



AVANCES RECIENTES EN EL INCREMENTO DE LA RESILIENCIA Y LA SUSTENTABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA FÍSICA EDUCATIVA

Febrero 24 – 26, 2021

Marco de referencia y propuesta de
procedimientos para el reforzamiento y diseño
sísmico por resiliencia de la infraestructura
física educativa en México



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



EN LIQUIDACIÓN

A Gustavo Ayala
Profesor Investigador



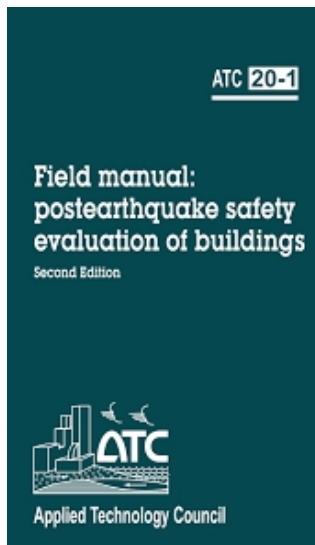
Contenido

- MOTIVACIÓN Y OBJETIVO
- ANTECEDENTES
- COMPRENDIENDO LA RESILIENCIA Y SUS IMPLICACIONES EN LA EVALUACIÓN Y DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS
- EVALUACIÓN DE RESILIENCIA DE EDIFICIOS ANTE SISMO
- EJEMPLO DE EVALUACIÓN
- DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS A LOS BASADOS EN DESPLAZAMIENTOS Y CONCEPTOS DE RESILIENCIA
- EJEMPLO DE DISEÑO
- REFLEXIONES FINALES

Motivación y objetivo

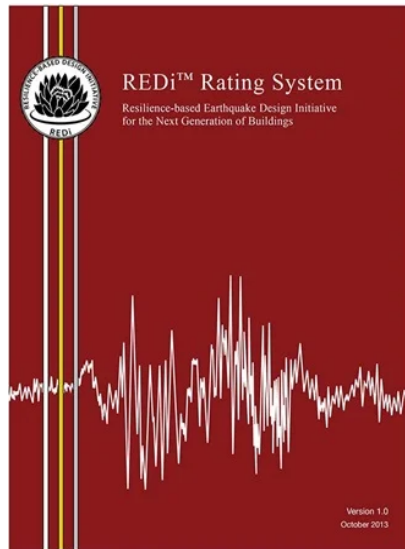
Motivación: Responder al creciente interés de diversas instituciones gubernamentales y privadas, por conocer y mejorar el estado actual de resiliencia ante desastres de la infraestructura educativa existente en el país y lo que se considera necesario hacer para mejorar la futura.

Objetivo: Desarrollar e implementar un procedimiento consistente con que permita evaluar el desempeño sísmico y la resiliencia de edificios escolares existentes y diseñar con base en estos conceptos su reforzamiento y edificios nuevos.



(a)

a) ATC-20 (1995)



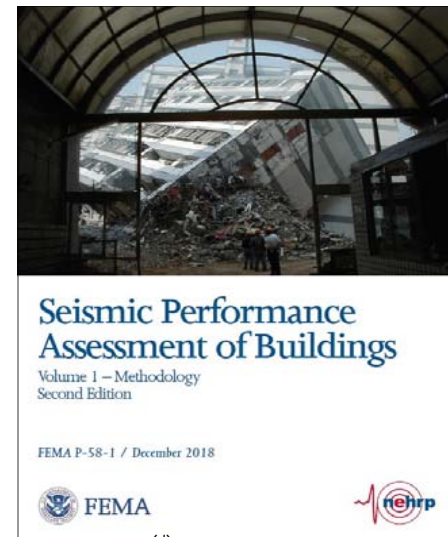
(b)

b) Almufti y Willford (2013)



(c)

c) ASCE/SEI (2017)



(d)

d) FEMA P-58 (2012, 2018)

Antecedentes

Daño en elementos estructurales, no-estructurales y contenidos



Antecedentes

Resumen del impacto

Escuelas públicas afectadas por los sismos de septiembre de 2017, por entidad y tipo de daño

	Total con daño		Daños menores		Reconstrucción parcial		Reconstrucción total	
	27 sept.	25 oct.	27 sept.	25 oct.	27 sept.	25 oct.	27 sept.	25 oct.
Chiapas	2,364	2,842	2,251	2,077	111	762	2	3
Cd. México	978	1,208	837	822	121	378	20	8*
Edo. México	3,388	3,645	2,924	1,171	272	2,396	192	78
Guerrero	169	254	105	82	0	111	64	61
Hidalgo	482	415	441	370	36	36	5	9
Michoacán	313	536	187	525	126	11	0	0
Morelos	305	1,540	178	906	110	606	17	28
Oaxaca	2,965	3,476	2,445	2,804	253	646	267	26
Puebla	1,230	1,216	466	1,098	756	56	8	62
Tlaxcala	1,004	1,004	940	942	62	61	2	1
Total	12,931	16,136	10,744	10,797	1,847	5,063	577	276

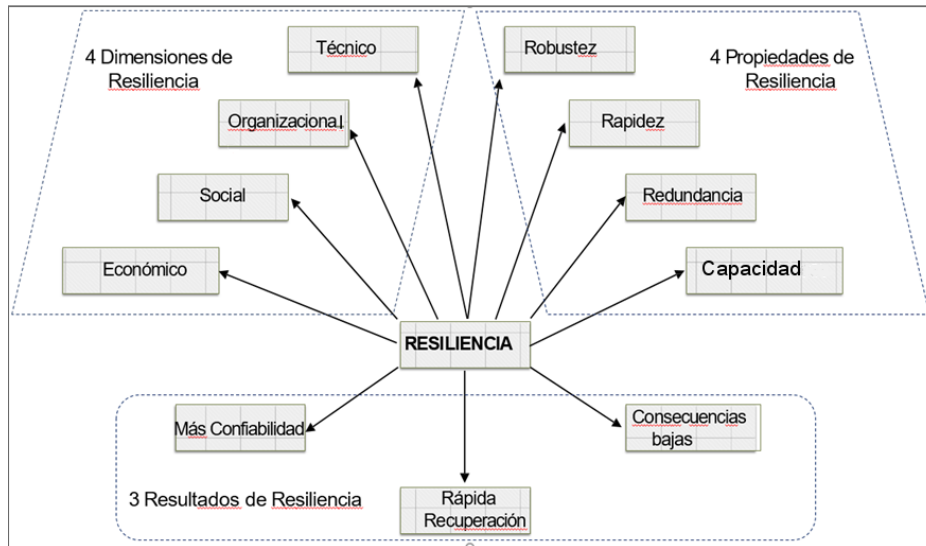
Daño menor: fisuras en aplanados o en barda perimetral, cristales rotos, desprendimiento de losetas. No amerita suspensión del servicio.

Reconstrucción parcial: daños en la mayoría de los espacios (bardas, escaleras, puertas) pero sin afectación estructural. Las escuelas pueden reabrir, clausurando los espacios en rehabilitación.

Reconstrucción total: daños evidentes en elementos estructurales (exposición de varillas y agrietamientos superiores al 30% de los elementos que lo conforman). Requieren demolición y restitución total.

Fuente: elaboración propia con base en el Comunicado 277 de la SEP del 27 de septiembre de este año, e INIFED, Reunión de trabajo con la Comisión de educación pública y servicios educativos de la H. Cámara de Diputados, 25 de octubre de 2017.

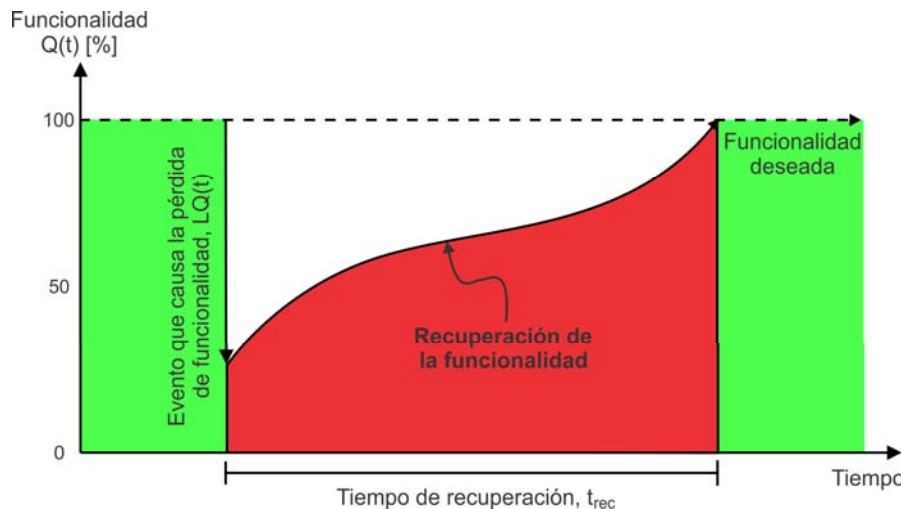
Comprendiendo la resiliencia



Resiliencia de una estructura: Capacidad para absorber impactos desastrosos con retornos oportunos a la normalidad. Considera las capacidades del diseño de la estructura en relación con su susceptibilidad al daño, redundancia y recuperación de funcionalidad después de un evento perturbador.

Terminología:

- Pérdida de funcionalidad **LQ(t)**.
- Recuperación de funcionalidad **RQ(t)**.
- Índice de resiliencia **RI(t)**.
- Pérdidas económicas directas e indirectas **LD(t), LI(t)**.
- Tiempo de reparación **Trep(t)**.
- Tiempo de recuperación **Trec(t)**
- Número de trabajadores **Nw(t)**
- Número de lesionados y muertos **Inj(t)**.



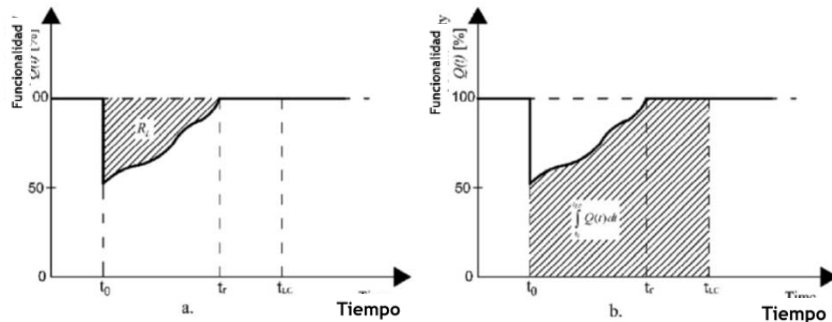
Funcionalidad: Utilidad de un sistema o qué tan bien hace el trabajo para el que está destinado.

Comprendiendo la resiliencia

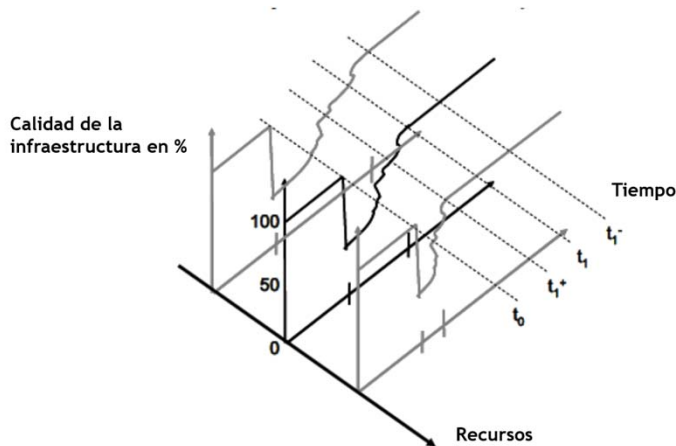
Cómo calcular la resiliencia

$$R_L = \int_{t_0}^{t_r} [100 - Q(t)] dt$$

$$R = \frac{1}{t_{LC} - t_0} \int_{t_0}^{t_{LC}} Q(t) dt$$

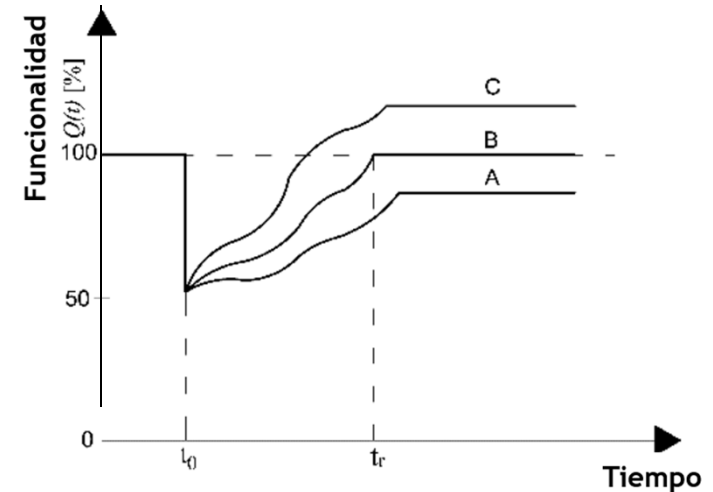


Recursos en la resiliencia



Beneficios de un sistema resiliente

- La resiliencia es una característica estructural muy útil cuando se concibe un plan de prevención de riesgos asociados a eventos perturbadores como los sismos que afectan la seguridad y puede aumentar la resiliencia de un edificio ante.

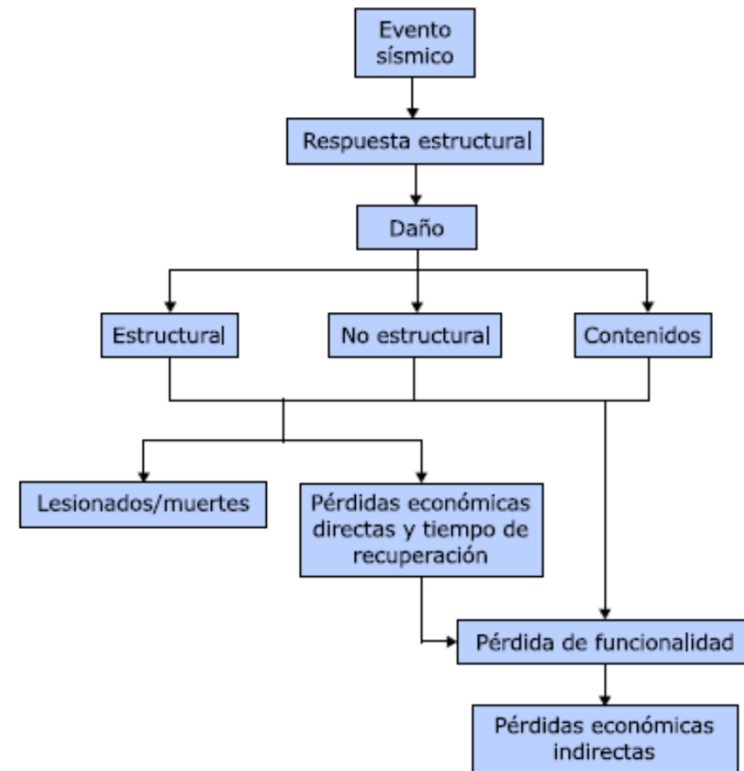
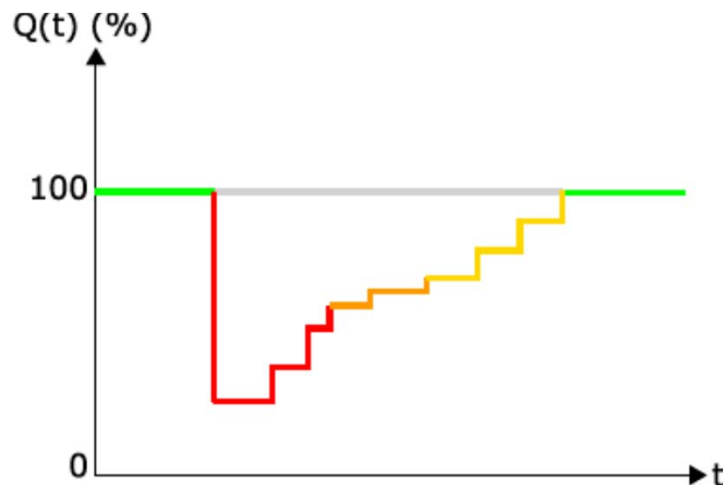


Niveles de desempeño

- Reocupación después de un sismo
- Recuperación de funcionalidad después de un sismo
- Recuperación de funcionalidad completa

Procedimiento de evaluación

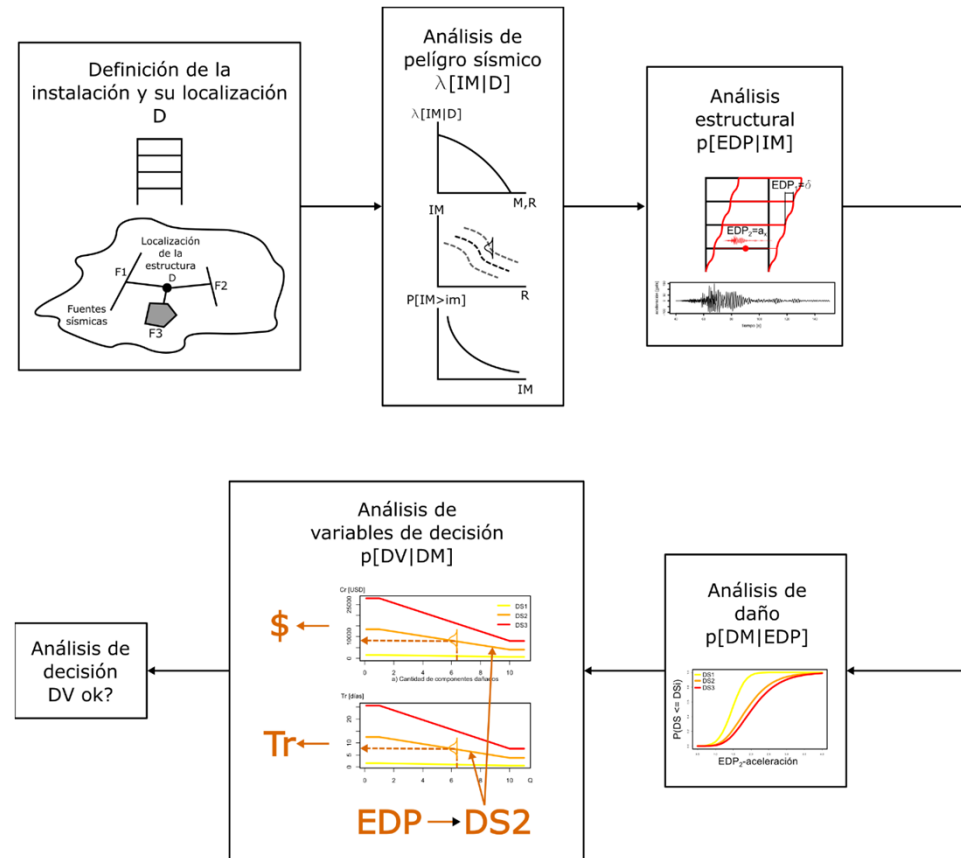
- **No se trata solo del daño en una estructura escolar. ¡Se trata del impacto que este tiene sobre la comunidad!.**
- La evaluación/reforzamiento de una estructura existente o el diseño de una nueva ante sismo con un procedimiento basado en desempeño y conceptos de resiliencia es una nueva tendencia en la ingeniería sísmica que permite reducir las pérdidas directas e indirectas mediante un enfoque holístico que considera todos los riesgos inducidos por los sismos, con el propósito de mitigarlos mediante un diseño multidisciplinario integrado y una planificación de contingencias para lograr una recuperación de funcionalidad rápida después del sismo o sismos para la que se diseña.



MCEER (2003), Cimellaro et al. (2006), Bruneau y Reinhorn (2007)

Procedimiento de evaluación

Esquema de evaluación del desempeño en términos probabilistas



$$\lambda(DV > dv) = \int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(dv | dm) dG(dm | edp) dG(edp | im) | d\lambda(im) |$$

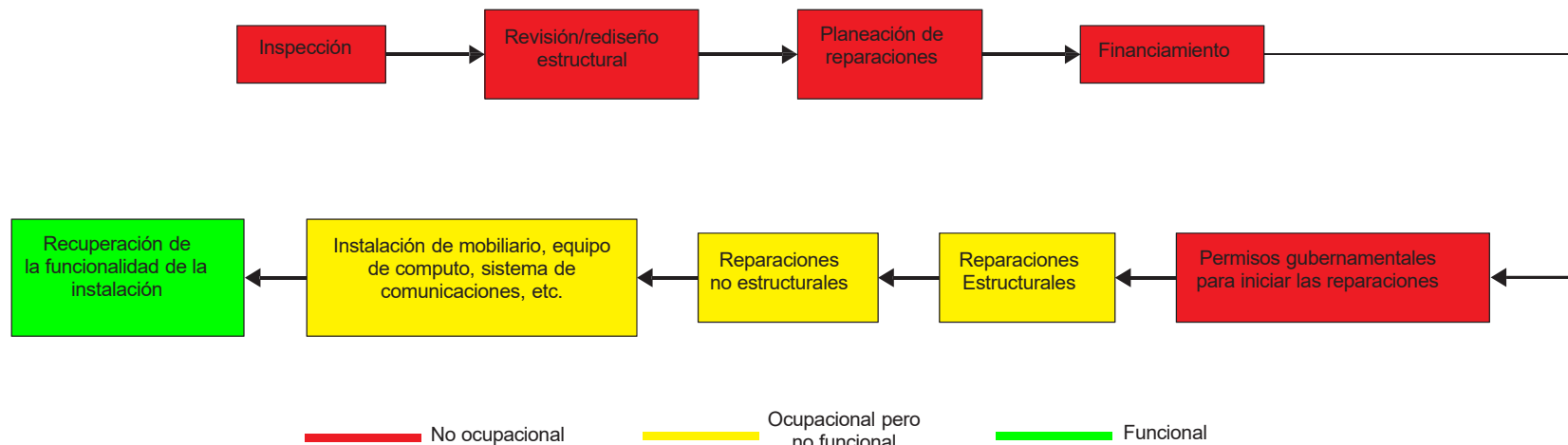
Procedimiento de evaluación

SECUENCIA GENERAL DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN:

Basada en razonamiento **heurístico (Polya, 1954)**.

Considera el problema desde un punto de vista integral, es decir mediante una concepción **holística**: Elementos estructurales, no-estructurales, contenidos,..., consecuencias del daño: pérdidas económicas, tiempo de reparación, número de trabajadores, etc.

SECUENCIA GENÉRICA DE LA RECUPERACIÓN DE FUNCIONALIDAD.



Procedimiento de evaluación

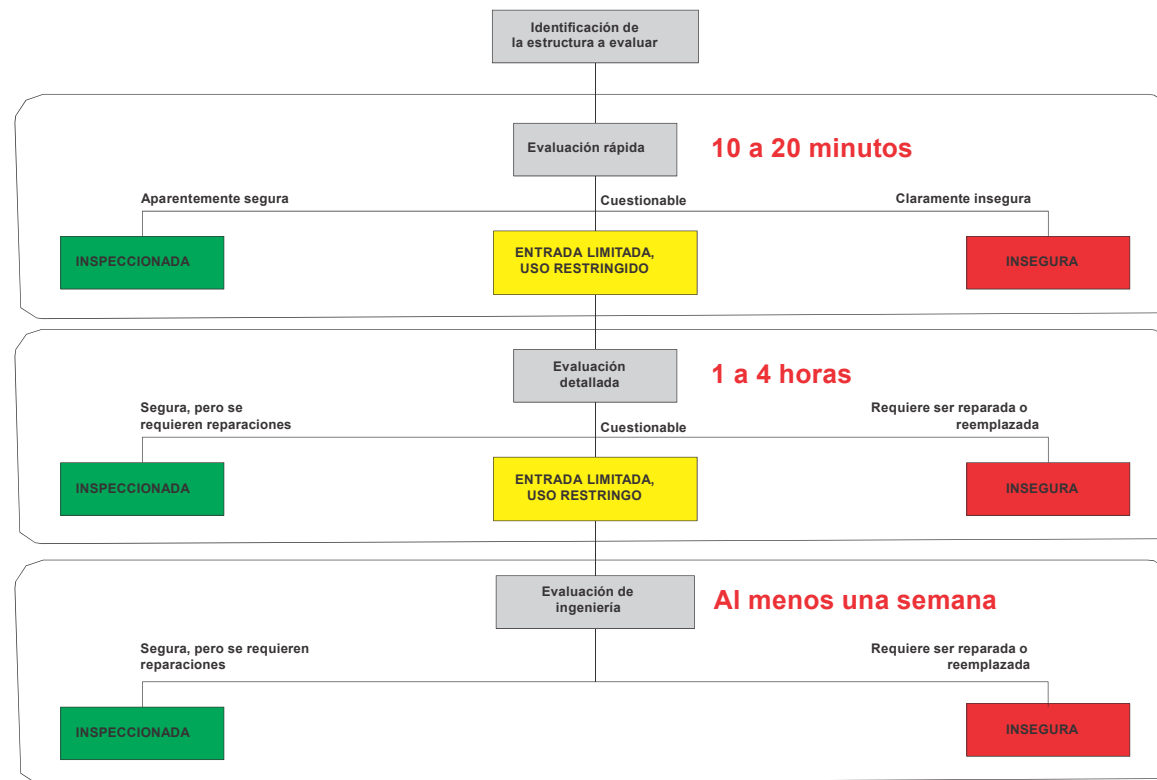


Diagrama de flujo del proceso de inspección post-sísmica ATC-20 (Gallager, 1989).

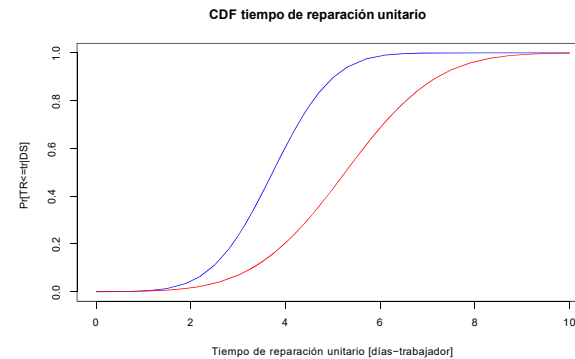
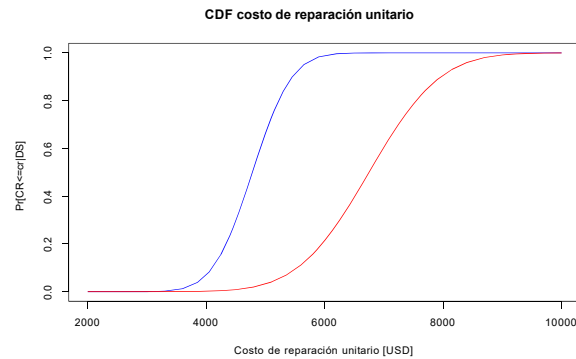
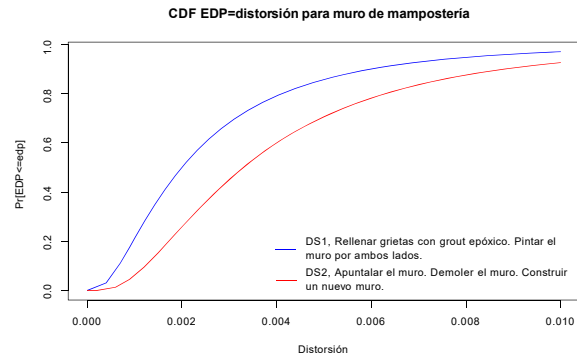
Procedimiento de evaluación

Inferencia del daño en **elementos estructurales y no-estructurales** mediante el uso de funciones de fragilidad (FEMA P-58, 2012).

Características genéricas del daño.

Actividades genéricas de reparación.

Costo y tiempo de reparación correspondiente a un trabajador.



Distribuciones de probabilidad de estado daño discreto genérico, costo y tiempo de reparación.

Procedimiento de evaluación

¿Es posible usar la función de fragilidad para estimar el daño en contenidos?, sí pero los resultados son irreales o muy conservadores (Dar *et al.*, 2016). Simulación del daño en contenidos utilizando la respuesta dinámica ante una historia de aceleraciones de un bloque rígido. Modos de falla: reposo, deslizamiento, balanceo, volteo. → Ensayo de Bernoulli.

Housner (1963). Ecuación diferencial, 2º orden, no lineal:

$$\ddot{\theta} = p^2 \left\{ \sin(\alpha S(\theta) - \theta) - \frac{\ddot{u}_b}{g} \cos(\alpha S(\theta) - \theta) \right\}$$

$$p = \sqrt{\frac{3g}{4R}}$$

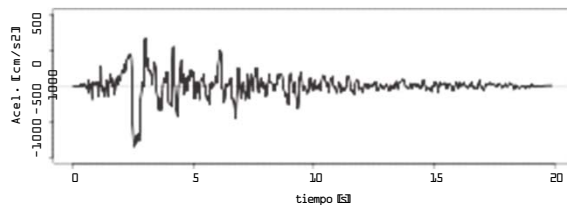
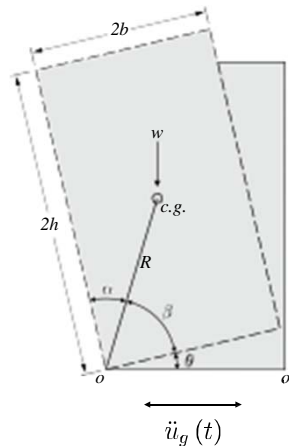
Formulación estado-espacio, Makris y Roussos (1998), Jaimes y Reinoso (2013), entre otros.

Método de Runge-Kutta de 4º orden

$$\{y(t)\} = \begin{Bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{Bmatrix}$$

$$\dot{y}(t) = \begin{Bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ -p^2 \left[\sin(\alpha S[\theta(t)] - \theta(t)) + \frac{\ddot{u}_b}{g} \cos(\alpha S[\theta(t)] - \theta(t)) - \theta(t) \right] \end{Bmatrix}$$

$$r = \left[1 - \frac{3}{2} \sin^2 \alpha \right]^2$$



Bloque rígido sometido a un registro de aceleraciones horizontales.

Procedimiento de evaluación

Estados globales de funcionalidad (combinación de estados de daño entre Componentes Estructurales, No-Estructurales y Contenidos):

LQ0: Completamente funcional, edificio seguro, TAG=G.

LQ1: Parcialmente funcional, edificio seguro, TAG=G.

LQ2: Uso restringido, no funcional, TAG=G.

LQ3: Entrada restringida, no funcional, reparable, estruct. seguro, TAG=Y.

LQ4: Edificio no ocupable, inseguro, reparable, TAG=R.

LQ5: Edificio no ocupable, inseguro, irreparable TAG=R.

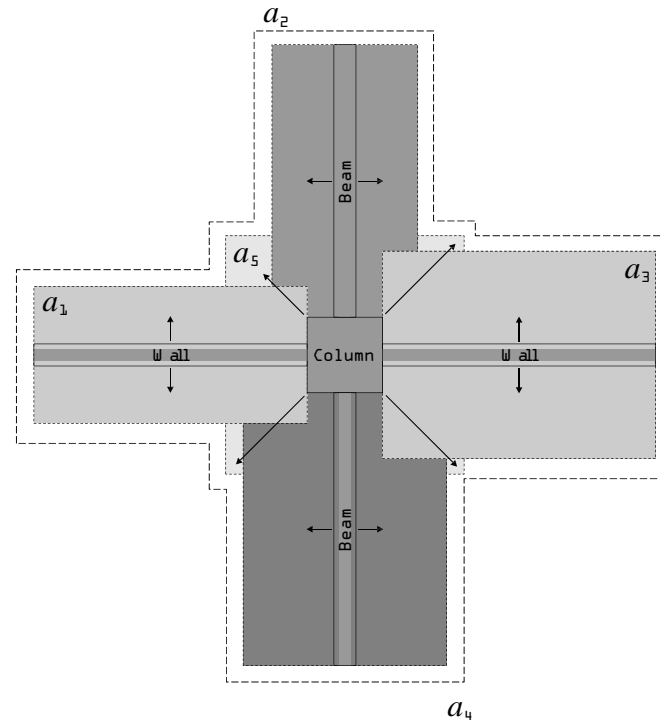
LQ6: Colapso estructural, reemplazo, TAG=R.

Procedimiento de evaluación

Pérdida de funcionalidad $LQ(t)$:

Porcentaje de área no usable: (1) Cantidad de elementos dañados y (2) cantidad de trabajadores que ocupan un área específica.

Daño en elementos (de cualquier clase) que impidan el acceso a entradas/salidas, vías de comunicación, espacios de uso principal... $LQ(t) \rightarrow 100\%$.



Envolvente del área en planta no usable durante la etapa de los trabajos de reparación.

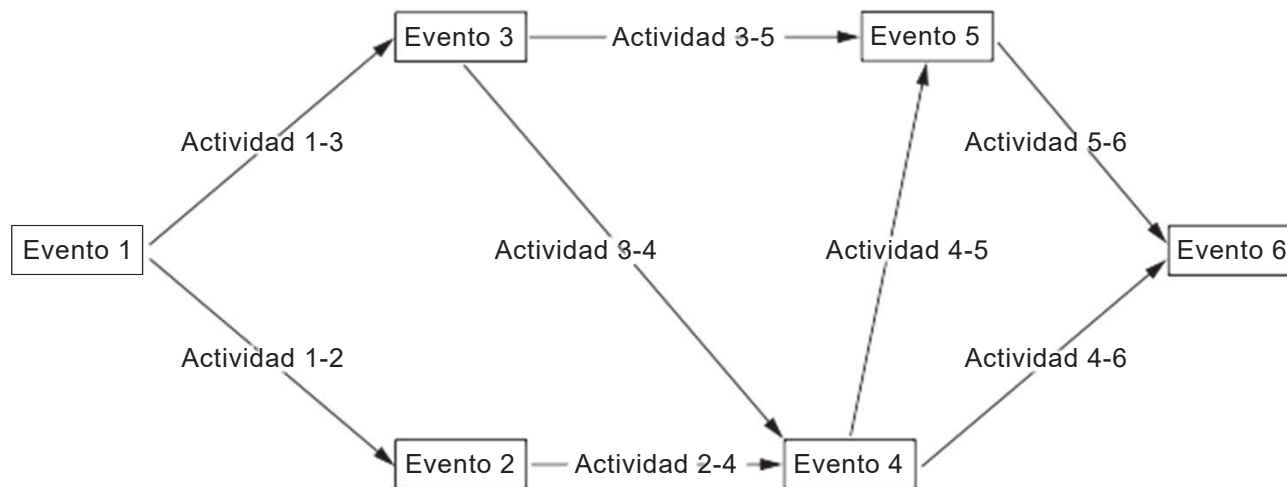
Procedimiento de evaluación

Recuperación de la funcionalidad $RQ(t)$:

Método de la Ruta Crítica (CPM) y en la Técnica de Revisión y Evaluación de Proyectos (PERT).

Las incertidumbres se toman en cuenta en la variación de la cantidad de elementos dañados, en el costo y tiempo de reparación en cada realización aleatoria, y en el número de trabajadores.

FEMA P-58: Reparación en serie y en paralelo.



Ejemplo de una red de actividades.

Procedimiento de evaluación

Definir los PGs que experimentaron daño.

Cuantificar la cantidad de elementos DS_i de cada PG y asignarlos en partes iguales a una cantidad de cuadrillas¹:

Para estado de daño DS_1 :

$$n_c = \begin{cases} 1 \text{ cuadrilla} & \text{si } 1 \leq n_{DS_1} \leq 10 \\ 2 \text{ cuadrillas} & \text{si } n_{DS_1} > 10 \end{cases}$$

Para estado de daño DS_2 o mayor:

$$n_c = \begin{cases} 2 \text{ cuadrillas} & \text{si } 1 \leq n_{DS_2} \leq 10 \\ 3 \text{ cuadrillas} & \text{si } n_{DS_2} > 10 \end{cases}$$

Número de trabajadores en función del estado de daño:

$$n_w = \begin{cases} 2 \text{ trabajadores} & \text{si } DS = DS_1 \\ 3 \text{ trabajadores} & \text{si } DS \geq DS_2 \end{cases}$$

¹Después de un evento sísmico destructivo lo más probable es que la cantidad de recursos humanos sea limitada.

Definir actividades de reparación.

$$A_i^j(PG_i, DS = ds_k, e_k, FL_j, n_w) \rightarrow c_k$$

Definir secuencia de las actividades estableciendo previamente una jerarquía en los PGs:

$$PG_j \rightarrow PG_{j-m} \rightarrow \dots \rightarrow PG_{j-n}$$

Establecer jerarquía en la secuencia de reparación de los $DS|PG$:

$$DS_k \rightarrow DS_{k-i} \rightarrow \dots \rightarrow DS_{k-j}$$

Es válido realizar actividades en paralelo siempre y cuando en dichas actividades se encuentren elementos en el mismo estado de daño DS y correspondan al mismo grupo de desempeño PG.

Procedimiento de evaluación

Tiempo de reparación de cada actividad:

$$\tilde{tr}_{c_k} = E \left[\frac{1}{nw_{c_k}} \sum_{\forall \mathbf{A}_i^j \in c_k} \hat{tr}(\mathbf{A}_i^j | c_k) \right]$$

Tiempo de reparación total

$$TR_{max} = E \left[\max \left(TF_{\mathbf{A}_1^j}, TF_{\mathbf{A}_2^j}, \dots, TF_{\mathbf{A}_n^j} \right) \right]$$

Costo de reparación de cada actividad

$$cr_{\mathbf{A}_i^j} = E \left[\sum_{\forall \mathbf{A}_i^j \in c_k} \hat{cr}(\mathbf{A}_i^j | c_k) \cdot (1 + nw_{c_k} \cdot \alpha) \right]$$

Costo de reparación total

$$cr_T = E \left[\sum cr_{\mathbf{A}_i^j} \right]$$

Procedimiento de evaluación

Factores que impiden el inicio de las reparaciones (dependen de la severidad y cantidad del daño) (REDiTM, 2013):

- Inspección post-sísmica. Gestión de recursos financieros.
- Proceso para obtener permisos gubernamentales. Planeación de las reparaciones.

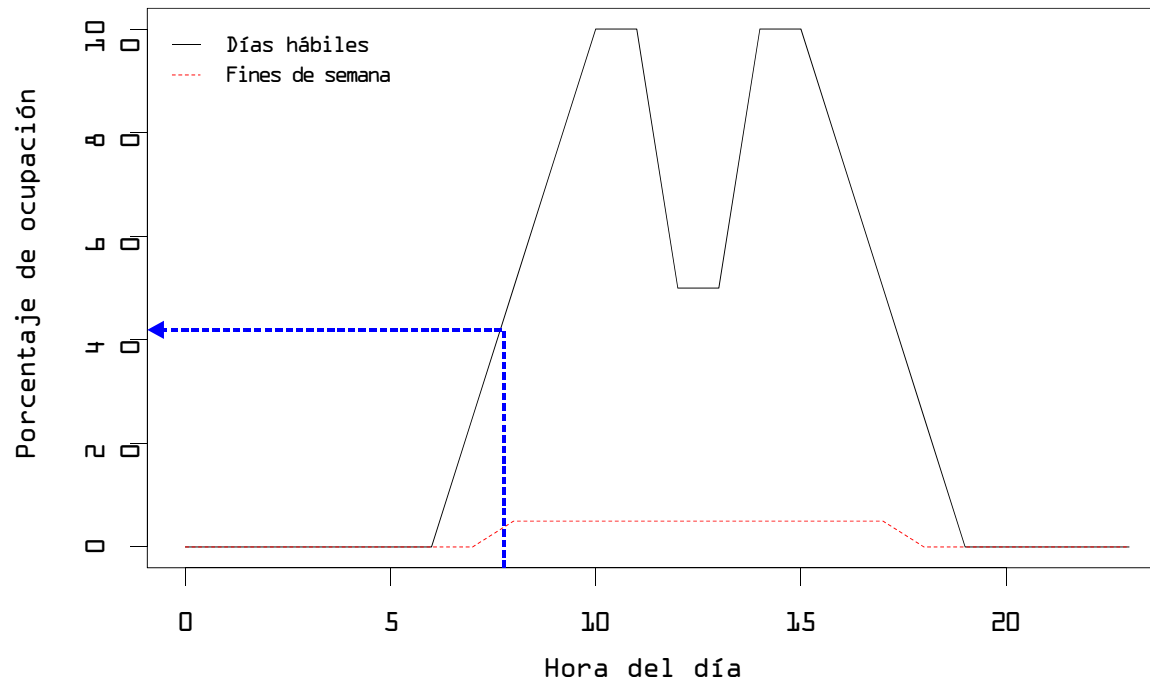
Factor de impedimento	Tipo de instalación	Medida de mitigación	Condición de reparación	μ	β
Inspección	Todas las instalaciones	Recomendaciones gubernamentales	-	1 día	0.54
	Instalaciones esenciales	-	-	2 días	0.54
Revisión/rediseño	Todas las instalaciones	Consulta a un ingeniero o contratista	C ₁	2 semanas	0.32
			C ₃	1 semana	0.31
			C ₃ ¹	42 semanas	0.45
			C ₁	6 semanas	0.4
			C ₃	12 semanas	0.4
Financiamiento	Todas las instalaciones	Línea de crédito preestablecida	-	1 semana	0.54
		Financiamiento gubernamental	-	3 semanas	0.44
		Préstamo privado	-	15 semanas	0.68
		Préstamo de banco	-	48 semanas	0.57
Planeación de actividades de reparación	Instalaciones esenciales con menos de 20 pisos	Contrato	C ₁	3 semanas	0.66
			C ₃	7 semanas	0.35
			C ₁	7 semanas	0.6
			C ₃	19 semanas	0.38
			C ₃	19 semanas	0.38
	Instalaciones no esenciales con menos de 20 pisos	Contrato	C ₁	3 semanas	0.66
			C ₃	7 semanas	0.35
			C ₁	11 semanas	0.43
			C ₃	23 semanas	0.41
			C ₃	23 semanas	0.41
Mas de 20 pisos	Contrato	C ₁	3 semanas	0.66	
		C ₃	7 semanas	0.35	
		C ₁	28 semanas	0.3	
		C ₃	40 semanas	0.31	
Permisos	Todas las instalaciones	-	C ₁	1 semana	0.86
			C ₃	3 semanas	0.52

¹Esta distribución de probabilidad debe ser utilizada si la evaluación estructural indica que se requiere un rediseño completo.

Procedimiento de evaluación

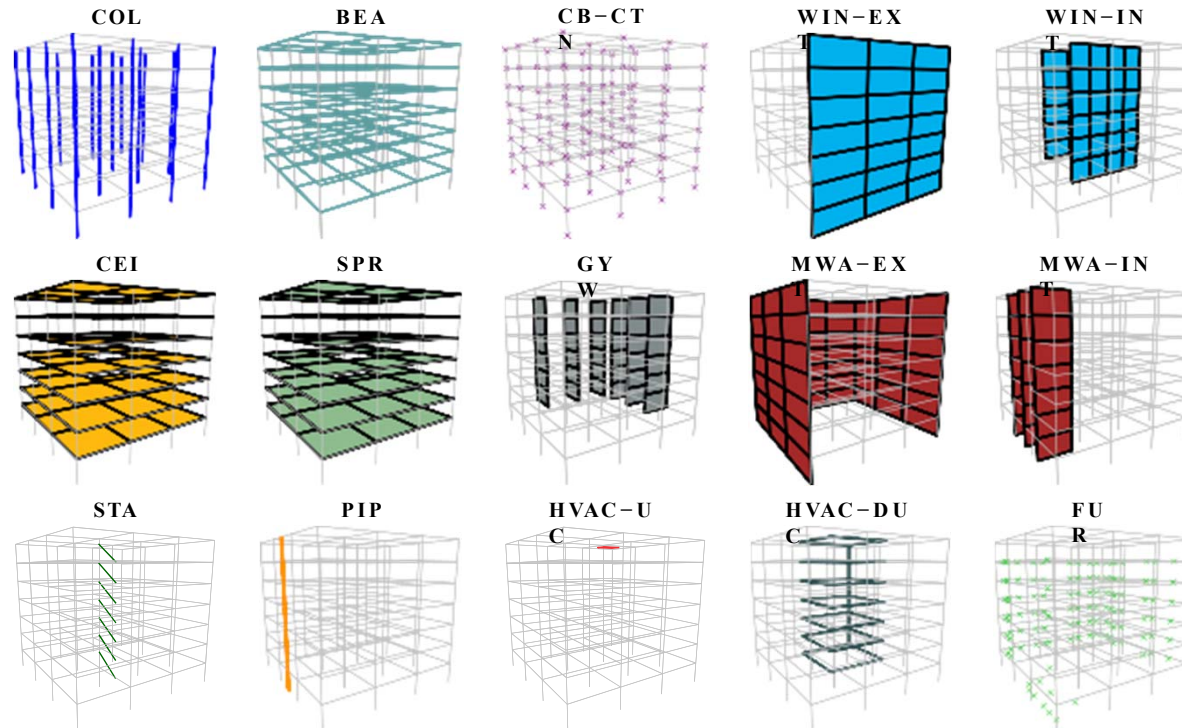
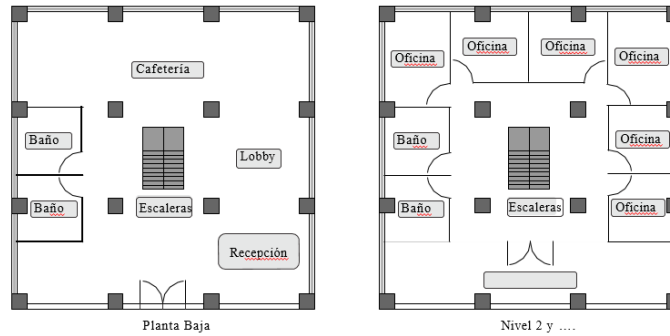
Número de lesionados. Adaptación del FEMA P-58 (2018):

- Simulación aleatoria del día y hora en que ocurre el evento sísmico.
- El número de personas lesionadas se infiere con una relación empírica, función de la severidad del daño que experimentan los grupos de desempeño susceptibles a causar algún tipo de lesión en los usuarios, e.g., plafones, muros de mampostería, aspersores, etc.



Porcentaje de ocupación en un edificio para uso de oficinas.

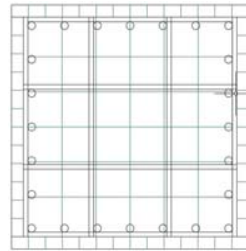
Ejemplo de evaluación



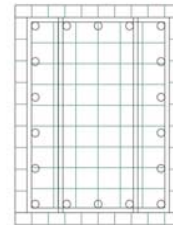
Distribución de espacios y de los grupos de desempeño más importantes que integran al sistema estructural.

Ejemplo de evaluación

- Tipo de análisis: dinámico no lineal paso a paso con el programa **OpenSees** (Mazzoni et al., 2007).
- Columnas y traveses: formulación de *fuerzas*, modelo de fibras, concreto (Chang y Mander, 1994), acero: Giuffrè y Pinto (1970) y muros de mampostería (Kadysiewski y Mosalam, 2009).



Columnas



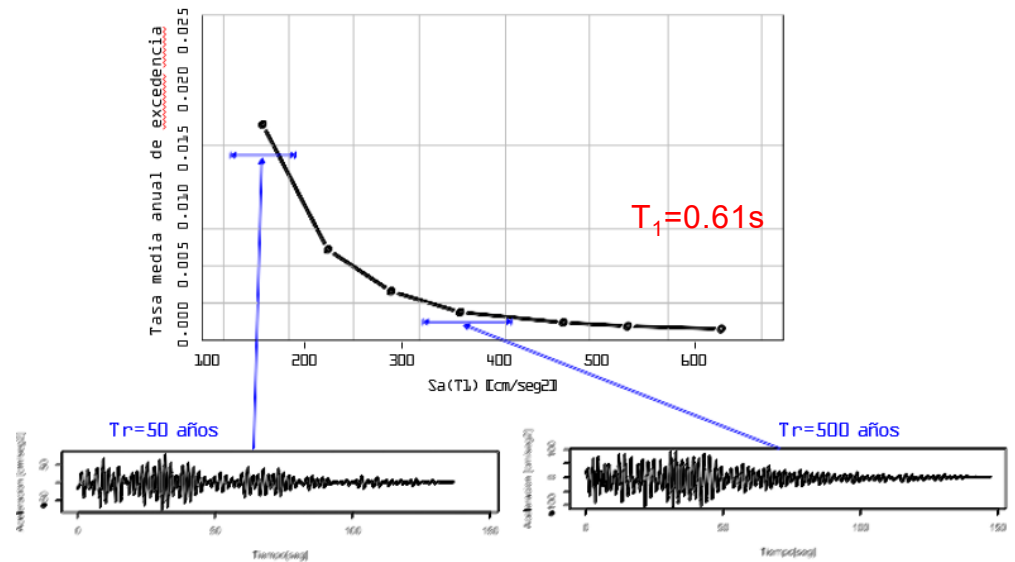
Traveses

Demanda sísmica, fuente puntual.



Imagen generada con @OpenStreetMap

Curva de peligro sísmico.

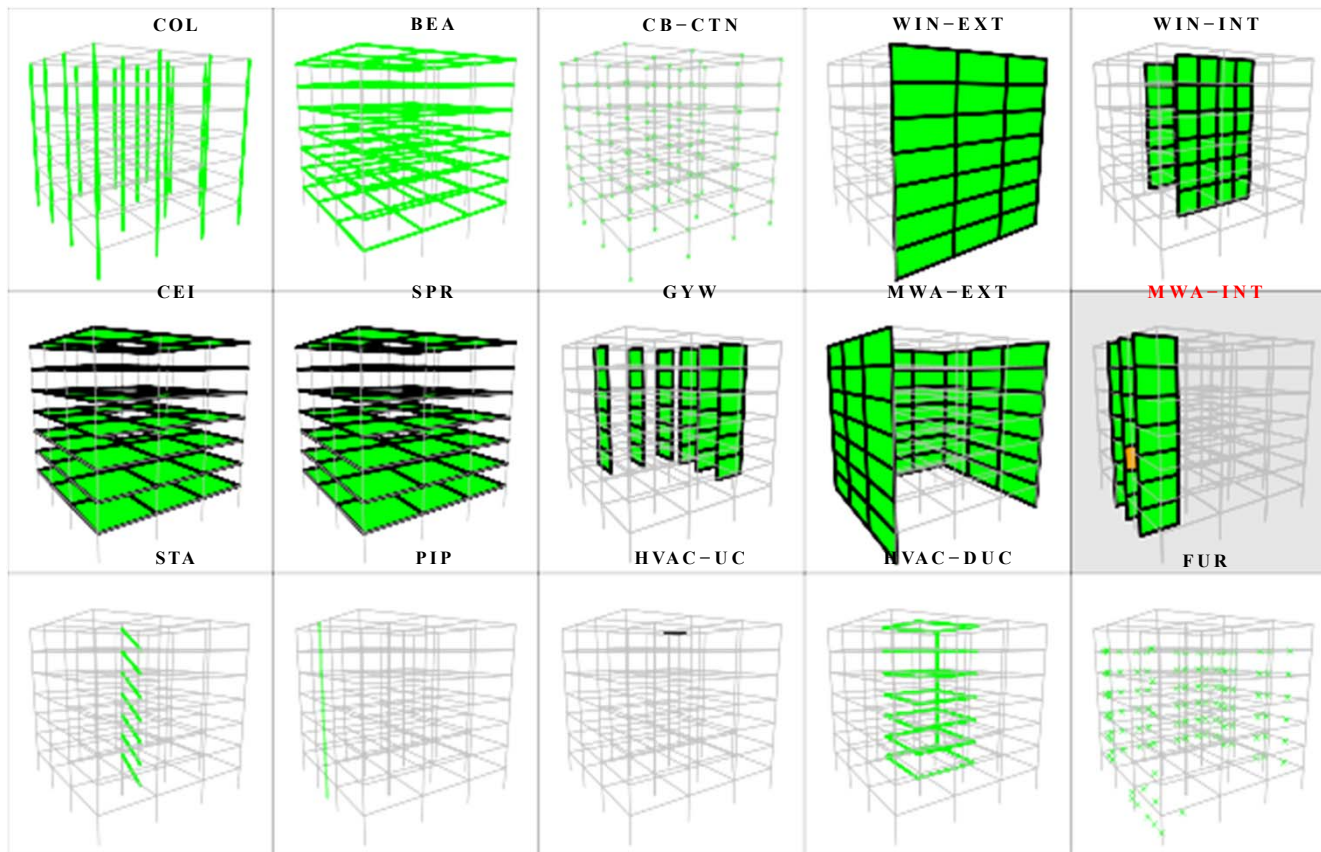


Tr: 50,1250, 250, 500,1000, 1500 y 2500 años

Resultados

INFERENCIA DEL DAÑO:

Tr=50 años (IM1), $S_a=0.15g$, Estado límite de funcionalidad **LS1**.

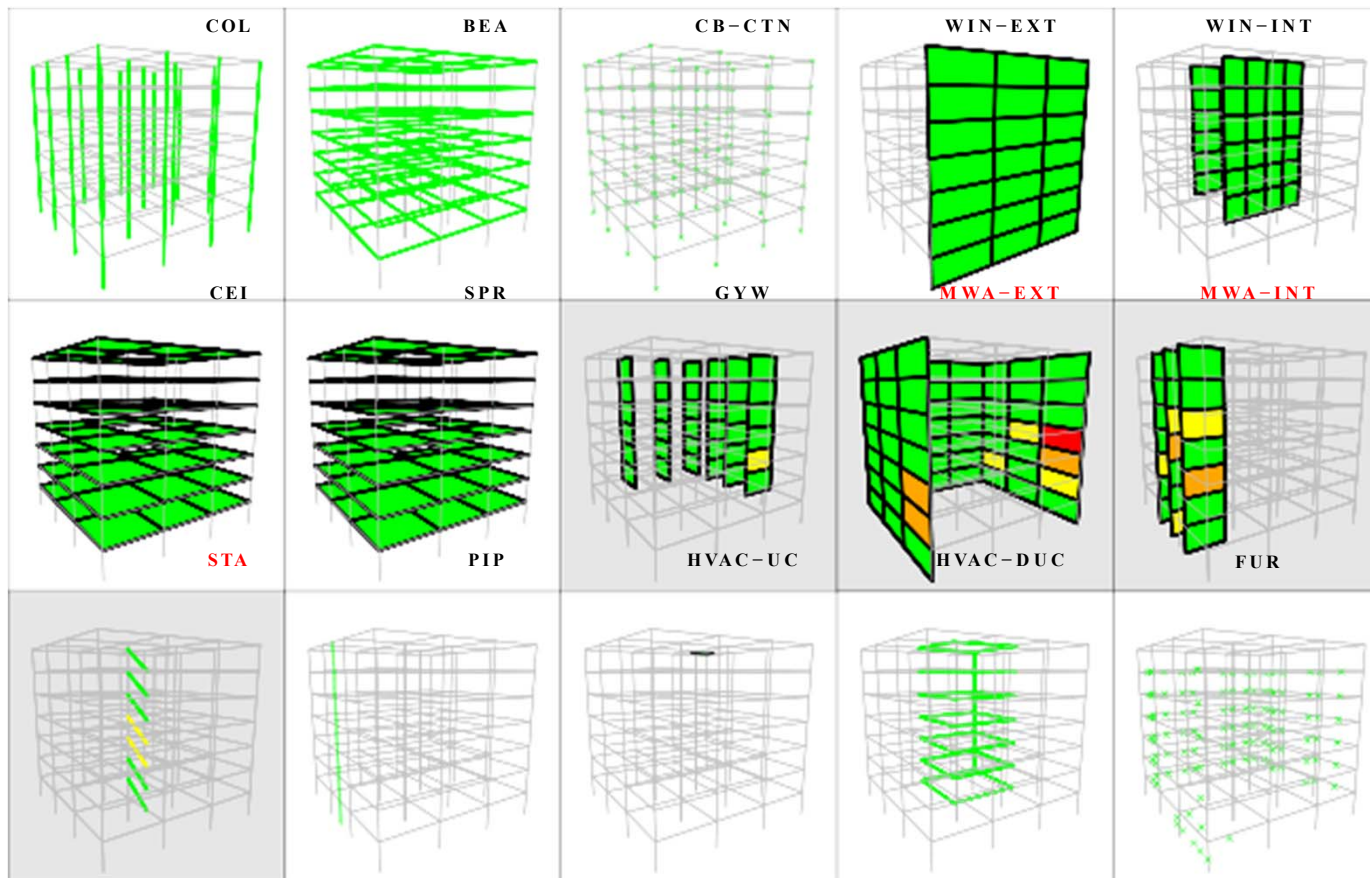


Daño correspondiente a una realización aleatoria del evento (IM1,LS1).

Resultados

INFERENCIA DEL DAÑO:

Tr=250 años (IM3), $S_a=0.29g$, Estado límite de funcionalidad **LS3**.

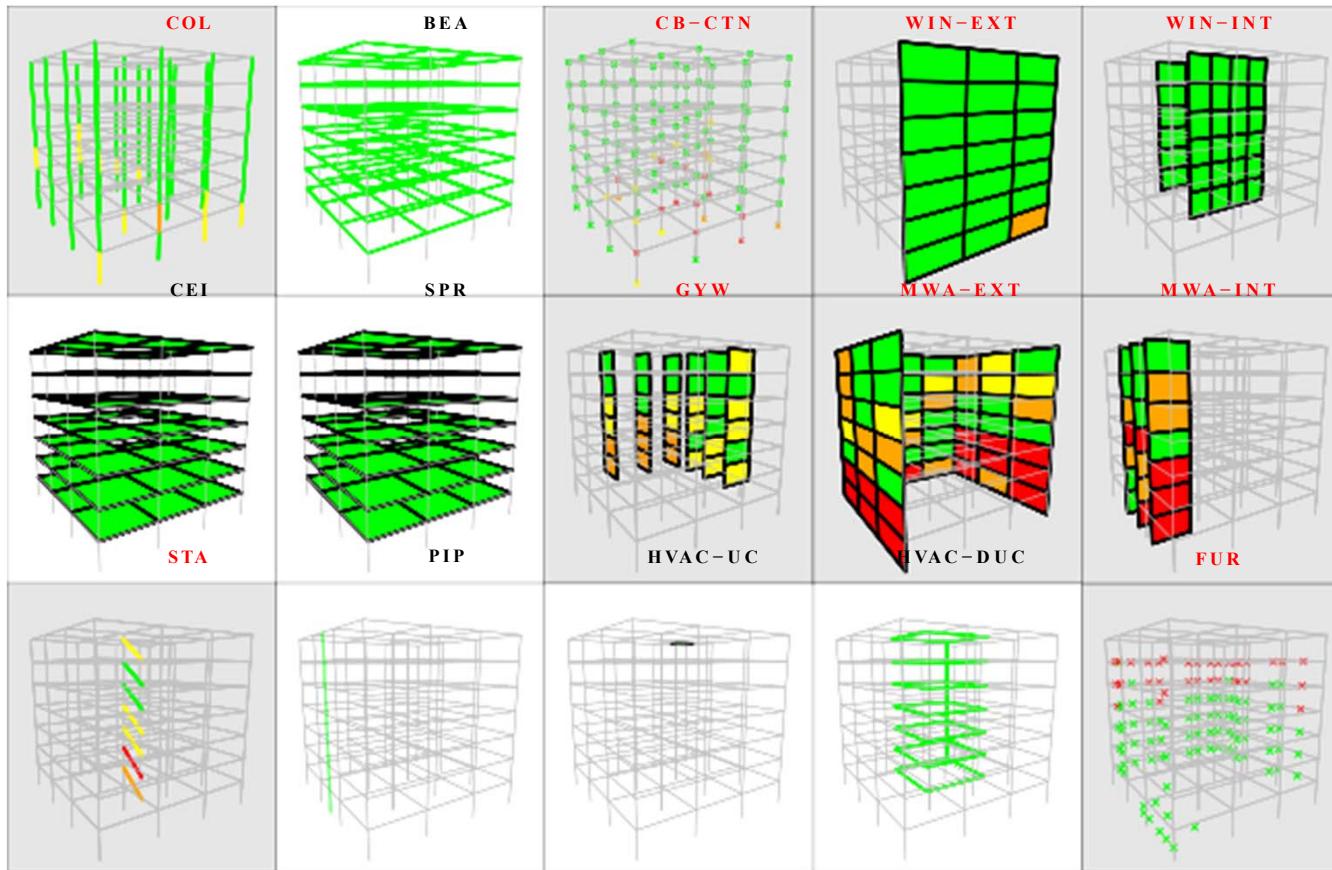


Daño correspondiente a una realización aleatoria del evento (IM3,LS3).

Resultados

INFERENCIA DEL DAÑO:

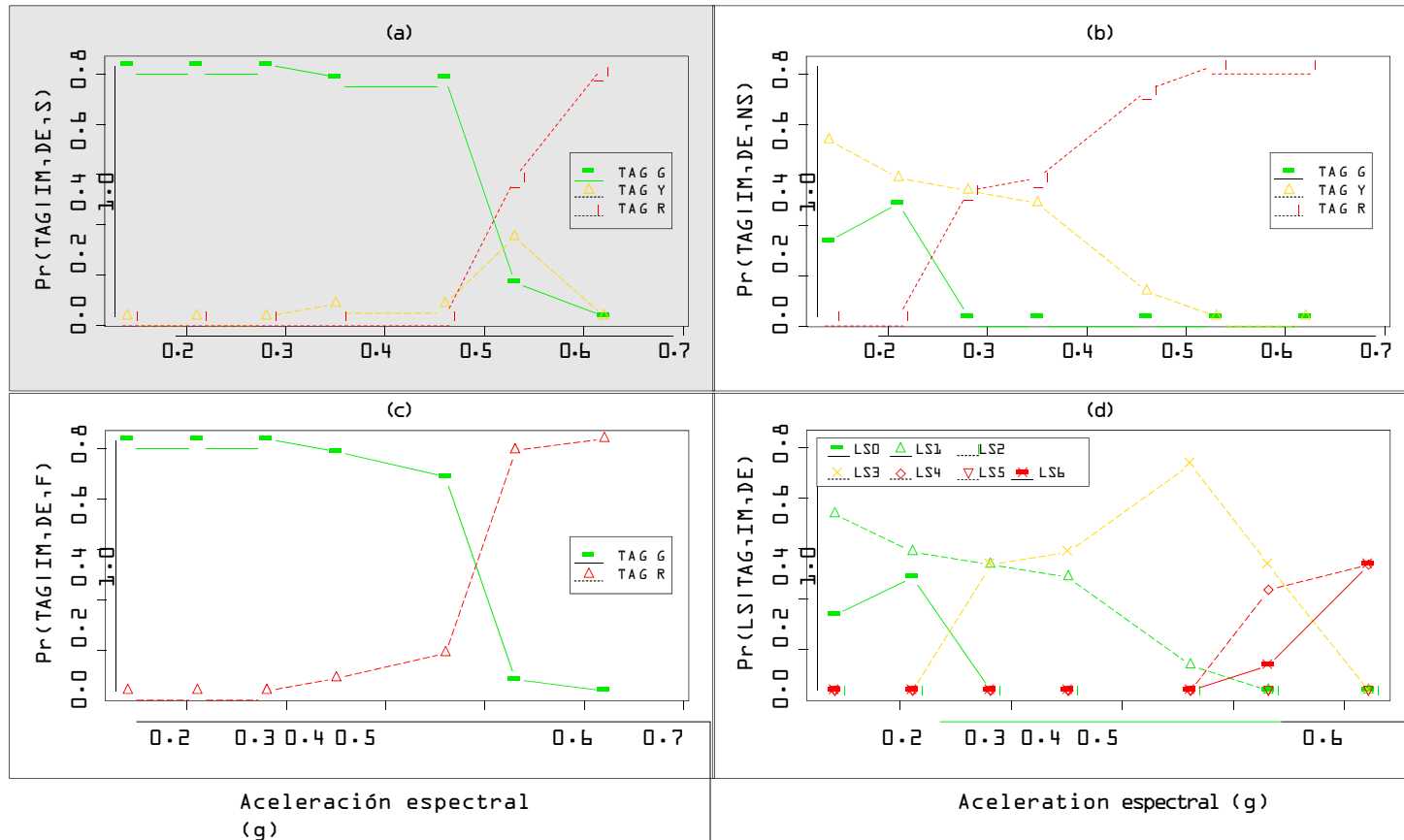
Tr=1500 años (IM6), $S_a=0.54g$, Estado límite de funcionalidad **LS4**.



Daño correspondiente a una realización aleatoria del evento (IM6,LS4).

Resultados

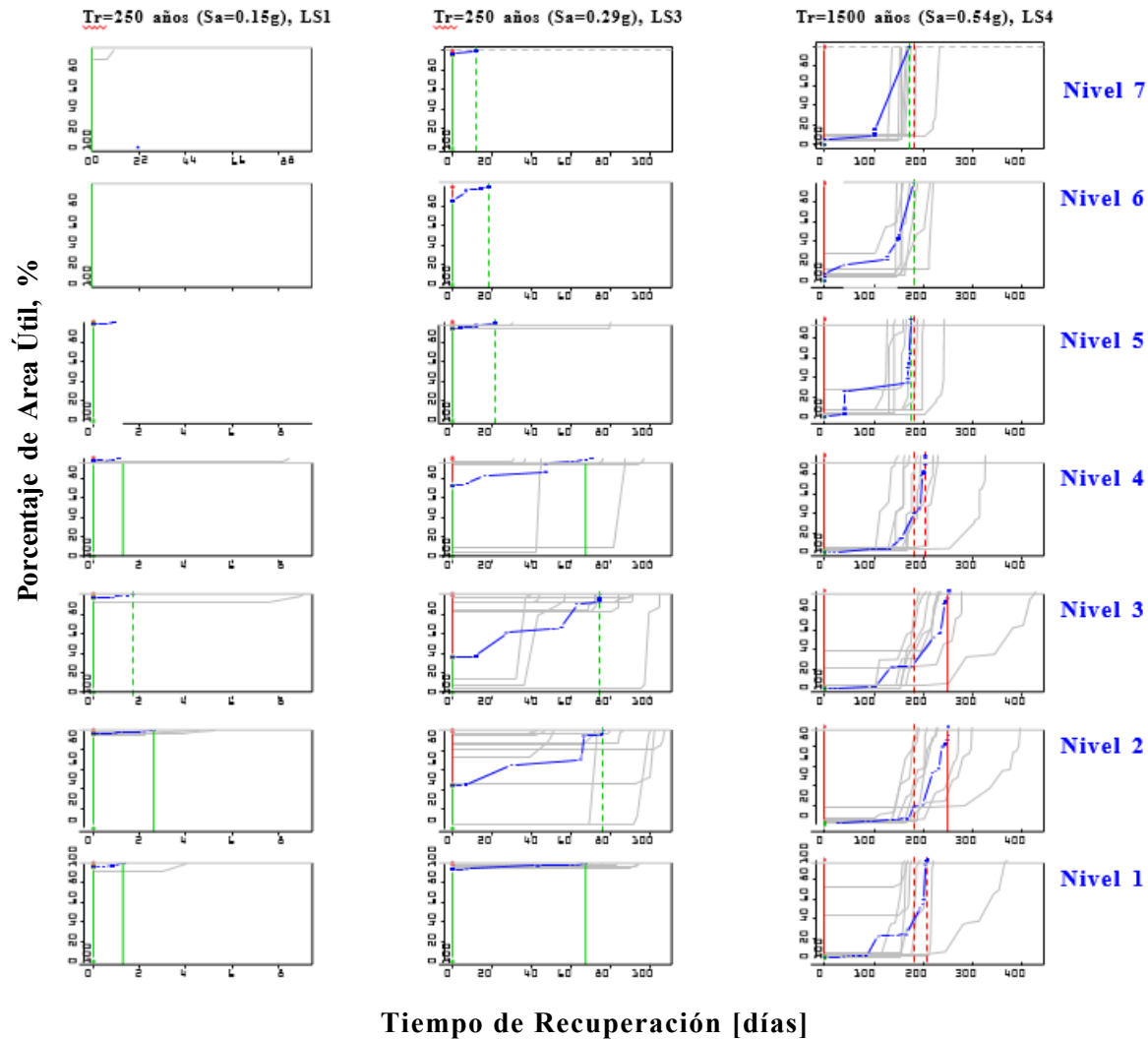
Inspección **estructural** post-sísmica (ATC-20, 1985).



Probabilidad de etiquetado por inspección (a) Estructural, (b) No Estructural, (c) Contenidos, y (d) Estados Límite de Funcionalidad LS.

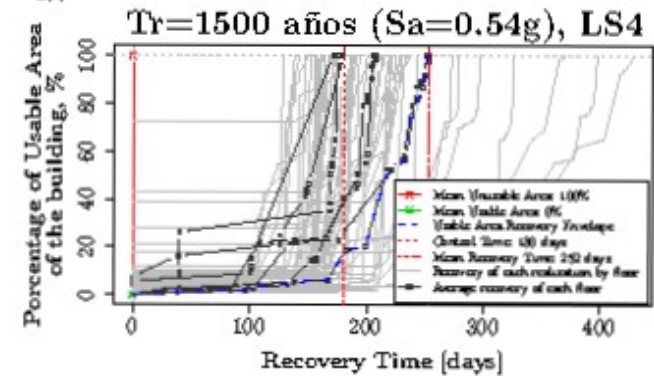
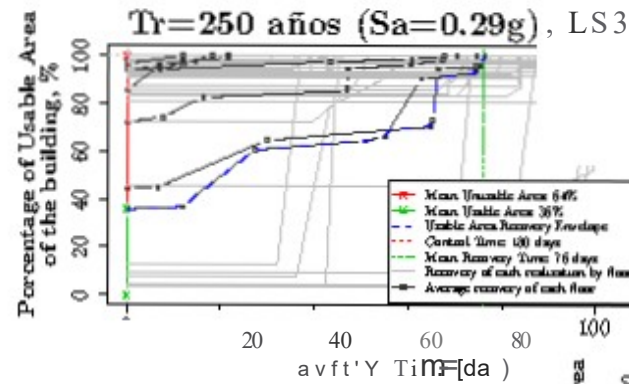
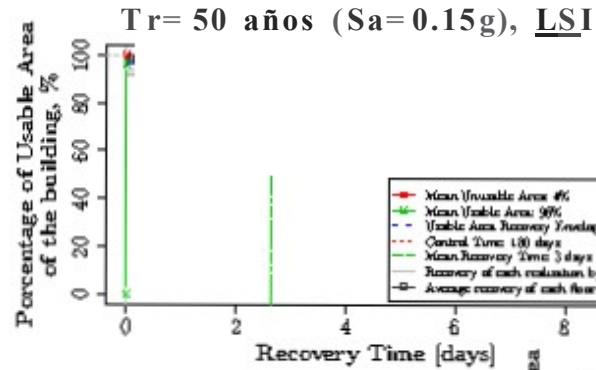
Resultados

→ Area Media No-Util → Area Media Util Porcentaje → Medio de Area Recuperada -- Tiempo de control
-- Tiempo Medio de Recuperación — Recuperación por cada realización



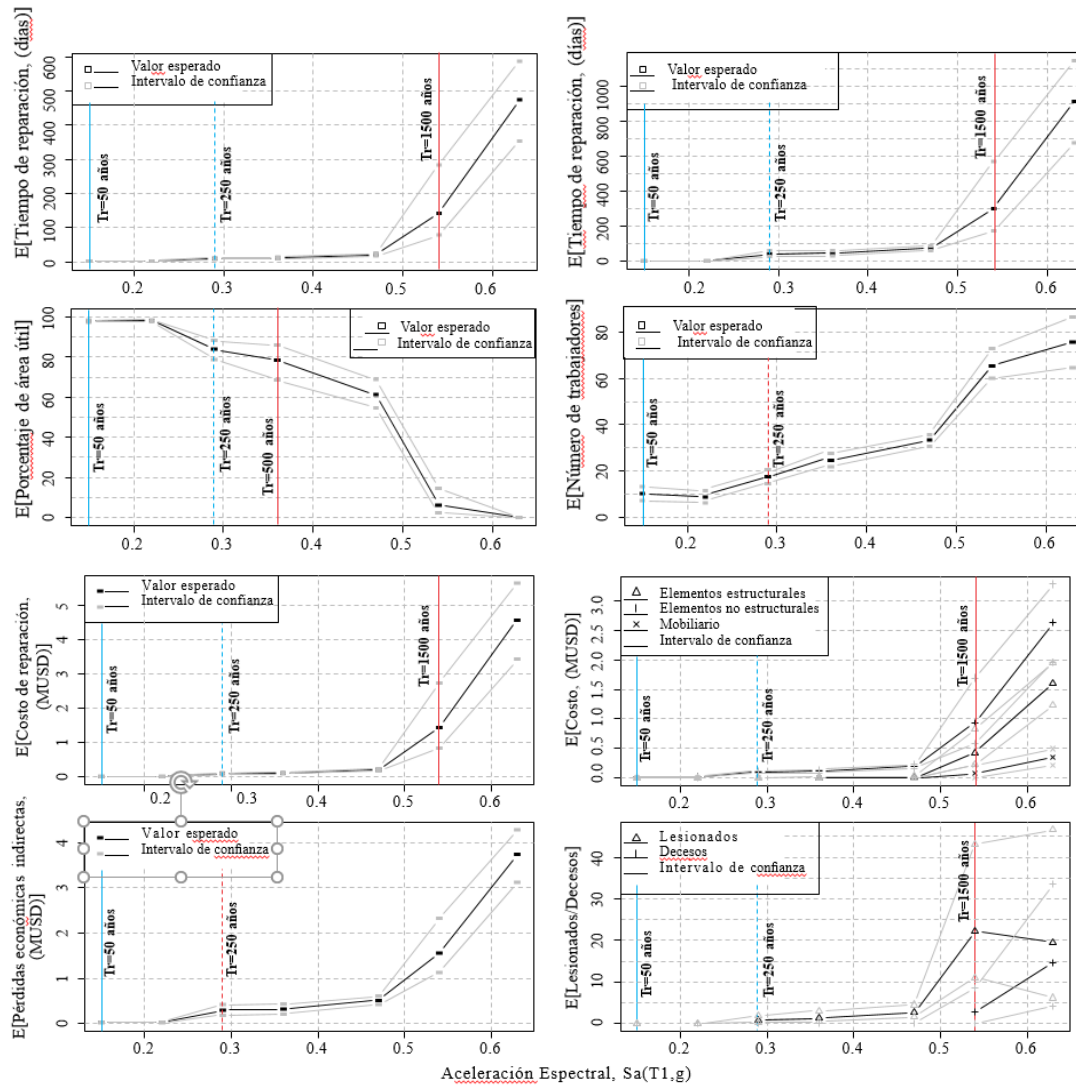
Resultados

RESILIENCIA: capacidad de recuperación del edificio



Resultados

Funciones de vulnerabilidad (Sa(T1) vs. E[DV]).



Curvas calculadas con el método de **remuestreo aleatorio Bootstrap (Efron, 1977)**

Diseño sísmico basado en resiliencia

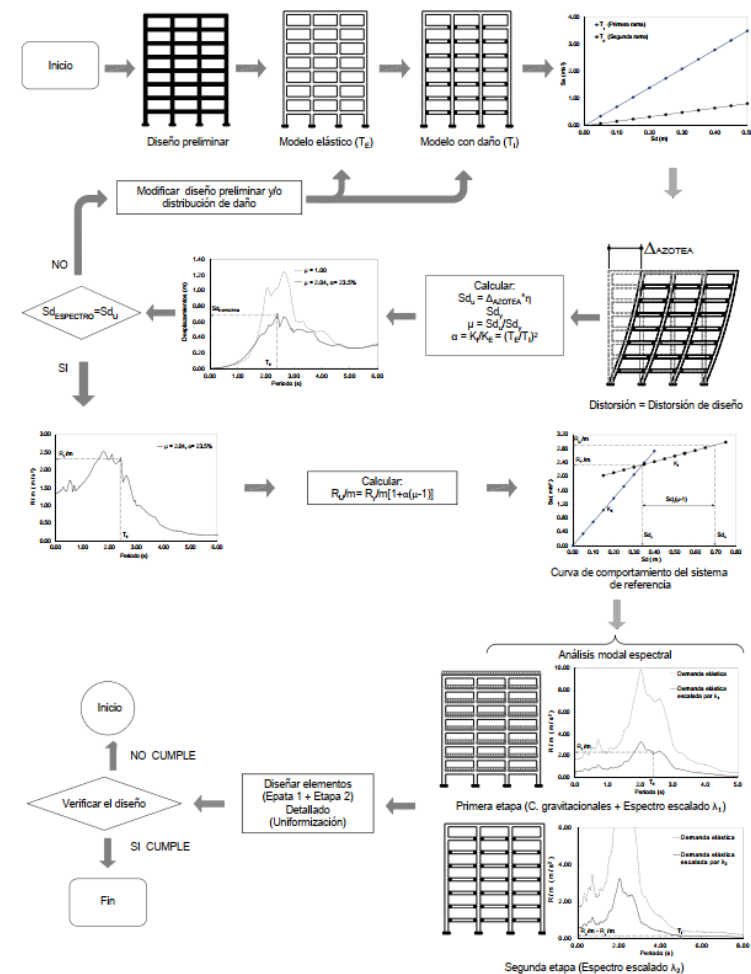
La resiliencia sísmica de un edificio se define como la capacidad de un sistema para reducir las posibilidades de reducción abrupta de su funcionalidad ante sismo, para absorberla si ésta ocurre y para recuperarse rápidamente después de este evento, Bruneau et al. (2003).

Los objetivos de desempeño en un diseño resiliente generalmente se enmarcan en términos de cantidad de daño aceptable expresada en términos económicos, pérdida de funcionalidad y tiempo de inactividad en relación con demandas de diseño específicas.

¿Cómo lograr un sistema resiliente?

1. Las probabilidades de falla reducidas,
2. Las consecuencias de las pérdidas en términos de vidas, daños y consecuencias económicas y sociales negativas, y
3. Los tiempo de recuperación/restauración de funcionalidad a su nivel "normal".

DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÉTODO PROPUESTO

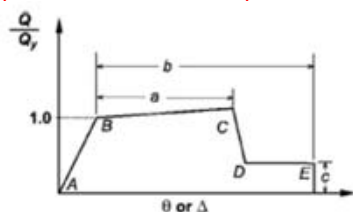


Diseño sísmico basado en resiliencia

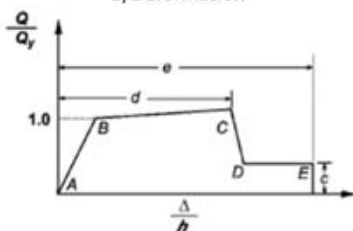
Extensión natural del enfoque de DSBD, en el que, además de garantizar un desempeño particular, identifica e intenta mitigar todos los riesgos asociados a amenazas que obstaculizan los objetivos de reocupación y recuperación de funcionalidad a través de un diseño mejorado de componentes estructurales y no estructurales, y de una pre-planificación de contingencia ante desastres.

Relación fuerza generalizada-deformación para elementos o componentes de CR

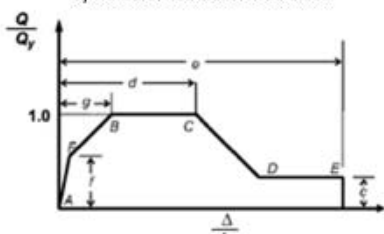
Parámetros para modelos y criterios de aceptación numérica para procedimientos no lineales. Vigas de concreto reforzado



a) Deformación



b) Relación de deformaciones



c) Relación de respuesta trilineal-deformación

Conditions	Modeling Parameters ^a			Acceptance Criteria ^a				
	Plastic Rotation Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle (radians)				
	a	b		Performance Level				
				IO	LS	CP		
Condition i. Beams controlled by flexure ^b								
$\frac{\rho - \rho'}{f_{st}}$	Transverse reinforcement ^c	$\frac{V^d}{b_w d \sqrt{f_{st}}}$						
≤ 0.0	C	≤ 3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition ii. Beams controlled by shear ^b								
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span ^b								
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005	0.01
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint ^b								
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.02	0.03

Note: f'_{st} in lb/in.² (MPa) units.

^a Values between those listed in the table should be determined by linear interpolation.

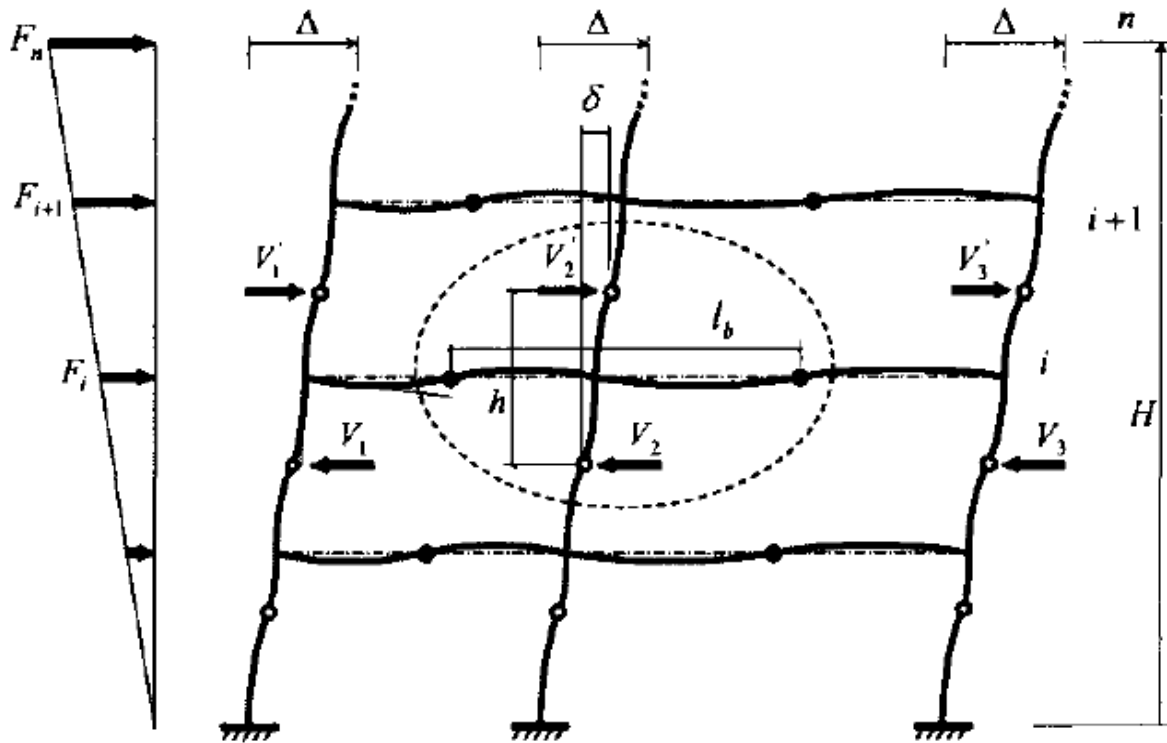
^b Where more than one of conditions i, ii, iii, and iv occur for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.

^c "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement, respectively. Transverse reinforcement is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at $\leq d/3$, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops (V_h) is at least 3/4 of the design shear. Otherwise, the transverse reinforcement is considered nonconforming.

^d V is the design shear force from NSP or NDP.

Diseño sísmico basado en resiliencia

Derivas de entrepiso en un marco plano



La distorsion de entrepiso, q , de un marco definido como el cociente de la deriva de entrepiso y su altura :

$$\theta = \delta/h$$

De acuerdo con Priestley, 1998

$$\theta_y = 0.5 \cdot \varepsilon_y \cdot (l_b/h_b)$$

La ductilidad de entrepiso es

$$\mu_\delta = \delta_u / \delta_y$$

El desplazamiento de fluencia de la estructura sin daño (correspondiente al modo fundamental) se obtiene a partir de:

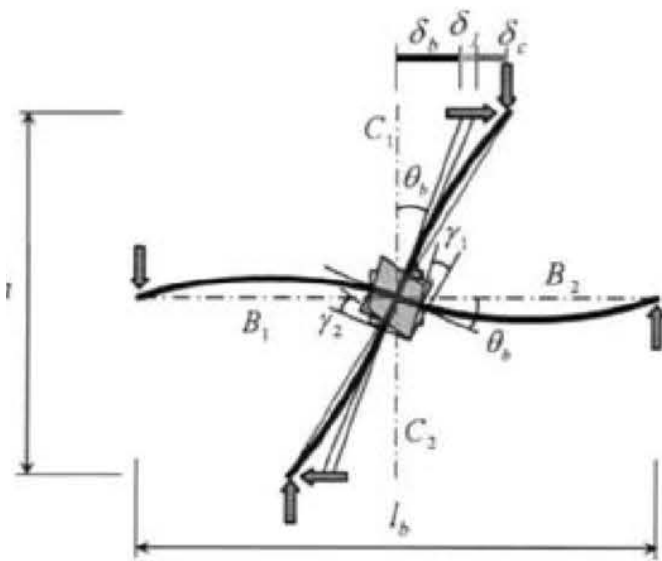
$$d_{az} = \frac{\delta_y \cdot h}{\phi_{i\max} - \phi_{i-1}}$$

$$\Delta_y = \frac{d_{az}}{FP \cdot \phi_{azel}}$$

Diseño sísmico basado en resiliencia

Para identificar la correlación de las derivas de entrepiso con los componentes de las rotaciones locales objetivo en vigas, columnas, muros y nodos. Sin embargo, si los miembros y las juntas en un marco se diseñan siguiendo las reglas especiales de detallado dúctil dadas en los reglamentos de diseño modernos, se espera que sus capacidades de rotación para diferentes estados límite sigan las ecuaciones que se describen más adelante en esta presentación.

Cálculo del desplazamiento plástico de un nodo de la estructura con daño



$$\delta_y = \delta_b^y + \delta_c^y + \delta_{jv} \quad \delta_{jv} = \text{desp. por cortante del núcleo del nodo}$$

$$\delta_p = \delta_b^p + \delta_c^p + \delta_{js} \quad \delta_{js} = \text{desp. por deslizamiento del refuerzo longitudinal}$$

Cálculo de la ductilidad de los elementos

$$\mu_{c\delta} = \frac{\delta_c^y + \delta_c^p}{\delta_c^y} \Rightarrow \delta_c^p = (\mu_{c\delta} - 1) \cdot \delta_c^y$$

$$\mu_{b\delta} = \frac{\delta_b^y + \delta_b^p}{\delta_b^y} \Rightarrow \delta_b^p = (\mu_{b\delta} - 1) \cdot \delta_b^y$$

$$\alpha_b = \frac{\delta_b^y}{\delta_y} \quad \alpha_c = \frac{\delta_c^y}{\delta_y} \quad \alpha_{js} = \frac{\delta_{js}}{\delta_p}$$

Desplazamiento plástico del marco CR:

$$\delta_p = \frac{(\mu_{b\delta} - 1) \cdot \alpha_b + (\mu_{c\delta} - 1) \cdot \alpha_c}{(1 - \alpha_{js})} \cdot \delta_y$$

Diseño sísmico basado en resiliencia

Componentes del desplazamiento inelástico

$$\delta_p = \frac{(\mu_{b\delta} - 1) \cdot \alpha_b + (\mu_{c\delta} - 1) \cdot \alpha_c}{(1 - \alpha_{js})} \cdot \delta_y$$

Curvaturas de fluencia:

$$\varphi_{yb} = 1.7 \cdot \left(\frac{\varepsilon_y}{hb} \right) \quad \text{viga}$$

$$\varphi_{yc} = 2.1 \cdot \left(\frac{\varepsilon_y}{hc} \right) \quad \text{columna}$$

Rotación de fluencia de vigas:

$$\theta_{by} = \frac{\varphi_{by} \cdot l_b}{6}$$

Desplazamiento de fluencia debido a la deformación de la viga:

$$\delta_{by} = \theta_{by} \cdot \frac{l_c}{2}$$

Desplazamiento de fluencia debido a la deformación de la columna:

$$\delta_{cy} = \varphi_{cy} \cdot \left(\frac{l_c}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{3}$$

Los factores que indican la contribución que tiene cada elemento al desplazamiento de fluencia total del marco.

$$\alpha_b = \frac{\delta_b^y}{\delta_y} \quad \alpha_c = \frac{\delta_c^y}{\delta_y} \quad \alpha_{js} = \frac{\delta_{js}}{\delta_p}$$

Para uniones viga-columna de proporciones normales su contribución al desplazamiento de fluencia total del marco se puede tomar como :

$$\alpha_{js} = 10\%$$

Diseño sísmico basado en resiliencia

Distorsión de entrepiso plástico:

$$\delta_{DEP} = \frac{2\delta_p}{h}$$

Desplazamiento en la azotea del modelo dañado:

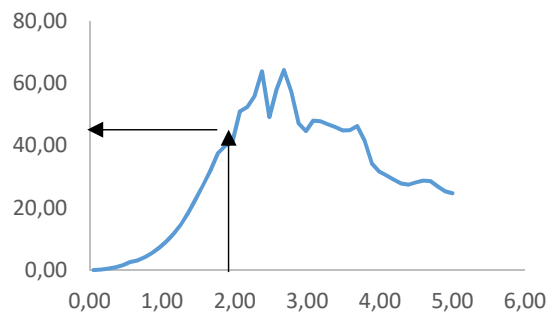
$$d_p = \frac{\delta_{DEP} \cdot h}{\phi_{i_{max}} - \phi_{i-1}}$$

Diferencias de formas modales normalizadas donde ocurre la distorsión máxima en el MD

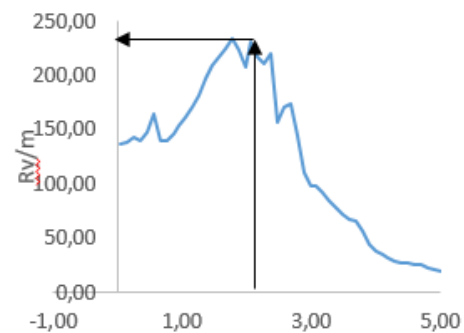
Con la información modal se encuentra el desplazamiento plástico del S1GDL

$$\Delta_p = \frac{d_p}{FP_{ED} \cdot \phi_{azED}}$$

FP_{ED} Factor de participación del modelo dañado
 ϕ_{azED} Forma modal correspondiente al nivel de azotea.



Verificación del T_1 para satisfacer el desplazamiento último



Resistencia de fluencia por unidad de masa

Desplazamiento ultimo del sistema de referencia:

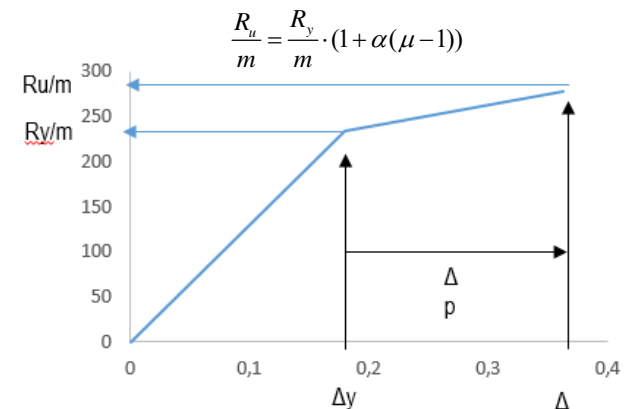
$$\Delta_u = \Delta_y + \Delta_p$$

Ductilidad del sistema

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Rigidez de post-fluencia

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1} = \frac{m \left(\frac{2\pi}{T_2} \right)^2}{m \left(\frac{2\pi}{T_1} \right)^2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2$$

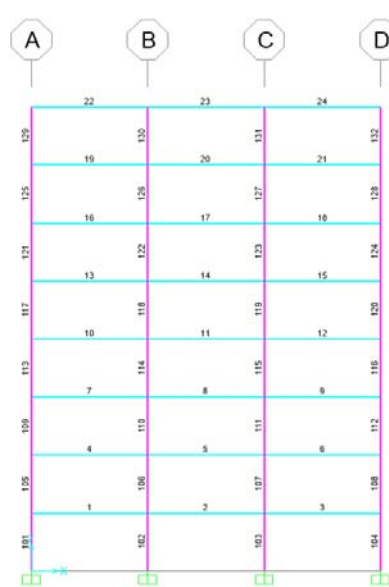


Resistencia última por unidad de masa

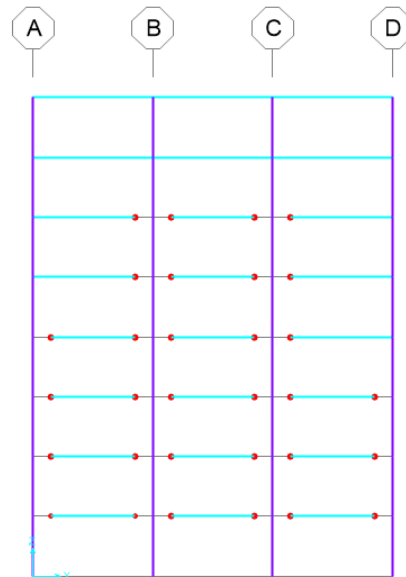
Ejemplo de diseño y resultados

Edificio de 8 niveles de concreto reforzado para el que se quiere controlar rotaciones en vigas, manteniéndolas en 0.02.

V= 30x60 cm C= 60x60 cm



Estructura sin daño



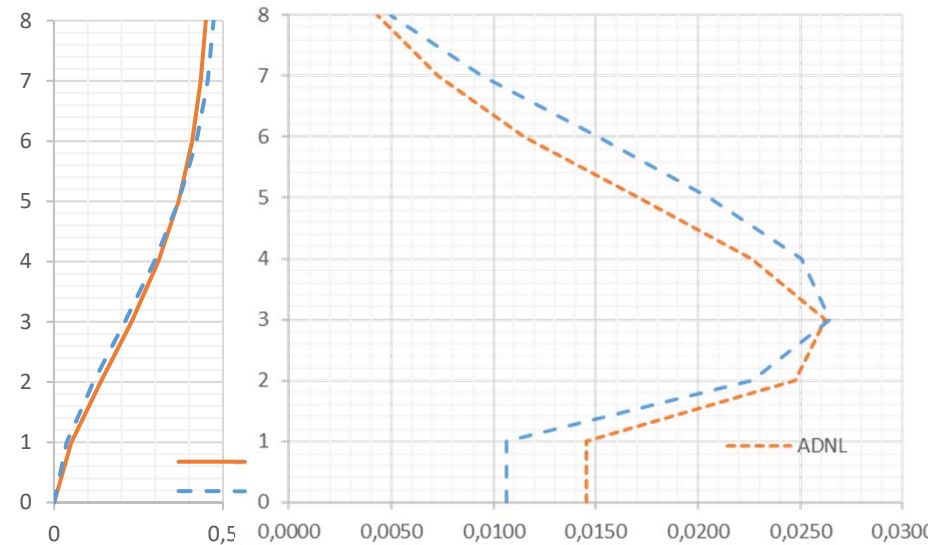
Estructura con daño propuesto

Aplicando la metodología se obtiene una ductilidad global de:

$$\mu = 2.025$$

$$dist_{max} = 0.0265$$

$$d_{az} = 47.2cm$$



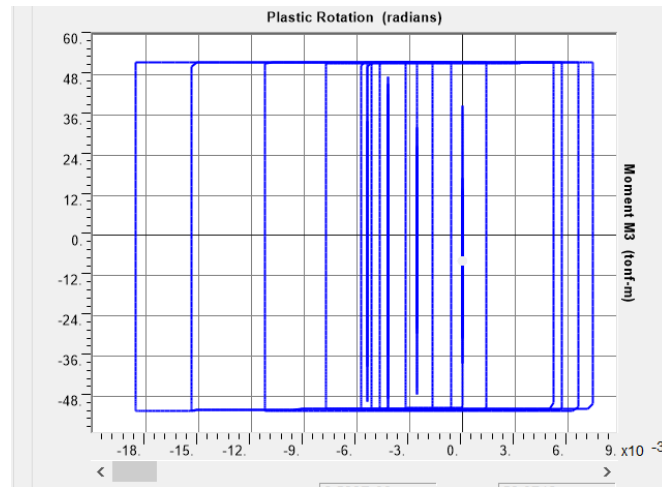
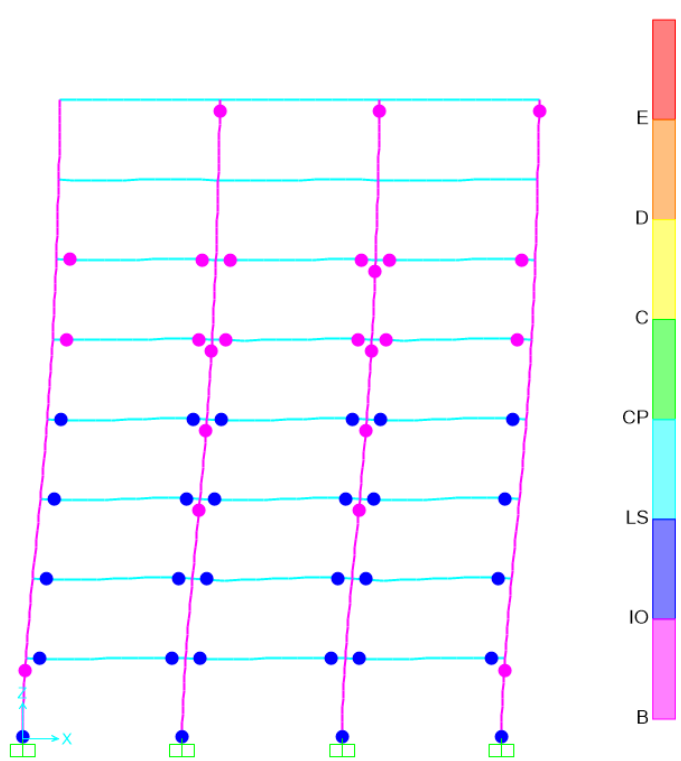
Desplazamientos

Distorsiones de entresida

Comparaciones con resultados del análisis no lineal de historia en el tiempo utilizando el registro EW del SCT-85

Resultados

Rotaciones plásticas en vigas y columnas



Máxima rotación ocurre en el nivel 2 con 0.019

Rotula	Rotación
R1	-0.016
R1	-0.012
R1-INT	-0.015
R1-INT	-0.013
R1	-0.015
R1	-0.013
R2	-0.019
R2	-0.015
R2-INT	-0.019
R2-INT	-0.016
R2	-0.018
R2	-0.017
R3	-0.018
R3	-0.014
R3-INT	-0.016
R3-INT	-0.014
R3	-0.015
R3	-0.016
R4	-0.013
R4	-0.010
R4-INT	-0.012
R4-INT	-0.011
R4	-0.011
R4	-0.012
R5	-0.009
R5	-0.007
R5-INT	-0.008
R5-INT	-0.008
R5	-0.007
R5	-0.008
R6	-0.006
R6	-0.004
R6-INT	-0.005
R6-INT	-0.005
R6	-0.005
R6	-0.005
R7	0.000
R7	0.000
R7-INT	0.000
R7-INT	0.000
R7	0.000
R7	0.000
R8	0.000
R8	0.000
R8-INT	0.000
R8-INT	0.000
R8	0.000
R8	0.000

Reflexiones finales

Esta presentación sugiere la consideración de la pérdida y tiempo de recuperación de funcionalidad de un edificio como base para los futuros métodos de evaluación/diseño sísmico de nuestros edificios escolares. Como profesionales de la ingeniería sísmica tenemos que preguntarnos:

- 1) ¿Quién paga los daños reparación/demolición de los edificios, la puesta en operación y los efectos colaterales a una comunidad de una escuela dañada por un sismo?
- 2) ¿Estamos comunicando adecuadamente a todas las partes involucradas en una escuela el riesgo sísmico de sus edificios?
- 3) ¿Es realmente necesario y más económico diseñar edificios escolares aceptando la ocurrencia de daños?
- 4) ¿Es correcto que los niños y jóvenes de una comunidad no puedan regresar a sus escuelas después de un sismo?
- 5) Finalmente, ¿queremos que nuestras escuelas continúen siendo dañadas por los sismos?.

Los académicos y profesionales de la ingeniería debemos informar a las instancias de gobierno, dueños, usuarios y otras entes interesadas sobre los riesgos y beneficios de las diferentes opciones de reforzamiento o diseño de una escuela, en términos no técnicos, relativamente simples y no vagamente definidos.

GRACIAS

POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITÚ

