

DISEÑO POR CAPACIDAD EN VIGAS CON PREDOMINIO DE CARGAS GRAVITATORIAS: COMPATIBILIDAD MECÁNICA ENTRE EL FACTOR DE REDUCCIÓN R Y LA FORMACIÓN DE RÓTULAS

Correa Medina, Pablo J.M.^a, Aráoz, Gabriel F.^b

^a Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – UNT, pjmcorrea@herrera.unt.edu.ar

^b Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – UNT – Instituto de Estructuras (IE),
garaoz@herrera.unt.edu.ar

Palabras clave: Diseño por Capacidad, Ductilidad, Factor de Reducción

RESUMEN

El Diseño por Capacidad busca que la disipación inelástica de energía ocurra mediante un mecanismo plástico jerarquizado. En este contexto, la utilización del factor de reducción R supone que dicho mecanismo mantenga consistencia mecánica con la respuesta estructural esperada. Sin embargo, las acciones gravitatorias y las armaduras mínimas reglamentarias pueden comprometer su desarrollo bajo el sismo de diseño.

Este trabajo desarrolla una formulación analítica basada en una condición de compatibilidad entre la demanda sísmica y la capacidad resistente de las Zonas de Formación Potencial de Rótulas Plásticas. De ella se deriva una Inecuación de Compatibilidad Mecánica que permite determinar el máximo factor de reducción compatible con el mecanismo plástico previsto y evaluar la consistencia mecánica del factor R en pórticos de hormigón armado.

ABSTRACT

Capacity Design seeks to ensure that inelastic energy dissipation occurs through a hierarchized plastic mechanism. In this context, the use of the reduction factor R assumes that such mechanism remains mechanically consistent with the expected structural response. However, gravity loads and code-required minimum reinforcement may compromise its development under the design earthquake.

This study develops an analytical formulation based on a compatibility condition between seismic demand and the resistant capacity of Potential Plastic Hinge Formation Zones. From this condition, a Mechanical Compatibility Inequality is derived to determine the maximum reduction factor compatible with the intended plastic mechanism and assess the mechanical consistency of factor R in reinforced concrete moment-resisting frames.

Organiza:

INTRODUCCION

El Diseño por Capacidad constituye uno de los principios fundamentales de la ingeniería sismorresistente moderna. Su filosofía consiste en controlar el mecanismo de colapso mediante la jerarquización de resistencias, promoviendo la formación de rótulas plásticas en las Zonas de Formación Potencial de Rótulas Plásticas (ZFPRP) y preservando el comportamiento esencialmente elástico de los restantes elementos estructurales.

Bajo este enfoque, los reglamentos permiten reducir las fuerzas sísmicas elásticas mediante el factor de reducción R , cuya utilización supone que las ZFPRP identificadas como regiones fusibles conserven la capacidad potencial de desarrollar deformaciones inelásticas cuando la demanda sísmica exceda el rango esencialmente elástico previsto por el diseño. Sin embargo, en pórticos de hormigón armado con elevadas acciones gravitatorias, grandes luces o ubicados en regiones de moderada y baja peligrosidad sísmica, el dimensionamiento flexional suele quedar gobernado por las combinaciones gravitatorias del CIRSOC 201⁽²⁾ o por las armaduras mínimas reglamentarias. Como consecuencia, la capacidad resistente finalmente provista puede superar la demanda sísmica reducida, comprometiendo localmente el desarrollo del mecanismo plástico previsto.

La filosofía del Diseño por Capacidad, desarrollada por Paulay y Priestley (1992) e incorporada posteriormente en reglamentos y documentos internacionales como ASCE/SEI 41, FEMA 356 y el Eurocódigo 8, establece criterios para jerarquizar resistencias y controlar la ubicación de las rótulas plásticas. En este marco, el presente trabajo propone una Inecuación de Compatibilidad Mecánica orientada a evaluar, para cada elemento fusible, la relación entre el factor de reducción R adoptado y el inicio de la plastificación en las ZFPRP cuando el diseño flexional queda condicionado por acciones gravitatorias o por las armaduras mínimas reglamentarias.

La metodología desarrollada constituye una herramienta complementaria al Diseño por Capacidad, permitiendo evaluar objetivamente la compatibilidad mecánica entre el factor de reducción adoptado y el mecanismo plástico previsto y aportar un criterio racional para la selección del factor de reducción global de la estructura.

Condición ideal del Diseño por Capacidad

Con el objeto de establecer una condición de referencia, considérese inicialmente el caso ideal en el cual el dimensionamiento de la viga está gobernado por la acción sísmica. En consecuencia, las armaduras longitudinales pueden disponerse de

manera que la resistencia de diseño de las secciones críticas resulte prácticamente coincidente con la demanda sísmica obtenida para el factor de reducción adoptado. Con el propósito de simplificar el análisis y centrar la atención exclusivamente en la interacción entre la demanda sísmica y la capacidad resistente de las ZFPRP, se supone que las armaduras longitudinales, tanto superiores como inferiores, permanecen continuas a lo largo de toda la viga. En consecuencia, no se consideran cortes ni variaciones de armadura longitudinal, eliminando así la influencia de los criterios de detallado sobre el desarrollo de la formulación analítica. Bajo estas condiciones se verifica simultáneamente que:

$$M^{(+)}_{u,max} \approx \phi M^{(+)}_n \quad (1)$$

$$M^{(-)}_{u,max} \approx \phi M^{(-)}_n \quad (2)$$

$M^{(+)}_{u,max}$ es el máximo momento positivo obtenido de la combinación sísmica.

$M^{(-)}_{u,max}$ es el máximo momento negativo obtenido de la combinación sísmica.

$\phi M^{(+)}_n$ y $\phi M^{(-)}_n$ representan las respectivas resistencias de diseño de la sección.

En este escenario ideal, el nivel de sollicitación sísmica asociado al espectro reducido moviliza una demanda cercana a la resistencia de diseño de las secciones críticas, favoreciendo el desarrollo del mecanismo plástico previsto. La energía comienza entonces a disiparse mediante deformaciones inelásticas en las ZFPRP, manteniendo consistencia mecánica con las hipótesis asociadas al factor de reducción adoptado.

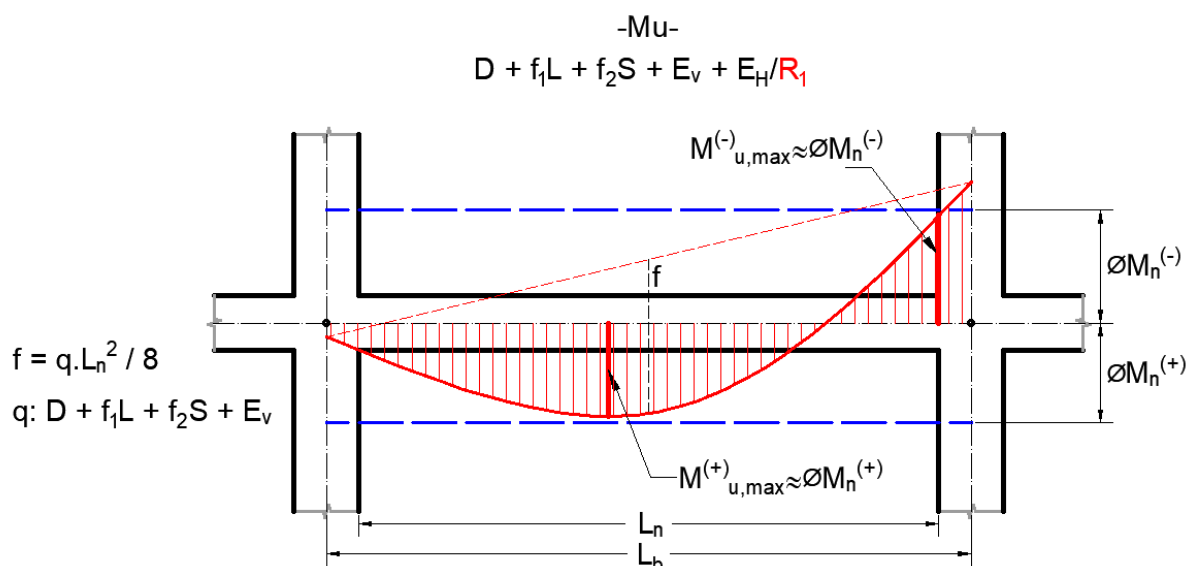


Figura 1. Condición ideal del Diseño por Capacidad.

La Figura 1 representa este comportamiento ideal. Puede observarse que el diagrama de momentos correspondiente a la combinación sísmica reducida mediante el factor R_1 alcanza prácticamente la resistencia de diseño de las secciones críticas, constituyendo la condición objetivo perseguida por la filosofía del Diseño por Capacidad cuando el dimensionamiento se encuentra gobernado por las combinaciones sísmicas. En esta situación, las acciones gravitatorias y las armaduras mínimas reglamentarias no condicionan el diseño resistente de la viga.

Influencia de las acciones gravitatorias sobre las ZFPRP

La condición ideal presentada en la sección anterior supone que el dimensionamiento de la viga queda gobernado por las combinaciones sísmicas. Sin embargo, esta situación rara vez se presenta en estructuras reales. En la práctica profesional, el diseño debe satisfacer simultáneamente las verificaciones exigidas por el Reglamento CIRSOC 201⁽²⁾, particularmente la combinación gravitatoria 1,2D + 1,6L.

La Figura 2 representa el diagrama de momentos flectores correspondiente a dicha combinación, manteniendo las armaduras longitudinales originalmente adoptadas para satisfacer únicamente los requerimientos del Diseño por Capacidad.

Puede observarse que los momentos negativos desarrollados sobre los extremos (cara de columna) permanecen por debajo de la resistencia de diseño de las respectivas ZFPRP.

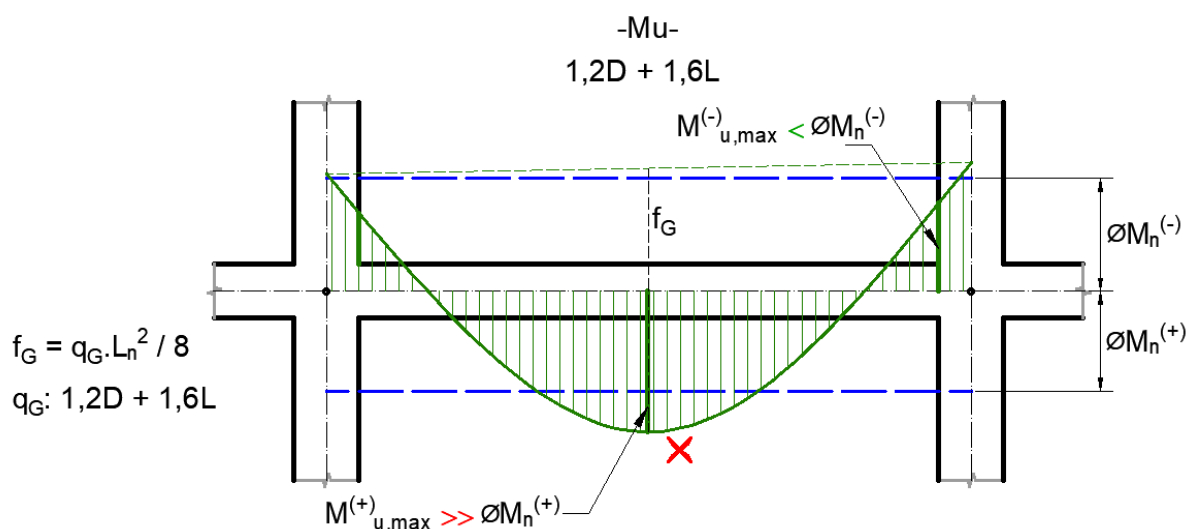


Figura 2. Verificación de la combinación gravitatoria 1,2D+1,6L utilizando las armaduras originalmente dimensionadas para el Diseño por Capacidad.

En la región positiva del vano, el momento gravitatorio máximo puede superar la

resistencia provista por las armaduras longitudinales inicialmente dimensionadas a partir de la demanda sísmica. En consecuencia, la condición resistente exigida por el CIRSOC 201⁽²⁾ ($M_u \leq \phi M_n$) deja de cumplirse, por lo que el dimensionamiento inicialmente obtenido resulta reglamentariamente inadmisibile. Desde el punto de vista del Diseño por Capacidad, este resultado posee una interpretación de particular importancia. La incompatibilidad observada no se origina por una deficiencia del procedimiento sismorresistente, sino por la aparición de una condición resistente adicional impuesta por las acciones gravitatorias. En otras palabras, las armaduras que garantizaban el correcto funcionamiento de las ZFPRP frente al sismo reducido dejan de ser suficientes. Por lo tanto, el proyectista se ve obligado a incrementar la cuantía de armadura longitudinal positiva en el tramo, no como consecuencia de una mayor demanda sísmica, sino exclusivamente para cumplir las exigencias resistentes impuestas por la combinación gravitatoria del CIRSOC 201⁽²⁾.

Incompatibilidad entre las verificaciones gravitatorias y la filosofía del Diseño por Capacidad

La comparación entre los diagramas de momentos permite identificar el mecanismo resistente que origina la incompatibilidad analizada. La Figura 3 presenta la superposición de ambos estados de sollicitación manteniendo las armaduras originalmente dimensionadas bajo el supuesto de que las combinaciones sísmicas gobiernan el diseño. Se observa que el momento positivo gobernado por la combinación gravitatoria resulta significativamente superior al momento positivo desarrollado por la combinación sísmica.

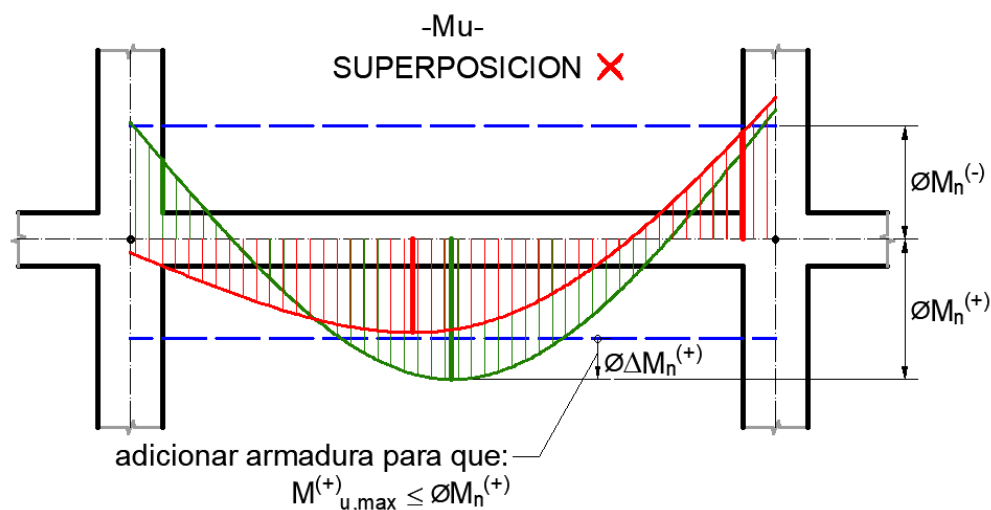


Figura 3. Superposición de los diagramas de momentos correspondientes a la combinación sísmica reducida y a la combinación gravitatoria.

En consecuencia, la cuantía de armadura calculada para la acción sísmica deja de satisfacer la condición resistente exigida por el CIRSOC 201⁽²⁾ en la ZFPRP positiva del vano, siendo necesario incrementar la resistencia nominal de dicha sección.

Este incremento resistente puede expresarse como un aumento de la capacidad nominal de la sección, que representa la resistencia adicional necesaria para satisfacer exclusivamente las verificaciones gravitatorias.

Resulta importante destacar que este aumento de capacidad no responde a un incremento de la demanda sísmica, sino únicamente a la necesidad de cumplir las verificaciones establecidas por el CIRSOC 201⁽²⁾. Desde el punto de vista del Diseño por Capacidad, esta circunstancia constituye el punto de partida del problema analizado en este trabajo, ya que modifica la resistencia disponible en la ZFPRP sin alterar, dentro del análisis lineal elástico adoptado, el nivel de solicitación sísmica asociado al factor de reducción R . En consecuencia, se pierde la condición de proximidad inicialmente buscada entre la demanda sísmica reducida y la resistencia de diseño de la ZFPRP. Esta situación puede comprometer localmente el desarrollo del mecanismo plástico previsto por el Diseño por Capacidad para el nivel de acción asociado al factor de reducción adoptado (R_1).

Pérdida de compatibilidad entre el factor de reducción R y las ZFPRP

Una vez incrementada la armadura longitudinal para satisfacer las verificaciones resistentes del CIRSOC 201⁽²⁾, la capacidad flexional de la ZFPRP positiva deja de ser la originalmente prevista durante el Diseño por Capacidad. La Figura 4 representa esta nueva condición de equilibrio.

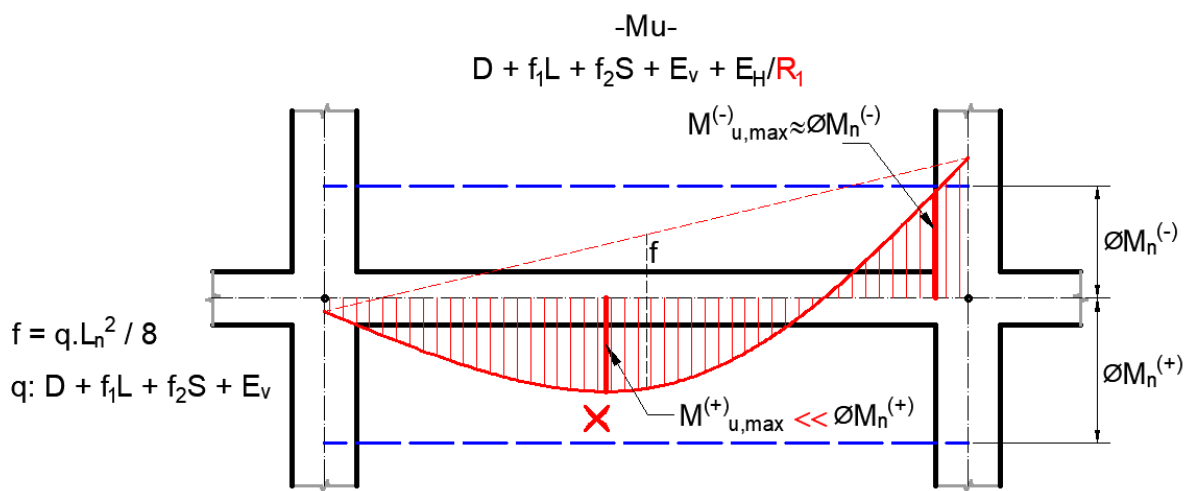


Figura 4. Incremento de la resistencia nominal de la ZFPRP positiva debido al dimensionamiento gravitatorio.

El incremento de armadura dispuesto para satisfacer la combinación gravitatoria produce un aumento del momento nominal resistente de la sección, mientras que la demanda sísmica permanece inalterada, dado que continúa siendo evaluada mediante el mismo factor de reducción R_1 adoptado durante el análisis estructural.

Como consecuencia, la condición inicialmente buscada deja de verificarse:

$$M^{(+)}_{u,max} \neq \phi M^{(+)}_n \quad (3)$$

En términos físicos, la ZFPRP dispone ahora de una resistencia significativamente superior a la demanda sísmica correspondiente al espectro reducido mediante el factor R_1 . En consecuencia, la sección permanece completamente dentro del régimen elástico para el nivel de acción considerado y el inicio de la plastificación deja de producirse en la región prevista por el Diseño por Capacidad.

El factor de reducción R_1 continúa siendo exactamente el mismo utilizado durante el análisis, mientras que la capacidad resistente de la ZFPRP ha aumentado de manera significativa. En estas condiciones, la hipótesis fundamental que justifica la utilización del factor de reducción R deja de verificarse localmente. La estructura continúa satisfaciendo todas las verificaciones resistentes exigidas por el reglamento; sin embargo, la demanda sísmica reducida ya no resulta suficiente para inducir la formación de la rótula plástica en la ZFPRP correspondiente.

En consecuencia, el mecanismo de disipación de energía supuesto por el Diseño por Capacidad puede dejar de desarrollarse para el nivel de solicitación asociado al factor de reducción R_1 , ya que la demanda sísmica reducida puede resultar insuficiente para inducir la plastificación de la ZFPRP considerada. Bajo estas condiciones, el valor adoptado para el factor de reducción puede dejar de ser mecánicamente compatible con el mecanismo plástico asumido durante el diseño.

Restablecimiento de la compatibilidad mediante la reducción del factor R

Una vez verificado que la sobrerresistencia introducida por el dimensionamiento gravitatorio impide la plastificación de la ZFPRP positiva, puede resultar necesario incrementar la demanda sísmica de diseño, o alternatively modificar el diseño resistente, a fin de restablecer la compatibilidad mecánica buscada.

Dado que la acción sísmica de diseño es inversamente proporcional al factor de reducción R , dentro del marco del análisis lineal elástico y manteniendo inalterada la configuración estructural, el mecanismo directo para incrementar las solicitaciones

consiste en adoptar un valor inferior del factor de reducción.

La disminución del factor de reducción produce un incremento de toda la demanda sísmica del sistema, de manera que los momentos positivos desarrollados en el tramo aumentan progresivamente hasta alcanzar nuevamente la resistencia de diseño de la ZFPRP positiva.

En este punto se recupera la condición necesaria para que la plastificación pueda iniciarse en la región positiva del vano bajo el nivel de acción sísmica correspondiente al nuevo factor de reducción R_2 . Sin embargo, la modificación del factor de reducción no afecta únicamente a dicha ZFPRP. Al incrementarse la acción sísmica global, aumentan simultáneamente los momentos negativos desarrollados en los apoyos. Como consecuencia, la resistencia nominal originalmente disponible en las ZFPRP negativas deja de ser suficiente para satisfacer la nueva demanda sísmica. Por lo tanto, el proyectista se ve nuevamente obligado a incrementar la armadura longitudinal superior con el objeto de restablecer la condición resistente en las ZFPRP.

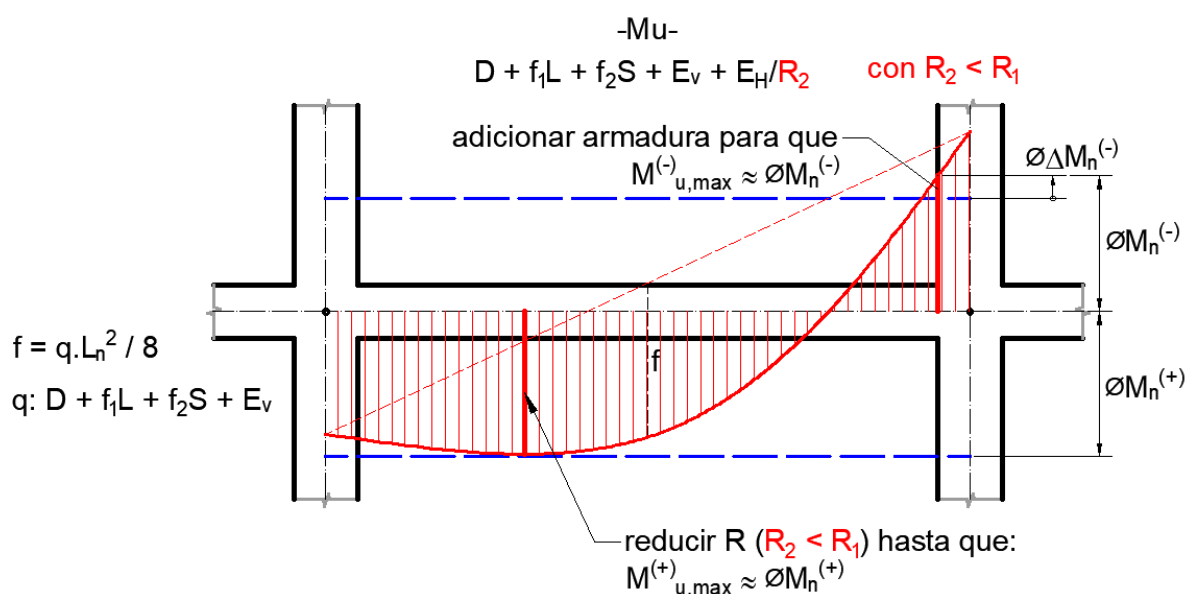


Figura 5. Reducción del factor R desde R_1 hasta R_2 .

La Figura 5 evidencia que la reducción del factor R modifica simultáneamente la respuesta de todas las ZFPRP. En general, la recuperación de la compatibilidad en el tramo tiende a incrementar las solicitaciones negativas en los apoyos, obligando a redimensionar la armadura longitudinal superior. En consecuencia, la selección del factor de reducción puede entenderse como un proceso iterativo de equilibrio entre demanda sísmica y capacidad resistente.

Convergencia del proceso iterativo

Luego de las iteraciones sucesivas de análisis y redimensionamiento resistente, puede alcanzarse, en ciertos casos, un estado en el cual las verificaciones gravitatorias y los principios del Diseño por Capacidad resulten simultáneamente compatibles. La Figura 6 muestra la condición de convergencia obtenida al adoptar un nuevo factor de reducción R_2 , siendo $R_2 < R_1$.

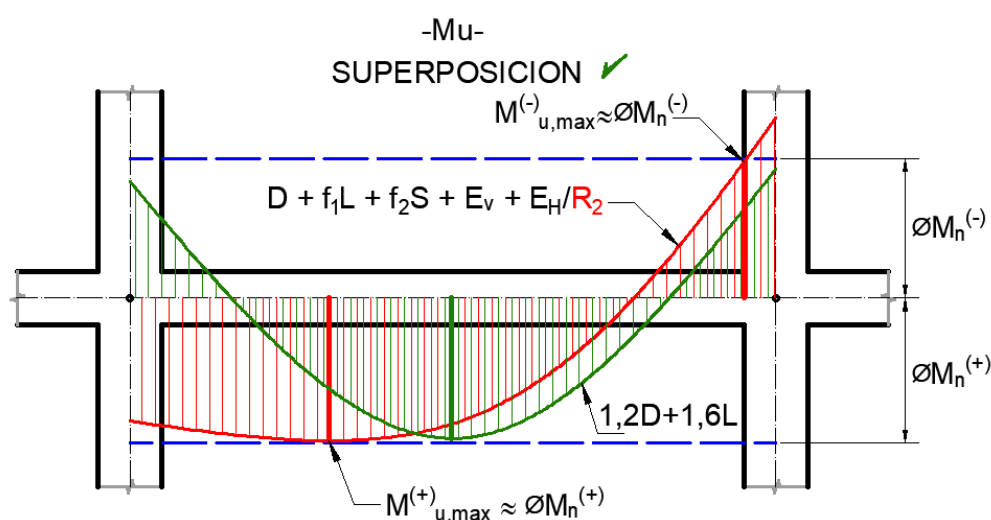


Figura 6. Estado de convergencia del proceso iterativo. El factor de reducción R_2 restablece la compatibilidad entre la demanda sísmica y la resistencia de las ZFPRP.

En estas condiciones, el diseño satisface simultáneamente:

- Las verificaciones resistentes exigidas por el CIRSOC 201⁽²⁾.
- La posibilidad de iniciar la plastificación en las ZFPRP para el nivel de demanda sísmica reducida asociado al factor de reducción R_2 .
- La compatibilidad entre la demanda sísmica de diseño y la resistencia nominal efectivamente provista.

La reducción del factor R incrementa las acciones sísmicas de diseño y, en consecuencia, las cuantías de armadura requeridas, particularmente en las regiones próximas a los apoyos. Asimismo, modificar el factor R altera la respuesta global de la estructura. Dado que el coeficiente de amplificación de desplazamientos C_d también varía con R , su efecto sobre las distorsiones de piso no puede generalizarse. Por ello, cualquier modificación de R exige repetir las verificaciones reglamentarias de desplazamientos, derivas y estabilidad global.

Obtención de la Inecuación de Compatibilidad Mecánica

El desarrollo gráfico presentado permitió identificar cómo la sobrerresistencia inducida por las acciones gravitatorias puede comprometer localmente el desarrollo del mecanismo plástico previsto en las ZFPRP para el nivel de demanda sísmica asociado al factor de reducción adoptado. Sin embargo, su aplicación en estructuras reales resulta poco eficiente debido al elevado número de elementos y combinaciones sísmicas a evaluar. Surge así la necesidad de una formulación analítica que permita cuantificar directamente esta compatibilidad mecánica.

La formulación propuesta se desarrolla a nivel de elemento estructural y permite obtener, para cada viga, sentido de análisis y combinación sísmica, un valor límite local de compatibilidad mecánica. Estos valores permiten identificar aquellas ZFPRP cuya sobrerresistencia puede comprometer el mecanismo plástico previsto. El valor obtenido debe interpretarse como un indicador mecánico local de compatibilidad, y no necesariamente como un valor reglamentario directamente adoptable para el factor global de reducción de la estructura.

Alcances y limitaciones de la formulación propuesta

La formulación desarrollada constituye una herramienta de evaluación local de la compatibilidad entre la demanda sísmica asociada al factor de reducción R y la capacidad resistente de las ZFPRP. Su aplicación se limita a:

- Pórticos resistentes a momento de hormigón armado diseñados según la filosofía del Diseño por Capacidad.
- Elementos gobernados predominantemente por flexión.
- Análisis lineal elástico con reducción de la acción sísmica mediante el factor de reducción R , conforme al INPRES-CIRSOC 103 – Parte I ⁽¹⁾.
- Dimensionamiento resistente realizado de acuerdo con el CIRSOC 201 ⁽²⁾.

La formulación no determina el factor de reducción global de la estructura, sino un valor límite local asociado a cada elemento fusible y a cada combinación sísmica analizada. En consecuencia, la selección del factor de reducción definitivo continúa siendo una decisión global que debe satisfacer simultáneamente las verificaciones reglamentarias de resistencia, estabilidad, deformabilidad y desempeño estructural.

La inecuación propuesta no reemplaza los procedimientos convencionales de diseño

ni los análisis no lineales cuando éstos sean requeridos. Bajo estas consideraciones, en la sección siguiente se desarrolla la deducción matemática de la Inecuación de Compatibilidad Mecánica:

Sea una combinación sísmica cualquiera del tipo:

$$D + f_1 L + f_2 S + E_v + E_H / R \quad (4)$$

donde únicamente la componente horizontal del sismo resulta afectada por el factor de reducción adoptado R . En consecuencia, el momento último obtenido mediante dicha combinación puede descomponerse como la suma de dos contribuciones independientes:

$$M_u^E = M_u^{EG} + M_u^{EEH} / R \quad (5)$$

donde:

M_u^E es el momento originado por la combinación $D + f_1 L + f_2 S + E_v + E_H / R$

M_u^{EG} representa el momento originado exclusivamente por las cargas gravitatorias presentes en dicha combinación: $D + f_1 L + f_2 S + E_v$

M_u^{EEH} corresponde al momento producido por la acción sísmica horizontal en régimen elástico, es decir, sin reducir por el factor R .

La filosofía de diseño establecida por el CIRSOC 201⁽²⁾ exige que la demanda no supere la resistencia de diseño de la sección:

$$M_u \leq \phi M_n \quad (6)$$

Por su parte, dentro de la hipótesis mecánica adoptada en este trabajo, se considera que en las ZFPRP la demanda sísmica reducida debe resultar suficientemente próxima a la resistencia de diseño como para posibilitar el desarrollo del mecanismo plástico previsto. En consecuencia:

$$M_u^E \approx \phi M_n \quad (7)$$

La ecuación (7) representa una aproximación de ingeniería orientada a vincular la

demanda sísmica reducida con la resistencia de diseño efectivamente provista. Se reconoce que el inicio físico de la fluencia puede producirse para niveles de momento inferiores a ϕM_n . Combinando ambas condiciones bajo la aproximación adoptada se obtiene:

$$M_u \leq M_u^E \quad (8)$$

La Ecuación (8) constituye la condición fundamental de compatibilidad mecánica sobre la cual se desarrolla la formulación analítica propuesta, y establece la condición necesaria para que la sección satisfaga simultáneamente las exigencias resistentes del CIRSOC 201⁽²⁾ y el inicio de la plastificación previsto por el Diseño por Capacidad. Reemplazando en la ecuación (8) las expresiones correspondientes a las componentes gravitatoria y sísmica de la combinación de acciones, y despejando el factor de reducción R , se obtiene la siguiente **Inecuación de Compatibilidad Mecánica**:

$$R \leq \frac{M_u^{EEH}}{M_u - M_u^{EG}} \quad (9)$$

donde M_u es el momento máximo entre la envolvente de las combinaciones del CIRSOC 201⁽²⁾ y el momento derivado de las armaduras mínimas reglamentarias. Esta expresión representa una condición matemática necesaria para que la formación de la rótula plástica resulte mecánicamente posible en la ZFPRP bajo la demanda sísmica reducida considerada. El numerador M_u^{EEH} representa la reserva máxima de momento sísmico horizontal disponible antes de aplicar la reducción espectral, mientras que el denominador $M_u - M_u^{EG}$ representa la porción de resistencia que aún debe ser movilizadada por la acción sísmica para alcanzar el inicio de la plastificación.

En consecuencia, el cociente establece el mayor valor del factor de reducción que aún permite que la acción sísmica alcance la resistencia de diseño de la sección. Si el factor adoptado verifica la inecuación de compatibilidad mecánica el inicio de la plastificación en la ZFPRP resulta físicamente posible para la demanda sísmica prevista. Por el contrario, si el R adoptado es mayor que el límite dado por la inecuación, la reducción espectral puede resultar excesiva respecto de la sobrerresistencia local existente, la demanda sísmica prevista no alcanzará la resistencia nominal de la sección y el mecanismo plástico asumido por el Diseño por

Capacidad dejará de ser compatible con el comportamiento mecánico real del elemento.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el objeto de ilustrar el problema que motiva la formulación desarrollada, se analiza la viga de un pórtico resistente de hormigón armado a momento. El elemento posee una sección rectangular de 200mm × 450mm, una luz entre ejes de apoyos de 6,00 m y una luz libre de 5,55 m. El hormigón presenta una resistencia característica $f'_c=20\text{MPa}$ y el acero longitudinal una tensión de fluencia $f_y=420\text{ MPa}$. La estructura se ubica en una región de Peligrosidad Sísmica Baja (Zona 1), siendo analizada conforme a las disposiciones del INPRES-CIRSOC 103 – Parte I ⁽¹⁾ y dimensionada de acuerdo con el CIRSOC 201⁽²⁾.

A partir del análisis estructural se obtienen los diagramas de momentos flectores correspondientes a la combinación sísmica del INPRES-CIRSOC 103 – Parte II ⁽³⁾ para un factor de reducción adoptado $R=7$ (máximo para pórticos de hormigón armado) y a la combinación gravitatoria del CIRSOC 201⁽²⁾. La superposición de ambos diagramas se presenta en la Figura 7.

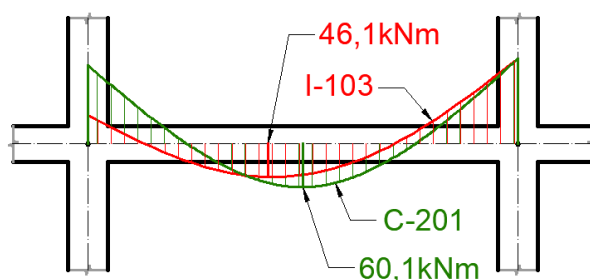


Figura 7. Superposición de demandas: INPRES-CIRSOC 103 – Parte I ⁽¹⁾ con $R=7$ y CIRSOC 201⁽²⁾.

Se observa que el dimensionamiento en las ZFPRP negativas queda gobernado prácticamente por la combinación sísmica, mientras que en el tramo el momento positivo del CIRSOC 201⁽²⁾ supera al de la combinación sísmica reducida ($60,1\text{kNm} > 46,1\text{kNm}$). En consecuencia, la resistencia nominal finalmente provista en la ZFPRP positiva resulta superior a la necesaria para movilizar, bajo la demanda sísmica reducida considerada, el mecanismo plástico previsto por el Diseño por Capacidad. Este comportamiento evidencia la pérdida de compatibilidad entre la demanda sísmica reducida y la capacidad resistente, constituyendo el punto de partida para la aplicación de la Inecuación de Compatibilidad Mecánica propuesta.

La Figura 8 reúne la información necesaria para la aplicación de la Inecuación de Compatibilidad Mecánica. En ella se presentan los diagramas de momentos correspondientes a la combinación gravitatoria del CIRSOC 201⁽²⁾, a la combinación sísmica del INPRES-CIRSOC 103 – Parte II ⁽³⁾ y a la descomposición de esta última en sus componentes gravitatoria y sísmica horizontal sin reducir.

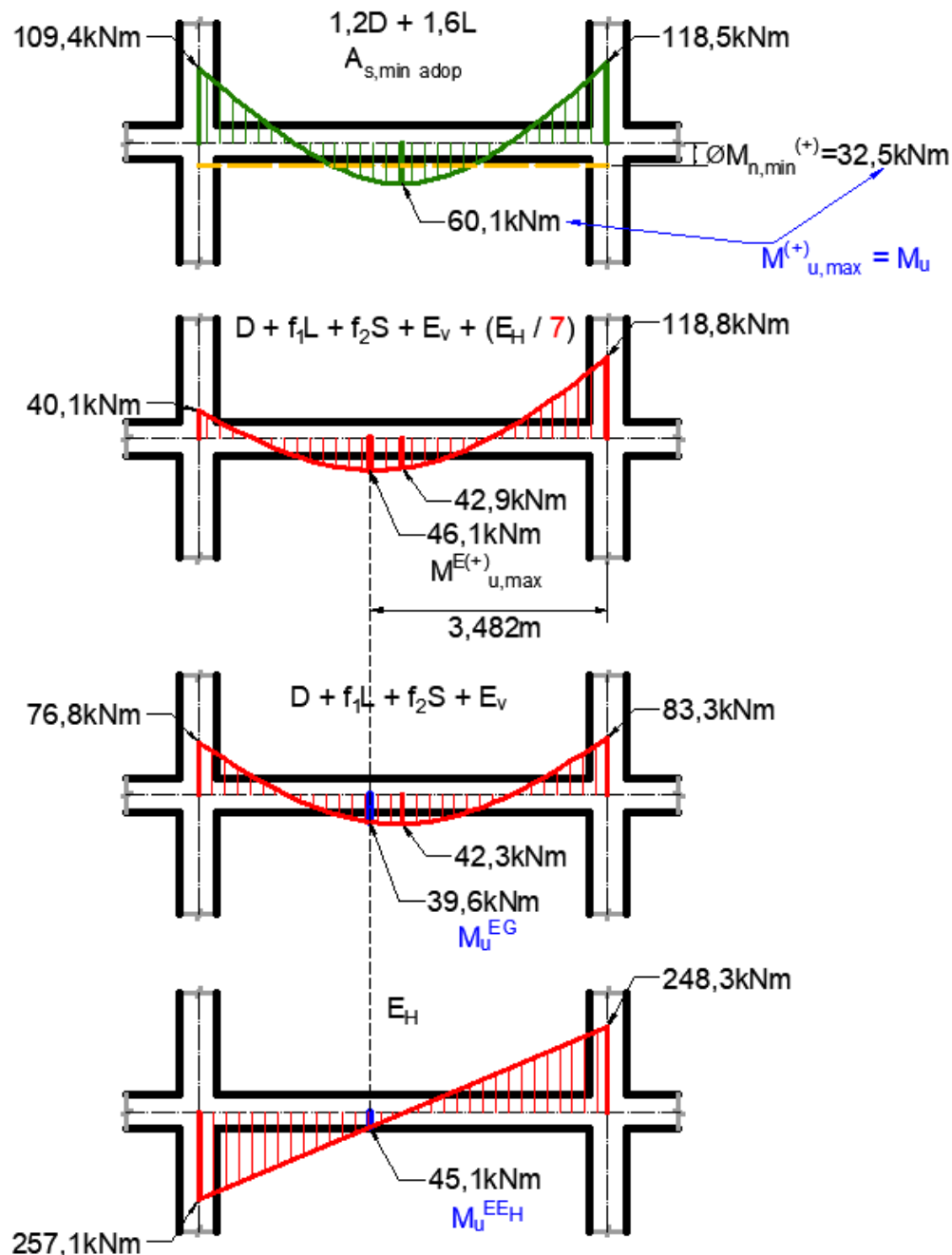


Figura 8. Aplicación de la Inecuación de Compatibilidad Mecánica

En primer lugar, se determina el momento positivo de referencia que gobernará la formulación, adoptándose el mayor valor entre el momento último correspondiente al CIRSOC 201⁽²⁾ y la resistencia de diseño asociada a las armaduras mínimas reglamentarias. Posteriormente, utilizando el factor de reducción inicial ($R=7$), se identifica la posición donde se desarrolla el máximo momento positivo de la combinación sísmica reducida. Una vez localizada dicha sección, se obtienen en ella los valores de las componentes gravitatoria y sísmica horizontal sin reducir, que constituyen los términos de la inecuación propuesta. Debe destacarse que estos momentos no corresponden necesariamente a sus valores máximos, sino a los existentes en la misma sección donde se desarrolla el máximo momento positivo de la combinación sísmica.

Quedan así definidos todos los parámetros necesarios para aplicar la Inecuación de Compatibilidad Mecánica y determinar el valor límite del factor de reducción compatible con la resistencia efectivamente provista en la ZFPRP analizada. Sustituyendo los valores obtenidos del análisis estructural en la ecuación (9):

$$R \leq 45,1 \text{ kNm} / (60,1 \text{ kNm} - 39,6 \text{ kNm})$$

$$R \leq 45,1 \text{ kNm} / 20,5 \text{ kNm}$$

$$R \leq 2,20$$

Por lo tanto, el valor inicialmente adoptado en el análisis estructural ($R=7$) no satisface la condición local de compatibilidad mecánica propuesta para la ZFPRP analizada, ya que $7 \gg 2,2$. En consecuencia, el factor de reducción inicialmente adoptado resulta excesivamente elevado para la viga analizada, debido a que la demanda sísmica reducida no alcanza a movilizar la resistencia efectivamente provista en la ZFPRP positiva. Por ello, resultará necesario reexaminar iterativamente el diseño estructural, pudiendo ello involucrar la reducción del factor de reducción adoptado, el redimensionamiento de elementos o la revisión del esquema resistente. Luego de realizar las iteraciones del procedimiento propuesto, se obtuvo la convergencia del factor de reducción. Los valores obtenidos en la última iteración fueron:

$$M_u = 60,1 \text{ kNm}$$

$$M_u^{EG} = 27,08 \text{ kNm}$$

$$M_u^{EEH} = 96,9 \text{ kNm}$$

Sustituyendo estos valores en la Inecuación de Compatibilidad Mecánica se obtiene,

$$R \leq 96,9\text{kNm} / (60,1\text{kNm} - 27,08\text{kNm})$$

$$R \leq 96,9\text{kNm} / 33,02\text{kNm}$$

$$R \leq 2,935 \approx 3$$

En consecuencia, puede considerarse que el factor de reducción finalmente adoptado satisface la condición local de compatibilidad mecánica propuesta para la ZFPRP analizada, verificándose simultáneamente las exigencias resistentes del CIRSOC 201⁽²⁾.

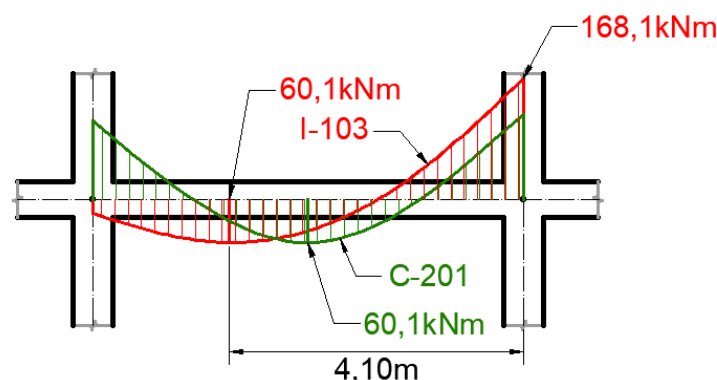


Figura 9. Superposición de demandas: INPRES-CIRSOC 103 – Parte I ⁽¹⁾ con $R \approx 3$ y CIRSOC 201⁽²⁾.

La Figura 9 muestra el estado convergente obtenido luego del proceso iterativo. La reducción del factor de reducción desde $R=7$ hasta $R=3$ permite, dentro del marco del modelo adoptado, que el momento positivo desarrollado por la combinación sísmica alcance la resistencia provista en la ZFPRP del tramo, restableciendo la condición necesaria para el inicio de la plastificación en la ZFPRP positiva prevista por el Diseño por Capacidad. Sin embargo, esta convergencia se logra a costa de un incremento de los momentos negativos en los apoyos, requiriendo un aumento de la armadura longitudinal superior.

Debe destacarse que esta reducción de R no constituye un ajuste menor. Al pasar de $E_H/7$ a $E_H/3$, la demanda sísmica de diseño se incrementa aproximadamente un 133%, modificando significativamente la respuesta estructural. En consecuencia, además del redimensionamiento resistente de los elementos, resulta indispensable verificar nuevamente los desplazamientos laterales, las distorsiones de piso, los efectos de segundo orden y todas las restantes comprobaciones reglamentarias.

Este resultado evidencia que la selección del factor de reducción posee un impacto

directo sobre el comportamiento global de la estructura y no representa únicamente un parámetro adoptado durante el análisis.

El procedimiento permitió obtener un valor límite local del factor de reducción compatible con el inicio de la plastificación en la ZFPRP analizada, verificando simultáneamente las exigencias resistentes del CIRSOC 201⁽²⁾ y la filosofía del Diseño por Capacidad.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la consistencia mecánica del mecanismo plástico asumido en el Diseño por Capacidad no depende únicamente del cumplimiento de las prescripciones reglamentarias de detallado, sino también de la compatibilidad efectiva entre la demanda sísmica reducida mediante el factor R y la capacidad resistente realmente provista en las ZFPRP.

Se verificó que, cuando el dimensionamiento de una viga queda gobernado por las combinaciones gravitatorias del CIRSOC 201⁽²⁾ o por las armaduras mínimas reglamentarias, la sobrerresistencia incorporada puede impedir localmente que la demanda sísmica reducida asociada al factor R adoptado movilice el mecanismo plástico previsto en determinadas ZFPRP. Esta incompatibilidad se refiere exclusivamente al nivel de demanda asociado al factor de reducción utilizado durante el diseño y no implica que la plastificación no pueda producirse frente a acciones sísmicas de mayor intensidad.

La reducción del factor R puede constituir una estrategia para restablecer la compatibilidad mecánica en las ZFPRP, aunque incrementa las acciones sísmicas de diseño, las solicitaciones internas, las cuantías de armadura y la necesidad de repetir todas las verificaciones reglamentarias asociadas al comportamiento global de la estructura.

Como principal aporte, este trabajo propone una Inecuación de Compatibilidad Mecánica que reemplaza el procedimiento gráfico de superposición de diagramas y permite evaluar, para cada elemento fusible y para cada combinación sísmica, el valor crítico asociado al inicio de la plastificación de cada ZFPRP. Dichos valores no representan factores de reducción locales de diseño ni sustituyen el factor R global de la estructura, sino que constituyen indicadores de compatibilidad mecánica para el

estado resistente analizado. En consecuencia, la convergencia hacia un único factor de reducción global requerirá un procedimiento iterativo con actualización progresiva de las articulaciones plásticas y de la respuesta estructural, aspecto que excede los alcances del presente trabajo y constituye una línea natural de investigación futura. Como alternativa práctica para verificar el factor R global adoptado, particularmente en pórticos resistentes a momento, puede recurrirse a un análisis estático no lineal (pushover), metodología disponible en la mayoría de los programas de análisis estructural y que permite verificar el desarrollo del mecanismo plástico global previsto por el Diseño por Capacidad.

REFERENCIAS

- (1) INPRES CIRSOC 103. *“Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes”*, Parte I *“Construcciones en general”*, 2018.
- (2) INTI-CIRSOC. (2013). *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. CIRSOC 201-2005*.
- (3) INPRES CIRSOC 103. *“Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes”*, Parte II *“Construcciones de hormigón armado”*, 2021.

BIBLIOGRAFÍA

Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons.

CEN. (2004). Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1). European Committee for Standardization.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356). Washington, DC.

American Society of Civil Engineers (ASCE). (2023). ASCE/SEI 41-23: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Reston, VA: ASCE.