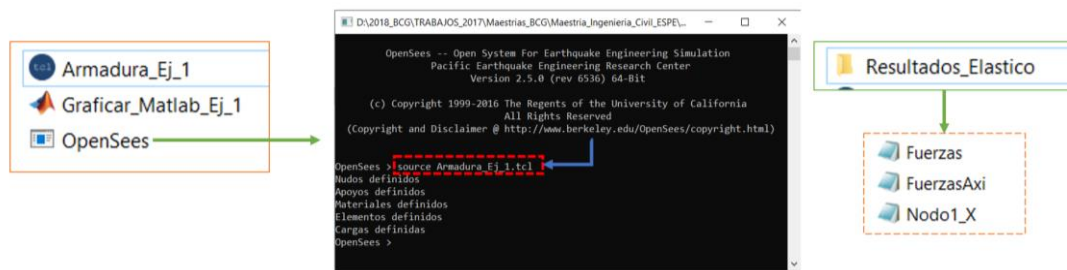


Figura A.3 Secuencia de análisis de los modelos en OpenSees.

Los resultados de OpenSees generalmente se guardan en archivos de texto (ver figura A.3), con la posibilidad de que el usuario los ejecute en Excel u en otro programa para procesar esta información. En este caso se utiliza MATLAB para cargar los resultados del análisis no lineal generado en OpenSees y generar gráficos, se muestra el código empleado para ello.

Código MATLAB para ver resultados: Armadura_Ej_1

```
%
% -----
% Ejemplo 1: Armadura
% Código con: MATERIAL Elástico y Elástico Perfectamente Plástico
% Problema para entender la no linealidad de material
% Programa por: Ing. Brian Cagua, MDO. (CEINCI-LAB)
% Monografía escrita por: Dr. Roberto Aguiar, Ing. Brian Cagua, Ing.
Julia Pilatasig
% Fecha: 4/6/2020
% -----

clear; clc; close all;
format short g

% Datos
Fuerza=300; % T
Fy = 3.5; % T/cm2
A1 = 40; % cm2
A2 = 20; % cm2

%% Para el análisis Elástico

Nodo1_X= load(['Resultados_Elastico\Nodo1_X.out']); %DATO:Dirección
carpeta
FuerzasAxi= load(['Resultados_Elastico\FuerzasAxi.out']);
%.DATO:Dirección carpeta

Porcentaje_Fuerza = Nodo1_X(:,1); % Fracción respecto a la unidad
Desp_Elastico = Nodo1_X(:,2); % cm

Axial_1 = FuerzasAxi(:,2); % T
Axial_2 = FuerzasAxi(:,3); % T
Axial_3 = FuerzasAxi(:,4); % T

Fuerzas = Fuerza*Porcentaje_Fuerza; % T
num_pasos = length(Desp_Elastico);

Py_1 = Fy*ones(num_pasos,1)*A1; % T
Py_2 = Fy*ones(num_pasos,1)*A2; % T

%% Gráfica 1: Fuerza-Desplazamiento
set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
figure
plot(Desp_Elastico,Fuerzas,'b','LineWidth',2.0)
hold on
title('Fuerza vs Desplazamiento','fontsize',16)
```

```

xlabel('Desplazamiento Nudo 1 [cm]','fontsize',14)
ylabel('Fuerza Nudo 1 [T]','fontsize',14)
legend({'Análisis Elástico'},'Location','best','fontsize',12)
grid on
box on

%% Para el análisis Elástico Perfectamente Plástico

Nodo1_X_PP= load(['Resultados_Elastico_Pefect_Plast\Nodo1_X.out']);
%.DATO:Dirección carpeta
FuerzasAxi_PP=
load(['Resultados_Elastico_Pefect_Plast\FuerzasAxi.out']);
%.DATO:Dirección carpeta

Porcentaje_Fuerza_PP = Nodo1_X_PP(:,1); % Fracción respecto a la unidad
Fuerzas_PP = Fuerza*Porcentaje_Fuerza_PP; % T
Desp_Elastico_PP = Nodo1_X_PP(:,2); % cm

Axial_1_PP = FuerzasAxi_PP(:,2); % T
Axial_2_PP = FuerzasAxi_PP(:,3); % T
Axial_3_PP = FuerzasAxi_PP(:,4); % T

%% Gráfica 2: Fuerza-Desplazamiento
set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
figure
plot(Desp_Elastico_PP,Fuerzas_PP,'g','LineWidth',2.0)
hold on
xlim([0 5])
title('Fuerza vs Desplazamiento','fontsize',16)
xlabel('Desplazamiento Nudo 1 [cm]','fontsize',14)
ylabel('Fuerza Nudo 1 [T]','fontsize',14)
legend({'Análisis Elástico Perfectamente
Plástico'},'Location','best','fontsize',12)
grid on
box on

%% Gráfica 3: Fuerza-Desplazamiento
set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
figure
plot(Desp_Elastico,Fuerzas,'b','LineWidth',2.0)
hold on
plot(Desp_Elastico_PP,Fuerzas_PP,'g','LineWidth',2.0)
hold on
xlim([0 5])
title('Fuerza vs Desplazamiento','fontsize',16)
xlabel('Desplazamiento Nudo 1 [cm]','fontsize',14)
ylabel('Fuerza Nudo 1 [T]','fontsize',14)
legend({'Análisis Elástico','Análisis Elástico Perfectamente
Plástico'},'Location','best','fontsize',12)
grid on
box on

%% Gráfica 4: Fuerza_Axial-Desplazamiento
set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
figure

plot(Desp_Elastico,Axial_1,'-m','LineWidth',2.0)
hold on
plot(Desp_Elastico,Axial_2,'-c','LineWidth',2.0)
hold on
plot(Desp_Elastico,Axial_3,'-y','LineWidth',2.0)
hold on
plot(Desp_Elastico_PP,Axial_1_PP,'--k','LineWidth',2.0)
hold on
plot(Desp_Elastico_PP,Axial_2_PP,'--b','LineWidth',2.0)
hold on
plot(Desp_Elastico_PP,Axial_3_PP,'--g','LineWidth',2.0)
hold on

plot(Desp_Elastico_PP,Py_1,'--r','LineWidth',1.0)

```

```

hold on
plot(Desp_Elastico_PP,Py_2,'--r','LineWidth',1.0)
hold on
plot(Desp_Elastico_PP,-Py_1,'--r','LineWidth',1.0)
hold on
plot(Desp_Elastico_PP,-Py_2,'--r','LineWidth',1.0)
hold on
xlim([0 5])
title('Fuerza vs Desplazamiento','fontsize',16)
xlabel('Desplazamiento Nudo 1 [cm]','fontsize',14)
ylabel('Fuerza Axial de cada Elemento [T]','fontsize',14)
legend({'Análisis elástico Elemento 1','Análisis elástico Elemento
2',...
'Análisis elástico Elemento 3',...
'Análisis elástico perfectamente plástico Elemento 1',...
'Análisis elástico perfectamente plástico Elemento 2',...
'Análisis elástico perfectamente plástico Elemento 3',...
},'Location','best','fontsize',12)
grid on
box on

```

Para ejecutar el programa en MATLAB denominado **Graficar_Matlab_Ej_1.m** es necesario tener las carpetas con resultados, tanto del análisis Elástico como Elástico Perfectamente Plástico y con ello se tendrá las gráficas del análisis, como se ilustra en la figura A.4.

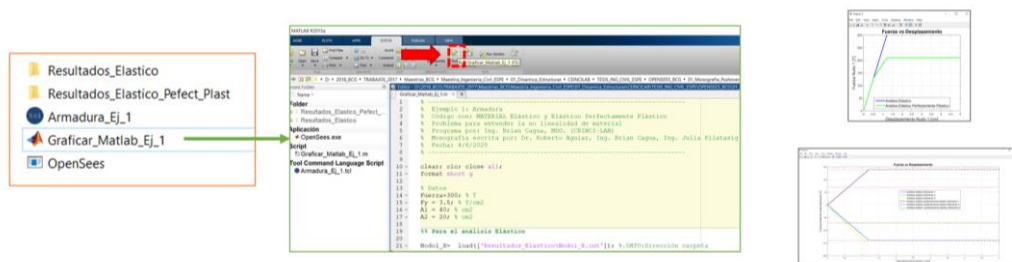


Figura A.4 Secuencia para generar gráficas en MATLAB.

Del análisis se puede presentar las respuestas globales y locales de fuerzas en función del desplazamiento como se puede apreciar en la figura A.5.

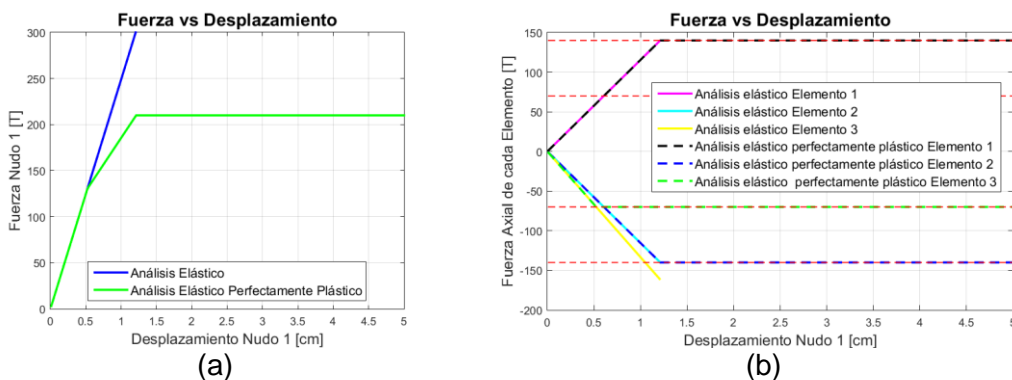


Figura A.5 a) Respuesta global del sistema: Fuerza en el nudo 1 vs Desplazamiento horizontal, b) Fuerza axial en cada elemento vs Desplazamiento horizontal en el nudo 1.

Ejercicio 2:

Analizar la variación de la carga horizontal en función de los desplazamientos horizontales en el nudo de aplicación de la carga, considerando los efectos de no linealidad geométrica.

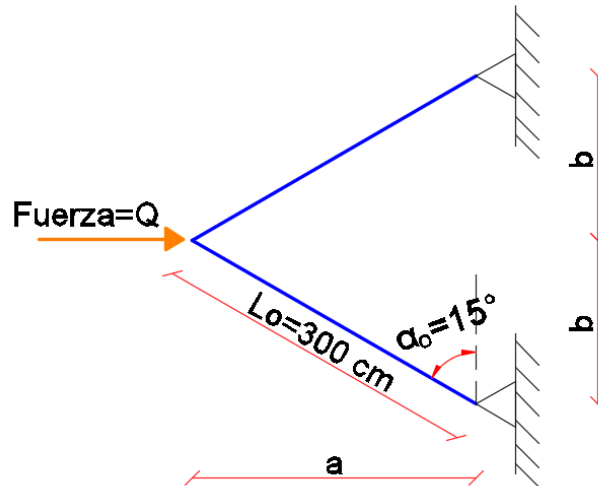


Figura A.6. Esquema de la estructura.

El material para las barras de la armadura plana tiene un esfuerzo de fluencia de $3.5 \frac{T}{cm^2}$ y un módulo de elasticidad de $2000 \frac{T}{cm^2}$. Por didáctica se realizará el análisis considerando un comportamiento lineal elástico de los materiales y se asume que el área transversal de las barras es $20 cm^2$.

Código tcl para el modelo: Armadura_Ej_2

```
#-----
# Ejemplo 2: Armadura
# Código con: Material Elástico y Elástico Perfectamente Plástico
# No linealidad Geométrica:
# LINEAL = Pequeños desplazamientos / NO LINEAL = grandes desplazamientos
# Problema para entender la no linealidad geométrica
# Programa por: Ing. Brian Cagua, MDO. (CEINCI-LAB)
# Monografía escrita por: Dr. Roberto Aguiar, Ing. Brian Cagua, Ing. Julia
Pilatasig
# Fecha: 4/6/2020
#-----

# 1_Definir modelo
# model BasicBuilder -ndm $ndm <-ndf $ndf>
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 2
# 2_Definir Geometria

# Definir nodos
# node $nodeTag (ndm $coords) <-mass (ndf $massValues)>
# node (numero de nudo) "X" "Y"
node 1 0 0
```

```

node 2      0                                     [expr
+2*300*cos(15*3.1416/180)]
node 3      [expr -300*sin(15*3.1416/180)]      [expr
+300*cos(15*3.1416/180)]

puts "Nodos definidos"
# Soporte o condiciones de borde
# fix $nodeTag (ndf $constrValues)
#(0= no tiene restriccion; 1= si tiene restriccion)
fix 1 1 1
fix 2 1 1

puts "Apoyos definidos"
# Definir materiales
# Material elastico
# uniaxialMaterial Elastic $matTag $E <$eta> <$Eneg>
set matTag1 1
set E 2000. ; #Ton/cm2

uniaxialMaterial Elastic $matTag1 $E

puts "Materiales definidos"
# Definir elementos (areas)
set A1 20.

## Armaduras..... LINEAL = Pequeños desplazamientos
##element corotTruss $eleTag $iNode $jNode $A $matTag
#element truss 1 1 3 $A1 $matTag1
#element truss 2 2 3 $A1 $matTag1

# Armaduras..... NO LINEAL = grandes desplazamientos
#element corotTruss $eleTag $iNode $jNode $A $matTag
element corotTruss 1 1 3 $A1 $matTag1
element corotTruss 2 2 3 $A1 $matTag1

puts "Elementos definidos"

# Definir nudo de control
set NodoControl 3
# Desplazamiento de la prueba realizada
set displ [list [expr -3*300*sin(15*3.1416/180)] [expr
+3*300*sin(15*3.1416/180)] ];
# Definir cargas (solo de referencia)
# Variacion de carga
timeSeries Linear 1
# Patron de carga
# pattern Plain $patternTag $tsTag <-fact $cFactor> {
set Lateral 1
pattern Plain $Lateral 1 {
    #load $nodeTag (ndf $LoadValues)
    load 3 0.0001 0
}
}

```



```

        set despactual [nodeDisp $NodoControl 1]           ;# nodeDisp me
da desplazamiento de cualquier nodo
    }
    } elseif {$Dincr<0} {
        set Dmax [expr $Dincr*$nPasos]
        set ok 0
        while {$ok == 0 && $despactual>$Dmax } {           ;# Para cada
valor de desplazamiento, en cada Dincr
            set ok [analyze 1]                             ;# Asigno valor
de "analyze" a ok
            set despactual [nodeDisp $NodoControl 1]     ;# nodeDisp me
da desplazamiento de cualquier nodo
        }
    }
}
# Mientras el OK no sea "0", debo intentar con otro tipo de algoritmo. Para
ayudarme a la convergencia.
if {$ok !=0} {
    puts "Análisis no converge en $despactual"
} else {
    puts "Análisis Completo"
}
remove recorders ; # No cerrar el OpenSees para generara resultados

```

Código MATLAB para ver resultados: Armadura_Ej_1

```

% -----
% Ejemplo 2: Armadura
% Código con: Material Elástico y Elástico Perfectamente Plástico
% No linealidad Geométrica:
% LINEAL = Pequeños desplazamientos / NO LINEAL = grandes desplazamientos
% Problema para entender la no linealidad geométrica
% Programa por: Ing. Brian Cagua, MDO. (CEINCI-LAB)
% Monografía escrita por: Dr. Roberto Aguiar, Ing. Brian Cagua, Ing. Julia
Pilatasig
% Fecha: 4/6/2020
% -----

clear; clc; close all;
format short g

%% Datos
A = 20; % cm2
E = 2000; % T/cm2
Lo = 300; % cm
alfa_o = 15; % Grados
alfa_2 = 15; % Grados
%% Desarrollo
a = Lo*sin(alfa_o/180*pi);
b = Lo*cos(alfa_o/180*pi);
%% Análisis Analítico
% Análisis lineal
q = -a:a/10:3*a;
K_L=2*E*A*a^2/Lo^3;
Q_L_Analitico=K_L*q;
% Análisis no lineal
num=length(q);
for i=1:num

```

```

K_NL(1,i)=K_L*(Lo)^3/a^2*(1/((a-q(1,i))^2+b^2)^0.5)-1/Lo)*(a-
q(1,i))*1/q(1,i);
Q_NL_Analitico(1,i)=K_NL(1,i)*q(1,i);
end

%% Análisis OpenSees
% Para el análisis lineal
Nodo3_Y= load(['Resultados_Lineal\Nodo3_Y.out']); %DATO:Dirección carpeta
FuerzasAxi= load(['Resultados_Lineal\FuerzasAxi.out']); %DATO:Dirección
carpeta
Fuerzas= load(['Resultados_Lineal\Fuerzas.out']); %DATO:Dirección carpeta
Q_L = Fuerzas(:,4)+Fuerzas(:,8);
q_L = Nodo3_Y(:,2);

% Para el análisis no lineal
Nodo3_Y_NL = load(['Resultados_No_Lineal\Nodo3_Y.out']); %DATO:Dirección
carpeta
FuerzasAxi_NL = load(['Resultados_No_Lineal\FuerzasAxi.out']);
%DATO:Dirección carpeta
Fuerzas_NL = load(['Resultados_No_Lineal\Fuerzas.out']); %DATO:Dirección
carpeta
Q_NL = Fuerzas_NL(:,4)+Fuerzas_NL(:,8);
q_NL = Nodo3_Y_NL(:,2);

%% Gráfica
set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
figure()
% Analítico
plot(q/a,Q_L_Analitico/(A*E),'-o','LineWidth',1)
hold on
plot(q/a,Q_NL_Analitico/(A*E),'-o','LineWidth',1)

% OpenSees
plot(q_L/a,Q_L/(A*E),'LineWidth',1.5)
plot(q_NL/a,Q_NL/(A*E),'LineWidth',1.5)
xlim([-1 3])
grid minor
grid on
box on
title('Análisis en OpenSees de armadura material elástico','fontsize',16)
ylabel('Relación carga generalizada, Q/EA','fontsize',14)
xlabel('Desplazamiento generalizado, q/a','fontsize',14)
xt =-0.5; yt = 0.1;
txt1 = ['Análisis Lineal: Pequeños desplazamientos'];
txt2 = ['Análisis No Lineal: Grandes desplazamientos'];
str = {txt1,txt2};
text(xt,yt,str,'FontSize',11,'FontName','Arial','BackgroundColor','white',
...
'EdgeColor','black')

legend({'Análisis Lineal Analítico', 'Análisis No Lineal Analítico' ...
'Análisis Lineal OpenSees', 'Análisis No Lineal
OpenSees'},'Location','best','fontsize',12)

```

Gráfica esfuerzo versus esbeltez de elementos de acero a compresión:

Código MATLAB:

```

%% Datos
Es = 2038901.916; %[Kg /cm2]
Fy = 2530 ; %[Kg /cm2]
KL_r_crit = 4.71*(Es/Fy)^0.5;

for i=1:200
KL_r(i,1)=i;
%% EULER
FeE(i,1) = pi^2*Es/(KL_r(i,1))^2;
%% EULER CORREGIDO
if FeE(i,1)<Fy
FeEcorreg(i,1) =FeE(i,1);
else
FeEcorreg(i,1) = Fy;
end

%% AISC 360
if FeE(i,1)<0.44*Fy
FeAISC(i,1) =0.877*FeE(i,1);
else
FeAISC(i,1) =0.658^(Fy/FeE(i,1))*Fy;
end
end

%% RANKINE GORDON
FeRG=(FeE*Fy) ./ (FeE+Fy);
%% RANKINE
FeR=(Fy) ./ (1+((Fy*(KL_r).^2) ./ (Es*pi^2)));

%% Esbeltez Crítica
KLrc=[KL_r_crit KL_r_crit]';
Fec=[0 1.5*Fy]';
%% Grafica
set(0,'defaultfigurecolor',[1 1 1])
plot(KL_r,FeE,'LineWidth',2)
hold on
plot(KL_r,FeEcorreg,'LineWidth',2)
plot(KL_r,FeRG,'LineWidth',2)
plot(KL_r,FeR,'--','LineWidth',2)
plot(KL_r,FeAISC,'LineWidth',2)
plot(KLrc,Fec,'-.r','LineWidth',1)
ylim([0 1.5*Fy])
title('Curva Esfuerzo - Esbeltez para elementos en
compresión','FontSize',16)
ylabel('Esfuerzo (Kg /cm2)','FontSize',12)
xlabel('Esbeltez, KL/r (-)','FontSize',12)
legend({'Euler','Euler Corregido',...
'Rankine-Gordon','Rankine','AISC 360','KL/r critico'},'Location','best')
grid on
grid minor
box on

```

Anexo B. Código para Pushover del ejemplo 1 presentado en la sección 4

Código de CEINCI-LAB: Edificio de 6 pisos de acero

```

clear;clc
format short
% Acoplar OPENSEES con CEINCI-LAB
global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ n masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno Es Abeam lbeam Mybeam Ks_beamxL qp
global Acol Icol Mycol Ks_colxL num_elem Tabla_Elem_Nud
global DP DN th_pP th_pN th_pcP th_pcN Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
%.....
global nod_Diag X_Diag Y_Diag NI_Diag NJ_Diag Abrace lbrace num_Diag Tabla_Elem_Nud_Diag
global Fy_brace Es_brace
%% Geometría del pórtico
Uso_Conexion = 1; % Si la conexion es Precalificada 1, sino 2 entonces Cpr = 1.
ESTRUCTURA = 3; % 1 Sin refuerzo, 2 Con V invertida y 3 con X multiples pisos
Graficar=0; % 0 si no quiere graficar, 1 en funcion del num de ESTRUCTURA, 2 Todas
sv =[7.315;7.315;7.315]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp =[5.486;3.81; 3.81; 3.81; 3.81; 3.81]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-3.269;-1.8517]; % carga distribuida en vigas en cada piso T/m
% .....
mar = [2;5;8;11;14;17]; % Para las V invertidas
mar2 = [2;8;14]; % Para las V invertidas en el modelo con X
marv = [5;11;17]; % Para las V en el modelo con X
%Para diagonales se calcula el área e inercia
diae=0.18; %Diámetro exterior
diai=0.18-8*2/1000; %Diámetro interior
% .....
[nv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ng]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_COL_VG=length(L);
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
% .....
[GEN]=geometria_nudo_diagonales(nv, np, nudt, mar);
[NI2,NJ2]=gn_portico(GEN);
[NI_Diag2,NJ_Diag2]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
[GEN]=geometria2_nudo_diagonales(nv, np, nudt,mar2,marv);
[NI3,NJ3]=gn_portico(GEN);
[NI_Diag3,NJ_Diag3]=gn_portico3(NI,NJ, NI3,NJ3);
% .....
NI_Dib{1}=NI; NI_Dib{2}=NI_Diag2; NI_Dib{3}=NI_Diag3;
NJ_Dib{1}=NJ; NJ_Dib{2}=NJ_Diag2; NJ_Dib{3}=NJ_Diag3;
% .....
if ESTRUCTURA ==1
NI_Diag=NI;

```

```

NJ_Diag=NJ;
elseif ESTRUCTURA ==2
NI_Diag=NI_Diag2;
NJ_Diag=NJ_Diag2;
elseif ESTRUCTURA ==3
NI_Diag=NI_Diag3;
NJ_Diag=NJ_Diag3;
NI2=NI3;
NJ2=NJ3;
end

[VC_Diag]=vc(NI_Diag,NJ_Diag,CG);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag); %long. de @elem, seno y coseno
%% Masas
W=zeros(np,1);
for t=1:np
sum=0;
for r=1:nv
sum=-qp(t,1)*sv(r,1);
W(t,1)=W(t,1)+sum;
end
end
sum=0;
WBuilding=0;
for i=1:np
WBuilding=WBuilding+W(i,1); %Peso total en T
for ij=1:nv+1
if ij==1
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
elseif ij==nv+1
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(nv,1)/2;
else
NodalMass =(-qp(i,1)/g)*sv(ij-1,1)/2+(-qp(i,1)/g)*sv(ij,1)/2;
end
masa_nudo(i,ij)=NodalMass;
end
MASA(i,i)=W(i,1)/g;
end
% Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
% 2 Distribución parabólica; % 3 Distribución triangular; % 4 Distribución uniforme
Dis_Fuerzas_Laterales = 1;

%% Dibujo de la Estructura 2D
if Graficar==0
elseif Graficar==1
dibujo(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag)
dibujoNudElem(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag,CG)
dibujogdl(X,Y,NI_Diag,NJ_Diag,CG)
else
for op=1:3
dibujo(X,Y,NI_Dib{op},NJ_Dib{op})
dibujoNudElem(X,Y,NI_Dib{op},NJ_Dib{op},CG)
dibujogdl(X,Y,NI_Dib{op},NJ_Dib{op},CG)
end
end

%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fy_brace=Fy;
Es_brace=Es;
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
if Uso_Conexion==1
Cpr=(Fy+Fu)/(2*Fy); % Factor que toma en cuenta la resistencia máxima de la conexión.
if Cpr < 1.2
Cpr=Cpr;
else
Cpr =1.2;
end
end

```

```

else
    Cpr=1;
end
%% Secciones de los elementos
% Column section % W30x173
Zx = 0.0098;
Acol = 0.0326;
lcol = 0.0034;
Mycol =Fy*Zx*Cpr;
d_col= 773.2 / 1000.0;
% Brace section % Tcircular Diámetro de 18 cm y espesor de 8 mm
Abrace=pi*diae^2/4-pi*diai^2/4; % área
lbrace=pi*diae^4/64-pi*diai^4/64; % inercia
% beam section % W30x99
Zx = 0.0051;
Abeam = 0.0186;
lbeam = 0.0017;
Mybeam = Fy*Zx*Cpr;
d_beam = 754.4 / 1000.0;
% beam springs at Floor 2 # % W30x99
DP= 0.886; % rate of cyclic deterioration for pos loading
DN= 0.886; % rate of cyclic deterioration for neg loading

th_pP= 0.0204; % plastic rot capacity for pos loading
th_pN= 0.0204; % plastic rot capacity for neg loading

th_pcP= 0.1001; % post-capping rot capacity for pos loading
th_pcN= 0.1001; % post-capping rot capacity for neg loading
% .....
%% Propiedades dinámicas
if ESTRUCTURA==1
    [Seccion]=Unica_Vg_COL(nudt,coseno,Acol,lcol,Abeam,lbeam);
    %Seccion=[ELEMENTO, BASE, ALTURA, NUMEROS DE ELEMENTOS A CREAR, INCREMENTO EN
    NUMERO DE ELEMENTO]
    [ELEM]=gelem_portico(Seccion);
    % Matriz de Rigidez
    ELEMH=ELEM(1:length(NI),:);
    [KH]=krigidez_acero(ngl,ELEMH,L,seno,coseno,VC,Es);
    KTT=KH; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (Tn/m)
else
    [Seccion]=Unica_Vg_COL(nudt,coseno,Acol,lcol,Abeam,lbeam);
    Seccion=[Seccion; length(NI)+1 Abrace lbrace 11 1];
    [ELEM]=gelem_portico(Seccion);
    % Matriz de Rigidez
    ELEMH=ELEM(1:length(NI),:);
    [KH]=krigidez_acero(ngl,ELEMH,L,seno,coseno,VC,Es);
    %Contribucion de elementos Diagonales de Acero
    ELEMA=ELEM(length(NI)+1:end,:);
    LA=L_Diag(length(NI)+1:end); senoA=seno_Diag(length(NI)+1:end);
    cosenoA=coseno_Diag(length(NI)+1:end); VCA=VC_Diag(length(NI)+1:end,:);
    num_Diag=length(LA);
    %%%%%%%%%%%%%%% UNIDADES cm
    Est = Es/10; % Módulo de elasticidad, (kg/cm2)
    H=sp*100;
    hci=d_col*100;hcd=d_col*100;hdis=0;Lon=sv(2,1)*100;hv=d_beam*100;
    Kef=zeros(np,1);
    for ie=1:np
        [Kdiag(ie),Kef(ie)]=rigidez_equivalente_TADAS(hci,hcd,hdis,Lon,hv,H(ie),Kef(ie),Abrace*10000,Est);
    end
    Kdiag=Kdiag/10; % Para tener en T/m
    ELEM_T_Diag=[Kdiag(1);Kdiag(1);
        Kdiag(2);Kdiag(2);
        Kdiag(3);Kdiag(3);
        Kdiag(4);Kdiag(4);
        Kdiag(5);Kdiag(5);
        Kdiag(6);Kdiag(6)];
    [KA]=krigidez_tadas(num_Diag,ngl,ELEM_T_Diag,senoA,cosenoA,VCA); %Rigidez de Diagonales
    KTT=KH+KA; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (Tn/m)
end
end

```

```

na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
%.....
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np
maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez
Masa_Rigidez = [MASA,KL];
mkdir Prop_Dinamicas_Estructuras_2D
save(['Prop_Dinamicas_Estructuras_2D\EST_' num2str(ESTRUCTURA) '_M_K.txt'],['Masa_Rigidez'],'-ascii');
%.DATO:Dirección carpeta
% break
%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,d_col,d_beam);
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2);
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
L_rig=0.6;
NI2=[zeros(1,length(NI)), NI2(1,end-num_Diag+1:end)];
NJ2=[zeros(1,length(NJ)), NJ2(1,end-num_Diag+1:end)];
[NI_Diag,NJ_Diag]=gn_portico3(NI,NJ, NI2,NJ2);
% .....
[Tabla_Elem_Nud_Diag,nod_Diag,X_Diag,Y_Diag]=ElementosNudosDiagonales(nod,num_COL_VG,num_Diag,
NI_Diag,NJ_Diag,X,Y,L_rig);
NI_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,2);
NJ_Diag=Tabla_Elem_Nud_Diag(:,3);
[L_Diag,seno_Diag,coseno_Diag]=longitud(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag); %long. de @elem, seno y coseno
NI_Diag=[NI,NI_Diag];
NJ_Diag=[NJ,NJ_Diag];
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
%% Dibujos
if ESTRUCTURA==1
dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)
Pushover_Opensees()
! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl
else
dibujoNudElemMODPUSH(X_Diag,Y_Diag,NI_Diag,NJ_Diag)
Pushover_Opensees_Diag()
! OpenSees.exe Pushover_Estructura_Ref.tcl
end
%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread('Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out');
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover3(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];
%% Grabar los archivos
mkdir Pushover_Estructuras_2D
save(['Pushover_Estructuras_2D\EST_' num2str(ESTRUCTURA) '.txt'],['Resultados'],'-ascii'); %.DATO:Dirección
carpeta

```

Anexo C. Código para ejemplo de sección rectangular

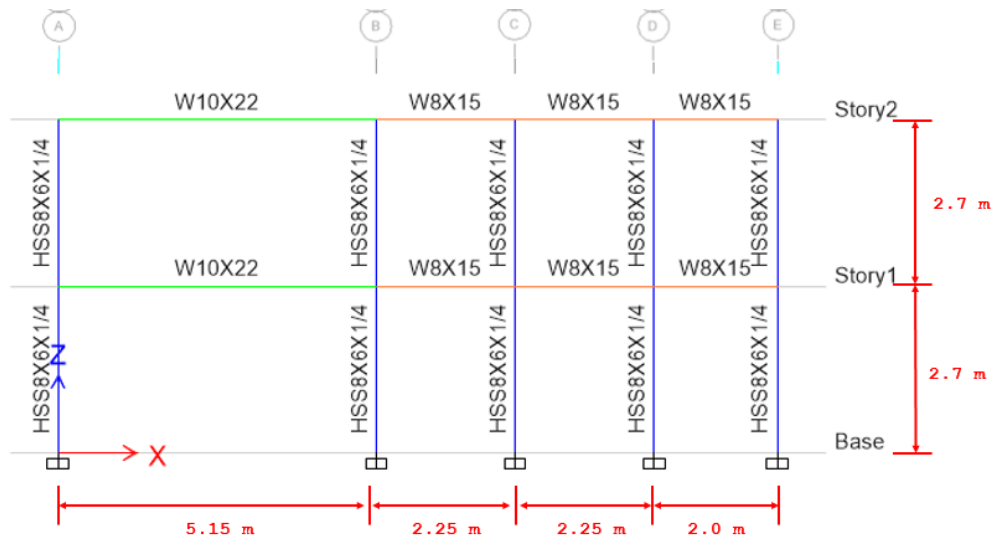


Figura C.1. Esquema de la estructura.

Código CEINCI-LAB: Ejemplo 2 para Pushover Nivel 2

```

global DOF nod sv sp nv np nr X Y NI NJ masa_nudo Xcol Ypisos L
global coseno qp num_elem Tabla_Elem_Nud Dis_Fuerzas_Laterales T W fi
global Es Fy Fu Sec_AIZ th_Sec Uso_Conexion L2 Deriva_Global Nud_Xsimilares
%.....
%% Geometría del pórtico
sv=[5.15;2.25;2.25;2]; %Ingresar un vector con la longitud de vanos en (metros)
sp=[2.7; 2.7]; %Ingresar un vector con la altura de pisos en (metros)
g=9.81; % Gravedad m/seg2
qp=[-2.3;-1.5]; % carga distribuida en vigas en cada piso T/m
Uso_Conexion = 2;
%Uso_Conexion = # % Conexion Precalificada RBS 1, Conexion Precalificada diferente
que RBS 2, No Precalificada 3.
Deriva_Global = 0.04; % Fracción de la altura total de la estructura
% .....
[inv,np,nudt,nudcol,nudvg,nod,nr]=geometria_nudo_viga(sv,sp);
[X,Y]=glinea_portico2(nv,np,sv,sp,nod,nr);
[NI,NJ]=gn_portico2(nr, nv, nudt, nudcol, nudvg);
[CG,ngl]=cg_sismo2(nod,nr,Y); %Calcula los grados de libertad
[VC]=vc(NI,NJ,CG);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
Xcol=X(1,1:nr);
Ypisos=nonzeros(unique(Y));
Nud_Xsimilares=zeros(nr,np);

```



```

for k = 1:nr
a=find(Xcol(1,k)==X);
Nud_Xsimilares(k,1:length(a))=a;
end
% .....
%% Masas
[MASA, masa_nudo, WBuilding, W]=masa_carga_reactiva(np, nv, qp, sv, g);
% Dis_Fuerzas_Laterales = 1; % 1 En función del primer modo de vibrar
% Dis_Fuerzas_Laterales = 2; % 2 Distribución parabólica
% Dis_Fuerzas_Laterales = 3; % 3 Distribución triangular
% Dis_Fuerzas_Laterales = 4; % 4 Distribución uniforme
Dis_Fuerzas_Laterales = 1;
% % .....
% % Dibujo de la Estructura 2D
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
% dibujoNudElem(X,Y,NI,NJ,CG)
% dibujogdl(X,Y,NI,NJ,CG)
%% .....SECCIONES
%% Propiedades del material
Fy=25310.505; % Esfuerzo de fluencia, T/m2
Es=200.0*1000000.0/9.81;% Módulo de elasticidad, T/m2
Fu=40778.036; % Esfuerzo último, T/m2
% Sec_VG_COL = Elementos l =[tipo#, d,tw,bs,bi,tfs,tfi]... En milímetros!!
Sec_VG_COL=[1 200, 12, 150, 150, 6, 6; % Tipo 1 COL.. HSS8X6X1/4
2 260, 6, 120, 120, 12, 12; % Tipo 2 VPA.. W10x22
3 210, 6, 100, 100, 8, 8]; % Tipo 3 VPB.. W8x15

% Elem_Sec_VG_COL = ["tipo# respecto de Sec_VG_COL", Identificador de los
elementos]
Elem_Sec_VG_COL=[1 1, 2, 3, 4, 5;
1 6, 7, 8, 9, 10;
2 11, 12, 19, 20, 0;
3 13, 14, 15, 16, 17;
3 18, 21, 22, 23, 24;
3 25, 26, 0, 0, 0];

% .....
%% Propiedades dinámicas
[Seccion,Elem_Tipo_Prop2,Z_ELEM,th_ELEM]=Diferentes_Vg_COL(nudt,Sec_VG_COL,
Elem_Sec_VG_COL,Uso_Conexion,Fy,Es,L);
%Seccion=[ELEMENTO, Área, Inercia, NUMEROS DE ELEMENTOS A CREAR,
INCREMENTO EN NUMERO DE ELEMENTO]
[ELEM]=gelem_portico(Seccion);
% Matriz de Rigidez
[K]=krigidez_acero(ngl,ELEM,L,seno,coseno,VC,Es);
%.....
KTT=K; %<----- MATRIZ "K" DE TODA LA ESTRUCTURA (kN/m)
na=np;
kaa=KTT(1:na,1:na);kab=KTT(1:na,na+1:ngl);
kba=kab'; kbb=KTT(na+1:ngl,na+1:ngl);
KL=kaa-kab*inv(kbb)*kba;
%.....
[T,fi,OM]=orden_eig(KL,MASA);
% Factores de participacion modal
b=ones(np,1);
for i=1:np

```

```

maxfi=max(abs(fi(:,i)));
fi(:,i)=fi(:,i)/maxfi;
end
for i=1:np
    FP(:,i)=abs(((fi(:,i))*MASA*b)/((fi(:,i))*MASA*(fi(:,i))));
end
disp('Los periodos de vibración en segundos con CEINCI-LAB son:')
T % seg
% Grabar matrices de masa y rigidez
Masa_Rigidez = [MASA,KL];
mkdir Prop_Dinamicas_Estructuras_2D
save(['Prop_Dinamicas_Estructuras_2D\EST_1_M_K.txt'],['Masa_Rigidez'],'-ascii');
%.DATO:Dirección carpeta

%% Elementos y nudos
[Tabla_Elem_Nud,nod,X,Y]=ElementosNudos_V2(nudt,nudcol,nod,NI,NJ,X,Y,Sec_VG_C
OL,Elem_Tipo_Prop2);
[Sec_AIZ,th_Sec, L2]=Secciones_Mod_OpenSees(nudt,ELEM, Z_ELEM,th_ELEM, L); %
Area, Inercia, Modulo Plastico Z
% .....
NI=Tabla_Elem_Nud(:,2);
NJ=Tabla_Elem_Nud(:,3);
[L,seno,coseno]=longitud(X,Y,NI,NJ); %long. de @elem, seno y coseno
num_elem=nudt*5;
HBuilding=max(Y);
% .....
%% Nudos con grados de libertad iguales
[DOF]=MismosGDL(nod,np,Xcol,Ypisos,X,Y);
%% Dibujos
% dibujo(X,Y,NI,NJ)
dibujoNudElemMODPUSH(X,Y,NI,NJ)
Pushover_Opensees_V2()

! OpenSees.exe Pushover_Estructura.tcl

%% Gráfica Pushover
Tfundamental=textread('Resultados_Modal\Periodo_Fundamental.out');
[Vbase,DT]=Graficar_Pushover3(nr,WBuilding,HBuilding,FP,Tfundamental);
Resultados=[Vbase,DT];

```