



Respuesta inelástica de CNEs considerando el efecto de sitio

Cristian Camilo Ardila Mosquera

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Juan Carlos Obando Fuertes, Doctor (PhD) en Ciencias de la Ingeniería (Estructuras)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita

(Ardila Mosquera, 2024)

Referencia

(Ardila Mosquera, 2024). *Respuesta inelástica de CNEs considerando el efecto de sitio* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract	7
1 Introducción	8
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Justificación	14
2 Objetivos	14
2.1 Objetivo general	14
2.2 Objetivos específicos	14
2.3 Hipótesis	14
3 Marco teórico	15
4 Metodología	18
5 Resultados	20
6 Discusión	35
7 Conclusiones	37
8 Referencias	39

Lista de figuras

Figura 1, Resumen de las Aceleraciones Máximas en los Pisos	9
Figura 2, sistema masa resorte.	12
Figura 3: Espectros de aceleración absoluta normalizados de un edificio de 3 pisos de acero (razón de amortiguamiento 2%).....	13
Figura 4: Diferencias entre aceleraciones en el suelo y aceleraciones en los pisos. Esquema de componentes no estructurales con y sin sistema de aislación, (Obando 2016).....	19
Figura 5 . Relación fuerza-desplazamiento perfectamente elasto-plástica (Obando 2016).	20
Figure 6. Influencia de la respuesta inelástica de las estructuras en las IDRs de los CNEs, a nivel de piso y en el suelo, $\psi=2\%$ y $R=4$	21
Figure 7. Influencia de la respuesta inelástica de las estructuras en las IDRs de los CNEs, variación del factor R_p del CNE, razón de amortiguamiento 2%.	25
Figure 8. Influencia de la respuesta inelástica de las estructuras en las IDRs de los CNEs, variación del factor de amortiguamiento del CNE considerando un R_p constante de 4.	30
Figure 9. Evaluación de ecuaciones predictivas para los Índices de Demandas Relativas (IDRs) de aceleración del piso.	33
Figure 10. Evaluación de las ecuaciones de predicción considerando todos los pisos de las estructuras y el factor sísmico de diseño.	35

Siglas, acrónimos y abreviaturas

IDRs	Ratios de Desplazamiento Inelástico
CNEs	Componentes No Estructurales
R	factor de modificación, ASCE (2010) e INN (2015)
Psi (ξ)	Razón de amortiguamiento
PFA	Aceleraciones Máximas en los Pisos
PGA	Aceleraciones Máximas del suelo.

Resumen

Este estudio aborda la respuesta inelástica de los Componentes No Estructurales (CNEs) inelásticos, sensibles a la aceleración, considerando el efecto de sitio. El objetivo principal es analizar de manera sistemática la influencia del efecto de sitio en las relaciones inelásticas (IDRs) de los CNEs, teniendo en cuenta diversas tipologías estructurales obtenidas a partir del análisis lineal. Se modelaron siete estructuras de variadas alturas y materiales, y se obtuvieron perfiles de aceleraciones de piso a través de registros sísmicos en tres tipos de suelos distintos para con esta información poder derivar la respuesta de desplazamiento de sistemas elásticos e inelásticos de un solo grado de libertad. Los resultados obtenidos revelan que la respuesta inelástica de los CNEs no se ve afectada por el efecto de sitio. La metodología empleada incluye la simulación numérica con MATLAB utilizando las ecuaciones de Newmark. Se presta especial atención a variables clave como el periodo característico y los valores de convergencia de las relaciones inelásticas, proporcionando valiosas percepciones sobre la respuesta dinámica de los CNEs bajo la influencia del efecto de sitio.

Palabras clave: Relación de Desplazamientos Inelásticos (IDRs); Componentes No Estructurales (CNEs); Aceleraciones en el Piso.

Abstract

This study addresses the inelastic response of Non-Structural Components (NSCs) that are sensitive to acceleration, considering the site effect. The main objective is to systematically analyze the influence of the site effect on the inelastic response spectra (IDRs) of NSCs, taking into account various structural typologies obtained from linear analysis. Seven structures of varied heights and materials were modeled, and floor acceleration profiles were obtained through seismic records on three different types of soils. With this information, the displacement response of single-degree-of-freedom elastic and inelastic systems could be derived. The results obtained reveal that the inelastic response of NSCs is not affected by the site effect. The methodology used involves numerical simulation with MATLAB using the Newmark equations. Special attention is given to key variables such as the characteristic period and the convergence values of inelastic relationships, providing valuable insights into the dynamic response of NSCs under the influence of the site effect.

Keywords: Inelastic Displacements Ratios (IDRs); Nonstructural Components (NSCs); Floor Accelerations.

1 Introducción

El constante afán del ser humano por mejorar su entorno y comodidad se refleja claramente en el diseño y la construcción de viviendas y edificaciones. Mientras que los sistemas estructurales de los edificios están diseñados para resistir y disipar fuerzas significativas, existe otro componente igualmente crucial centrado en la comodidad y conveniencia: los componentes no estructurales (CNEs). Los CNEs, a diferencia de los elementos estructurales, no tienen la función principal de soportar cargas estructurales, pero su papel es vital para la seguridad y funcionalidad de un edificio. Durante eventos sísmicos, no solo se ve afectado el sistema estructural, sino también todos los elementos no estructurales que componen el entorno habitable. Por lo tanto, es esencial someter a estos objetos a un riguroso proceso de diseño y anclaje para mitigar las fuerzas inerciales, reduciendo así los costos de reparación después de un sismo. La cantidad y naturaleza de los CNEs dependen en gran medida del uso específico de un edificio. Por ejemplo, en oficinas, representan un porcentaje significativo del costo total del edificio, oscilando entre el 70% y el 85%, mientras que en hospitales este porcentaje puede llegar hasta el 90% (Taghavi et al., 2003). Este hecho subraya la importancia crucial de los CNEs no solo en términos de utilidad y comodidad, sino también en la funcionalidad estructural global de la edificación, como se evidenció en eventos sísmicos pasados en Nueva Zelanda (2010 y 2011), Chile (2010) y Ecuador (2016) (Dhakal et al., 2016; Miranda et al., 2010; Miranda et al., 2018). La conciencia de la influencia directa de los CNEs en la integridad estructural ha llevado a un creciente interés en su estudio en los últimos años. Investigaciones recientes se han centrado en caracterizar las aceleraciones de piso en estructuras específicas, revelando patrones significativos (Petrone et al., 2015; Petrone et al., 2016; Surana et al., 2018; Perrone et al., 2020; Ricci et al., 2021). Es importante destacar que los CNEs están estrechamente vinculados a las aceleraciones del piso, pero no necesariamente a la señal sísmica en sí. Algunos estudios han explorado ecuaciones predictivas y criterios aplicables de manera más general (Degli et al., 2018; Merino et al., 2020; Vukobratovic et al., 2016), subrayando la importancia de comprender estas relaciones para mejorar la resiliencia de las edificaciones ante eventos sísmicos.

En el ámbito de los CNEs, se distinguen dos categorías principales: aquellos sensibles a desplazamientos y los sensibles a aceleraciones. Para los CNEs sensibles a aceleraciones, la variable central en el diseño es la aceleración absoluta máxima en su punto de anclaje. Esta

consideración se debe principalmente a dos factores cruciales. En primer lugar, los CNEs sensibles a la aceleración están firmemente anclados a la estructura en ubicaciones específicas. En segundo lugar, durante un sismo, las aceleraciones de piso tienden a aumentar con la altura del edificio (Miranda et al., 2018; Anajafi H et al., 2020). A medida que las ondas sísmicas atraviesan el suelo, experimentan cambios en su velocidad y amplitud debido a las variaciones en la rigidez y densidad del sustrato geológico. En suelos rígidos, las ondas sísmicas tienden a viajar a velocidades mayores, mientras que en suelos blandos, por otro lado, las ondas sísmicas tienden a ser absorbidas y dispersadas más fácilmente, este fenómeno, puede causar una variación considerable en las aceleraciones de piso, tal como se puede evidenciar en la Figura 1. En cuanto al diseño sísmico de los CNEs sensibles a la aceleración, se centra en la respuesta inelástica ante las posibles aceleraciones que la estructura podría experimentar durante un evento sísmico. Aunque esta área es crucial para mejorar la resiliencia de los CNEs, hay una falta notable de estudios que aborden en detalle la respuesta inelástica de estos elementos. Además, pocos estudios han explorado las características mecánicas del suelo en el cual está anclado el edificio, a pesar de que este factor puede tener un impacto significativo en la respuesta sísmica. Estas complejidades subrayan la necesidad de una comprensión más profunda y detallada de la interacción entre los CNEs, la estructura y las características del suelo para mejorar la capacidad de respuesta sísmica de los CNEs. (Mirand et al., 2018; Anajafi et al., 2020).

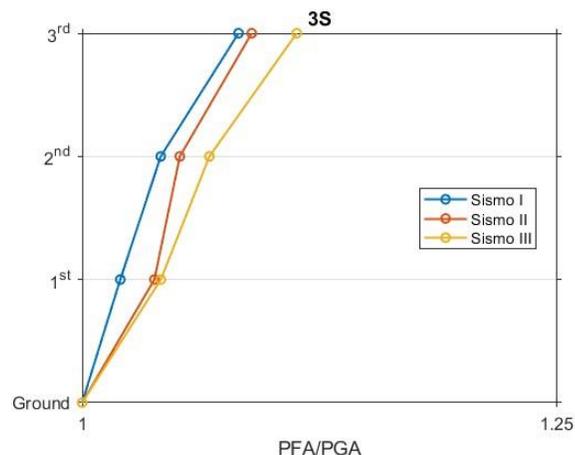


Figura 1, Resumen de las Aceleraciones Máximas en los Pisos

El trabajo de Obando y Lopez-Garcia (2018) se destaca como una contribución significativa en el estudio de la respuesta no lineal de los CNEs, al centrarse en la caracterización de esta respuesta a través de las IDRs (relación de deformación inelástica). Su enfoque se concentra en la

dependencia de esta relación con el desplazamiento máximo de un sistema inelástico en comparación con su correspondiente desplazamiento máximo elástico. Las contribuciones de Adam y Fotiu (2000), así como Aziz (2003), ofrecen una comprensión detallada de las respuestas sísmicas inelásticas, al modelarlas bajo un grado de libertad (GDL) y adherirlas a estructuras elásticas. Este enfoque permite explorar la interacción entre los CNEs y las estructuras a las que están conectados. Chaudhuri y Villaverde (2008), junto con Villaverde (2006), adoptan un enfoque específico al considerar únicamente los periodos de los CNEs que están en resonancia con los periodos de la estructura de soporte. Esta metodología proporciona información valiosa sobre el comportamiento dinámico de los CNEs en situaciones particulares de resonancia. Aunque estos estudios se basan en evaluaciones realizadas bajo aceleraciones de piso, es crucial reconocer que los CNEs reaccionan a estas aceleraciones, lo que puede resultar en IDRs con características distintas a las de la estructura. En un ejemplo más reciente, Bravo-Haro, Virreira y Elghazouli (2021) realizaron una extensión del estudio de Obando y Lopez-Garcia (2018), explorando las IDRs de CNEs considerando varios grupos de excitaciones sísmicas, que incluyen aceleraciones de campo lejano y cercano. A pesar de estos avances, sigue siendo notable que ninguno de los autores mencionados considera el efecto del sitio para el análisis de las IDRs de los CNEs. Este aspecto introduce una variable adicional y subraya la necesidad de investigaciones futuras que aborden la influencia de las condiciones específicas del sitio en la respuesta no lineal de los objetos no estructurales.

Dada la falta de consideración del efecto de sitio en estudios anteriores sobre las relaciones inelásticas de los CNEs, esta investigación se propone abordar esta omisión crucial. Se enfoca en analizar las relaciones inelásticas de los CNEs teniendo en cuenta la influencia del efecto de sitio en el contexto de estructuras representativas en Colombia. En concreto, se seleccionaron dos estructuras de pórticos de concreto reforzado y dos de acero, abarcando diversos niveles y representando configuraciones estructurales comunes en el país. El objetivo principal es evaluar cómo el efecto de sitio impacta las diferentes características de las relaciones inelásticas de desplazamiento y aceleración de los CNEs. Se presta especial atención a variables clave, como el periodo característico, que es el periodo a partir del cual las IDRs (relaciones de deformación inelástica) alcanzan una estabilización a un valor constante. Además, se investigan los valores de convergencia de estas relaciones inelásticas, proporcionando insights sobre la respuesta dinámica de los CNEs bajo la influencia del efecto de sitio. Una parte fundamental de la investigación implica

evaluar la validez de las ecuaciones de predicción propuestas anteriormente para las relaciones inelásticas de los CNEs. Esto permitirá no solo entender la influencia del efecto de sitio en las características de las relaciones inelásticas, sino también validar o ajustar las herramientas de predicción utilizadas en el diseño sísmico de estos elementos no estructurales. Con este enfoque integral, se busca contribuir al avance del conocimiento en el diseño sísmico de CNEs, considerando un factor hasta ahora subestimado: el efecto de sitio.

1.1 Planteamiento del problema

La dinámica estructural, un campo tanto complejo como fascinante, desentraña la forma en que las estructuras responden ante eventos sísmicos, siendo esencial para diseñar tanto los componentes estructurales como los no estructurales (CNEs). Cuando se desencadena un terremoto, un edificio se comporta como un oscilador armónico forzado. Esto implica que la fuerza sísmica que lo afecta está intrínsecamente relacionada con la masa, rigidez y altura del edificio.

Para ilustrar este principio, podemos visualizar el edificio como un sistema de masa y rigidez concentrado, aunque este enfoque no ofrezca valores confiables, sirve como una forma simplificada para que el lector comprenda la naturaleza del problema. En la Figura 2 se representa un edificio de dos pisos, pero es importante señalar que este método para entender la dinámica estructural puede extrapolarse a estructuras con más componentes.

Esta simplificación conceptual permite apreciar la influencia de la masa y rigidez en la respuesta del edificio ante un terremoto. La interacción compleja entre estos factores determina la capacidad de la estructura para resistir las fuerzas sísmicas y proporciona un marco fundamental para el diseño sismorresistente de edificaciones, incluyendo tanto los elementos estructurales como los no estructurales.

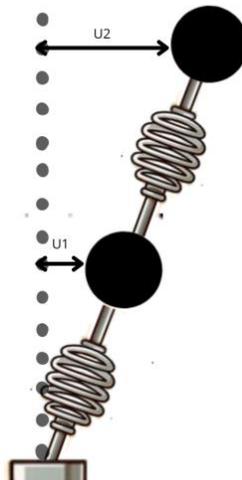


Figura 2, sistema masa resorte.

La respuesta sísmica a nivel de piso es diferente y creciente a medida que se asciende en altura, esto se puede evidenciar en la Figura 3, en donde se puede observar que, para cada piso de una estructura de acero de 3 niveles, la demanda sísmica varía aumentado con la altura, por ende, los CNEs no están vinculadas a las aceleraciones del suelo, sino más bien a las aceleraciones específicas del piso al que están ancladas o sujetas (Villaverde, 1997).

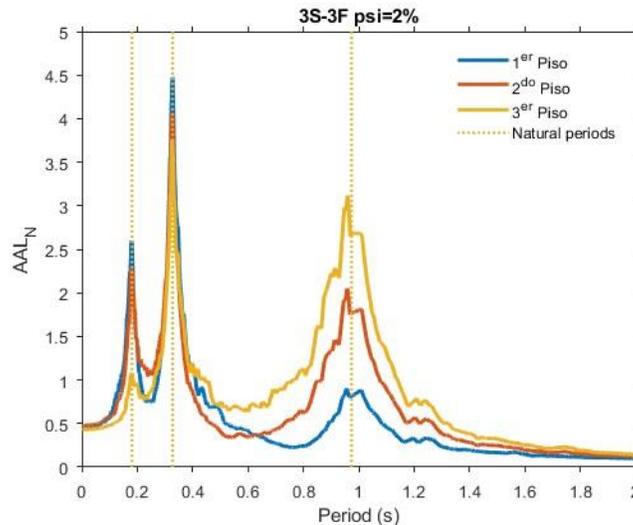


Figura 3: Espectros de aceleración absoluta normalizados de un edificio de 3 pisos de acero (razón de amortiguamiento 2%)

Es evidente entonces que la respuesta sísmica no depende solamente del diseño estructural, también de la interacción suelo estructura, la transferencia de energía entre el suelo y el edificio también desempeña un papel crucial. Suelos más rígidos tienen una tendencia a transmitir mejor la energía sísmica, mientras que suelos más blandos pueden absorber parte de esa energía. En consecuencia, suelos con propiedades de amplificación pueden incrementar la energía sísmica que alcanza al edificio, dando lugar a mayores aceleraciones y deformaciones en la estructura.

Es evidente entonces, que, en el análisis del comportamiento de los objetos no estructurales, se debe incorporar entonces otro elemento dinámico adicional que pueda modelar estos cambios en las propiedades mecánicas del terreno en donde esta impuesta la cimentación del edificio, el suelo sobre el que se construye una estructura puede tener propiedades distintas al lecho rocoso, lo que se traduce en una variación del movimiento entre diferentes puntos que interactúan con la cimentación, incluso en ausencia de la cimentación (Carlos et al., 2016).

Este es el interrogante que responderá este estudio, como el efecto de sitio afecta las relaciones inelásticas de los componentes no estructurales, para esto se modelaron 7 estructuras de diferentes alturas y diferentes materiales, que mediante señales de sismos obtenidas en 3 tipos de suelos diferentes se obtendrán perfiles de aceleraciones de piso para posteriormente analizar las relaciones inelásticas.

1.2 Justificación

La investigación sobre los Componentes No Estructurales (CNEs) se justifica por la necesidad imperante de comprender su rol crucial en la respuesta sísmica de las edificaciones. La constante búsqueda de optimizar la seguridad y funcionalidad en el diseño y construcción de viviendas y estructuras destaca la importancia vital de los CNEs, especialmente en situaciones sísmicas.

La elección de este tema se basa en el aumento de la conciencia acerca de la influencia directa de los CNEs en la integridad estructural, subrayada por experiencias sísmicas previas en diversas regiones. La investigación busca analizar de qué manera el efecto de sitio influye en las relaciones inelásticas de desplazamiento y aceleración de los CNEs.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar de manera sistemática la influencia del efecto de sitio en las relaciones inelásticas de CNEs considerando además diferentes tipologías estructurales.

2.2 Objetivos específicos

Analizar y caracterizar las relaciones inelásticas de los componentes no estructurales.

Obtener perfiles detallados de aceleraciones de piso a través de las simulaciones realizadas considerando registros de diferentes tipos de suelo.

Comparar y contrastar cómo las relaciones inelásticas varían considerando el efecto de sitio.

2.3 Hipótesis

La hipótesis central de este estudio se fundamenta en la premisa de que existe un efecto directo del sitio en las relaciones inelásticas de los Componentes No Estructurales (CNEs) en estructuras representativas en Colombia. Se sostiene la conjetura de que el efecto de sitio, previamente subestimado en la respuesta sísmica de los CNEs, manifestará variaciones significativas en sus características dinámicas, particularmente en las relaciones inelásticas de desplazamiento y aceleración.

Esta hipótesis se sustenta en la idea de que la interacción entre los CNEs y las características específicas del suelo sobre el cual se asienta una estructura influye de manera directa en sus respuestas dinámicas. Se anticipa que, al considerar detalladamente este efecto de sitio, se revelarán patrones distintivos en las relaciones inelásticas de los CNEs, proporcionando así una base sólida para la validación y ajuste de las herramientas de predicción empleadas en el diseño sísmico de estos componentes.

3 Marco teórico

La interrelación entre las propiedades mecánicas del suelo y su respuesta ante fuerzas sísmicas es de naturaleza intrincada. Al someter una masa de suelo a un esfuerzo sísmico, su comportamiento se encuentra estrechamente ligado a una variedad de propiedades que definen las características del terreno. Aspectos fundamentales como la densidad, cohesión, fricción interna, velocidad de onda sísmica y capacidad de deformación desempeñan un papel crítico en la comprensión de la reacción del suelo frente a cargas dinámicas. La compleja interacción entre estas propiedades influye significativamente en la transferencia de fuerzas y ondas sísmicas a través del suelo, teniendo un impacto directo en el desempeño de las estructuras construidas sobre él, por ejemplo, las ondas sísmicas pueden experimentar amplificaciones o reducciones a medida que se propagan a través del suelo, influenciadas por las características del suelo, su frecuencia y amplitud (Sheng et al., 2002).

En este contexto, Reinoso et al. (2005) destacan que las aceleraciones más elevadas del piso durante eventos sísmicos inducen un incremento sustancial en las fuerzas y desplazamientos experimentados por los componentes no estructurales (CNEs), lo que conlleva al riesgo potencial de avería o daño. Esta susceptibilidad se atribuye a la íntima conexión entre los CNEs y la respuesta dinámica del suelo frente a excitaciones sísmicas. En términos más detallados, cuando el piso experimenta aceleraciones considerables, se generan fuerzas inerciales significativas. Estas fuerzas

actúan sobre los CNEs, que, al carecer de una integración estructural sólida con el edificio, presentan una menor capacidad para resistir las fuerzas dinámicas. Por lo tanto, cualquier amplificación en las ondas sísmicas se traduce en un aumento directo de la demanda sobre los CNEs.

Es relevante destacar que los CNEs comprenden todos aquellos elementos que no forman parte del sistema estructural principal de un edificio, pero que desempeñan un papel fundamental en su funcionalidad. Según Hamidreza et al., (2020), estos elementos y subsistemas no están directamente involucrados en los sistemas de carga de gravedad o fuerza lateral de la estructura, pero son esenciales para respaldar su operación normal (Anajafi et al., 2020). La comprensión del comportamiento sísmico de los CNEs es de vital importancia, ya que puede contribuir significativamente a la reducción de costos en el caso de daños a las estructuras y, lo que es aún más crucial, a la prevención de interrupciones en los servicios públicos.

En el contexto actual, Obando et al. (2018) llevaron a cabo una exhaustiva caracterización de las ratios de desplazamiento inelástico (IDRs) específicamente en componentes no estructurales (CNEs) sensibles a la aceleración en estructuras de edificios de varios pisos sometidos a aceleraciones lejanas del suelo. Estos IDRs revisten gran importancia al proporcionar información esencial sobre la capacidad de los CNEs para resistir cargas sísmicas y su habilidad para mantener su funcionalidad tras un terremoto. Además, su aplicación resulta crucial para analizar el efecto de sitio y reconocer variaciones en los IDRs frente a diferentes señales sísmicas.

Los CNEs exhiben una notable correlación con los periodos fundamentales de la edificación, marcando una vinculación esencial en su respuesta dinámica. Esta conexión revela una independencia discernible con respecto al periodo característico de la aceleración del suelo, generando disparidades significativas tanto en los valores máximos como en el contenido de frecuencia de las aceleraciones del piso. Específicamente, se observa la presencia de mínimos locales en los IDRs durante los periodos modales de la estructura, fenómeno atribuido a los efectos inelásticos que reducen la magnitud de los máximos en los espectros de desplazamiento en esos periodos particulares. Esta complejidad se intensifica al constatar que las IDRs no siguen un aumento uniforme en periodos progresivamente más cortos que el período característico, sino que revelan mínimos locales durante los periodos de resonancia. Estos hallazgos subrayan la importancia de una comprensión detallada de la interacción dinámica del edificio y los CNEs, los

cuales dependen directamente de las características dinámicas de la estructura mas no de la aceleración de piso (Obando et al., 2018; Obando et al., 2022).

4 Metodología

Como se ha detallado anteriormente, resulta evidente que cada nivel de una estructura exhibe respuestas diversas frente a un evento sísmico. En otras palabras, las fuerzas inerciales varían y aumentan con la altura, generando, por ende, una fluctuación en las aceleraciones a nivel de cada piso. Para comprender el impacto del efecto de sitio en los CNEs, resulta fundamental inicialmente obtener estas aceleraciones. Es crucial destacar que los CNEs reaccionarán ante estos estímulos, no obstante, no lo harán en respuesta directa a la señal sísmica, (Villaverde, 1997).

Para calcular las aceleraciones a nivel de piso, se emplea la ecuación de Newmark, la cual se deriva de la segunda ley de Newton. Como se ha discutido anteriormente, esta ecuación puede expresarse de la siguiente manera para un sistema de múltiples grados de libertad (SDOF) .

$$[m]\ddot{u}(t) + [c]\dot{u}(t) + [k]u(t) = P(t)$$

Por conceptos básicos de manejo de matrices y además asumiendo que $P(t) = 0$ (las fuerzas externas que actúan en el sistema son nulas) es posible derivar la expresión para la aceleración de piso, obteniendo el siguiente resultado.

$$\ddot{u}(t) = -[m]^{-1}[c]\dot{u}(t) - [m]^{-1}[k]u(t)$$

Para poder solucionar esta ecuación, se usará la técnica del Mantenedor de Orden Cero el cual divide el tiempo en pasos discretos y considera que las magnitudes permanecen constantes durante cada intervalo de tiempo. En otras palabras, asume que las magnitudes son "retenidas" o "mantenidas" constantes durante el periodo de muestreo.

La aplicación del Mantenedor de Orden Cero implica tomar la información de las magnitudes en un momento específico y considerar que permanece constante hasta el siguiente paso de tiempo. Este enfoque facilita el uso de métodos numéricos para calcular los desplazamientos y velocidades en cada piso de la estructura en cada punto discreto en el tiempo.

Pasando a examinar los CNEs, que interactúan con las aceleraciones del piso previamente definidas, es necesario obtener otro sistema de ecuaciones para modelar su comportamiento dinámico. En este caso, se supondrá que los CNEs se comportan como un sistema de masa y rigidez concentrada de dos pisos, que consta de una aislación lineal y el CNE como se puede observar en la Figura 4. Por lo tanto, utilizando la teoría de Newmark, su comportamiento dinámico se puede parametrizar de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 \\ -m_2 \end{bmatrix} \ddot{u}_g$$

Donde, m_1 , c_1 , k_1 , son la masa, amortiguamiento y rigidez del sistema de aislación y m_2 , c_2 , k_2 del CNE respectivamente.

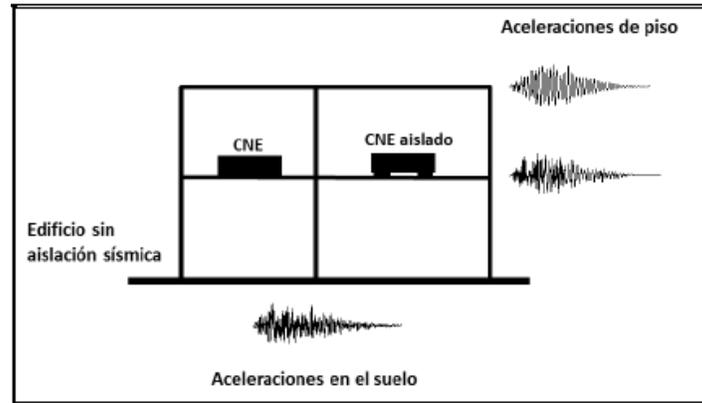


Figura 4: Diferencias entre aceleraciones en el suelo y aceleraciones en los pisos. Esquema de componentes no estructurales con y sin sistema de aislación, (Obando 2016).

Para calcular las IDR (relaciones entre deformación no lineal y lineal), es necesario determinar la aceleración, velocidad y desplazamiento de los CNEs en un instante de tiempo t , recorriendo todo el input sísmico o, en este caso, las aceleraciones de piso. Además, se verifica si el desplazamiento supera el límite admisible o si la velocidad cambia de signo. En estas situaciones, se debe ajustar el intervalo de tiempo y la rigidez del sistema para simular el comportamiento no lineal o elástico del sistema. Así, se pueden obtener los desplazamientos en cada instante del tiempo. Para este estudio, se considera un sistema elasto-plástico, permitiendo obtener las deformaciones lineales y no lineales del sistema, como se ilustra en la Figura 5.

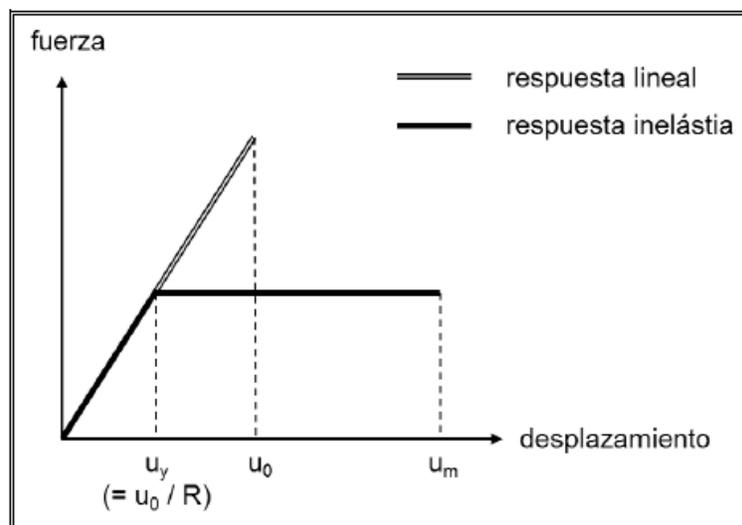


Figura 5. Relación fuerza-desplazamiento perfectamente elasto-plástica (Obando 2016).

5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el presente estudio. Es relevante recordar que las IDRs son una herramienta ampliamente utilizada en la literatura para caracterizar la respuesta inelástica de los CNEs (Objetos No Estructurales) frente a una demanda sísmica. Esta relación ha sido objeto de extensa investigación, siendo definida como la relación entre la respuesta máxima de desplazamiento inelástico y la respuesta del sistema elástico, (Chopra y Chintanapakdee., 2004).

Los CNEs exhiben una capacidad intrínseca para disipar energía, lo cual se refleja en la práctica al dividir la carga esperada por un factor de modificación R , como se sugiere en las normativas ASCE (2010) e INN (2015). En este contexto, las estructuras fueron modeladas asumiendo un comportamiento elástico lineal, mientras que los CNEs fueron representados como sistemas SDOF (Single Degree of Freedom) de dos niveles, caracterizados por un comportamiento perfectamente elasto-plástico mediante la ecuación de Newmark.

La modelización de los CNEs se realizó considerando directamente el coeficiente de amortiguación ξ y el factor de respuesta R . Cabe destacar que, aunque la ecuación involucra una matriz de masas, para los propósitos de este estudio se asumió que el CNEs posee una masa considerablemente menor que la masa total de la estructura (Sankaranarayanan y Medina., 2007).

En la Figura 6, se presenta la traza de las IDRs tanto en el suelo como a nivel de piso. No obstante, cabe destacar que, para los objetivos específicos de este estudio, no se ha implementado un procedimiento formal para analizar el comportamiento de las IDRs a nivel del suelo. Esta decisión se justifica por diversas razones. a) las IDRs no dependen del tipo de registro, siempre y cuando el periodo característico pueda identificarse adecuadamente, (Chopra y Chintanapakdee., 2004). b) el periodo característico de los CNEs está directamente relacionado con los periodos fundamentales de la estructura, siendo estos iguales. Por lo tanto, son independientes al periodo característico de la aceleración del suelo, (Obando et al., 2022), esto implica que las aceleraciones de piso difieren de la aceleración del suelo tanto en los valores máximos como en el contenido de frecuencia, (Obando y Lopez-Garcia., 2014). c) los resultados obtenidos indican que el periodo

característico del suelo es aproximadamente igual a 0.5 s, independientemente del registro utilizado. Este valor se alinea con los hallazgos típicos en la literatura para suelos rígidos, (Chopra y Chintanapakdee., 2004).

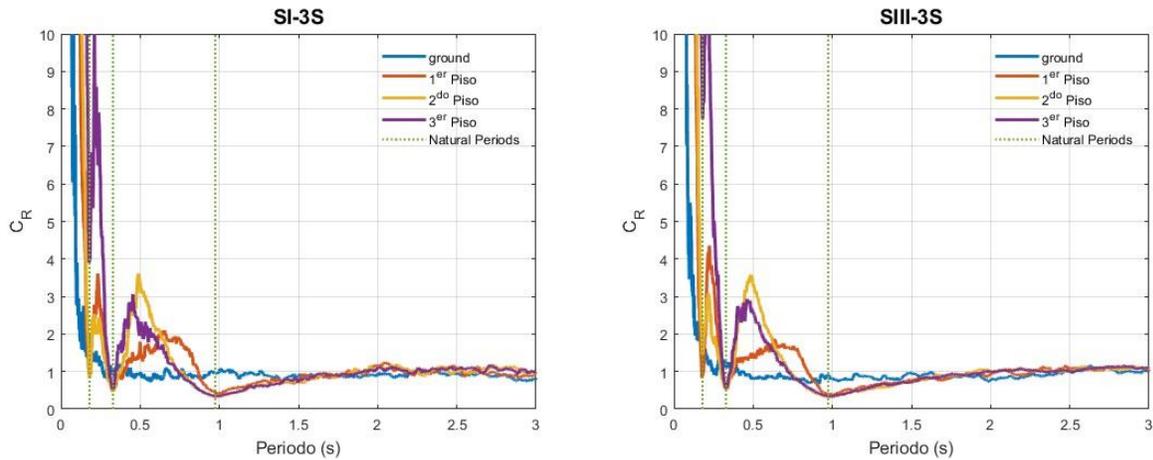
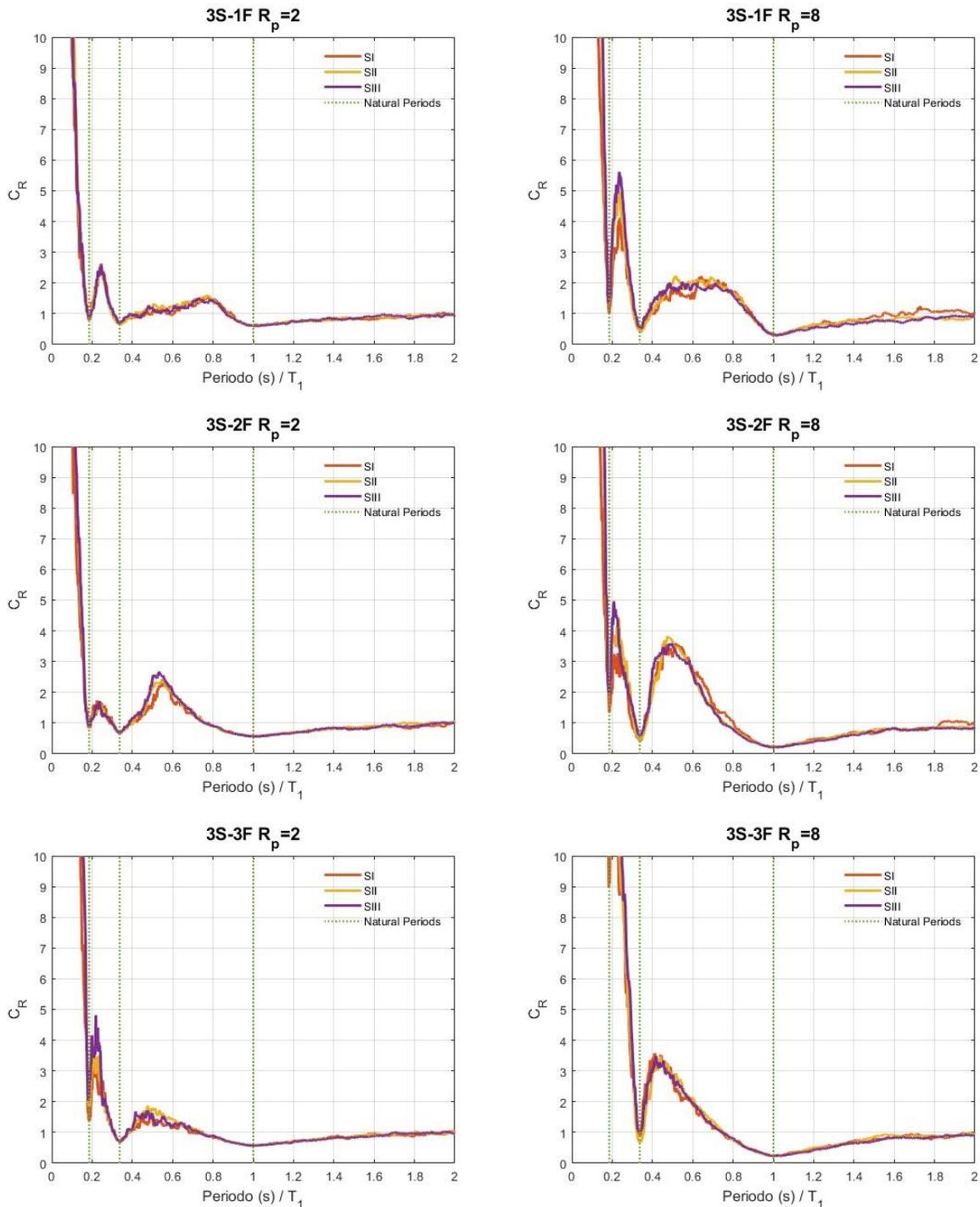


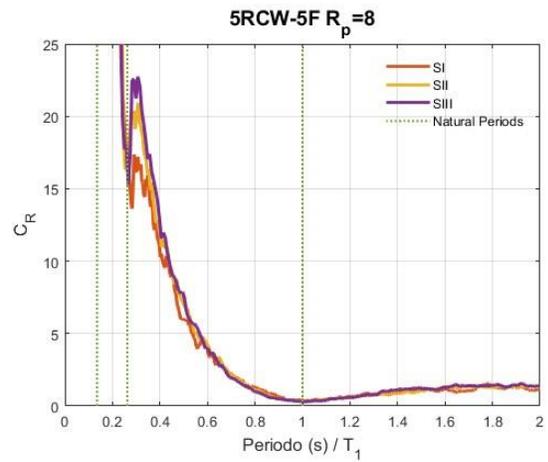
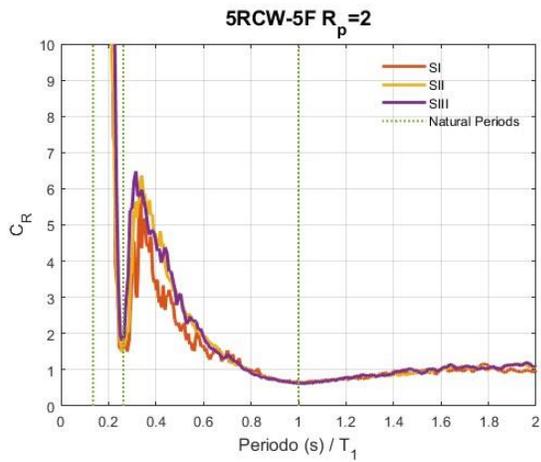
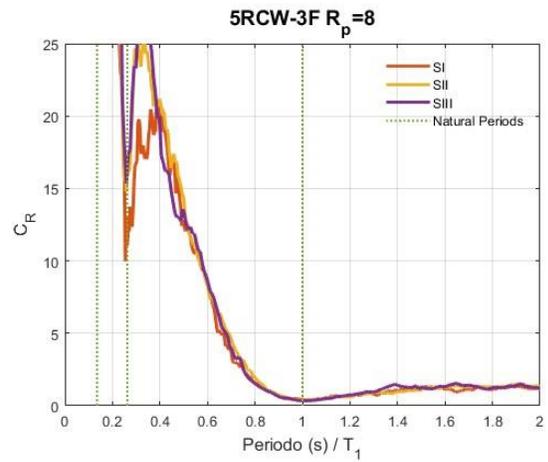
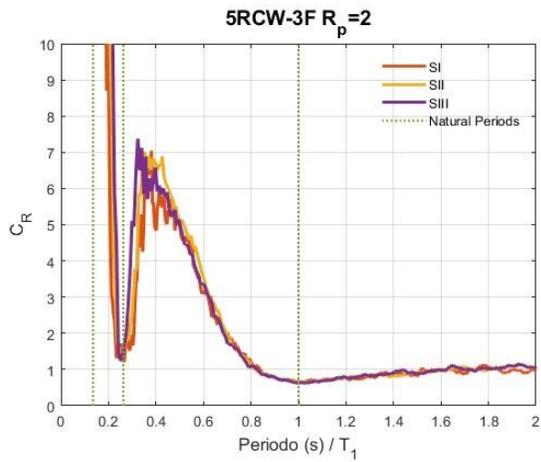
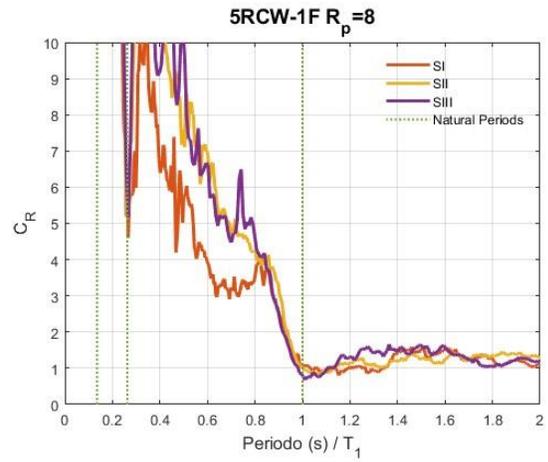
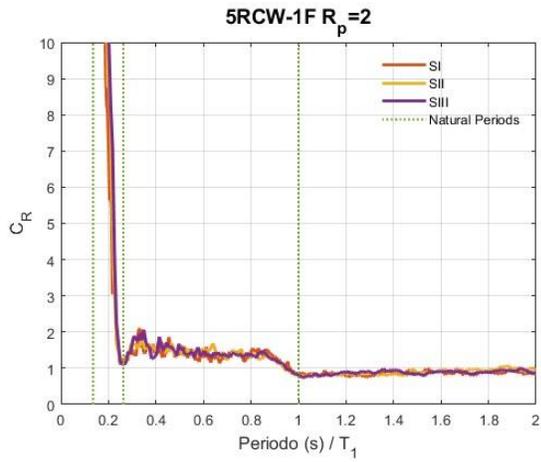
Figure 6. Influencia de la respuesta inelástica de las estructuras en las IDRs de los CNEs, a nivel de piso y en el suelo, $\psi=2\%$ y $R=4$.

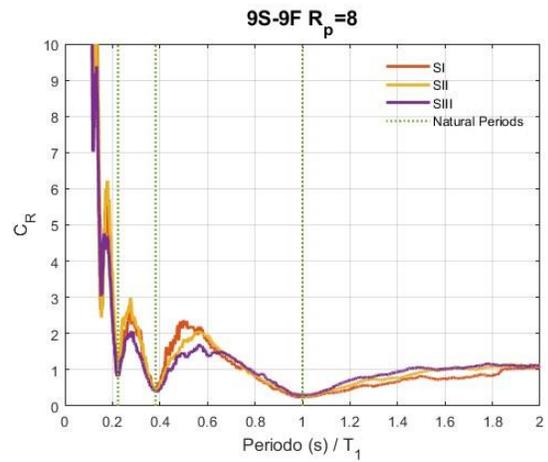
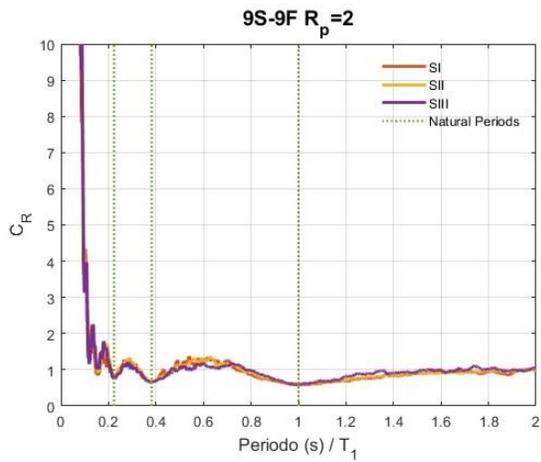
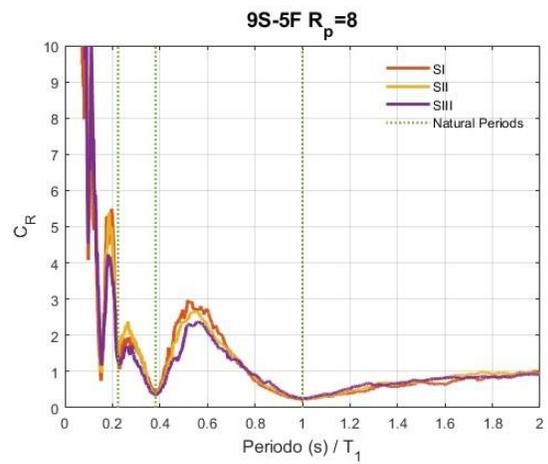
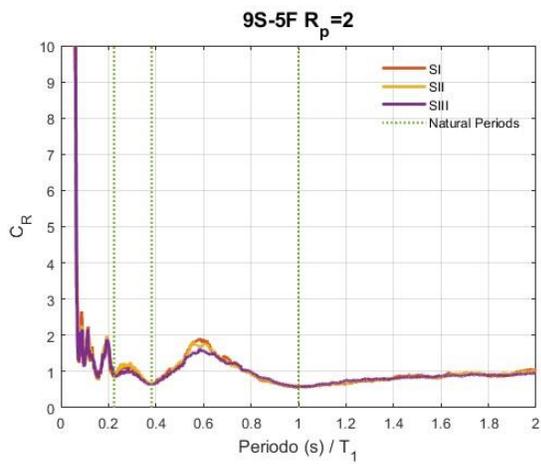
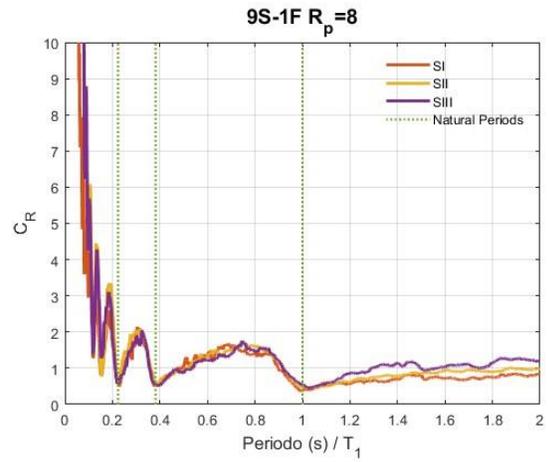
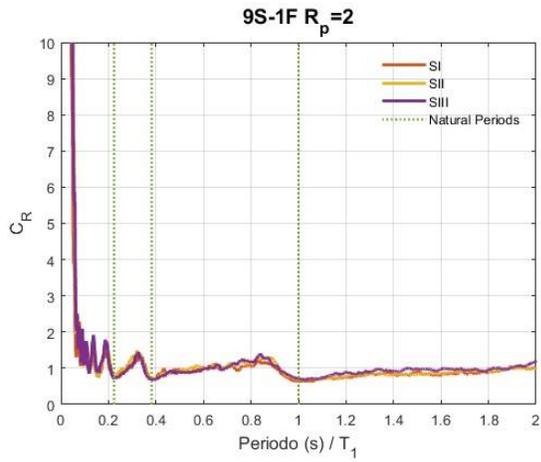
Para contrastar con la literatura, se adoptaron los símbolos definidos por Chopra y Chintanapakdee (2004), quienes establecen que para indicar que las IDRs son válidas y responden a un valor constante R , en lugar de un valor de ductilidad constante, se denotan al conjunto de familias como CR . Es importante recordar que los períodos modales efectivos de la estructura se indican con líneas verticales punteadas en las gráficas 7 para facilitar las observaciones pertinentes.

La influencia de R en las IDRs ya ha sido objeto de estudio e informado por Chopra y Chintanapakdee (2004), de los cuales se pueden extraer varias observaciones importantes. a) Las IDRs expresan mínimos locales marcados precisamente en los periodos modales de la estructura, (Obando et al., 2018). Es relevante recordar que las IDRs son una relación entre los desplazamientos inelásticos y los elásticos. Los autores concluyen que estos mínimos marcados se producen porque los efectos inelásticos reducen la magnitud de los máximos en los espectros de desplazamiento en esos períodos, (Obando et al., 2018). b) Las IDRs son proporcionales a R ; por lo tanto, valores más grandes de R conducen a valores más grandes de IDRs (Chopra y Chintanapakdee., 2004). c) Las IDRs son ligeramente inferiores a la unidad en el primer periodo modal de la estructura (periodo característico). Para periodos mayores al periodo característico, tienden a 1. Estas observaciones son válidas sin importar el piso ni el valor de R tomado, (Chopra

y Chintanapakdee., 2004). Además, esta observación también es válida independientemente del tipo de registro. d) Las IDRs no aumentan de manera uniforme en períodos que son progresivamente más cortos que el período característico, presentando mínimos locales en los periodos de resonancia, (Bravo et al., 2021; Obando et al., 2018).







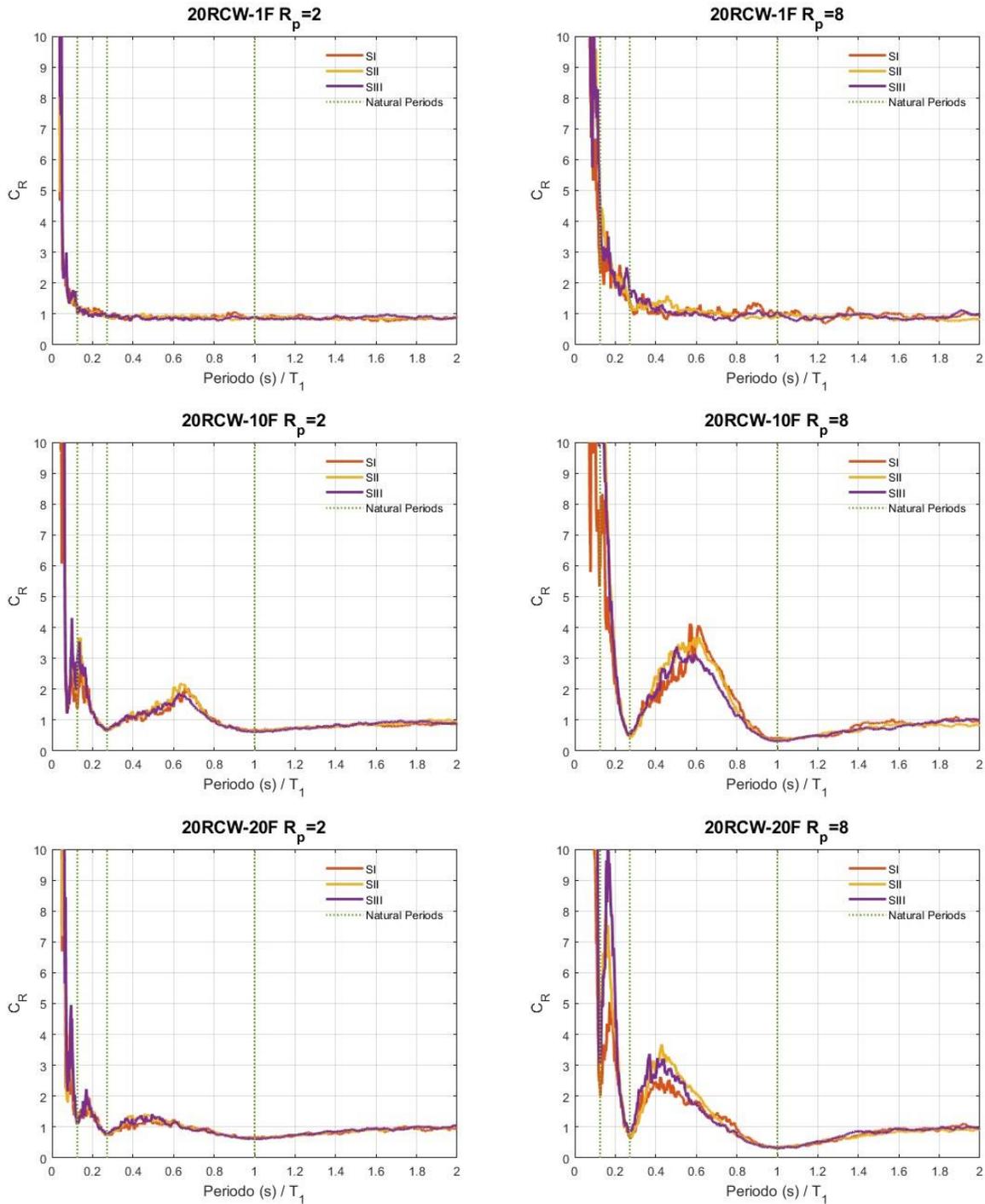


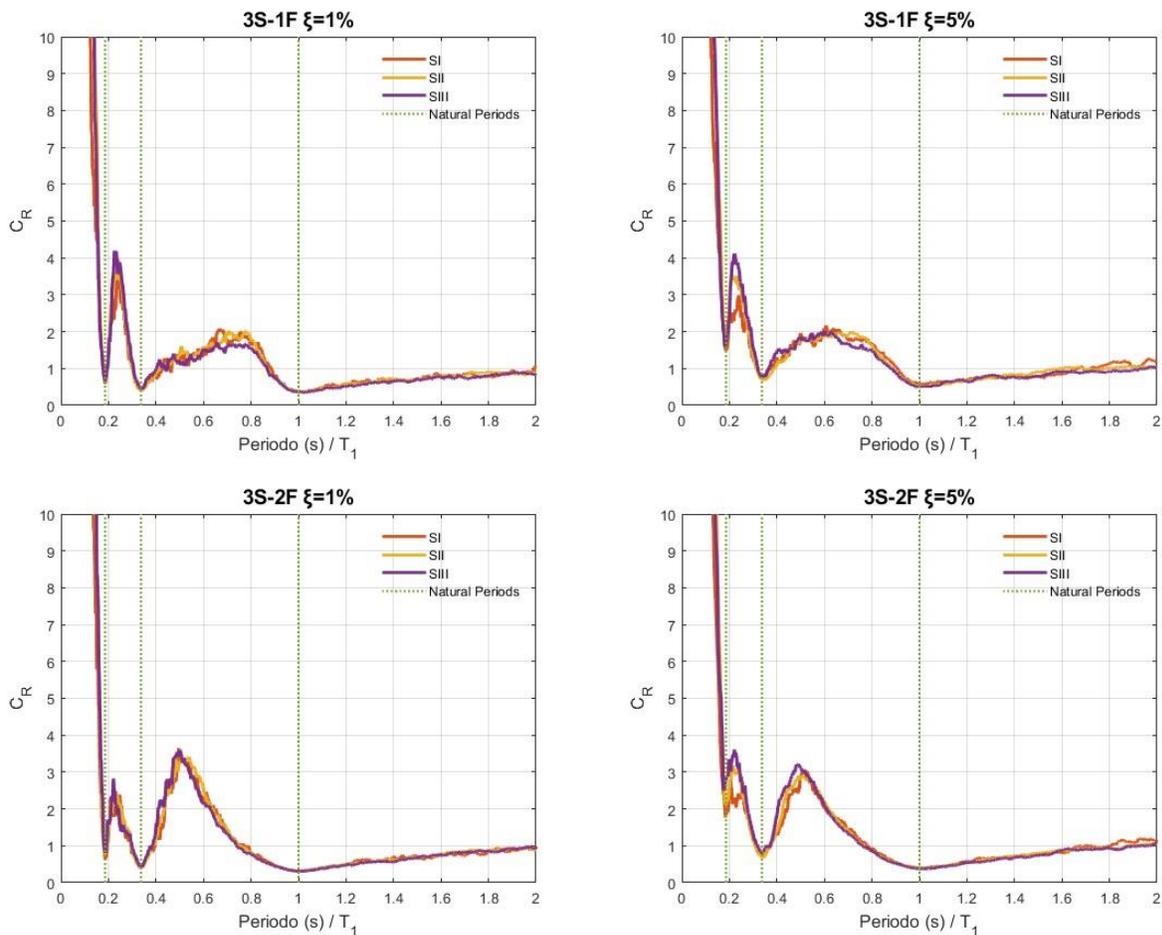
Figure 7. Influencia de la respuesta inelástica de las estructuras en las IDRs de los CNEs, variación del factor R_p del CNE, razón de amortiguamiento 2%.

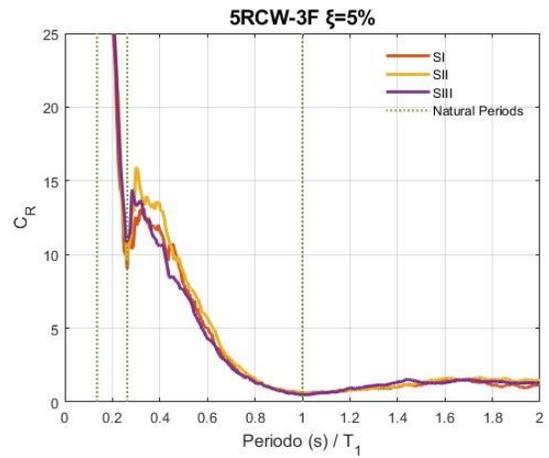
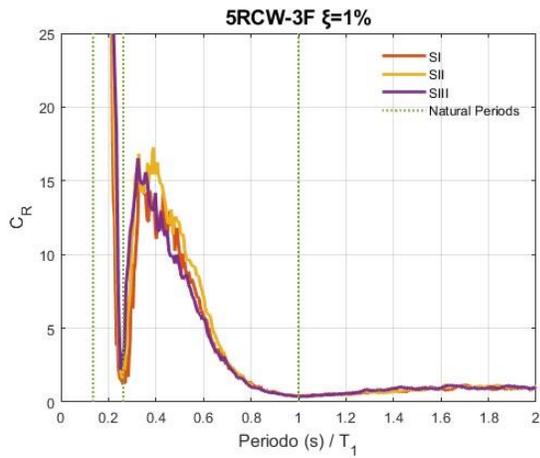
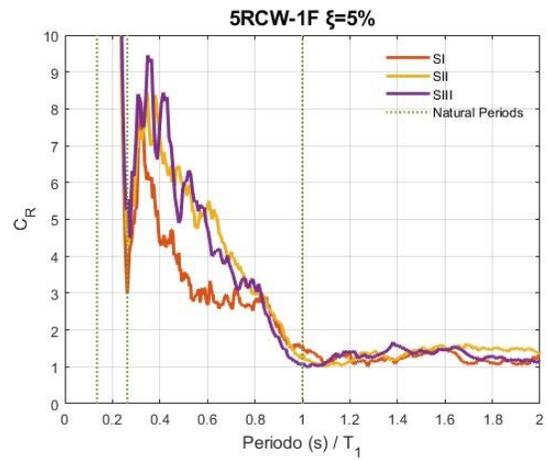
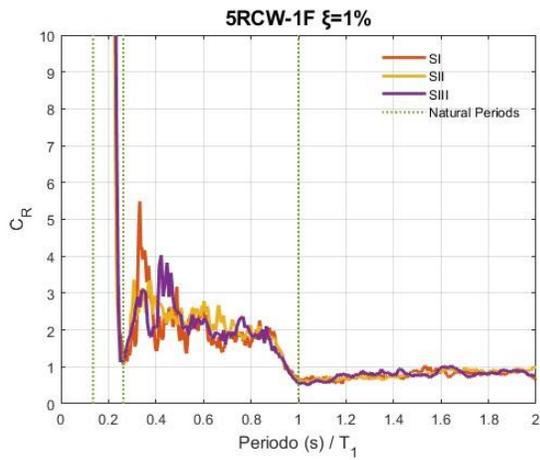
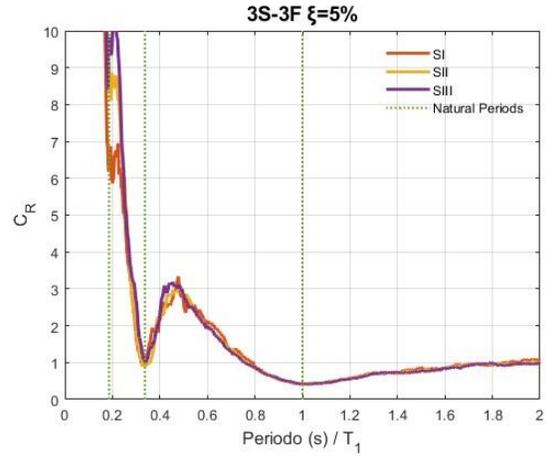
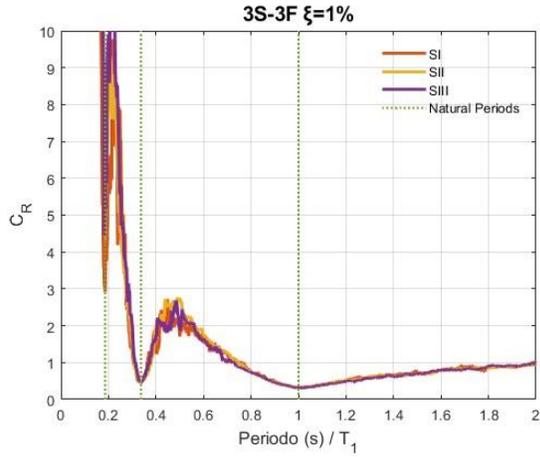
La teoría presentada por (Obando., 2016) indica que las diferencias significativas en las relaciones de deformación inelástica (IDRs) se observan en rangos de periodos pequeños y en

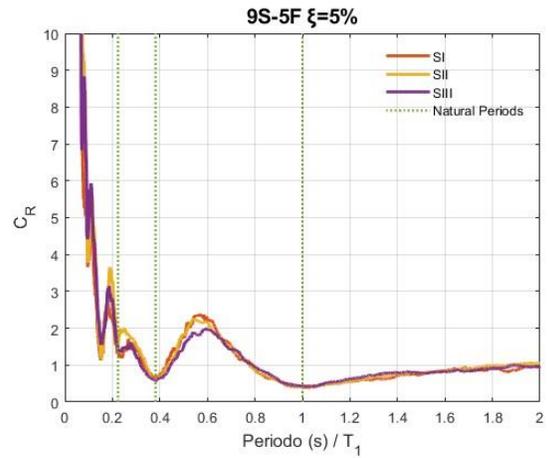
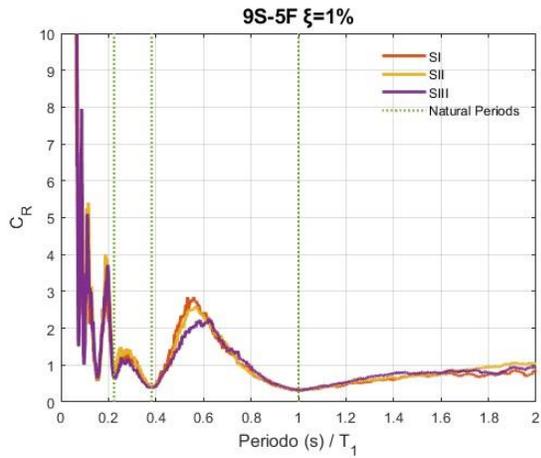
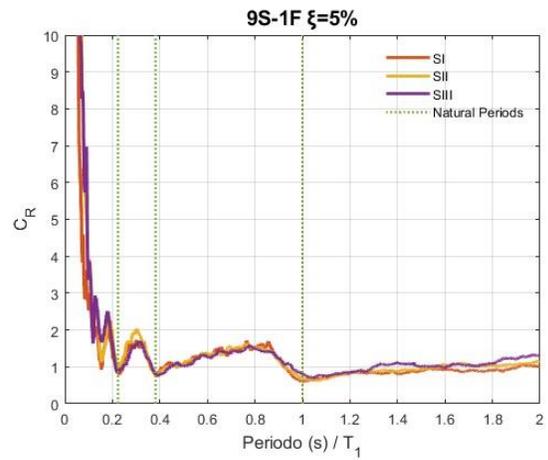
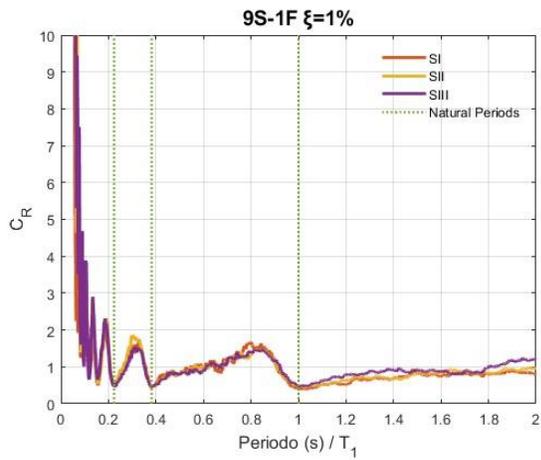
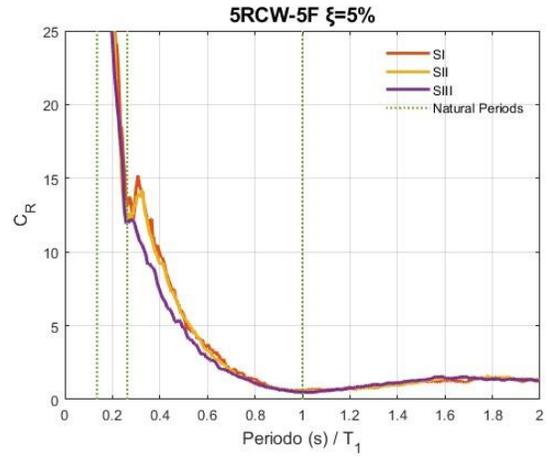
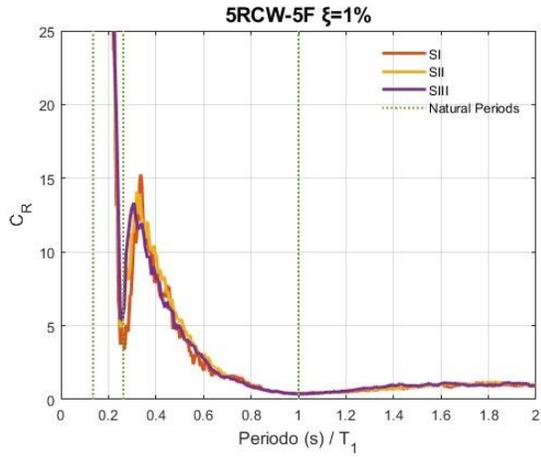
resonancia modal. En estos casos, se ha observado que las IDR para una razón de amortiguamiento ξ bajo son consistentemente menores que las IDR para ξ alto.

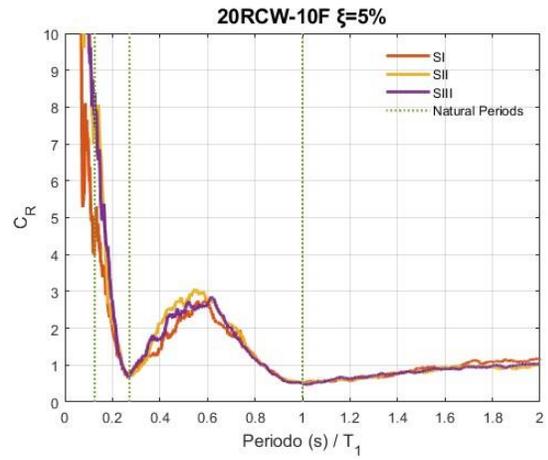
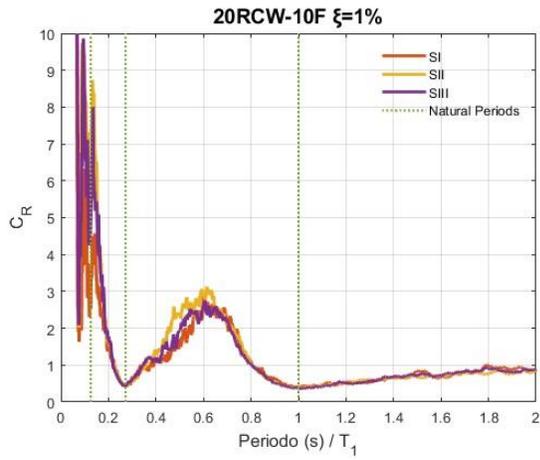
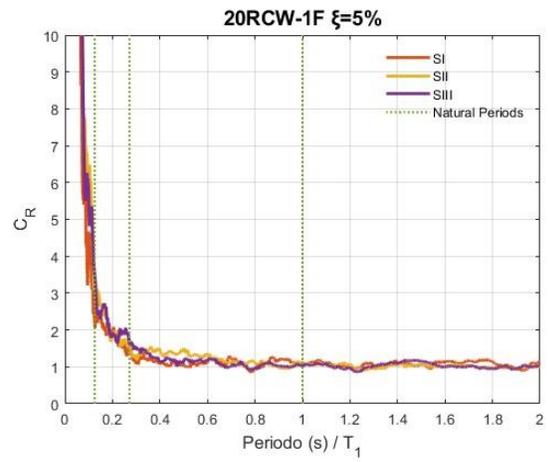
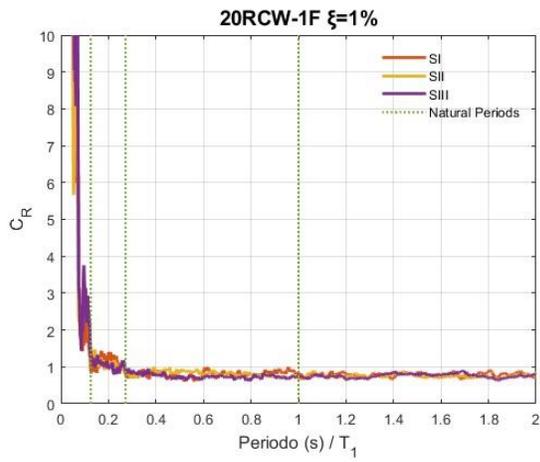
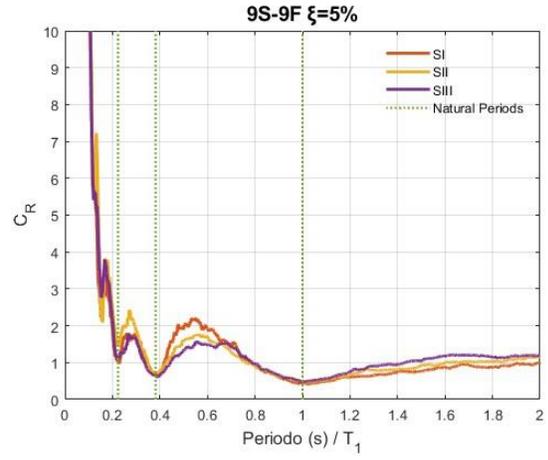
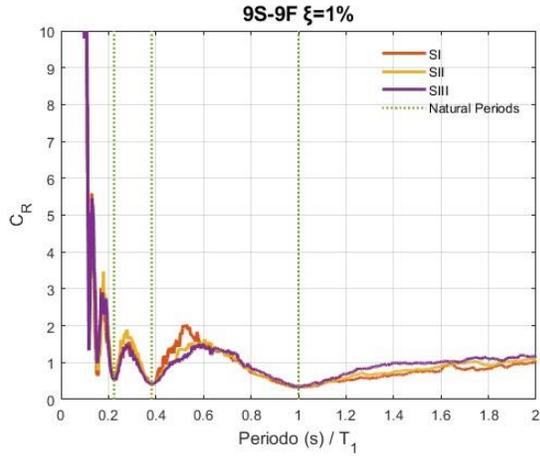
Para intentar explicar esto, es importante que el lector recuerde el sistema de ecuaciones planteado en la metodología para analizar los CNEs, la razón de amortiguamiento (ζ) en la matriz de amortiguamiento influye en cómo el sistema responde a las fuerzas dinámicas. Cuando ζ es bajo, significa que hay menos disipación de energía en el sistema. En el contexto de periodos pequeños y resonancia modal, esto puede traducirse en una mayor respuesta dinámica del sistema. Aunque parece contraintuitivo, un ζ menor puede resultar en menores deformaciones inelásticas en estos escenarios específicos.

La acumulación de energía durante la resonancia puede generar amplitudes de vibración más altas, pero si ζ es bajo, la disipación de esta energía es limitada. Esto podría resultar en una respuesta estructural menos amortiguada y, por ende, en deformaciones inelásticas menores en comparación con situaciones donde ζ es más alto.









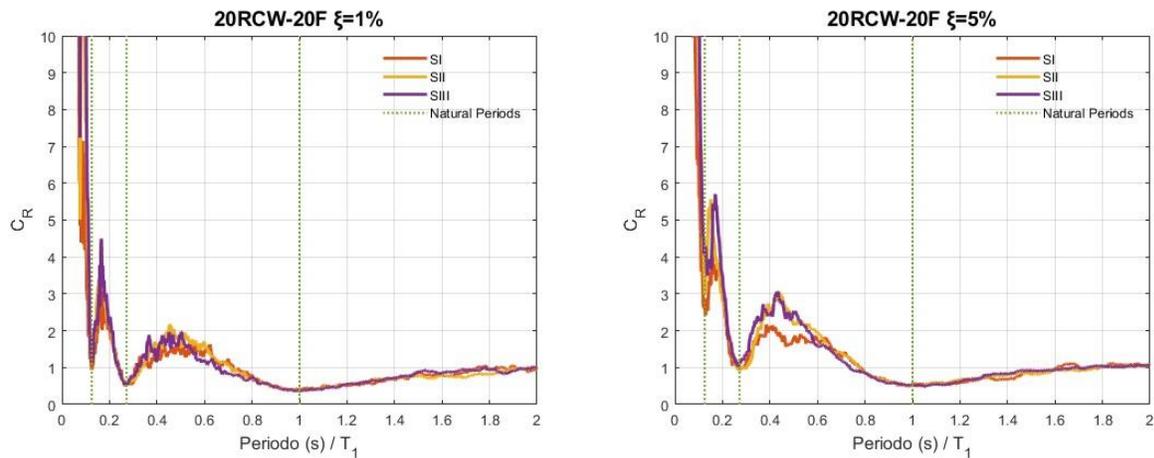


Figure 8. Influencia de la respuesta inelástica de las estructuras en las IDRs de los CNEs, variación del factor de amortiguamiento del CNE considerando un R_p constante de 4.

En las figuras 7 y 8, se puede observar que el efecto de sitio no juega un papel relevante en el comportamiento de las IDRs, existe una pequeña variación en los picos máximos locales para periodos menores al periodo característico, esta variación se debe a la compleja interacción entre la frecuencia natural de la estructura, la frecuencia del sismo y las características del suelo. La frecuencia natural, determinada por la masa y rigidez de la estructura, puede resultar en resonancia si se aproxima a la frecuencia del sismo, amplificando las amplitudes de vibración, especialmente en ciertos pisos con distribuciones específicas de masas y rigideces. La coincidencia de la frecuencia del sismo con alguna frecuencia natural de la estructura puede generar amplificaciones, y diferentes sismos con diversos espectros de frecuencia contribuyen a patrones de respuesta únicos en la estructura. Además, la influencia de las características del suelo, como la amplificación en suelos más rígidos, introduce variaciones espaciales en la respuesta sísmica, causando que pisos sobre suelos diferentes experimenten distintas magnitudes de aceleración. Sin embargo, no se evidencia un cambio crítico causado por el efecto de sitio, el más pronunciado es en el primer piso de la estructura de concreto de 5 niveles.

Los resultados en este estudio permiten validar ecuaciones presentadas en la literatura, las cuales pretenden mediante ecuaciones simples predecir el comportamiento de las IDRs de aceleraciones de piso para valores constantes de R , para esto se usará la ecuación propuesta por Obando y López-García.

$$C_R = 1 + \frac{(R - 1.329)}{0.86R(0.1 + 2T_1)((1 + 0.13T_1)\left(\frac{T_p}{T_1}\right))^{2.4}} \quad [1]$$

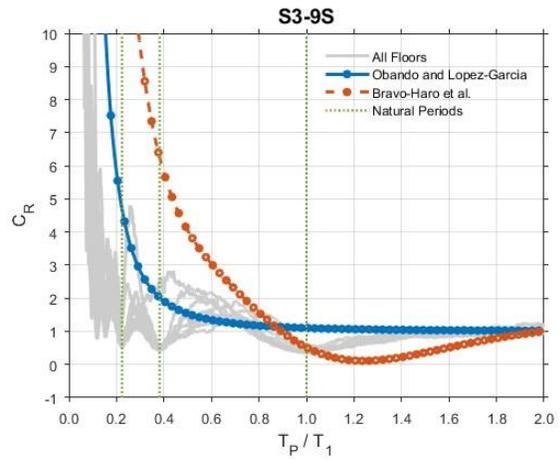
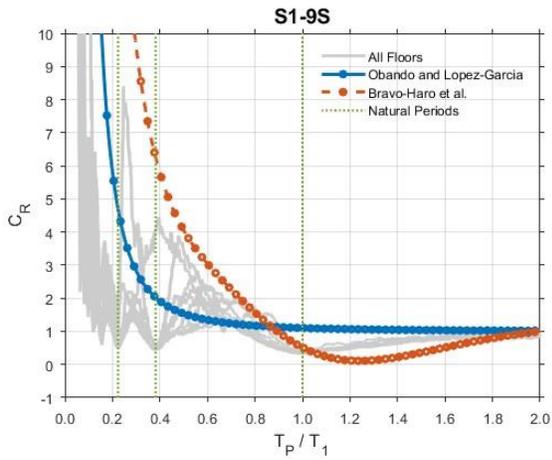
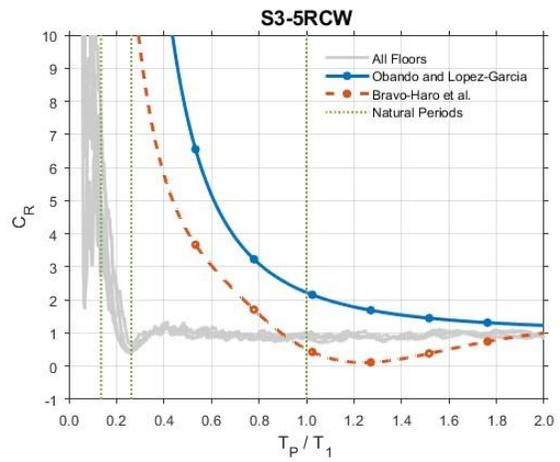
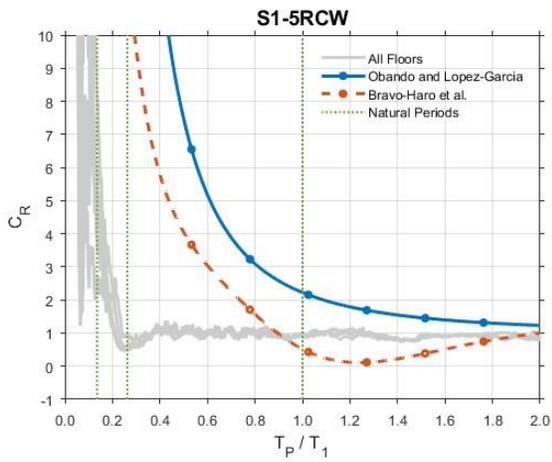
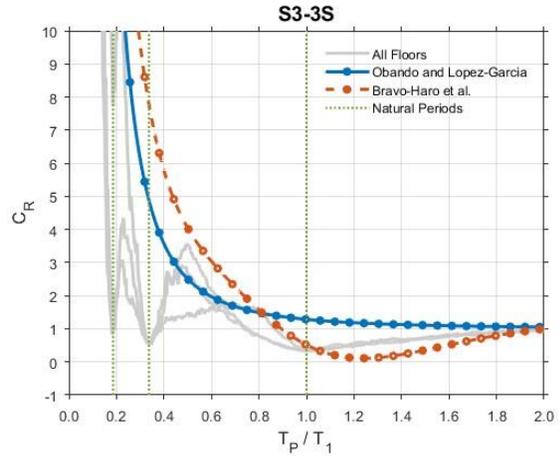
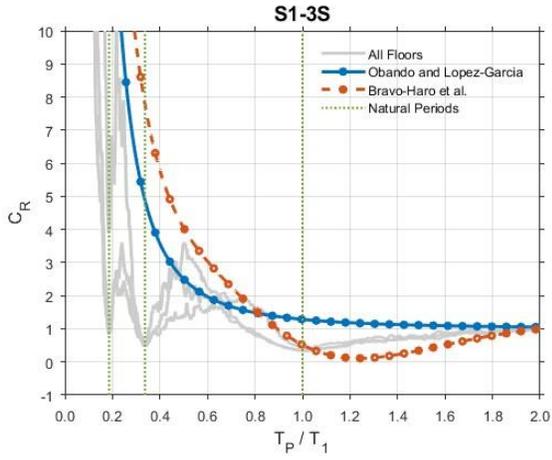
donde T_1 es el período fundamental de la estructura de soporte y T_p es el período del CNE.

El estudio de Obando y López-García fue extendido por Bravo-Haro et al., los cuales propusieron la siguiente ecuación.

$$C_R = a_1 + (R - 1) \left[\frac{1}{a_2 \left(\frac{T_p}{T_1}\right)^2} \right] + a_2 \left(\frac{T_p}{T_1}\right) e^{-4.5\left\{\ln\left(\frac{T_p}{T_1} - 0.005\right)\right\}^2} + a_2 \left(\frac{T_p}{T_1}\right) e^{a_5\left\{\ln\left(\frac{T_p}{T_1} + 0.67\right)\right\}^2} \quad [2]$$

Las constantes, a_1 , a_2 , a_3 , a_4 y a_5 dependen de R , y su valor se puede encontrar en el estudio de Bravo-Haro et al. Aunque ambas ecuaciones se derivaron a partir de información obtenida a nivel de techo y tienen el mismo objetivo de predecir el comportamiento de las IDRs mediante ecuaciones simples, la ecuación de Bravo-Haro et al. tiene en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura de soporte. No busca ofrecer resultados exactos cuando la estructura entra en resonancia en su primer modo. (Obando et al., 2022).

Los valores predictivos obtenidos mediante las ecuaciones se presentan en la Figura 9, donde se pueden identificar varios aspectos esenciales. a) La ecuación 1 muestra una precisión suficiente para estructuras de pocos pisos, exhibiendo un comportamiento conservador para períodos mayores o menores al período característico. Sin embargo, para estructuras de varios pisos, por ejemplo, aquellas con 9 o más pisos de acero y 20 o más pisos de concreto, se observa que la ecuación no es conservadora para valores menores al período característico, aunque presenta un ajuste considerable a las IDRs. b) Por otro lado, la ecuación 2 es más conservadora en períodos menores al período característico, pero para períodos mayores al característico, no muestra la misma conservación en comparación con la ecuación 1.



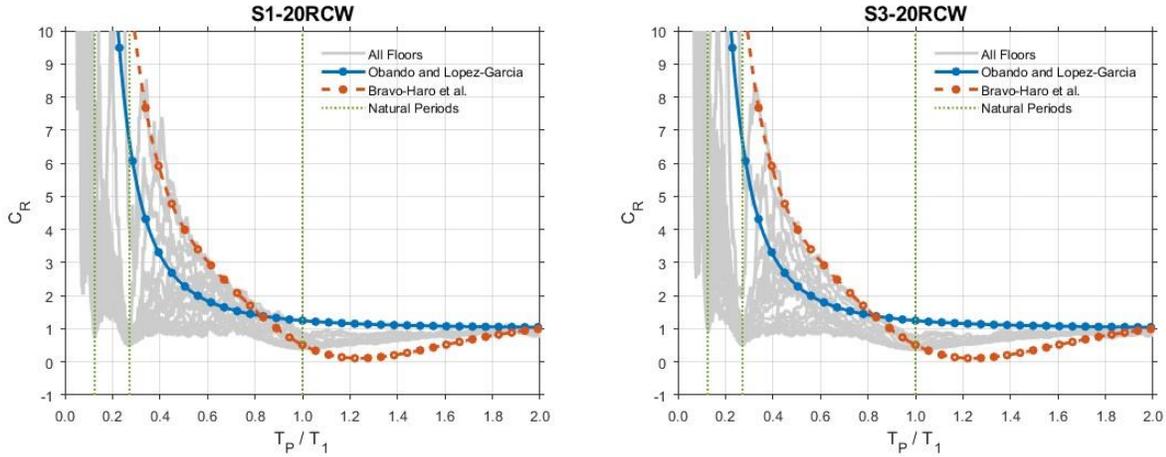


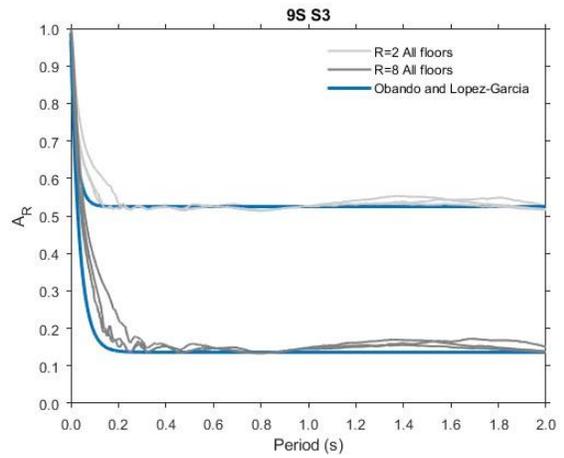
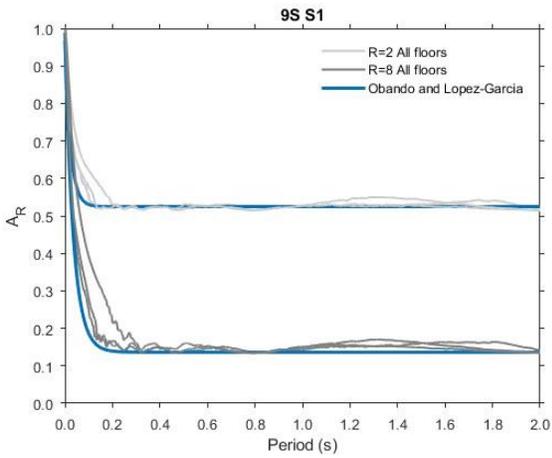
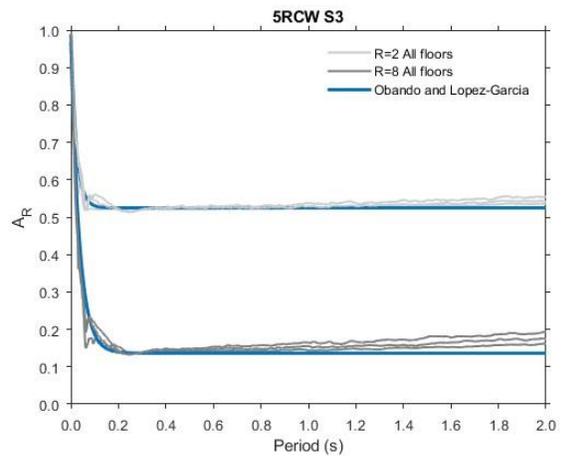
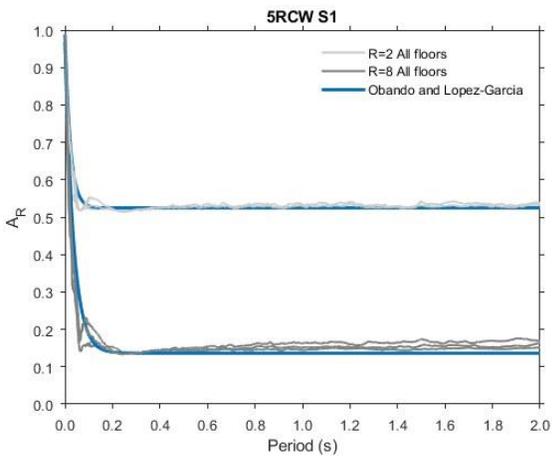
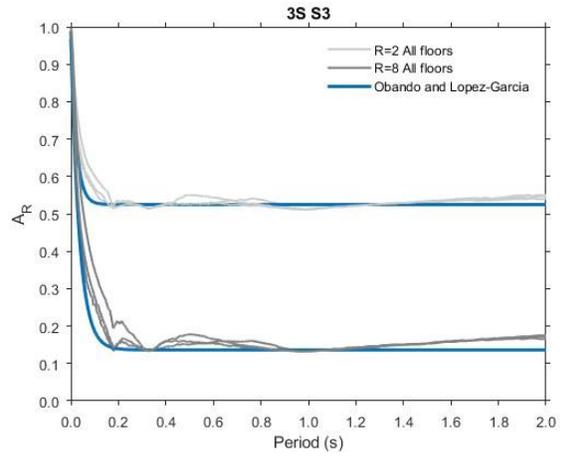
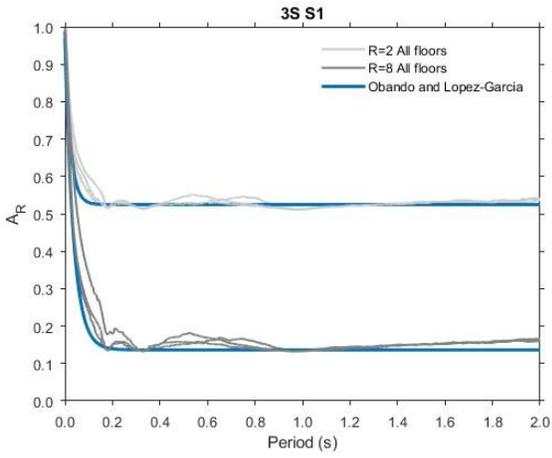
Figure 9. Evaluación de ecuaciones predictivas para los Índices de Demandas Relativas (IDRs) de aceleración del piso.

Como las IDRs no parecen depender del tipo de registro, tal como se evidencio en este artículo, las IDRs dependen directamente de las aceleraciones de piso, y estas dependen de las propiedades dinámicas de la estructura, entonces (Obando et al., 2022) proponen una ecuación simple para predecir los Índices de Demandas Relativas (IDRs) de aceleración en el piso.

$$A_R = \frac{1}{A + BR} + \left(\frac{CR + D}{R + D} \right) e^{\left(\frac{FR+T}{R+H} T_p \right)}$$

Donde T_p es el periodo del componente no estructural, y A,B,C,D,E,F,G,H son constantes cuyos valores fueron obtenidos mediante análisis de regresión las cuales se pueden encontrar en el artículo de (Obando et al., 2022).

En su artículo, los autores dejaron un vacío de conocimiento al no abordar la validez de la ecuación para cualquier tipo de aceleraciones sísmicas. Sin embargo, al examinar la Figura 10, se puede apreciar una comparación entre los valores predichos por la ecuación y aquellos obtenidos mediante simulaciones numéricas. Esta comparación revela una notable concordancia, indicando que la ecuación es efectiva para una amplia gama de aceleraciones sísmicas. Además, se destaca que el efecto del sitio no parece afectar el ajuste de la ecuación propuesta.



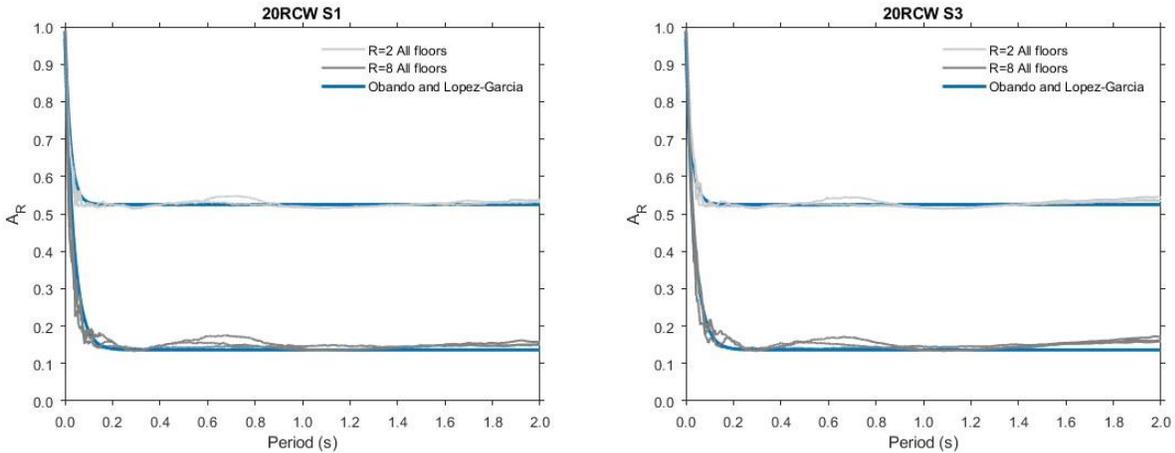


Figure 10. Evaluación de las ecuaciones de predicción considerando todos los pisos de las estructuras y el factor sísmico de diseño.

6 Discusión

La aparente falta de cambios significativos en las Relaciones de Deformación Inelástica (IDRs) de los Componentes No Estructurales (CNEs) a pesar de las variaciones en las aceleraciones de piso para diferentes suelos es un hallazgo que requiere una cuidadosa consideración. Este fenómeno podría atribuirse a diversas razones intrínsecas al modelo y a las características específicas de los CNEs.

En primer lugar, la diferencia en las propiedades de masa entre los CNEs y la estructura principal puede tener un papel destacado. La masa relativamente baja de los CNEs puede significar que su contribución a la respuesta global es limitada, incluso cuando las aceleraciones de piso varían entre diferentes suelos. En consecuencia, la respuesta de los CNEs puede ser más influenciada por las propiedades de masa de la estructura principal que por las variaciones en las condiciones del suelo.

Además, la respuesta no lineal del sistema elasto-plástico, aunque presente en el modelo, puede no manifestarse de manera significativa en las IDRs de los CNEs debido a la relación masa-rigidez relativamente baja de estos componentes. La falta de cambios notorios podría indicar que las propiedades elasto-plásticas introducidas en el modelo pueden no estar siendo plenamente aprovechadas por la naturaleza ligera de los CNEs.

Otra posible explicación podría ser que las características del suelo, a pesar de generar variaciones en las aceleraciones de piso, no afectan sustancialmente la respuesta de los CNEs. Esto

podría deberse a que los CNEs, al ser componentes livianos, son menos sensibles a las variaciones en las propiedades del suelo en comparación con la estructura principal.

En última instancia, este hallazgo sugiere la necesidad de una evaluación más detallada de las interacciones entre los CNEs y las condiciones del suelo. Se podría considerar una revisión de las propiedades y configuraciones específicas del modelo, así como la realización de análisis de sensibilidad para identificar los factores que más influyen en la respuesta de los CNEs. Además, la validación de los resultados con datos experimentales o estudios de campo podría proporcionar una mayor confianza en la interpretación de estos resultados aparentemente contraintuitivos.

7 Conclusiones

Al analizar el impacto del efecto de sitio, se destaca que el período característico de las aceleraciones en el piso coincide con el período fundamental de la estructura (T_1), como respalda la evidencia presente en la literatura. Adicionalmente, se observa que el período característico del suelo (T_c) exhibe variaciones en comparación con los períodos de la estructura, aproximándose a un valor constante de alrededor de 0.5 segundos. Este valor es característico de suelos rígidos, independientemente del registro utilizado, lo que refleja una tendencia consistente en las condiciones analizadas.

Según los resultados obtenidos, parece que las características de las IDR no experimentan cambios sustanciales al considerar el efecto de sitio. Esto sugiere que, para el diseño de los CNEs, la utilización de registros sísmicos de fuente lejana, independientemente del efecto de sitio, no conlleva errores significativos.

Al tener en cuenta el efecto de sitio, se observa que tanto las IDR de aceleración en el piso como las de aceleración en el suelo son prácticamente iguales a la unidad en períodos que superan el período característico (T_1). Este comportamiento se mantiene constante en todos los niveles de piso y en todos los modelos de edificios, sin importar el valor del factor R y ξ . Este fenómeno, ampliamente respaldado por la literatura, señala que no hay cambios evidentes en relación con el efecto de sitio en estas condiciones. Este resultado subraya la consistencia y validez generalizada de las IDR, independientemente de las variaciones en los parámetros mencionados, cuando se considera el impacto del efecto de sitio.

Considerando el efecto de sitio, las IDR de aceleración en el piso exhiben patrones que concuerdan con la literatura de la siguiente manera: a) Las IDR de aceleración en el piso son comparables a las IDR de aceleración del suelo, dado que ambas aumentan en períodos inferiores al período característico. b) Las IDR de aceleración en el piso presentan mínimos locales en los períodos fundamentales de la estructura, a diferencia de las IDR de aceleración del suelo, las cuales aumentan de manera monótona a medida que disminuye el período con respecto al período característico. Estos resultados reflejan la coherencia entre las observaciones del estudio y los patrones descritos en la literatura en relación con el efecto de sitio en las IDR de aceleración en el piso.

Las IDR de aceleración en el piso revelan disparidades notables en períodos inferiores al período característico y en proximidad al período de resonancia modal. Se observa de manera consistente que, independientemente del efecto de sitio, los IDR para $\xi = 2\%$ son sistemáticamente inferiores a los de $\xi = 5\%$. Estos hallazgos se alinean con las expectativas teóricas y refuerzan la influencia significativa del coeficiente de amortiguación (ξ) en las IDR de aceleración en el piso, especialmente en períodos críticos cercanos al período característico y de resonancia modal.

Las ecuaciones predictivas destinadas tanto a anticipar los Índices de Demandas Relativas (IDRs) de aceleración en el piso como a prever el comportamiento de las IDRs de aceleraciones en el piso, cuando se mantienen constantes los valores de R, presentan diferencias en su rendimiento. La ecuación propuesta por Bravo-Hero et al. muestra un ajuste menos preciso para períodos mayores al período característico; sin embargo, se destaca por proporcionar predicciones conservadoras en períodos menores al período característico. Por otro lado, la ecuación de Obando et al. demuestra un buen ajuste para períodos mayores al período característico, aunque puede no ofrecer predicciones conservadoras para períodos menores al mismo. A pesar de estas variaciones, es importante señalar que ambas ecuaciones muestran un comportamiento coherente con los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas, revelando así una notable concordancia en relación con los valores numéricos.

Este estudio ha examinado las IARs con respecto al tipo de registro sísmico y la validez de una ecuación propuesta por Obando et al. (2022). Los resultados sugieren que las IARs no están condicionadas por el tipo de registro, destacando su estrecha relación con las aceleraciones de piso, las cuales, a su vez, se derivan de las propiedades dinámicas de la estructura. La ecuación propuesta, basada en el periodo del componente no estructural, demuestra ser efectiva en una variedad de condiciones sísmicas, respaldada por una comparación detallada con simulaciones numéricas. A pesar de la falta de abordaje explícito sobre la universalidad de la ecuación, la consistencia observada y la aparente insensibilidad al efecto del sitio sugieren su potencial utilidad en el diseño y evaluación de componentes no estructurales en distintos escenarios sísmicos.

8 Referencias

Adam, C., & Fotiu, P. A. (2000). Dynamic analysis of inelastic primary–secondary systems. *Engineering Structures*, 22(1), 58–71.

Anajafi, H., Medina, R. A., & Santini-Bell, E. (2020). Inelastic floor spectra for designing anchored acceleration-sensitive nonstructural components. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(5), 2115–2147.

Aziz, T. S. (2003). Seismic design of secondary systems. In 6th U.S. conference and workshop on lifeline earthquake engineering TCLEE 2003, Long Beach, USA.

Bravo-Haro, M. A., Virreira, J. R., & Elghazouli, A. Y. (2021). Inelastic displacement ratios for nonstructural components in steel framed structures under forward-directivity near-fault strong-ground motion. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(5), 2185–2111.

Chopra, A. K., & Chintanapakdee, C. (2004). Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: Single-degree-of-freedom bilinear systems. *Journal of Structural Engineering*, 130(9), 1309–1319.

Degli Abbati, S., Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2018). Theoretically-based and practice-oriented formulations for the floor spectra evaluation. *Earthquake Structures*, 15(5), 565–581.

Dhakal, R. P., Pourali, A., Tasligedik, A. S., Yeow, T., Baird, A., MacRae, G., et al. (2016). Seismic performance of non-structural components and contents in buildings: an overview of NZ research. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(1), 1–17.

Di Domenico, M., Ricci, P., & Verderame, G. M. (2021). Floor spectra for bare and infilled reinforced concrete frames designed according to Eurocodes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(13), 3577–3601.

Kazantzi, A., Vamvatsikos, D., & Miranda, E. (2018). New approach to the design of acceleration-sensitive non-structural elements in buildings. In 16th European conference on earthquake engineering, Thessaloniki, Greece.

Magliulo, G., Manfredi, G., & Petrone, C. (2015). Seismic demand on light acceleration-sensitive nonstructural components in European reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(8), 1203–1217.

Merino, R. J., Perrone, D., & Filiatrault, A. (2020). Consistent floor response spectra for performance-based seismic design of nonstructural elements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 49(3), 261–284.

Miranda, E., Kazantzi, A., & Vamvatsikos, D. (2018). New approach to the design of acceleration-sensitive non-structural elements in buildings. In 16th European conference on earthquake engineering, Thessaloniki, Greece.

Miranda, E., Mosqueda, G., Retamales, R., & Pekcan, G. (2012). Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(S1), 453–471.

Obando, J. C., Arroyo, O., Lopez-Garcia, D., & Carrillo, J. (2022). Seismic response of acceleration-sensitive nonstructural components in a Thin Lightly-Reinforced Concrete Wall (TLRCW) mid-rise building. *Journal of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.017>

Obando, J. C., & Lopez-Garcia, D. (2018). Inelastic displacement ratios for nonstructural components in multistory buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(3), 569–594. doi:10.1080/13632469.2016.1244131.

Obando, J. C., & Lopez-Garcia, D. (2014). Inelastic deformation ratios for nonstructural components subjected to floor accelerations. Proceedings of the 10th US National Conference on Earthquake Engineering, electronic paper no. 767, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, USA.

Perrone, D., Brunesi, E., Filiatrault, A., & Nascimbene, R. (2020). Probabilistic estimation of floor response spectra in masonry infilled reinforced concrete building portfolio. *Engineering Structures*, 202, 109842.

Petrone, C., Magliulo, G., & Manfredi, G. (2016). Floor response spectra in RC frame structures designed according to Eurocode 8. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(3), 747–767.

Ray Chaudhuri, S., & Villaverde, R. (2008). Effect of building nonlinearity on seismic response of nonstructural components: a parametric study. *Journal of Structural Engineering*, 134(4), 661–670.

Reinoso, E., & Miranda, E. (2005). Estimation of floor acceleration demands in high-rise buildings during earthquakes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 14(2), 107–130.

Sankaranarayanan, R., & Medina, R. A. (2007). Acceleration response modification factors for nonstructural components attached to inelastic moment-resisting frame structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(14), 2189–2210.

Sheng Wang; Hong Hao (2002). Effects of random variations of soil properties on site amplification of seismic ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(7), 551–564. doi:10.1016/s0267-7261(02)00038-6

Surana, M., Pisode, M., Singh, Y., & Lang, D. H. (2018). Effect of URM infills on inelastic floor response of RC frame buildings. *Engineering Structures*, 175, 861–878.

Taghavi, S., & Miranda, E. (2003). Response assessment of nonstructural building elements. Technical Report PEER 2003/05. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.

Villaverde, R. (1997). Seismic design of secondary structures: State of the art. *Journal of Structural Engineering*, 123(8), 1011–1019.

Vukobratovic, V., & Fajfar, P. (2016). A method for the direct estimation of floor acceleration spectra for elastic and inelastic MDOF structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 45(15), 2495–2511.