



Colegio Dominicano de
Ingenieros, Arquitectos
y Agrimensores

Primer Congreso Internacional
“Terremotos y vulnerabilidad”

Reducción de riesgo sísmico en puentes. Presente y futuro

Dr C. Ing. Dario Candebat Sánchez

Jefe de Grupo de Ingeniería Sísmica – Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

Presidente Nacional de la Sociedad de Ingenieros Civiles - UNAICC

dario@cenais.cu



Terremoto de Chile, 2010

Fuente: <http://es.earthquake-report.com>

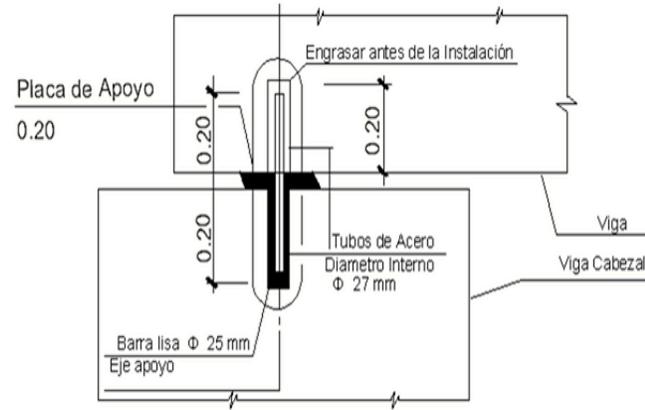
Daños provocados por sismos fuertes

- Ausencia de travesaños o diafragmas extremos sobre los apoyos.
- Ausencia de topes sísmicos.
- Anclajes deficientes para el movimiento lateral.
- Insuficiente mesa de apoyo en estribos.
- Cepas insuficientes.
- Longitud de apoyo insuficiente en estribo.
- Golpeteo.
- Asentamiento del relleno.

Daños más comunes



Longitud de apoyo insuficiente



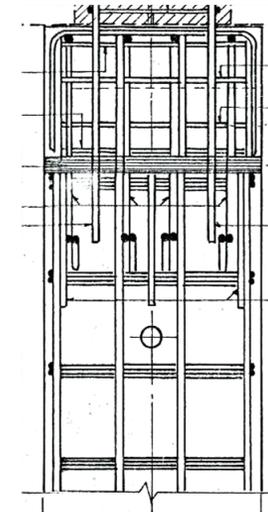
Estructuras poco redundantes



Ausencia de trabas sísmicas y diafragmas



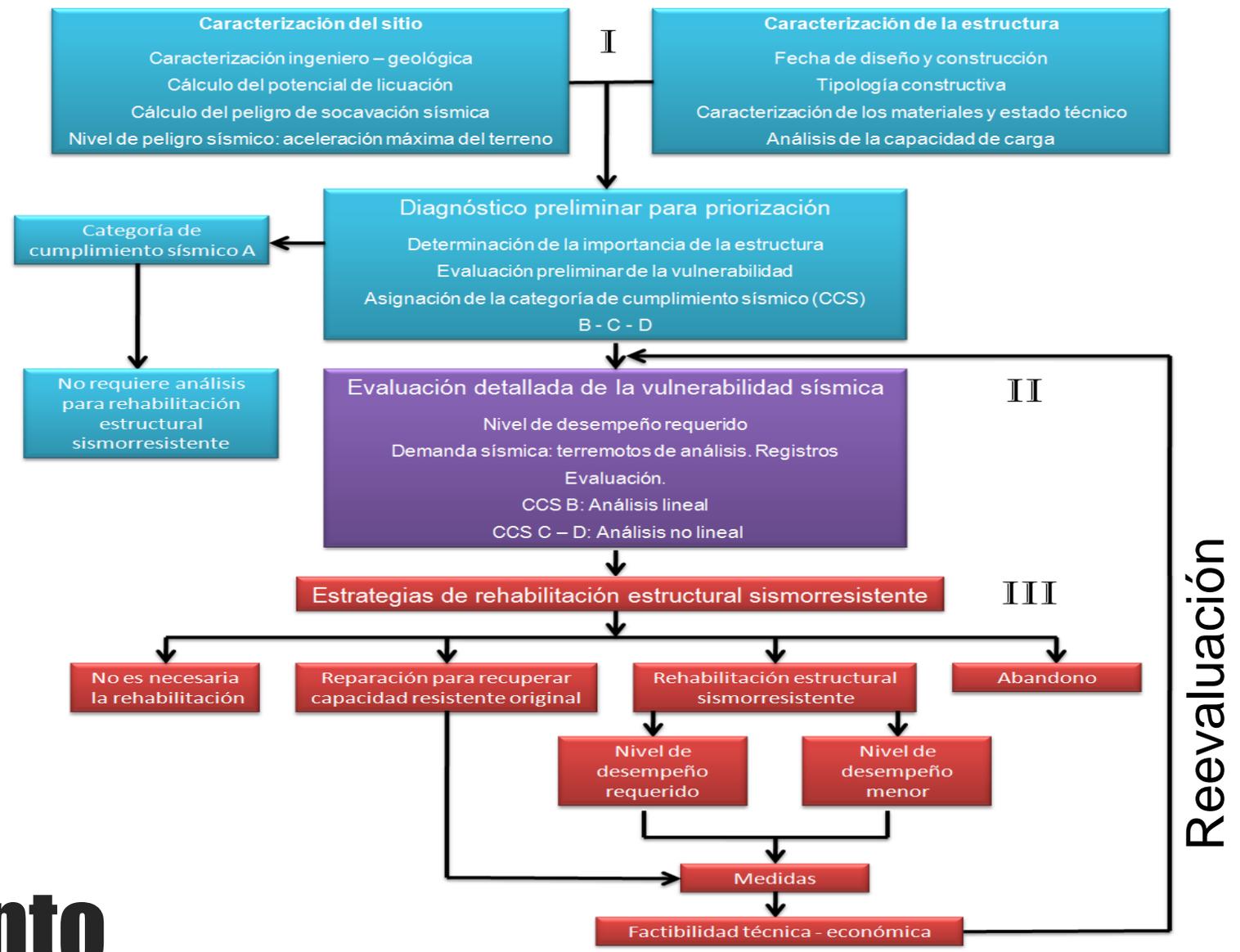
Monocolumna

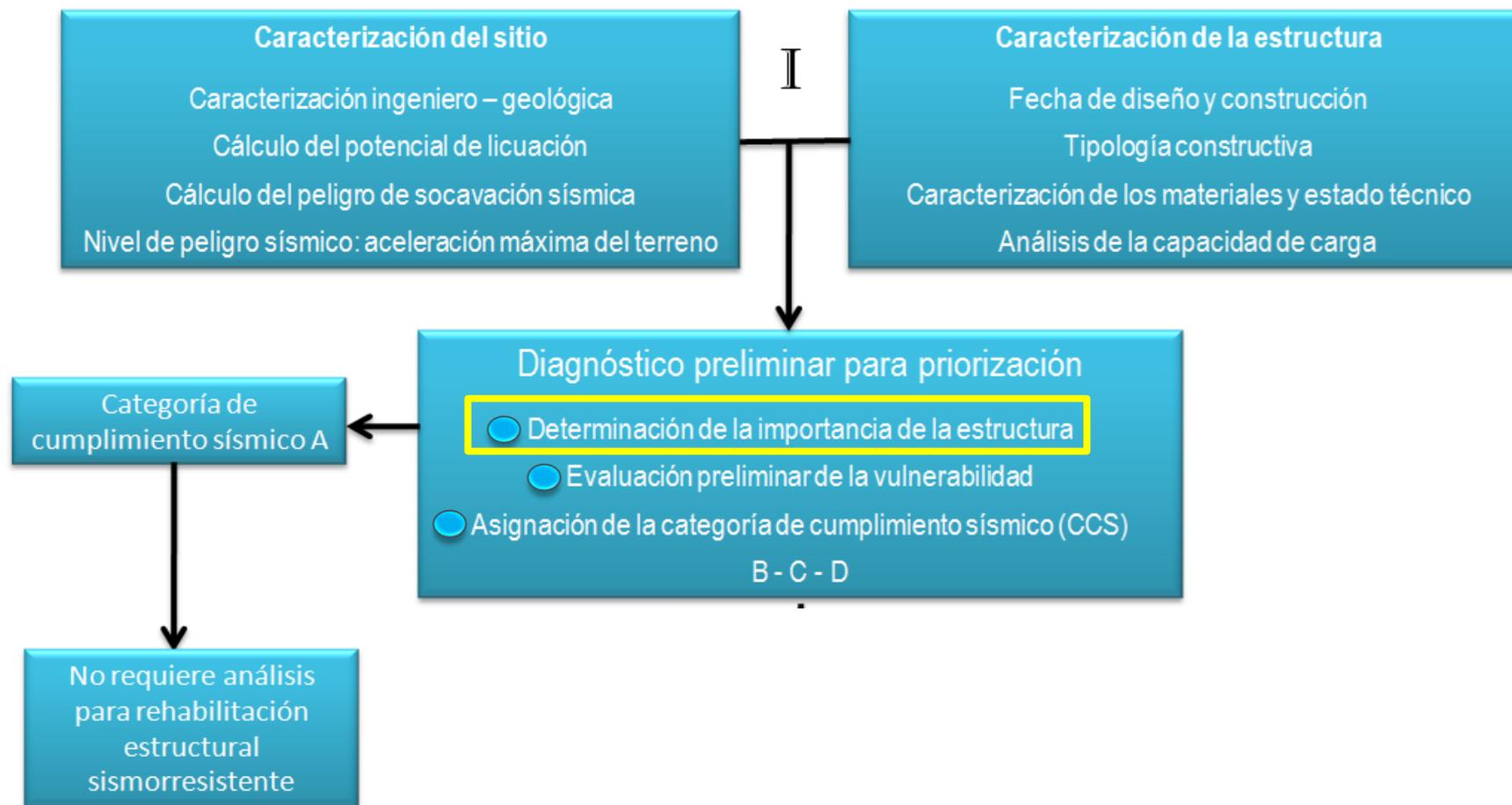


Espaciamiento inadecuado entre cercos

Cuba

Procedimiento





Etapa - 1

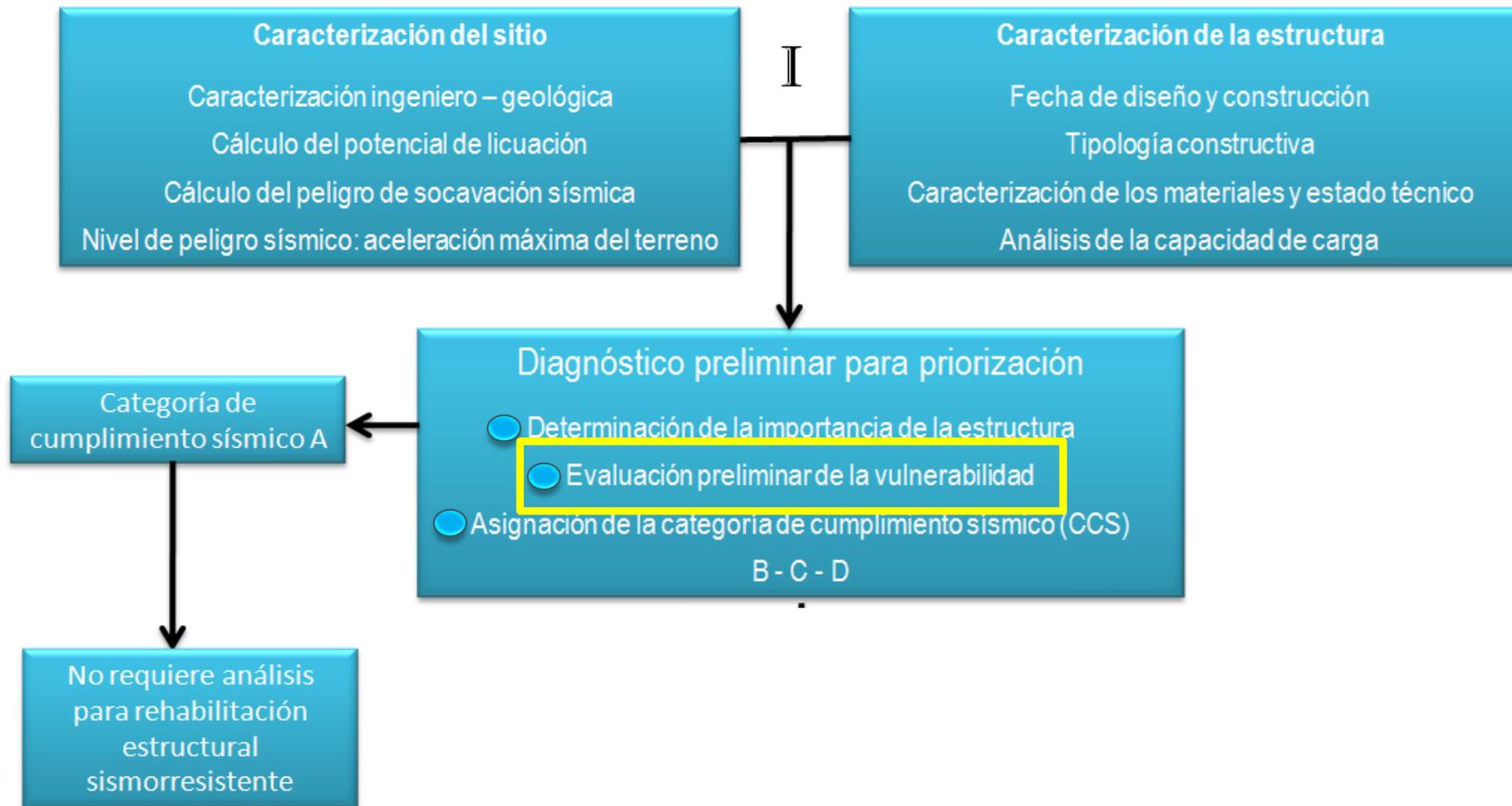
Clasificación de los puentes según su importancia

- Puentes críticos.
- Puentes esenciales.
- Otros puentes.

Se adoptan los criterios de AASHTO

Se tienen en cuenta aspectos técnicos, sociales, económicos, políticos, **medioambientales e históricos.**

Etapa – 1: Diagnóstico



Etapa - 1

Aspectos a evaluar referidos a la superestructura	Evaluación
Especificaciones de diseño	2.00
Después de 1999	1.00
Antes de 1999	2.00
Tipo de superestructura	1.50
Isostática con losa continua	0.75
Isostática	1.50
Longitud de apoyo	1.50
Cumple lo especificado en la norma vigente	0.00
No cumple	1.50
Existencia de trabas sísmicas	1.00
Existen y poseen diseño satisfactorio	0.00
Existen pero presentan diseño inadecuado	0.75
No existen	1.00
Existencia de diafragmas (vigas transversales)	1.00
Posee diafragmas	0.00
No posee diafragmas	1.00
Dispositivos de apoyo	1.00
Existen	0.00
Existen en mal estado y/o son inadecuados	0.75
No Existen	1.00
Trazado de la superestructura	1.00
Recto	0.00
Curva horizontal menor de 90° y esviaje menor de 30°	0.50
Curva de 90° y esviaje entre 30° y 45°	0.75
Curva mayor de 90° y esviaje mayor de 45°	1.00
Curvas verticales	0.50
No tiene	0.00
< 6 %	0.25
> 6 %	0.50
Posibilidades de golpeteo	0.50
Separación adecuada entre estructuras adyacentes	0.00
Separación menor a la requerida a la misma altura	0.25
Separación menor a la requerida a diferentes alturas	0.50
Evaluación total	10.00
Factor de ponderación en el resultado final	25%

Etapa – 1: Diagnóstico

Aspectos a evaluar referidos a la subestructura	Evaluación
Degradación de la rigidez	2.50
$T_P \leq T_c$	0.00
$T_P > T_c$	2.50
Estado técnico de la subestructura	2.00
Muy buena y Buena (Sin daños en pilas y/o estribos)	0.00
Regular (Daños moderados en pilas y/o estribos)	1.00
Mala y muy mala (Daños extensivos en pilas y/o estribos)	2.00
Tipo de Subestructura	2.00
Pilas	
Muros de corte	0.50
Pórticos	0.75
Mono columnas o pilas en V o inclinadas	1.00
Estribos	
Abiertos	0.50
Cerrados con drenaje adecuado	0.75
Cerrados sin drenaje adecuado	1.00
Esbeltez geométrica de columnas de pilas y estribos (adimensional)	1.00
$l_g \leq 6.5$	0.00
$6.5 \leq l_g \leq 30$	0.75
$l_g > 30$	1.00
Esviaje	1.00
Sin esviaje o con ángulo menor de 15°	0.00
Esviaje entre 15° y 30°	0.50
Esviaje entre 31° y 45°	0.75
Esviaje mayor de 45°	1.00
Unión columna - cimentación	1.00
Unión monolítica	0.00
No existe monolismo	1.00
Probabilidad de resonancia estructura - suelo	0.50
$T_{suelo} \neq T_{estructura}$	0.00
$T_{suelo} = T_{estructura}$	0.50
Evaluación final	10.00
Factor de ponderación en el resultado final	45%

Etapa – 1: Diagnóstico

Ecuaciones empíricas obtenidas para cálculo del período

Columnas de pilas de 0.70 m x 0.70 m. Gálibo vertical: 5.8 - 9.00 m.

Dirección longitudinal

$$T_L = 0.040 G_V^2 - 0.4518 G_V + 1.47 \quad R^2 = 0.944$$

Dirección transversal

$$T_T = 0.0339 G_V^2 - 0.3426 G_V + 1.022 \quad R^2 = 0.964$$

Columnas de pilas de 0.80 m x 0.80 m. Gálibo vertical: 2.60 - 12.00 m.

Dirección longitudinal

$$T_L = 0.006 G_V^2 - 0.047 G_V + 0.231 \quad R^2 = 0.863$$

Dirección transversal

$$T_T = T_L = 0.0008 G_V^2 + 0.0318 G_V + 0.0282 \quad R^2 = 0.909$$

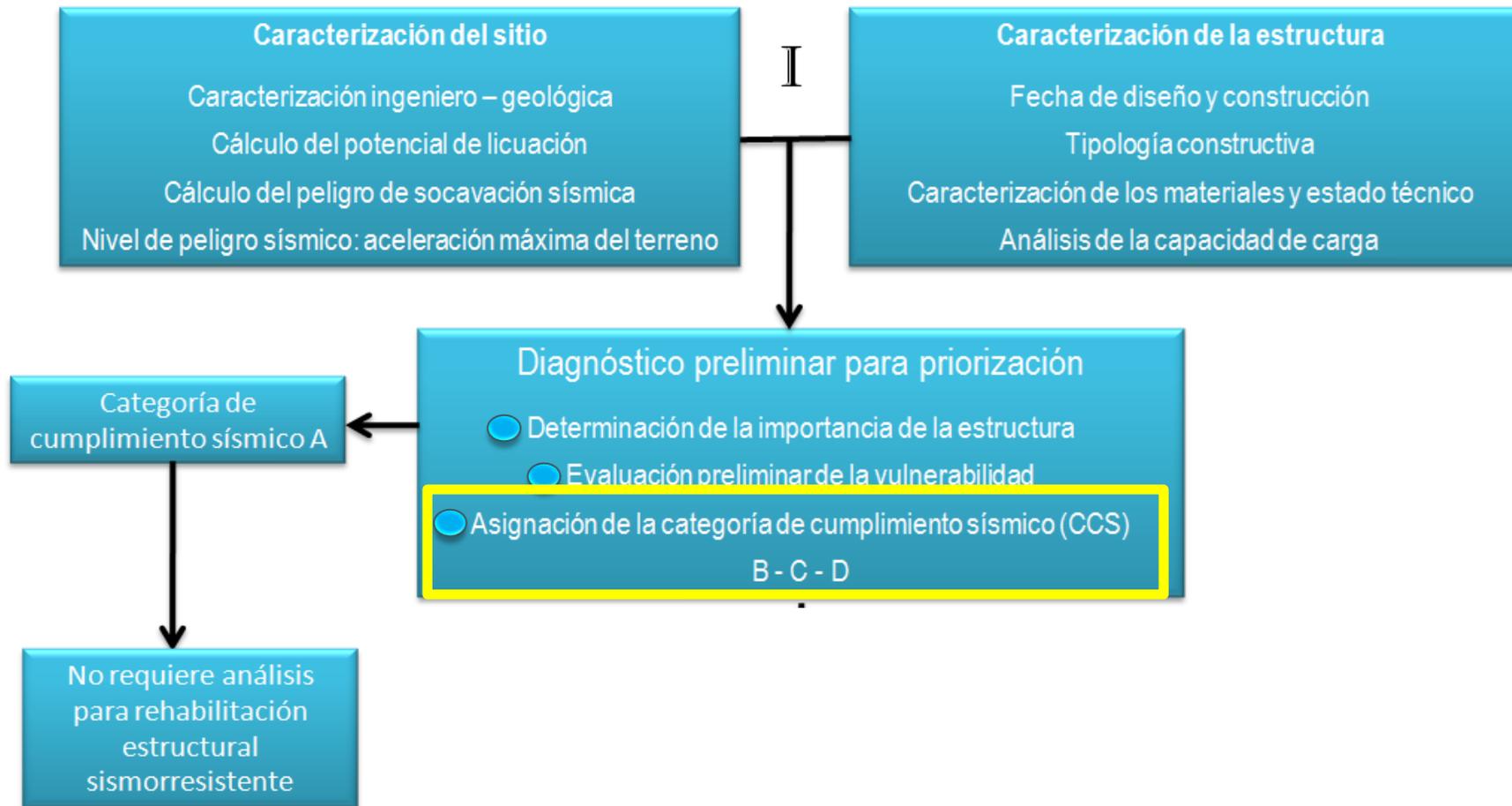
Aspectos a evaluar referidos a las condiciones del sitio	Evaluación
Aceleración del sitio (% gravedad)	2.50
$0,075 \leq a < 0,10$	0.00
$0,10 \leq a < 0,20$	0.50
$0,20 \leq a < 0,30$	1.75
$a \geq 0,30$	2.50
Erosión y/o socavación	2.00
Poco probable	0.00
Probable	1.00
Existe en estado incipiente	1.50
Existe y afecta la estabilidad del puente	2.00
Riesgos geológicos (Licuefacción)	2.00
Insignificante	0.00
Media	0.75
Alta	1.50
Muy alta	2.00
Dureza de los suelos	1.50
Duros (S ₁)	0.00
Menos duros (S ₂)	0.50
Blandos (S ₃)	0.75
Muy blandos (S ₄)	1.50
Irregularidad topográfica del suelo	1.00
No	0.00
Si	1.00
Homogeneidad del suelo	0.50
Sin variación entre eje de pilas y estribos	0.00
Variable	0.50
Existencia de fallas geológicas	0.50
No existen en la zona o están ubicadas a más de 50 Km	0.00
Existen fallas pasivas ubicadas a menos de 50 Km	0.25
Existen fallas activas ubicadas a menos de 50 Km	0.50
Evaluación Total	10.00
Factor de ponderación en el resultado final	30%

Etapa – 1: Diagnóstico

Parámetros invalidantes

- Inadecuada longitud de apoyo y ausencia de trabas sísmicas o diafragmas o ambos.
- Degradación de la rigidez.
- Estado técnico de la subestructura Malo y Muy malo.
- Existencia de socavación que afecta la estabilidad de la estructura.
- Resonancia suelo – estructura

Etapas – 1: Diagnóstico



Etapa - 1

Categorías de cumplimiento sísmico

Zona de peligro	Clasificación de la importancia de la estructura		
	Críticas	Esenciales	Ordinarias
Muy bajo	A	A	A
Bajo	B	B	B
Moderado	C	C	B
Alto	D	C	B
Muy alto	D	C	B

Modificado de NC 46 (1999). Elaboración propia.

Etapa – 1: Diagnóstico

Categorías de cumplimiento sísmico

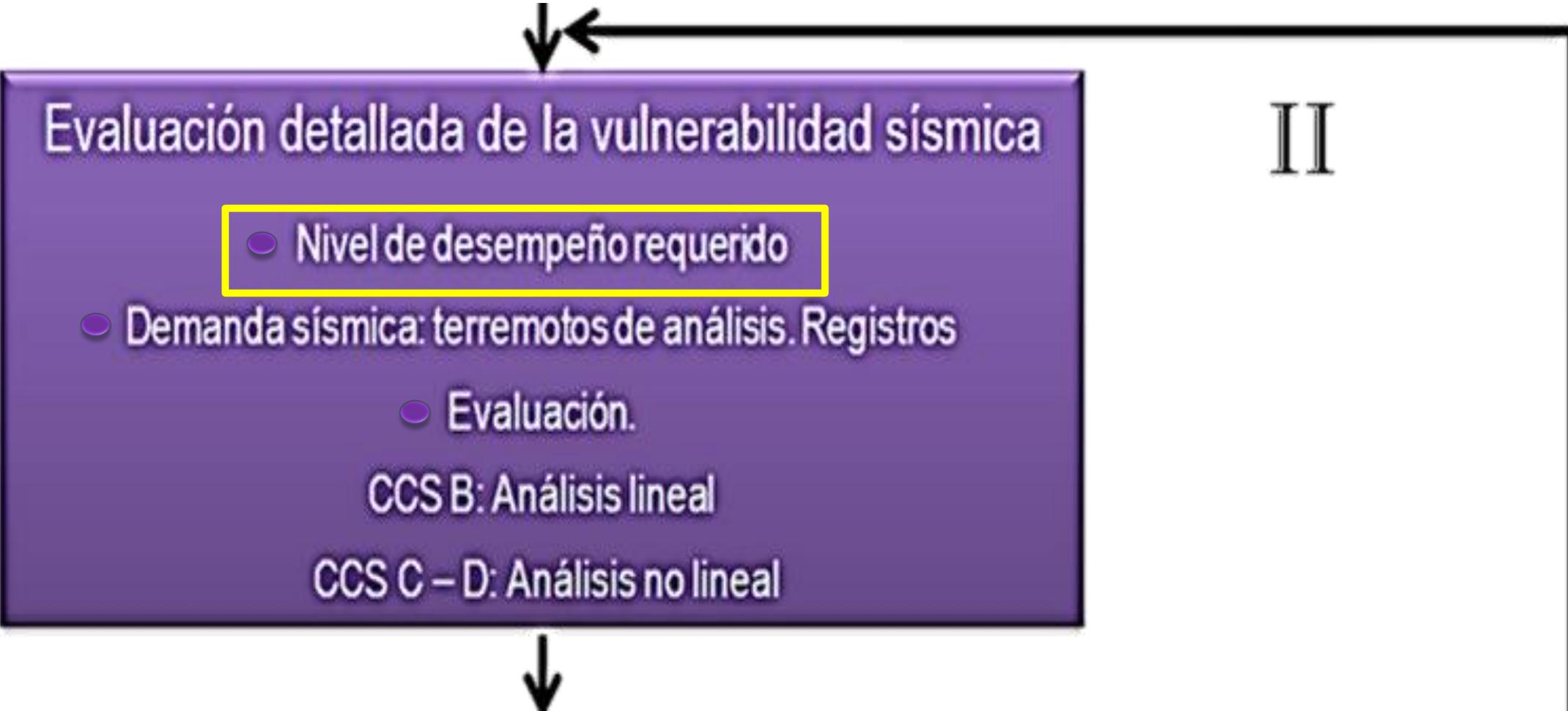
Categoría A: la estructura no necesita ser rehabilitada desde el punto de vista sismorresistente.

Categoría B: debe soportar bajos niveles de carga sísmica sin ningún daño. Daños leves para cargas moderadas y daños extensivos ante altos niveles de acción sísmica.

Categoría C: debe soportar acciones sísmicas moderadas sin daño. Acciones sísmicas fuertes con daños moderados.

Categoría D: la estructura debe ser rehabilitada para resistir cargas sísmicas fuertes y solo manifestar daños ligeros.

Etapa – 1: Diagnóstico



Evaluación detallada de la vulnerabilidad sísmica

II

- Nivel de desempeño requerido
- Demanda sísmica: terremotos de análisis. Registros
 - Evaluación.
 - CCS B: Análisis lineal
 - CCS C – D: Análisis no lineal

Etapa – 2: Evaluación detallada

Nivel de desempeño requerido

		Nivel de desempeño		
		Completamente operacional	Operacional	Seguridad para la vida
Nivel de demanda sísmica	Sismo frecuente, 30 % en 75 años. (PR = 225 años)			
	Sismo ordinario, 15 % en 75 años. (PR = 475 años)			
	Sismo extremo, 5 % en 75 años. (PR = 1642 años)			



Críticos



Esenciales



Ordinarios

Etapa – 2: Evaluación detallada

Nivel de desempeño 1: seguridad de la vida. El daño sufrido es significativo y el servicio es interrumpido de manera significativa, pero la seguridad de la vida está asegurada. Es posible que el puente tenga que ser reemplazado después de un sismo fuerte.

Nivel de desempeño 2: operacional. El daño sufrido es mínimo y el acceso a vehículos de emergencia debe estar disponible después de la inspección y la limpieza de escombros. El puente debe ser reparable con o sin restricciones al flujo vehicular.

Nivel de desempeño 3: completamente operacional. El daño sufrido es insignificante y el acceso al puente está disponible para todos los vehículos después de la inspección y limpieza de escombros. El daño debe ser reparable, sin la interrupción del tráfico.

Etapa – 2: Evaluación detallada

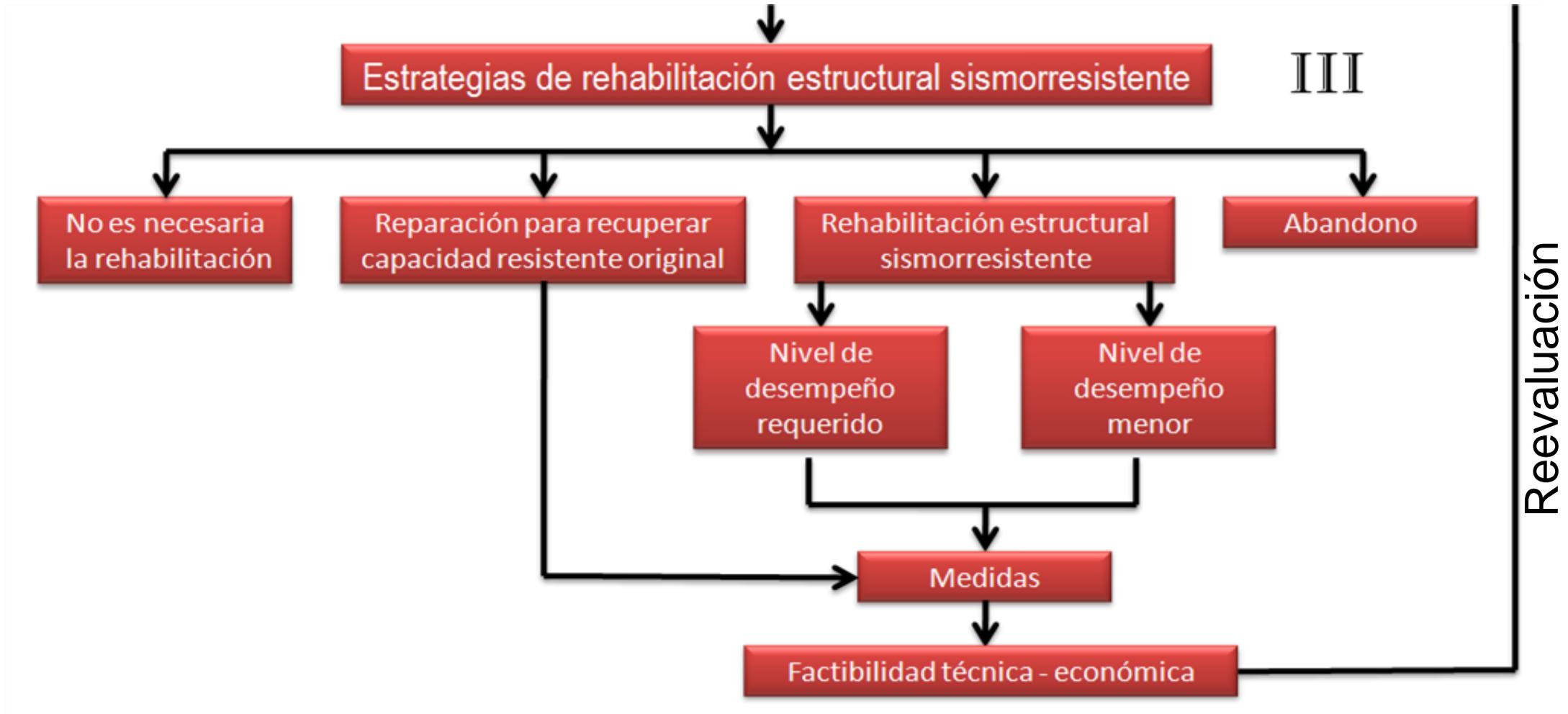


Evaluación detallada de la vulnerabilidad sísmica

II

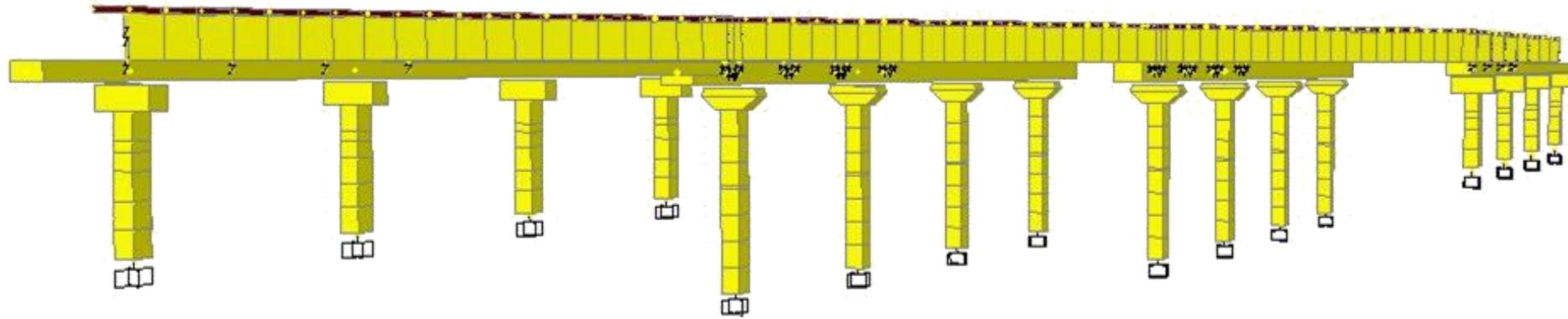
- Nivel de desempeño requerido
- Demanda sísmica: terremotos de análisis. Registros
 - Evaluación.
 - CCS B: Análisis lineal
 - CCS C – D: Análisis no lineal

Etapa – 2: Evaluación detallada



III

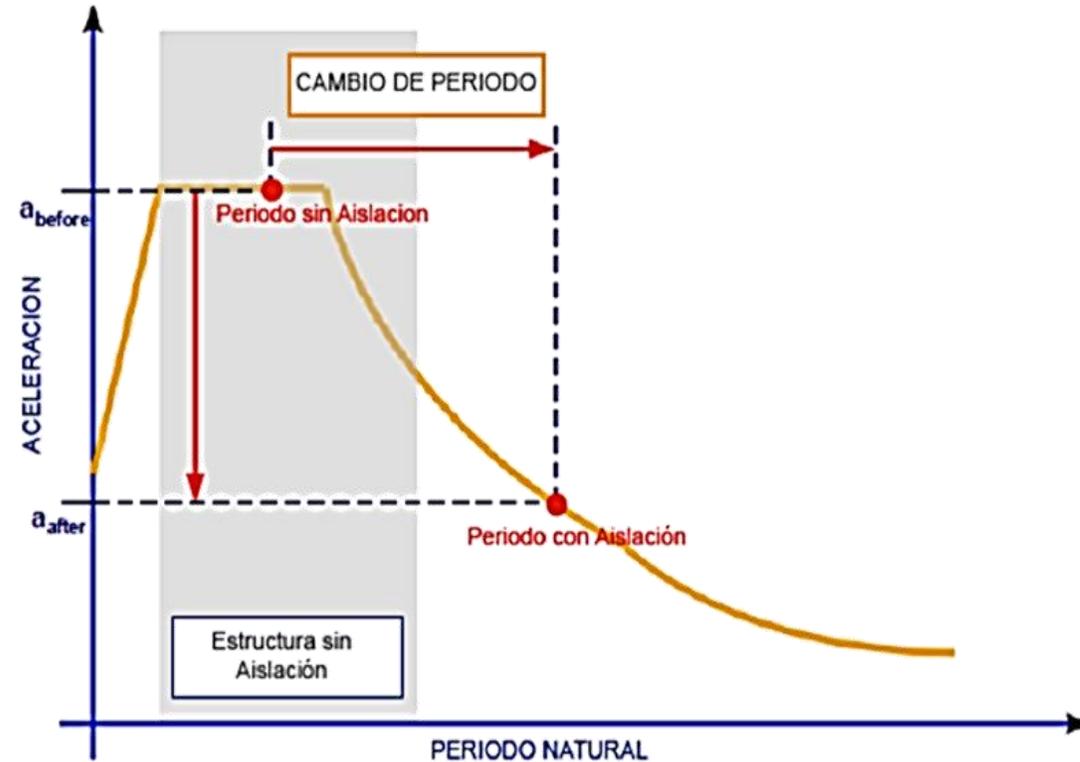
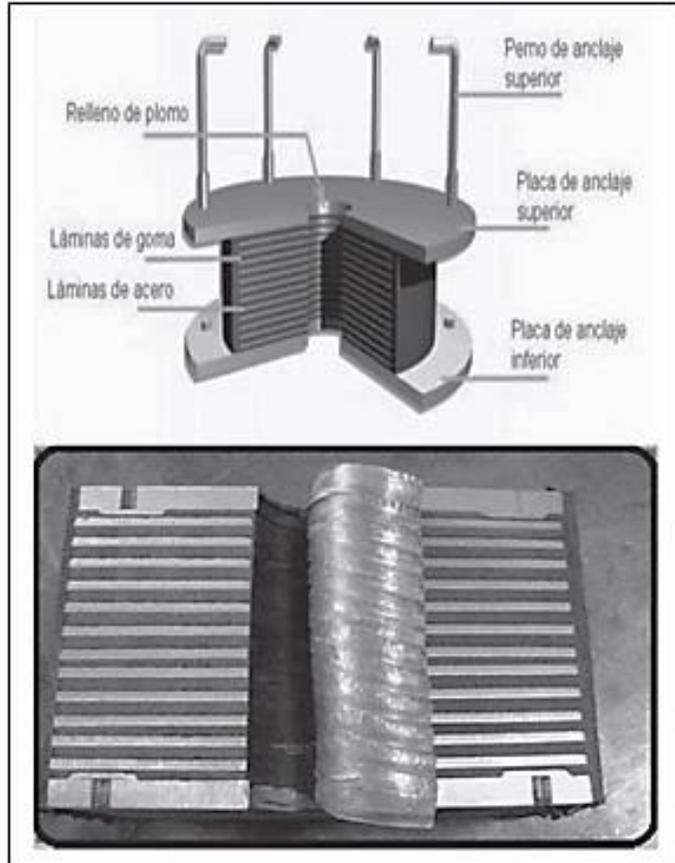
Etapa - 3



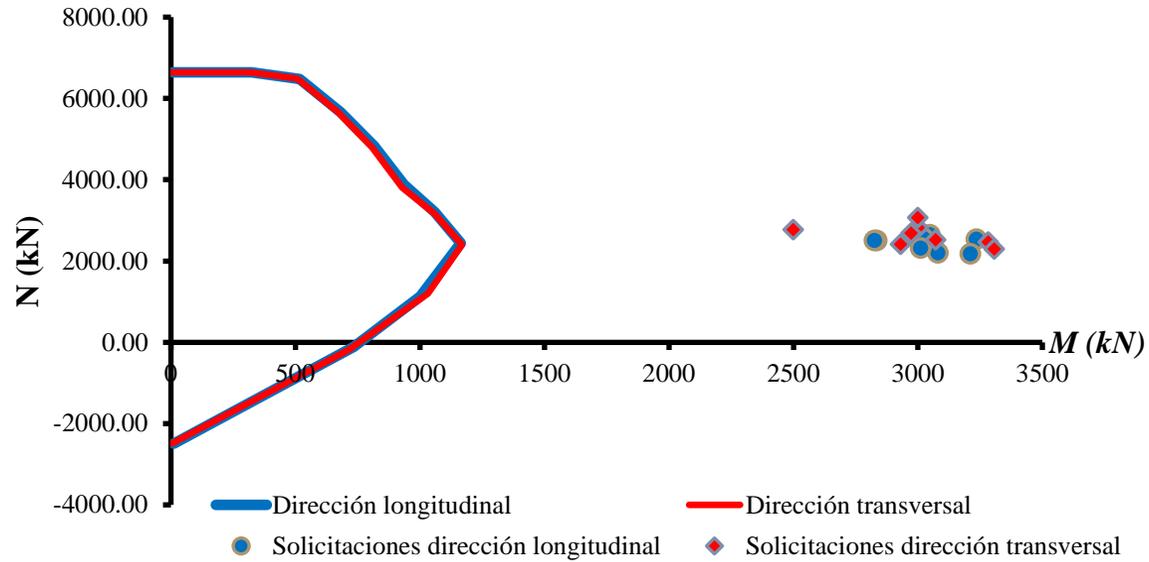
Longitud total (m)	Ancho (m)	Luces (m)	Esviaje (°)	Gálibo vertical (m)	Tipo de Suelo
60.00	34.20	3 x 20.00	30	8.40	D

Etapa – 3: Estrategias

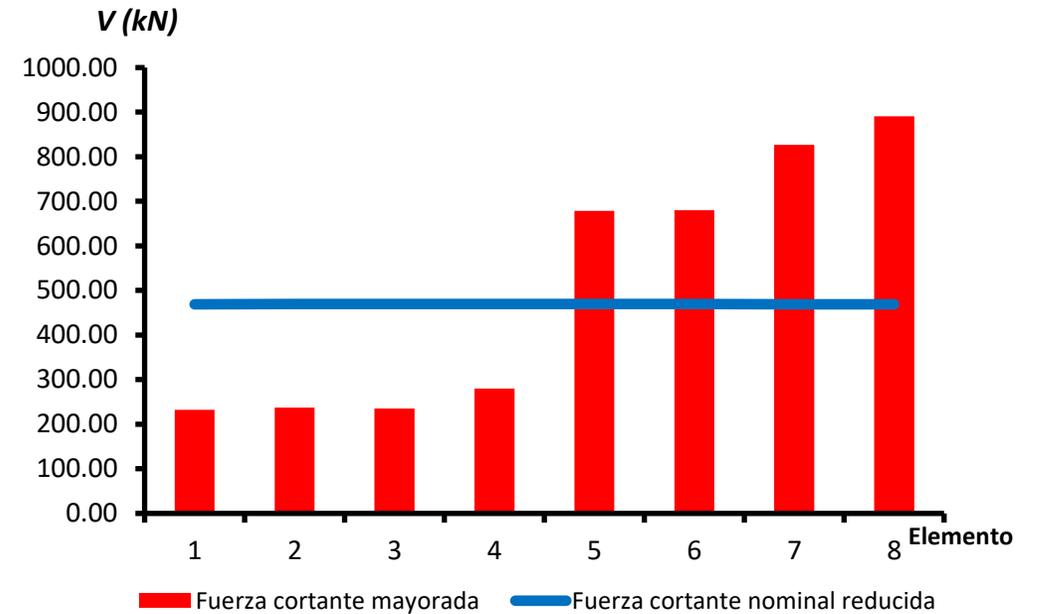
Aisladores sísmicos con núcleo de plomo



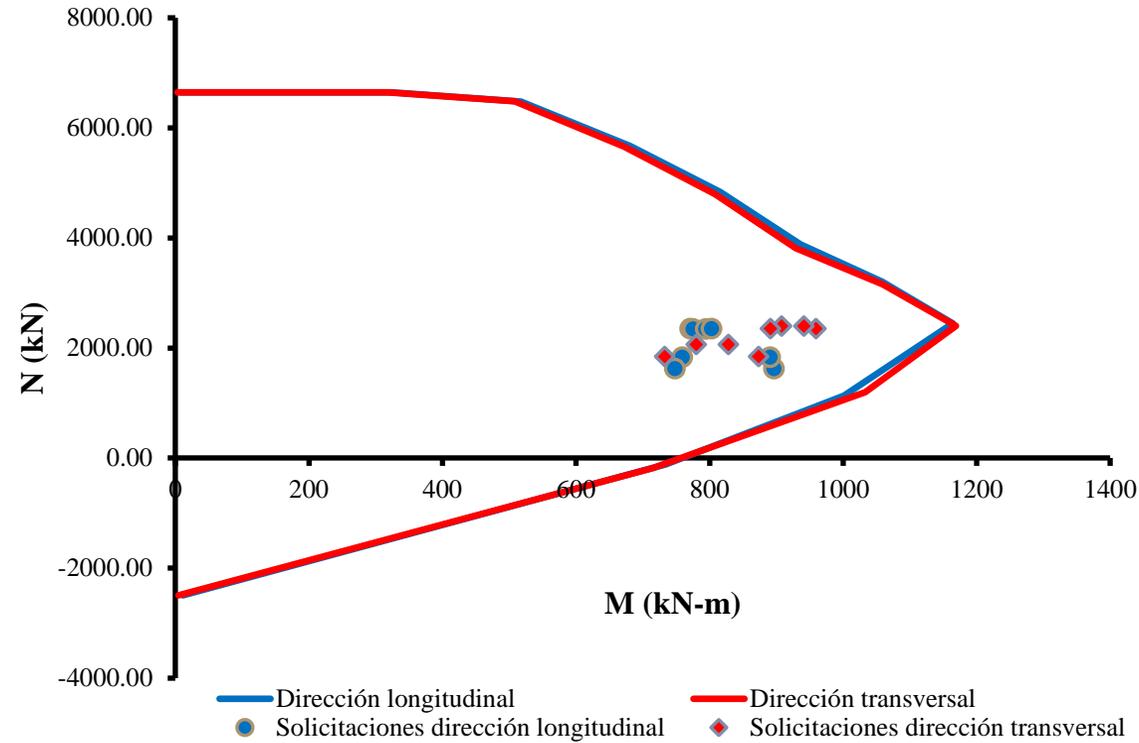
Etapa – 3: Estrategias



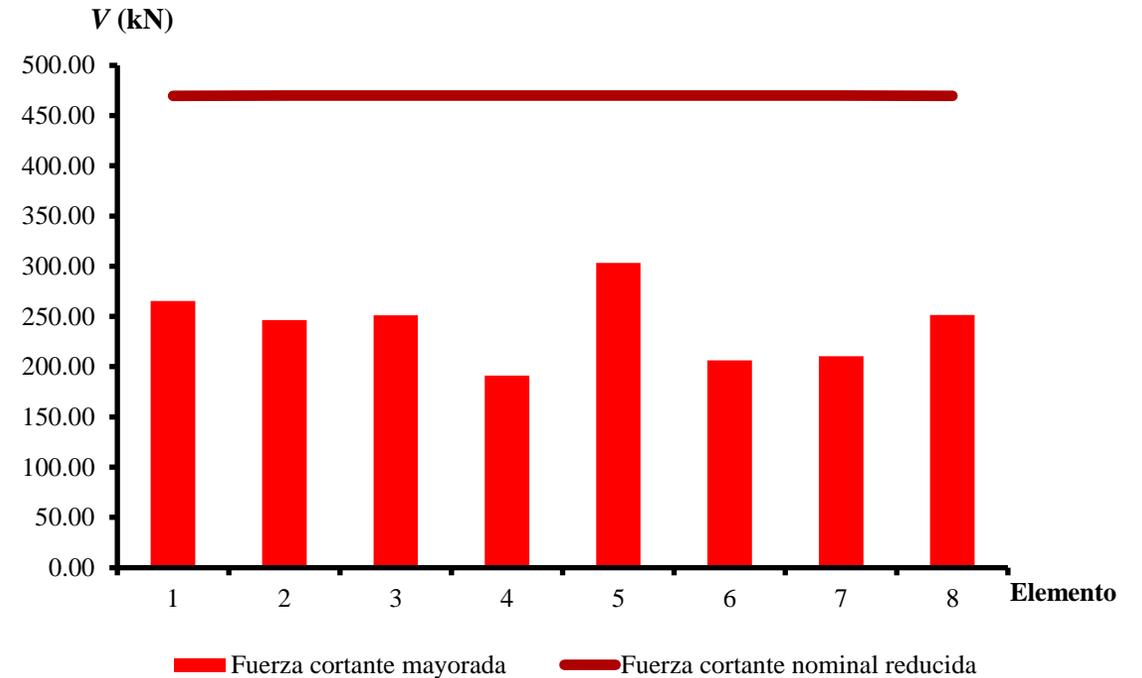
Antes...



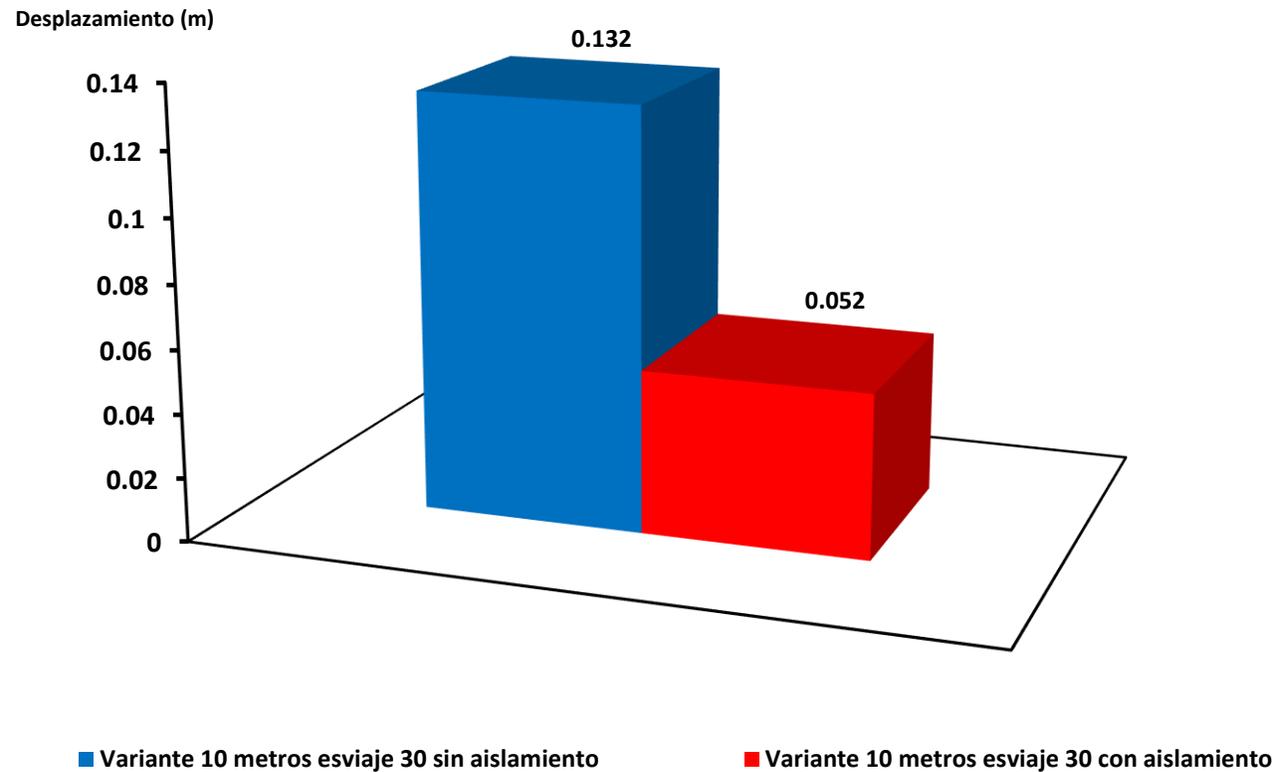
Etapa – 3: Estrategias



Después...



Etapa – 3: Estrategias



Etapa – 3: Estrategias

Estribos							
M (kN-m)			N (kN)			V (kN)	
% dismin.	s/aisl.	con aisl.	% dismin.	s/aisl.	con aisl.	% dismin.	
Variante 6 metros esviaje 30°							
66.29	1599.42	1258.19	21.33	890.26	251.033	71.80	
Variante 6 metros esviaje 0°							
71.07	1179.67	931.38	21.05	755.5	192.259	74.55	
Variante 8 metros esviaje 30°							
63.77	1622.24	1327.73	18.15	764.75	277.405	63.73	
Variante 8 metros esviaje 0°							
72.14	1304.01	996.88	23.55	716.239	192.373	73.14	
Variante 10 metros esviaje 30°							
55.15	1615.54	1396.48	13.56	587.876	262.322	55.38	
Variante 10 metros esviaje 0°							
50.52	1639.79	1066.50	34.96	371.243	193.081	47.99	

Etapa – 3: Estrategias

Proyecto: Investigaciones para la implementación y actualización de la norma sísmica cubana.

Propuesta de capítulo para el diseño de puentes
sismorresistentes

Actualización

- Se diseña un procedimiento basado en el desempeño. Integra tres etapas básicas: análisis para la selección y priorización, evaluación detallada de la vulnerabilidad y selección de la estrategia para la rehabilitación.
- Se establecen, además, los parámetros que, conjuntamente con el análisis estructural, garantizan la integridad de los resultados (sociales, económicos, medioambientales e históricos).

Conclusiones

- Se diseña una metodología, validada mediante criterios de expertos, para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica estructural, que incluye parámetros no utilizados usualmente por las metodologías existentes.
- Se definen parámetros invalidantes que garantizan una evaluación adecuada de la vulnerabilidad.

Conclusiones

- La utilización de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo incrementa la resistencia global de la estructura, contribuye a la disminución de la demanda sísmica a las columnas de pilas y estribos y propicia la reducción en más de 50 % de los desplazamientos de la subestructura.
- Se demuestra que la transformación de los tableros isostáticos formados por múltiples tramos simplemente apoyados, en tableros continuos, mejora la distribución de las cargas, incrementa la rigidez en la dirección longitudinal e incrementa el confort de la red vial al disminuir la cantidad de juntas.

Conclusiones

Gracias