



Curso de Diseño de Estructuras Sismorresistentes

Tercera Parte

Diseño de Sistemas de un Grado de Libertad Basado en Fuerzas

Inestabilidad Dinámica de Sistemas de un Grado de Libertad

PROF. EDUARDO MIRANDA

DEPARTMENT OF CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING
STANFORD UNIVERSITY

OBJETIVOS DE ESTA PARTE DEL CURSO

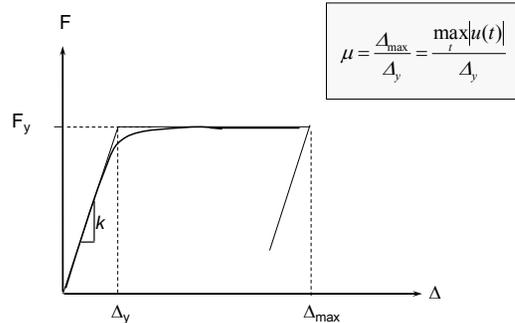


1. Introducir los conceptos principales del diseño sismorresistente basado en fuerzas.
1. Discutir la respuesta sísmica de sistemas de un grado de libertad con comportamiento no lineal discutiendo el efecto de la resistencia lateral de la estructura en las demandas de ductilidad.
2. Introducir el concepto de espectro no lineal, de demanda de resistencia lateral elástica, de demanda de resistencia lateral inelástica y de factor de reducción por ductilidad.
3. Discutir el concepto de inestabilidad dinámica y de la resistencia lateral necesaria para evitar el colapso.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

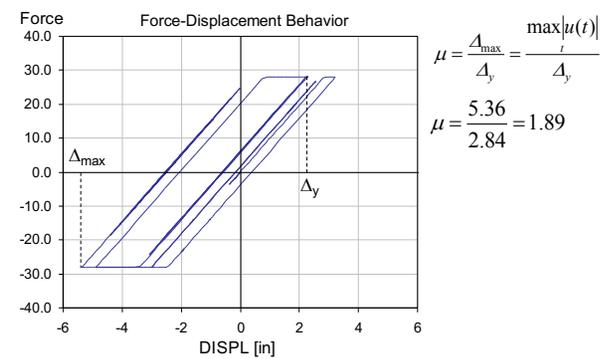
DEMANDA DE DUCTILIDAD DE DESPLAZAMIENTO



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE DUCTILIDAD DE DESPLAZAMIENTO



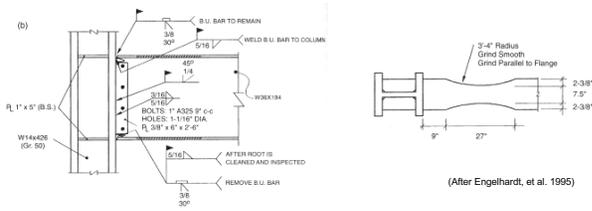
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

EJEMPLOS DE COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO NO LINEAL



Conexión viga-columna de acero estructural tipo RBS



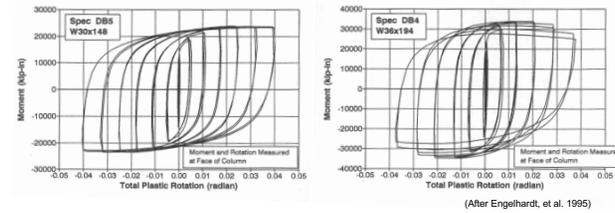
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

EJEMPLOS DE COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO NO LINEAL



Conexión viga-columna de acero estructural tipo RBS



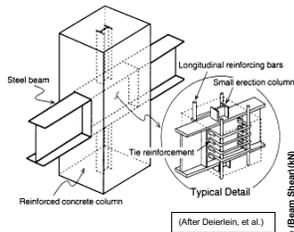
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

EJEMPLOS DE COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO NO LINEAL

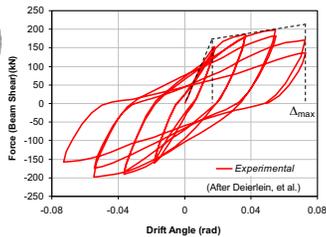


Demanda de ductilidad de desplazamiento en conexión compuesta



$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} = \frac{\max|\mu(t)|}{\Delta_y}$$

$$\mu = \frac{0.073}{0.016} = 4.56$$



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESPUESTA ESTRUCTURAL PICO A PARTIR DEL ESPECTRO DE RESPUESTA



De clases anteriores recordamos que :

El valor pico de la fuerza lateral (cortante basal) en un sistema con comportamiento elástico lineal se calcula como el producto de la rigidez lateral por el valor pico del desplazamiento relativo:

$$F_0 = kD = kS_d$$

Dado que $A = \omega_n^2 S_d$ entonces la el valor pico de la fuerza lateral también puede calcularse como:

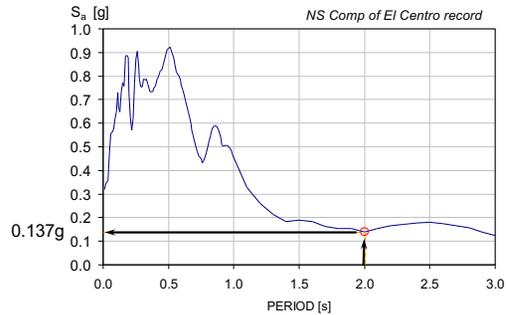
$$F_0 = mA = \frac{A}{g} W \approx \frac{S_a}{g} W$$

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESPUESTA ESTRUCTURAL PICO A PARTIR DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

Calcule el valor pico de la demanda de resistencia lateral necesaria para que un sistema de un grado de libertad con periodo $T_n=2.0$ s y fracción de amortiguamiento de $\zeta=0.05$ permanezca elástico al ser sometido a la componente NS del registro de El Centro.



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE RESISTENCIA ELÁSTICA

La **DEMANDA DE RESISTENCIA ELÁSTICA** F_e se define como la resistencia lateral necesaria para que el sistema permanezca elástico (para que no fluya) al ser sometido a un determinado movimiento del terreno.

$$F_e = mA = \frac{A}{g} W$$

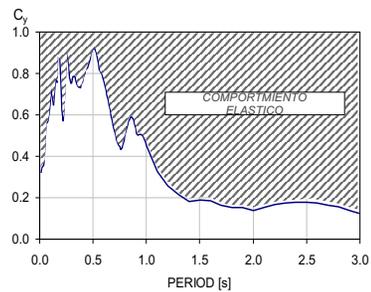
$$C_e = \frac{F_e}{W} = \frac{A}{g} \approx \frac{S_a}{g}$$

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE RESISTENCIA ELÁSTICA

Si el sistema tiene un coeficiente sísmico $C_y \geq S_a/g$, entonces la respuesta será **ELÁSTICA**.

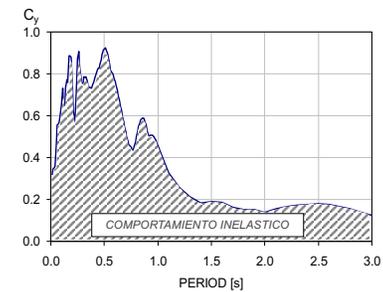


Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE RESISTENCIA ELÁSTICA

Por el contrario, si el sistema tiene un coeficiente sísmico $C_y < S_a/g$, entonces la respuesta será **INELÁSTICA**.



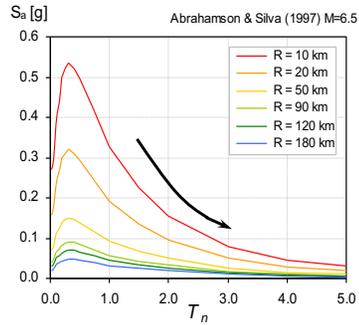
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE RESISTENCIA ELÁSTICA



Para una determinada magnitud y distancia la demanda de resistencia elástica se puede estimar a partir de una ley de atenuación. Para estructuras construidas en roca o en suelo firme con periodo de vibración aproximadamente mayor que 0.6s, la demanda de resistencia elástica en promedio disminuye con el incremento en el periodo de vibración



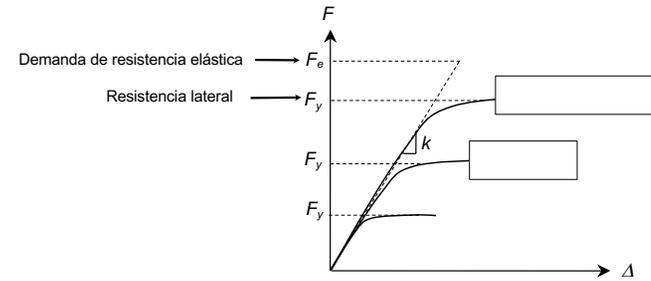
Curso de Diseño Sismorresistente,

Prof. Eduardo Miranda

RESISTENCIA LATERAL DE DISEÑO



En el diseño basado en fuerzas el parámetro de demanda principal es la **RESISTENCIA LATERAL**



Cuál es la **RESISTENCIA LATERAL** para la cual debo diseñar mi estructura?

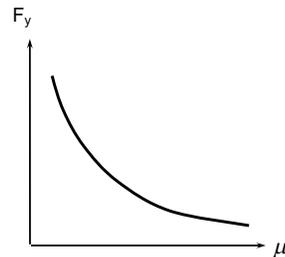
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE DUCTILIDAD



Por lo general, una disminución en la resistencia lateral de la estructura trae consigo un incremento en la demanda de ductilidad con una variación como la mostrada en la figura



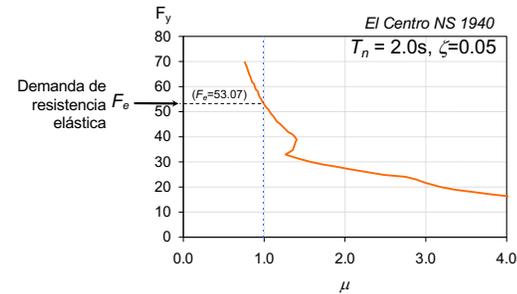
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE DUCTILIDAD



La relación entre la resistencia lateral y la demanda de ductilidad cambia de un movimiento de terreno a otro y de un sistema de un grado de libertad a otro. Por ejemplo, para un sistema con periodo de 2 seg, una fracción de amortiguamiento de 5% y con comportamiento elástoplástico sometido al registro de El Centro se tiene la siguiente relación:



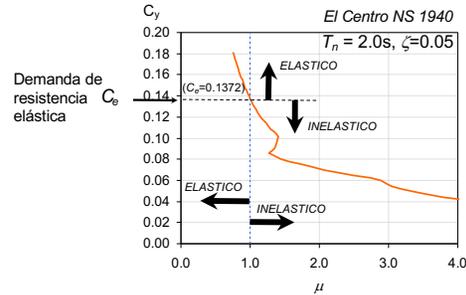
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE DUCTILIDAD



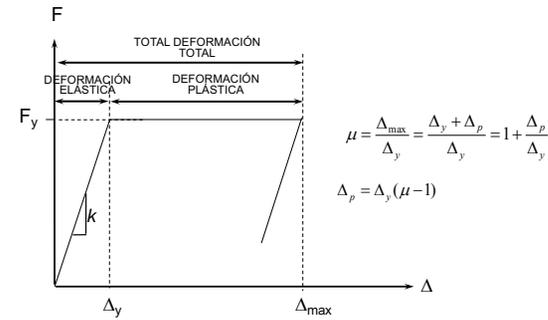
En forma análoga se puede obtener una relación entre la resistencia lateral normalizada por el peso, esto es, entre el coeficiente sísmico y la demanda de ductilidad



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEFORMACIÓN ELÁSTICA Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA DEMANDA DE DUCTILIDAD



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE DUCTILIDAD MÁXIMA TOLERABLE

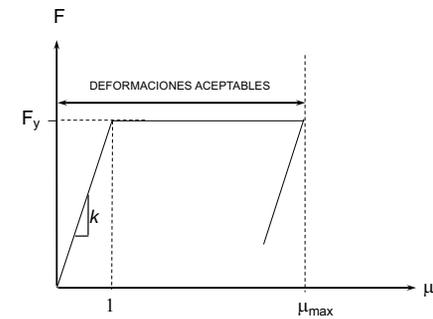


En el diseño sismorresistente basado en fuerzas uno está interesado en controlar las demandas de deformación plástica, esto es, uno desea limitar (controlar) la demanda de deformación plástica por debajo de la máxima deformación máxima tolerable. Esto puede lograrse limitando la demanda de ductilidad por debajo de un límite máximo denominado **DEMANDA DE DUCTILIDAD MÁXIMA TOLERABLE**, μ_t , la cual en ocasiones también se le denomina la **CAPACIDAD DE DUCTILIDAD**.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

DEMANDA DE DUCTILIDAD MÁXIMA TOLERABLE



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

PRINCIPIO BÁSICO DEL DISEÑO SISMORRESISTENTE



La ecuación más importante del diseño sismorresistente es:

$$DEMANDA \leq CAPACIDAD$$

En términos de demandas de ductilidad esto implica:

$$\mu_{DEMANDA} \leq \mu_{CAPACIDAD}$$
$$\mu \leq \mu_t = \mu_{max}$$

CAPACIDAD DE DUCTILIDAD DE DESPLAZAMIENTO



La capacidad de ductilidad de desplazamiento de una estructura depende de muchos factores. Algunos de los factores más importantes que afectan la capacidad de ductilidad de desplazamiento de una estructura son:

- El tipo de estructura (edificio, puente, casa, etc.)
- El material estructural (acero, concreto reforzado, madera, mampostería, etc.)
- El sistema estructural resistente a cargas laterales
- El nivel de detallado

Cuando se usan sistemas de un grado de libertad equivalentes para representar sistemas de varios grados de libertad debe tenerse en cuenta que la capacidad de ductilidad de desplazamiento no es la de un elemento, una conexión o un entrepiso sino la de toda la estructura. Esto es, el hecho de que un elemento o una conexión pueda soportar demandas de ductilidad de 5 o 6 no necesariamente implica que toda la estructura pueda desarrollar una ductilidad de 5 o 6.

DISEÑO BASADO EN FUERZAS



Supongamos que

$$\mu_t = 3$$

Cúal es la resistencia lateral mínima que debe tener la estructura para que garantice que al ser sometido a un acelerograma específico se cumpla que

$$\mu \leq \mu_t$$

Para responder a esta pregunta, uno está interesado en calcular la resistencia lateral que hace que la demanda de ductilidad sea igual (dentro de una cierta tolerancia, como por ejemplo 1%) a la demanda de ductilidad máxima tolerable (capacidad de ductilidad de desplazamiento).

RESISTENCIA LATERAL ASOCIADA A UNA DETERMINADA DEMANDA DE DUCTILIDAD



Para un determinado acelerograma podemos obtener la resistencia lateral que produce una determinada demanda de ductilidad por medio de iteraciones (prueba y error).

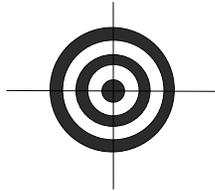
Procedimiento básico:

1. Darle la sistema de un grado de libertad una resistencia lateral inicial arbitraria;
2. Lleve a cabo un análisis no lineal paso a paso para determinar la demanda de ductilidad;
3. Compare la demanda de ductilidad calculada en el paso 2 con la ductilidad máxima tolerable;
4. Si la demanda de ductilidad no es igual a la ductilidad máxima tolerable (dentro de una cierta tolerancia) entonces ajuste la resistencia lateral del sistema y repita los pasos 2 a 4.

DUCTILIDAD OBJETIVO



Dado que uno modifica la resistencia lateral para arriba o para abajo hasta que uno le "atine" a la ductilidad máxima tolerable, esta última también se le conoce como *DUCTILIDAD OBJETIVO*.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DISEÑO



Objetivo principal del diseño :

$$\mu \leq \mu_t$$

Medio para alcanzarlo :

$$C_y \geq C_i (\mu = \mu_t)$$

Una vez que conocemos C_y entonces la fuerza de diseño es

$$F_y = C_y W$$

DEMANDA DE RESISTENCIA INELÁSTICA



La *DEMANDA DE RESISTENCIA INELÁSTICA* se define como la resistencia lateral mínima necesaria para limitar la demanda de ductilidad de desplazamiento por debajo de la ductilidad máxima tolerable (de la capacidad de ductilidad de desplazamiento)

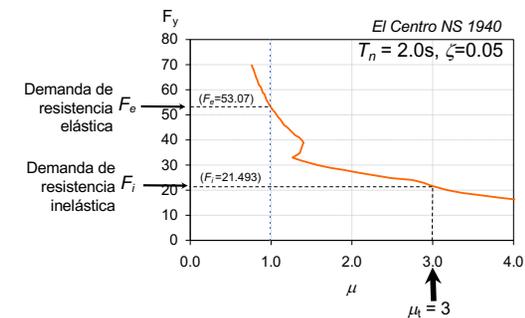
$$F_i(\mu = \mu_t)$$

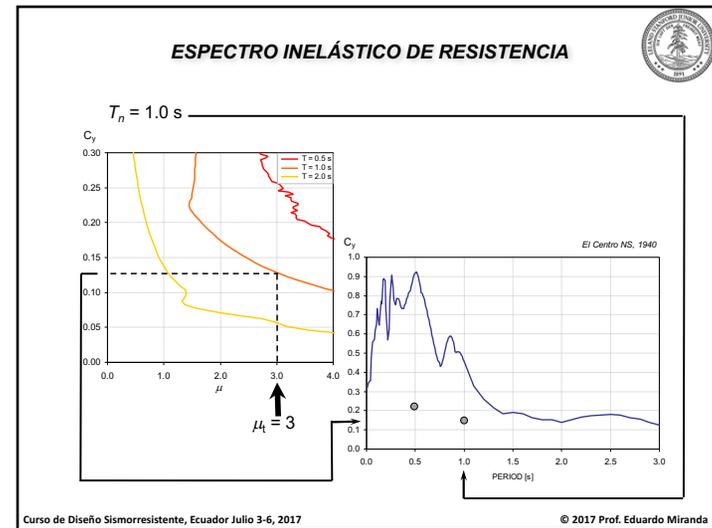
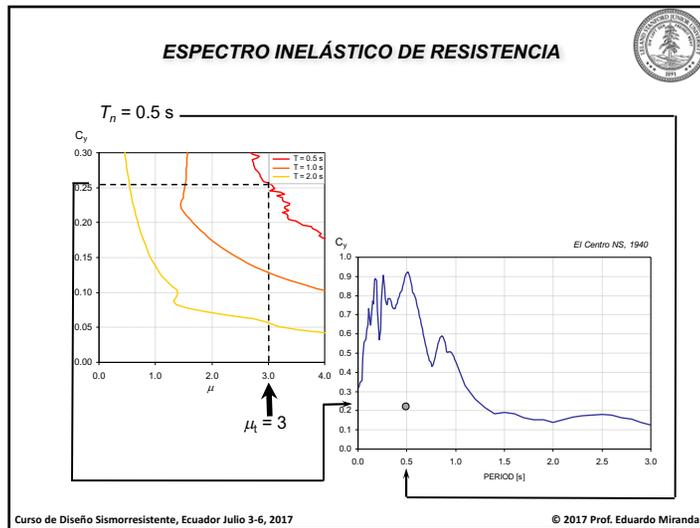
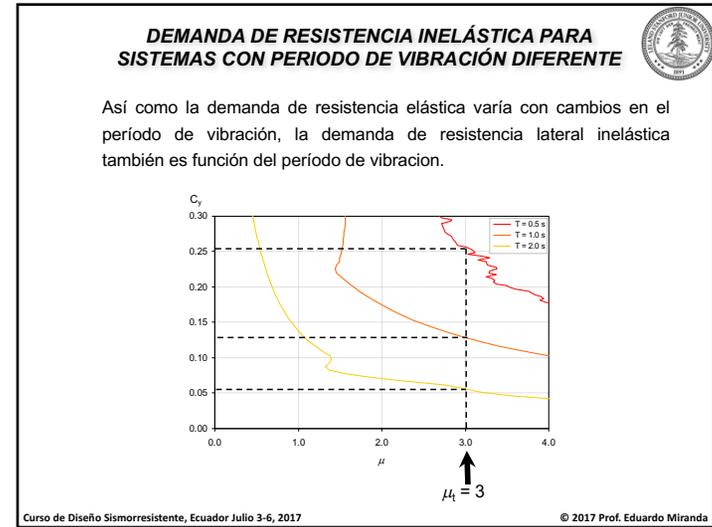
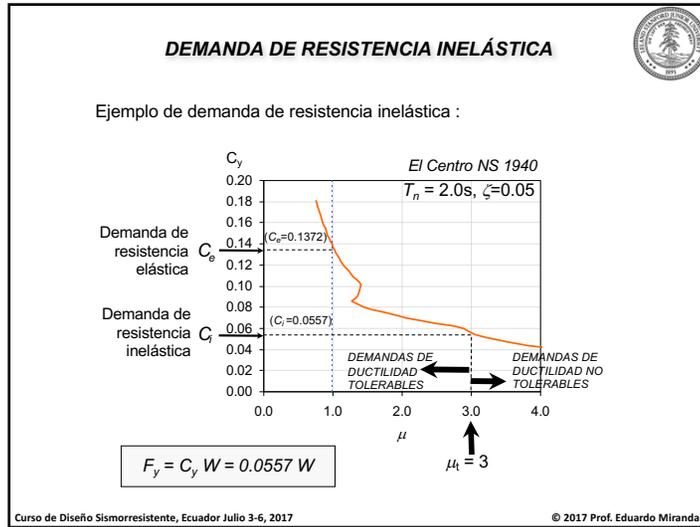
Cualquier resistencia lateral menor que $F_i(\mu = \mu_t)$ da como resultado una demanda de ductilidad mayor que la ductilidad máxima tolerable ($\mu > \mu_t$).

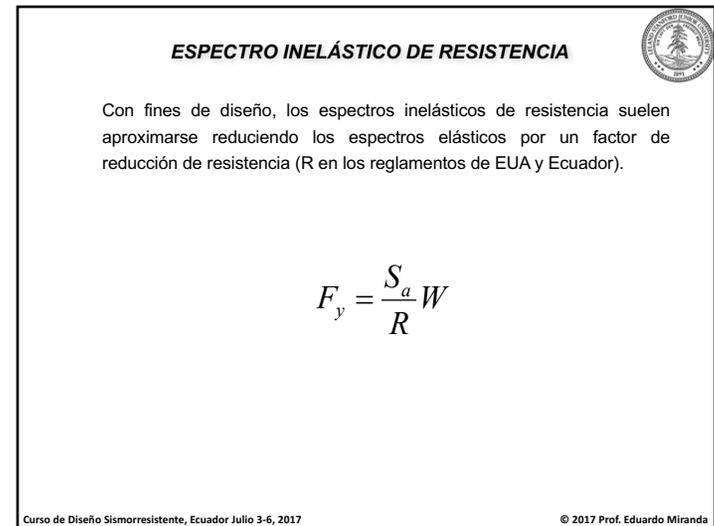
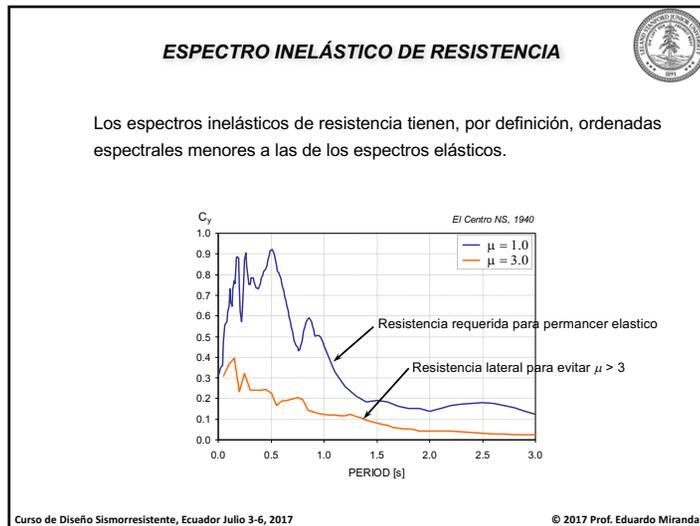
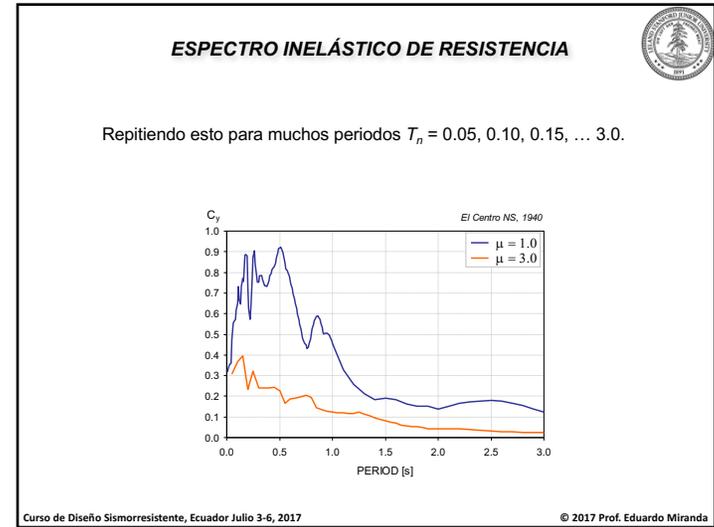
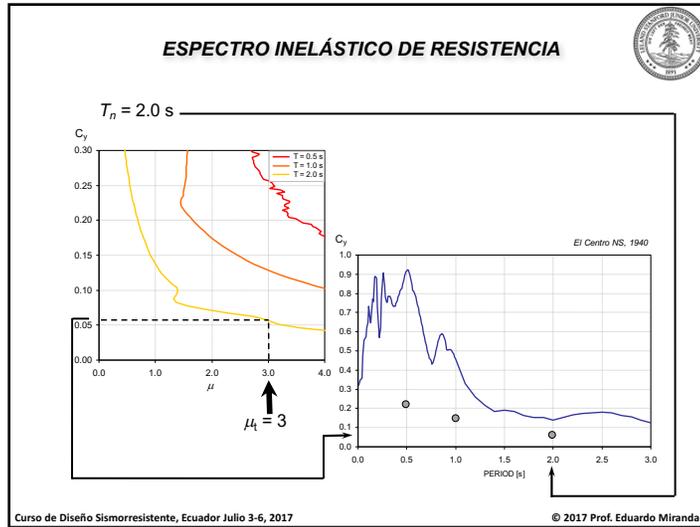
DEMANDA DE RESISTENCIA INELÁSTICA



Ejemplo de demanda de resistencia inelástica :







ESPECTRO INELÁSTICO DE RESISTENCIA



El cociente de la resistencia requerida para mantener al sistema elástico y la resistencia requerida para mantener la demanda de ductilidad pico por debajo de un nivel máximo tolerable se le denomina FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA..

$$R_{\mu} = \frac{F_y(\mu = 1)}{F_y(\mu = \mu_t)}$$

Mismo que también puede expresarse como

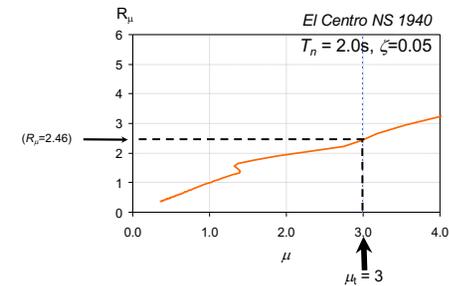
$$R_{\mu} = \frac{C_y(\mu = 1)}{C_y(\mu = \mu_t)}$$

El subíndice μ en este factor de resistencia es para indicar que dicho factor de reducción resistencia está asociado a una determinada ductilidad, o sea, podemos diseñar para una menor resistencia a cambio de permitir que la estructura tenga un comportamiento no lineal.

ESPECTRO INELÁSTICO DE RESISTENCIA



Para un cierto movimiento de terreno, el FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA, es el factor de resistencia máximo que uno puede usar si uno quiere limitar la demanda de ductilidad a que esté por debajo de su valor máximo tolerable. Si uno utiliza un factor de reducción más grande entonces la demanda de ductilidad excederá a la máxima tolerable.



ESPECTRO INELÁSTICO DE RESISTENCIA



Objetivo principal :

$$\mu \leq \mu_t$$

Procedimiento básico :

$$F_y = \frac{F_e}{R} = \frac{m S_a}{R} ?$$

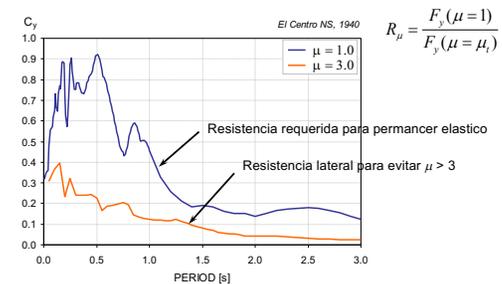
Para ello debemos conocer :

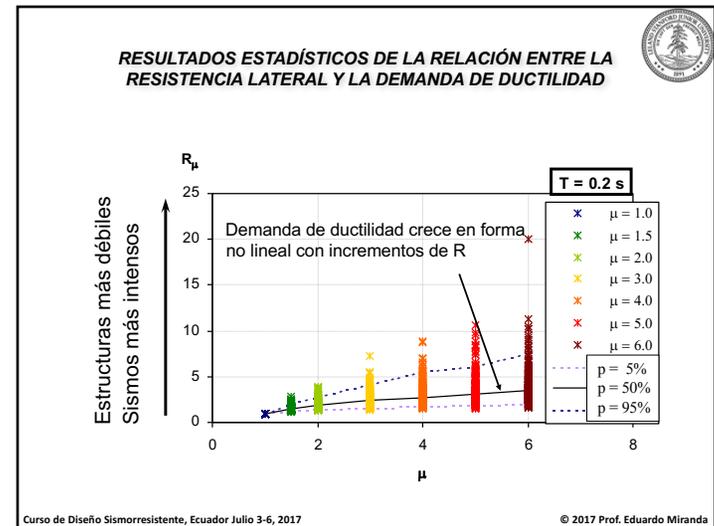
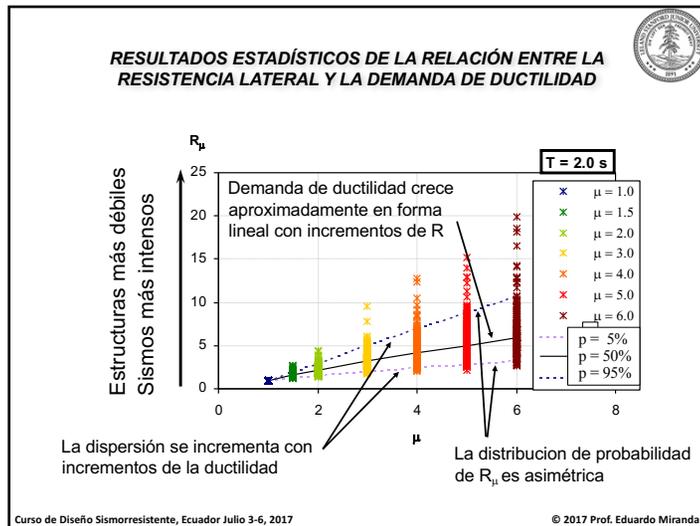
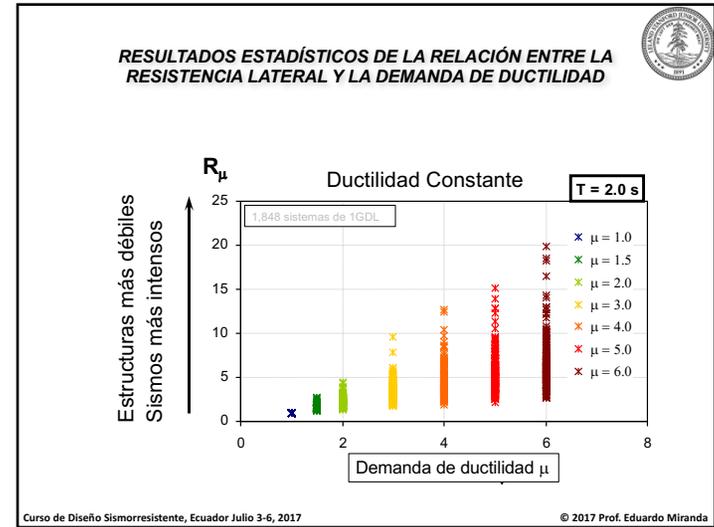
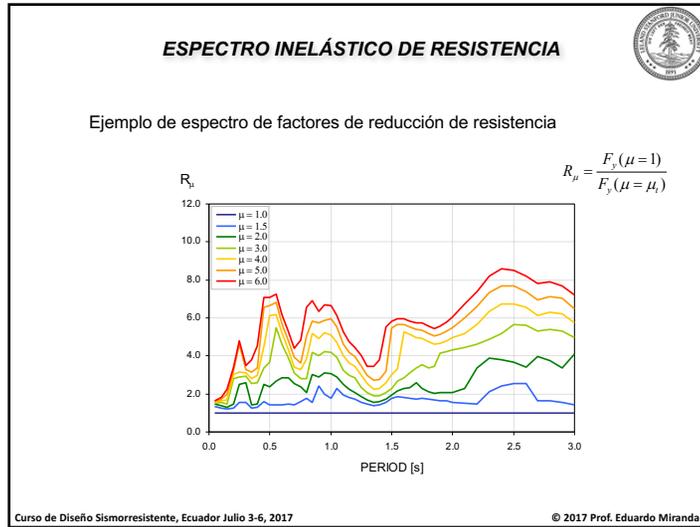
$$R_{\mu}$$

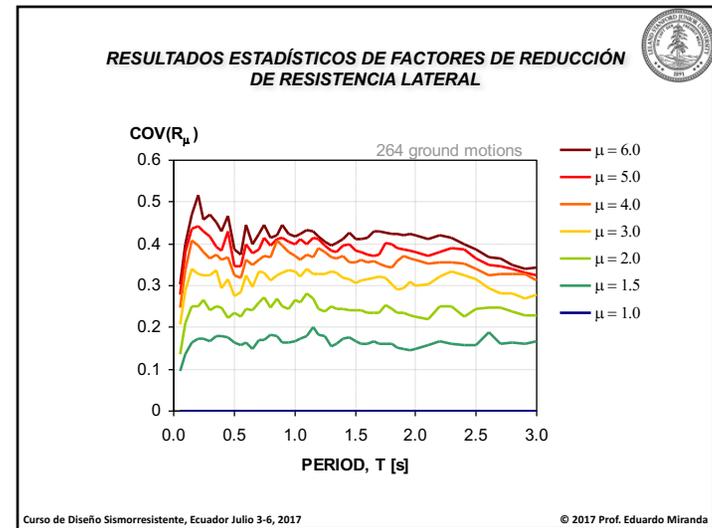
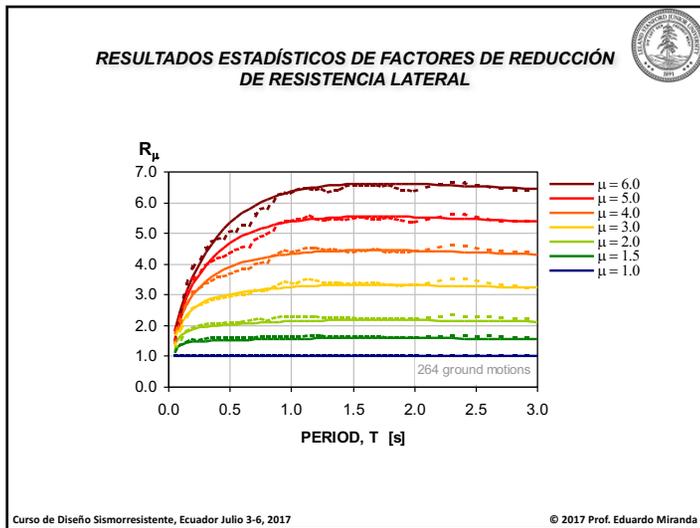
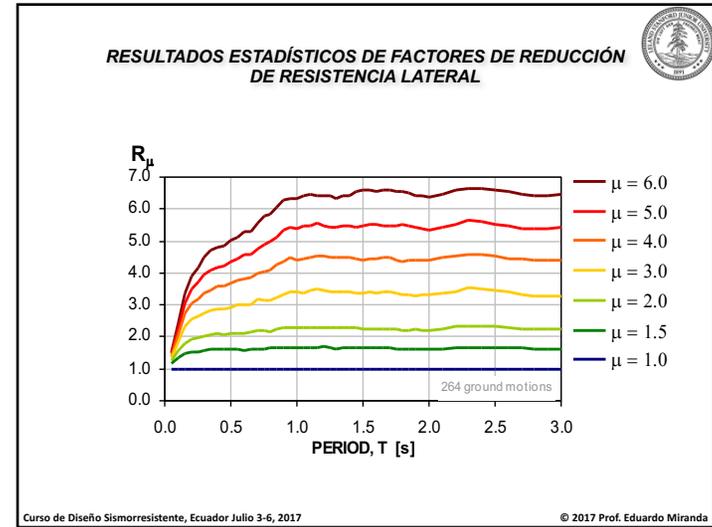
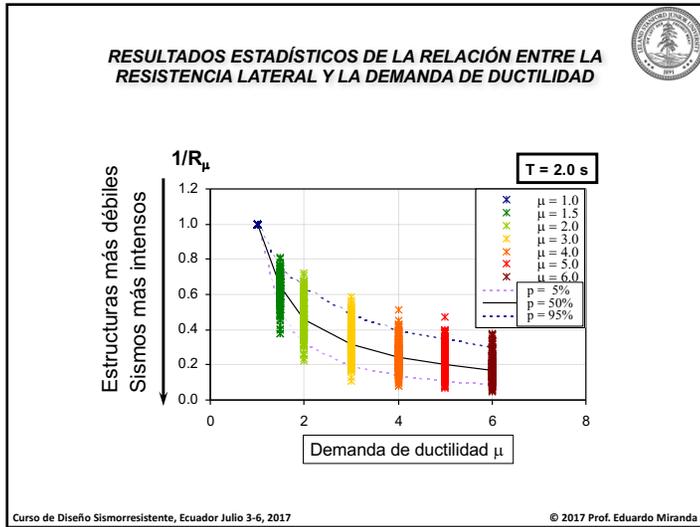
ESPECTRO INELÁSTICO DE RESISTENCIA



Se puede calcular un espectro de FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA dividiendo el espectro de resistencia inelástico entre el factor de resistencia elástico.







FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Newmark y Hall 1982.

$$\begin{aligned} \text{For } 0 \leq T < \frac{T_1}{10} & R_\mu = 1 \\ \text{For } \frac{T_1}{10} \leq T < \frac{T_1}{4} & R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \left[\frac{T_1}{4T} \right]^{2.513 \log \left[\frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \right]} \\ \text{For } \frac{T_1}{4} \leq T < T_1' & R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \\ \text{For } T_1' \leq T < T_1 & R_\mu = \frac{T\mu}{T_1} \\ \text{For } T \leq T < T_2 & R_\mu = \mu \\ \text{For } T_2 \leq T < 10.0 \text{ s} & R_\mu = \mu \end{aligned}$$

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Newmark y Hall (cont.).

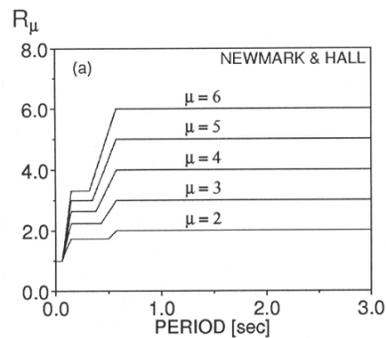
where the limiting periods T_1 , T_1' and T_2 are given by

$$\begin{aligned} T_1 &= 2\pi \frac{\phi_{ev} V}{\phi_{es} A} \\ T_1' &= T_1 \frac{\mu}{\sqrt{2\mu - 1}} \\ T_2 &= 2\pi \frac{\phi_{ed} D}{\phi_{ev} V} \end{aligned}$$

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Newmark y Hall (cont.).



FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Nassar y Krawinkler 1991

$$R_\mu = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c}$$

En donde el coeficiente c es función del periodo de vibrar y se calcula con esta expresión

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T}$$

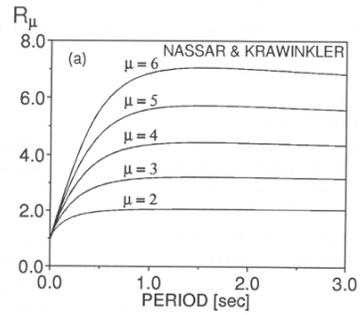
En donde α es el cociente de la rigidez post-elástica y la rigidez inicial (elástica) y a y b son constantes que dependen de α de la siguiente manera

α	a	b
0.00	1.00	0.42
0.02	1.00	0.37
0.10	0.80	0.29

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Nassar y Krawinkler 1991



FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Miranda 1991

$$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \geq 1$$

En donde Φ es función de μ , de T y de las condiciones del terreno como se indica a continuación

Para estructuras sobre roca $\Phi = 1 + \frac{1}{10 T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[-\frac{3}{2} \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right]$

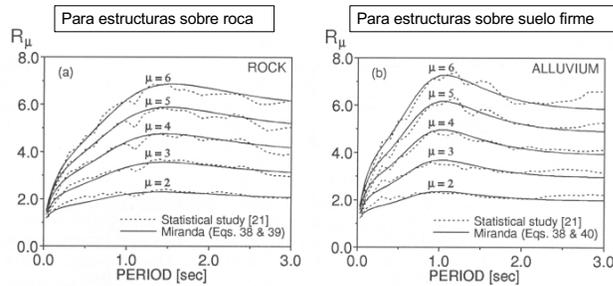
Para estructuras sobre suelo firme $\Phi = 1 + \frac{1}{12 T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right]$

Para estructuras sobre suelo blando ($V_{s30} < 120$ m/s) $\Phi = 1 + \frac{T_g}{3 T} - \frac{3 T_g}{4 T} \exp \left[-3 \left(\ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right]$

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



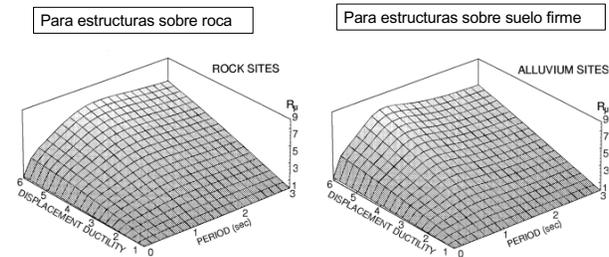
Miranda 1991



FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



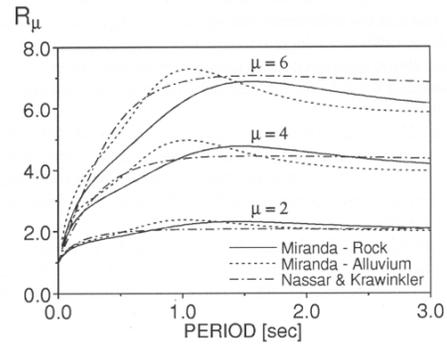
Miranda 1991



FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Comparación de dos expresiones aproximadas



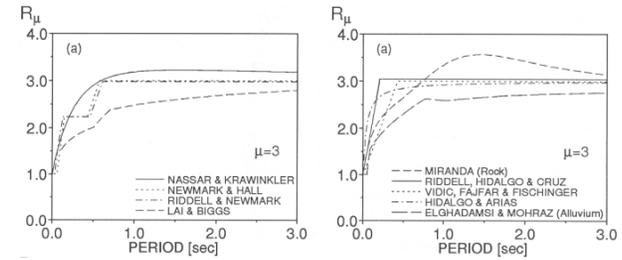
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Comparación de varias expresiones aproximadas



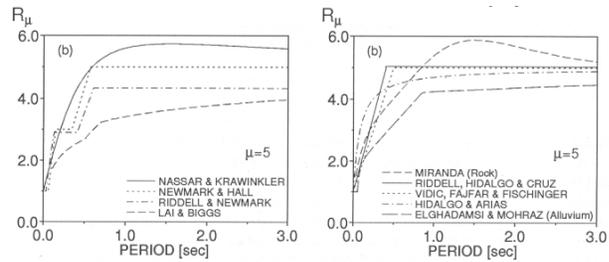
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Comparación de varias expresiones aproximadas



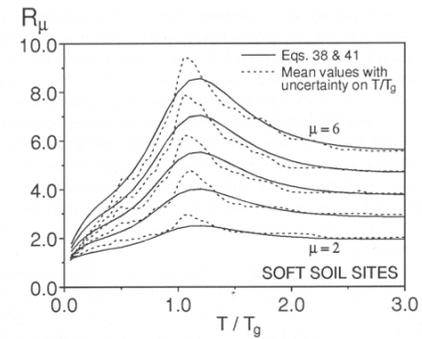
Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS



Miranda 1991 Para estructuras sobre suelo blando ($V_{s30} < 120$ m/s)

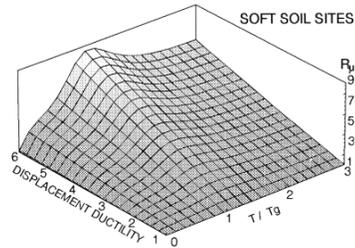


Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS

Para estructuras sobre suelo blando ($V_{s30} < 120$ m/s)

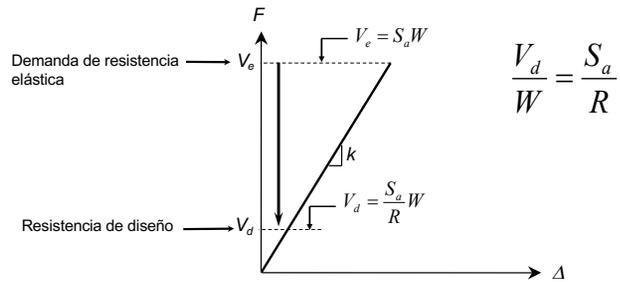


FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA APROXIMADOS

Miranda 1996 (ecuación muy simple que puede utilizarse para estructuras en roca o suelo firme)

$$R_{\mu} = \mu + (1 - \mu) \exp\left[\frac{-16T}{\mu}\right]$$

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS (Y REGLAMENTO DOMINICANO)

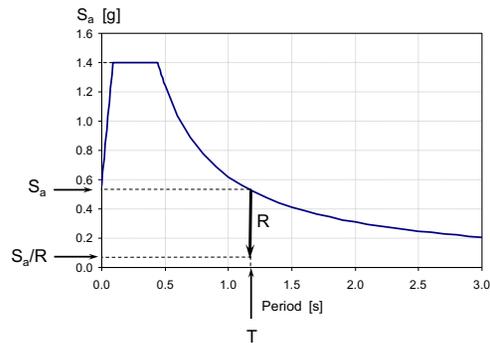


El factor R por lo general varía entre 3 y 8

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS

Basic Seismic Force Resisting System	R	Ω _o	C _d
<i>Building Frame Systems</i>			
Composite eccentrically braced frame	8.0	2.0	4.0
Composite concentrically braced frame	5.0	2.0	4.0
Ordinary composite braced frame	3.0	2.0	3.0
Composite steel plate shear walls	6.5	2.5	5.5
Special composite reinforced concrete shear walls with steel elements	6.0	2.5	5.0
Ordinary composite reinforced concrete shear walls with steel elements	5.0	2.5	4.5
<i>Moment Resisting Frame Systems</i>			
Special composite moment frame	8.0	3.0	5.5
Intermediate composite moment frame	5.0	3.0	4.5
Composite partially restrained frame	6.0	3.0	5.5
Ordinary composite moment frame	3.0	3.0	2.5
<i>Dual Systems with Special Moment Frames (Capable of Resisting at Least 30% of the Prescribed Seismic Force)</i>			
Composite eccentrically braced frame	8.0	2.5	4.0
Composite concentrically braced frame	6.0	2.5	5.0
Composite steel plate shear walls	8.0	2.5	6.5
Special composite reinforced concrete shear walls with steel elements	8.0	2.5	6.5
Ordinary composite reinforced concrete shear walls with steel elements	7.0	2.5	6.0
<i>Dual Systems with Intermediate Moment Frames (Capable of Resisting at Least 20% of the Prescribed Seismic Force)</i>			
Composite concentrically braced frame	5.0	2.5	4.5
Ordinary composite braced frame	4.0	2.5	3.0
Ordinary composite reinforced concrete shear walls with steel elements	5.5	2.5	4.5

**FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN
REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS
(Y REGLAMENTO DE ECUADOR)**



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

**FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN
REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS
(Y REGLAMENTO ECUATORIANO)**



Es importante hacer notar que los factores de reducción de resistencia en los reglamentos de los Estados Unidos (por ejemplo en el IBC o en NEHRP) así como en el reglamento Ecuatoriano (NEC-2015) no son función del periodo de vibración (para un sistema estructural dado se usa el mismo factor de reducción independientemente de cuál sea el periodo de vibración), lo cual de acuerdo a lo que aquí hemos visto, es claramente inadecuado.

Los factores de reducción de resistencia dependen del periodo de vibrar de la estructura y no es correcto usar un factor de reducción de resistencia constante. En particular, para estructuras de periodo corto esto puede producir demandas de ductilidad mayores a las máximas tolerables.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

**FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN
REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS
(Y REGLAMENTO ECUATORIANO)**



A continuación reproduzco un párrafo del reporte ATC-19 sobre factores de reducción (ATC-19 report entitled "Structural Response Modification Factors", ATC 1995):

"Response modification factors play a key, but controversial, role in the seismic design process in the United States. No other parameter in the design base shear equation impacts design actions in a seismic framing as does the R factor. Despite the profound influence of R on the seismic performance of buildings in the United States, no sound technical basis exists for determining the values of R tabulated in seismic design codes in the United States. There is an obvious and pressing need to develop a rational technical basis for R factors if equivalent lateral force design procedures are to be retained for seismic design."

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

Conclusions del mismo reporte ATC-19 "Structural Response Modification Factors" (ATC 1995):



1. There is no mathematical basis for the response modification (R) factors tabulated in modern seismic codes in the United States.
2. A single value of R for all buildings of a given framing type, irrespective of plan and vertical geometry, cannot be justified.
3. To ensure consistent levels of damage, values for R should depend on both the fundamental period of the building and the soil type on which the building is founded.
4. The values assigned to R for a given framing systems should vary between seismic zones because the reserve strength in a framing system will probably be a function of the ratio of the gravity loads to the seismic loads. Also, detailing requirements currently vary by zone.
5. The values currently assigned to R for different framing system will probably not result in uniform levels of risk for all buildings.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS



A more recent study also evaluated R factors in current U.S. codes



The objective of this publication was to develop a procedure to establish consistent and rational building system performance and response parameters (R , C_d , Ω_d) for the linear design methods traditionally used in current building codes. The primary application of the procedure is for the

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS



From the conclusions of the FEMA P695 report

Precision of Seismic Performance Factors

In general, there is no practical difference in the collapse performance of systems designed with fractional differences in the response modification coefficient, R . For example, collapse performance of structures designed for $R = 6$ and $R = 6.5$ is essentially the same, all else being equal. There is a discernible, but modest difference in collapse performance for systems designed for moderately different values of R , for example $R = 6$ and $R = 8$. There is, however, a significant difference in collapse performance for systems designed using different multiples of R , as in $R = 3$ versus $R = 6$. Current values of R provided in Table 12.2-1 (e.g., 3, 3-1/4 and 3-1/2) reflect a degree of precision that is not supported by results of example collapse evaluations.

(After FEMA P695)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA EN REGLAMENTOS DE LOS ESTADOS UNIDOS



From the conclusions of the FEMA P695 report

Short-Period Buildings

Consistent with prior research, values of collapse margin ratio are consistently smaller for short-period buildings, regardless of the type of seismic-force-resisting system. Unless they have adequate design strength, short-period buildings generally do not meet collapse performance objectives of the Methodology.

These findings suggest a possible need for period-dependent seismic performance factors, such as a short-period value and a 1-second value of the response modification coefficient, R , for each system. At present, the Methodology determines a single value of each seismic performance factor, independent of period, and consistent with the design requirements of ASCE/SEI 7-05. It could, however, be modified to determine period-dependent values of each factor.

(After FEMA P695)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESUMEN



1. La demanda de resistencia elástica es la resistencia lateral necesaria (que debe poseer la estructura) para permanecer elástica al ser sometida a un determinado movimiento de terreno. Esta resistencia se puede determinar con un análisis elástico o bien a partir de las ordenadas de un espectro de respuesta elástico del movimiento de terreno.
2. La demanda de resistencia inelástica es la resistencia lateral necesaria (mínima resistencia que debe poseer la estructura) para limitar la demanda de ductilidad por debajo de un cierto valor máximo tolerable al ser sometida a un determinado movimiento de terreno. Esta resistencia lateral mínima se calcula con un análisis paso a paso no lineal iterando con la resistencia lateral hasta tener una demanda de ductilidad que es aproximadamente igual a la demanda de ductilidad máxima tolerable.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESUMEN



3. El espectro inelástico es una herramienta muy útil para determinar fuerzas laterales de diseño pues sus ordenadas corresponden a las pseudo-aceleraciones normalizadas o bien coeficientes sísmicos que conducen a un adecuado control de demandas de ductilidad.
4. Tanto las demandas de resistencia elástica como la demanda de resistencia inelástica cambia de un acelerograma a otro. Ambos tienen mucha variabilidad y por lo tanto existe una incertidumbre para determinar estas demandas de resistencia lateral para movimientos sísmicos que aun no han ocurrido (movimientos sísmicos que pueden afectar a nuestra estructura en un futuro).
5. El factor de reducción de resistencia corresponde al máximo factor de reducción de resistencia que uno puede aplicar a la demanda de resistencia elástica para obtener una demanda de ductilidad menor que la máxima tolerable. Este factor de reducción de resistencia también cambia de un acelerograma a otro.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESUMEN



6. Con fines de diseño sismorresistente se obtienen aproximaciones de los espectros no lineales y por lo tanto de las demandas de resistencia inelástica por medio del uso de factores de reducción aproximados que, por medio de expresiones (ecuaciones) relativamente sencillas nos dan una estimación del valor promedio de los factores de resistencia.
7. Los factores de reducción de los reglamentos de los Estados Unidos o del reglamento de Ecuador (NEC-2015) usan factores de reducción que no dependen del periodo de vibración de la estructura cuando en realidad deberían serlo. Muchos otros reglamentos, como el reglamento de México, el de Chile o el Eurocódigo tienen mejores recomendaciones del factor de reducción y si son función del periodo de vibración de la estructura.
8. Yo les recomiendo que usen factores de reducción calculados con las ecuaciones propuestas por un servidor o bien por las propuestas por el Prof. Krawinkler quien era profesor en Stanford.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD



El factor de reducción R_{μ} , aun si se utiliza uno de depende del periodo de vibración y de acuerdo a algunas de las expresiones de Krawinkler o de su servidor, no pueden aplicarse directamente a sistemas de varios grados de libertad (por ejemplo a edificios de más de un nivel).

Esto es porque las demandas de deformación lateral en edificios de más de un nivel las deformaciones NO SE DISTRIBUYEN EN FORMA UNIFORME, esto es siempre ocurre una concentración de distorsión de entrepiso en ciertos niveles y unos entrepisos experimentan distorsiones mucho mayores a las de otros.

El factor R_{μ} controlaría la distorsión PROMEDIO en el edificio, pero no la DEFORMACIÓN MÁXIMA, de allí que sea necesario modificar el factor de reducción para ser aplicados a edificios de más de un nivel y en general para estructuras que no tengan deformaciones lateral uniformes a lo largo de su altura (chimeneas, torres de transmisión, etc.)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD



Como vimos anteriormente, el cortante basal de diseño de una estructura de un grado de libertad se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{SDOF}(\mu = \mu_i) = \frac{V_{SDOF}(\mu = 1)}{R_{\mu}}$$

En que $V_{SDOF}(\mu=1)$ es el cortante basal (en la base de la estructura) que se requiere tenga la estructura para permanecer elástica en el sismo de diseño y R_{μ} es el factor de reducción por ductilidad descrito anteriormente.

(Santa-Ana y Miranda, 2000)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD



Para edificios de varios niveles y otras estructuras de varios grados de libertad en que las deformaciones laterales no se distribuyan en forma uniforme el cortante basal resistente que debe tener la estructura para controlar las demandas de ductilidad de entrepiso por debajo de un nivel aceptable μ_i se puede calcular con la siguiente expresión:

$$V_{MDOF}(\mu = \mu_i) = \frac{V_{SDOF}(\mu = 1)}{R_\mu R_M}$$

En que el factor R_M es un factor de modificación, cuyo valor es menor a uno, para sistemas de múltiples grados de libertad el cual se calcula como:

$$R_M = \frac{V_{SDOF}(\mu = \mu_i)}{V_{MDOF}(\mu = \mu_i)}$$

Las siguientes diapositivas describen algunas de las investigaciones que su servidor ha hecho con sus estudiantes de doctorado sobre este factor.

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD



nisec National Information Service for Earthquake Engineering
University of California, Berkeley

Strength Reduction Factors in Performance-Based Design

By Eduardo Miranda
National Center for Disaster Prevention (CENAPRED)
A.V. Delfin Madrigal 665, 04360 Mexico, D.F., Mexico

Note: this paper was presented at the EERC-CURE Symposium in Honor of Vítimas V. Bertero, January 31 - February 1, 1997, Berkeley, California.

SUMMARY

Strength reduction factors that are used to reduce design forces in earthquake resistant design are discussed. Based on recent research, the paper presents the different components of the so called R factors and discusses how these can be incorporated into a performance-based earthquake resistant design. The first component discussed is the reduction in lateral strength demand produced by nonlinear behavior in the structure which takes into account the hysteretic energy dissipation capacity of the structure. The paper presents first a summary and comparison of recent statistical studies on strength reduction factors computed for single-degree-of-freedom systems undergoing different levels of inelastic deformation when subjected to a large number of recorded earthquake ground motions. Despite having used significantly different ground motions data bases, results from various studies are remarkably similar. The main parameters that affect the amplitude of strength reductions are discussed. The evaluation of the results indicates that strength reductions due to nonlinear behavior are primarily influenced by the maximum tolerable displacement ductility demand, the period of the system and the soil conditions at the site. Based on these parameters simplified expressions that can be used in codes are presented. The paper then describes how strength reduction factors derived from single-degree-of-freedom systems need to be modified in order to be used in the design of multi-degree-of-freedom systems. Reductions in design forces due to overstrength are discussed. These reductions are due to the fact that the lateral strength of a structure is typically higher and in some case much higher than the nominal strength capacity of the structure. These reductions can be divided to take into account the additional strength from the nominal strength to the formation of the first plastic hinge and the additional strength from this point to the formation a mechanism. Finally, the paper discusses how these reductions factors can be implemented in performance-based design.

(Miranda, 1997)

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD



TABLE 1.
MODIFICATION OF STRENGTH REDUCTION FACTORS FOR MDOF STRUCTURES

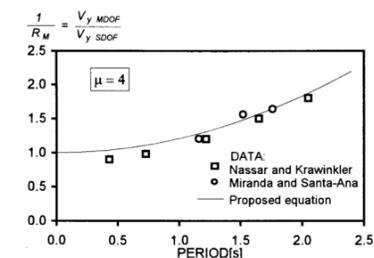
NUMBER OF STORIES	PERIOD OF VIBRATION	STORY DUCTILITY	R_M SCT19.EW	R_M 0625.EW	R_M 5625.NS	\bar{R}_M
8	1.16 s	3	0.85	0.83	0.88	0.85
		4	0.84	0.80	0.85	0.83
		5	0.82	0.79	0.84	0.82
12	1.52 s	3	0.67	0.71	0.78	0.72
		4	0.56	0.68	0.68	0.64
		5	0.49	0.60	0.60	0.56
16	1.76 s	3	0.61	0.72	0.67	0.67
		4	0.61	0.61	0.62	0.61
		5	0.60	0.60	0.64	0.61

(Miranda, 1997)

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD



$$R_M = \left[1 + 0.15 T^2 \cdot \ln(\mu) \right]^{-1}$$



(Miranda, 1997)

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

12WCEE 2000

1446

STRENGTH REDUCTION FACTORS FOR MULTI-DEGREE-OF-FREEDOM SYSTEMS

Perla R SANTA-ANA¹ And Eduardo MIRANDA²

SUMMARY

Strength reduction factors of multi-degree-of-freedom (MDOF) structures are investigated. The study is based on the results of strength reduction factors computed for eight steel moment resisting-frame buildings undergoing different levels of inelastic deformation when subjected to 28 earthquake ground motions. The ground motions used in this study were recorded on different soil conditions corresponding to firm sites (site classes A, B, C and D according to the 1997 NEHRP Provisions). Four main variables are considered: a) the fundamental period of vibration of the building; b) the level of inelastic deformation in the building; c) number of stories; and d) soil conditions. Special emphasis is given to the ratio of the strength reduction factor that results in an adequate control of the maximum interstory displacement ductility ratio in a MDOF structure to the strength reduction factor corresponding to the same ground motion and same level of inelastic deformation in an equivalent single-degree-of-freedom (SDOF) system having a period of vibration equal to the fundamental period of the MDOF structure. Results indicate that strength reduction factors of MDOF structures are typically smaller than those corresponding to SDOF systems. Thus, the lateral strength of MDOF structures needs to be higher than the one obtained from SDOF systems. The ratio of the MDOF to SDOF strength reduction factor is primarily affected by the number of stories and the level of inelastic deformation. Finally, for the site conditions considered in this study, the soil type has only a small effect on MDOF reduction factors.

(Santa-Ana y Miranda, 2000)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

TYPICAL PLANT

Figure 1. Plan of the multi-story buildings analyzed in this study

(Santa-Ana y Miranda, 2000)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda

FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

Figure 2. Elevations of the 4, 8, 12 and 16 story flexible and rigid buildings showing steel members

(Santa-Ana y Miranda, 2000)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda

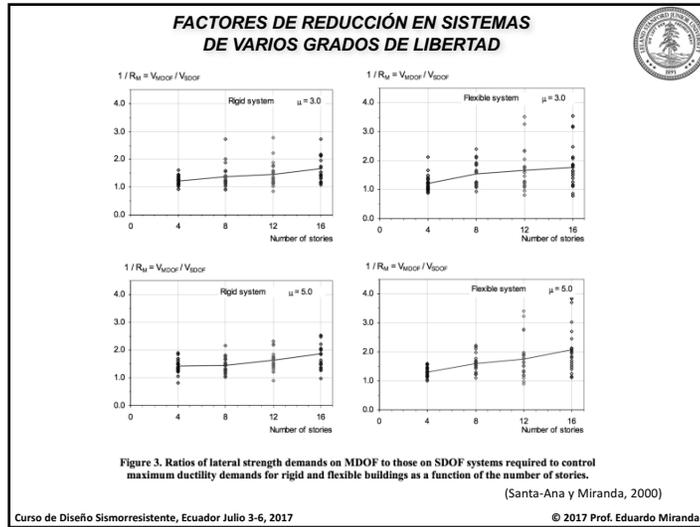
FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

Table 2. List of ground motions used in this study

Earthquake	Station Name Location	Epicentral Distance km	Magnitude M_s	Components and Maximum Accelerations			Site Class	
Whittier	Los Angeles, Griffith Park	22.3	6.1	0	-133.8	360	-121.4	A,B
Loma Prieta	Gilroy 1, Gavilan Coll.	10.9	7.1	90	433.6	360	426.6	A,B
Loma Prieta	San Francisco, Cliff House	57.4	7.1	0	-73.1	90	-105.7	A,B
Northridge	Los Angeles, Griffith Park	24.5	6.8	360	162.9	270	282.1	A,B
San Fernando	Glemdale, 633 E Broadway	18.0	6.5	110	265.7	200	-209.1	C
Whittier	Garvey Reservoir A. Building	11.3	6.1	60	-367.1	330	-468.2	C
Loma Prieta	Corralitos, Eureka Canyon R.	2.2	7.1	90	469.4	360	617.7	C
Loma Prieta	Saratoga, Aloha Ave.	12.4	7.1	90	316.2	0	494.5	C
Northridge	Castaic Old Ridge Route	38.6	7.5	360	504.2	90	557.1	C
Kern County	Los Angeles, Hollywood PE	107.0	7.7	90	41.2	180	-58.1	D
San Fernando	Los Angeles, Hollywood Bldg	23.0	6.5	90	-207.0	180	167.3	D
Whittier	Vernon, Cmd Terminal	11.1	6.1	7	-267.3	277	-239.9	D
Loma Prieta	Gilroy 2, Hwy 101 Bolsa	12.6	7.1	90	316.3	0	394.2	D
Northridge	Los Angeles, Hollywood Bldg	22.5	6.8	360	381.4	90	227.0	D

(Santa-Ana y Miranda, 2000)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda



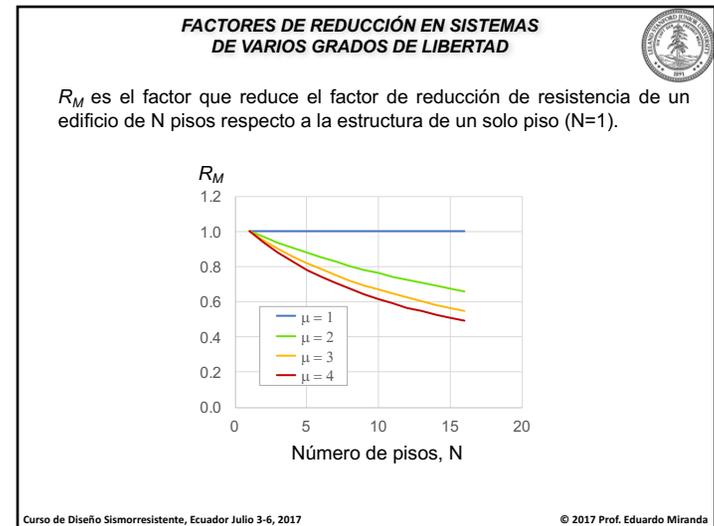
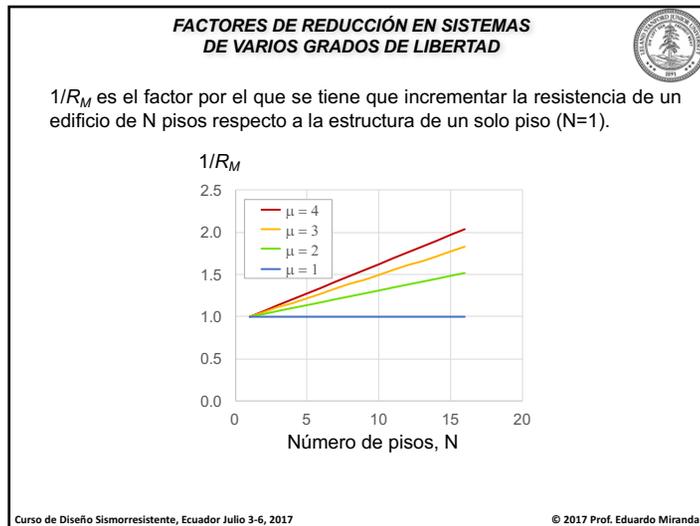
FACTORES DE REDUCCIÓN EN SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

Una expresión sencilla que se puede utilizar para el factor de modificación R_M que reduce el factor de reducción en la medida que el número de pisos se incrementa o en la medida que la ductilidad máxima tolerable se incrementa puede calcularse con esta ecuación:

$$R_M = \left[1 + \frac{(N - 1) \ln(\mu)}{20} \right]^{-1}$$

$1/R_M$ es el factor por el que se tiene que incrementar la resistencia de un edificio de N pisos respecto a la estructura de un solo piso (N=1).

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda



SOBRERRESISTENCIA



Las estructuras son en casi todos los casos significativamente más resistentes que la fuerza lateral de diseño, esto es, el corte basal resistente de la estructura es mayor y en algunos casos mucho mayor que el cortante basal de diseño.

Existen tres factores principales que contribuyen a que las estructuras sean más resistentes que el nivel para el cual fueron diseñadas:

- Los **materiales** son por lo general más resistentes que su resistencia nominal de diseño.
- Los **elementos estructurales** son por lo general más resistentes que su resistencia de diseño.
- No todos los elementos estructurales alcanzan su resistencia al mismo tiempo lo que permite que ocurra una redistribución de fuerzas en la **estructura**.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

SOBRERRESISTENCIA



Algunos de los factores que contribuyen a que los **materiales** sean más resistentes que su resistencia nominal de diseño son los siguientes:

- Tanto para el hormigón (concreto) como el acero (de refuerzo o estructural) los productores deben garantizar que en casi todos los casos su producto tiene una resistencia igual o superior a la resistencia nominal (e.g., f_c o el f_y). Para ello, debido a la variabilidad en las propiedades mecánicas del material, los productores suelen fabricar sus materiales con una resistencia promedio que es ligeramente mayor a la resistencia de diseño y con ello se minimiza la probabilidad de que su producto sea rechazado en obra. Por ejemplo, es común que la resistencia del hormigón (concreto) a los 28 días sea un 15% a 20% mayor que la resistencia nominal o bien que la resistencia a la fluencia de una barra de acero tenga en promedio una resistencia un 10% mayor a la resistencia nominal.
- En el caso del hormigón (concreto) la resistencia por lo general sigue aumentando con la edad más allá de los 28 días en que se mide el f_c . Aunque la tasa de incremento de resistencia con la edad es mucho menor a la que ocurre en las primeras semanas, este factor puede contribuir a resistencias de un 5 hasta un 20% arriba de la medida a los 28 días.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

SOBRERRESISTENCIA



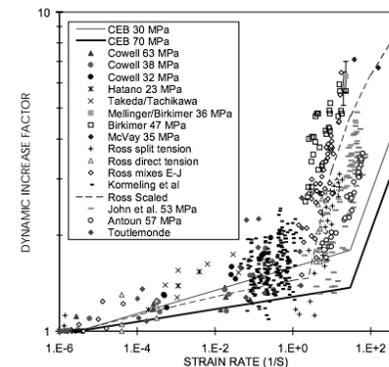
Otras razones que hacen que los **materiales** sean más resistentes que su resistencia nominal de diseño son:

- En edificación usando procesos de construcción acelerados con frecuencia se requiere que el hormigón tenga un porcentaje cercano a sus resistencia de diseño (f_c) a una temprana edad (por ejemplo a los 3 o 4 días) para poder descimbrar o bien para colocar carga en la estructura (e.g., colar el siguiente nivel) lo que hace que se use un concreto más resistente que el utilizado en el diseño de la estructura.
- Tanto el hormigón como el acero tienen una resistencia mayor al ser sometido a velocidades de carga rápida (mayor que la que se usa en pruebas estándar de resistencia de materiales). En inglés le a esto le llamamos "*strain rate effects*" y puede producir resistencias 5 a 10% mayores que el mismo material (mismo cilindro o probeta) probado lentamente.
- Con fines de diseño suelen despreciarse el endurecimiento por deformación y este puede ser muy importante. Por ejemplo, una barra de acero de refuerzo con un esfuerzo nominal de fluencia de 4,200 kgf/cm² (60 ksi) alcanza por lo general esfuerzos máximos de 7,000 kgf/cm² y puede alcanzar en algunos casos esfuerzos máximos de más de 7,000 kgf/cm².

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

SOBRERRESISTENCIA



Aumento de la resistencia a la tensión del hormigón/concreto debido a la velocidad de carga

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

SOBRERRESISTENCIA



Otras razones que hacen que los **materiales** sean más resistentes que su resistencia nominal de diseño son:

- El confinamiento del hormigón/concreto hace que la resistencia a la compresión, y por lo tanto la de cortante, aumente en función del confinamiento. Por ejemplo, si los extremos de las trabes/vigas o de las columnas están bien confinadas (e.g., con cociente volumétricos de refuerzo transversal mayores al 2%) se pueden alcanzar resistencias a la compresión 20 o 30% mayores que la resistencia a la compresión del mismo hormigón/concreto pero sin confinamiento.
- La mampostería también tiene resistencia adicional a la compresión y de tensión diagonal por efectos de velocidad de carga (Strain rate effects) y por confinamiento. Sin embargo es difícil lograr un confinamiento adecuado de mampostería.

SOBRERRESISTENCIA



Además de la resistencia de los materiales, existen muchos factores que hacen que los **elementos estructurales** sean más resistentes que su resistencia nominal de diseño son los siguientes:

- El diseño de elementos estructurales suele requerir dimensiones mínimas. Por ejemplo, el ACI exige que las columnas tengan una dimensión mínima de 12 pulgadas (30 cms) o que los muros tengan un espesor mínimo de 10 cm (en Japón el espesor mínimo es 15 cms). Así mismo existen relación mínimas de ancho a peralte o relaciones de esbeltez máximas que pueden controlar las dimensiones de los elementos estructurales. En estos casos la resistencia del elemento puede ser mayor, y en algunos casos mucho mayor, de la necesaria para resistir las fuerzas sísmicas.
- En elementos de hormigón/concreto existen cuantías mínimas de refuerzo que en muchos casos controlan la cuantía de refuerzo en el elemento (e.g. Columna, muro estructural, etc.). En estos casos la resistencia del elemento puede ser mayor, y en algunos casos mucho mayor, de la necesaria para resistir las fuerzas sísmicas.

SOBRERRESISTENCIA



Factores que hacen que los **elementos estructurales** sean más resistentes que su resistencia nominal de diseño (cont.)

- En el diseño de elementos estructurales se usan factores de reducción de resistencia ϕ (por ejemplo 0.9 para flexión, 0.75 a 0.85 para flexo-compresión, etc), lo cual hace que el elemento estructural tenga una resistencia que es $1/\phi$ veces mayor que la necesaria.
- En elementos de acero por lo general se escogen secciones transversales (e.g. Secciones W) de un posible número de secciones de un peralte dado. Suele escogerse una sección con una capacidad a flexión ($M_p = Z_x \times f_y$) que es mayor a la necesaria, lo cual incrementa la resistencia del elemento estructural por arriba de la resistencia necesaria.
- En elementos de hormigón suele escogerse el número de varillas/barras de acero de refuerzo para: (a) que el área de acero sea mayor a la mínima necesaria; y (b) para redondear para arriba el número de varillas de un solo diámetro o combinación de dos diámetros. En casi todos los casos se acaba teniendo una resistencia mayor a la necesaria.

SOBRERRESISTENCIA



Factores que hacen que los **elementos estructurales** sean más resistentes que su resistencia nominal de diseño (cont.)

- Tanto en estructuras de acero como de hormigón/concreto suele copiarse el diseño de un elemento a otros con elementos mecánicos semejantes con la finalidad de minimizar el número de elementos que son diferentes. Por lo general se escoge el diseño más conservador y se aplica a otros (por ejemplo muchas columnas en un nivel tienen el mismo diseño aunque en realidad los elementos mecánicos son diferentes en cada una de ellas). Esto hace que muchos de los elementos estructurales tengan una resistencia mayor a la mínima necesaria y por lo tanto tengan diferentes niveles de sobrerresistencia.
- En elementos de hormigón/concreto muy peraltados suele despreciarse la contribución del acero de refuerzo intermedio por temperatura. Por ejemplo en vigas con peralte mayor a 60 cm suele colocarse un par de varillas a medio peralte para controlar el agrietamiento por secado y temperatura. Dicho par de varillas pueden fluir, y aun si no alcanzan fluencia de todas formas contribuyen a incrementar la capacidad a flexión del elemento.

SOBRERRESISTENCIA



Factores que hacen que los **elementos estructurales** sean más resistentes que su resistencia nominal de diseño (cont.)

- En elementos de hormigón/concreto normalmente se exige que en vigas/trabes la cuantía de acero a compresión sea por lo menos del 50% de la cuantía de acero a tensión. Esto puede hacer que las trabes sean más resistentes de lo que realmente sería necesario.
- La contribución de la losa puede incrementar en forma significativa la resistencia a flexión del sistema de piso. Los reglamentos de construcción suelen tomar en cuenta el incremento en rigidez y resistencia a flexión cuando la losa está en compresión. Sin embargo, cuando la losa está en tensión suele no tomarse en cuenta su contribución. Esto es una práctica errónea. Por ejemplo, en el caso de trabes de hormigón el acero de la losa puede incrementar 50 a 100% por la resistencia de a flexión (1.5 o 2.0 veces la resistencia de sólo la viga). Tristemente suele pensarse que despreciar dicha sobrerresistencia es del lado conservador. Esto **es equivocado**. Despreciar la sobre-resistencia puede tener graves consecuencias.

SOBRERRESISTENCIA



Además de la sobrerresistencia de los materiales y de los elementos estructurales, existen muchos factores que hacen que las **estructuras** sean significativamente más resistentes que su resistencia de diseño: Algunos de estos factores son los siguientes:

- Redistribución de fuerzas. No todos los elementos y secciones alcanzan su resistencia en forma simultánea. Cuando un elemento alcanza su resistencia a flexión o flexocompresión las fuerzas adicionales se redistribuyen a otros elementos que aun no han fluido haciendo que la estructura pueda seguir tomando fuerzas laterales adicionales.
- Existen muchos elementos, tanto estructurales como no estructurales, que no suelen incluirse en el modelo estructural y por lo tanto no se toman en cuenta durante el diseño de la estructura, sin embargo pueden tener una importante contribución a la rigidez y resistencia lateral de la estructura y por lo tanto que la estructura sea mucho más resistente que la resistencia lateral de diseño.

SOBRERRESISTENCIA



Factores que hacen que las **estructuras** sean significativamente más resistentes que su resistencia de diseño (cont.)

- El diseño para otra combinaciones de carga (por ejemplo, cargas gravitacionales o cargas eólicas) pueden controlar muchos elementos estructurales o porciones de la estructura que hagan que la estructura tenga una resistencia lateral por arriba de la resistencia de diseño
- Efectos tridimensionales. Efectos tridimensionales no capturados o no capturados del todo en el análisis estructural elástico puede hacer por ejemplo que las fuerzas axiales sean diferentes a las calculadas y que ello haga que la resistencia de estos elementos y por lo tanto de la estructura sea mucho mayor que la resistencia de diseño. Por ejemplo, en estructuras de hormigón efectos tridimensional pueden hacer que las cargas axiales en columnas sean mayores y por lo tanto sus resistencias a flexocompresión. En el caso de estructuras de acero las cargas axiales en columnas pueden ser menores a las calculadas en el análisis y por lo tanto tener resistencias a flexocompresión mayores.

SOBRERRESISTENCIA



Factores que hacen que las **estructuras** sean significativamente más resistentes que su resistencia de diseño (cont.)

- Requisitos de torsión (por ejemplo excentricidad accidental) pueden hacer que la estructura tenga mayor resistencia lateral ya que se incrementa la resistencia de todos los elementos lejanos al centro de rigidez.
- Requisitos mínimos de diseño de sistemas duales. Los reglamentos suelen exigir que los pórticos/marcos que forman parte de sistemas duales sean capaces de resistir al menos un 25% de las fuerzas laterales de diseño. Por lo general esto hace que la estructura tenga una resistencia por arriba de la resistencia de diseño.
- El diseño de muchas estructuras suele estar controlado por los requisitos de rigidez lateral (para que no se excedan las distorsiones máximas de entrepiso). Esto hace que los elementos estructurales deban ser más rígidos y por lo tanto suelen ser también más resistentes y por lo tanto la estructura acaba siendo mucho más resistente que la resistencia lateral de diseño.

SOBRERRESISTENCIA

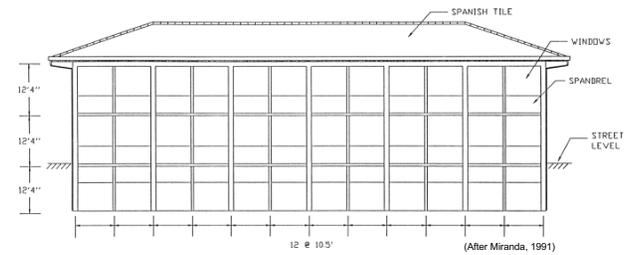


Es un GRAVE ERROR despreciar la sobrerresistencia. El hecho de que una estructura tenga una resistencia adicional de 50% o 80% por arriba de la resistencia de diseño implica que las fuerzas que actuarán en la estructura también serán 50% o 80% por arriba de las de diseño y si uno no toma en cuenta esto puede tener importantes consecuencias tales como:

- (a) La falla de las conexiones;
- (b) Que se presente la falla en elementos donde no se quería se presentará la falla (columnas, cimentaciones/fundaciones);
- (c) Que el modo de falla no sea el deseado (falla de cortante en lugar de falla por flexión);
- (d) Que se presente un mecanismo de colapso no deseado (un piso débil);

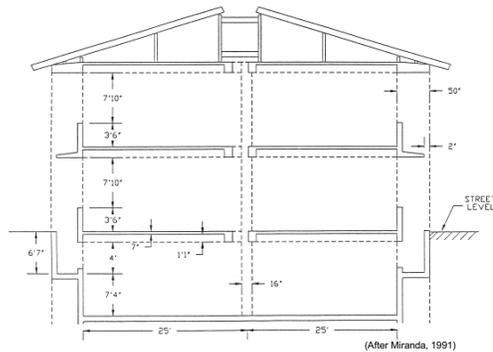
Un buen diseñador estructural siempre debe hacer una estimación, lo más realista posible, de la verdadera resistencia de materiales, elementos estructurales y estructuras.

SOBRERRESISTENCIA EJEMPLO 1



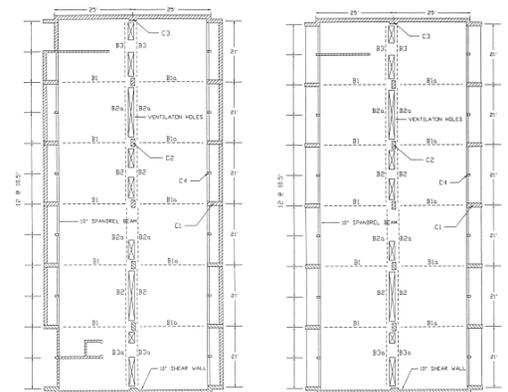
Longitudinal direction

SOBRERRESISTENCIA EJEMPLO 1



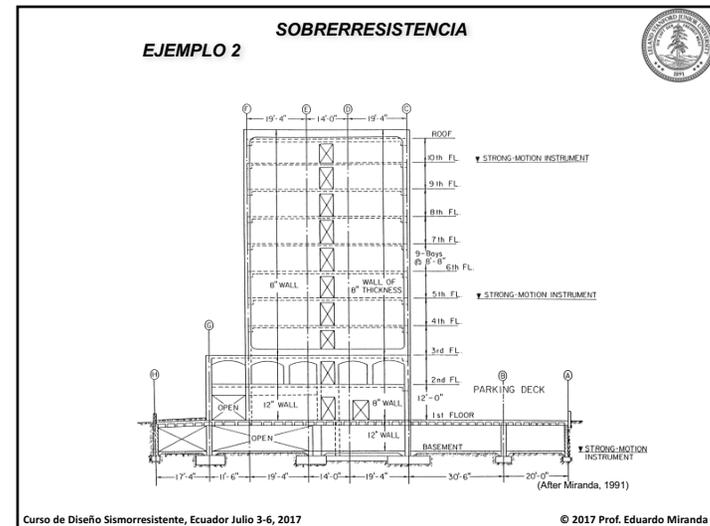
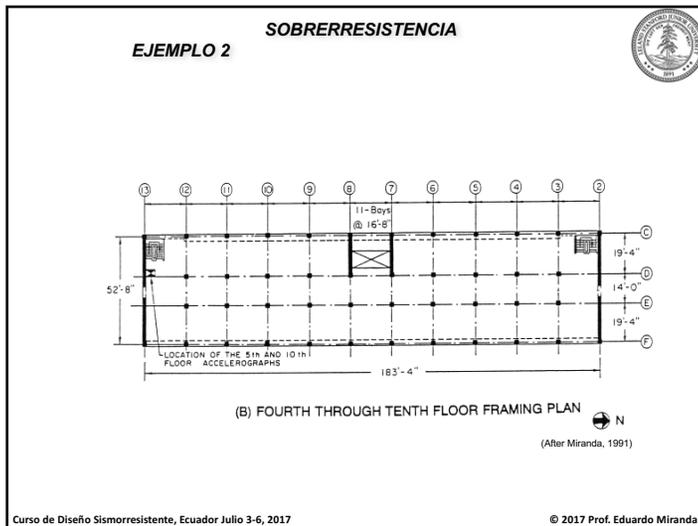
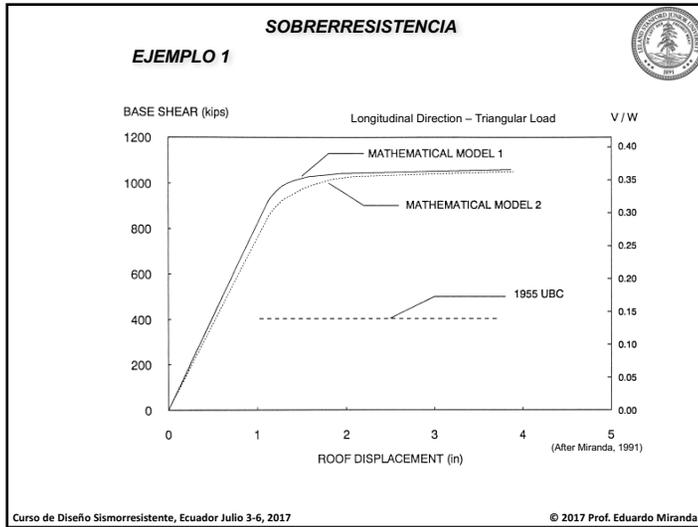
Elevation - Transverse Direction

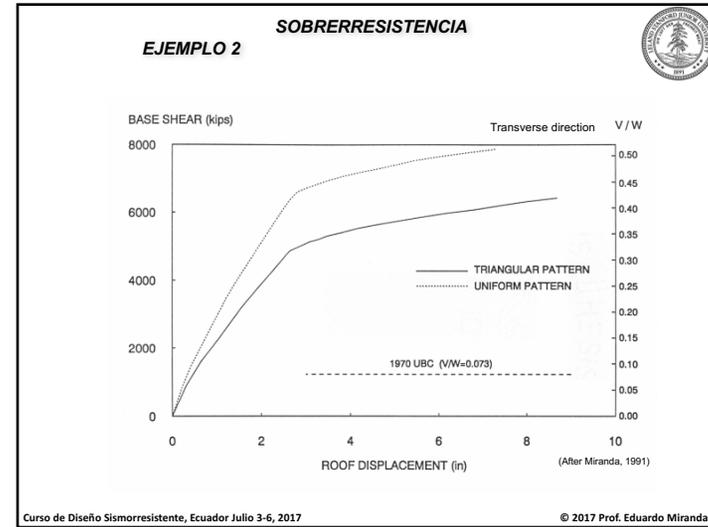
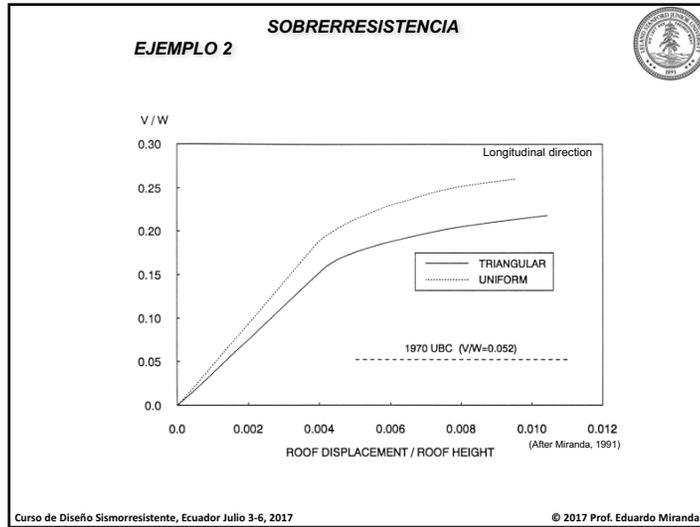
SOBRERRESISTENCIA EJEMPLO 1



Plan - Basement

Plan - Typical Floor





FACTOR DE REDUCCIÓN POR SOBRERRESISTENCIA

El factor de reducción de resistencia R_{μ} corresponde al cociente de la resistencia lateral necesaria para mantener a un sistema de un grado de libertad en el intervalo elástico entre la resistencia lateral del sistema.

Si el sistema posee un cierto nivel de sobrerresistencia, esto es, una resistencia lateral por arriba de su resistencia nominal, entonces es posible tomar una reducción adicional, que suele representarse como R_{Ω} . La estimación del nivel de sobrerresistencia requiere de un análisis no lineal y depende, como se comentó anteriormente, de muchos factores como el material, estructuración, procedimiento de diseño, número de niveles, etc.

Con fines de diseño, lo mejor es utilizar valores conservadores, que correspondan a valores de sobrerresistencia que puedan ser alcanzados con un alto nivel de certidumbre. Estos valores suelen ser **del orden de 2.0 para estructuras de periodo corto y del orden de 1.5 para estructuras de periodo moderado o largo.**

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda

MI RECOMENDACIÓN DE FACTORES DE REDUCCIÓN

Mi recomendación es utilizar un factor de reducción dado por:

$$R = R_{\mu} R_M R_{\Omega}$$

Por ejemplo, para una estructura de hormigón de 10 niveles estructurada a base de marcos de hormigón con un excelente detallado su capacidad de ductilidad es del orden de 3.0, si la estructura tiene un periodo de vibración de 1.5s su factor de reducción por ductilidad R_{μ} sería del orden de 3.3, su factor de modificación para sistemas de múltiples grados de libertad sería 0.67 y considerando un factor de sobrerresistencia de R_{Ω} 1.5 daría como resultado

$$R = (3.3)(0.67)(1.5) = 3.3$$

Se hace hacer notar que este valor es mucho menor al que se utiliza en la norma NEC-2015 (3.3 vs 8.0).

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda

MI RECOMENDACIÓN DE FACTORES DE REDUCCIÓN



Mi recomendación es utilizar un factor de reducción dado por:

$$R = R_{\mu} R_M R_{\Omega}$$

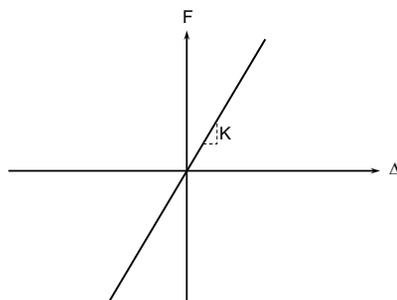
Aun si se considera una capacidad de ductilidad de 4.0, que es difícil de obtener pues los marcos suelen tener distorsiones de entrepiso a la fluencia del orden de 0.01, ello implica capacidades de deformación de entrepiso de 0.04 y aun con factores de sobrerresistencia de 2.0 en lugar de 1.5 implicaría un factor de reducción de $R=(4.4)(0.67)(2.0)=5.6$, lo que implica que, a menos de que los factores de sobrerresistencia reales en la estructura alcancen valores mayores que 2.0, **los factores de reducción de la NEC-2015, son demasiado altos.**

Yo no recomiendo usar factores de reducción mayores a 5.0.

Inestabilidad Dinámica de Sistemas de un Grado de Libertad

PROF. EDUARDO MIRANDA

RESPUESTA ELÁSTICO-LINEAL DE 1GDL



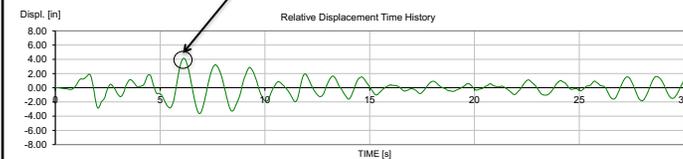
RESPUESTA ELÁSTICA DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Movimiento de terreno: Comp NS El Centro, CA Mayo 18th, 1940

Sistema 1GDL elástico, $T=1.5s$, $\zeta=5\%$

Deformación Pico = 4.15 inches (10.5 cm)

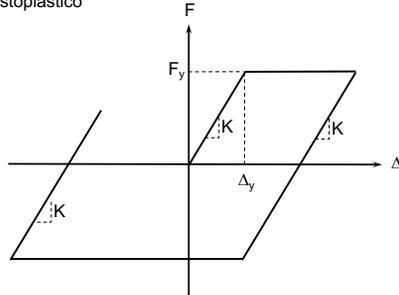


Demanda de resistencia elástica $C_e = F_e / W = 0.188$

RESPUESTA NO LINEAL DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Sistema elastoplástico



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

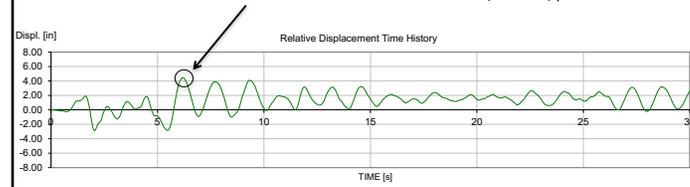
RESPUESTA NO LINEAL DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Ground Motion: NS Comp El Centro, CA May 18th, 1940

SISTEMA DE 1GDL elastoplástico (EPP), $T=1.5s$, $\zeta=5\%$, $C_v = 0.129$

Peak deformation = 4.45 inches (11.3 cm) $\mu = 1.56$



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

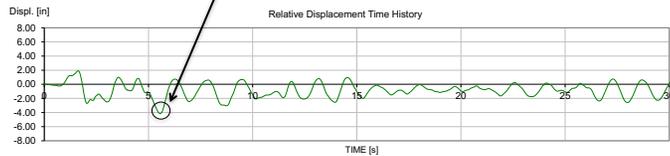
RESPUESTA NO LINEAL DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Movimiento de terreno: NS Comp El Centro, CA May 18th, 1940

SISTEMA DE 1GDL elastoplástico (EPP), $T=1.5s$, $\zeta=5\%$, $C_v = 0.077$

Peak deformation = 4.13 inches (10.5 cm) $\mu = 2.41$



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

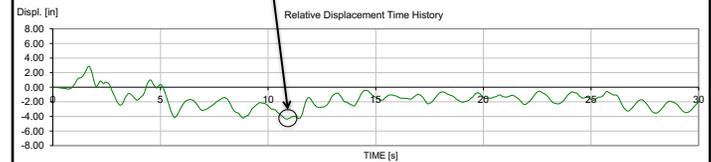
RESPUESTA NO LINEAL DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Movimiento de terreno: NS Comp El Centro, CA May 18th, 1940

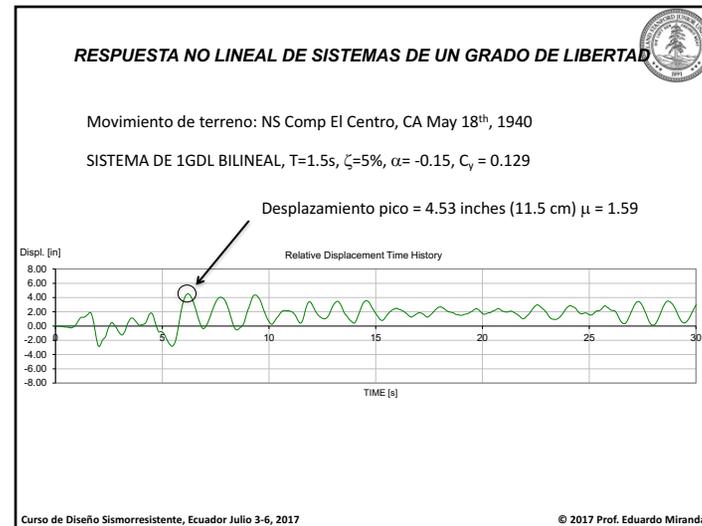
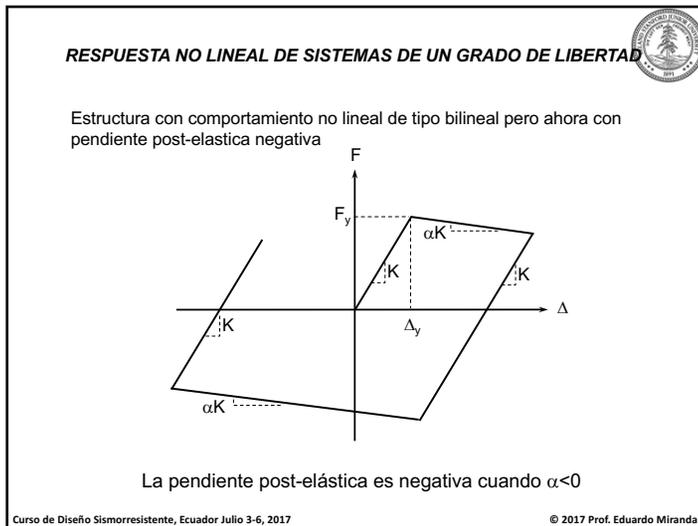
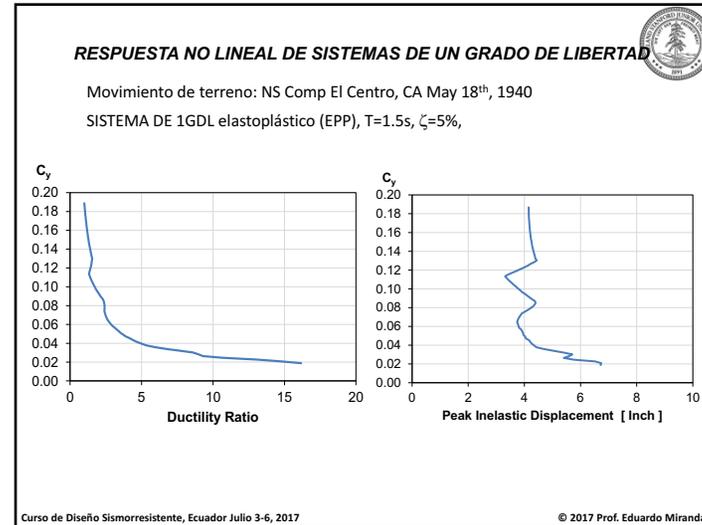
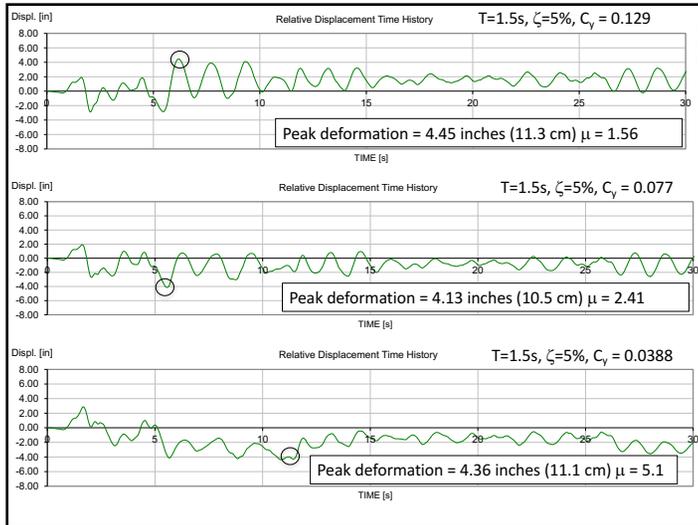
SISTEMA DE 1GDL elastoplástico (EPP), $T=1.5s$, $\zeta=5\%$, $C_v = 0.0388$

Peak deformation = 4.36 inches (11.1 cm) $\mu = 5.1$



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda



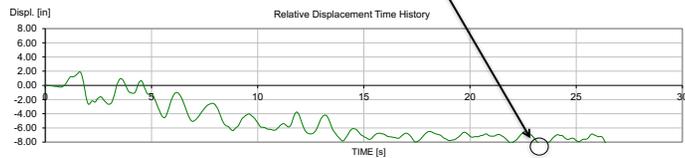
RESPUESTA NO LINEAL DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Movimiento de terreno: NS Comp El Centro, CA May 18th, 1940

SISTEMA DE 1GDL BILINEAL, T=1.5s, ζ=5%, α=-0.15, C_y = 0.077

Desplazamiento pico = 9.93 inches (25.2 cm) μ = 5.81



Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

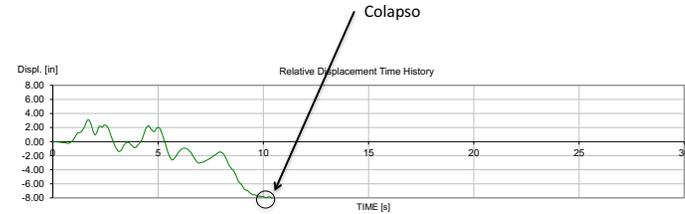
© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESPUESTA NO LINEAL DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Movimiento de terreno: NS Comp El Centro, CA May 18th, 1940

SISTEMA DE 1GDL BILINEAL, T=1.5s, ζ=5%, α=-0.15, C_y = 0.038



Quando la estructura deja de vibrar lateralmente y continua su desplazamiento sólo en una dirección se dice que ha sufrido una inestabilidad dinámica, esto es, sufre un colapso (un derrumbe estructural)

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

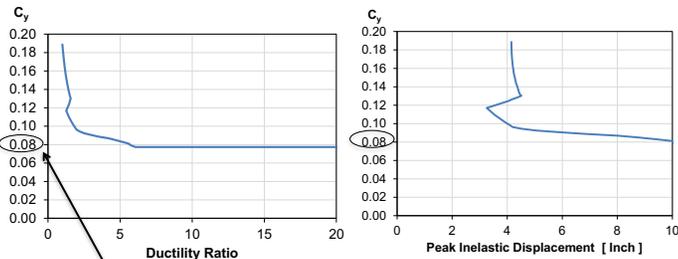
© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESPUESTA NO LINEAL DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD



Movimiento de terreno: NS Comp El Centro, CA May 18th, 1940

SDOF System: Bilinear Nonlinear System, T=1.5s, ζ=5%, α=-0.15,



Mínima resistencia lateral para evitar el colapso

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESISTENCIA LATERAL MÍNIMA NECESARIA PARA EVITAR EL COLAPSO



La resistencia lateral que por lo menos debe tener una estructura para evitar la inestabilidad dinámica (para evitar el colapso) se puede calcular a partir de la resistencia lateral necesaria para permanecer elástico con la siguiente expresión

$$F_y = \frac{F_e}{R_c}$$

En que F_e = Resistencia Lateral necesaria para permanecer elástico

R_c = Factor de Reducción para evitar el colapso

$$R_c = \frac{C_e}{C_c}$$

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017

© 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESISTENCIA LATERAL MÍNIMA NECESARIA PARA EVITAR EL COLAPSO



Ejemplo: Calcule el valor de R_c

Movimiento de terreno: Comp. NS El Centro, CA Mayo 18th, 1940
Sistema 1GDL con comportamiento bilineal, $T=1.5s$, $\zeta=5\%$, $\alpha=-0.15$,

$$R_c = \frac{C_e}{C_c} = \frac{0.1888}{0.0765} = 2.468$$

Si $R \leq R_c$ la estructura no colapsa bajo este movimiento de terreno

Si $R > R_c$ la estructura colapsa bajo este movimiento de terreno

ESTIMACIÓN OF R_c



Para sistemas de 1GDL con comportamiento bilineal R_c puede estimarse usando la siguiente expresión

$$R_c = 1 + a(\alpha)^{-b}$$

where a and b =period-dependent constants that, through a two-step nonlinear regression analysis, were found that can be approximated by the following equations

$$a = 0.26(1 - e^{-7.5T})$$

$$b = 0.89 + 0.04T + 0.15 \ln(T)$$

where T =period of vibration of the system.

Note que en esta ecuación la rigidez post-elastica está definida como $-\alpha$
(After Miranda and Akkar, 2005)

ESTIMACIÓN OF R_c

(From FEMA 440 and ASCE41)



The recommended limitation on the design force reduction, R_{max} , is as follows

$$R_{max} = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} + \frac{|\alpha_e|^{-t}}{4}$$

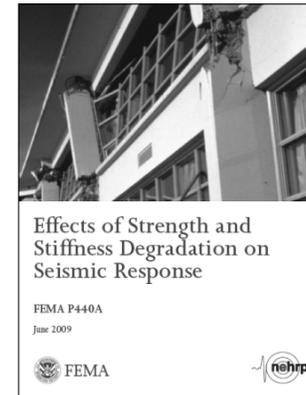
where

$$t = 1 + 0.15 \ln T$$

In this equation R_{max} is the same as R_c

Este reporte está disponible en forma gratuita en Internet en la página de FEMA.

ESTIMACIÓN OF R_c



Ecuación Aproximada para Estimar el Factor R_C
(From FEMA 440A)

$$R_{di} = \left(\frac{\Delta_c}{\Delta_y} \right)^a + b \frac{T_e}{3|\gamma|} + \frac{F_r}{F_c} (\Delta_u - \Delta_r) \sqrt{T_e}$$

En esta ecuación R_{di} es o mismo que R_C

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda

Ecuación Aproximada para Estimar el Factor R_C
(From FEMA 440A)

A median-targeted strength ratio for lateral dynamic instability, R_{di} , is defined as:

$$R_{di} = \left(\frac{\Delta_c}{\Delta_y} \right)^a + b \frac{T_e}{3|\gamma|} + \frac{F_r}{F_c} \left(\frac{\Delta_u - \Delta_r}{\Delta_y} \right) \sqrt{T_e} \quad (4-4)$$

where T_e is the effective fundamental period of vibration of the structure, Δ_y , Δ_c , Δ_r , and Δ_u are displacements corresponding to the yield strength, F_y , capping strength, F_c , residual strength, F_r , and ultimate deformation capacity at the end of the residual strength plateau, as shown in Figure 4-28. Parameters a and b are functions given by:

$$a = 1 - \exp(-dT_e) \quad (4-5)$$

$$b = 1 - \left(\frac{F_r}{F_c} \right)^2 \quad (4-6)$$

where the parameter d is a constant equal to 4 for systems with stiffness degradation, and 5 for systems without stiffness degradation. The parameter γ is the ratio of the post-capping slope (degrading stiffness) to the initial effective slope (elastic stiffness).

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda

RESUMEN

1. Cuando una estructura llega a niveles de deformación en la que existe una degradación de resistencia durante un ciclo de vibración y durante el movimiento en una sola dirección ("in-cycle" strength degradation) ya sea por no-linealidades de material o no-linealidades geométricas (efectos P- Δ) la estructura puede sufrir una inestabilidad dinámica que conduzca al colapso de la estructura.
2. El factor R_C permite la estimación (simplificada) de la resistencia lateral necesaria para evitar la inestabilidad dinámica (colapso) de la estructura. Este factor de reducción representa el factor de reducción MÁXIMO que puede tener una estructura. Les proporcionaré dos expresiones aproximadas para estimar este factor.

Curso de Diseño Sismorresistente, Ecuador Julio 3-6, 2017 © 2017 Prof. Eduardo Miranda



PROF. EDUARDO MIRANDA
© Todos los derechos reservados