

**ESTADO DEL ARTE DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE CONEXIONES NO
CONVENCIONALES FUNDACIÓN-COLUMNAS EN PUENTES DE CONCRETO.**

WILLIAN ALFONSO SÁNCHEZ PICÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**ESTADO DEL ARTE DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE CONEXIONES NO
CONVENCIONALES FUNDACIÓN-COLUMNAS EN PUENTES DE CONCRETO**

WILLIAN ALFONSO SÁNCHEZ PICÓN

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Civil**

Director:

JOSÉ MIGUEL BENJUMEA ROYERO

Ingeniero Civil, M.Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

A Dios: quien me guió en cada momento de mi vida

A mi padre William Alfonso, que desde la eternidad se sentirá orgulloso del triunfo que hoy alcanzo.

A mi madre Yasmit, quien me dio la vida

A mi abuela Benedicta, quien me acogió como uno más de sus hijos.

A mi tía Nubia del Carmen, quien con su apoyo incondicional y cariño permitió que esta meta fuera posible.

A mis tías y en especial a Gloria Haydée, quienes siempre se preocuparon por mí y mis hermanos.

A mis hermanos, Yarlay, Jefferson, Jhon, Sildana y Juliana

Al profesor José Benjumea, quien dirigió mi tesis, gracias por guiarme en este trabajo. Le deseo éxitos en su carrera.

En camino por este triunfo, aprendí a valorar a mis amigos y compañeros, quienes junto a mi lucharon por alcanzar la meta, gracias por su apoyo y afecto.

William Sánchez

AGRADECIMIENTOS

No me queda nada más que agradecer al Magíster José Miguel Benjumea Royero por su constante apoyo, paciencia, gestión y tiempo para el desarrollo y culminación de este proyecto. A la Universidad Industrial de Santander quien me formo como ingeniero. A todos ellos gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. JUSTIFICACIÓN	17
1 OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2 CONEXIONES NO CONVENCIONALES FUNDACIÓN COLUMNA EN PUENTES DE CONCRETO.....	20
2.1 CONSTRUCCIÓN ACELERADA DE PUENTES (ABC).....	20
2.1.1 Conexión tipo socket (cs).....	21
2.1.2 Conexiones con acopladores de barras.....	23
2.1.3 Conexiones articulada e híbrida	26
2.1.4 Conexión con ductos de lechada.....	28
2.1.5 Conexión con tecnologías emergentes.....	29
2.1.6 Conexión articulada con tubería estructural.....	31
3 RESULTADOS DE ENSAYOS CÍCLICOS REALIZADOS A LOS MECANISMOS DE CONEXIÓN NO CONVENCIONALES Y A ESTRUCTURAS FABRICADAS TRADICIONALMENTE	33
3.1 PEDESTAL PREFABRICADO (PP).....	35
3.2 ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC)	36
3.3 CHAQUETA DE ACERO (CH)	36
3.4 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS (FRC).....	37

3.5	FIBRAS REFORZADAS CON POLÍMERO (FRP)	37
3.6	CONCRETO REFORZADO CON FIBRA HÍBRIDA (HYFRC)	38
4	EVALUACIÓN DE CONEXIONES NO CONVENCIONALES FUNDACIÓN- COLUMNAS EN PUENTES DE CONCRETO	39
4.1	PARÁMETROS DE EVALUACIÓN NO SÍSMICOS	39
4.1.1	Ahorro de tiempo	40
4.1.2	Costo de fabricación	40
4.1.3	Inspeccionabilidad	41
4.1.4	Reparabilidad.....	41
4.1.5	Durabilidad.....	42
5	NIVEL DE PREPARACIÓN PARA IMPLEMENTACIÓN DE CONEXIONES EN ABC (TRL)	44
5.1	CONEXIONES QUE PODRÍAN SER IMPLEMENTADAS EN COLOMBIA .	45
5.2	NIVEL DE PREPARACIÓN PARA IMPLEMENTACIÓN DE CONEXIONES EN ABC (TRL) EN COLOMBIA.....	46
6	CONCLUSIONES	48
	CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
	BIBLIOGRAFÍA.....	60
	ANEXOS.....	64

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Regiones donde se esperan presencia de rótulas plásticas	15
Figura 2. Tipos de conexiones no convencionales en fundación-columna en ABC.	20
Figura 3. Proceso constructivo CS tipo 1.	21
Figura 4. Proceso constructivo CS tipo 2.	22
Figura 5. Mecanismo de empalme con barras de acople.....	23
Figura 6. Mecanismos de empalme disponibles comercialmente.	24
Figura 7. Disposición típica de barras acopladoras.....	25
Figura 8. Izquierda: mango de lechada con rosca. Derecha: mango de lechada sin rosca.	25
Figura 9. Izquierda: Acopladores con cabeza y rosca sin pedestal prefabricado. Derecha: Acopladores con cabeza y rosca con pedestal.	26
Figura 10. Conexión articulada e híbrida. Diagrama generalizado de histéresis. .	27
Figura 11. Ensamble de elementos prefabricados en una conexión articulada. ...	28
Figura 12. Conexión conductos de lechada.	29
Figura 13. Cojín elastomérico como mecanismo de disipación de energía.	30
Figura 14. Disposición típica zapata-cojín-columna postensada y segmentada. ...	30
Figura 15. Esquema general de la Conexión de pasador de tubería	32
Figura 16. Respuesta ante una excitación de la Conexión de pasador de tubería.	32
Figura 17. Pedestal prefabricado.	36
Figura 18. Chaqueta de acero en la zona de formación de rótula plástica.	37
Figura 19. Chaqueta fabricada a partir de fibras reforzadas con polímeros.....	38

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Pruebas cíclicas realizadas a conexiones no convencionales fundación-columna en puentes de concreto	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. Escala relativa en comparación con CIP	39
Tabla 3. Resumen de calificación de los parámetros sísmicos y no sísmicos.....	43

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PROTOTIPO DE COLUMNAS CON CONEXIONES NO CONVENCIONALES.....	59

RESUMEN

TÍTULO: ESTADO DEL ARTE DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE CONEXIONES NO CONVENCIONALES FUNDACIÓN-COLUMNAS EN PUENTES DE CONCRETO*

AUTOR: WILLIAN ALFONSO SÁNCHEZ PICÓN **

PALABRAS CLAVES: Construcción acelerada de puentes, no convencionales, conexiones, fundación, columnas.

DESCRIPCIÓN:

Este artículo presenta un resumen de las conexiones no convencionales fundación-columna en puentes de concreto que están siendo utilizadas en la construcción in-situ y acelerada de puentes (ABC) y que mejoran el comportamiento sísmico de la estructura. Enfocándose en el análisis sísmico y la descripción de los mecanismos de funcionamiento de las conexiones. Se presenta una tabla que resume la comparación de pruebas realizadas a columnas con conexiones no convencionales en contraste con columnas construidas tradicionalmente, en aspectos como: tipo de conexión, deriva máxima alcanzada, deriva residual y el daño observado. Se describen componentes y materiales que mejoran el comportamiento sísmico y fueron utilizados en los especímenes de prueba. Además, con el fin de determinar la posible aplicación en Colombia de las conexiones no convencionales analizadas, se contrastan los tipos de conexiones en comparación con una construida tradicionalmente en aspectos como: rendimiento sísmico, ahorro de tiempo, costos, inspeccionabilidad, reparación postterremoto y durabilidad. En todos los casos siempre se compara con una estructura construida convencionalmente. A partir de estudios realizados a conexiones no convencionales en Colombia se propone un nivel de preparación para la implementación (TLR) en zona de amenaza sísmica alta de la conexión ductos de lechada, con el fin de tener un punto de partida en la transición de la construcción tradicional a construcción acelerada de puentes.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: M.Sc. José Miguel Benjumea Royero, Ingeniero Civil, M.Sc.

ABSTRACT

TITLE: STATE OF THE ART OF SEISMIC BEHAVIOR OF CONNECTIONS UNCONVENTIONAL-COLUMNS FOUNDATION IN CONCRETE BRIDGES.*

AUTHOR: WILLIAN ALFONSO SANCHEZ PICON **

KEY WORDS: Accelerated bridge construction, non-conventional, connections, foundation, columns.

DESCRIPTION:

This article presents a summary of the non-conventional foundation-column connections in concrete bridges that are being used in the construction cast in place and accelerated bridge (ABC) that improve the seismic performance of the structure. Focusing on seismic analysis and description of the mechanisms of connections performance. It presents a table that summarizes the comparison of tests performed to connections in contrast with columns built conventionally, in aspects such as: type of connection, maximum drift reached, residual drift and observed damage. Components and materials that improve the seismic performance are described and were used in the test specimens. In addition, in order to determine the possible application in Colombia of the analyzed connections, it analyzes the types of connections in aspects such as: seismic performance, time saving, costs, inspectability, post-earthquake repair and durability. In all cases it is always compared to a conventionally built structure. From studies of non-conventional connections in Colombia, it proposes a readiness level (TRL) for the implementation of the connection, is proposed in an area of high seismic hazard of grout duct in order to have a starting point in the transition from traditional construction to accelerate bridge construction.

* Bachelor Thesis

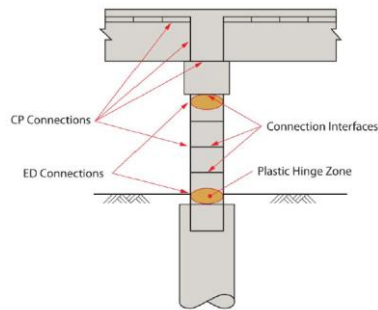
** Faculty of Physical Engineering – Mechanical. School of Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero, Civil Engineer, M.Sc.

INTRODUCCIÓN

Los puentes son una parte fundamental para la movilidad y el desarrollo de un país, ya que son el medio que interconecta los puntos entre los diferentes entramados de una red vial, permitiendo así el intercambio de bienes de un lugar a otro. Los puentes son estructuras vulnerables a fenómenos sísmicos, por lo tanto, es importante desarrollar medidas que ayuden a mitigar los posibles riesgos y consecuencias del daño sísmico [1]. Posterior a un fuerte terremoto existe la posibilidad de que los componentes estructurales del puente se vean comprometidos en gran medida, aumentando así costos directos asociados con la reparación y los costos indirectos asociados con el tiempo de inactividad [2] o, en el caso extremo, reemplazo total de la estructura, generando inconvenientes colaterales como problemas en el tráfico, pérdidas económicas y dificultad de acceso del personal de ayuda.

Generalmente, los componentes estructurales afectados por fuertes terremotos son las zonas donde se interconectan las columnas con la zapata, y las viga [3], lugar donde se espera la formación de rótulas plásticas, ver **Figura 1**, y donde se observan los mayores daños estructurales. Las columnas de puentes construidas de forma tradicional (unión monolítica zapata-columna), sufren fallas causadas por sismos debido a la insuficiencia en la capacidad de deformación de sus elementos para absorber la gran demanda de energía en estas zonas. Los puentes diseñados de forma tradicional se basan en la formación de rótulas plásticas en las columnas del puente como un medio para disipar la energía sísmica (AASHTO, 2009). Sin embargo, las rótulas plásticas implican el desarrollo de daño significativo dentro de esta región [4].

Figura 1. Regiones donde se esperan presencia de rótulas plásticas



Fuente: [5]

Se han encontrado miles de puentes en los Estados Unidos y en todo el mundo que no cumplen con los estándares de diseños actuales [6] y se clasifican como estructuras deficientes o funcionamiento obsoletos [4]. Además, muchos de estos puentes se encuentran en zonas de amenaza sísmica moderada a alta. Debido a este grave problema, las nuevas generaciones de puentes, además de proporcionar alto desempeño sísmico, deben contar con una rápida construcción y cumplir con los siguientes criterios: “incorporación de técnicas innovadoras en metodologías y materiales para reducir eficazmente el tiempo de construcción y la interrupción del tráfico; un mayor nivel de seguridad en obra y para los viajeros, e implementación de procedimientos amigables con el medio ambiente” [7].

Actualmente existen diferentes mecanismos de conexiones no convencionales que interconectan los diferentes elementos de una columna de puente fabricada en concreto; dichas conexiones deben ser fáciles de construir y suficientemente robustas, con el fin de mantener la integridad de la columna durante un evento sísmico y posterior a este. Las conexiones deben ser íntegras y garantizar un rendimiento dúctil en las posibles zonas de plastificación [3].

Este documento se enfoca en el rendimiento sísmico de conexiones no convencionales subestructura-columna, conexiones que mejoran el rendimiento sísmico [2, 6] y permiten una rápida construcción, es por esto que estas conexiones se convierten en una alternativa viable para la fabricación de estructuras de puentes.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en el capítulo dos, se presenta una lista de conexiones no convencionales con la descripción de su mecanismo de funcionamiento. En el tercer capítulo se presentan un resumen de pruebas sísmicas realizadas a conexiones no convencionales, resaltando resultados tales como, tipo de conexión, deriva máxima alcanzada, deriva residual y el daño observado. En el cuarto capítulo las conexiones son evaluadas en contraste con estructuras construidas convencionalmente y se comparan en aspectos sísmicos y no sísmicos. En el quinto capítulo se presenta un nivel de preparación para la implementación en Colombia de la conexión de ductos de lechada. Y por último, en el capítulo seis se presentan las conclusiones del análisis.

1. JUSTIFICACIÓN

Las columnas de puentes construidas de forma tradicional (unión monolítica zapata-columna) sufren fallas causadas por sismo debido a la insuficiencia en la capacidad de deformación de sus elementos para absorber la gran demanda de energía (deriva residual alta). En consecuencia, los puentes son estructuras altamente vulnerables a eventos de gran intensidad y pueden verse afectados con graves daños estructurales, generando inconvenientes colaterales como: problemas en el tráfico, pérdidas económicas y dificultad de acceso del personal de ayuda.

Actualmente existen diferentes mecanismos de conexiones no convencionales que interconectan los diferentes elementos de una columna de puente fabricada en concreto; dichas conexiones deben ser fáciles de construir y suficientemente robustas, con el fin de mantener la integridad de la columna durante un evento sísmico y posterior a este. Las conexiones deben ser íntegras y garantizar un rendimiento dúctil en las posibles zonas de plastificación (en estas zonas es donde se esperan los mayores daño estructurales).

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la pregunta principal de investigación: ¿qué mecanismos no convencionales de transmisión de fuerzas y disipación de energía en conexiones fundación-columnas en puentes de concreto reforzada están siendo investigadas e implementadas? Además, se plantean la siguiente pregunta subordinada a la principal: ¿qué mecanismo de conexiones podrían ser implementados en nuestro medio?

Ya que en Colombia el 50% de la población se encuentra en zonas de amenaza sísmica alta, se hace necesario la implementación de nuevas tecnologías que

mitiguen el impacto de estos movimientos. Algunas de las conexiones no convencionales fundación-columnas en puentes de concreto podrían ser implementadas en nuestra nación. Por lo tanto, con este proyecto se busca identificar y clasificar dichas conexiones con el fin de dar a conocer e interesar a nuestros ingenieros de diferentes mecanismos de conexiones no convencionales que ofrecen una mayor disipación de energía y que están siendo estudiados e implementados en diferentes partes del mundo.

2. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar los mecanismos de transmisión de fuerzas y disipación de energía que actualmente se emplean en conexiones fundación-columnas en puentes de concreto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

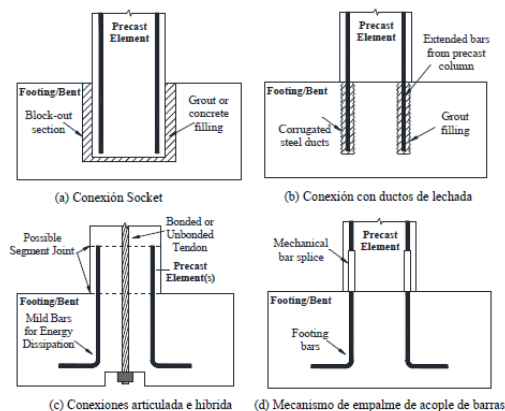
- Clasificar los mecanismos de transmisión de fuerzas y disipación de energía que actualmente se emplean en conexiones no convencionales fundación-columnas en puentes de concreto.
- Contrastar el comportamiento sísmico de los sistemas de conexiones no convencionales detectados.
- Identificar posibles conexiones que puedan ser implementadas en construcciones en columnas de concreto de puentes en Colombia.

3. CONEXIONES NO CONVENCIONALES FUNDACIÓN COLUMNA EN Puentes DE CONCRETO

1.3 CONSTRUCCIÓN ACELERADA DE PUENTES (ABC)

Se refiere al diseño y construcción con métodos innovadores y materiales de alto rendimiento con el fin de reducir el tiempo de la ejecución de la construcción de uno o un grupo de proyectos de puentes, para así mejorar la rentabilidad y disminuir el impacto en el tráfico en un periodo de construcción más corto [8, 9]; proporcionando los siguientes beneficios: “(1) una mayor calidad de la construcción de elementos estructurales a causa de la fabricación en las plantas, (2) los materiales más duraderos debido al curado más apropiado en las plantas de fabricación, (3) la ejecución concurrente de diferentes tareas, (4) la reducción de la interrupción del tráfico y menos riesgo para el viajero y el personal en construcción, y (5) la reducción de efectos directos e indirectos sobre el medio ambiente, debido a la construcción acelerada y el uso de tecnologías más eficientes que requieren menos energía [10]”. La **Figura 2** muestra un resumen de las conexiones más utilizadas en ABC.

Figura 2. Tipos de conexiones no convencionales en fundación-columna en ABC.

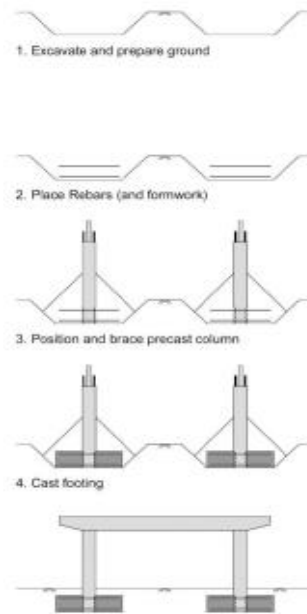


. Fuente: adaptación [11]

1.3.1 Conexión tipo socket (cs)

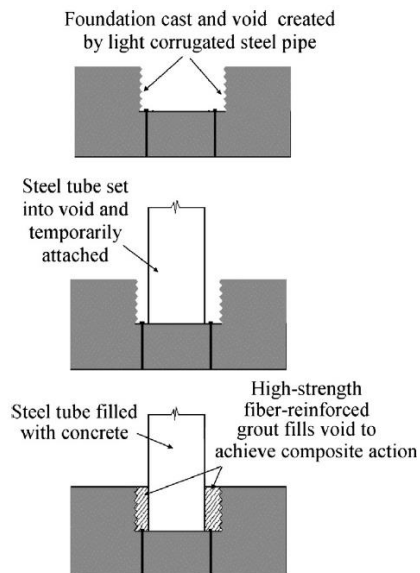
Existen dos formas para acelerar la construcción de columnas de concreto utilizando CS: la primera consta de fabricar la columna en planta para posteriormente ser llevada al lugar de su ubicación definitiva y finalmente ser fundida la zapata a su alrededor como se ilustra en la **Figura 3**. Este sistema ahorra tiempo de construcción en el sitio, ya que el tiempo de construcción y fundida de la zapata es menor que el de la fabricación de la columna. Las barras longitudinales de la columna son rectas y se terminan con anclajes mecánicos. Esta disposición mejora la construcción, ya que no hay barras que crucen la interfaz entre la columna-zapata y proporciona una mejor transferencia de fuerzas en la región de la conexión que no es posible con barras longitudinales ancladas convencionalmente. La superficie de la columna en el área de contacto con la zapata es rugosa para mejorar la adherencia al hormigón circundante, por lo que la resistencia a las cargas verticales es soportada por fricción. La segunda opción consta de la prefabricación de los dos elementos, donde la columna es embebida en la zapata. La zapata debe proporcionar una abertura mayor a la de la columna (esta abertura según especificaciones de diseño) para que posteriormente el volumen restante sea llenado con concreto o lechada de alta resistencia formando así un solo elemento, ver **Figura 4**.

Figura 3. Proceso constructivo CS tipo 1.



Fuente: [5]

Figura 4. Proceso constructivo CS tipo 2.

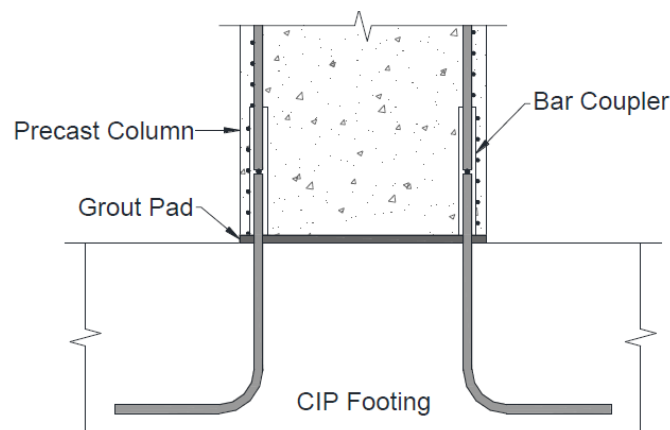


Fuente: [12]

1.3.2 Conexiones con acopladores de barras

Son mecanismos que se utilizan para empalmar el acero longitudinal de refuerzo que sobresale de dos segmentos estructurales, uno de estos dos prefabricado, con el fin de acortar la longitud de traslapeo entre barras de una estructura de concreto reforzado. La **Figura 5** muestra un esquema de la utilización del mecanismo de empalme para el acople de barra utilizado en la interfaz zapata columna.

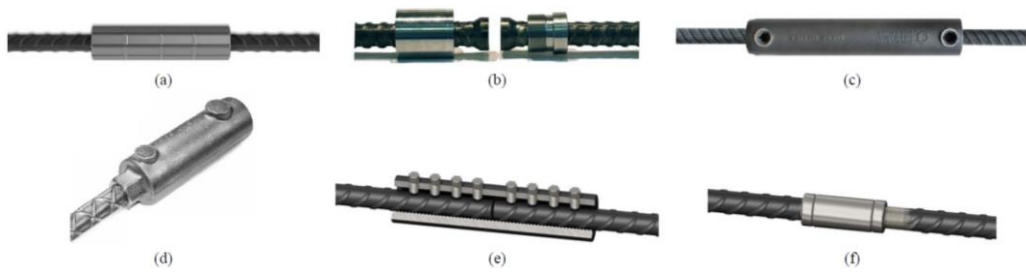
Figura 5. Mecanismo de empalme con barras de acople.



Fuente: [13]

Existen diferentes mecanismos de empalme para barras longitudinales que están disponibles comercialmente y se ilustran en la **Figura 6**. Este artículo se centra en los mecanismos de empalme con barras de acople tales como: barras de acople con cabeza y rosca (b), mangos de lechada (c) y de acople con rosca (d), ya que estos son los más utilizados en ABC.

Figura 6. Mecanismos de empalme disponibles comercialmente.

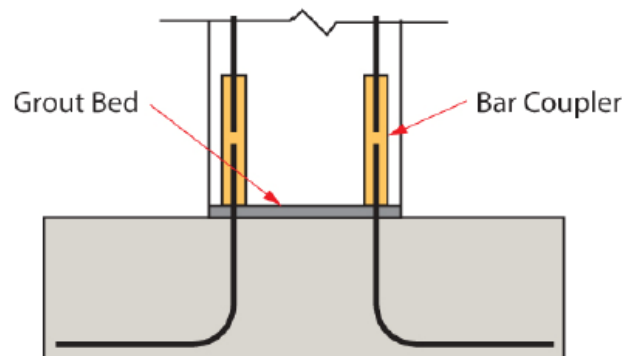


Fuente: [13]

2.1.2.1. Mangos de lechada

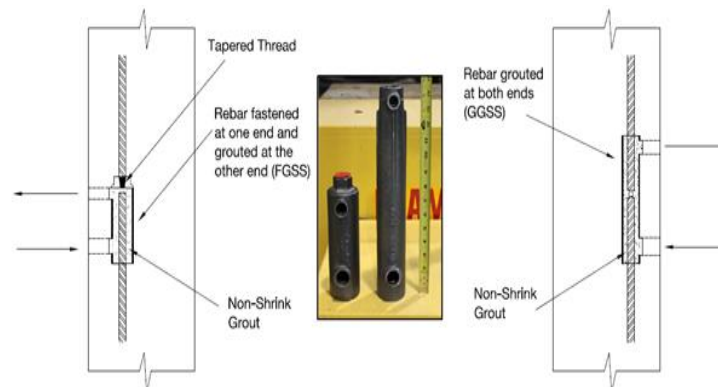
Consta de un mango de acero que se llena con cemento o lechada de alta resistencia después de que la columna se ha ensamblada con la zapata, ver **Figura 7**. Este método permite un rápido ensamble in situ, ya que la columna puede ser construida en planta por separado de la zapata. Existen dos formas de hacer este tipo conexión: la primera forma consta en enroscar uno de los extremos de la barra al mango (rosca cónica) de empalme y su extremo homologo es sellado con cemento o lechada dentro del mango de acero, ver **Figura 8-izquierda**. En la segunda forma de conexión, las dos barras son empalmadas dentro del mango y posteriormente es inyectado el cemento o lechada para hacer la unión, ver **Figura 8-derecha**. En estos dos casos el mango de acero cuenta con dos aberturas adicionales, el orificio inferior, que es la vía por donde es inyectado el cemento o lechada, con el fin de que la pasta fluya y ascienda llenando así los espacios vacíos para que posteriormente la pasta restante sea expulsada por el orificio superior. Este tipo de inyección garantiza que todo el interior del mango sea llenado con cemento o lechada y que los esfuerzos sean transmitidos a la zapata.

Figura 7. Disposición típica de barras acopladoras.



Fuente: [5]

Figura 8. Izquierda: mango de lechada con rosca. Derecha: mango de lechada sin rosca.



Fuente: [7]

2.1.2.2. Acopladores con cabeza y rosca

Los aceros longitudinales de refuerzo a empalmar cuentan con una cabeza en cada extremo y una pieza de acoplamiento roscada mantiene las barras juntas y sirven como guía para mantener los aceros en el eje longitudinal como se ilustra en la

Figura 9. Izquierda: Acopladores con cabeza y rosca sin pedestal prefabricado. Derecha: Acopladores con cabeza y rosca con pedestal.



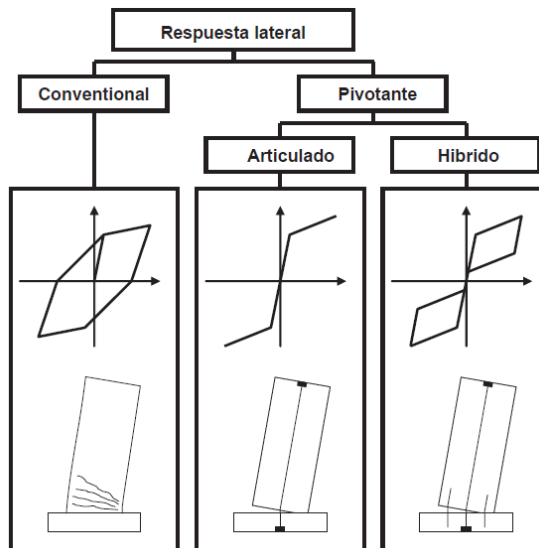
Fuente:[3]

1.3.3 Conexiones articulada e híbrida

La conexión articulada consta de un tendón o barra pretensada no adherida, que cumple la función de unir los elementos prefabricados de la subestructura con la súper estructura mediante una fuerza de pretensado. Los sistemas de tendones no adheridos son diseñados para permanecer principalmente elásticos ante cargas últimas (éste sistema produce una respuesta elástica no lineal) conservando así su fuerza efectiva de pretensado después de cargas cíclicas, permitiendo que el comportamiento plástico sea muy pequeño y, por consiguiente, desplazamientos residuales mínimos. Por lo tanto, después de un fuerte terremoto, los tendones no necesitan ser reemplazados pero la tensión debe ser revisada [1]. En resumen, la columna responderá de forma pivotante con auto centrado ante una excitación como forma de disipación de energía. Las conexiones híbridas son similares a las conexiones articuladas, pero incluyen disipadores de energía en la zona pivotante. El término híbrido describe la unión de dos materiales donde cada uno proporciona un beneficio para el desempeño sísmico. Las propiedades de la conexión articulada se conservan y se adicionan a la capacidad de disipación de energía, reduciendo al

mínimo los desplazamientos residuales. La **Figura 10** describe los diagramas de histéresis para la conexión articulada e híbrida.

Figura 10. Conexión articulada e híbrida. Diagrama generalizado de histéresis.



fuentes: [4].

El sistema de conexión articulada e híbrida reduce el trabajo y el tiempo para la construcción in situ del sistema prefabricado, ya que permite la posibilidad de conectar la columna con la zapata o segmentar la columna en múltiples unidades que pueden o no incorporar refuerzo como se ilustra en la **Figura 11**.

Figura 11. Ensamble de elementos prefabricados en una conexión articulada.

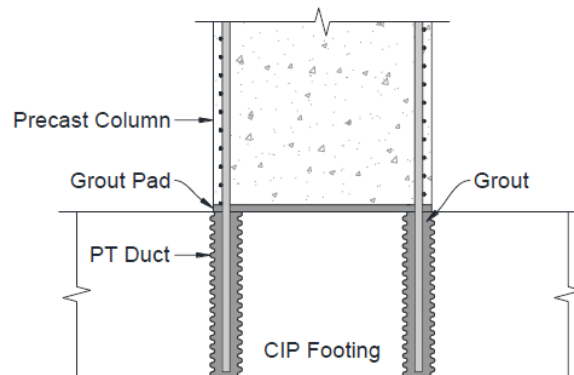


Fuente: [14]

1.3.4 Conexión con ductos de lechada

En este sistema, las barras de refuerzo longitudinal que se extienden hacia afuera de la columna prefabricadas, se conectan a la zapata en conductos individuales dentro de esta como ilustra la **Figura 12**, para posteriormente llenar los conductos con una lechada o un cemento de alta resistencia [5]. La lechada se endurece anclando así el acero de refuerzo longitudinal de la columna en la zapata. La fuerza soportada por el acero es transmitida al hormigón circundante y este a su vez a todos los componentes de la zapata. Los conductos generalmente están hechos de acero galvanizado y corrugados en su interior para mejorar la adherencia.

Figura 12. Conexión conductos de lechada.



Fuente: [13]

1.3.5 Conexión con tecnologías emergentes

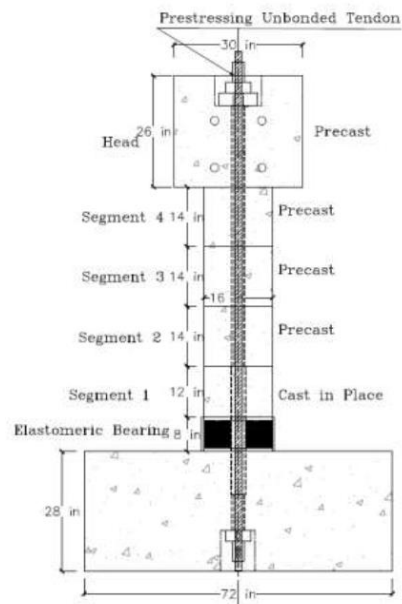
Se denominan tecnologías emergentes ya que están en una temprana etapa de desarrollo, pero ofrecen una solución viable y rápida en la integración de elementos prefabricados. A fin de mejorar el comportamiento sísmico y la rápida construcción de las columnas con elementos prefabricados, se estudian tecnologías y materiales no convencionales que ofrecen características nuevas. Una de estas conexiones emergentes son los materiales elastoméricos, **Figura 13**, capaces de soportar grandes deformaciones y recuperar gran parte de esta. Se utilizan como cojines entre la conexión zapata-columna, **Figura 14**, con el fin de proporcionar una región de alta deformación reduciendo así el momento transmitido entre estos dos elementos. Las columnas que utilizan este tipo de conexión deben ser postensadas con tendones no adheridos con el fin de unir la zapata-cojín-columna. Este tipo de conexión proporciona altas disipaciones de energía, que se traducen en pequeños daños en la zona de rótula plástica y derivas residuales mínimas por las propiedades de recentrado del postensado [15].

Figura 13. Cojín elastomérico como mecanismo de disipación de energía.



Fuente: [15]

Figura 14. Disposición típica zapata-cojín-columna postensada y segmentada.

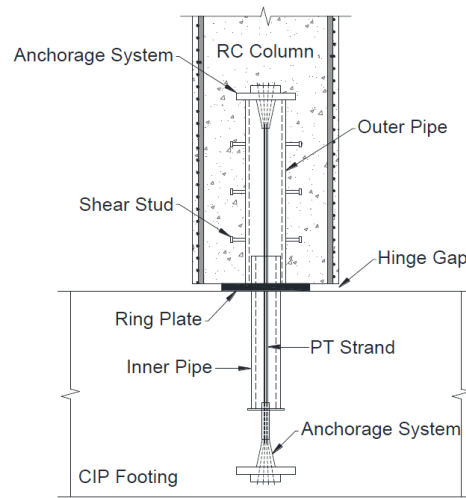


Fuente: [15]

1.3.6 Conexión articulada con tubería estructural

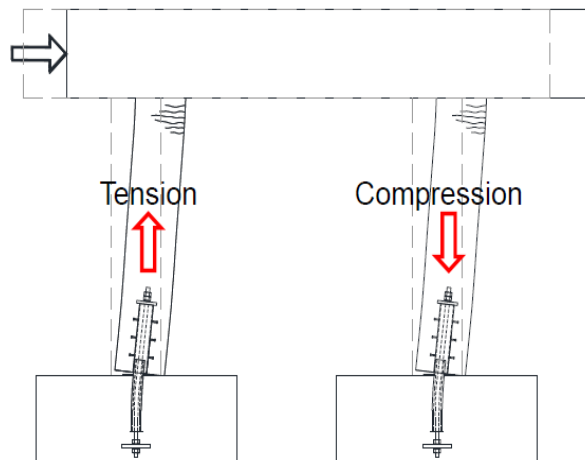
Este tipo de conexión es considerada también una conexión articulada [10]. Consta de dos tubos de acero; uno de ellos debe estar incrustado en la zapata en dirección al eje de la columna (tubo interior) y el segundo tubo se incrusta en la columna (tubo exterior); el tubo interior sobresale de la columna para ser extendido dentro del tubo exterior. La **figura 15** muestra un esquema de la disposición de las tuberías. La fuerza cortante de la columna se transfiere a la zapata a través del contacto entre los tubos y la fricción en la interfaz zapata-columna. Tras una excitación sísmica la fuerza de tensión, ver **Figura 16**, será soportada por un tendón o una varilla roscada de acero postensado de alta resistencia que atraviesa el interior de los tubos que están anclados a los extremos de la columna y la zapata. Con el fin de que la columna pueda pivotar y tenga un espacio entre estos dos elementos, se dispone de una placa de anillos de acero o un apoyo de caucho, que además contribuye a transmitir la fuerza de compresión a la zapata [16]. El mecanismo de transmisión de fuerza entre la columna y el tubo exterior son conectores de cortante soldados a la superficie del tubo que anclan estos dos elementos. Este tipo de conexión está diseñado para eliminar o transferir el mínimo momento a la zapata con el fin de que la estructura permanezca elástica ante un fuerte terremoto y reducir las deformaciones residuales [10].

Figura 15. Esquema general de la Conexión de pasador de tubería



Fuente: [13]

Figura 16. Respuesta ante una excitación de la Conexión de pasador de tubería.



Fuente: [17]

4. RESULTADOS DE ENSAYOS CÍCLICOS REALIZADOS A LOS MECANISMOS DE CONEXIÓN NO CONVENCIONALES Y A ESTRUCTURAS FABRICADAS TRADICIONALMENTE

La **Tabla 1** muestra un resumen de columnas de puentes en concreto con conexiones no convencionales en la interfaz zapata y columna, ensayadas bajo cargas sísmicas. Algunos autores realizaron ensayos en conjunto con estructuras fabricadas tradicionalmente con el fin tener un parámetro de comparación. Ésta recopilación sintetiza el estudio realizado por diferentes autores en distintos lugares del mundo, con el fin de hacer un paralelo con sus homólogas fabricadas in situ. En el **Anexo I** se describe el tipo de conexión utilizado, con una imagen represen de la columna prototipo y la curva de desempeño. La **Tabla 1** ilustra los resultados obtenidos bajo diferentes tipos de ensayos, materiales empleados, sección transversal, tipo de conexión entre la zapata y columna, deriva máxima alcanzada, deriva residual y el tipo de daño observado al terminar la prueba.

Tabla 1. Pruebas cíclicas realizadas a conexiones no convencionales fundación-columna en puentes de concreto

Referencia	Tipo de prueba	Espécimen de Prueba	Sección Transversal (mm)	Interfaz Zapata-Columna	Deriva Máxima %	Deriva residual %	Daño
Mander and Cheng [2] (1997)	Uniaxial estático	CR, EPRE, PT	CU,610	PT	4.5	< 0.5	Presencia de grietas inducidas por flexión.
		CR, EPRE		Almohadilla de goma	4.5	< 0.5	
Hewes and Priestley [18] (2002)	Uniaxial estático	CR, S, CH, PT	C, 610	PT	6	< 0.5	Astillamiento del concreto por arriba y debajo de la chaqueta.
Billington and Yoon [1] (2004)	Uniaxial estático	CR, S	CU, 200	PT	16	2	Astillamiento del concreto de recubrimiento
		CR, S, FRC				1	Presencia de grietas inducidas por flexión.
		CR, S, FRC				1	
Chou and Chen [14] (2006)	Uniaxial estático	CR, S, CH,	C, 500	PT, HY	6	<0.5	Aplastamiento menor de la chaqueta de acero
		CR, S, CH, DEE				0.6	

Referencia	Tipo de prueba	Espécimen de Prueba	Sección Transversal (mm)	Interfaz Zapata-Columna	Deriva Máxima %	Deriva residual %	Daño
Palermo, et al. [19] (2007)	Uniaxial estático	CR	CU, 350	PT	4.5		Presencia de grietas inducidas por flexión.
		CR, M			3.5	<0.5	
		CR, M			4	<0.5	
		CR, M, DEI no adherido			3	1.4	
		CR, M, DEI no adherido			3.5	0.9	
Jeong, et al. [20] (2008)	Biaxial dinámico	CR	C, 406	HY			Astillamiento del concreto de recubrimiento, pandeo barras de refuerzo.
		CR, M, DEI adheridos			13.2	4.4	
		CR, M, DEI adheridos			10.7	2.1	
		CR, M, DEI no adheridos			11.1	2.3	
		CR, M, DEI no adheridos, CH			10	0.9	
Yamashita and Sanders [21] (2009)	Uniaxial dinámico	CR, S, H	R, 457*1016	PT	9.7	<0.5	Presencia de grietas inducidas por flexión, falla del anclaje.
Marriott, et al. [22] (2009)	Uniaxial estático	CR	CU, 350	PT, HY	3.5		Presencia de grietas inducidas por flexión, fractura de disipadores de energía
		CR, M				<0.5	
		CR, M, DEE				<0.5	
		CR, M, DEE				<0.5	
Solberg, et al. [23] (2009)	Biaxial estático	CRF, M, DEI no adherido	CU, 500	HY	4	<5	Presencia de grietas inducidas por flexión.
ElGawady, et al. [24] (2010)	Uniaxial estático	CR	C, 203	PT	15.3	11.96	Aplastamiento del acero de la chaqueta.
		CR, M, FRP			15.3	2.52	
		CR, S, FRP			15.4	6.73	
		CR, S, FRP, Neopreno			15.4	2.92	
		CR, S, FRP, DEE			15.3	3.31	
Guerrini and Restrepo [25] (2013)	Triaxial dinámico	CR, M, H, CH, DEI no adheridos	C, 406	Emergente, almohadilla de poliuretano	8.5	<0.5	Agrietamiento menor de mortero en la base; pandeo y la fractura de disipadores
Haraldsson, et al. [5] (2013)	Triaxial dinámico	HYFRC, M, DEI adheridos	O 406	Socket, HY	7.2	1.4	Pandeo y fractura de las barras longitudinales
Haber [3] (2013)	Uniaxial estático	CR, CIP, M	C, 610	Acopladores con cabeza y rosca	10		Daño en el núcleo confinado del hormigón.
		CR, PFBCD			10		
		CR, EPRE			6		
		CR, EPRE, PP			6		
Trono, et al. [26] (2014)	Triaxial dinámico	CR	C, 406	PT	10.8	0.9	Agrietamiento del recubrimiento del concreto inducido por compresión
		HYFRC, S			8.8	6.8	Fractura de las barras longitudinales no unidas

Referencia	Tipo de prueba	Espécimen de Prueba	Sección Transversal (mm)	Interfaz Zapata-Columna	Deriva Máxima %	Deriva residual %	Daño
Sideris, et al. [6] (2014)	Uniaxial estático	CR, S, H 635	CU, 330	PT	14.9	<0.5	Trituración de concreto se observó en la articulación inferior.
Motaref, et al. [27] (2014)	Uniaxial estático	CR	C, 406	PT	10	<0.5	Presencia de grietas inducidas por flexión.
		CR, S, Caucho		PT, almohadilla de goma		2.9	
		CR, S, FRP		PT		<0.5	
		CR, S, ECC		PT		1	
		CR, S, FRP		PT		1.8	
Stanton, et al. [28] (2014)	Uniaxial estático	CR, S, J	O 508	Socket, PT	10.4	< 1	Fractura de barras longitudinales

CR= concreto reforzado; CIP= fabricada in situ; M= monolítica; EPRE= elementos prefabricados; PP= pedestal prefabricado; C=circular; CU= cuadrada; R= rectangular; H= hueca; S= segmentada; PT= postensado o conexión articulada; CH= chaqueta de acero; FRC= concreto reforzado con fibras ; DEE= disipador de energía externo; DEI= disipador de energía interno; FRP= fibra reforzada con polímero; HYFRP= concreto reforzado con fibra híbrida; ECC= Engineered Cementitious Composite.

A continuación se describen diferentes componentes y materiales utilizados en los ensayos de la **Tabla 1**.

1.4 PEDESTAL PREFABRICADO (PP)

La zapata es fundida in situ y a su vez se funde una pequeña parte de la columna donde posteriormente se empalmarán los aceros longitudinales de estos dos elementos mediante mecanismos de empalmes de acoplamiento. Éste arreglo se hace para no empalmar los aceros directamente en la zona de plastificación.

Figura 17. Pedestal prefabricado.



Fuente: [11]

1.5 ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC)

Es un compuesto a base de cemento con fibras poliméricas dispuestas al azar. La característica más importante del ECC es la alta ductilidad a la tracción, con una capacidad de deformación unitaria última del 5% [29] en comparación con la del cemento ordinario que es del 0.1% [30]. Debido a esto se mejora el funcionamiento de la estructura de hormigón armado y, por consiguiente, mejora la seguridad estructural.

1.6 CHAQUETA DE ACERO (CH)

Es un elemento estructural que actúa en la longitud de la columna de puente como encofrado del concreto, ver **Figura 18**, permitiendo una rápida construcción in situ ya que funciona como formaleta y ofrece adicionalmente acero de refuerzo longitudinal y transversal. En ocasiones se utiliza en la zona de formación de rótula plástica para mejorar el rendimiento en esta región.

Figura 18. Chaqueta de acero en la zona de formación de rótula plástica.



Fuente: [18]

1.7 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS (FRC)

Es un concreto reforzado con fibras orientadas al azar, que mejoran el comportamiento estructural. Puede contener fibras de vidrio, carbono, sintéticas o naturales. Cada una de estas mejora ciertas características en el concreto.

1.8 FIBRAS REFORZADAS CON POLÍMERO (FRP)

Es una chaqueta fabricada a partir de fibras de polímeros como: fibra de vidrio o carbono. Es ubicada alrededor de la columna posterior a su fabricación, ver **Figura 19**, ofreciendo ventajas como: bajo peso, alta resistencia, alta relación rigidez-peso, resistente a la corrosión y fácil instalación [27], proporcionando al concreto confinamiento y mejorando la capacidad estructural para soportar fuerza cortante.

Figura 19. Chaqueta fabricada a partir de fibras reforzadas con polímeros.



Fuente: [31]

1.9 CONCRETO REFORZADO CON FIBRA HÍBRIDA (HYFRC)

Se refiere a la utilización de diferentes tipos de fibras. El propósito de combinar las fibras es mejorar las múltiples propiedades de mezcla de hormigón. La eficacia del comportamiento de este material compuesto es muy superior a la de la fibra reforzada de hormigón con un solo tipo de fibra.

5. EVALUACIÓN DE CONEXIONES NO CONVENCIONALES FUNDACIÓN-COLUMNAS EN PUENTES DE CONCRETO

Los parámetros de evaluación se basaron en los trabajos realizados por Saiidi [17] y Marsh, et al. [12].

1.10 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN NO SÍSMICOS

Los parámetros para la evaluación no sísmica se definen en términos de ahorro de tiempo, costo inicial, inspeccionabilidad, posibilidad de reparación, y durabilidad. Cada categoría se evaluó con una escala entre los rangos que va de -2 a 2, ver **Tabla 2**, con relación al valor correspondiente a una conexión fabricada in situ que es el parámetro de comparación con una calificación de 0. Es decir, una conexión evaluada en cualquiera de los parámetros mencionados anteriormente que obtenga una calificación 0 equivaldría a una conexión fabricada in situ.

Tabla 2. Escala relativa en comparación con CIP

Escala	Definición relativa con CIP
+2	Mucho mejor
+1	Ligeramente mejor
0	Igual
-1	Ligeramente Peor
-2	Peor

Fuente: [12]

1.10.1 Ahorro de tiempo

Es un parámetro de medida que indica el ahorro de tiempo al utilizar uno de los tipos de conexiones no convencionales y que aplican en la construcción acelerada de puentes. El verdadero ahorro de tiempo depende del sistema constructivo seleccionado para la integración de un tipo de conexión, por lo que la evaluación es necesariamente subjetiva y aproximada. Sin embargo, es una medida evaluada y comparada con una conexión convencional de la construcción in situ. Las conexiones fueron evaluadas en conjuntos y no por pasos individuales en el proceso de construcción. Una descripción detallada de este método está disponible en el Apéndice H de Marsh et al. [12].

1.10.2 Costo de fabricación

La calificación de costos iniciales se evalúa cómo los costos asociados para la fabricación de una conexión sísmica ABC y se compara con la de una conexión fabricada in situ. Considerando los siguientes factores:

- El costo total de las piezas y materiales necesarios.
- El costo debido a los requisitos de manejo especial, levantamiento o apuntalamiento para la instalación en campo (por ejemplo, grúas de gran capacidad).
- El costo debido a los requisitos para el detalle y el diseño de herramientas o piezas de construcción especiales, para facilitar y acelerar el procedimiento de construcción (por ejemplo, juego plantilla para alinear las barras longitudinales de la columnas prefabricadas para conductos inyectados).

1.10.3 Inspeccionabilidad

En este parámetro de calificación se evalúa la dificultad de la inspección post-terremoto en los componentes de la conexión, en comparación con la misma conexión construida utilizando métodos convencionales. La calificación considera la capacidad de reconocer daños por inspección visual y si los métodos están disponibles para la evaluación de los daños de los componentes estructurales críticos. Los siguientes temas son considerados en la calificación inspeccionabilidad:

- ¿Puede un inspector llegar a concluir que no hay daños en el interior de la columna dentro de los componentes críticos mediante la mera inspección visual?
- ¿Puede la inspección visual identificar un fallo de un componente estructural importante que necesita reparación o sustitución inmediata?
- ¿Los daños pueden evaluarse con herramientas de evaluación no destructivas?
- ¿Los daños pueden evaluarse con una mínima destrucción?

1.10.4 Reparabilidad

La calificación evalúa la dificultad de reparación pos-terremoto de la conexión respecto a la de una construida convencionalmente, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Equipos, piezas y materiales necesarios para el proceso de reparación.
- Necesidad de destrucción para acceder a las piezas dañadas.

- El tiempo requerido total de proceso de reparación se compara con la de un sistema de puente construido in situ.

1.10.5 Durabilidad

La calificación durabilidad se evalúa en comparación de una conexión ABC con la de una conexión construida utilizando métodos de construcción tradicional bajo exposición ambiental típica similar. Los siguientes temas son considerados en la calificación de la durabilidad.

- ¿La conexión debe proporcionar una protección adecuada de sus componentes estructurales?
- ¿La conexión evita el ingreso de contaminantes o agua a los componentes estructurales?
- ¿Es la durabilidad de la conexión afectada por la calidad de la construcción?
- ¿Puede ser detectado deterioro durante las inspecciones de rutina de puente?

La **Tabla 3** resume las calificaciones otorgadas por Mehrsoroush [13] y Marsh, et al. [12].

Tabla 3. Resumen de calificación de los parámetros sísmicos y no sísmicos.

Tipo de conexión	Rendimiento sísmico	Ahorro de tiempo	Costos	Inspeccionabilidad	Reparabilidad	Durabilidad
Socket	0	+2	-1	0	0	+1
Mangos de lechas	-1	+2	-1	0	0	0
Acoplador cabeza y rosca	0	+2	-1	0	+1	0
Articulada e Híbrida	+1	0	-	-1	-1	-1
Ductos de lechada	0	+2	-1	0	0	0
Tecnologías Emergentes	+2	-2	-	-1	-1	-1
Conexión con pasador de tubería	+1	+2	0	0	0	-1

Fuente: [13].

6. NIVEL DE PREPARACIÓN PARA IMPLEMENTACIÓN DE CONEXIONES EN ABC (TRL)

El TRL (“Technology Readiness Level” en su nombre original en inglés) evalúa las conexiones basadas en su preparación para ser implementadas en zonas de alta sismicidad e identifica falencias en el conocimiento y el desarrollo de un tipo de conexión, proporcionando información de los requisitos necesarios para la implementación total en campo o describe las actividades necesarias para avanzar al siguiente nivel. Nueve niveles de preparación fueron propuestos por Marsh et al. [12]:

- TRL-1 indica que el concepto de la conexión existe.
- TRL-2 muestra que el tipo de conexión ha sido analizada o probada para fuerzas estáticas.
- TRL-3 indica que la conexión es construible y ha sido implementada en una región de baja sismicidad.
- TRL-4 indica que el tipo de conexión ha sido analizada para la carga sísmica utilizando modelos analíticos. El análisis debe incluir la respuesta a la carga cíclica, para evaluar la demanda de ductilidad y capacidad.
- TRL-5 indica que todas las pruebas a los componentes críticos son aplicables y se han completado.

Cabe señalar que TRL-5 no se aplica a todas las categorías de conexión ABC. Por ejemplo, en conexiones fabricadas usando acopladores de barras mecánicas, el rendimiento de las conexiones se basa principalmente en el acoplador individual, por lo tanto TRL-5 es aplicable a acopladores si han sido probados. Se asigna un

TRL-5 para conexiones que no aplican a pruebas de componentes individuales (ejemplo una conexión socket) y han completado el TRL-4.

- TRL-6 se refiere a las pruebas completadas de una conexión bajo carga cíclica inelástica.

- TRL-7 indica que las directrices de diseño sísmico para un tipo de conexión se han desarrollado sobre la base de estudios exhaustivos en análisis experimentales y paramétricos.

- TRL-8 se aplica cuando la conexión se ha construido en una región de alta sismicidad si el diseño de la conexión es posible utilizando datos sísmicos.

- TRL-9 indica que el tipo de conexión se ha comportado adecuadamente durante un evento sísmico en el campo. Esto implica que la conexión satisfaga los requisitos individuales de constructibilidad y desempeño sísmicos cuando se utilizan en áreas de alta sismicidad. Sin embargo, ya que las conexiones ABC en zonas de altas sismicidad son relativamente nuevas con pocas implementaciones en campo, se espera que ninguna de las conexiones evaluadas logre este nivel de preparación.

1.11 CONEXIONES QUE PODRÍAN SER IMPLEMENTADAS EN COLOMBIA

Para la implementación de conexiones con métodos que aceleren la construcción de puentes en Colombia, es necesario partir de conexiones que brinden la posibilidad de hacer la transición de métodos convencionales a métodos ABC. Partiendo de esta hipótesis, se plantea la utilización de conexiones emulantes. Una conexión emulante es aquella que imita el comportamiento sísmico de una construida tradicionalmente, utilizando análisis y diseños típicos de estas. Las conexiones con acopladores de barras, el uso de ductos de lechada y las conexiones tipo Socket podrían proporcionar comportamientos emulantes sin desviarse del diseño convencional.

En recientes investigaciones realizadas en la Universidad de los Andes por Galvis [32], se analizó cuál conexión podría ser la más adecuada para la implementación en Colombia, describiendo detalles constructivos y dando recomendaciones detalladas para el diseño que se implementaría para este tipo de conexión, aplicada a un puente representativo. REF: [32] evaluó criterios de selección como 1) facilidad constructiva de acuerdo a los medios disponibles en la práctica colombiana, 2) rapidez de ejecución del proceso de conexión, 3) similitud en el detallado de los elementos comparados con sus semejantes fundidos in situ y 4) comportamiento esperado de la conexión. REF: [32] recomienda que la conexión más apropiada para la implementación en Colombia son los ductos de lechada “ya que permite un detallado práctico idéntico al de elementos usados en la construcción tradicional” [32].

1.12 NIVEL DE PREPARACIÓN PARA IMPLEMENTACIÓN DE CONEXIONES EN ABC (TRL) EN COLOMBIA

Basado en la información recopilada de los ductos de lechada en los estudios realizados por Galvis [32], se asigna un nivel de preparación para la implementación de la conexión en Colombia de TRL-7, ya aplica directrices de diseño de acuerdo a normas y métodos internacionales, ajustadas a este tipo de conexión. La **Tabla 4** muestra una evolución del TRL en Colombia para la conexión con ductos de lechada.

Tabla 4. *Evaluación del TRL para la conexión ductos de lecha*

TRL	Descripción	
1	Existe el concepto	✓
2	Resistencia estática predecible	✓
3	Implementada en una zona de baja	✓
4	Análisis para carga sísmica	✓
5	Pruebas sísmicas a sus	✓
6	Pruebas sísmicas	✓
7	Directrices de diseño y construcción	✓
8	Implementada en una zona de alta	✓
9	Desempeño adecuado en un	✓
Calificación		7

7. CONCLUSIONES

Las conexiones no convencionales fundación-columna son una solución rápida para acelerar la construcción de puentes en concreto, permitiendo un ahorro de tiempo significativo en comparación con una estructura construida convencionalmente y ofreciendo un mayor desempeño sísmico.

Las pruebas cíclicas realizadas a conexiones no convencionales demostraron ser iguales o más eficientes sísmicamente que una construida tradicionalmente. Las conexiones emulantes exhibieron menores derivas máximas y residuales al igual que menores daños estructurales. Conexiones articuladas exhibieron mayores derivas máximas pero menores derivas residuales y daños estructurales, propiedad de su condición pivotante[1-92].

La integración de conexiones no convencionales junto con materiales que mejoran el comportamiento para resistencia de cargas, es una solución ingeniosa que permite el mejoramiento de cierto componente estructural, como es el caso del ECC que tiene una mayor ductilidad a tracción en comparación con un concreto ordinario y se dispone estratégicamente en las zonas de plastificación de la estructura.

Las conexiones no convencionales fundación-columna ofrecen mayores o iguales beneficios que una estructura construida convencionalmente en aspectos tales como: rendimiento sísmico, ahorro de tiempo, inspeccionabilidad, reparabilidad y durabilidad. El componente con una evaluación más desfavorable son los costos, ya que al tratarse de elementos prefabricados es necesario el traslado de las piezas a la ubicación definitiva, además, se utilizan grúas de gran capacidad para el ensamble de los elementos, necesitándose mano de obra especializada. Si se adiciona la integración de materiales novedosos que mejoren el comportamiento de cierto componente estructural, los costos se aumentarán.

La conexión con ductos de lechada es la transición para implementar la construcción acelerada de puentes en Colombia, ya que es una conexión prometedora que brinda propiedades emulantes de columnas construida convencionalmente. Actualmente se están adelantando estudios para el diseño e implementación de este tipo de conexión. En Colombia se hace necesario el estudio analítico y experimental de las demás conexiones expuesta, junto con el desarrollo de materiales que mejoren su comportamiento, con el fin de explorar y explotar sus propiedades mecánicas.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. L. Billington and J. Yoon, "Cyclic response of unbonded posttensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 9, pp. 353-363, 2004.
- [2] J. B. Mander and C.-T. Cheng, "Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design," 1997.
- [3] Z. B. Haber, *Precast Column-Footing Connections for Accelerated Bridge Construction in Seismic Zones*: UNIVERSITY OF NEVADA, RENO, 2013.
- [4] M. J. Tobolski, "Improving the design and performance of concrete bridges in seismic regions," 2010.
- [5] O. S. Haraldsson, T. M. Janes, M. O. Eberhard, and J. F. Stanton, "Seismic resistance of socket connection between footing and precast column," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 18, pp. 910-919, 2013.
- [6] P. Sideris, A. J. Aref, and A. Filiatrault, "Quasi-static cyclic testing of a large-scale hybrid sliding-rocking segmental column with slip-dominant joints," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 19, p. 04014036, 2014.
- [7] M. Ameli, J. Parks, D. Brown, C. Pantelides, J. Sletten, and C. Swanwick, "Seismic Evaluation of Grouted Splice Sleeve Connections for Precast Reinforced Concrete Bridge Piers," in *Proceedings of the 7th National Seismic Conference on Bridges & Highways*, 2013.
- [8] M. P. Culmo, "Accelerated Bridge Construction-Experience in Design, Fabrication and Erection of Prefabricated Bridge Elements and Systems," 2011.
- [9] M. L. Ralls, "Accelerated Bridge Construction," *ASPIRE.[Online Article]*, pp. 16-20, 2007.

- [10] A. Mehrsoroush and M. Saiidi, "EARTHQUAKE-RESISTANT TELESCOPIC PIPE PIN COLUMN BASE CONNECTIONS FOR ACCELERATED BRIDGE CONSTRUCTION," 2014.
- [11] Z. B. Haber, M. S. Saiidi, and D. Sanders, "EMULATIVE COLUMN-FOOTING CONNECTIONS FOR SEISMIC DESIGN IN ACCELERATED BRIDGE CONSTRUCTION."
- [12] M. L. Marsh, M. Wernli, B. Garrett, J. Stanton, M. Eberhard, and M. Weinert, "Application of Accelerated Bridge Construction connections in Moderate-to-High Seismic Regions. NCHRP Report 698," *Transportation Research Board, Washington, DC*, 2011.
- [13] S. Mehrsoroush, Ryan, "Development of Earthquake-Resistant Precast Pier Systems for Accelerated Bridge Construction in Nevada," 2015.
- [14] C. C. Chou and Y. C. Chen, "Cyclic tests of post-tensioned precast CFT segmental bridge columns with unbonded strands," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 35, pp. 159-175, 2006.
- [15] S. Motaref, *Seismic response of precast bridge columns with energy dissipating joints*: University of Nevada, Reno, 2011.
- [16] C. A. Cruz Noguez and M. S. Saiidi, "Performance of advanced materials during earthquake loading tests of a bridge system," *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, pp. 144-154, 2012.
- [17] S. Saiidi, "Highlights of Recent and Current Bridge Earthquake Engineering Research at UNR."
- [18] J. T. Hewes and M. N. Priestley, "Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns," 2002.
- [19] A. Palermo, S. Pampanin, and D. Marriott, "Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned

dissipating connections," *Journal of Structural Engineering*, vol. 133, pp. 1648-1661, 2007.

[20] H. Jeong, J. Sakai, and S. A. Mahin, "Shaking table tests and numerical investigation of self-centering reinforced concrete bridge columns," *Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley. Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan*, 2008.

[21] R. Yamashita and D. H. Sanders, "Seismic performance of precast unbonded prestressed concrete columns," *ACI structural journal*, vol. 106, 2009.

[22] D. Marriott, S. Pampanin, and A. Palermo, "Quasi-static and pseudo-dynamic testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replaceable dissipaters," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 38, pp. 331-354, 2009.

[23] K. Solberg, N. Mashiko, J. Mander, and R. Dhakal, "Performance of a damage-protected highway bridge pier subjected to bidirectional earthquake attack," *Journal of structural engineering*, vol. 135, pp. 469-478, 2009.

[24] M. ElGawady, A. J. Booker, and H. M. Dawood, "Seismic behavior of posttensioned concrete-filled fiber tubes," *Journal of Composites for Construction*, vol. 14, pp. 616-628, 2010.

[25] G. Guerrini and J. Restrepo, "Seismic response of composite concrete-dual steel shell columns for accelerated bridge construction," in *Proc., 7th National Seismic Conf. on Bridges and Highways*, 2013.

[26] W. Trono, G. Jen, M. Panagiotou, M. Schoettler, and C. P. Ostertag, "Seismic response of a damage-resistant recentering posttensioned-HyFRC bridge column," *Journal of Bridge Engineering*, p. 04014096, 2014.

[27] S. Motaref, M. S. Saiidi, and D. Sanders, "Shake table studies of energy-dissipating segmental bridge columns," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 19, pp. 186-199, 2013.

- [28] J. Stanton, M. Eberhard, D. Sanders, T. Thonstad, J. Schaefer, B. Kennedy, *et al.*, "A PRE-TENSIONED, ROCKING BRIDGE BENT FOR ABC IN SEISMIC REGIONS," 2014.
- [29] V. C. Li, "On engineered cementitious composites (ECC)," *Journal of advanced concrete technology*, vol. 1, pp. 215-230, 2003.
- [30] V. C. Li, "Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance," 2008.
- [31] Y. Yang, L. H. Sneed, M. S. Saiidi, and A. Belarbi, "Repair of earthquake-damaged bridge columns with interlocking spirals and fractured bars," 2014.
- [32] F. A. Galvis, "DESARROLLO DE UN TIPO DE CONEXIÓN COLUMNA-FUNDACIÓN PARA PILAS PREFABRICADAS DE PUENTES," Universidad de los Andes, Bogotá D.C, 2015.
- [33] M. Ameli, J. Parks, D. Brown, and C. Pantelides, "GROUTED SPLICE SLEEVE CONNECTION ALTERNATIVES FOR PRECAST REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIERS IN MODERATE-TO-HIGH SEISMIC REGIONS," 2014.
- [34] M. Ameli, J. E. Parks, D. N. Brown, and C. P. Pantelides, "Seismic evaluation of grouted splice sleeve connections for reinforced precast concrete column-to-cap beam joints in accelerated bridge construction," *PCI Journal*, pp. 80-103, 2015.
- [35] U. Attanayake, O. Abudayyeh, J. Cooper, A. W. Mohammed, and H. Aktan, "First Full-Depth Deck-Panel Accelerated Bridge Construction Project in Michigan: Constructability Challenges and Lessons Learned," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 28, pp. 128-135, 2012.
- [36] A. Belleri and P. Riva, "Seismic behaviour of grouted sleeve precast column to foundation connections: results applied to the direct displacement based design," in *Proceedings of 14th world conference on earthquake engineering October*, 2008, pp. 12-17.

- [37] A. Belleri and P. Riva, "Seismic performance and retrofit of precast concrete grouted sleeve connections," *PCI journal*, vol. 57, pp. 97-109, 2012.
- [38] F. J. Brenes, S. L. Wood, and M. E. Kreger, "Anchorage requirements for grouted vertical-duct connectors in precast bent cap systems," 2006.
- [39] Z.-Y. Bu, Y.-C. Ou, J.-W. Song, N.-S. Zhang, and G. C. Lee, "Cyclic Loading Test of Unbonded and Bonded Posttensioned Precast Segmental Bridge Columns with Circular Section," *Journal of Bridge Engineering*, p. 04015043, 2015.
- [40] L. S. Cohagen and T. Northwest, *A precast concrete bridge bent designed to re-center after an earthquake* vol. 684: TransNow, 2008.
- [41] M. C. Currie, J. M. Rouse, and F. W. Klaiber, "Self-Centering Bridge Piers with Structural Fuses," in *2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, 2007.
- [42] H. Dawood, M. ElGawady, and J. Hewes, "Behavior of segmental precast posttensioned bridge piers under lateral loads," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 17, pp. 735-746, 2011.
- [43] H. M. M. M. Dawood, "SEISMIC BEHAVIOR AND DESIGN OF SEGMENTAL PRECAST POST-TENSIONED," Washington State University, 2010.
- [44] dew, "erew," *wrewr*, vol. werwe, p. were, wrewr.
- [45] M. A. ElGawady and A. Sha'lan, "Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 16, pp. 328-339, 2010.
- [46] A. Esmaili Zaghi, *Seismic design of pipe-pin connections in concrete bridges*: University of Nevada, Reno, 2009.
- [47] G. Finnsson, "Unbonded pre-tensioned bridge columns with hybrid fiber-reinforced concrete shells," University of Washington, 2013.

- [48] G. Guerrini, M. Massari, A. Vervelidis, and J. Restrepo, "Self-Centering Precast Concrete Dual-Shell Steel Columns," in *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- [49] G. Guerrini, J. I. Restrepo, M. Massari, and A. Vervelidis, "Seismic Behavior of Posttensioned Self-Centering Precast Concrete Dual-Shell Steel Columns," *Journal of Structural Engineering*, 2014.
- [50] T. Guo, Z. Cao, Z. Xu, and S. Lu, "Cyclic Load Tests on Self-Centering Concrete Pier with External Dissipators and Enhanced Durability," *Journal of Structural Engineering*, p. 04015088, 2015.
- [51] Z. B. Haber, "Precast Columns with Mechanically Spliced Connections for Accelerated Bridge Construction in Seismic Zones."
- [52] Z. B. Haber, M. S. Saiidi, and D. H. Sanders, "Seismic performance of precast columns with mechanically spliced column-footing connections," *ACI Structural Journal*, vol. 111, 2014.
- [53] Z. B. Haber, M. S. Saiidi, and D. H. Sanders, "Behavior and Simplified Modeling of Mechanical Reinforcing Bar Splices," *ACI Structural Journal*, vol. 112, p. 179, 2015.
- [54] P. O. Jansson, "Evaluation of grout-filled mechanical splices for precast concrete construction," 2008.
- [55] J. Kapur, W. P. Yen, W. Dekelbab, A. Bardow, M. Keever, J. Sletten, *et al.*, "Best Practices Regarding Performance of ABC Connections in Bridges Subjected to Multihazard and Extreme Events," 2012.
- [56] F. Kavianipour, *Experimental and Analytical Seismic Studies of a Four-Span Bridge System with Composite Piers*: UNIVERSITY OF NEVADA, RENO, 2013.

- [57] T. Kim, B. Jin, Y. Kim, S. Kim, and I. Kim, "Inelastic behavior of precast concrete segmental bridge piers with shear resistance connecting structure," *Civil Engineering*, vol. 3, p. 1, 2008.
- [58] W.-P. Kwan and S. L. Billington, "Unbonded posttensioned concrete bridge piers. I: Monotonic and cyclic analyses," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 8, pp. 92-101, 2003.
- [59] A. S. Larkin, D. H. Sanders, and M. S. Saiidi, "Unbonded Prestressed Columns for Earthquake Resistance," in *Masters Abstracts International*, 2012.
- [60] D. E. Lehman and C. W. Roeder, "Foundation connections for circular concrete-filled tubes," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 78, pp. 212-225, 2012.
- [61] S. Mahin, J. Sakai, and H. Jeong, "Use of partially prestressed reinforced concrete columns to reduce post-earthquake residual displacements of bridges," in *Fifth National Seismic Conference on Bridges & Highways, San Francisco, California*, 2006.
- [62] M. Mashal and A. Palermo, "EXPERIMENTAL TESTING OF EMULATIVE FULLY PRECAST CONCRETE BRIDGE BENT IN SEISMIC REGIONS."
- [63] M. Mashal, S. White, and A. Palermo, "Quasi-static cyclic tests of Emulative Precast Segmental Bridge Piers (E-PSBP)," in *2013 NZSEE Conference, Wellington, New Zealand*, 2013.
- [64] M. Mashal, S. White, and A. Palermo, "Experimental testing of emulative connections for accelerated bridge construction in seismic areas," in *Austrroads Bridge Conference, 9th, 2014, Sydney, New South Wales, Australia*, 2014.
- [65] A. Mehrsoroush, "Experimental and Analytical Seismic Studies of Bridge Piers with Innovative Pipe Pin Column-Footing Connections and Precast Cap Beams," UNIVERSITY OF NEVADA, RENO, 2014.

- [66] G. METELLI and P. RIVA, "Seismic behaviour of precast column to foundation joint," in *International fib Symposium 2008. Amsterdam, The Netherlands, 19-22 May 2008*, 2008.
- [67] E. Nikbakht and A. Khalim, "Behavior of Unbonded Segmented Precast Bridge Columns Subjected To Axial and Lateral Cyclic Loading."
- [68] Y.-C. Ou, "Precast segmental post-tensioned concrete bridge columns for seismic regions," State University of New York at Buffalo, 2007.
- [69] Y.-C. Ou, M. Chiewanichakorn, A. J. Aref, and G. C. Lee, "Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns," *Journal of structural engineering*, vol. 133, pp. 1636-1647, 2007.
- [70] Y.-C. Ou, P.-H. Wang, M.-S. Tsai, K.-C. Chang, and G. C. Lee, "Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions," *Journal of structural engineering*, vol. 136, pp. 255-264, 2009.
- [71] A. Palermo and M. Mashal, "Accelerated Bridge Construction (ABC) and Seismic Damage Resistant Technology: A New Zealand Challenge," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 45, pp. 123-134, 2012.
- [72] J. B. Pang, M. O. Eberhard, and J. F. Stanton, "Large-bar connection for precast bridge bents in seismic regions," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 15, pp. 231-239, 2009.
- [73] R. C. d. C. S. Resistente, "NSR-10," *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá*, 2010.
- [74] H. Roh, Y.-C. Ou, J. Kim, and W. Kim, "Effect of yielding level and post-yielding stiffness ratio of ED bars on seismic performance of PT rocking bridge piers," *Engineering Structures*, vol. 81, pp. 454-463, 2014.

- [75] S. P. Rowell, C. E. Grey, S. C. Woodson, and K. P. Hager, "High Strain-Rate Testing of Mechanical Couplers," DTIC Document 2009.
- [76] M. S. Saiidi, M. O. Brien, and M. Sadrossadat-Zadeh, "Cyclic response of concrete bridge columns using superelastic nitinol and bendable concrete," *ACI Structural Journal*, vol. 106, 2009.
- [77] C. S. Shim, C.-H. Chung, and H. H. Kim, "Experimental evaluation of seismic performance of precast segmental bridge piers with a circular solid section," *Engineering Structures*, vol. 30, pp. 3782-3792, 2008.
- [78] C.-S. Shim, Y.-S. Chung, and J.-Y. Yoon, "Cyclic behavior of prefabricated circular composite columns with low steel ratio," *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 2525-2534, 2011.
- [79] P. Sideris, A. J. Aref, and A. Filiatrault, "Large-scale seismic testing of a hybrid sliding-rocking posttensioned segmental bridge system," *Journal of Structural Engineering*, vol. 140, p. 04014025, 2014.
- [80] F. G. Solano Toloza, "Proyecto de grado en la modalidad practica empresarial construccion global Ltda proyecto viceza," in *Seguimiento proceso constructivo y observacion del comportamiento estructural de placas steel deck*, ed Bucaramanga, 2007, pp. 154-182.
- [81] M. Tazarv, "Seismic Performance of Next Generation Bridge Components for Accelerated Bridge Construction (ABC)," 2012.
- [82] M. Tazarv and M. S. Saiidi, "UHPC-filled duct connections for accelerated bridge construction of RC columns in high seismic zones," *Engineering Structures*, vol. 99, pp. 413-422, 2015.
- [83] M. Tazarv and S. Saiidi, "Emulative Moment-Resistant RC Bridge Column-Footing Connection for Accelerated Bridge Construction in High Seismic Zone," in *Proceedings of the 7th National Seismic Conference on Bridges & Highways*, 2013.

- [84] H. V. Tran, "Drilled Shaft Socket Connections for Precast Columns in Seismic Regions," University of Washington, 2012.
- [85] W. Trono, G. Jen, C. Ostertag, and M. Panagiotou, "Tested and modeled seismic response of a rocking, post-tensioned HyFRC bridge column," in *Proc., 7th National Seismic Conf. on Bridges and Highways*, 2013.
- [86] W. D. Trono, *Earthquake resilient bridge columns utilizing damage resistant hybrid fiber reinforced concrete*: University of California, Berkeley, 2014.
- [87] S. Varela and M. Saiid'Saiidi, "DYNAMIC PERFORMANCE OF NOVEL BRIDGE."
- [88] Y. Yang, L. H. Sneed, A. Morgan, M. S. Saiidi, and A. Belarbi, "Repair of RC bridge columns with interlocking spirals and fractured longitudinal bars—An experimental study," *Construction and Building Materials*, vol. 78, pp. 405-420, 2015.
- [89] W. P. Yen and G. C. Lee, *Proceedings of the Special International Workshop on Seismic Connection Details for Segmental Bridge Construction Held in Seattle, Washington, July 22-14, 2009*: MCEER, University at Buffalo, State University of New York, 2009.
- [90] K.-S. Youm, J.-y. Cho, Y.-H. Lee, and J. J. Kim, "Seismic performance of modular columns made of concrete filled FRP tubes," *Engineering Structures*, vol. 57, pp. 37-50, 2013.
- [91] A. E. Zaghi, M. S. Saiidi, and A. Mirmiran, "Shake table response and analysis of a concrete-filled FRP tube bridge column," *Composite Structures*, vol. 94, pp. 1564-1574, 2012.
- [92] Z. Zhu, I. Ahmad, and A. Mirmiran, "Seismic performance of concrete-filled FRP tube columns for bridge substructure," *Journal of bridge engineering*, vol. 11, pp. 359-370, 2006.

BIBLIOGRAFÍA

AMELI, M. J., et al. Seismic Evaluation of Grouted Splice Sleeve Connections for Precast Reinforced Concrete Bridge Piers. En *Proceedings of the 7th National Seismic Conference on Bridges & Highways*. 2013.

Billington, S. L., & Yoon, J. K. (2004). Cyclic response of unbonded posttensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete. *Journal of Bridge Engineering*, 9(4), 353-363.

CHOU, Chung-Che; CHEN, Yu-Chih. Cyclic tests of post-tensioned precast CFT segmental bridge columns with unbonded strands. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2006, vol. 35, no 2, p. 159-175.

CRUZ NOGUEZ, Carlos A.; SAIIDI, M. Saiid. Performance of advanced materials during earthquake loading tests of a bridge system. *Journal of Structural Engineering*, 2012, vol. 139, no 1, p. 144-154.

CULMO, Michael P. *Accelerated Bridge Construction-Experience in Design, Fabrication and Erection of Prefabricated Bridge Elements and Systems*. 2011.

ELGAWADY, Mohamed; BOOKER, Aaron J.; DAWOOD, Haitham M. Seismic behavior of posttensioned concrete-filled fiber tubes. *Journal of Composites for Construction*, 2010, vol. 14, no 5, p. 616-628.

GALVIS, F. A. Galvis, "DESARROLLO DE UN TIPO DE CONEXIÓN COLUMNA-FUNDACIÓN PARA PILAS PREFABRICADAS DE PUENTES," Universidad de los Andes, Bogotá D.C, 2015.

HABER, Zachary B. *Precast Column-Footing Connections for Accelerated Bridge Construction in Seismic Zones*. UNIVERSITY OF NEVADA, RENO, 2013.

HABER, Zachary B.; SAIIDI, M. Saiid; SANDERS, David. EMULATIVE COLUMN-FOOTING CONNECTIONS FOR SEISMIC DESIGN IN ACCELERATED BRIDGE CONSTRUCTION.

HARALDSSON, Olafur S., et al. Seismic resistance of socket connection between footing and precast column. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, vol. 18, no 9, p. 910-919.

HEWES, Joshua T.; PRIESTLEY, MJ Nigel. *Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns*. 2002.

JEONG, H. I.; SAKAI, Junichi; MAHIN, Stephen A. Shaking table tests and numerical investigation of self-centering reinforced concrete bridge columns. *Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley. Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan*, 2008.

LEE, George C.; KITANE, Yasuo; BUCKLE, Ian G. Literature review of the observed performance of seismically isolated bridges. *Research Progress and Accomplishments: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*, 2001, p. 51-62.

MANDER, John B.; CHENG, Chin-Tung. Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design. 1997.

MARSH, M. Lee, et al. Application of Accelerated Bridge Construction connections in Moderate-to-High Seismic Regions. NCHRP Report 698. *Transportation Research Board, Washington, DC*, 2011.

MEHRSOROUGH, A.; SAIIDI, M. S. EARTHQUAKE-RESISTANT TELESCOPIC PIPE PIN COLUMN BASE CONNECTIONS FOR ACCELERATED BRIDGE CONSTRUCTION. 2014.

MEHRSOROUGH, Mehrsoroush S. Mehrsoroush, Ryan, "Development of Earthquake-Resistant Precast Pier Systems for Accelerated Bridge Construction in Nevada," 2015.

MOTAREF, Sarira. *Seismic response of precast bridge columns with energy dissipating joints*. University of Nevada, Reno, 2011.

OU, Yu-Chen, et al. Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions. *Journal of structural engineering*, 2009, vol. 136, no 3, p. 255-264.

PALERMO, A.; PAMPANIN, Stefano; MARRIOTT, D. Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned dissipating connections. *Journal of Structural Engineering*, 2007, vol. 133, no 11, p. 1648-1661.

RALLS, Mary Lou. Accelerated Bridge Construction. *ASPIRE.[Online Article]*, 2007, p. 16-20.

SIDERIS, Petros; AREF, Amjad J.; FILIATRAULT, Andre. Quasi-static cyclic testing of a large-scale hybrid sliding-rocking segmental column with slip-dominant joints. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, vol. 19, no 10, p. 04014036.

TOBOLSKI, Matthew Joseph. Improving the design and performance of concrete bridges in seismic regions. 2010.

TRONO, William, et al. Seismic response of a damage-resistant recentering posttensioned-HyFRC bridge column. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, p. 04014096.

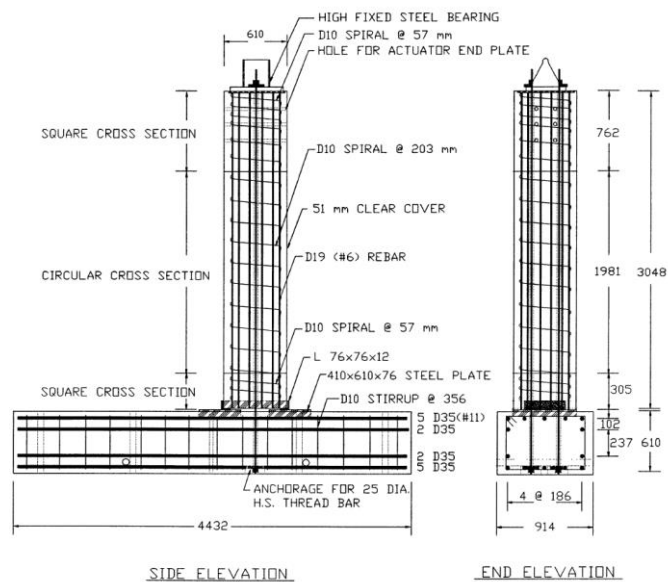
ANEXOS

ANEXO A. PROTOTIPO DE COLUMNAS CON CONEXIONES NO CONVENCIONALES

A continuación se presenta los prototipos de columnas de puentes en concreto que utilizan conexiones no convencionales fundación- columna y el resultado del diagrama de desempeño tras concluir las pruebas.

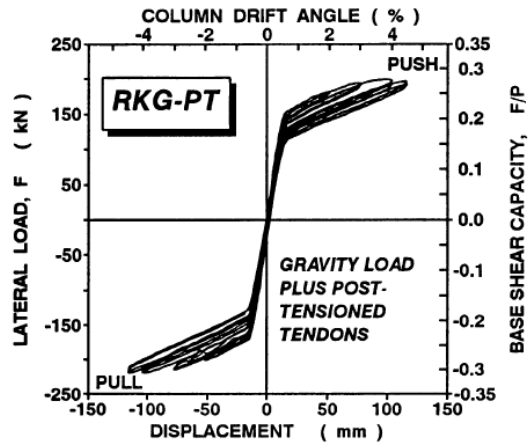
Mander y Cheng (1997): realizaron pruebas a columnas prefabricadas, utilizando una conexión articulada y emergente.

Figura A.1. Columna representativa de prueba.



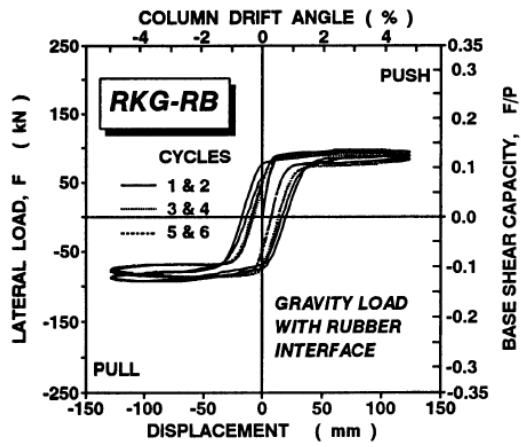
Fuente [2].

Figura A.2. Diagrama de histéresis de la columna con conexión postensada.



Fuente [2].

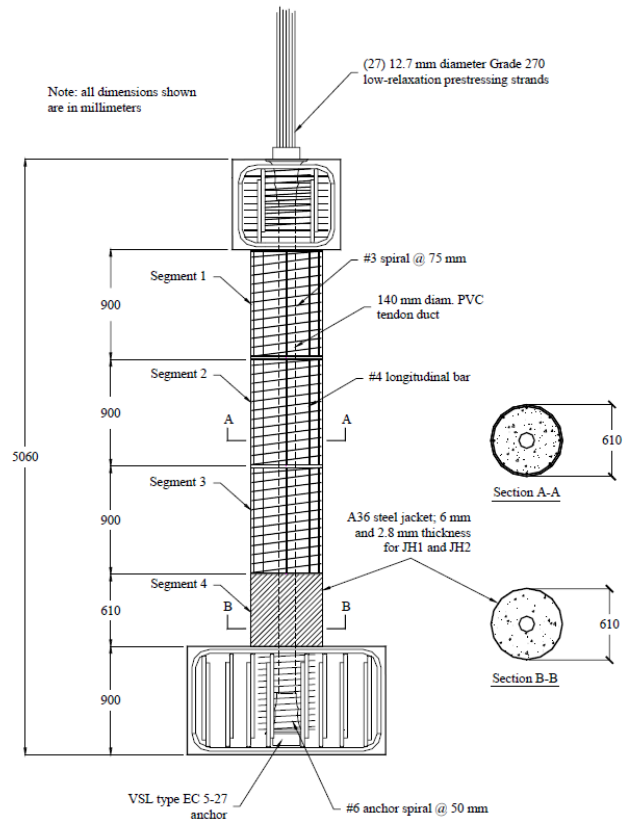
Figura A.3. Diagrama de histéresis de la columna con conexión emergente (almohadilla de goma).



Fuente [2].

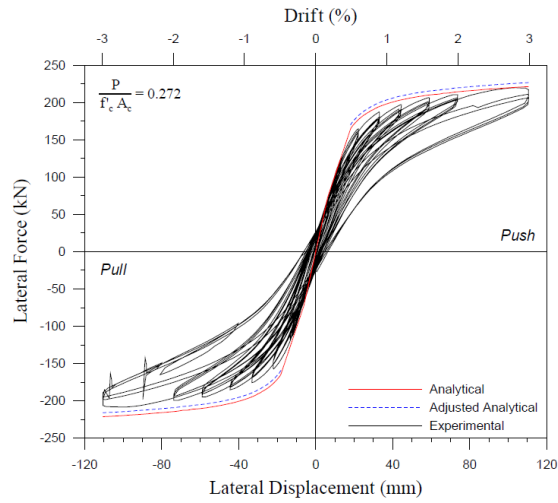
Hewes y Priestley (2002): realizaron pruebas a una columna prefabricada con conexión articulada.

Figura A.4. Columna representativa de prueba.



Fuente [17].

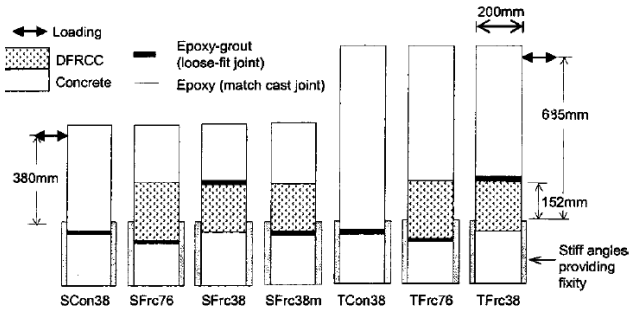
Figura A.5. Diagrama de histéresis de la columna con conexión postensada.



Fuente [17].

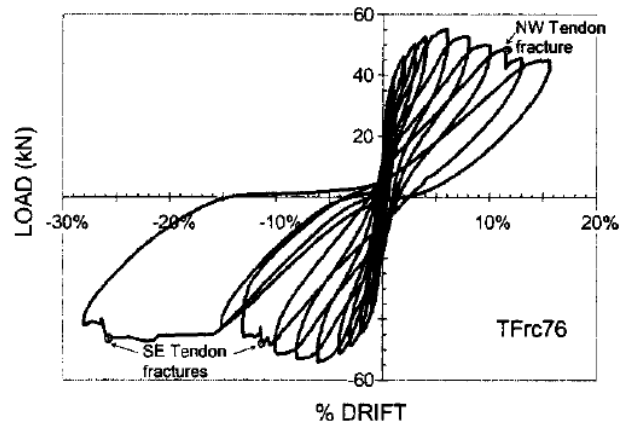
Billington y Yoon (2004): realizaron pruebas a columnas postensadas, utilizando el material concreto reforzado con fibras.

Figura A.6. Columnas representativas de prueba.



Fuente [1].

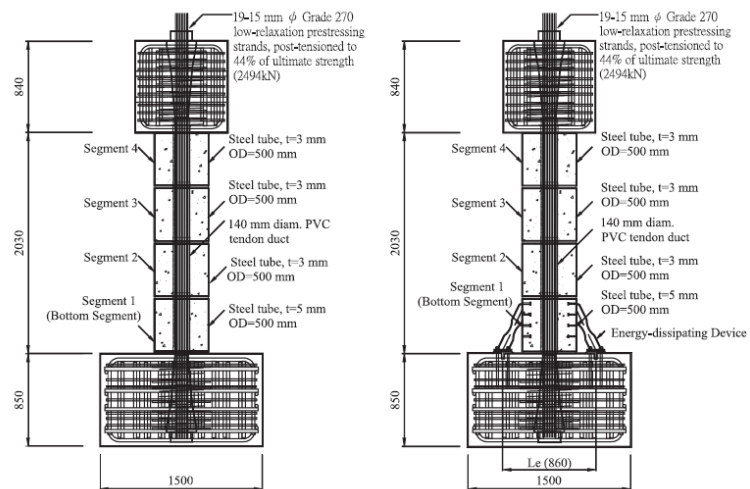
Figura A.7. Diagrama de histéresis generalizado de las columnas con conexión postensada.



Fuente [1].

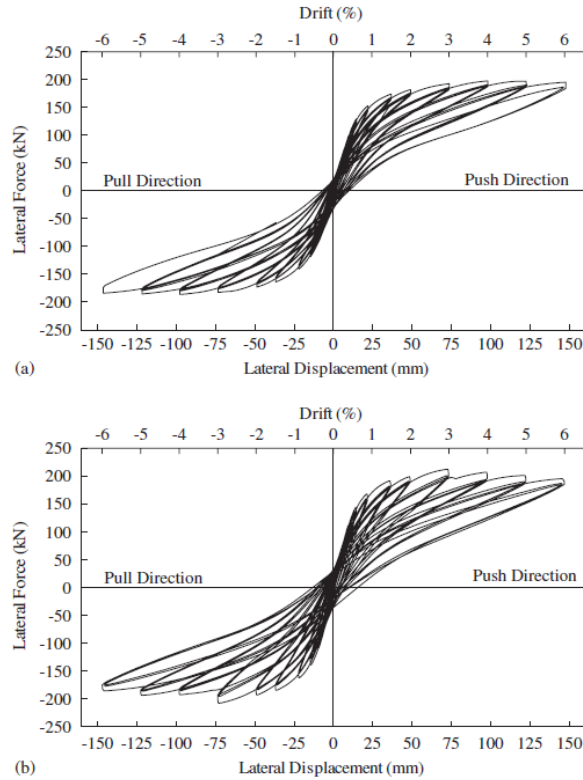
Chou y Chen (2006): realizo pruebas a columnas con conexión postensada e híbrida (disipadores de energía internos no adheridos).

Figura A.8. Columna representativa de prueba.



Fuente [13].

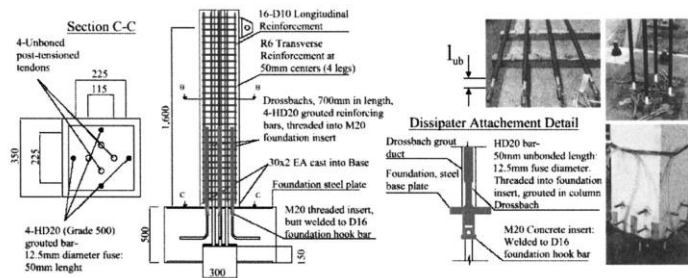
Figura A.9. a) Diagrama de histéresis de la columna con conexión postensada. b) Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida.



Fuente [13].

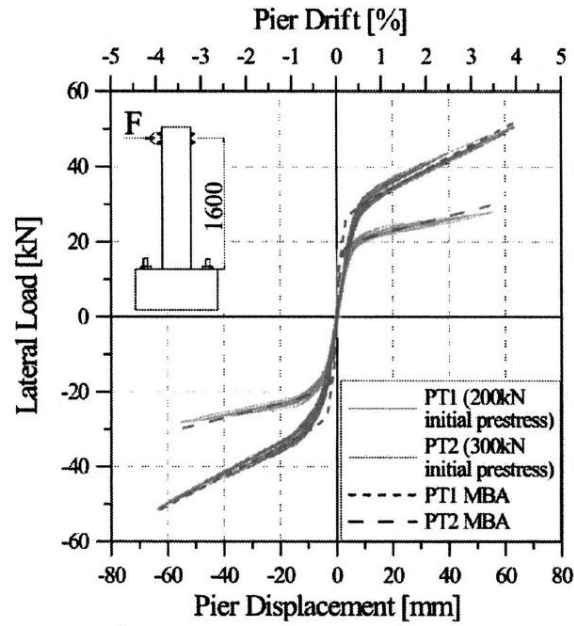
Palermo, et al. (2007): realizo pruebas a columnas con conexión postensada e híbrida (disipadores de energía internos no adheridos).

Figura A.10. Columna de prueba.



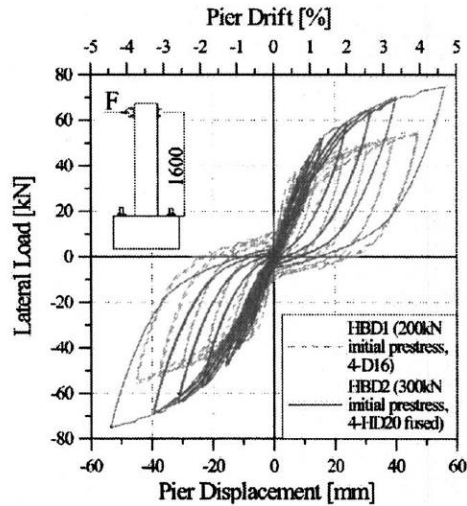
Fuente [18].

Figura A.11. Diagrama de histéresis de la columna con conexión articulada.



Fuente [18].

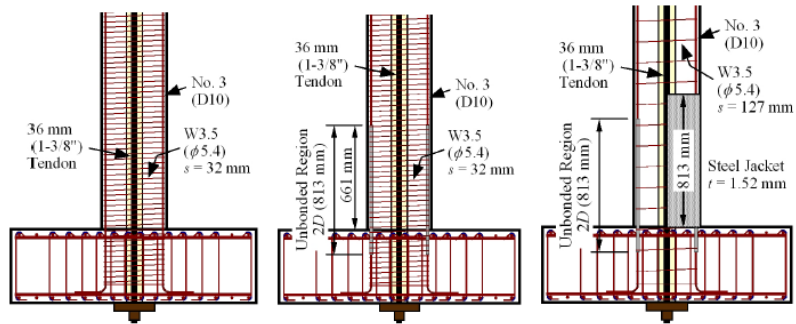
Figura A.12. Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida (disipadores de energía internos no adheridos).



Fuente [18].

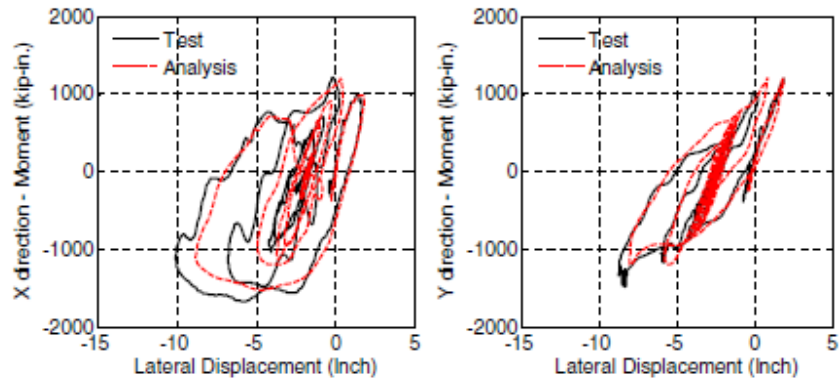
Jeong, et al. (2008): realizaron pruebas a columnas con conexión híbrida (disipadores de energía internos adheridos y no adheridos).

Figura A.13. Columnas de prueba.



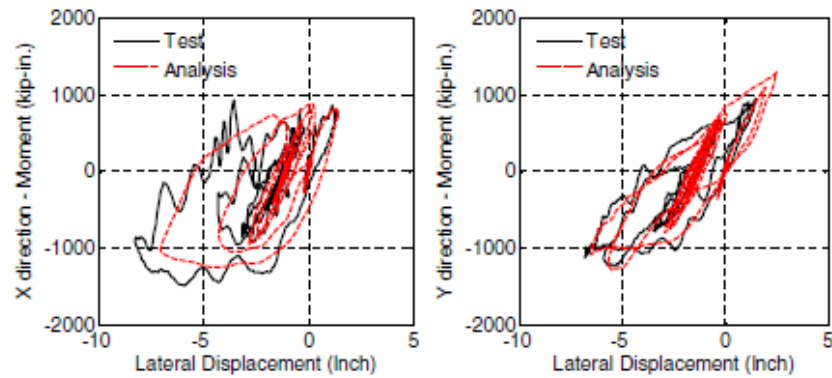
Fuente [19].

Figura A.14. Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida (disipadores de energía internos adheridos).



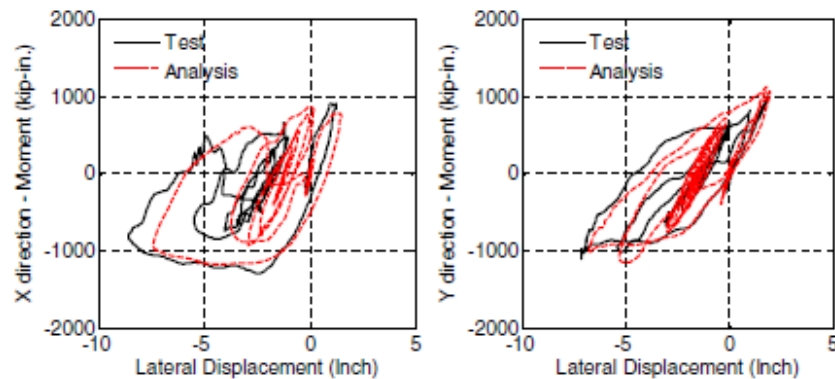
Fuente [19].

Figura A.15. *Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida (disipadores de energía internos adheridos).*



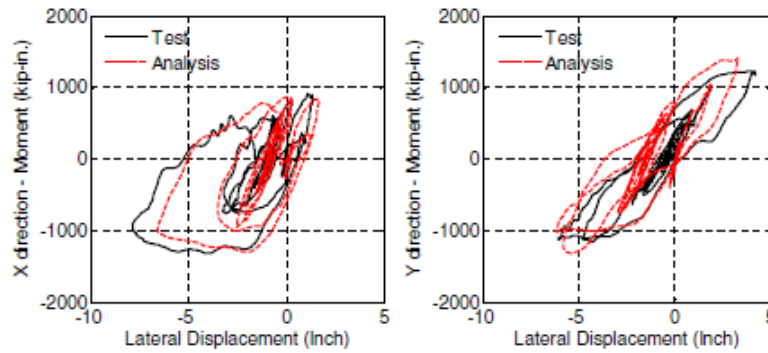
Fuente [19].

Figura A.16. *Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida (disipadores de energía internos adheridos).*



Fuente [19].

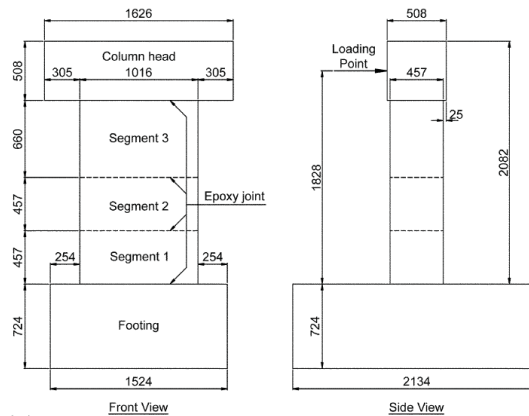
Figura A.17. Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida (disipadores de energía internos adheridos).



Fuente [19].

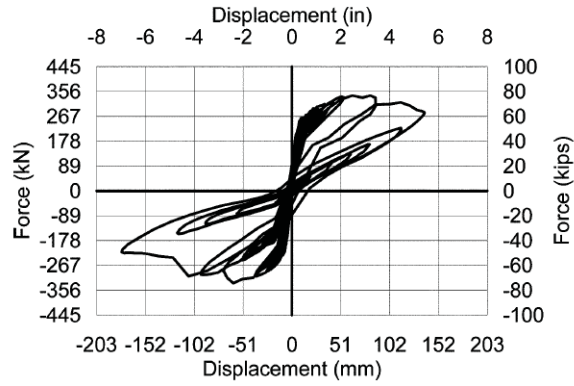
Yamashita y Sanders (2009): realizaron pruebas a columnas con conexión articulada.

Figura A.18. Columna de prueba.



Fuente [20].

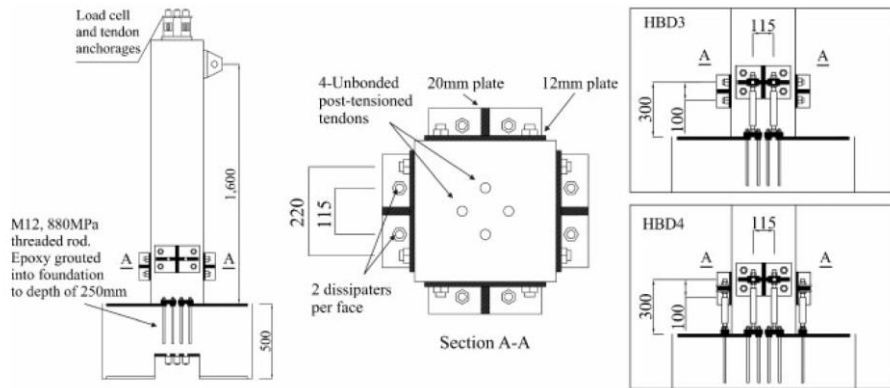
Figura A.19. Diagrama de histéresis de la columna con conexión articulada.



Fuente [20].

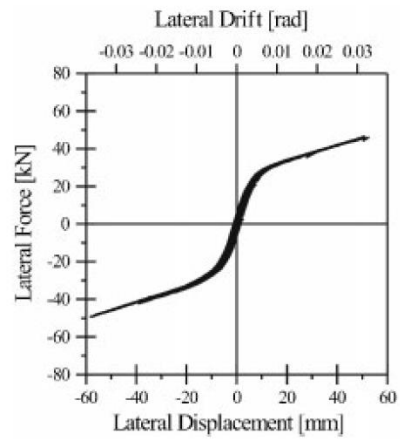
Marriott, et al. (2009): realizaron pruebas a columnas con conexión articulada e híbrida (disipadores de energía externos).

Figura A.20. Columna de prueba.



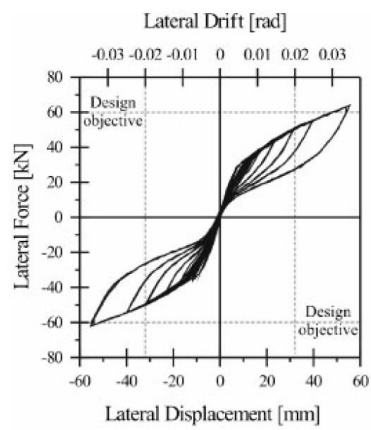
Fuente [21].

Figura A.21. Diagrama de histéresis de la columna con conexión articulada.



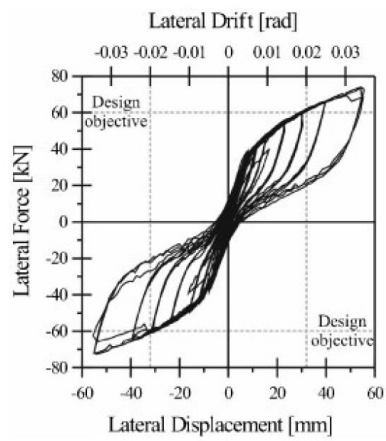
Fuente [21].

Figura A.22. Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida.



Fuente [21].

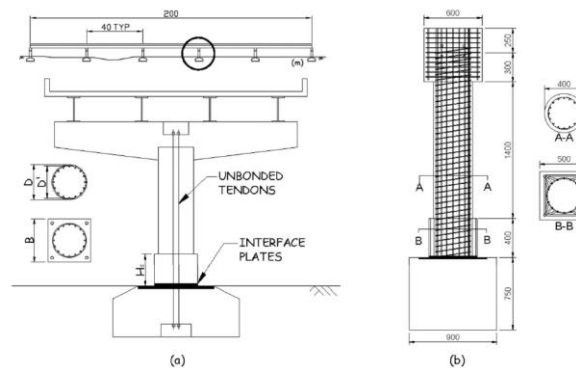
Figura A.23. Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida.



Fuente [21].

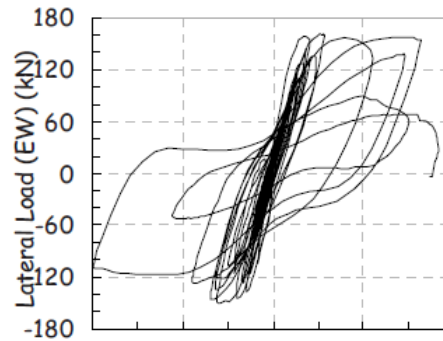
Solberg, et al. (2009): realizaron pruebas a columnas con conexión híbrida (disipadores de energía internos no adheridos).

Figura A.24. Columna de prueba.



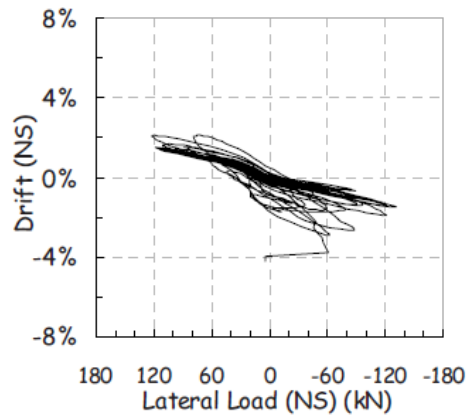
Fuente [22].

Figura A.25. Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida.



Fuente [22].

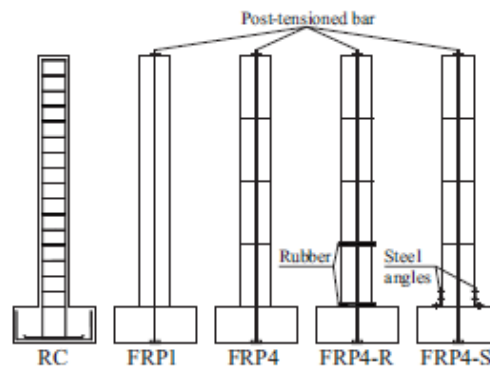
Figura A.26. Diagrama de histéresis de la columna con conexión híbrida.



Fuente [22].

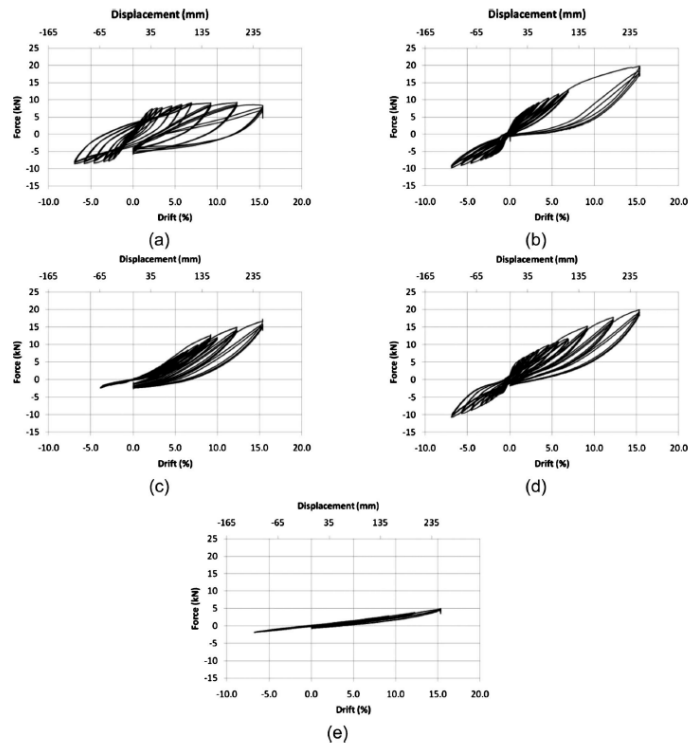
ElGwady, et al. (2010): realizaron pruebas a columnas con conexión articulada, híbrida y emergente (disipadores de energía externos). Utilizando materiales como fibras reforzadas con polímero y neopreno en la interfaz zapata columna.

Figura A.27. Columnas de prueba.



Fuente [23].

Figura A.28. Diagrama de histéresis para la columna con conexión: a) construida convencionalmente. b) y c) articulada. d) emergente. e) híbrida.



Fuente [23].

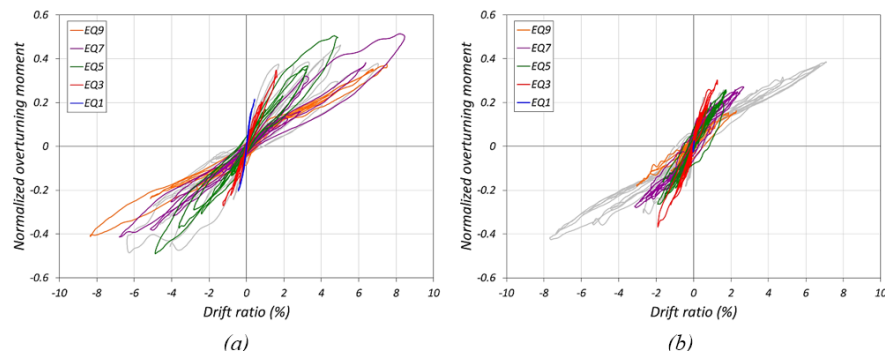
Guerrin y Restrepo (2013): realizaron pruebas a una columna con conexión emergente, con disipadores de energía internos adheridos y utilizando una almohadilla de poliuretano en la interfaz zapata columna.

Figura A.29. Columnas de prueba.



Fuente [24].

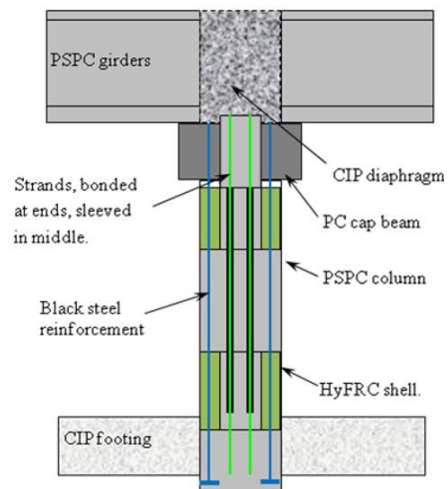
Figura A.30. Diagrama de histéresis de la columna con conexión emergente.



Fuente [24].

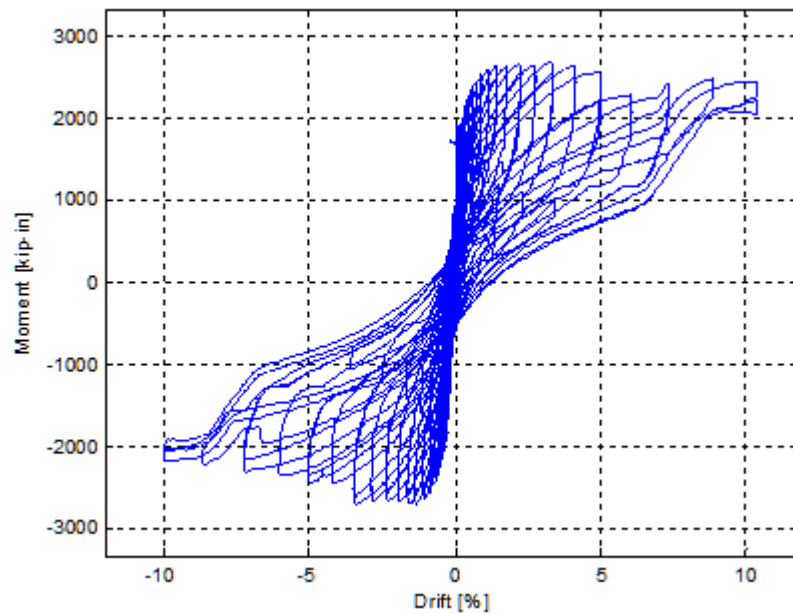
Haraldsson, et al. (2013): realizaron pruebas a una columna con conexión Socket, utilizando disipadores de energía internos adheridos y postensado, utilizando concreto reforzado con fibras híbridas.

Figura A.31. Columna de prueba.



Fuente [5].

Figura A.32. Diagrama de histéresis de la columna con conexión Socket.



Fuente [5].

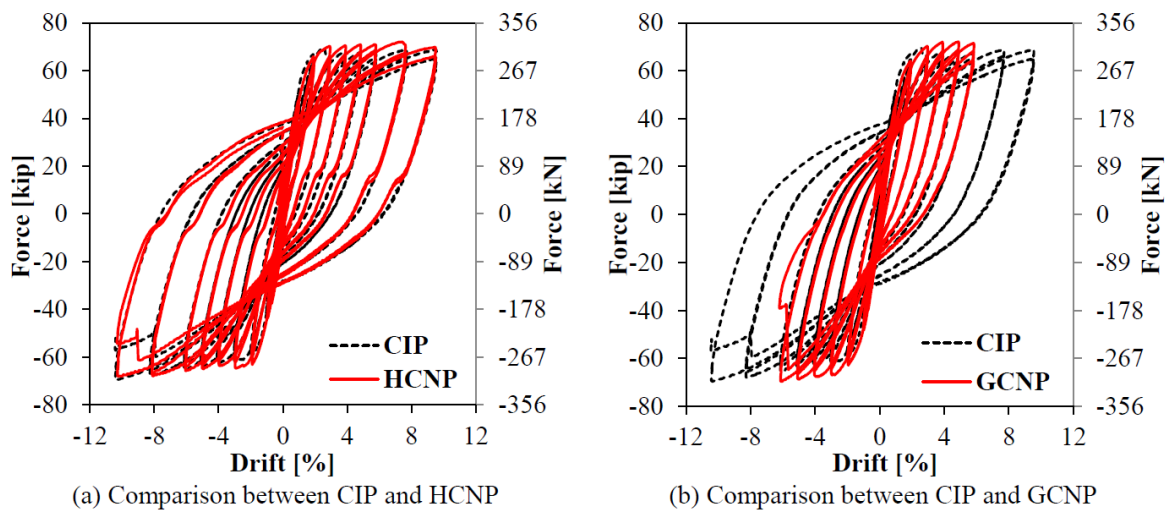
Haber (2013): realizaron pruebas a columnas con conexiones con acopladores de barras, utilizando mangos de lechada y acopladores con cabeza y rosca.

Figura A.33. Columnas representativas de prueba.



Fuente [3].

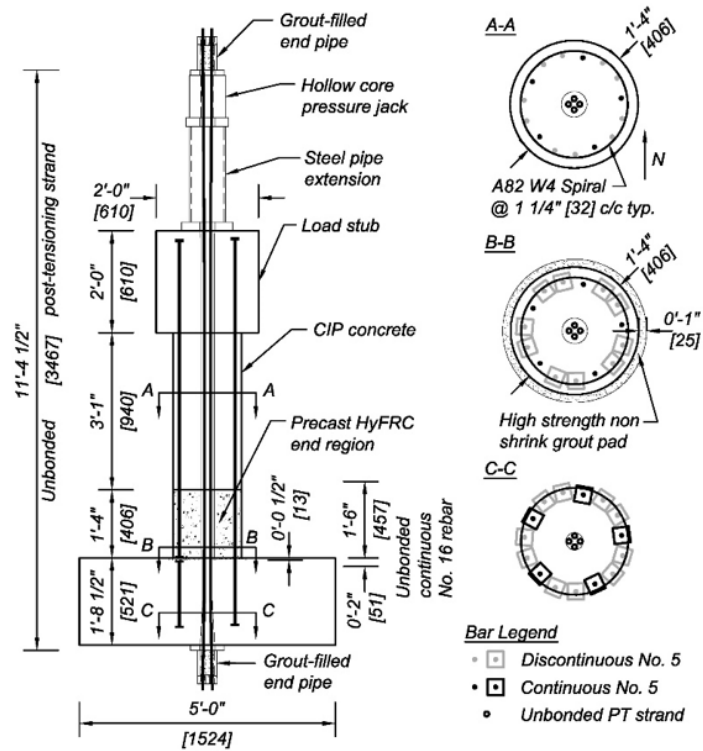
Figura A.34. Diagrama de histéresis para la columna con conexión: a) acoplador con cabeza y rosca. b) mangos de lechada.



Fuente [3].

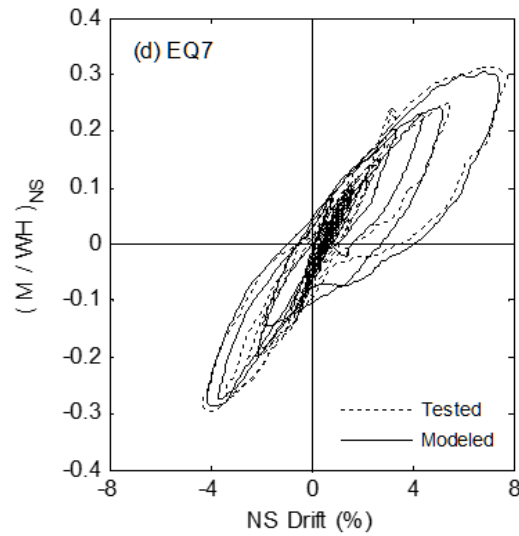
Trono, et al. (2014): realizaron pruebas a columnas con conexión articulada, utilizando concreto reforzado con fibras híbridas.

Figura A.35. Columna de prueba.



Fuente [25].

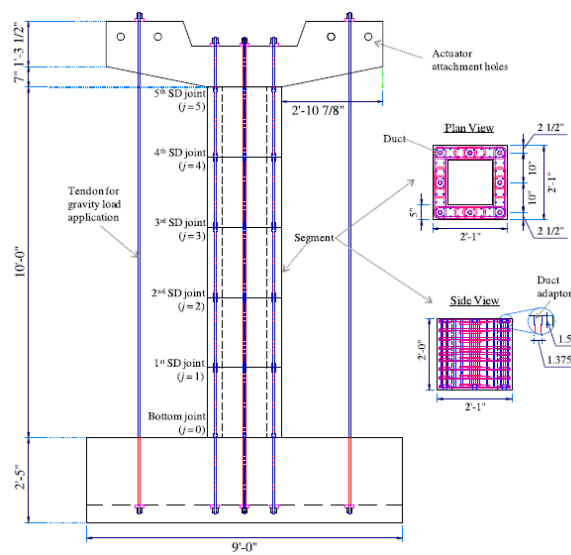
Figura A.36. Diagrama de histéresis de la columna con conexión articulada (almohadilla de goma).



Fuente [25].

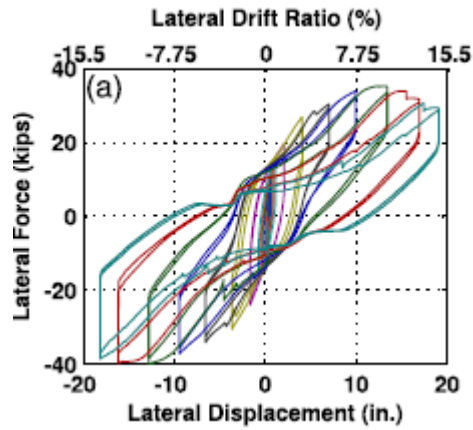
Sideris, et al. (2014): realizó pruebas a una columna con conexión articulada.

Figura A.37. Columna de prueba.



Fuente [6].

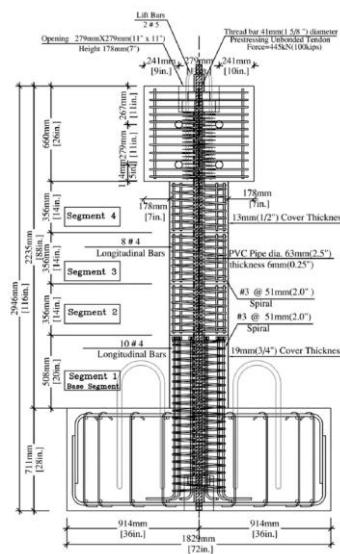
Figura A.38. Diagrama de histéresis de la columna con conexión articulada.



Fuente [6].

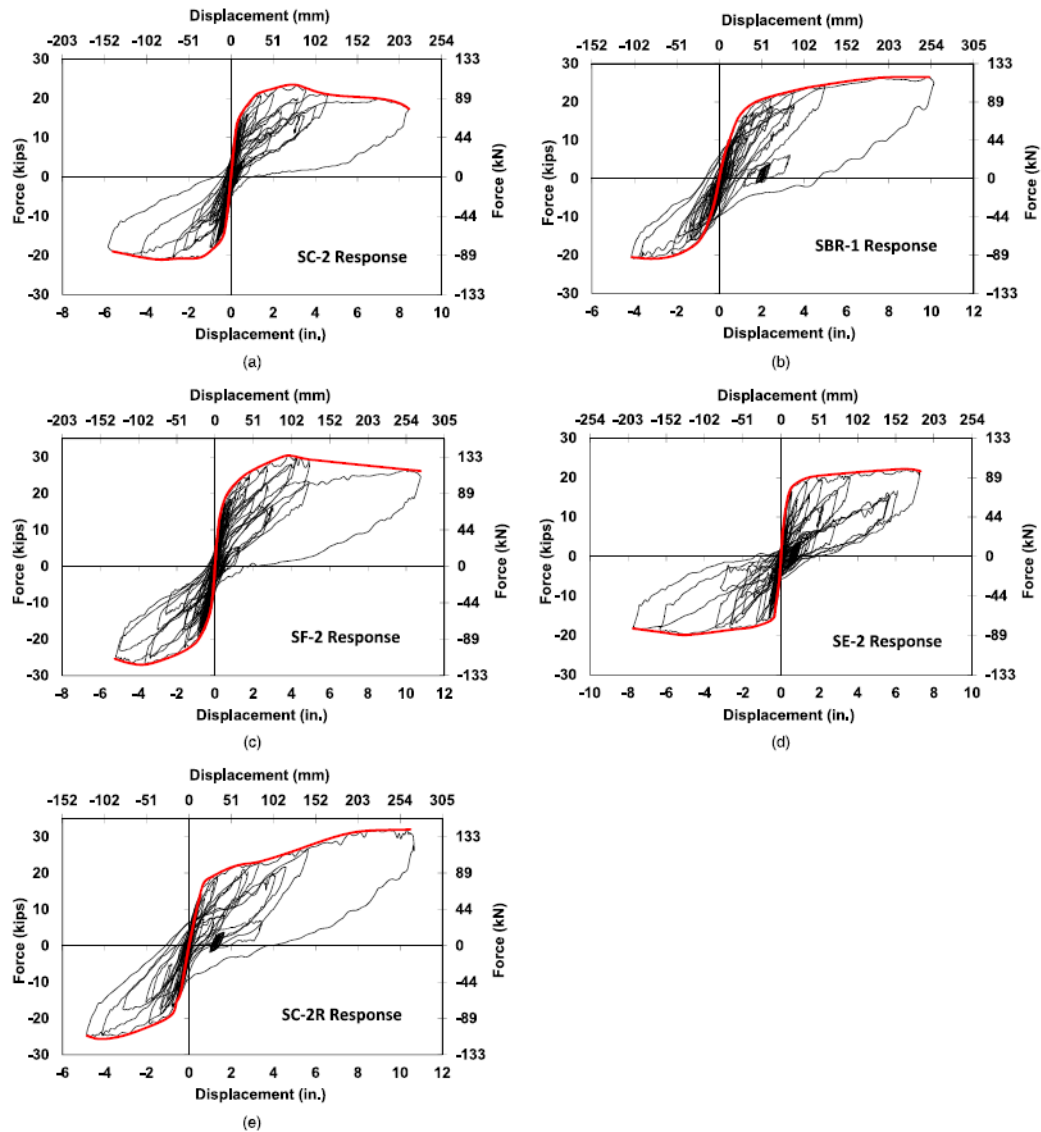
Motaref, et al. (2014): realizaron pruebas a columnas con conexiones articuladas y emergentes, utilizaron materiales como fibras reforzadas con polímeros, Engineered Cementitious Composite y en el caso de la conexión emergente almohadilla de goma en la interfaz zapata columna.

Figura A.39. Columna representativa de prueba.



Fuente [26].

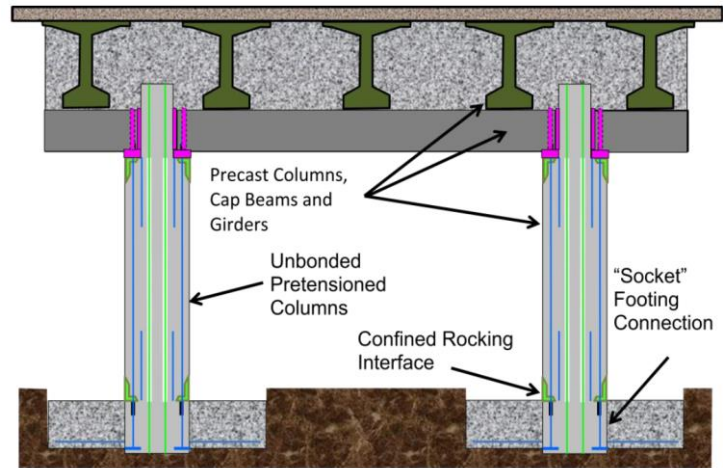
Figura A.40. Diagrama de histéresis para la columna con conexión: a), c), d) y e) articulada. b) emergente.



Fuente [26].

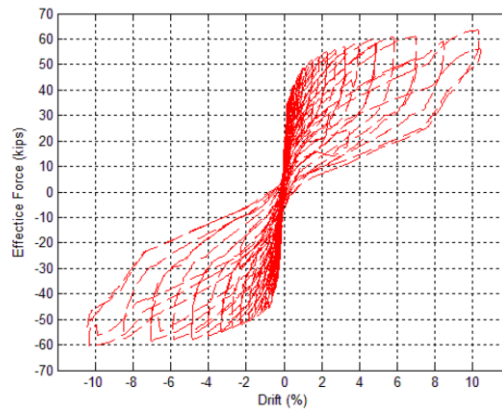
Stanton, et al. (2014): realizó pruebas a una columna con conexión Socket postensada.

Figura A.41. Columna de prueba.



Fuente [27].

Figura A.42. Diagrama de histéresis de la columna con conexión Socket.



Fuente [27].