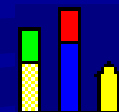


COLAPSO PROGRESIVO DE EDIFICIOS DE CONCRETO



Congreso de Ingenieria Civil UGC
Bogotá, Noviembre 5 – 7, 2013

Ricardo E. Barbosa C., *Ph.D.*



EngSolutions, Inc

Definición

“Colapso progresivo se define como la propagación de una falla local inicial -de elemento a elemento- resultando en el colapso de la estructura completa o de una de una parte desproporcionadamente grande de esta”

ASCE 07-10

Requisitos

■ Falla local que desencadena el proceso

Condición de carga anormal

- Sobrecarga imprevista
- Mal uso del edificio
- Cargas anormales como explosión accidental o acto terrorista

Condición de carga normal *

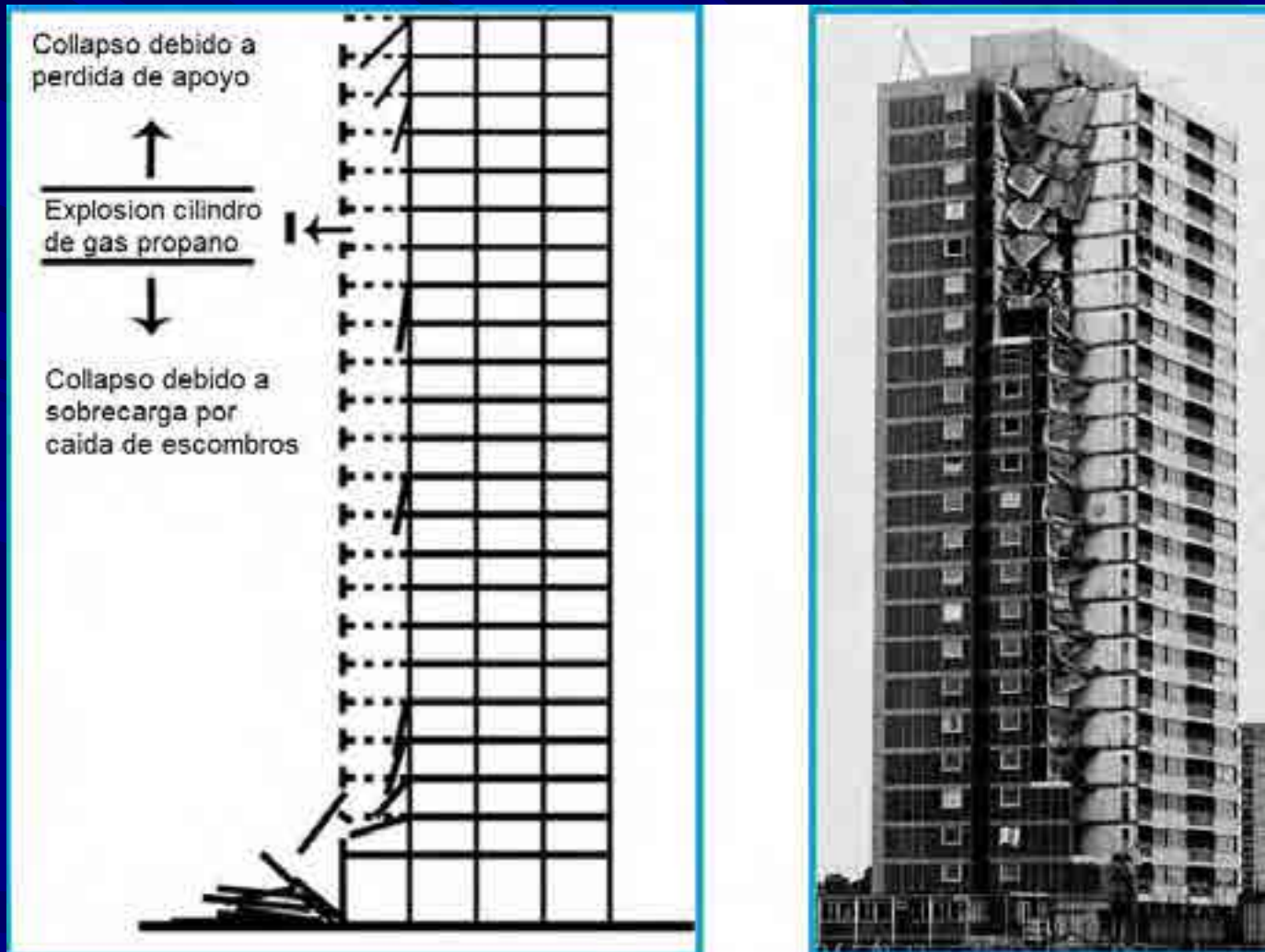
- Durante construcción
- Durante ocupación
- Evento natural (Sismo o Viento)

* Defecto constructivo y/o error de diseño

■ Estructura que carece de adecuada :

- Resistencia
- Continuidad
- Ductilidad
- Redundancia

Torre Ronan Point Londres 1962



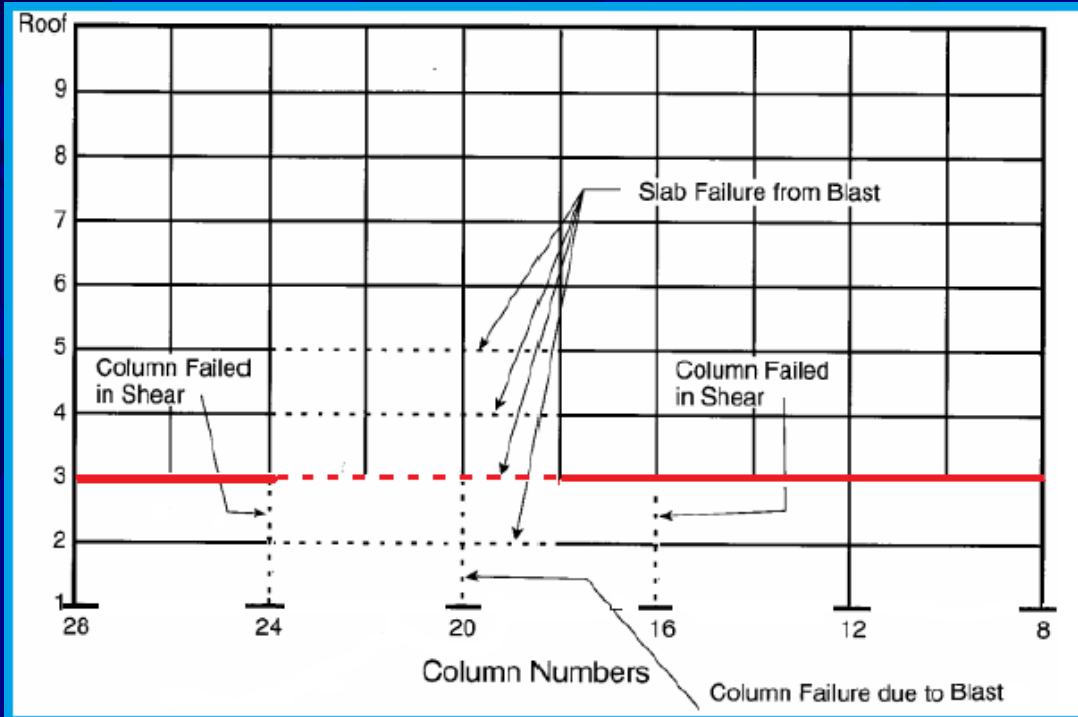
Explosión de pequeña magnitud en piso 18 produjo el colapso parcial. Paneles de concreto pobremente conectados. En respuesta los Ingleses adoptaron diseño contra colapso progresivo en su código (1970).

Edificio Federal A. P. Murrah en Oklahoma, 1995



Edificio de oficinas diseñado en los 70s sin provisiones de sismo (No dúctil). El primer piso se retrocedió una luz. En tercer nivel gran viga de transferencia soportada por columnas de doble altura separadas 12 m. En la viga de transferencia se apoyan columnas intermedias para una separación entre columnas de 6 m. Bomba de 2 Ton (a 4 m) destruyó 3 columnas inferiores.

Edificio Federal A. P. Murrah en Oklahoma



Marchand, 2004

Elementos destruidos por la explosión y colapso de los pisos soportados por la viga de transferencia. Estructura sin ductilidad y sin posibilidad de trayectoria alterna para redistribuir las cargas de elementos fallados.

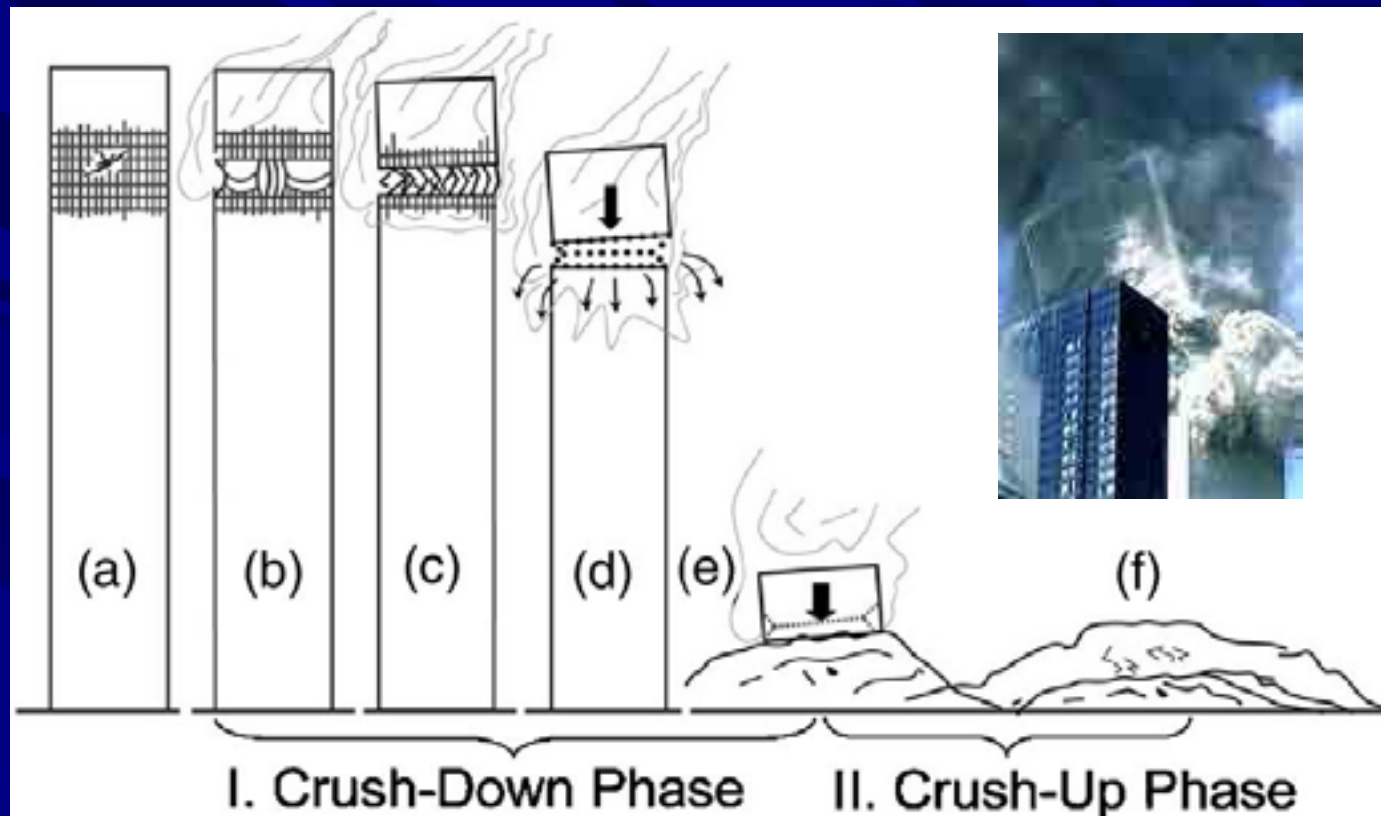
Torres Gemelas del World Trade Center (9/11)

Secuencia de eventos

- Impacto Boeing 767
- Daño estructural por impacto que la estructura soporto
- Fuego intenso rico en combustible debilitó zona de impacto
- Zona de impacto perdió su capacidad de soportar la carga sobre ella
- Parte superior colapso por pérdida de apoyo
- El peso e impacto de la parte superior cayendo causó una progresión de fallas que se extendió piso-a-piso hacia abajo



Torres Gemelas del World Trade Center (9/11)



Bazant (2007)

Falla progresiva pero no colapso desproporcionado pues fue causado por un gran impacto y un gran fuego. La estructura de cada edificio era resistente, continua, dúctil y redundante.

Normas Existentes - Diseño para Colapso Progresivo

■ EEUU

Sector Privado

- Actualmente ASCE y ACI no incluyen provisiones explícitas para prevenir colapso progresivo. Sin embargo, ASCE está desarrollando “Estandar para Mitigación de Colapso Desproporcionado en Edificios”

Edificios Gubernamentales

- UFC 4-023-03 “Diseño de Edificios para Resistir Colapso Progresivo” - aplica a edificios del Departamento de Defensa
- GSA “Guías de Análisis y Diseño para Resistir Colapso Progresivo” - aplica a edificios federales nuevos

■ Reino Unido

- “Regulaciones para Edificios” Requiere diseño contra colapso progresivo. Regulaciones se han usado durante 4 décadas

Diseño para Prevenir Colapso Progresivo

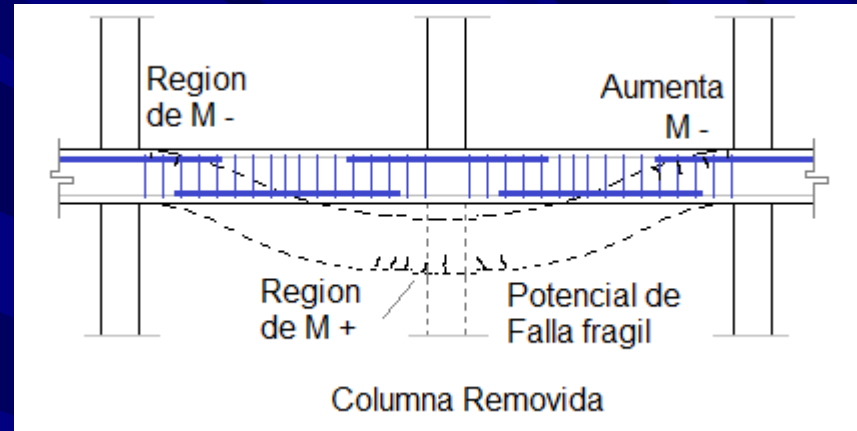
■ Métodos Indirectos

- Proveer Resistencia, Continuidad y Ductilidad
- Método de la Catenaria (Fuerzas de Amarre)

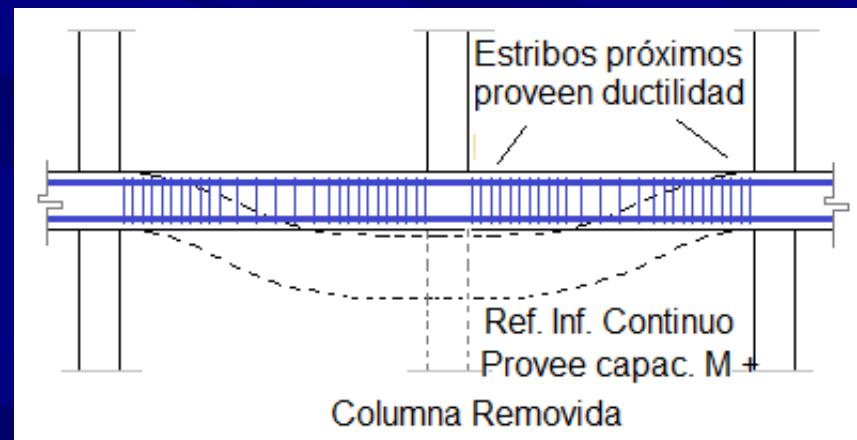
■ Métodos Directos

- Método de la Trayectoria de Carga Alterna (Redundancia)
- Método de la Resistencia Especifica (\$\$\$ Bunker)

Diseño Sísmico Riesgo de Colapso



Pórtico diseñado para Cargas de Gravedad

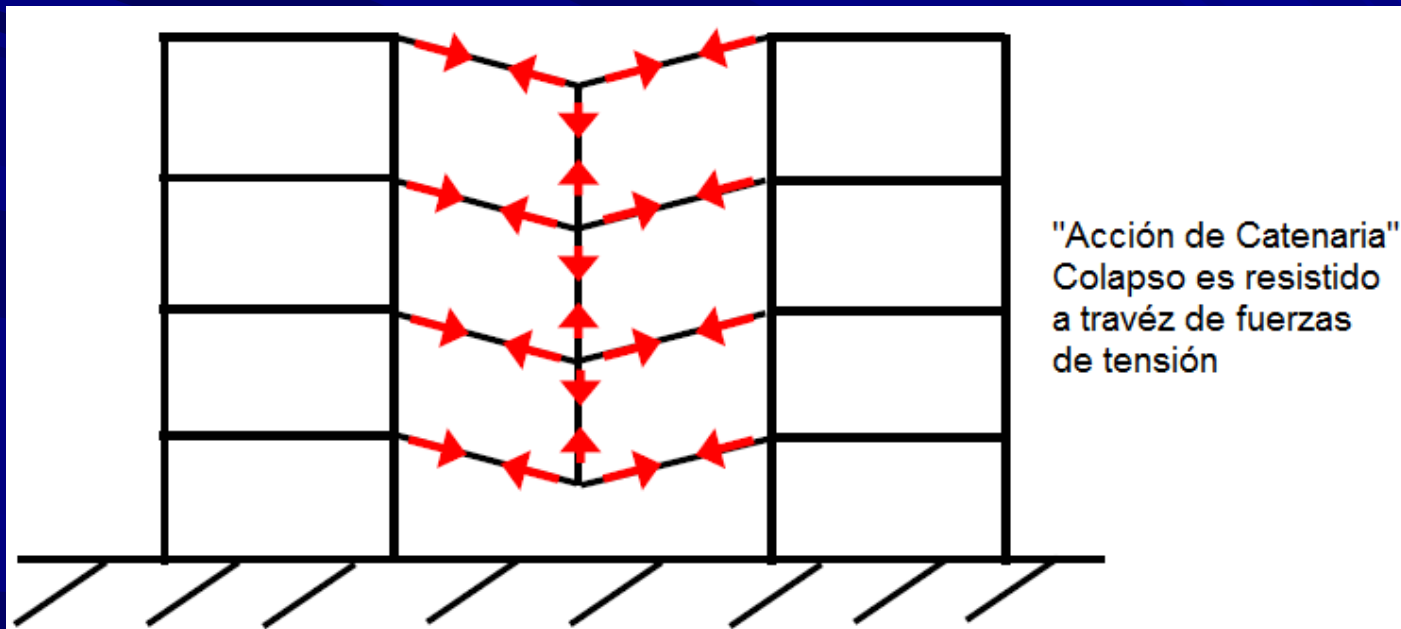


Pórtico diseñado para Fuerzas Sísmicas Altas (DES)

Estructuras diseñadas para sismo tienen mayor resistencia al colapso progresivo

Método de las Fuerzas de Amarre

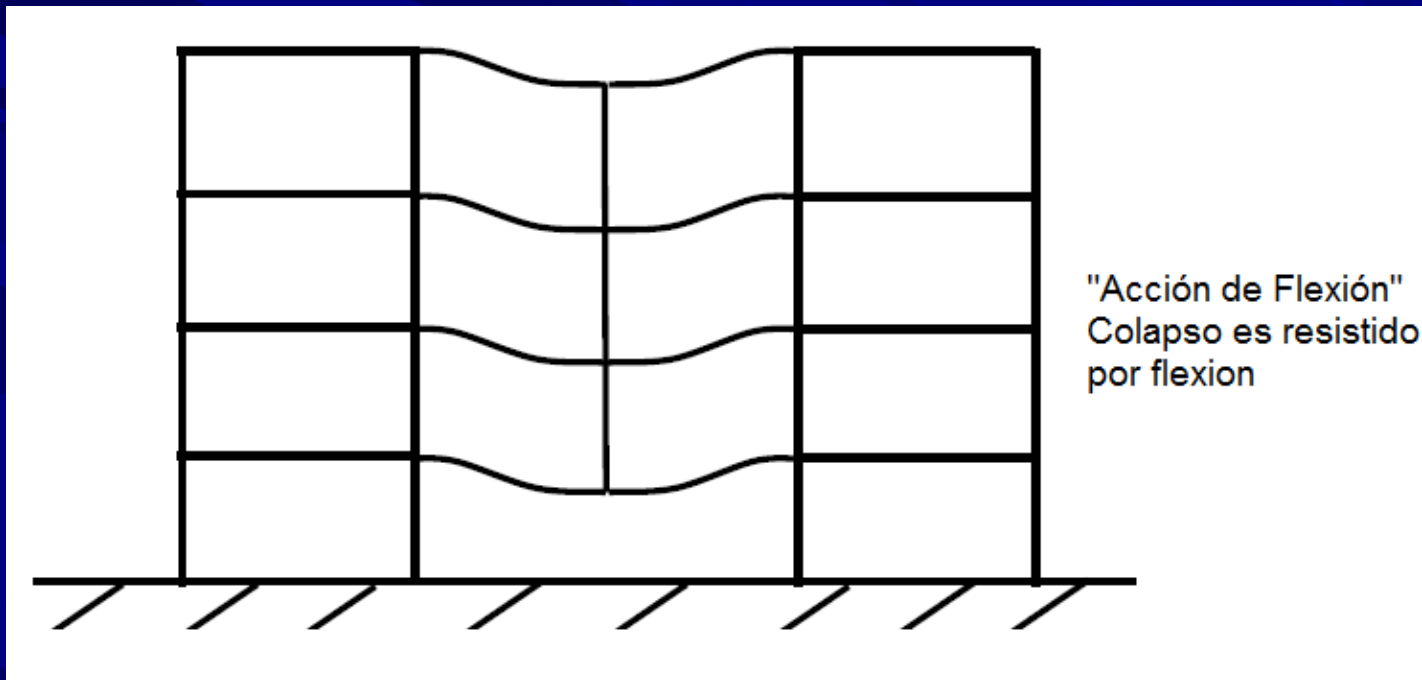
- Bajo deflexiones muy grandes, losas de concreto con refuerzo continuo pueden alcanzar un estado de tensión pura. En esta etapa las losas asumen la forma de una catenaria
- En este método de diseño se calculan las fuerzas con las que se debe amarrar el edificio para que no colapse



- Se deben proveer tres tipos de amarres horizontales: longitudinal, transversal y periférico.
- Se requieren amarres verticales en columnas y muros portantes

Método de la Trayectoria de Carga Alterna

- En este método el ingeniero debe demostrar que la estructura puede puentear una columna removida o una sección de muro y que las deformaciones no exceden límites establecidos



Selección Método de Diseño

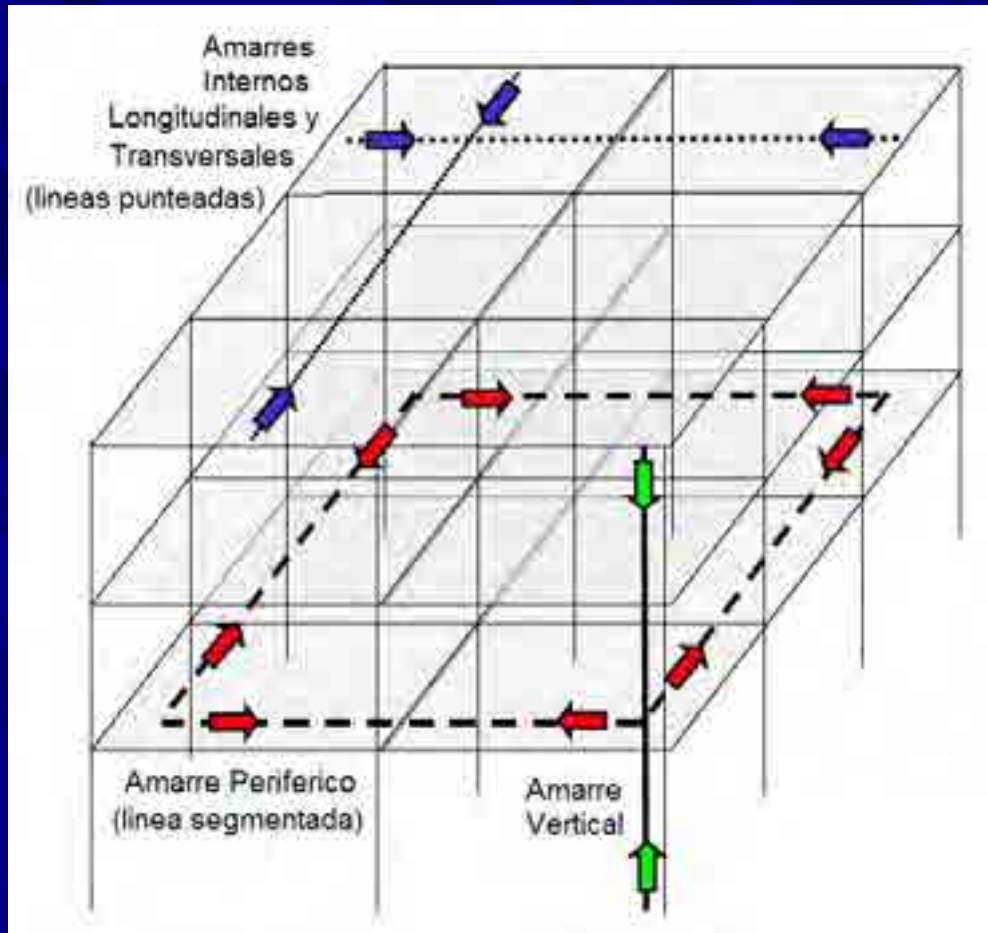
El método a usar depende de la categoría de Ocupación

En el caso del UFC-4-023 del Nivel de Protección requerido

Nivel de Protección	Diseño por Colapso Progresivo Requerido
Muy Bajo	Proveer Fuerzas de Amarre horizontales
Bajo	Proveer Fuerzas de Amarre horizontales y verticales
Medio	Proveer Fuerzas de Amarre horizontales y verticales y Aplicar el método de la Trayectoria de Carga Alterna
Alto	Proveer Fuerzas de Amarre horizontales y verticales y Aplicar el método de la Trayectoria de Carga Alterna Requisitos minimos de ductilidad

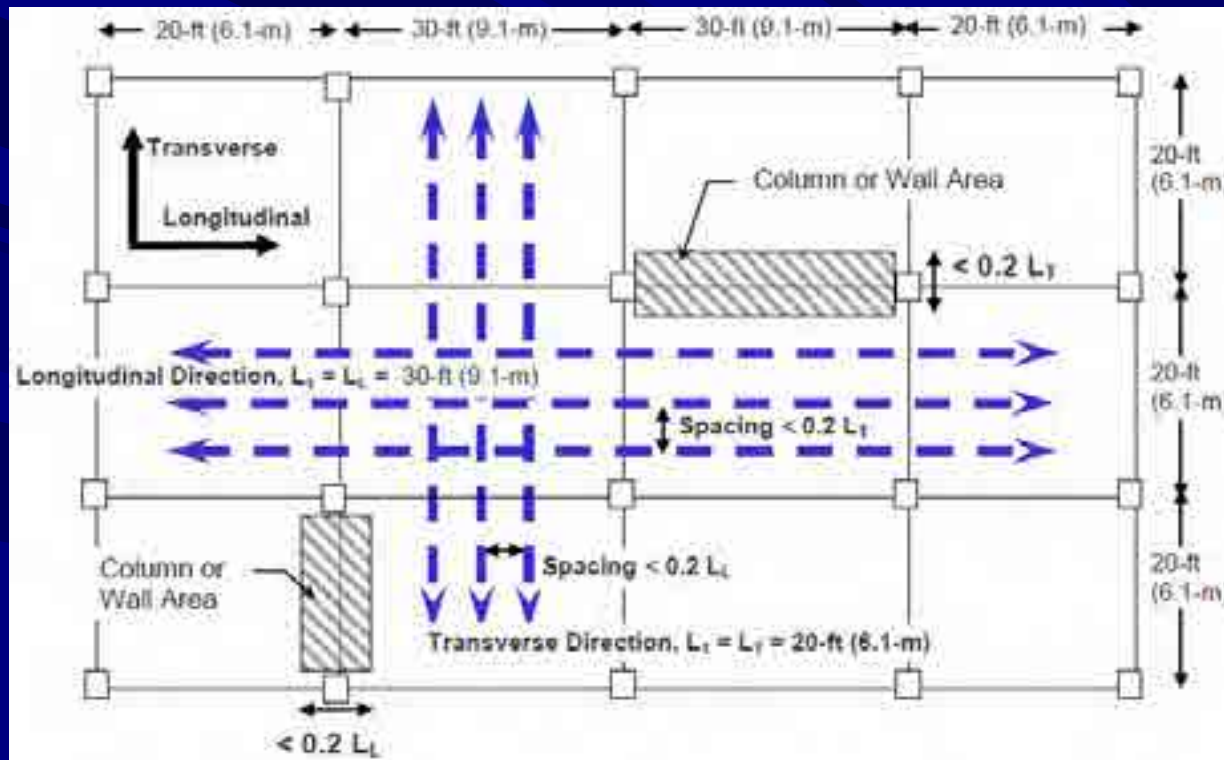
Fuerzas de Amarre

Los extremos de amarres longitudinales y transversales se deben anclar al amarre perimetral



El propósito de los amarres es transferir la carga vertical de elementos removidos a través del piso

Fuerza de Amarre Requerida



Carga de piso :

$$w = 1.2 CM + 0.5 CV$$

Amarres Internos :

$$T_i = 3 w L_1$$

Amarres Perimetrales :

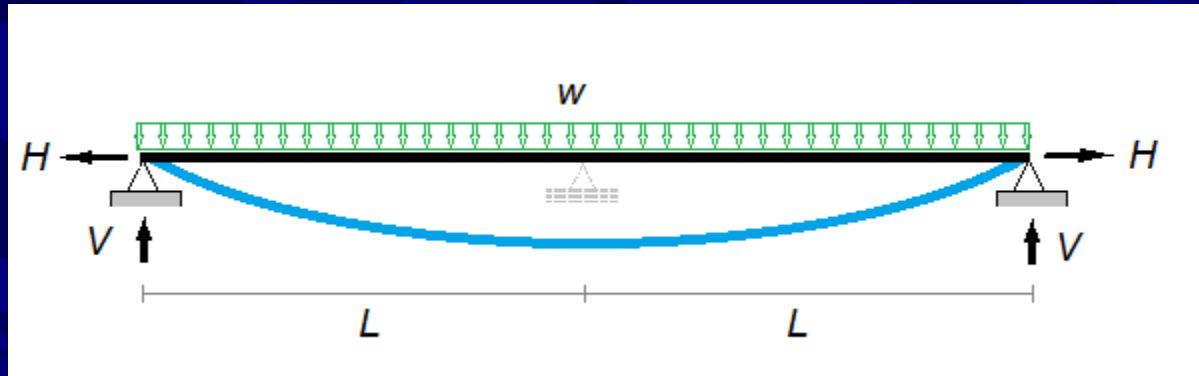
$$T_i = 6 w L_1 L_p$$

$$L_p = 1.0 m$$

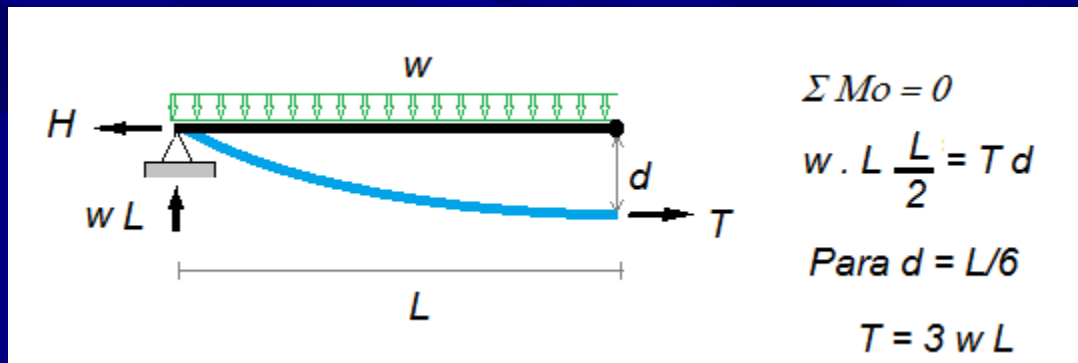
El **Amarre Vertical** debe tener una resistencia de diseño a la tensión igual a la máxima carga vertical que recibe una columna o muro de cualquier piso, usando el área tributaria y la carga de piso w

(No es la fuerza interna axial máxima sino la carga externa aplicada a la columna)

Fuerza Requerida en Amarres Internos



Forma Catenaria Asumida



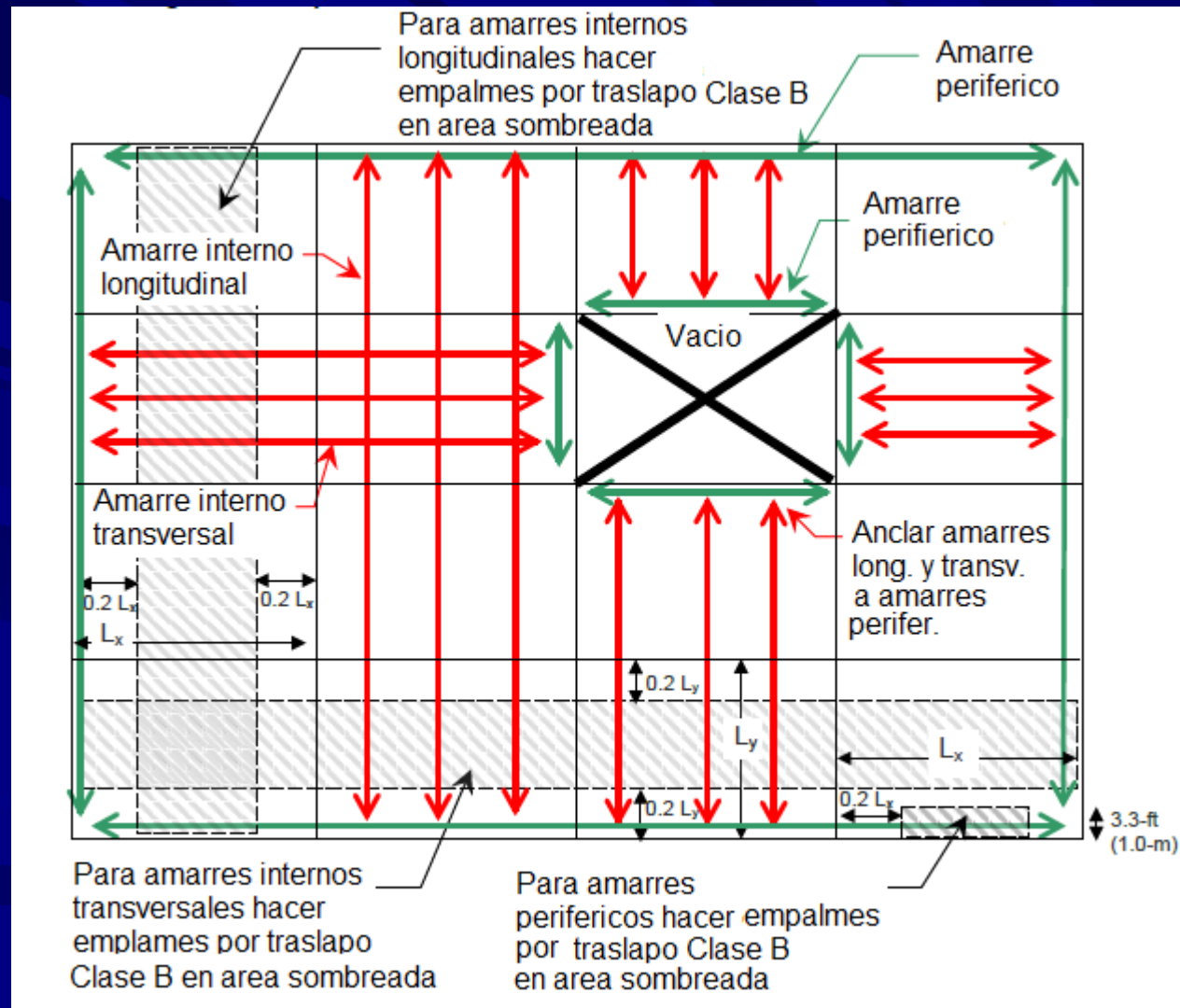
$$\begin{aligned}\sum M_o &= 0 \\ w \cdot L \cdot \frac{L}{2} &= T d \\ \text{Para } d &= L/6 \\ T &= 3 w L\end{aligned}$$

Asumiendo deflexión
maxima $d = L/6$ se
obtiene **$T = 3 w L$**

Area de acero requerida : $A_s = T b / (\phi 1.25 f_y)$

La fuerza de amarre es proveida por el mismo refuerzo a flexión en las losas / vigas. Típicamente se requiere poco o ningún refuerzo adicional. Solo anclar el refuerzo al amarre perimetral con ganchos sísmicos. En las viguetas refuerzo negativo (y positivo) se deben hacer continuos. Empalmes calculados con $1.25 F_y$

Localización de Empalmes e Interrupciones en Amarres

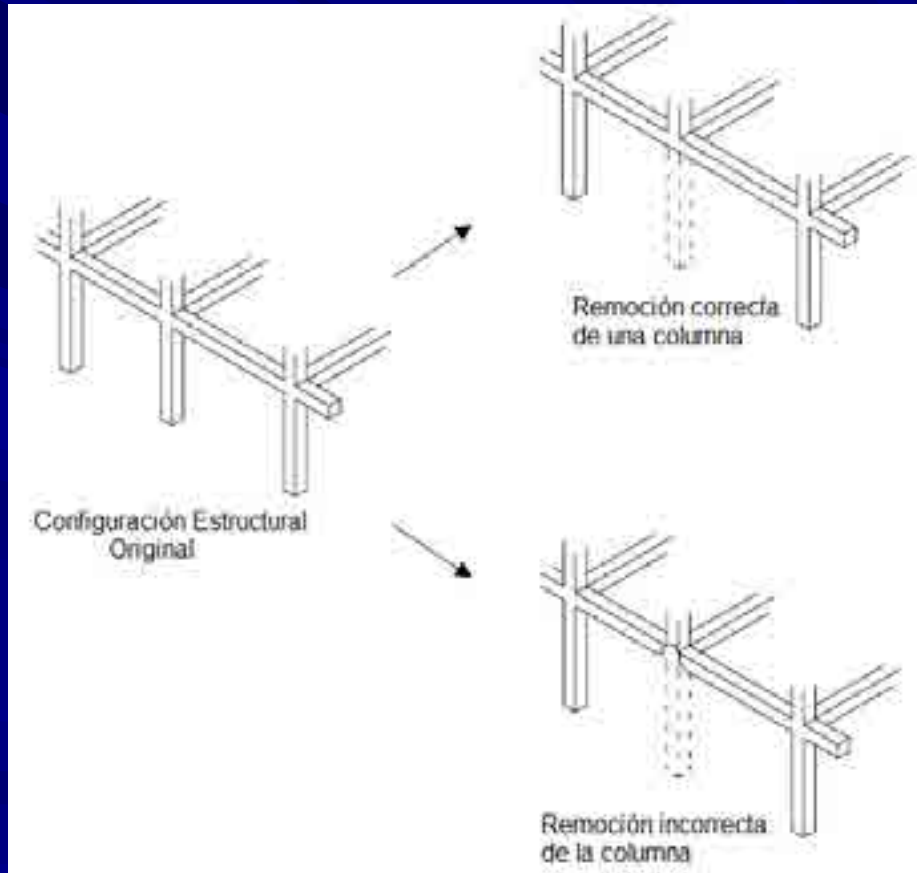


Método de la Trayectoria de Carga Alterna

Remoción de Elementos

Se asume continuidad viga-a-viga sobre la columna removida

Para muros, se remueve una longitud igual a dos veces la altura libre H del piso.
Para muros esquineros se mueve una longitud de muro igual a la altura libre del piso en cada dirección



Trayectoria de Carga Altern

Localización de remoción de columnas

- Centro lado corto
- Centro lado largo
- Esquina
- Cambio significativo en sistema estructural

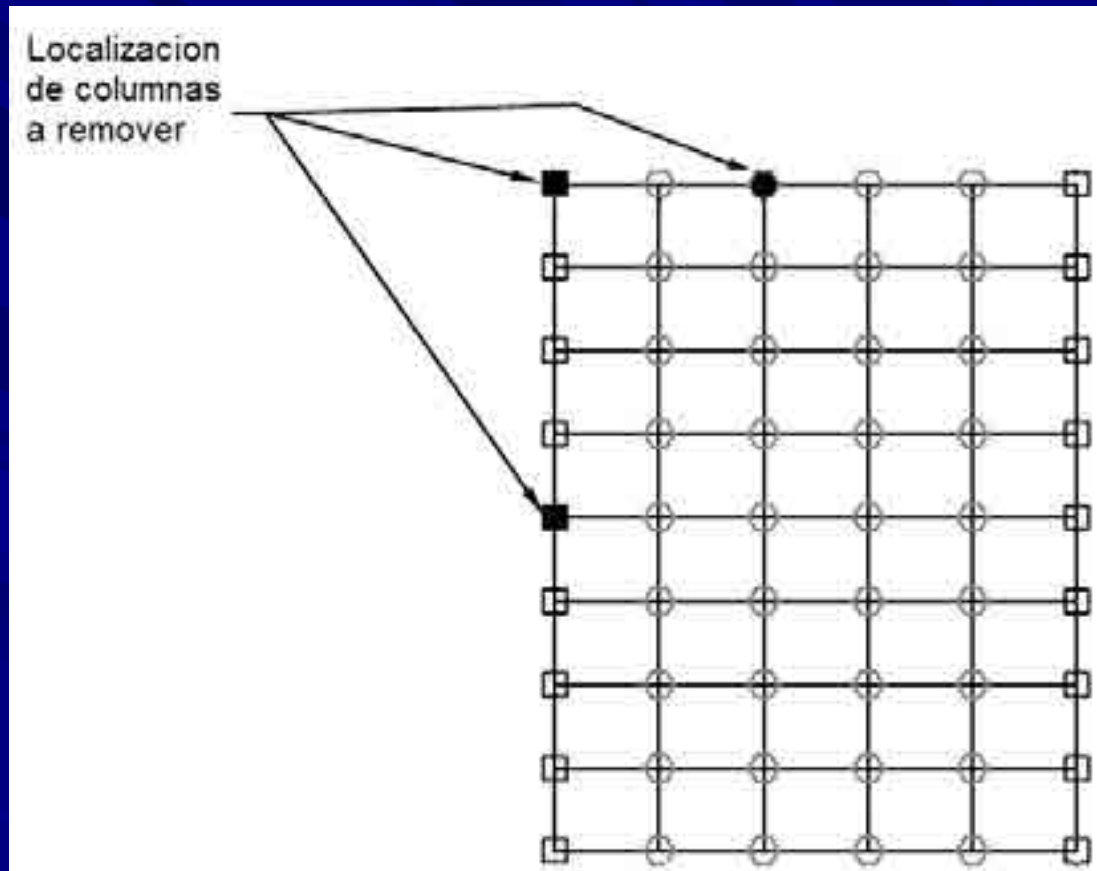
Niveles

- Nivel de calle
- Nivel inferior al techo
- Nivel a media altura

Edif. del D de D : TODOS

Sótanos Parqueaderos

- Columnas interiores (2do pórtico)
- Columna central

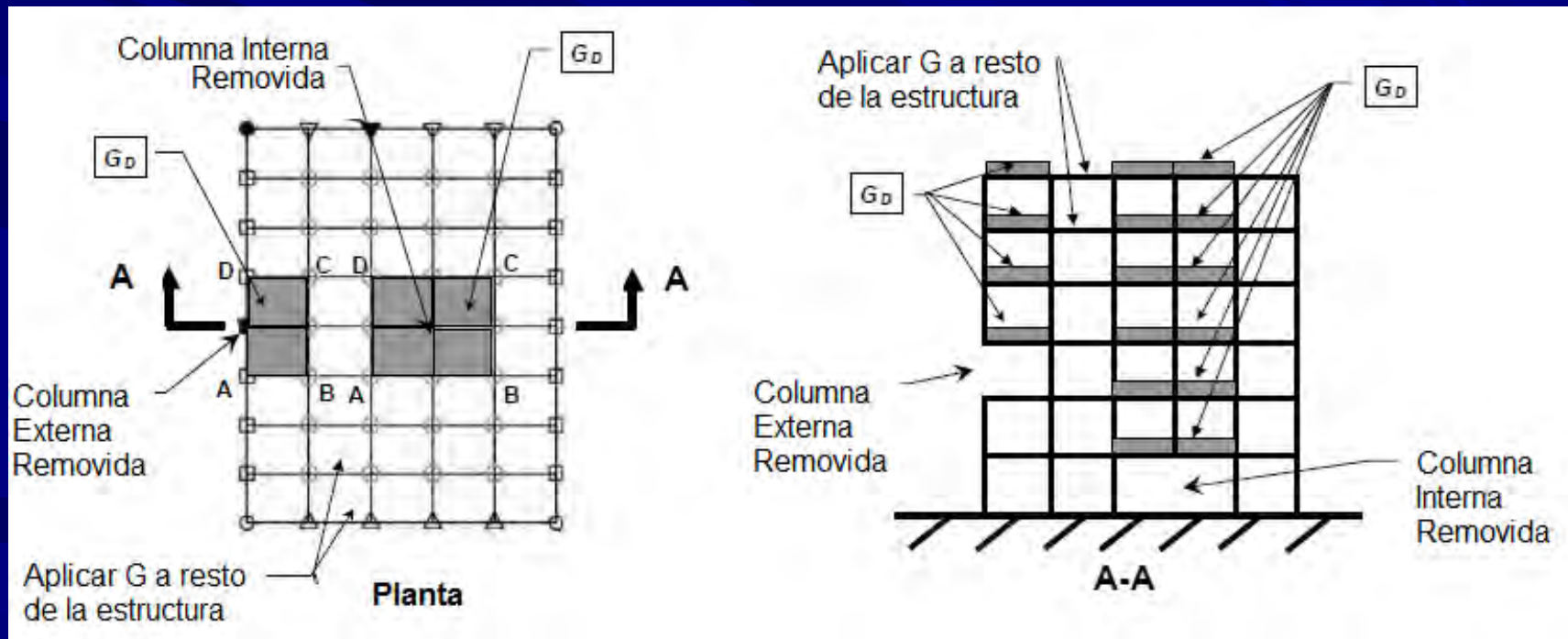


- Elementos se deben remover uno a la vez.
- Para cada caso se realiza un análisis independiente

Trayectoria de Carga Alterna – Análisis Lineal

Condición de carga (GSA):

- $G_D = 2 (CM + 0.25 CV)$ para áreas aferentes al elemento removido, en todos los niveles sobre el elemento. 2 es un factor de amplificación dinámica
- $G = CM + 0.25 CV$ para el resto de la estructura



Nota: Elementos se remueven uno a la vez. Para cada caso un análisis independiente. Se muestran cargas para dos casos

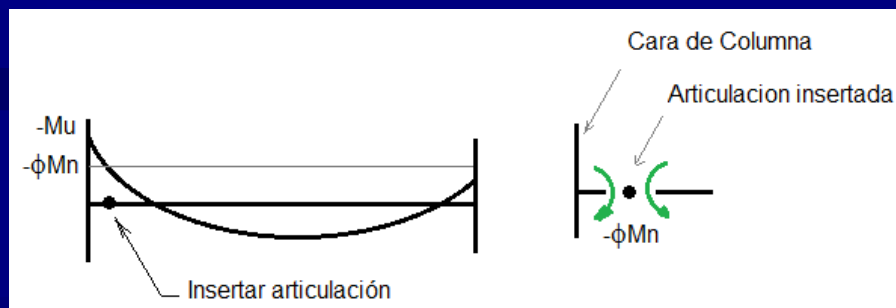
Trayectoria de Carga Alterna – Análisis Lineal

- Propiedades: Concreto $f'_c^* = 1.25 f'_c$ Factor reducción resistencia , $\phi = 1.0$
 Refuerzo $f_y^* = 1.25 f_y$
- RDC = Relación demanda capacidad = Q_u / Q_r
 Donde:
 Q_u = Demanda (Momento, fuerza axial, corte) obtenida del análisis lineal
 Q_r = Capacidad 'ultima' (f'_c^* , f_y^* , ϕ) calculada para refuerzo propuesto
- Relaciones RDC aceptables: $RDC \leq 1$ (En GSA se acepta hasta $RDC = 2$)

Procedimiento :

Flexión

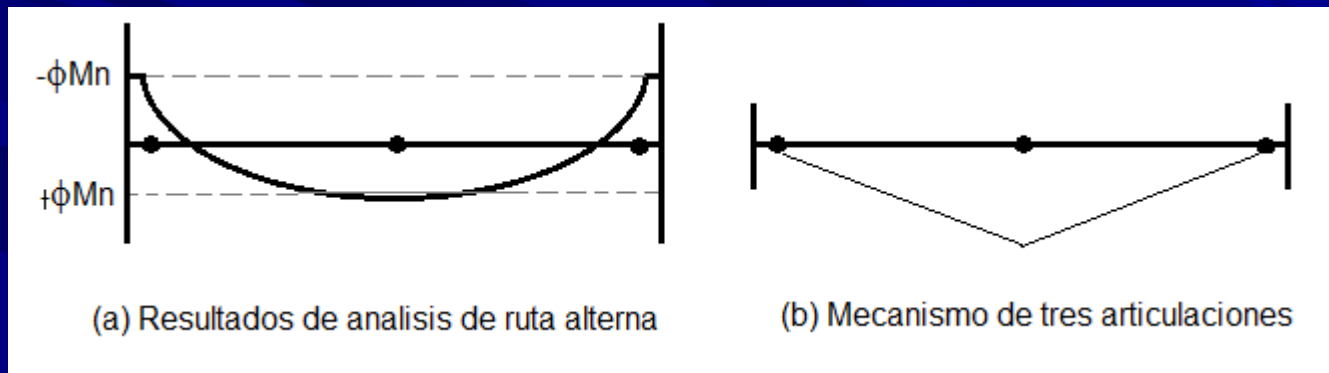
- Si para alguna viga $RDC > 1$ ($M_u > \phi M_n$) insertar articulación, adicionar momentos ϕM_n y repetir el análisis



Trayectoria de Carga Alternativa – Análisis Lineal

Flexión (Cont) :

- Se pueden adicionar articulaciones a vigas para redistribuir momentos hasta que se desarrolle un mecanismo de tres articulaciones. Después de esto la viga no puede recibir carga adicional y falla. La viga debe ser removida del modelo. Las cargas de la viga se deben aplicar al piso debajo de esta. Se debe repetir el análisis.



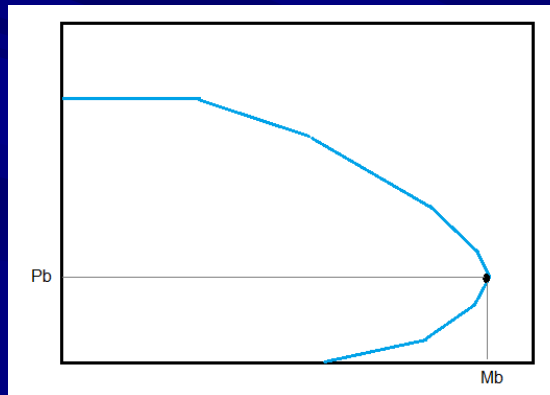
Corte :

- Si para algún elemento $V_u > \phi V_n$ en cualquier punto a lo largo de este, se considera que el elemento fallo y se debe remover del modelo. Las cargas del elemento se aplican al piso directamente bajo. Se debe repetir el análisis.

Trayectoria de Carga Alternativa – Análisis Lineal

Flexión y Carga Axial :

- Cuando la combinación de carga axial y momento en una columna excede la resistencia de diseño, la carga axial se debe comparar con la carga axial para falla balanceada P_b . Si la carga axial es menor que P_b una articulación plástica equivalente se inserta en el modelo, tal como se hace en vigas. En caso contrario, la columna se debe remover del modelo y aplicar las cargas asociadas al elemento al piso directamente bajo este. Luego se debe repetir el análisis.



Deformación :

- Si el límite de deformación de un elemento es excedido se considera que fallo
- Vigas normales ($L/h > 5$): Max. rotación 20 grados
- Vigas profundas ($L/h < 5$): Max rotación 12 grados
- Columnas y muros: Maximo acortamiento axial = 3 acortamiento elástico.

Ejemplo – Remoción Columna

Elementos

Columnas: 0.7 m x 0.7 m

Vigas: 0.5 m x 0.6 m

Muros: 0.25 m

Losa: 0.15 m

Cargas G

DL si = 300 K/m²

LL = 200 K/m²

* $G_d = 2 G$

Materiales

$f'_c = 245 \text{ K/cm}^2$

$f_y = 4200 \text{ K/cm}$

Sismo

$A_a = 0.15$

$A_v = 0.2$

$I = 1$

$S = D$ (~Piedemonte A)

$R = 5$

DMO

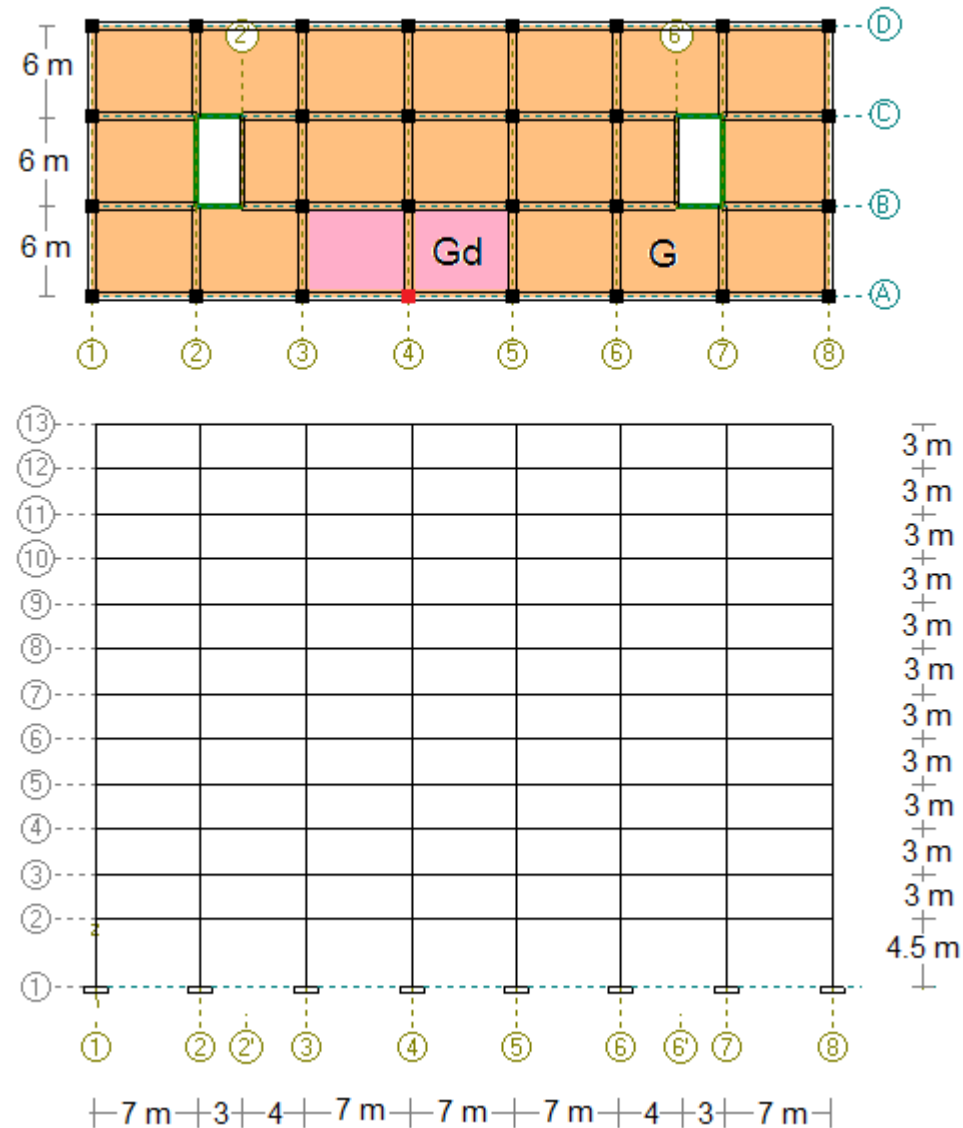


Diagrama Momentos - Columna Removida

Resistencia para
Colapso Progresivo

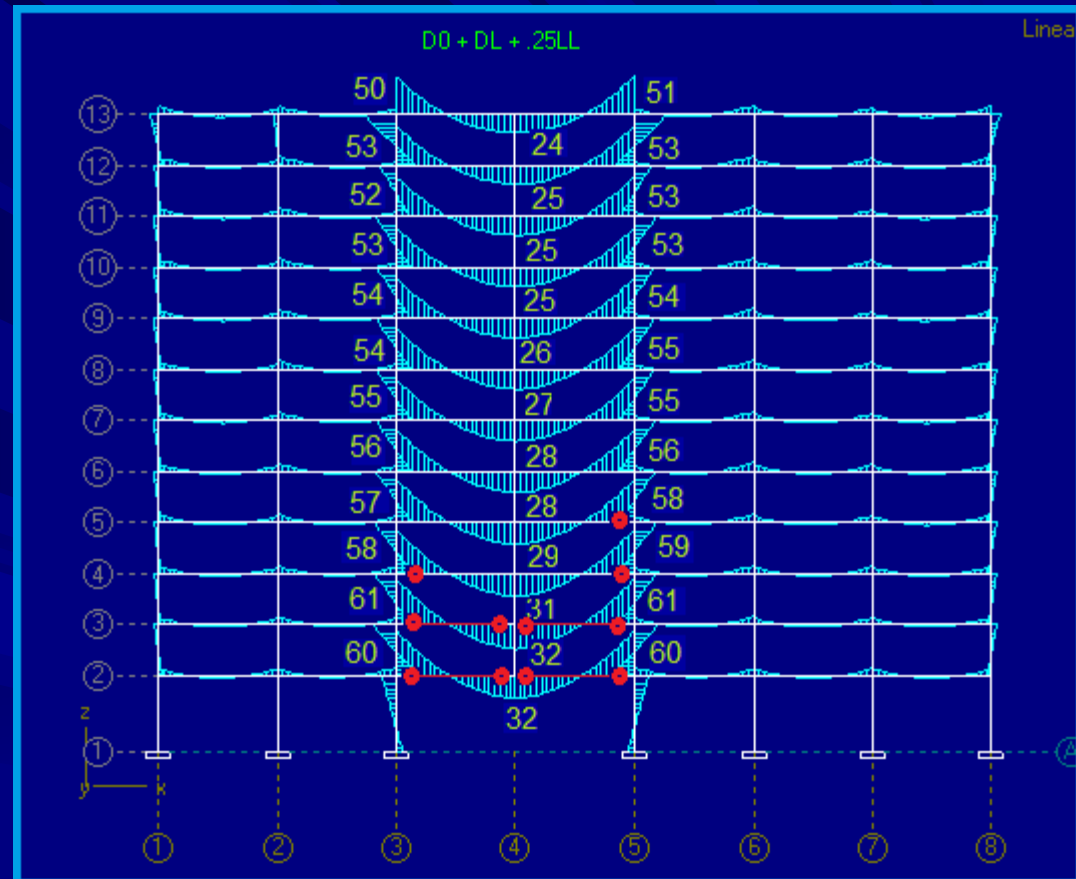
$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c}$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$f'_c = 1.25 \times 245 = 306 \text{ K/cm}^2$$

$$f_y = 1.25 \times 4200 = 5250 \text{ K/cm}^2$$

$$\phi = 1.0$$



Iteración No. 1

$A_s \text{ (cm}^2\text{)}$	$a \text{ (cm)}$	$\phi M_n \text{ (t-m)}$
- 21.8	8.8	- 57
+ 11.6	4.7	+ 32

Diseño
Original:



Diagrama Cortantes – Columna Removida

Resistencia para Colapso Progresivo

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s)$$

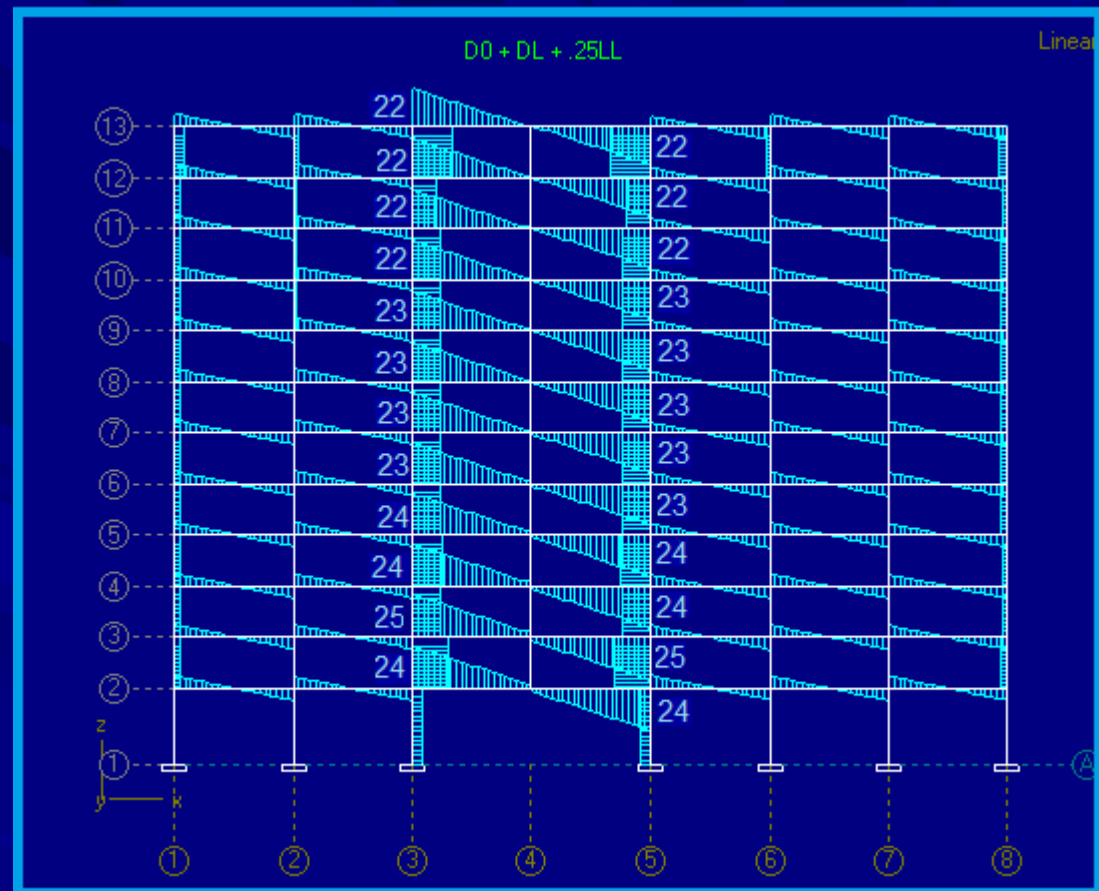
$$f'_c = 1.25 \times 245 = 306 \text{ K/cm}^2$$

$$f_y = 1.25 \times 4200 = 5250 \text{ K/cm}^2$$

$$\phi = 1.0$$

$$V_c = 25 \text{ ton}$$

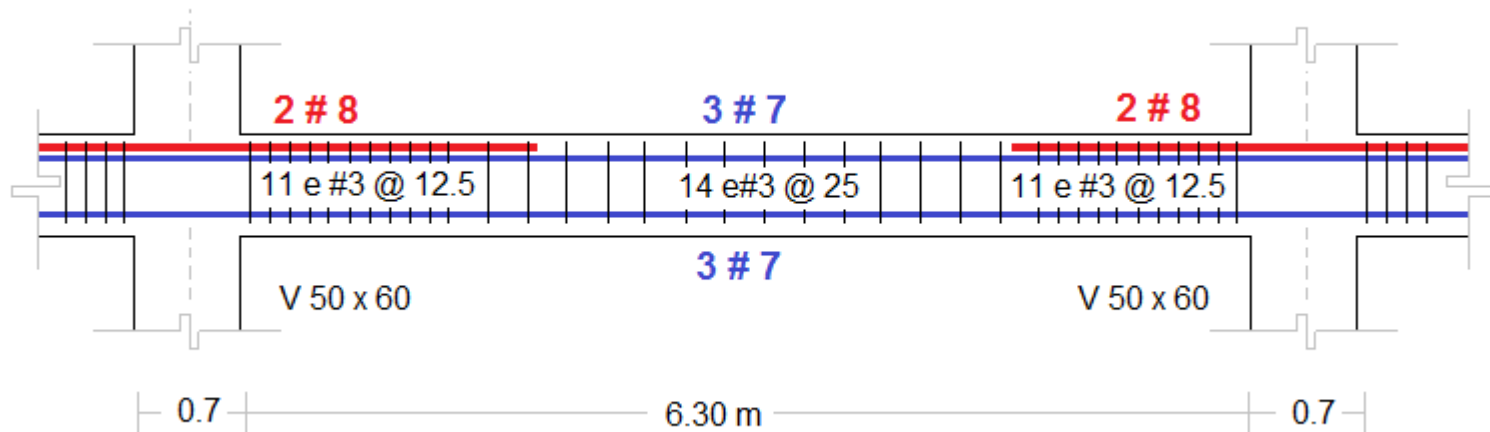
S (cm)	Vs (ton)	ϕV_n (ton)
12.5	32	57
25	16	41



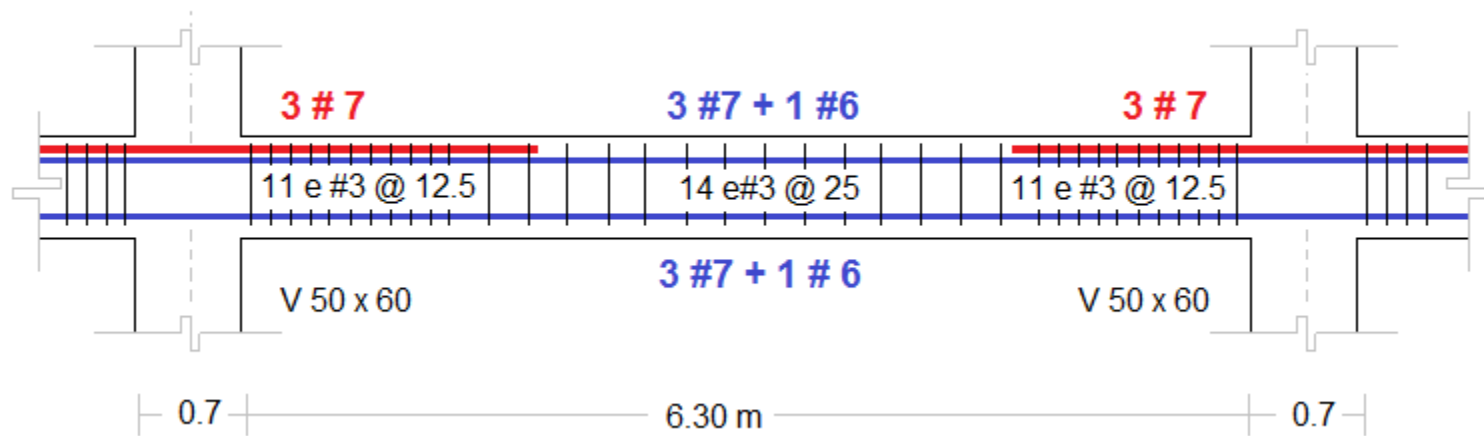
Diseño original:

11 e # 3 @ 12.5 + 14 e # 3 @ 25 + 11 e # 3 @ 12.5

Diseño Vigas Niveles 2, 3 y 4 Eje A



(a) Diseño original: f'_c , f_y , ϕ , Envolvente combinaciones de carga, DMO



(b) Resistencia a colapso: Env: (a) + Diseño CP: $1.25f'_c$, $1.25f_y$, $\phi=1$, $D+0.25L$, DMI

Resumen Análisis de Ruta de Carga Alterna

1. Crear un modelo tridimensional de la estructura
2. Remover elemento fallado
3. Aplicar las cargas G_d y G
4. Analizar la estructura incluyendo efectos P-Delta
5. Comparar Fuerzas internas con resistencia de cada elemento y verificar deformaciones
6. Si todos los elementos cumplen el análisis para la remoción de ese elemento esta completado. La estructura puede 'puentear' las cargas del elemento removido.
7. Si algún elemento no cumple criterio de resistencia (RDC) y/o deformación seguir el siguiente procedimiento:
 - 7a. Remover el elemento que falla o, insertar articulaciones con momentos constantes. Redistribuir cargas asociadas con elementos fallados.
 - 7b. Reanalizar el modelo
 - 7c. Calcular el área que falla. Comparar con límite (70 m² para columnas exteriores y 140 m² para columnas interiores)
 - 7d. Si límite de daño es excedido, rediseñar (adicionar refuerzo y/o aumentar secciones) y reanalizar la estructura comenzando con paso 1.
 - 7e. Si límite de daño es aceptable, se tiene una estructura con adecuada resistencia al colapso progresivo

Análisis Independiente – Edificio Space - Medellín



Falla Local



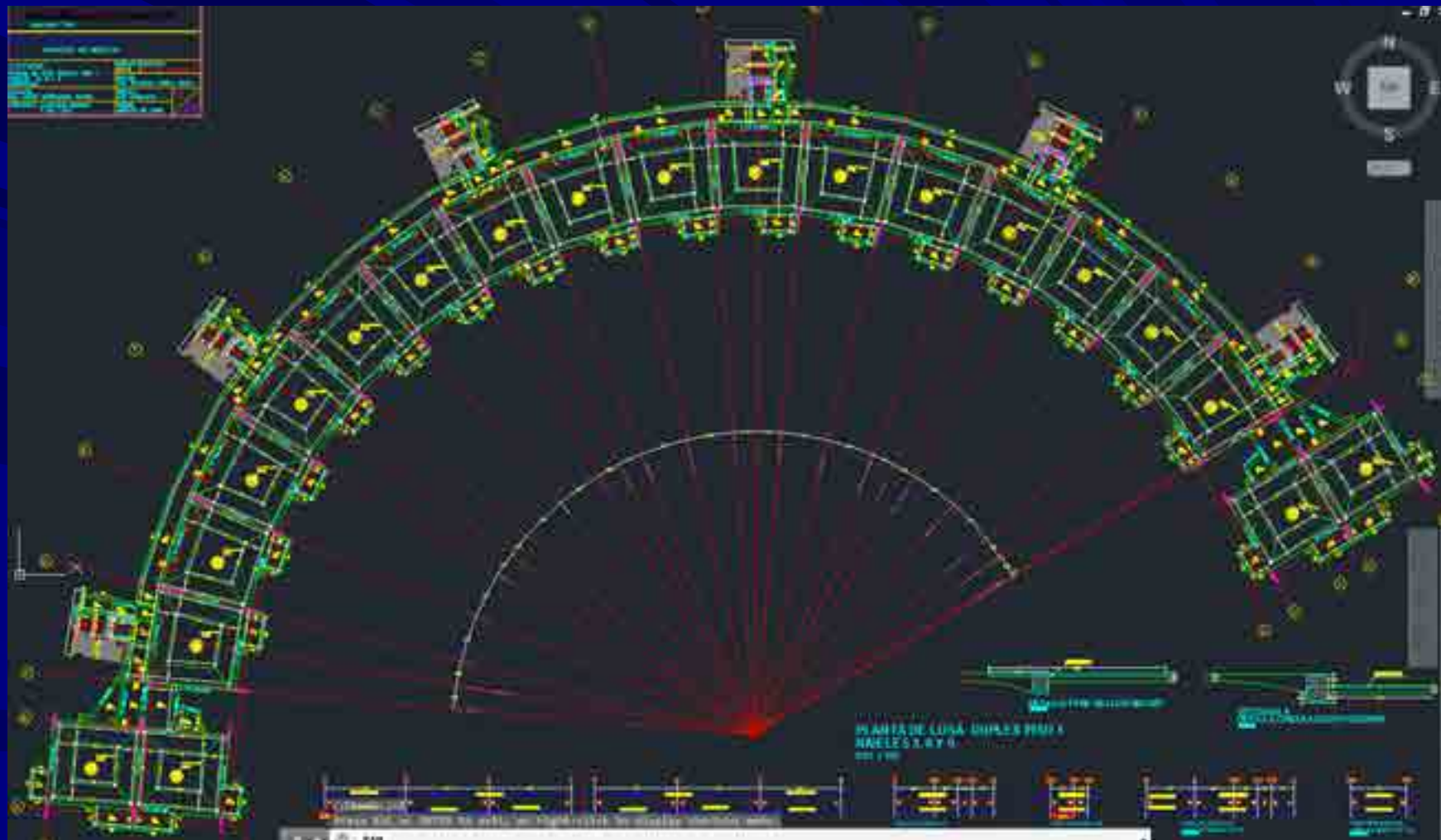
Falla Local



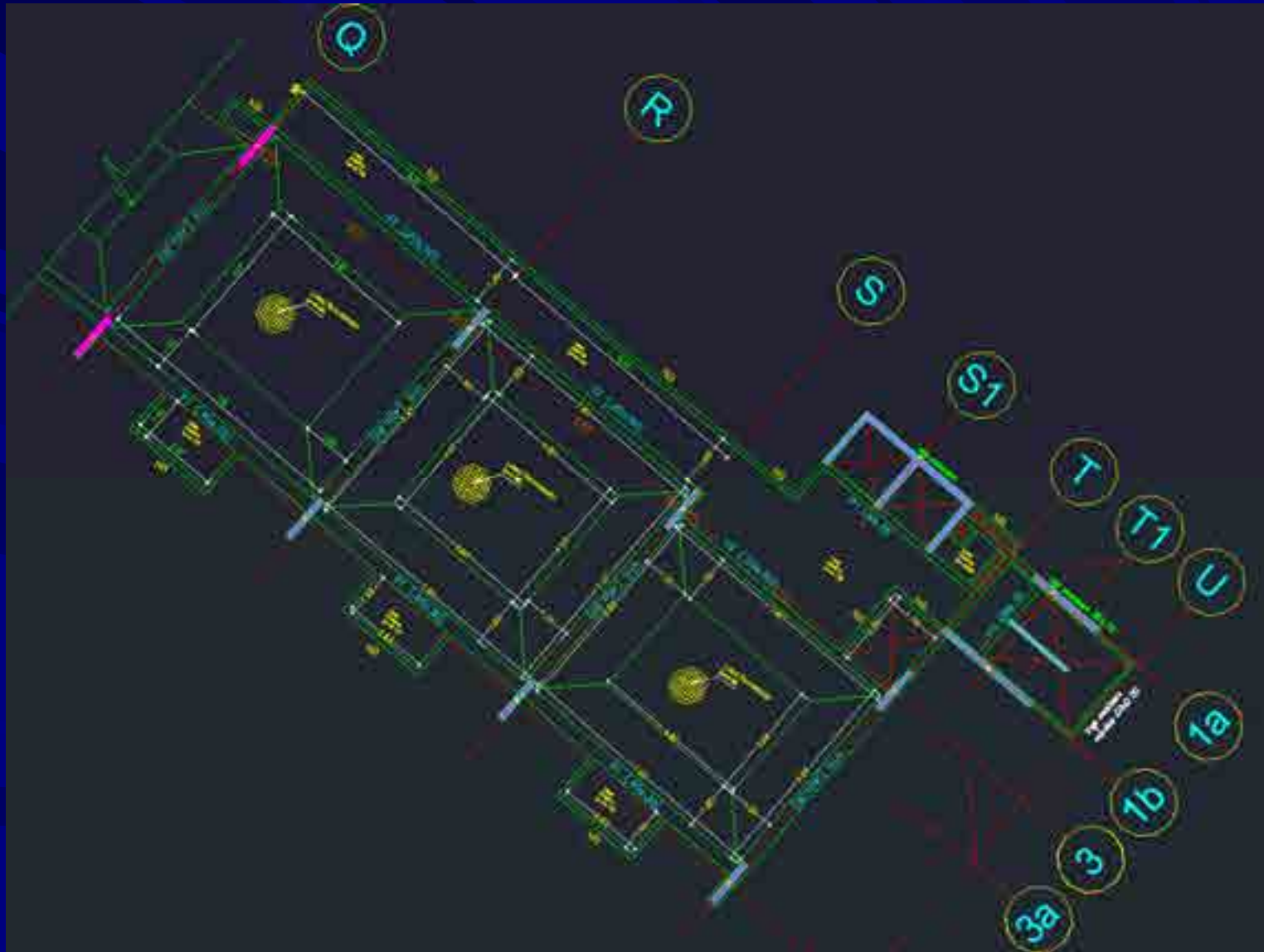
Colapso



Planta Estructural Niveles 3, 6, 9

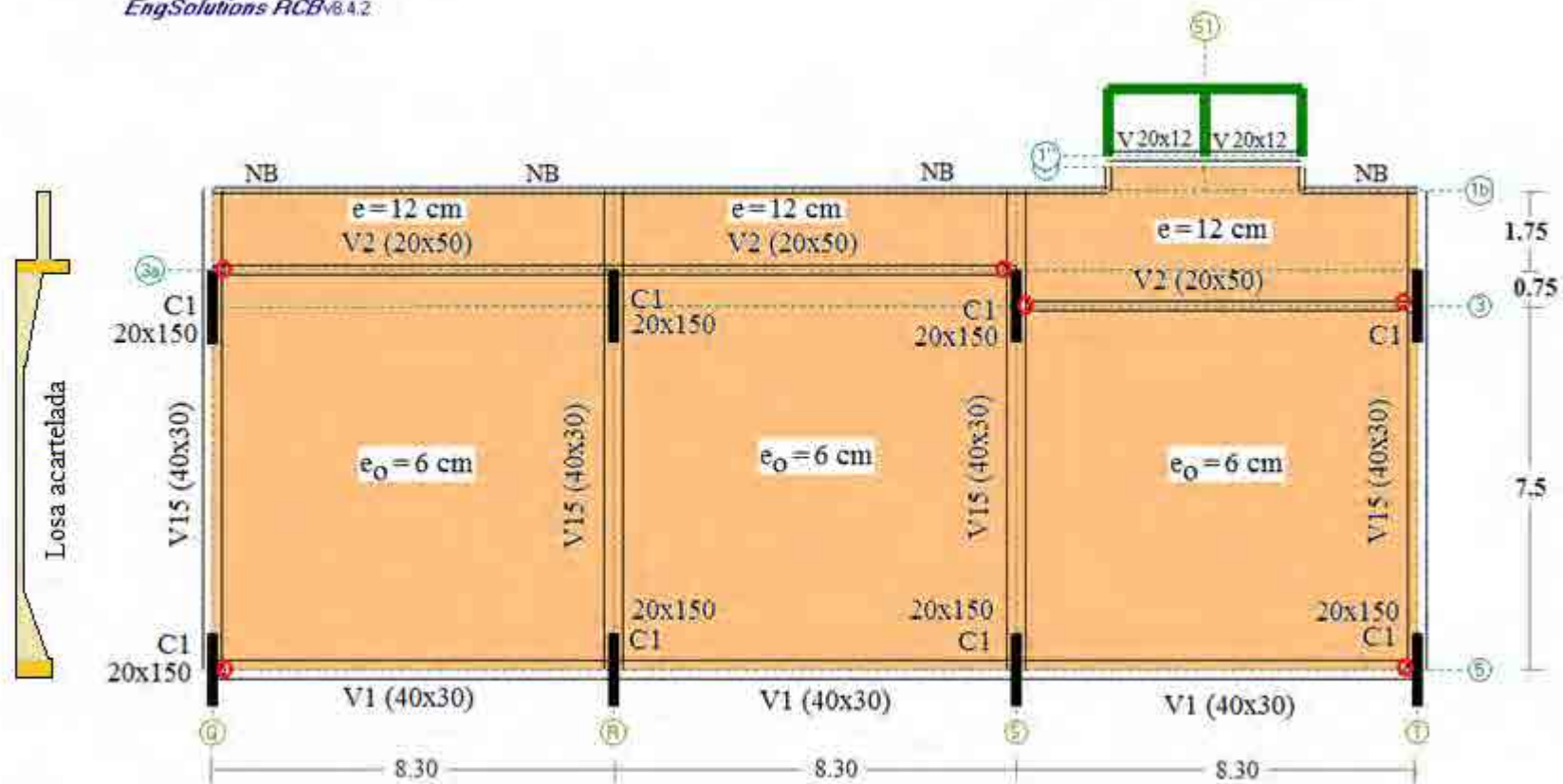


Planta Estructural Nivel 5 - Etapa 6



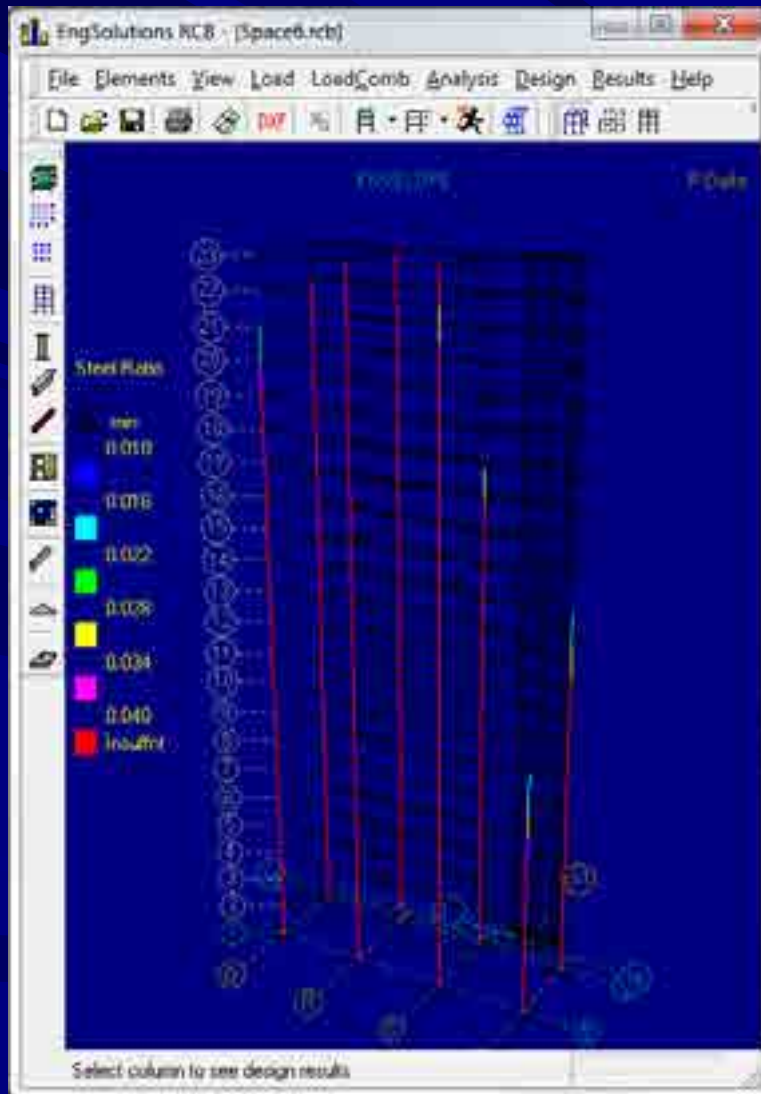
Modelo Matemático 1 – Nivel 22

EngSolutions RCB v8.4.2

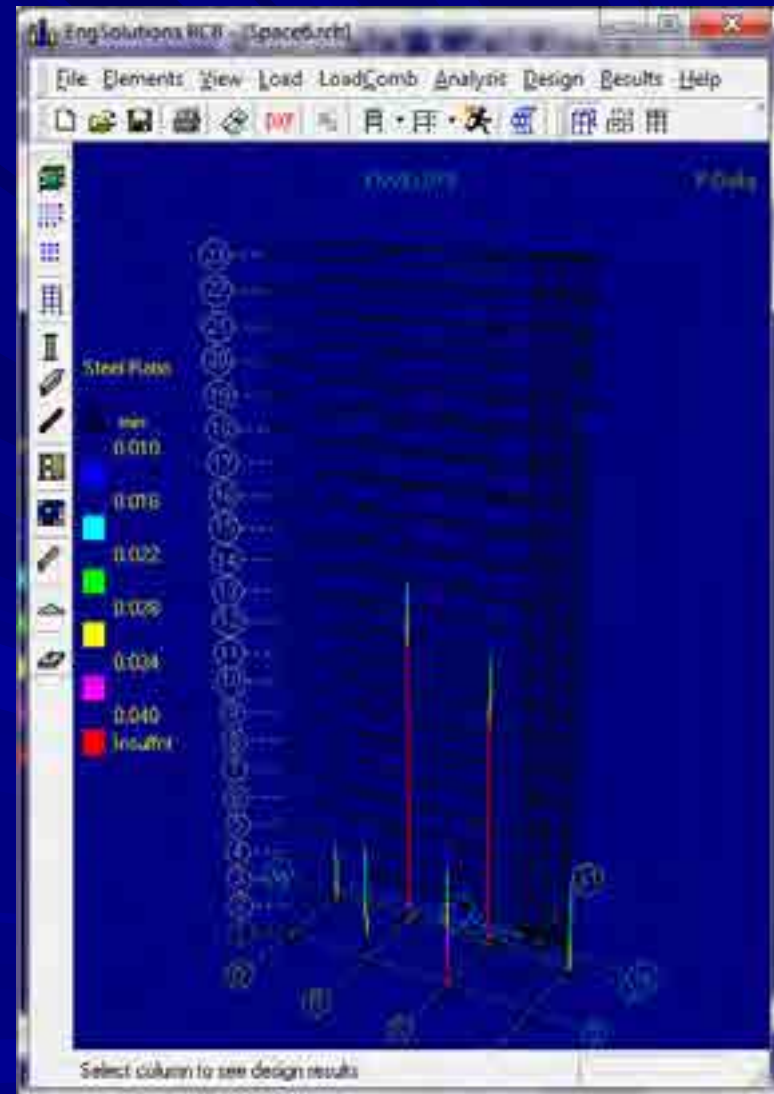


- Sistema de resistencia sísmica en X ???
- Núcleo de ascensores no integrado a la torre
- C1 no cumple dimensiones mínimas DMO. Sección de vigas (y losa) no consistentes con luces.
- Refuerzo negativo de vigas longitudinales (Ejes 3ª, 3 y 5) no puede ser debidamente anclado en columna de 20 cm. Refuerzo (eje 3) no continuo. Por tanto, vigas articuladas.

Diseño Columnas

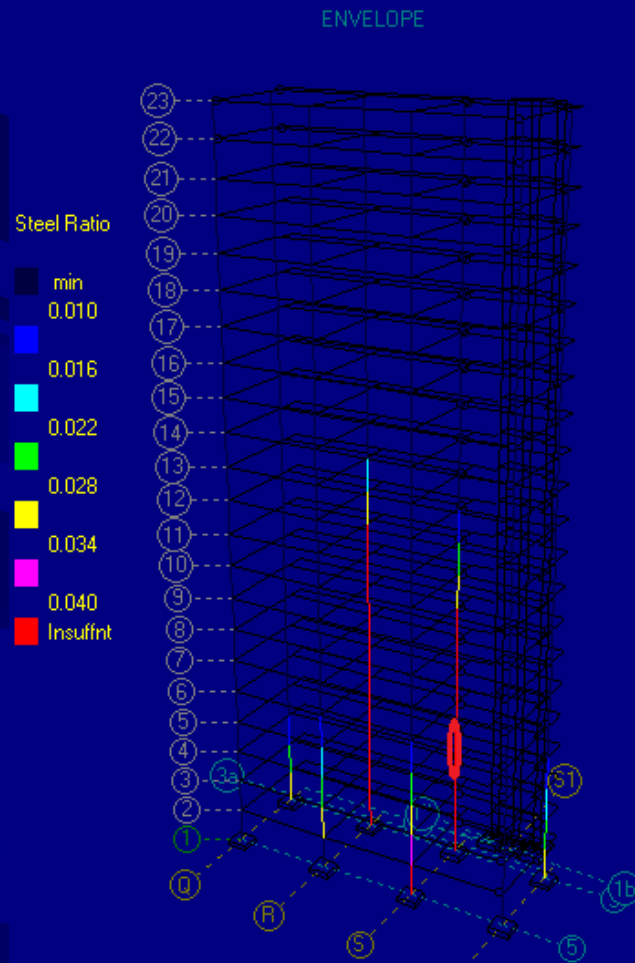


(a) Diseño para las combinaciones de carga reales de diseño NSR-10 (DMO)

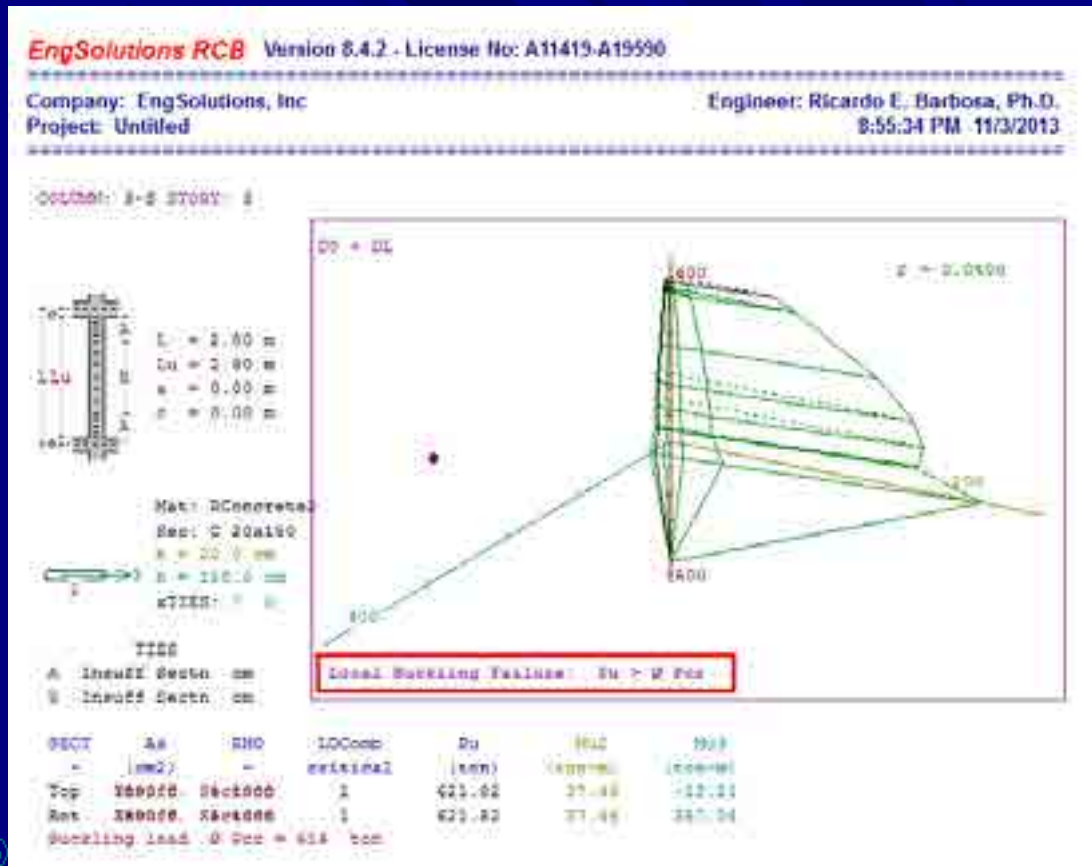


(b) Diseño para gravedad solamente (DMI) con cargas de servicio

Falla Columnas Inferiores Eje 3

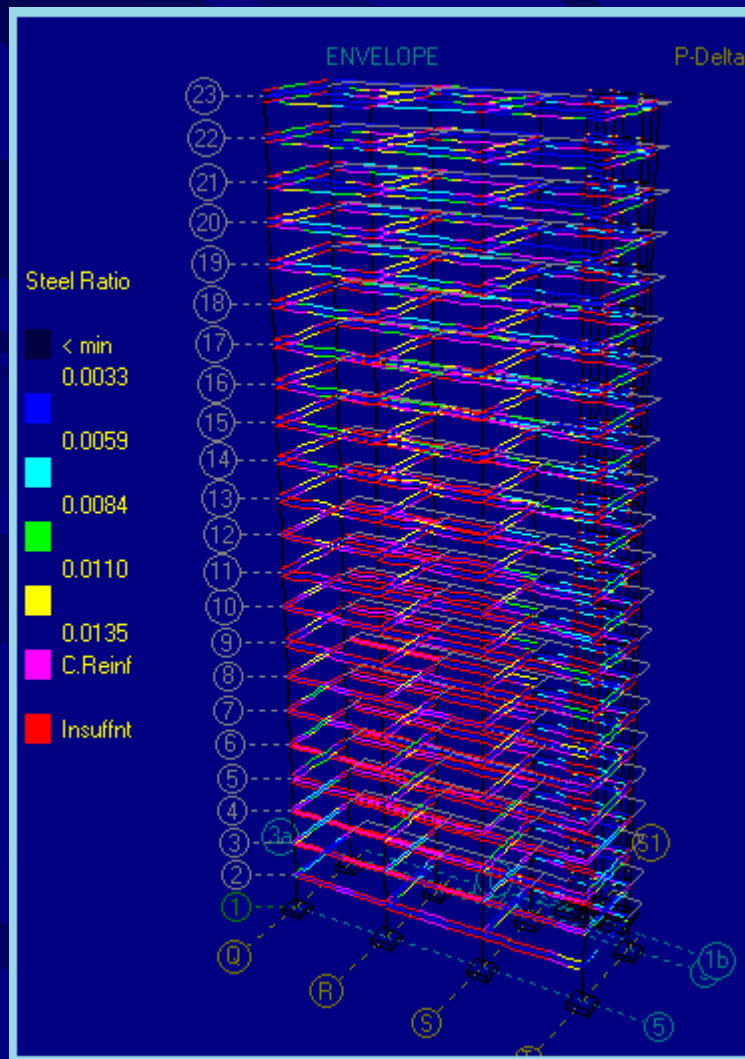


P-Delta

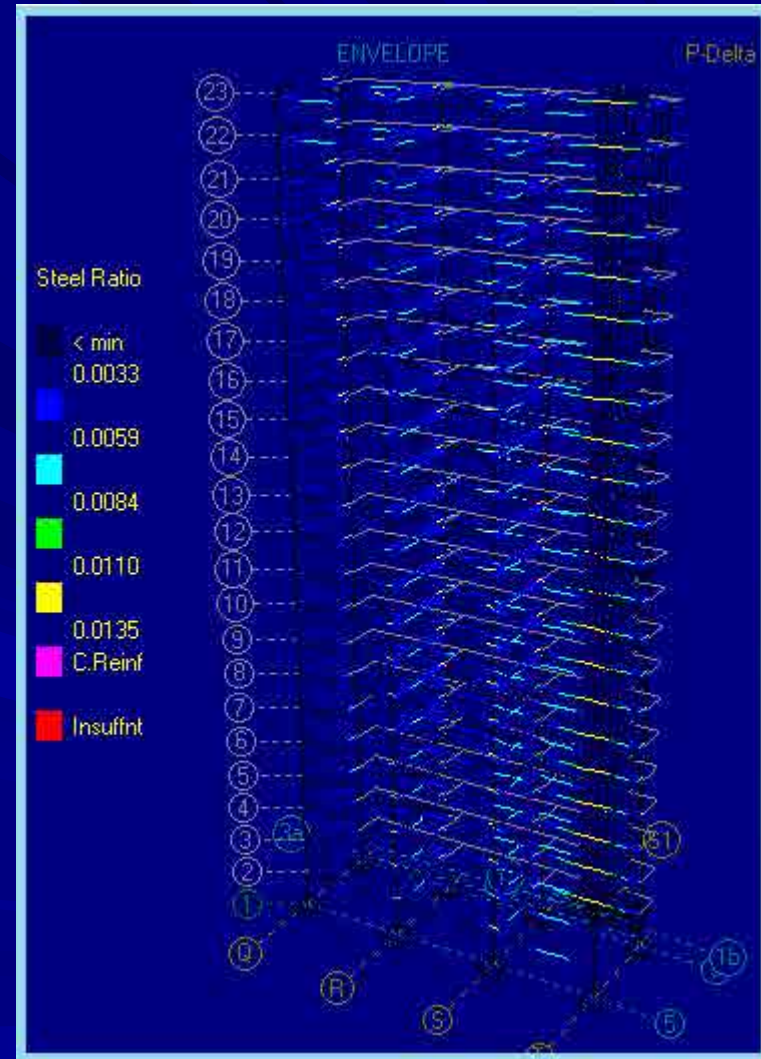


En el diseño para gravedad solamente, las columnas inferiores del eje 3 (incluyendo la que inicio el colapso progresivo) fallan por **Pandeo Local**

Diseño Vigas

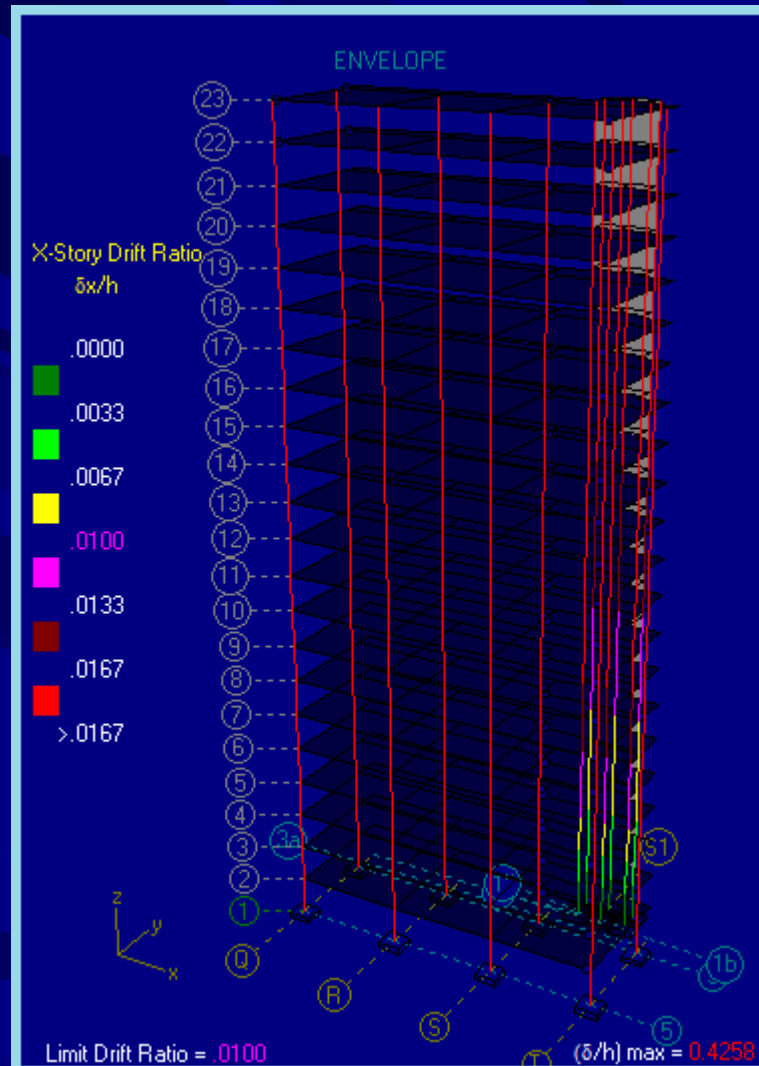


(a) Diseño para las combinaciones de carga reales de diseño NSR-10 (DMO)

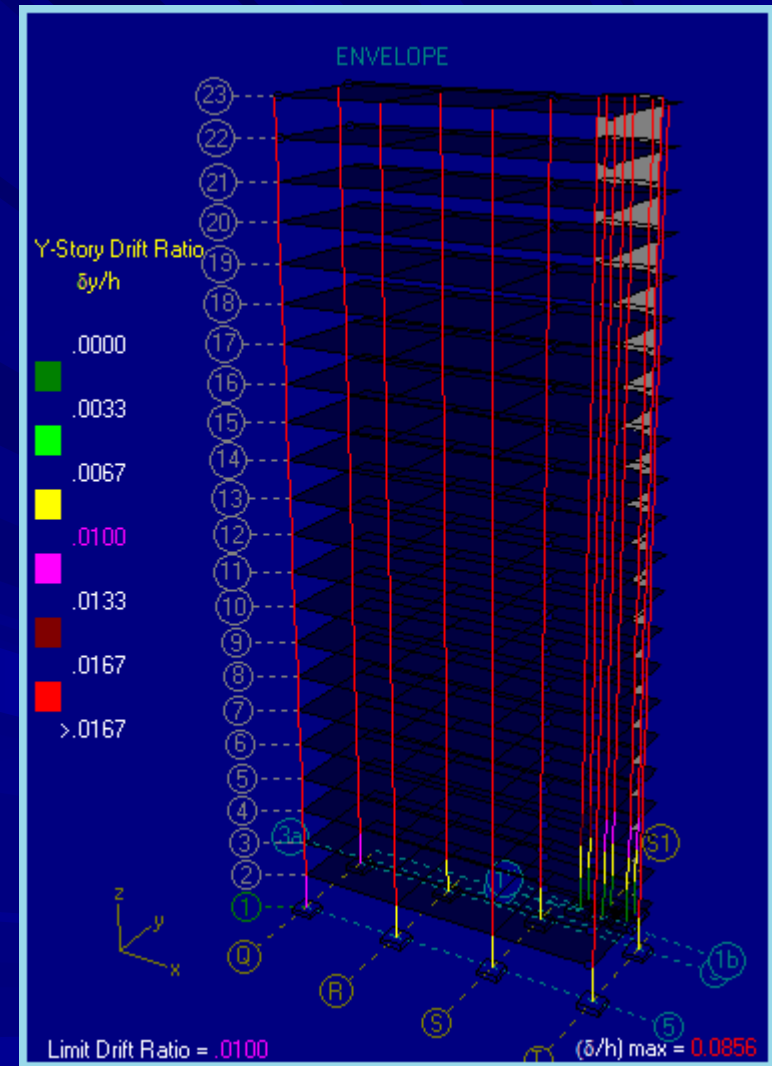


(b) Diseño para gravedad solamente (DMI) con cargas de servicio

Revisión de Derivas



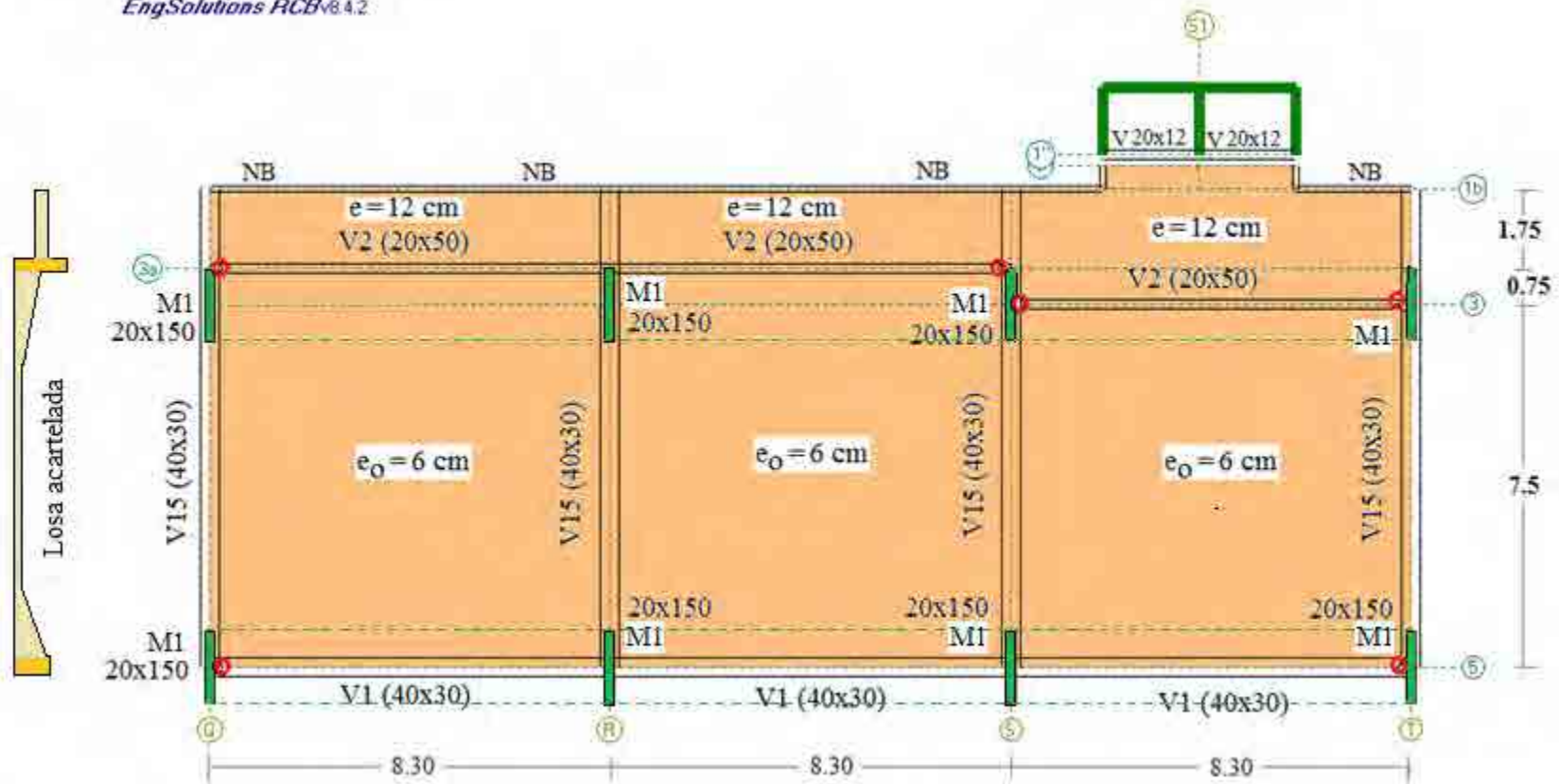
(a) Derivas Dirección X (δ/h max = 42%)



(b) Derivas Dirección Y (δ/h max = 8.6%)

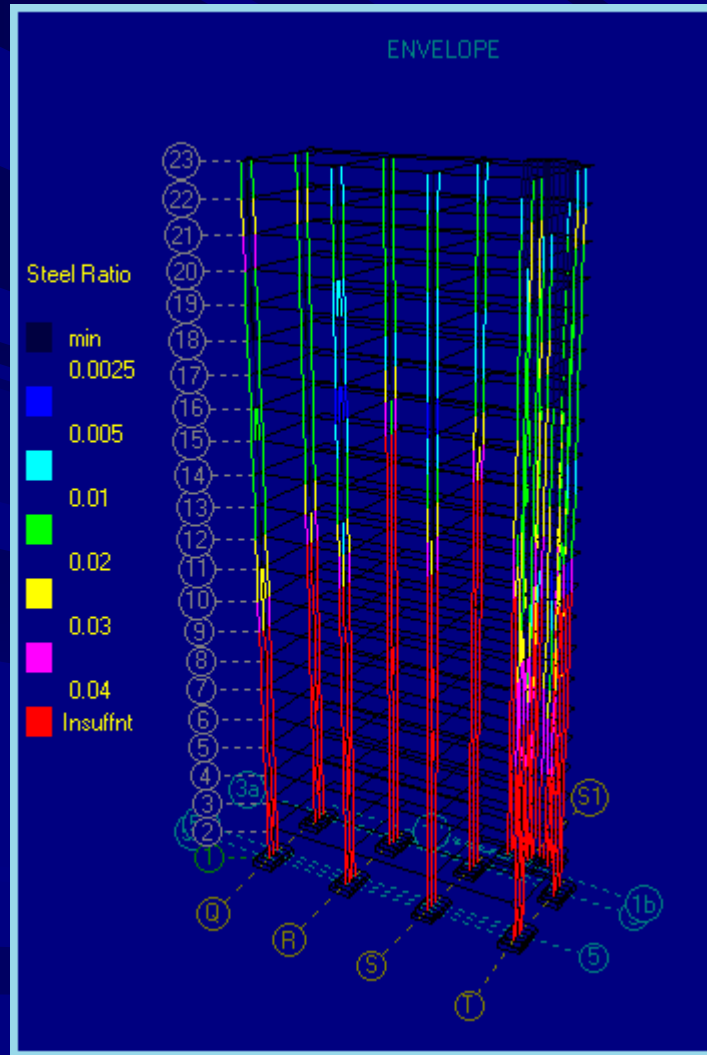
Modelo Matemático 2

EngSolutions RCB v8.4.2

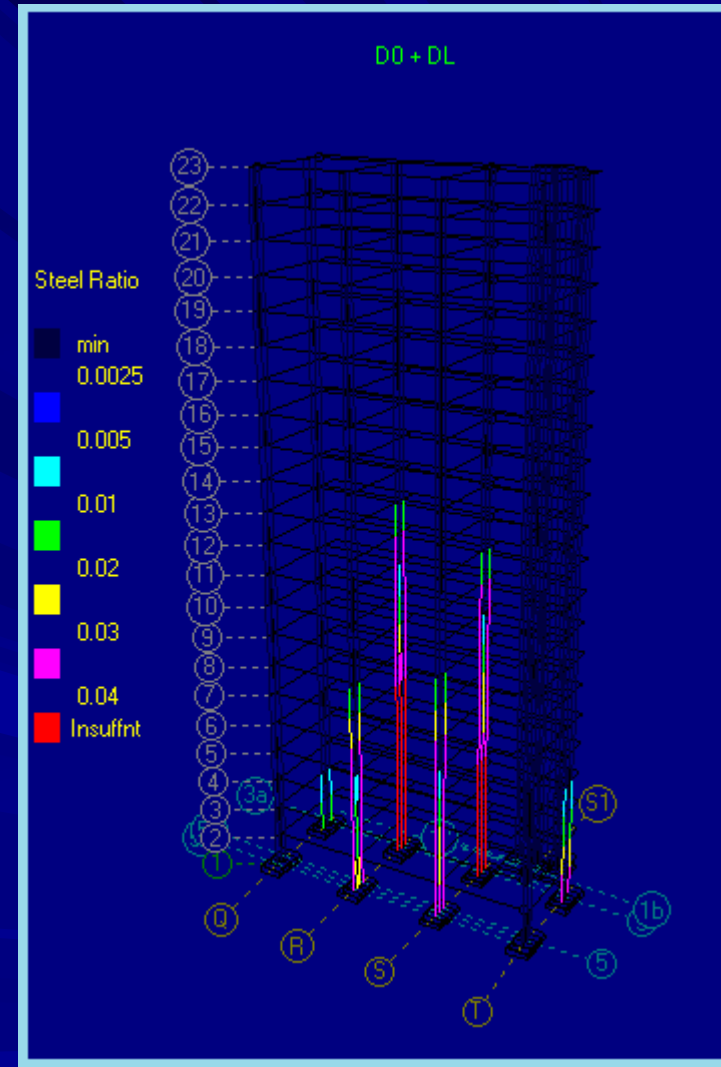


Elementos verticales (columnas) modelados como muros de corte

Diseño Muros

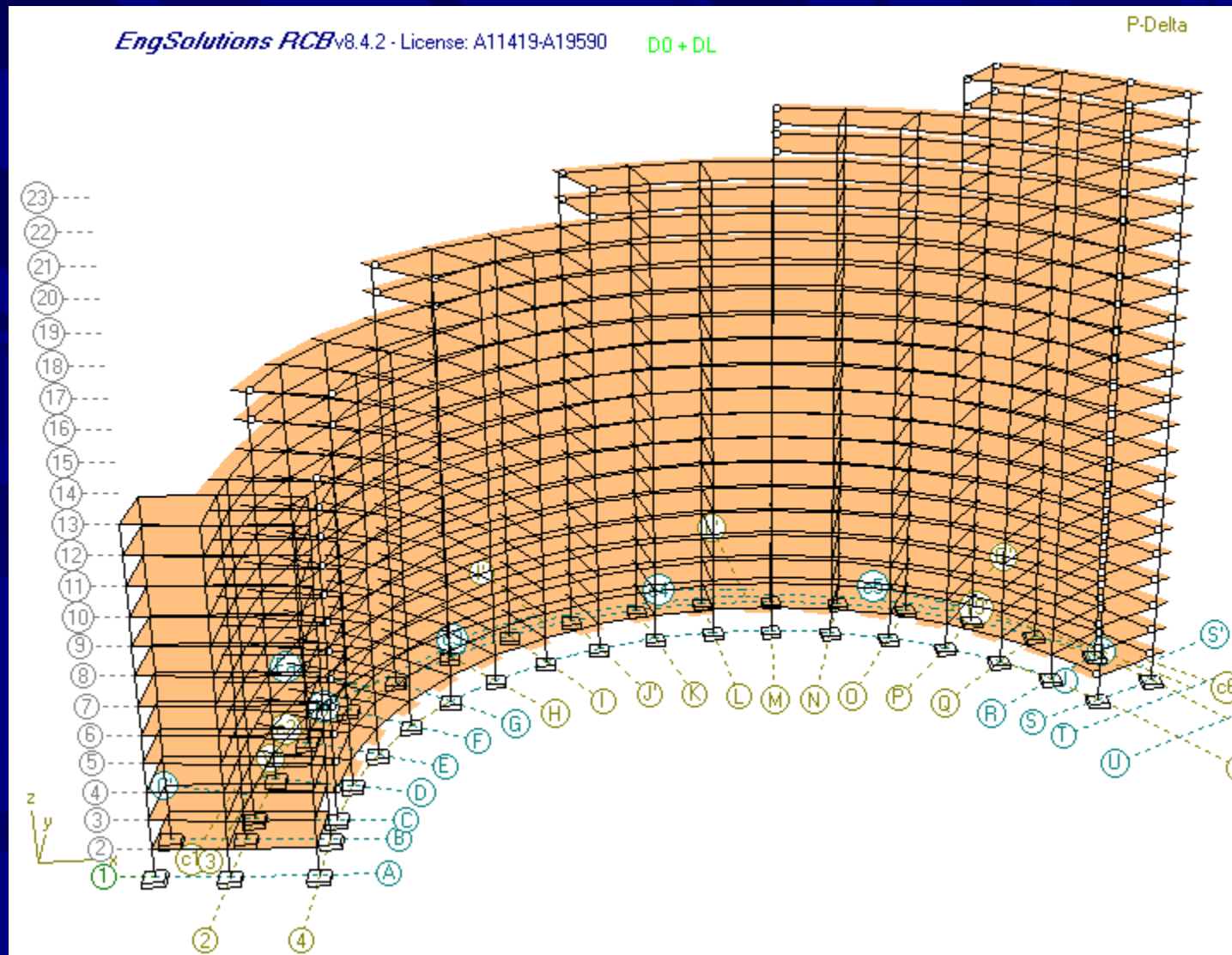


(a) Diseño para las combinaciones de carga reales de diseño NSR-10 (DMO)

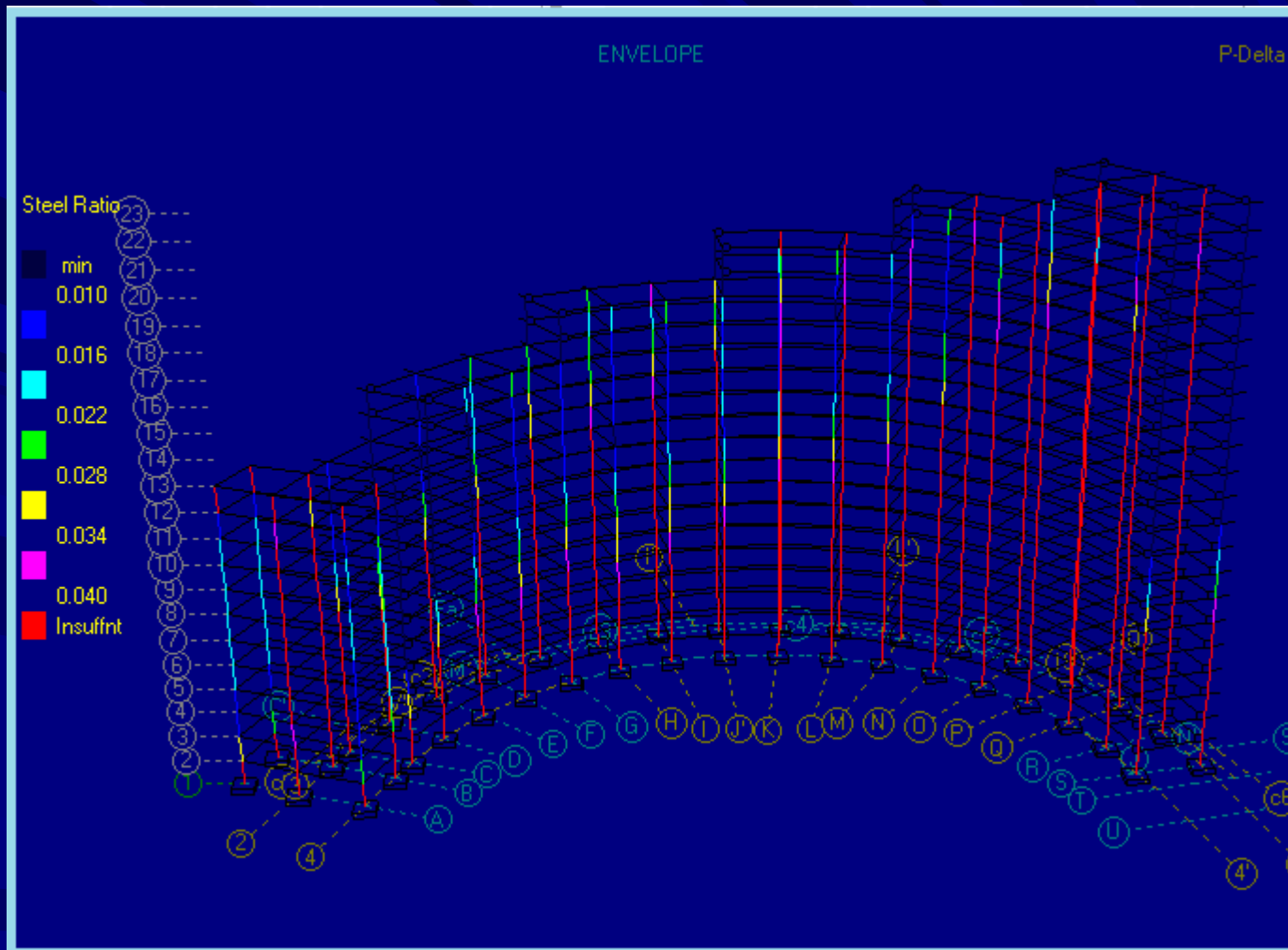


(b) Diseño para gravedad solamente (DMI) para cargas de servicio

Modelo Matemático 3

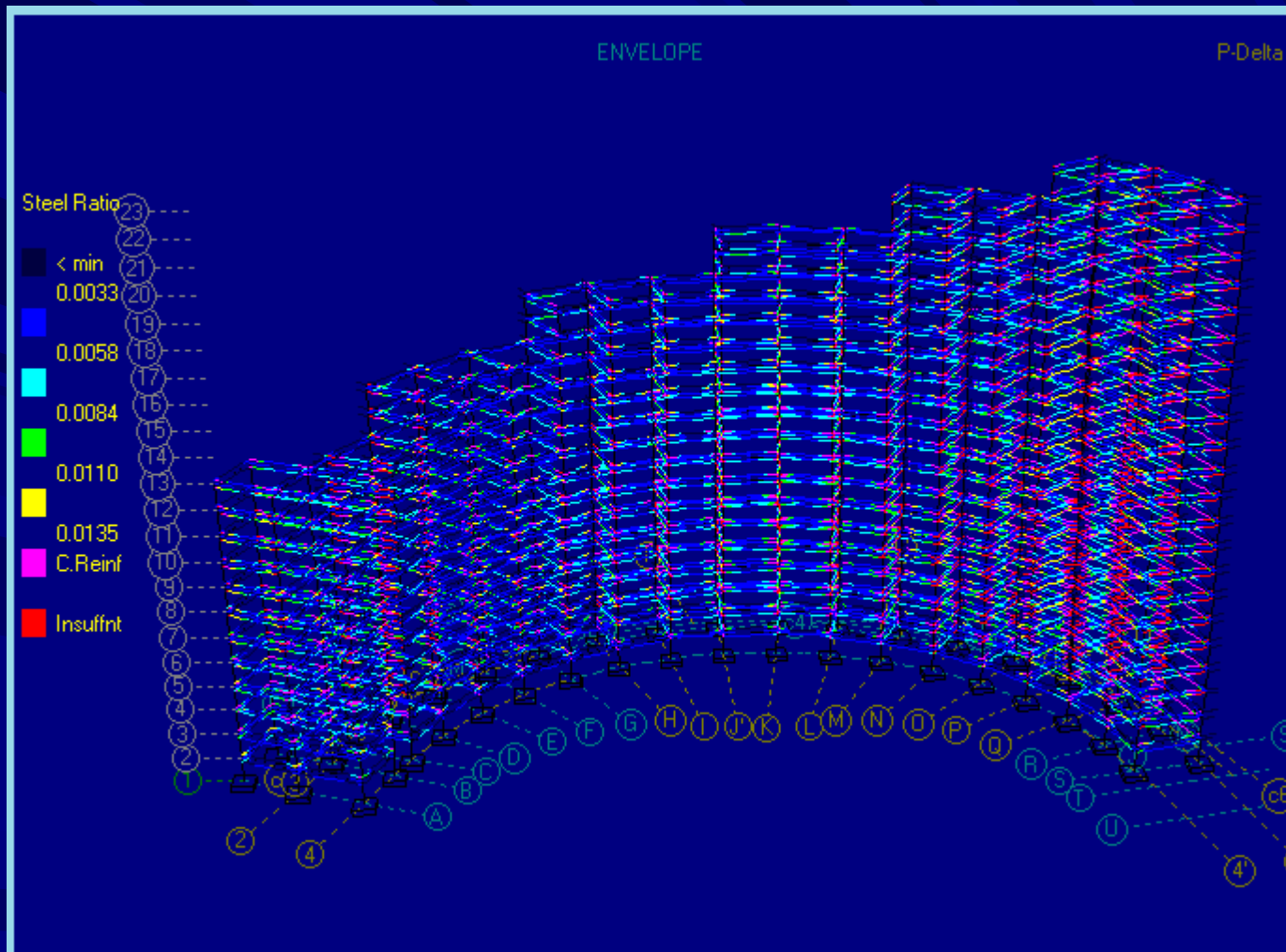


Diseño Columnas



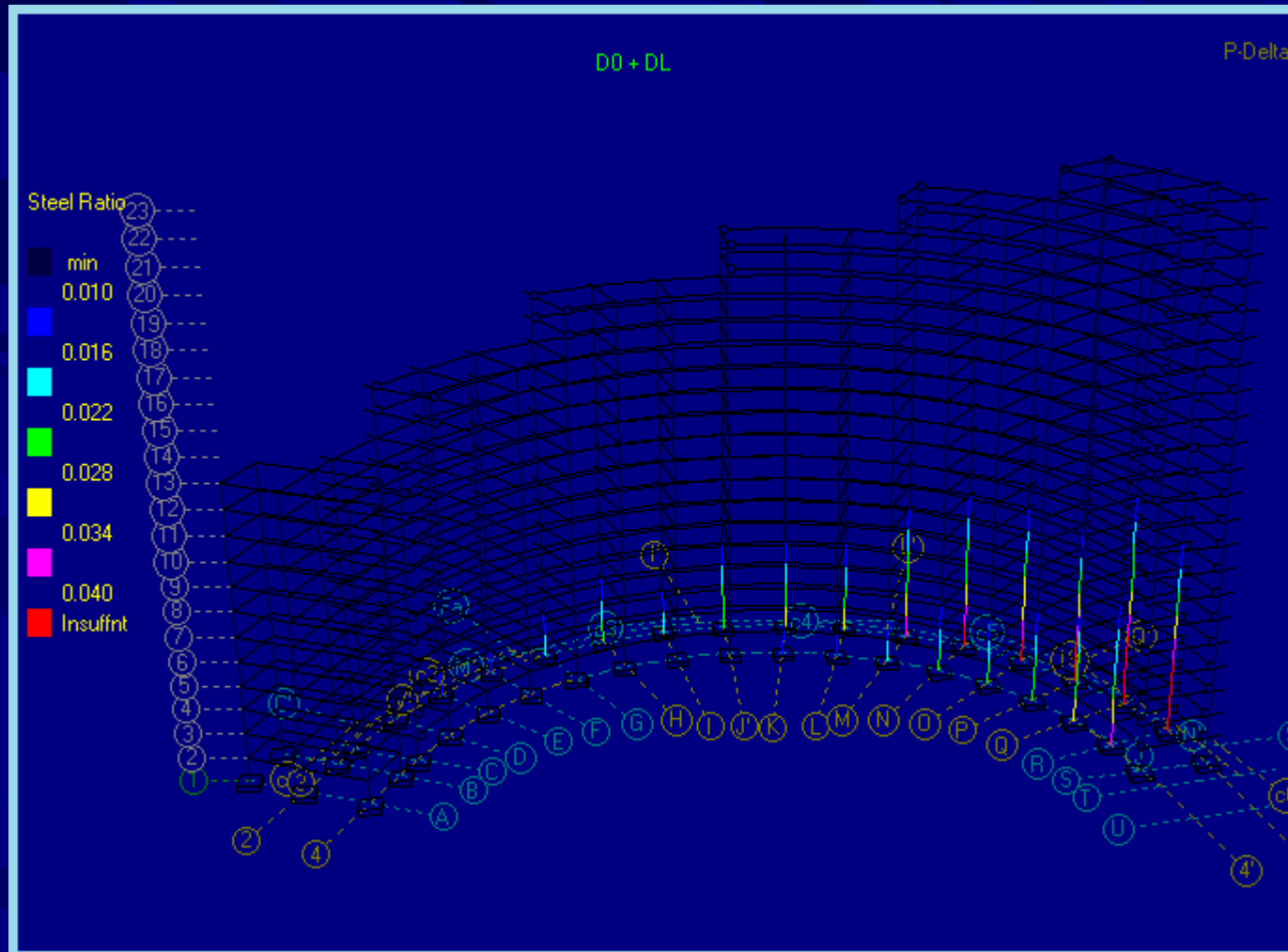
Numerosas columnas de las 6 unidades tienen sección insuficiente según NSR-10

Diseño Vigas



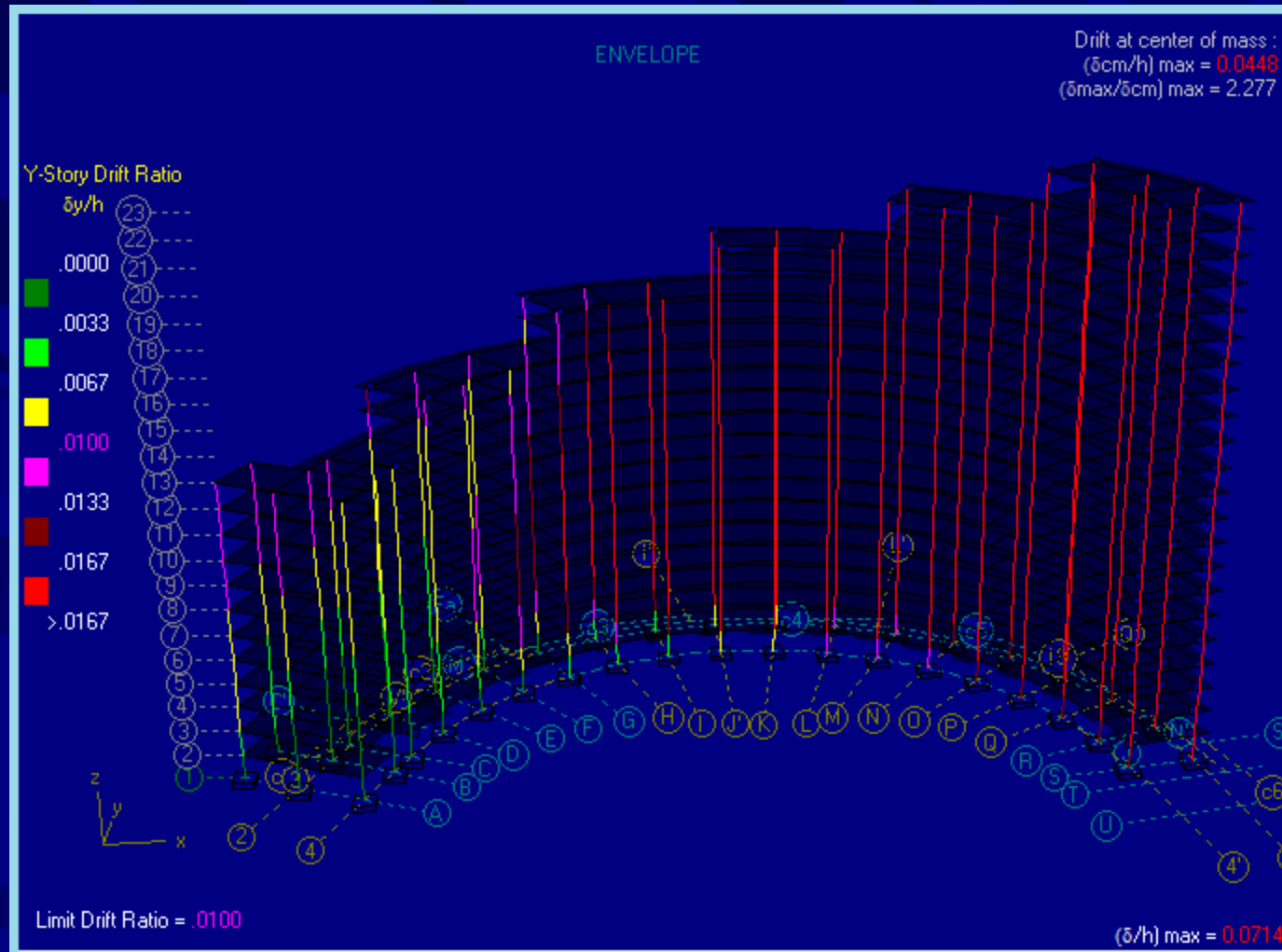
Numerosas vigas de las 6 unidades tienen sección insuficiente según NSR-10

Revisión Columnas Gravedad Solamente



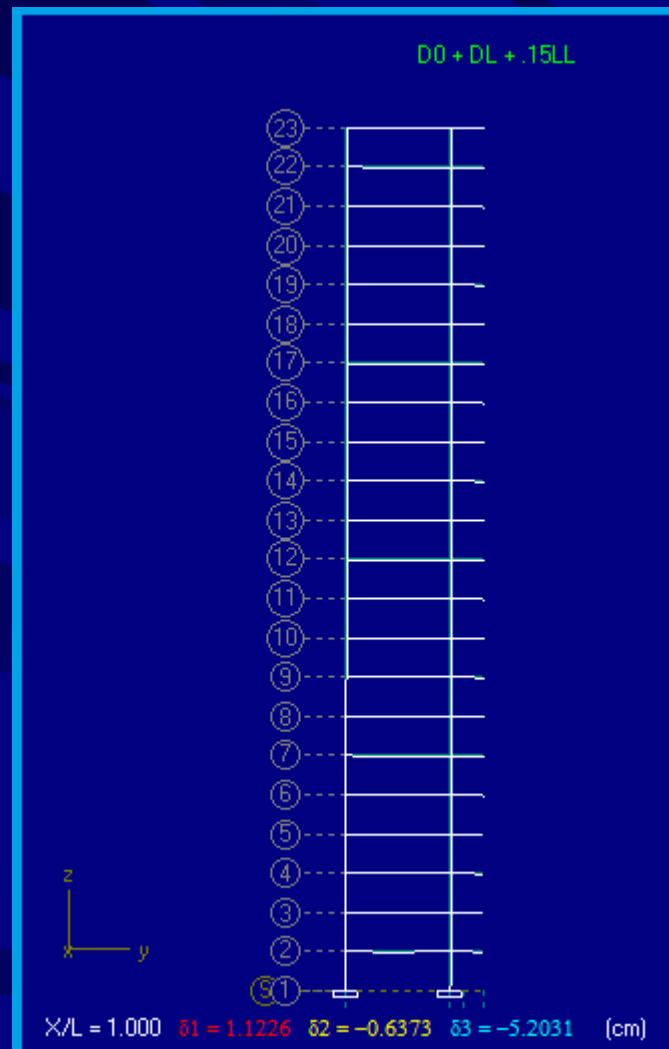
Columnas inferiores de la Unidad 6 fallan por gravedad (cargas de servicio)

Revisión de Derivas

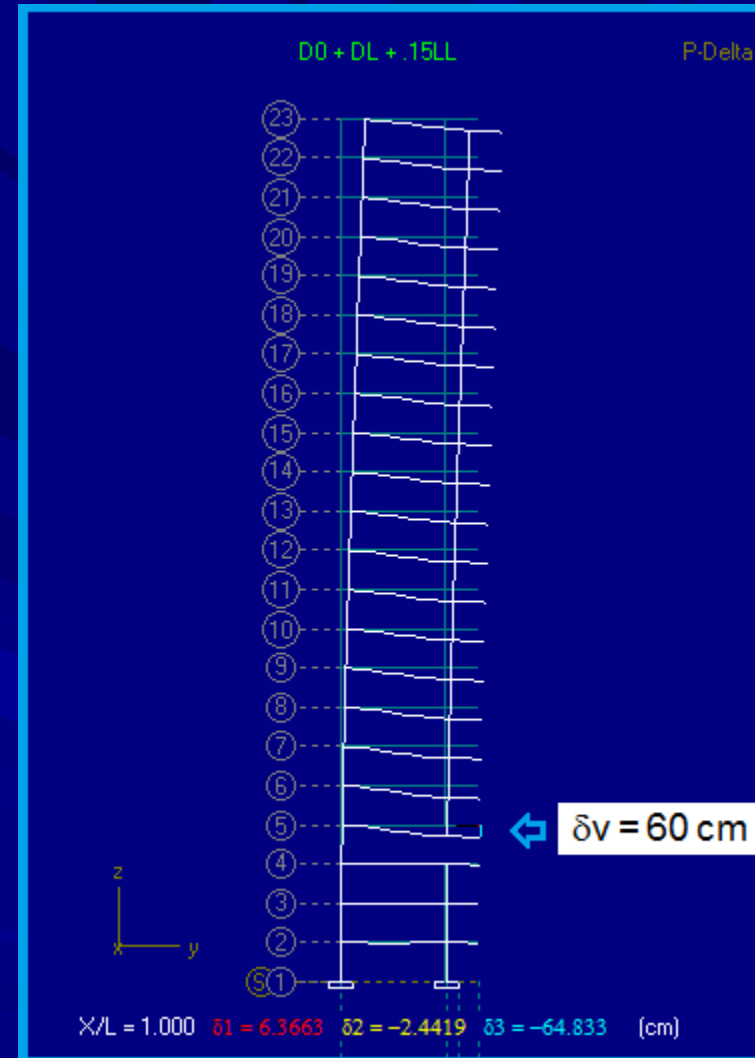


Deriva calculada se reduce al considerar la estructura completa (planos de los muros tienen componentes en las dos direcciones). Sin embargo estructura esta lejos de cumplir el limite (7.1% Vs 1% permisible)

Falla Local Column S-3 Piso 4 - Deformaciones



(a) Antes de falla local



(b) Despues de falla local

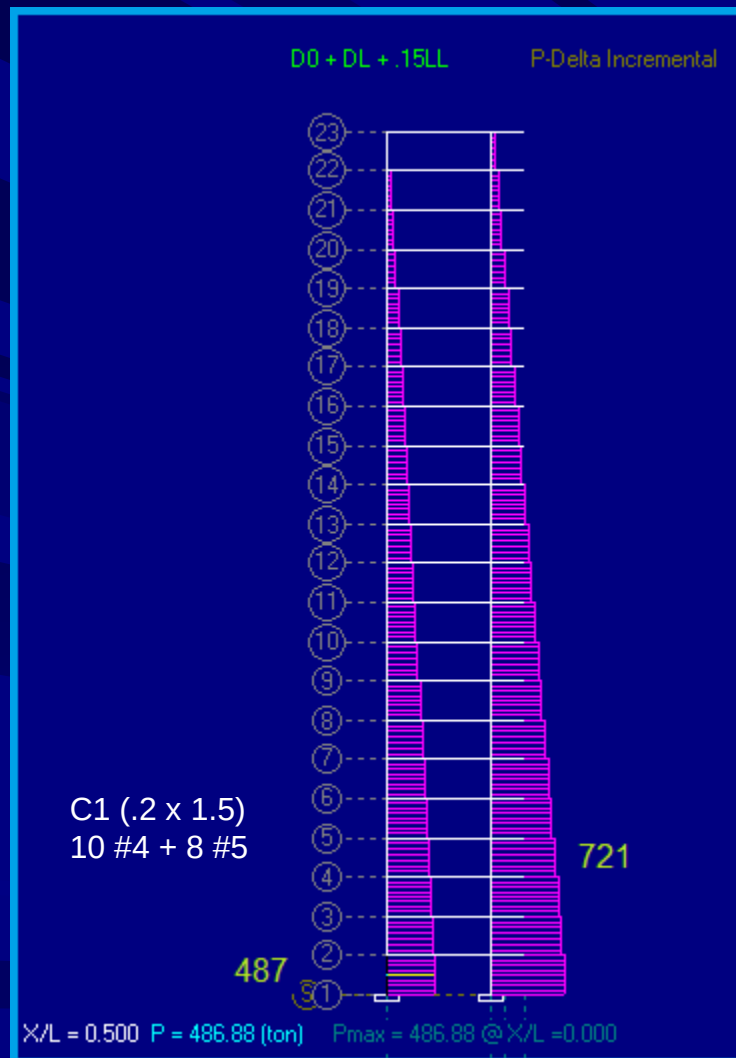
Falla Local Columna - Deformaciones



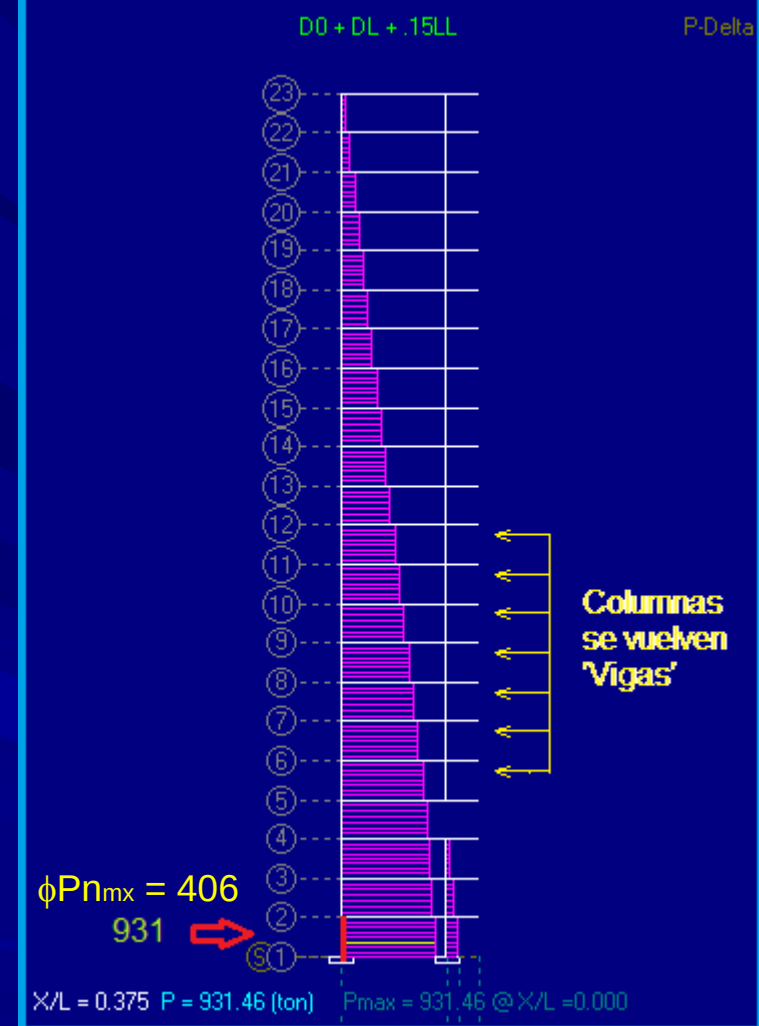
Falla Local Columna - Deformaciones



Falla Local Column S-3 Piso 4 – Fuerza Axial



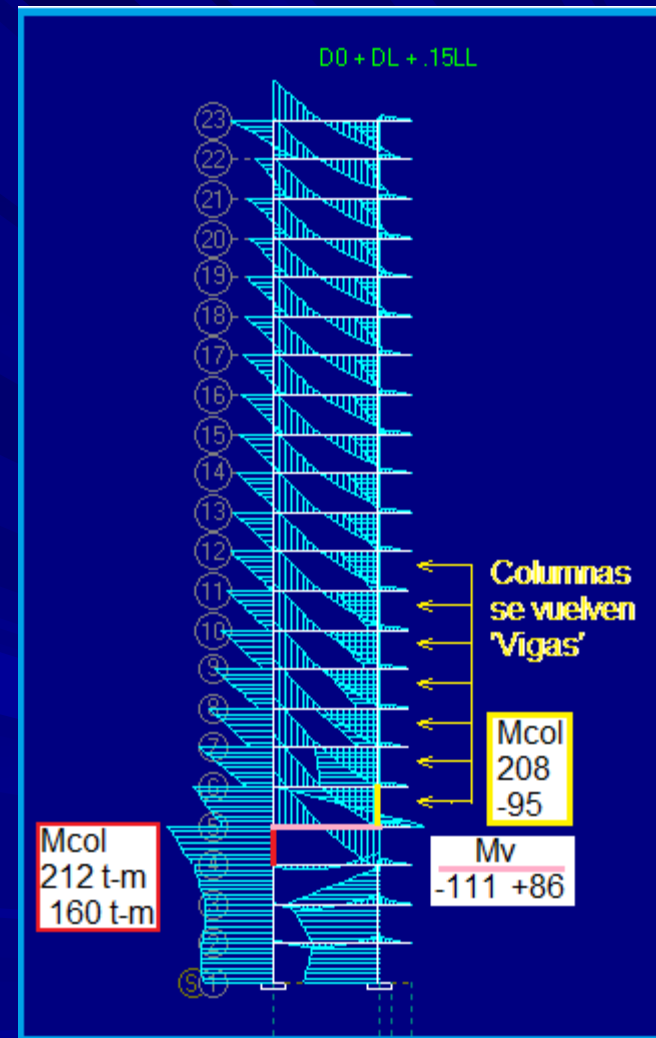
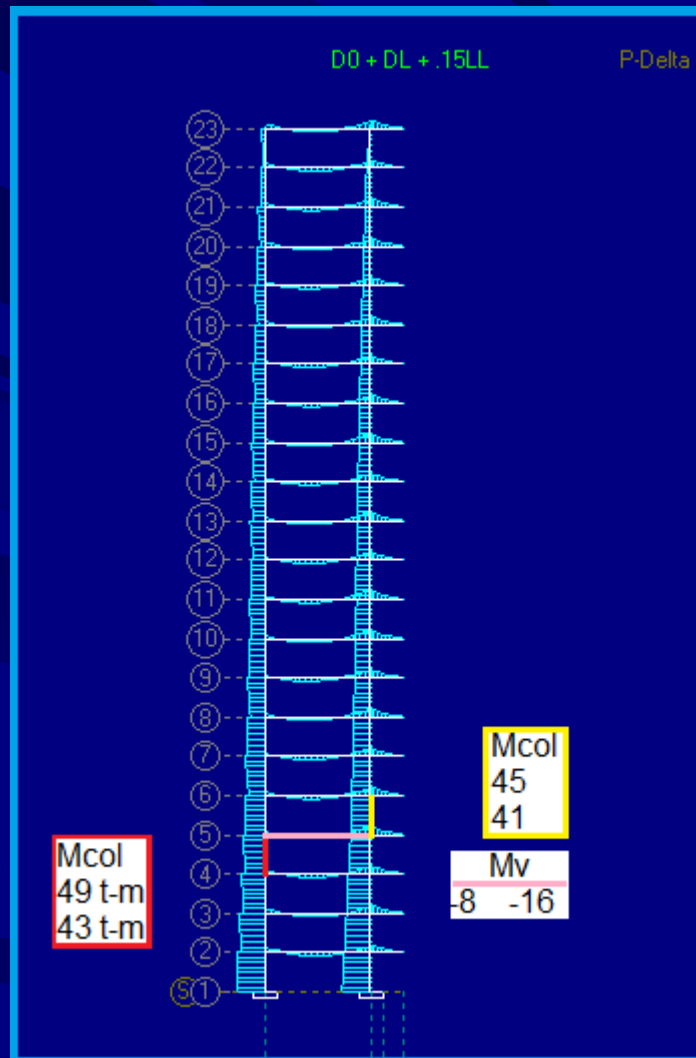
(a) Antes de falla local



(b) Después de falla local

$$\phi P_{n_{mx}} = 0.75 \phi [0.85 f'_c (A_c - A_s) + f_y A_s]$$

Falla Local Column S-3 Piso 4 – Momentos



Columnas Como Vigas

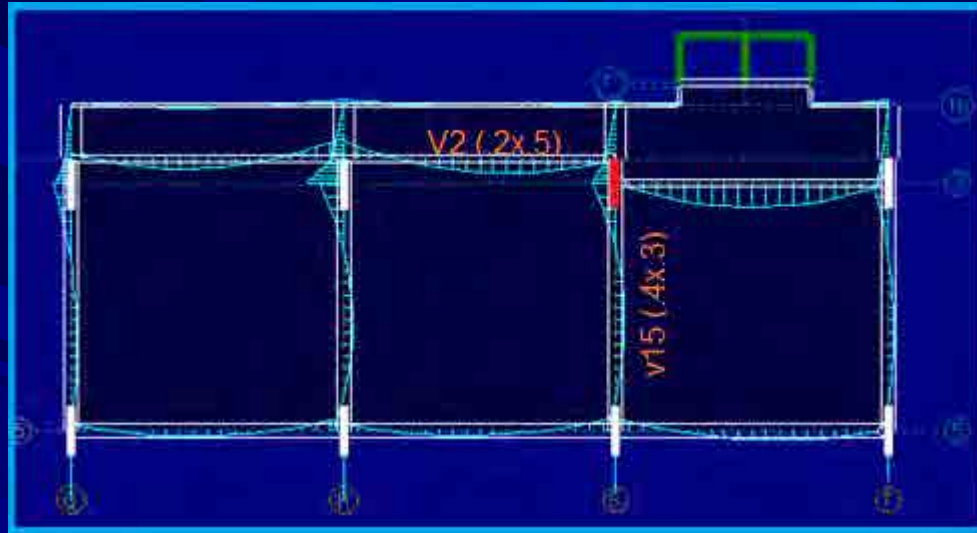


(a) Tensión



(b) Compresión

Falla Local Column S-3 Piso 4 – Momentos



(a) Antes de la falla local

V2 (0.20 x 0.50)

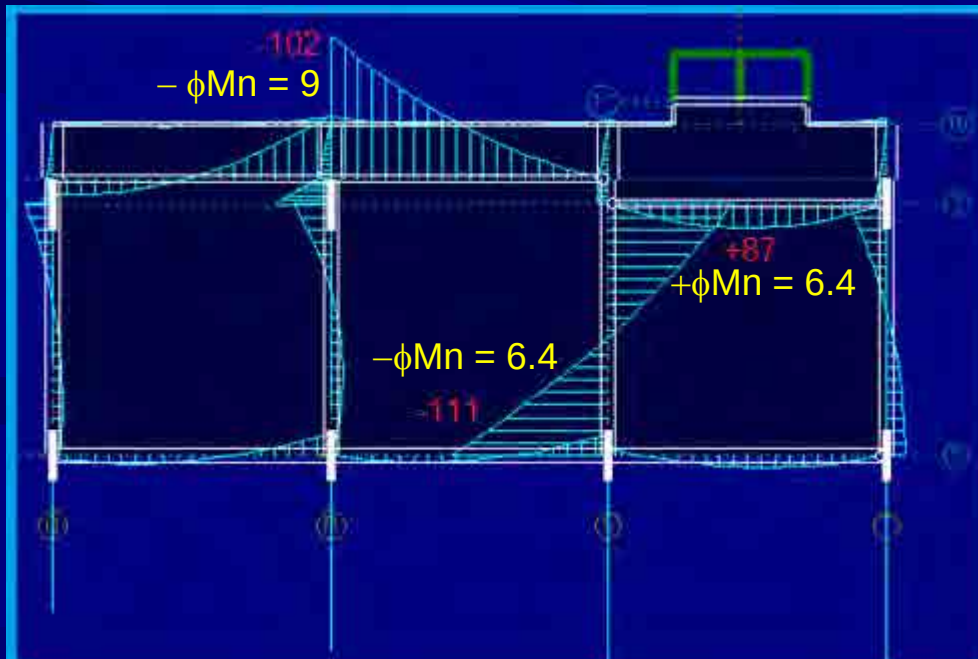
-As = 2 No 6

+As = 2 No 6

V15 (0.40 x 0.30)

-As = 3 No 6

+As = 3 No 6

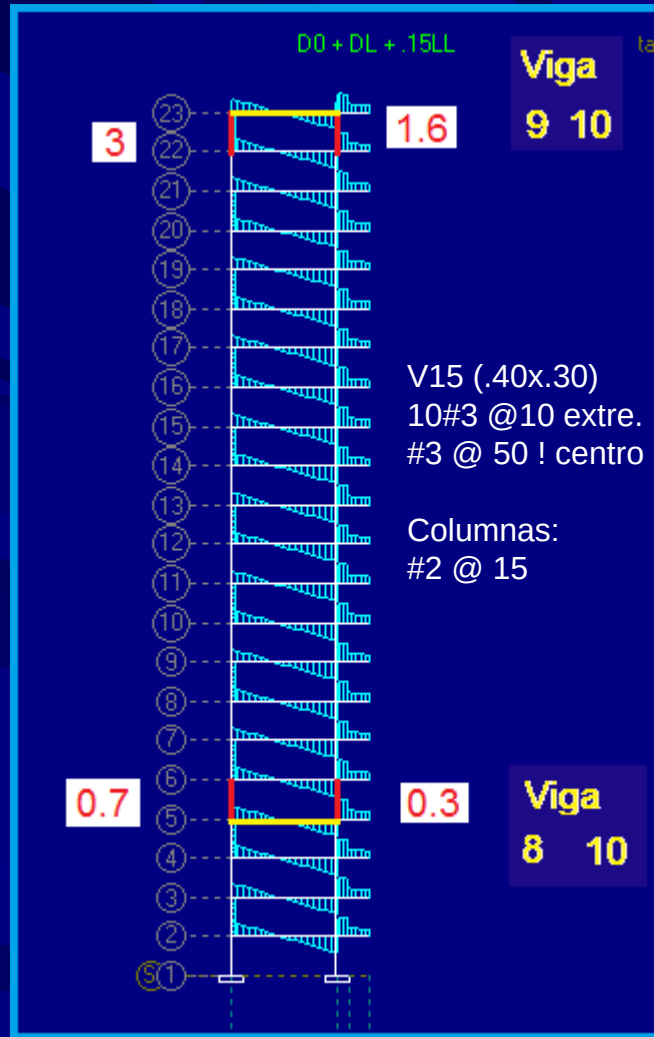


(b) Después de la falla local

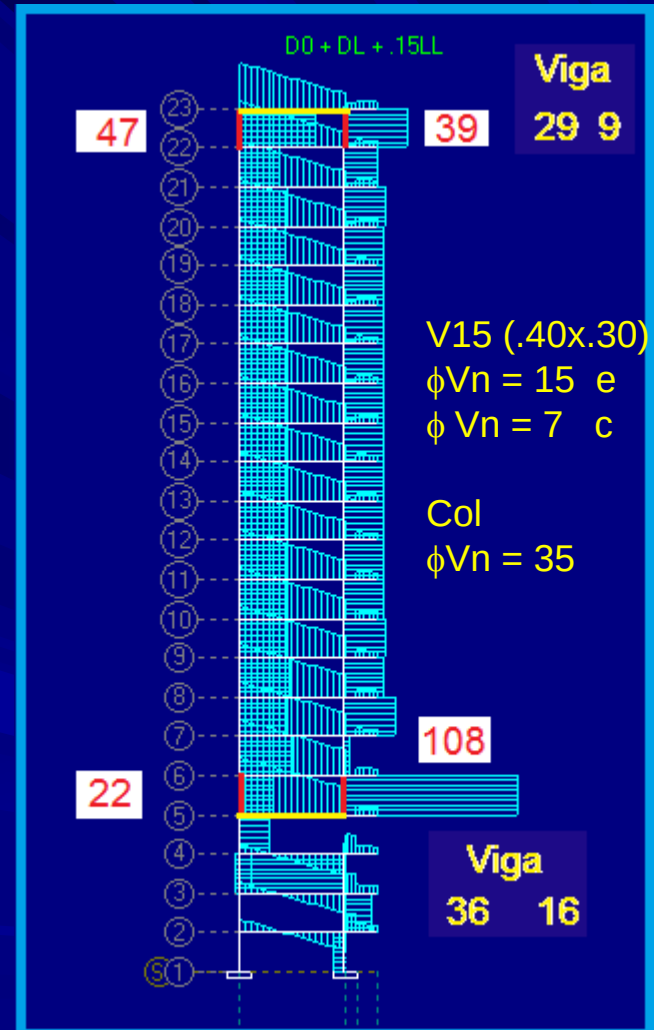
- Viga longitudinal doblemente articulada no ayuda a 'puentear' carga de elemento fallado.
- Viga longitudinal con un extremo articulado ineficiente como un voladizo de 8 m 'puenteando' carga (momentos enormes), además transmite flexión a la columna vecina en el sentido débil.
- Viga transversal de una sola luz de 8 m también ineficiente 'puenteando' carga (momentos resultantes son enormes).

NO RUTA ALTERNA DE CARGA

Falla Local Column S-3 Piso 4 – Cortantes



(a) Antes de falla local



(b) Después de falla local

Conclusiones

General

- Estructuras adecuadamente diseñadas como DES se pueden hacer resistentes a colapso progresivo con muy poco refuerzo adicional, asegurando continuidad de refuerzo
- Estructuras adecuadamente diseñadas como DMO se pueden hacer resistentes a colapso progresivo adicionando algo de refuerzo
- Estructuras diseñadas como DMI requieren aumento de secciones y de refuerzo para hacerlas resistentes a colapso progresivo

Edificio Space

Colapso de la Unidad 6 ocurrió debido a:

- La estructura carecía de adecuada resistencia (secciones & ref. insuficientes)
- La estructura carecía de adecuada redundancia. En una sola luz (y de 8 m) no hay posibilidad de ruta alterna para redistribuir cargas de elementos fallados
- La estructura carecía de adecuada continuidad (anclaje y continuidad refuerzo longitudinal de vigas)
- La estructura carecía de adecuada ductilidad. Columnas y vigas sin refuerzo de confinamiento adecuado

Agradecimientos

- Ing. Luis E Huertas – Rich & Associates
- Ing. Jairo Hernando Upegui
- Ing. Carlos E Blodek – Ingeniar Ltda
- Ing. Alfonso Castro
- Ing. Adriana Hoyos
- Ing. Jaime Curvelo
- Ing. Jose Joaquin Alvarez