



CURSO DE FORMACIÓN

**PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN  
EN INGENIERÍA SÍSMICA Y ANÁLISIS  
DINÁMICO DE ESTRUCTURAS**

MAGNA  
INSTITUCIÓN DE ESPECIALIZACIÓN PROFESIONAL

M.SC. EDWAR ESTEBA APAZA.  
INGENIERO ESTRUCTURAL

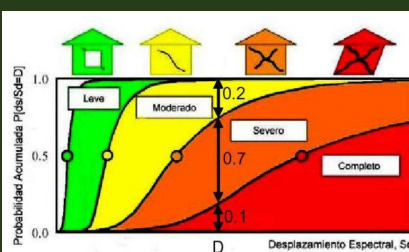
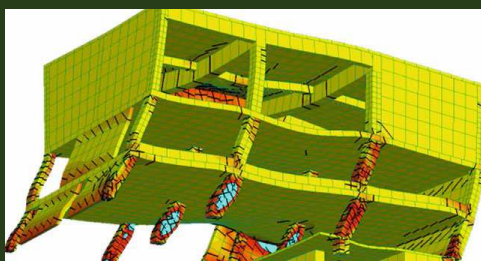
## MODULO VIII: ANÁLISIS NO LINEAL DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

### CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN
2. COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS
3. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL
4. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL
5. DISEÑO POR DESEMPEÑO
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## MOTIVACIÓN

- Comportamiento real de materiales y estructuras
- Necesidad de evaluar y reparar estructuras
- Discusión de los métodos existentes
- Base teórica y criterios de optimización

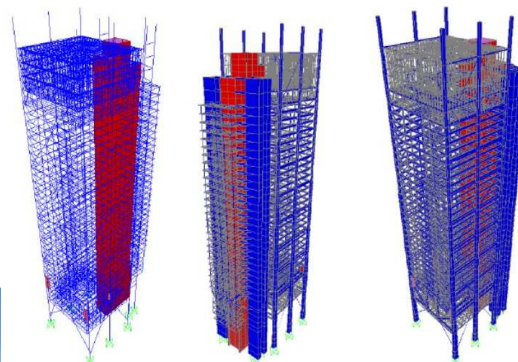


## INTRODUCCIÓN

### Diseño de Estructuras

#### Propósito

- ☐ Economía
- ☐ Seguridad
- ☐ Funcionalidad
- ☐ Estética



#### Objetivos Técnicos

- ☐ Resistencia
- ☐ Rigidez
- ☐ Ductilidad



## INTRODUCCIÓN

Concepción del Proyecto

### ***Criterios de diseño Sísmico***

- ☐ Considerar las condiciones locales
- ☐ Estructuras regulares
- ☐ Limitar deformaciones
- ☐ Evitar efecto columna corta
- ☐ Evitar piso blando
- ☐ Minimizar efectos de torsión
- ☐ Formas simétricas
- ☐ Continuidad en planta y altura
- ☐ Protección de elementos no estructurales

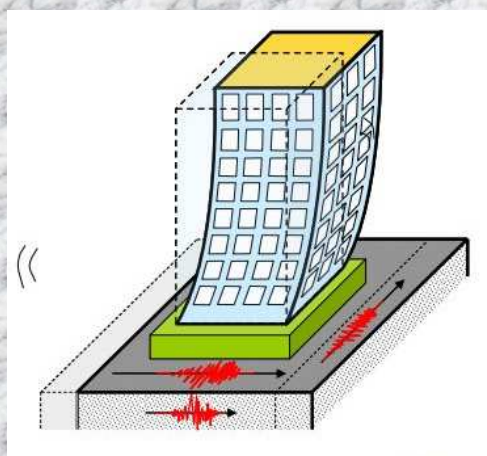


**MAGNA**  
INSTITUCIÓN DE ESPECIALIZACIÓN PROFESIONAL

## INTRODUCCIÓN

### **Fases de un proyecto estructural**

- ☐ Estructuración
- ☐ Pre-dimensionamiento
- ☐ Cargas (Peligro Sísmico)
- ☐ Análisis estructural
- ☐ Diseño Estructural
- ☐ Detalles constructivos



**MAGNA**  
INSTITUCIÓN DE ESPECIALIZACIÓN PROFESIONAL

## INTRODUCCIÓN

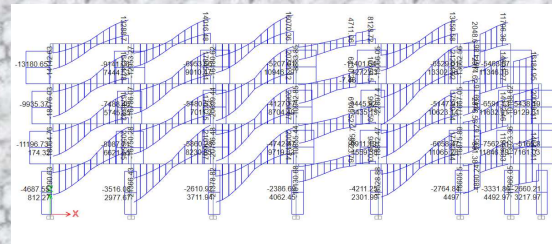
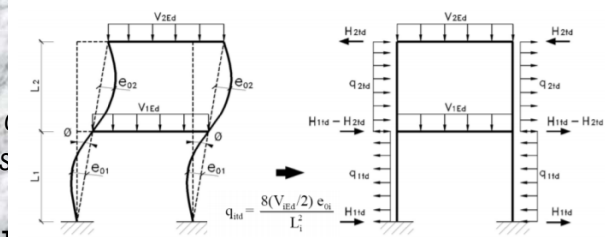


### Análisis Estructural

**Definición:** (Proceso de cálculo de determinación de la respuesta de la estructura frente a efectos externos)

❑ Análisis Lineal [Estático, dinámico]

❑ Análisis no lineal [Estático, dinámico]



## INTRODUCCIÓN



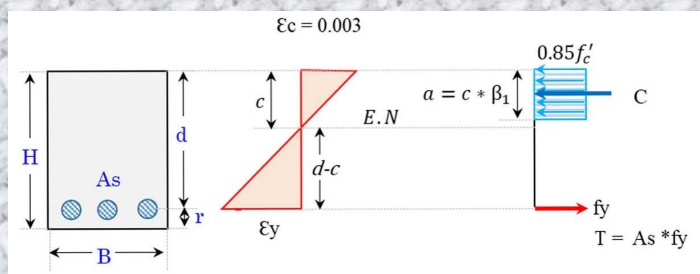
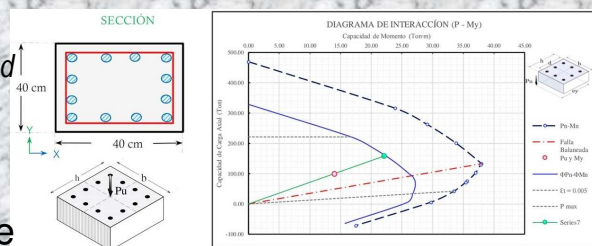
### Diseño Estructural

**Definición:** (función generar estabilidad y seguridad -obtención y verificación de los componentes de una estructura frente a las cargas que se aplican)

- [Resistencia ultima, Esfuerzos de trabajo] (ACI-318)
- Factores de combinación.
- Factores de reducción.
- Métodos ELU EC.

$$R_n \leq \phi R_u$$

$R_u$  (Factores de COMB)





## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS



### INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS NO LINEAL COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS DE Cº Aº

#### Hipótesis usuales

- Comportamiento elástico –Lineal

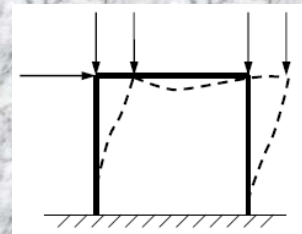
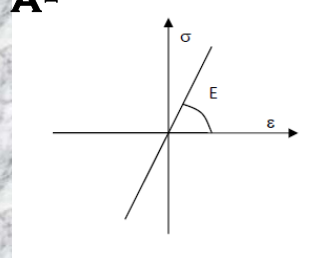
$$\sigma = E \cdot (\varepsilon - \varepsilon^0) + \sigma^0$$

- Relación lineal entre sus desplazamientos y deformaciones
- Apoyos con comportamiento lineal.

$$R = -K \cdot \delta$$



- Equilibrio en la configuración no deformada



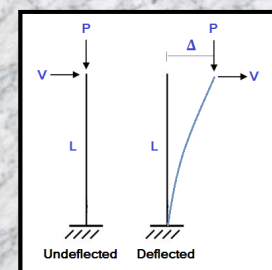
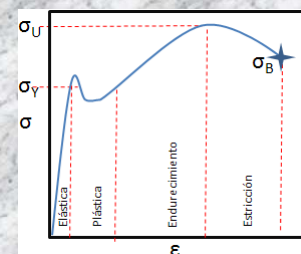
## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS



### Como se comportan las estructuras realmente?

- Distinto comportamiento de los materiales NL-M
- Efecto en piezas esbeltas NL-G
- Distinta respuesta de los apoyos (Problemas de Contacto)
- Grandes deformaciones y rotaciones (cables)
- Deformaciones diferidas

*Retracción, fluencia (comportamiento reológico).*

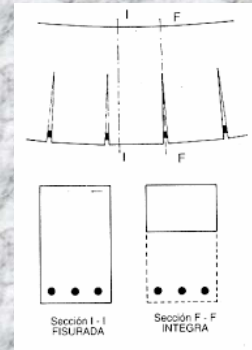
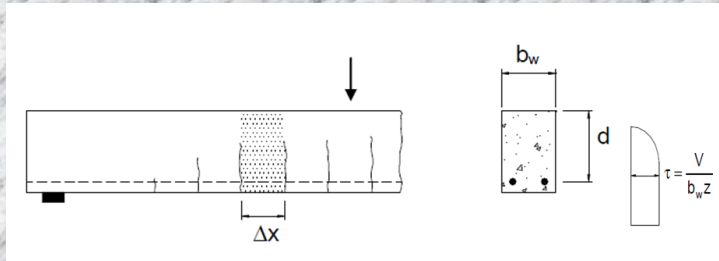


## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS



La respuesta No lineal se manifiesta en:

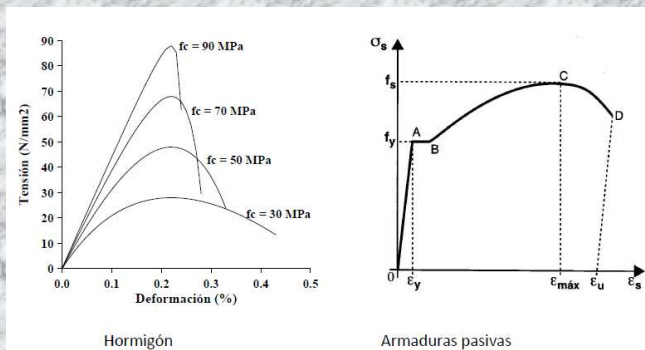
- Falta de proporcionalidad
- Pérdida de rigidez
- Y mayores desplazamientos
- Redistribución de esfuerzos y reserva de resistencia
- Inestabilidad o reducción de capacidad portante 2do orden
- Influencia del historial de cargas



## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS

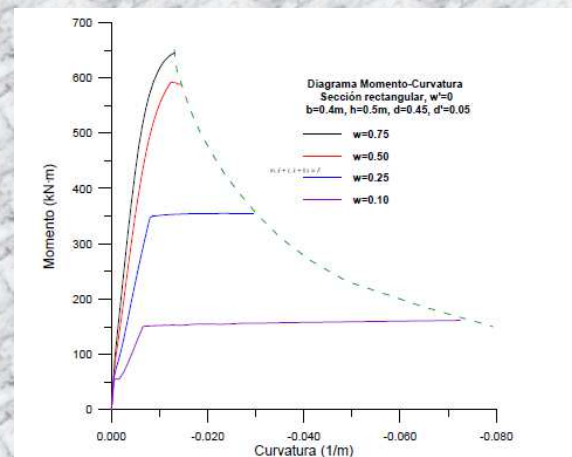


### Comportamiento no lineal de los materiales



### Influencia de la cuantía a tracción

- Flexión
- Cortante
- Axil





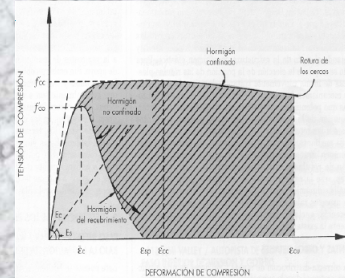
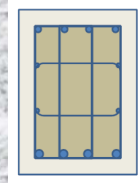
## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS



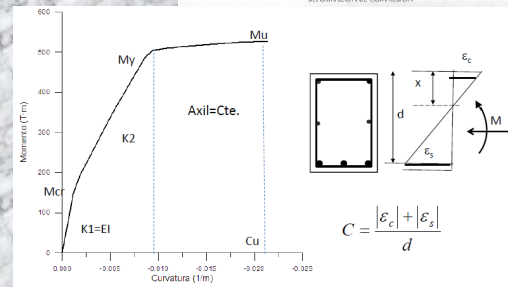
### Modelización del hormigón confinado

Ganancia de resistencia:  $f_{ccd} = f_{cd} (1 + 1.5 \alpha \omega_w)$

Ganancia de ductilidad:  $\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{cu} + \frac{1.4 \rho_w f_{yh} \varepsilon_{su}}{f_{cc}}$



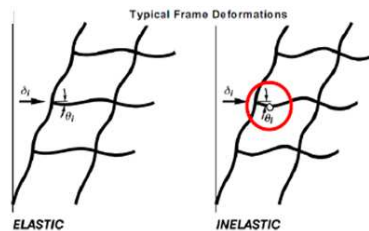
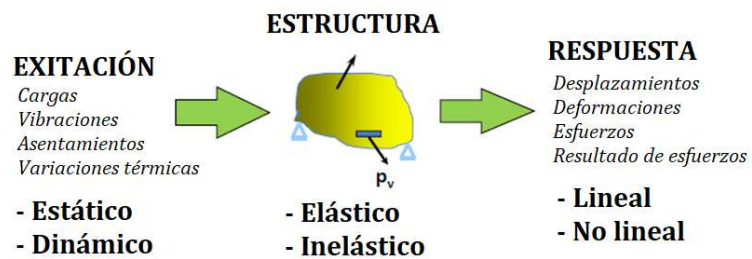
### Diagrama Momento-Curvatura



## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS



En resumen,  
En un análisis estructural se evalúa:





## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS

### TIPOS DE ANÁLISIS

#### Lineal

- Análisis estático o de fuerzas estáticas equivalentes
- Análisis modal espectral, o espectro de respuesta
- Análisis dinámico lineal tiempo historia (THA)

#### No Lineal

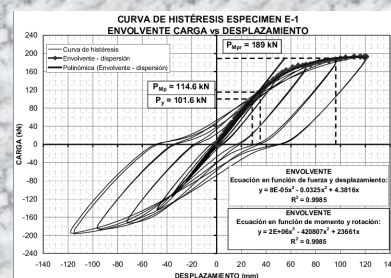
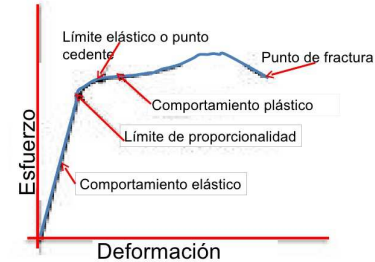
- Análisis estático no lineal (Push-over Analysis)
- Análisis dinámico no lineal (THNLA, step by step)
- Análisis dinámico incremental (IDA)

*El tipo de análisis depende del sistema estructural*

*(Tipo de excitación, tipo de estructura, tipo de respuesta)*

**MAGNA**

#### Relación entre esfuerzo y deformación



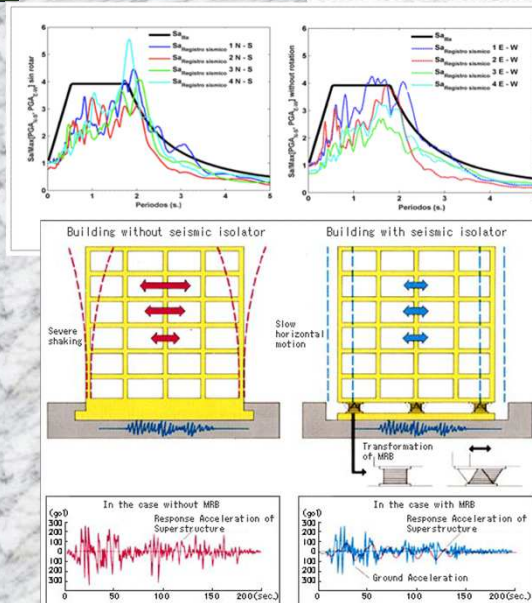
## COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS

### ANÁLISIS LINEAL

*Desarrolla*

- ❑ Proporcionalidad causa efecto
- ❑ Principio de superposición
- ❑ Independencia de Armado
- ❑ Queda del lado seguro
- ❑ Cálculo directo

**MAGNA**

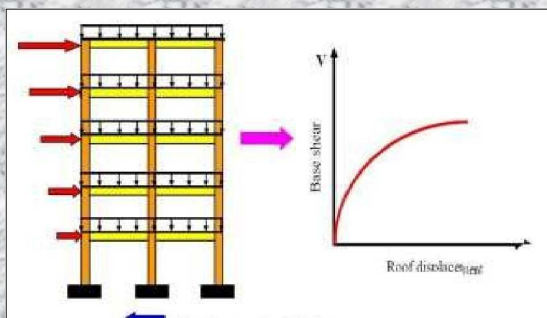


## ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL



### Análisis Push-Over

- Definición:
  - Estructura sometida a cargas de gravedad
  - Cargas monotonicas que controlan el desplazamiento
  - Desde el rango elástico al inelástico
  - Resultado: Esfuerzo en la base Vs deflexión.
  - Ductilidad y capacidad de la estructura y mecanismo de falla



## ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL



### Diferencia entre un análisis Pushover y Análisis Dinámico Espectral:

Análisis Push-over	Análisis modal espectral
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis simplificado estático no lineal * Analisis dinamico lineal</li> <li>• Capaz de evaluar la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes, también puede ser usado en estructuras nuevas para evaluar el efecto estático no lineal</li> </ul>	<p>Disponible para problemas que envuelve el diseño de estructuras nuevas</p>



## ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL

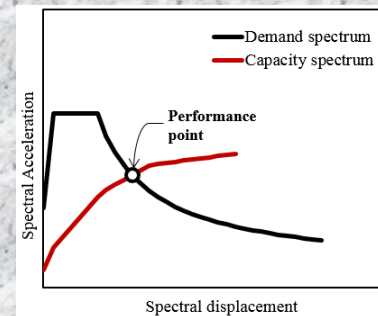
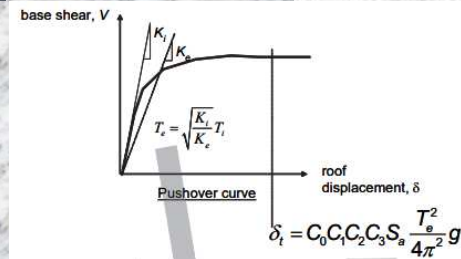


### Métodos de AENL

- Método de coeficientes de desplazamiento (FEMA 356).
- Método de espectro de capacidad (ATC-40).

Diferencia en el Plot (ADRS)

- Método del EC-8.

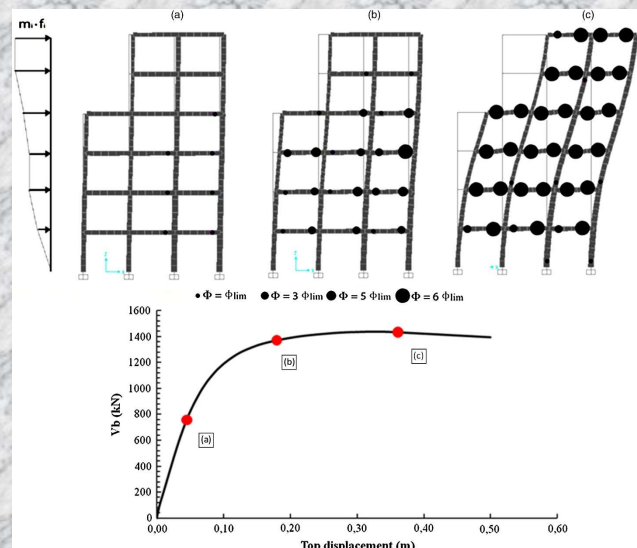


## ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL



### Por que un análisis Push-over?

- Mejor comprensión en el comportamiento de una estructura
- Predicción realista de los elementos mas solicitados
- Análisis que no requiere mucha demanda computacional
- Simple de aplicar
- Puede ser usado criterio de aceptación menos conservativos

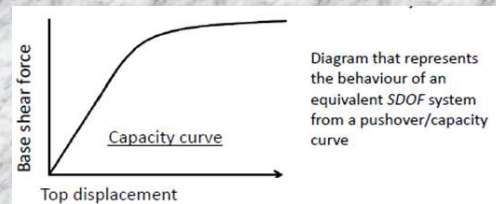
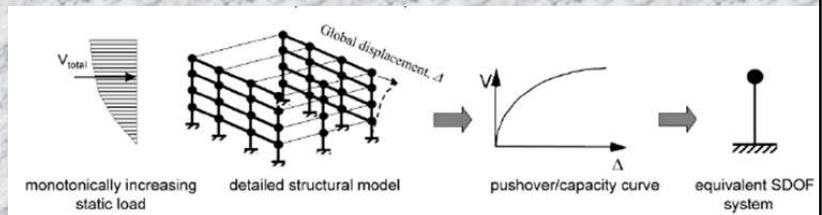


## ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL



### Procedimiento NLP

- Definir el modelo estructural
  - Elementos
  - Propiedades de esf-def.
- Definir cargas
  - Gravitacionales
  - Cargas laterales
- Seleccionar el control de desplazamientos
- Correr el análisis pushover

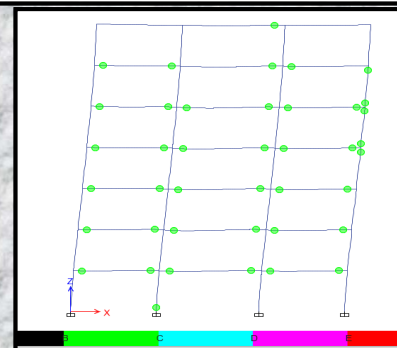
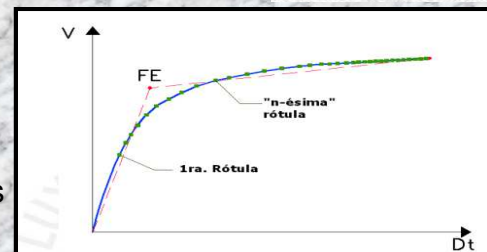


## ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL



### Resultados del análisis Pushover

- Plot de la curva pushover, numero de rotulas en cada estado
- Obtener la curva de capacidad
- Revisar la secuencia de formación de rotulas plásticas en la estructura.





## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL



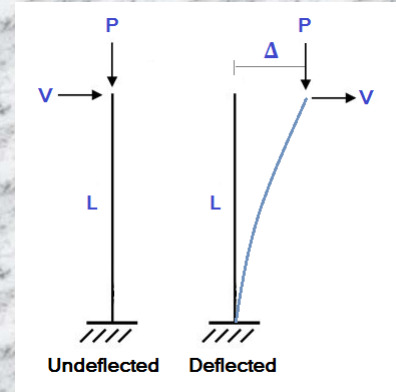
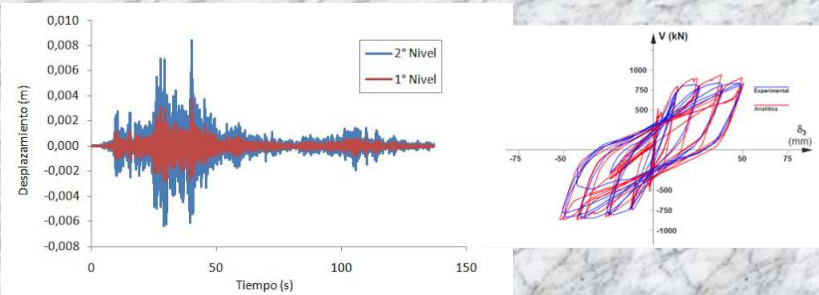
### Definición:

- Evaluación mas precisa donde intervienen las máximas características reales posibles de los elementos y estructura en general.

ANÁLISIS EVOLUTIVO (CRONOLÓGICO)

ANÁLISIS INELASTICO NO LINEAL

ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA



## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL



### Estudio de los materiales

- Concreto (material isotrópico; E, poisson G)
- Acero (Exx, Gxx)
- Leyes constitutivas de los materiales.

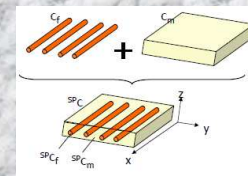
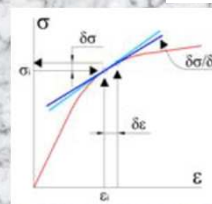
### NO LINEALIDADES CONSTITUTIVAS

- Supuesto un problema en pequeñas deformaciones  $e_{ij} = E_{ij} = \epsilon_{ij}$ , las no linealidades resultan del tipo constitutivas

$$\mathbf{r}^{int}(\mathbf{U}, \mathbf{U}, t + \Delta t) = \mathbf{f}_k^{int}(\mathbf{U}, \mathbf{U}, t + \Delta t) = \mathbf{A} \int_{\Omega^e} \left( \sigma_{ij} N_j^S N_{ik} dV \right) = \int_{\Omega^e} \sigma_{ij} N_j^S N_{ik} dV$$

$$\sigma = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon} = \begin{cases} \mathbf{C}^S : \epsilon^e + \xi : \epsilon & \text{Caso elasto-plástico con viscosidad} \\ \mathbf{C}^0 : \epsilon & \text{Caso elástico} \end{cases}$$

$$\dot{\sigma} = \mathbf{C}^t : \dot{\epsilon}$$



$$^L E_1 = 242 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$^L v_{23} = 0.2 ; ^L v_{32} = \frac{^L E_3}{^L E_2} ; ^L v_{23} = 0.2$$

$$^L v_{12} = 0.2 ; ^L v_{21} = \frac{^L E_2}{^L E_1} ; ^L v_{12} = 0.00331$$

$$^L v_{13} = 0.2 ; ^L v_{31} = \frac{^L E_3}{^L E_1} ; ^L v_{13} = 0.00331$$

$$^L E_3 = ^L E_3 = 4 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\frac{1}{^L G_{12}} = \left( \frac{1 + ^L v_{12}}{^L E_2} \right) + \left( \frac{1 + ^L v_{21}}{^L E_1} \right) = 3.041 \times 10^{-10}$$

$$\frac{1}{^L G_{31}} = \left( \frac{1 + ^L v_{31}}{^L E_1} \right) + \left( \frac{1 + ^L v_{13}}{^L E_3} \right) = 3.041 \times 10^{-10}$$

$$\frac{1}{^L G_{23}} = \left( \frac{1 + ^L v_{23}}{^L E_3} \right) + \left( \frac{1 + ^L v_{32}}{^L E_2} \right) = 6.0 \times 10^{-10}$$

$$\mathbf{t}(\mathbf{C}_F^{-1}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{^L E_1} & \frac{^L v_{21}}{^L E_2} & \frac{^L v_{31}}{^L E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{^L v_{12}}{^L E_1} & \frac{1}{^L E_2} & \frac{^L v_{32}}{^L E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{^L v_{13}}{^L E_1} & \frac{^L v_{23}}{^L E_2} & \frac{1}{^L E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{^L G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{^L G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{^L G_{12}} \end{bmatrix}$$

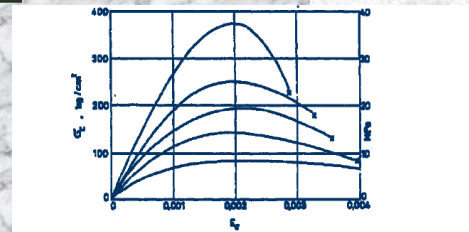
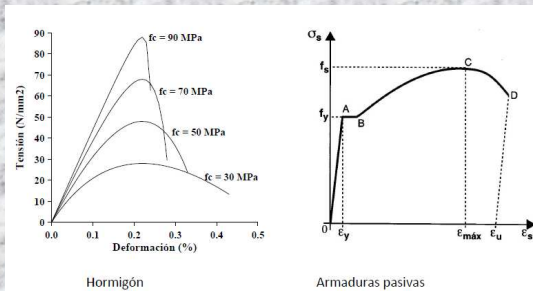
## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

### Modelos constitutivos de los materiales

*Confinado, inconfinado*

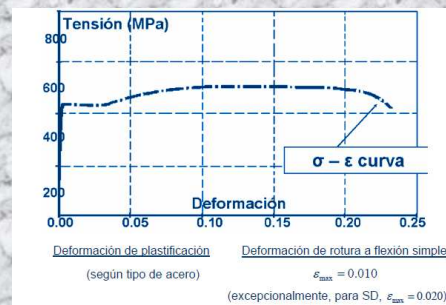
➤ Mander

➤ Takeda.



Deformación de plastificación  $\epsilon_{ps} = 0.002$   $f_{ps} \leq 50$  MPa  $\epsilon_{ps} = 0.002 + 0.000085(f_{ps} - 50)^{1.1}$   $f_{ps} > 50$  MPa

Deformación de rotura a flexión simple  $\epsilon_{ru} = 0.0035$   $f_{ru} \leq 50$  MPa  $\epsilon_{ru} = 0.0035 + 0.0144 \left( \frac{100 - f_{ru}}{100} \right)$   $f_{ru} > 50$  MPa



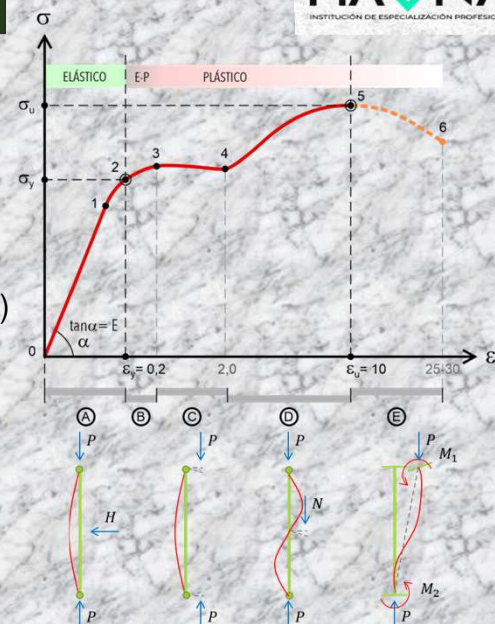
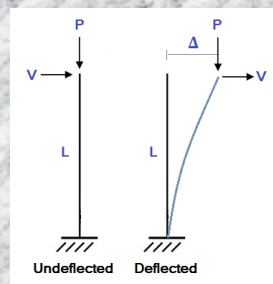
## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

### Tipos de no linealidad del Cº Aº

➤ No linealidad mecánica (Materiales)

➤ No linealidad geométrica (elementos esbeltos)

*efecto  $P - \Delta$*



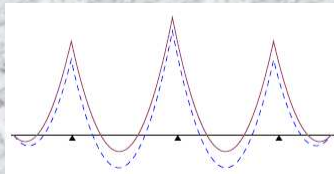


## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL



### Casos donde se observa no linealidades

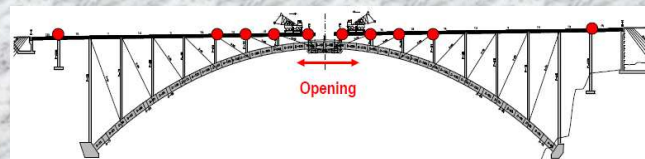
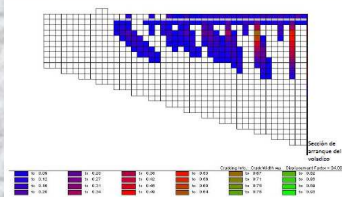
- Luces largas
- Voladizos
- Puentes (Cajón, vigas)
- Pilares
- Columnas largas.



## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL



- Casos reales.



## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

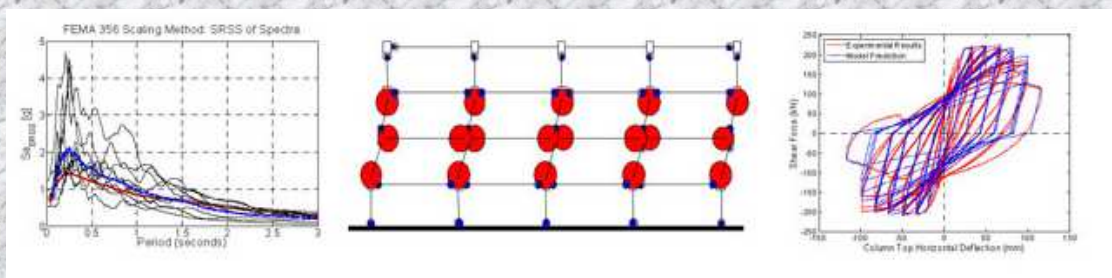


Considerar parámetros que interfieren en el análisis.

➤ DEMANDA

- Estudio de peligro sísmico (microzonificación sísmica).

➤ VULNERABILIDAD (estructura).



## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL



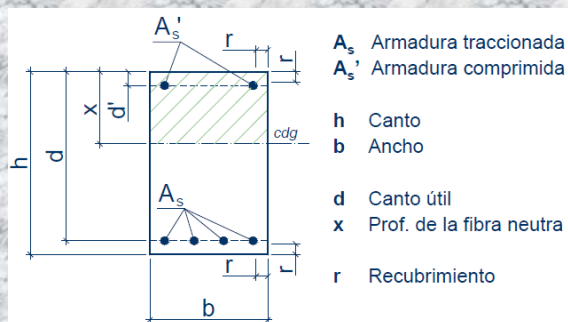
### Análisis Seccional

MATERIALES (post diseño refuerzo).

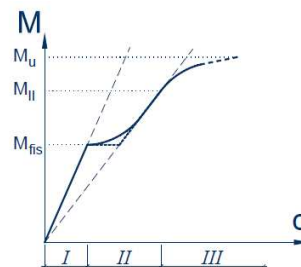
➤ Diagramas P- $\delta$  y M- $\phi$

### Análisis cronológico (Paso a Paso)

➤ Historial de carga y descarga



$M_{fis}$  Momento de fisuración  
 $M_{II}$  Final fase II (plastificación del hormigón)  
 $M_u$  Rotura (momento último)





## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

### Análisis seccional.

- Método útil análisis y evaluación de estructuras nuevas y existentes

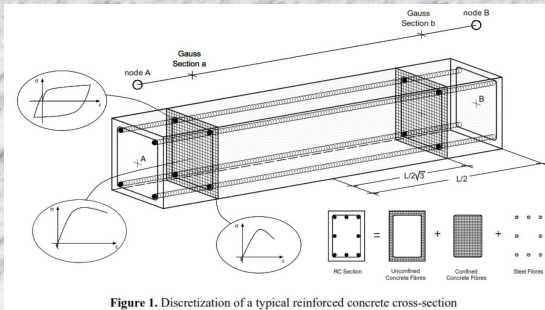
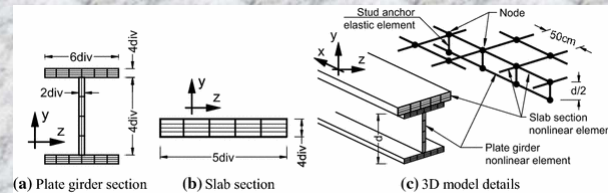
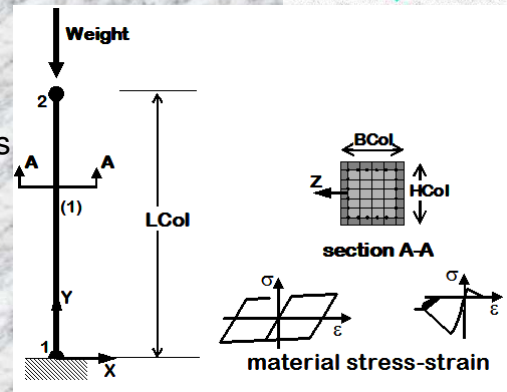


Figure 1. Discretization of a typical reinforced concrete cross-section



## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

### Análisis seccional

- Procedimiento de análisis

$$N = \iint \sigma \cdot dA \quad \varepsilon(z) = \varepsilon_m - c \cdot z$$

$$M = \iint \sigma \cdot z \cdot dA \quad \sigma(z) = f(\varepsilon - \varepsilon^0) + \sigma^0$$

---

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} EA & ES \\ ES & EI \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_m \\ c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} N^0 \\ M^0 \end{Bmatrix}$$

$$\vec{\sigma}_s = [K_s] \cdot \vec{\varepsilon}_s + \vec{\sigma}_0$$

$$EA = \iint E \cdot dA$$

$$ES = -\iint E \cdot z \cdot dA$$

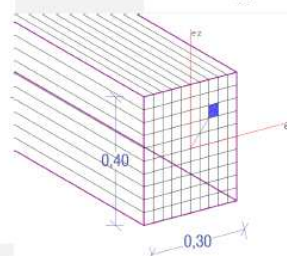
$$EI = \iint E \cdot z^2 \cdot dA$$

$$N^0 = -\iint (E \cdot \varepsilon^0 + \sigma^0) \cdot dA$$

$$M^0 = \iint (E \cdot \varepsilon^0 + \sigma^0) \cdot z \cdot dA$$

- De tal manera que: en la sección de la estructura se Aplica.
- Principio del Trabajo Virtual

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_m + z \cdot \Delta \phi_y - y \cdot \Delta \phi_z$$

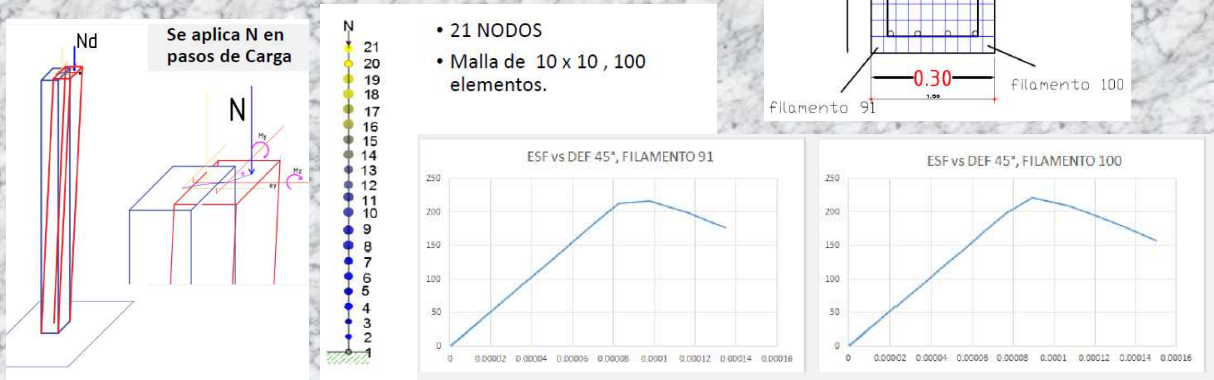


$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M_y \\ \Delta M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} EA & ES_y & -ES_z \\ ES_y & EI_y & ES_{yz} \\ -ES_z & ES_{yz} & EI_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_0 \\ \Delta \phi_y \\ \Delta \phi_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta N_0 \\ \Delta M_{y0} \\ \Delta M_{z0} \end{pmatrix}$$

## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

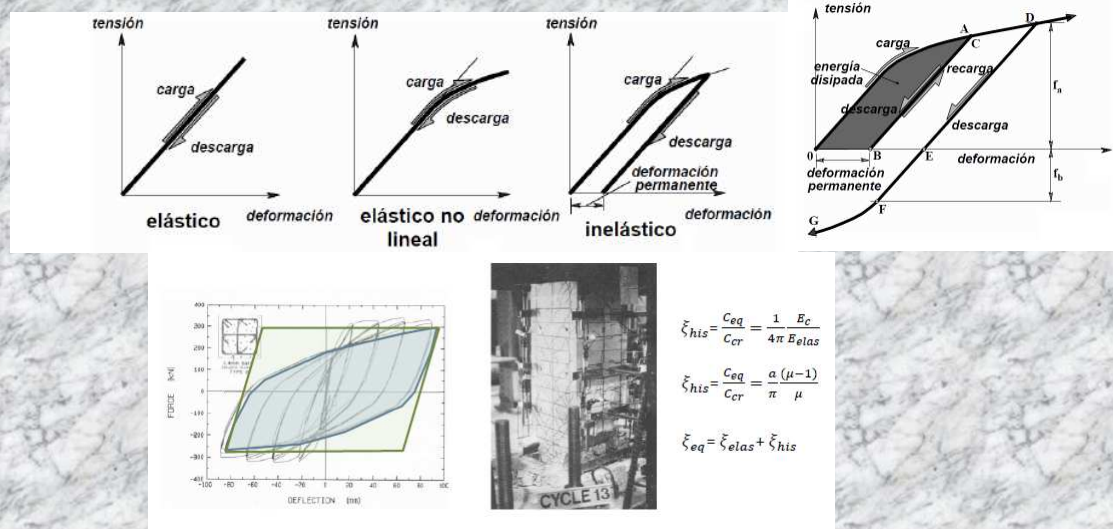
### Análisis del elemento.

- Ejemplo de Aplicación, [Columna esbelta].



## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

- Proceso de histéresis

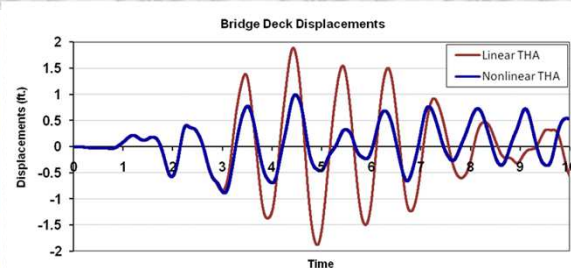
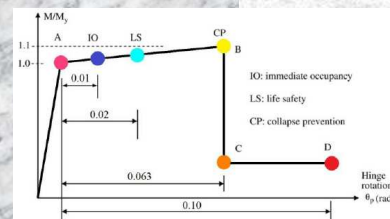
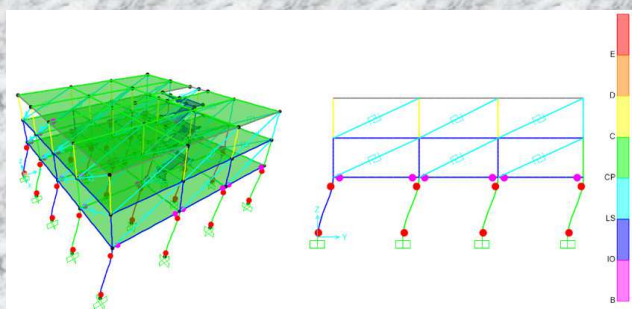




## ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

### Respuesta del análisis dinámico no lineal

- Resultados a cualquier tiempo historia.



## DISEÑO POR DESEMPEÑO

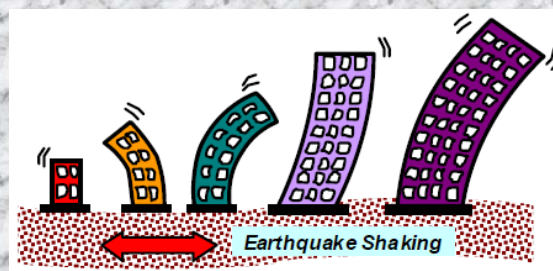
### DISEÑO BASADO EN DESEMPEÑO

- Proceso que permite en estructuras [nuevas o existentes] el entendimiento real de:

- Riesgo de vida
- Ocupación
- Perdidas económicas

Que pueden ocurrir tras un fenómeno sísmico.

- Diseñar estructuras que tengan previsible y confiable comportamiento frente a sismos.



## DISEÑO POR DESEMPEÑO



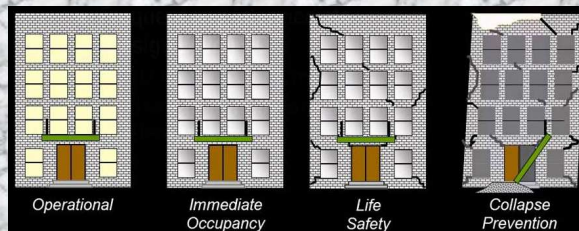
### Niveles de Desempeño

#### ➤ FEMA 356 (2000)

- **Ocupación inmediata**
- **Control de Daño**
- **Seguridad de vida**
- **Seguridad limitada**
- **Prevención de colapso**
- **No considerado**

#### ➤ ATC 40 (1996)

- Operacional 1-A
- **Ocupación inmediata 1-B**
- Daño controlado
- **Seguridad de Vida 1-C**
- Seguridad limitada
- **Estabilidad estructural 1-D**
- No considerado



#### ➤ VISION 2000 (SEAOC 1995)

- **Totalmente Operacional**
- **Operacional**
- **Seguridad de vida**
- **Precolapso**
- **Colapso**

## DISEÑO POR DESEMPEÑO



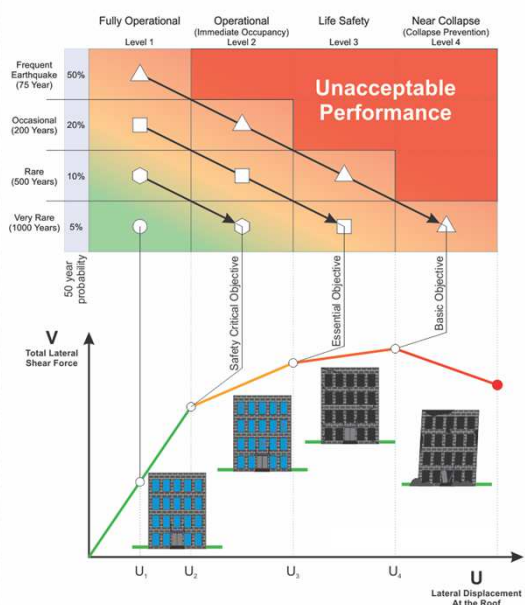
### ➤ Objetivo de desempeño.

Nivel de desempeño esperado: criterio de seguridad básica (ATC-40, 1996)

Nivel del movimiento del terreno	Nivel de desempeño de la edificación			
	Operacional	Inmediata Ocupación	Seguridad Vital	Estabilidad Estructural
Servicio (SS)				
Diseño (SD)			X	
Máximo (SM)				X

Niveles recomendados de desempeños esperados (SEAOC, 1995)

1. Instalaciones Básicas		Nivel de Desempeño Sísmico			
2. Instalaciones Esenciales/Riesgosas		Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad	Colapso
3. Instalaciones de Seguridad Crítica					
0...Desempeño inaceptable					
Nivel del Movimiento Sísmico	Frecuente (T=43 años)	1	0	0	0
	Ocasional (T=72 años)	2	1	0	0
	Raro (T=475 años)	3	2	1	0
	Muy Raro (T=970 años)	-	3	2	1

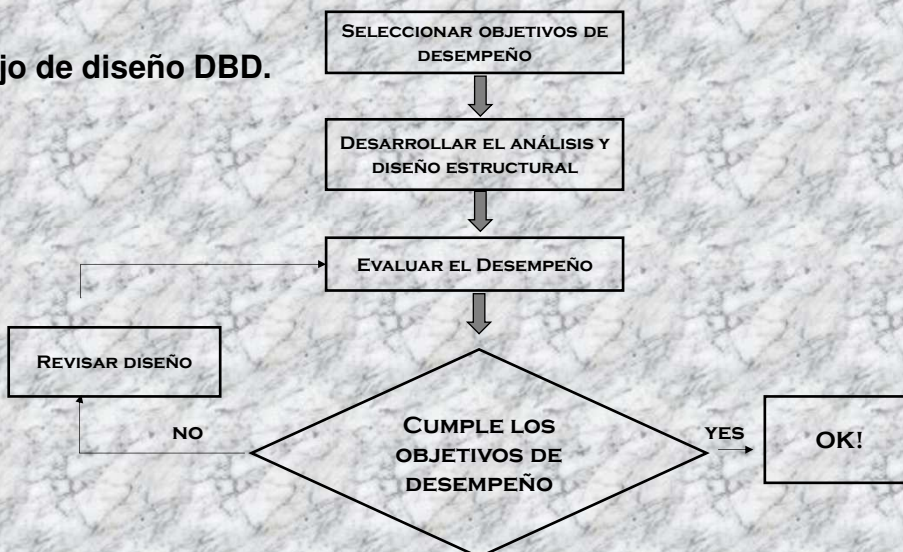




## DISEÑO POR DESEMPEÑO



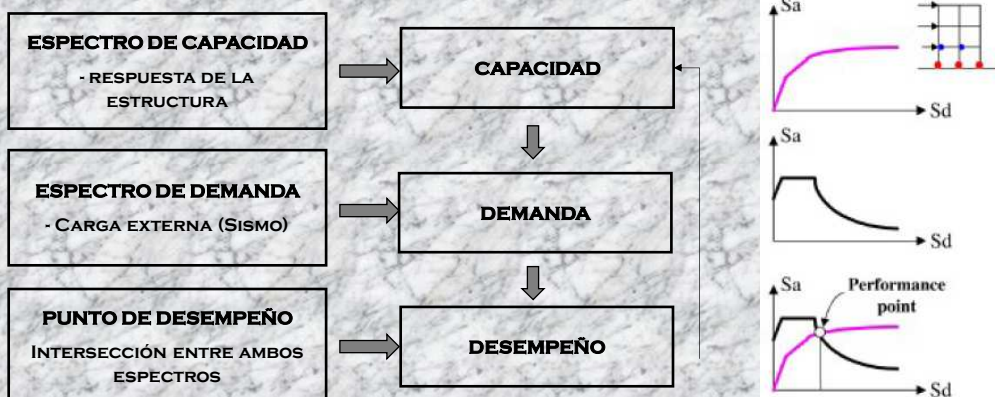
### ➤ Flujo de diseño DBD.



## DISEÑO POR DESEMPEÑO



### ➤ Determinar el punto de desempeño



- En acuerdo y revisión de profesionales, clientes y oficiales ..quienes participan en el proyecto, determinan el nivel de desempeño

## DISEÑO POR DESEMPEÑO



### Ventajas del DBD

- Método sistemático para evaluar el desempeño de una estructura.
- Diseño con alto nivel de confianza
- Diseño de estructuras que están fuera de los límites de los códigos.
- Evaluación del desempeño sísmico de estructuras existentes.
- Ofrece a la sociedad el potencial de ser más eficiente y eficaz en la inversión de recursos financieros para evitar futuras pérdidas por terremoto

## DISEÑO POR DESEMPEÑO



### Diferencia con diseños tradicionales

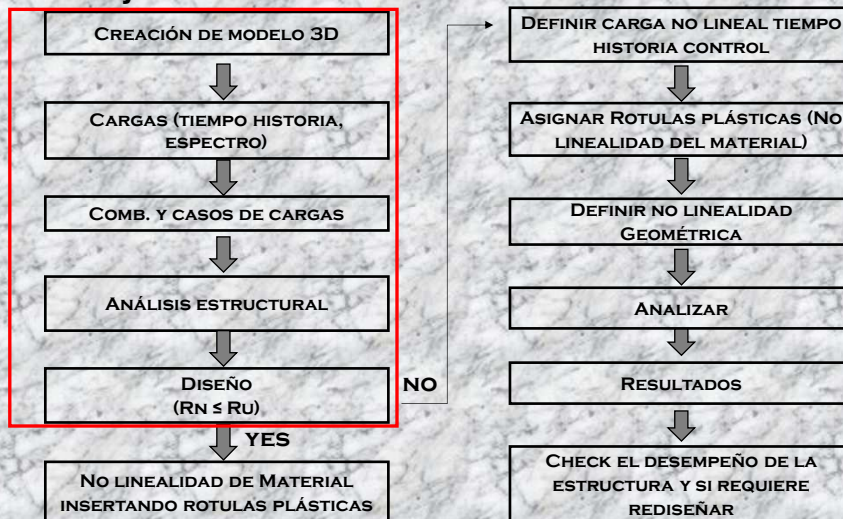
Diseños convencionales	Diseño por desempeño
.Dos niveles de enfoque (ELU y ELS)	Varios niveles de enfoques, preocupación explícita por el desempeño, E-L intermedios.
Basado en la fuerza de aproximación, no tiene medida de la capacidad de deformación.	Se basa en cuantificar la deformación de los miembros y del conjunto, bajo acción sísmica bajo cierto nivel de peligro sísmico
Las deformaciones son considerados hasta los estados elásticos.	La deformaciones son mejores cantidades para evaluar el daño que los esfuerzos, ya que se espera que se deforma mas allá del estado elástico
Comportamiento elástico	Comportamiento inelástico.



## DISEÑO POR DESEMPEÑO



### Flujo de análisis y diseño no Lineal



## CONCLUSIONES



1. Objetivos
  - El análisis estático no lineal, es de rápida aplicación y se puede utilizar en estructuras nuevas y existentes.
2. Descripción de
3.
  - Mientras se tenga mayor información de las características de los elementos y de la estructura el análisis no lineal será mas exacto.
  - El análisis no lineal es el método mas potente para evaluación y reparación de estructuras.
4. Análisis sísmico
  - En elementos importantes de estructuras (vigas de gran peralte, Dech, pilas) requiere de
5. Análisis no lineal.
  - El diseño por desempeño es la herramienta muy eficaz que considera el estado de la estructura.
6. Diseño del AMS
7. Resultados y discusión
8. Conclusiones y recomendaciones

## RECOMENDACIONES



- Comportamiento no lineal de otro tipo de estructuras
- Incrementar la base teórica del comportamiento inelástico
- Estudio de varios edificios distintos en altura.
- Método de diseño basado en desplazamientos
- Método de diseño basado en fuerzas



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**

**MCS. ABEL EDWAR ESTEBA APAZA**  
**WSP: +51 976702606**  
**FB. EDWAR ESTEBA**  
**ABEL.EDWAR@HOTMAIL.COM**