

**Conexiones en Estructuras Prefabricadas en Edificaciones Ubicadas en Zona de Amenaza
Sísmica Alta**

Manuel José Gutiérrez Navarro

Gustavo Adolfo Morales Navarro

Monografía de Grado para Optar al Título de Especialista en Estructuras

Director

Alvaro Viviescas

Phd. En Ingeniería Estructural

Universidad Industrial de Santander.

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas.

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

La concepción de este trabajo esta dedicado principalmente a Dios, por abrirme todas las oportunidades para completar este peldaño de mi carrera profesional.

A mis padres por enseñárme los valores de sacrificio y dedicación, sin ellos no seria posible aclamar el deber cumplido.

A cada larga noche ante el computador, mi refugio durante los meses de trabajo y musa de inspiración.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ser inspirador y guía para llevar a buen puerto este proyecto y permitir el avance en mi formación personal, a mi familia por alcahuetear mis sueños y ser bastión en todo momento especialmente en aquellos críticos.

Mi profundo agradecimiento al ingeniero Alvaro Viviescas quien desde la dirección del proyecto me brindo conocimiento, enseñanza y orientación oportuna, abonando mi saber profesional. A mi par Gustavo Morales por ser excelente compañero en la búsqueda y construcción de una meta compartida.

A los docentes de la especialización en estructuras muchas gracias por compartir sus saberes y experiencias, con ellas construyo mi idoneidad en el ámbito estructural.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Estructuras Prefabricadas.....	18
2.1 Definición	18
2.2 Historia Sistema Prefabricado.....	20
2.3 Aplicaciones.....	23
2.3.1 Puentes	26
2.3.1.1 Metodología ABC (Accelerated Bridge Construction).....	29
3. Tipos de Conexiones.....	32
3.1 Tipos de conexiones según su comportamiento estructural.....	32
3.1.1 Conexiones Emulativas.....	33
3.1.2 Conexiones no Emulativas.....	34
3.2 Tipos de conexiones según su forma constructiva.....	36
3.2.1 Conexiones Húmedas.....	36

3.2.2 Conexiones post-tensadas.	37
3.2.3 Conexiones Pernadas.	38
3.2.4 Conexiones Mecánicas.....	39
3.2.5 Conexiones Soldadas.	40
4. Criterios Normativos.....	41
4.1 Generalidades del Análisis.....	42
4.2 Conexiones en muros y losas.....	46
4.3 Diseño y detalle de conexiones.....	49
5. Conexiones prefabricadas para uso en zonas de riesgo de amenaza sísmica alta en Colombia	52
5.1 Parámetros de Evaluación.....	54
5.1.1 Diseño de conexión.....	55
5.1.2 Proceso de producción e instalación.	56
5.2 Puntaje de Participación.....	56
5.3 Condición de Evaluación	57
5.3.1 Parámetro de diseño.	57
5.3.2 Parámetro de proceso constructivo e instalación.	58
5.4 Ventajas y Desventajas de los tipos de conexión según su “Forma Constructiva”	58
5.4.1 Conexión tipo húmeda.	58
5.4.1.1 Ventajas.....	58
5.4.1.2 Desventajas.	58
5.4.2 Conexión tipo postensada.	59

5.4.2.1 Ventajas.....	59
5.4.2.2 Desventajas.	59
5.4.3 Conexión tipo pernada.	61
5.4.3.1 Ventajas.....	61
5.4.3.2 Desventajas.	61
5.4.4 Conexión tipo mecánica.....	62
5.4.4.1 Ventajas.....	62
5.4.4.2 Desventajas	63
5.4.5 Conexión tipo soldada.....	63
5.4.5.1 Ventajas.....	63
5.4.5.2 Desventajas.	63
5.5 Calificación de Aspectos.....	64
5.5.1 Calificación cualitativa según los aspectos definidos.....	64
5.5.2 Calificación ponderada de los parámetros del proceso de selección.	64
6. Conclusiones	65
Referencias Bibliograficas	67

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Puntajes de participación de parámetros dentro del proceso de selección.	57
Tabla 2. Condiciones para evaluación del parámetro de diseño.	57
Tabla 3. Condiciones para evaluación del parámetro de proceso constructivo e instalación.	58
Tabla 4. Calificación de tipos de conexión según los parámetros de evaluación.	64
Tabla 5. Calificación pondera de tipos de conexión dentro del proceso de selección.	64

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso constructivo con elementos prefabricados.	18
Figura 2. Puente Long Key, Florida. West Palm Beach TV. (2019).	27
Figura 3. Esquema típico superestructura vano a vano.....	28
Figura 4. Esquema típico superestructura voladizo equilibrado.	28
Figura 5. Construcción del modelo de estudio en la universidad de Washington.	31
Figura 6. Regiones inelásticas en elementos fabricados In situ y elementos prefabricados.	35
Figura 7. Tipos de las conexiones según su comportamiento estructural.	36
Figura 8. (a) Esquema para el proceso de instalación de muestras de conexión de viga y columna prefabricada de tipo “húmeda”, (b) Conexión luego de la fundición del concreto de acabado....	37
Figura 9. Proceso de post-tensado entre columna y viga prefabricada.	38
Figura 10. Detalle de conexión Pernada.	39
Figura 11. Conexión típica soldada.	40
Figura 12. Clasificación de las conexiones según su forma constructiva.	41
Figura 13. Ejemplo del refuerzo de muro sobre la conexión entre dos losas de piso.	47
Figura 14. Conexiones a cortante.....	48
Figura 15. Longitud de apoyo.	52

Resumen

Título: Conexiones en Estructuras Prefabricadas para Edificaciones Ubicadas en Zonas de Amenaza Sísmica Alta.*

Autores: Gutiérrez Navarro Manuel José, Morales Navarro Gustavo Adolfo**

Palabras Claves: Prefabricado, sismo resistente, amenaza sísmica, conexión.

Descripción:

Este trabajo pretende presentar una validación de las conexiones empleadas en estructuras prefabricadas de edificaciones en concreto y establecer bajo una serie de características en torno al análisis estructural cuales son factibles de ser usadas en zonas sísmicas alta en Colombia. Se obtendrán las bases para los criterios de clasificación del desarrollo teórico del sistema prefabricado y explicación de los criterios normativos de las distintas normas internacionales empleadas. El entendimiento de los conceptos presentes en las normas facilitara la unificación de conceptos y revelara la necesidad de desarrollar investigaciones en el área del prefabricado que definan criterios de diseño en base a las características sísmicas presentes en Colombia y tener como resultado un fortalecimiento en el desarrollo de metodologías constructivas que fomenten el uso del sistema prefabricado. El sistema prefabricado presenta todas las condiciones necesarias para ser implementado y competir ante sistemas tradicionales, los beneficios se ven en el mercado de la construcción al comparar eficiencia y costo en los procesos constructivos, sus aplicaciones son variables desde edificaciones hasta puentes, sus limitaciones son mínimas y al contrario genera garantías mediante controles estrictos de calidad en sus elementos y la correcta transferencia de fuerzas en el sistema de resistencia sísmica de la estructura.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alvaro Viviescas, Phd. En Ingeniería Estructural

Abstract

Title: Connections in Precast Buildings Structures Located In High Seismic Zone.*

Authors: Gutiérrez Navarro Manuel José, Morales Navarro Gustavo Adolfo**

Keywords: Precast system, seismic resistance, seismic hazard, connections

Description:

This work aims to present a validation of the connections used in prefabricated structures of buildings in concrete and establish a series of characteristics related to structural analysis that are feasible to be used in high seismic zones in Colombia. The bases for the classification criteria of the theoretical development of the prefabricated system and explanation of the normative criteria of the different international standards used will be obtained. The understanding of the concepts present in the standards will facilitate the unification of concepts and will reveal the need to develop research in the area of prefabrication that will define design criteria based on the simile characteristics present in Colombia and have as a result a strengthening in the development of constructive methodologies that encourage the use of the prefabricated system. The prefabricated system presents all the necessary conditions to be implemented and compete against traditional systems, the benefits are seen in the construction market when comparing efficiency and cost in the constructive processes, their applications are variable from buildings to bridges, their limitations are minimal and on the contrary generates guarantees through strict quality controls on its elements and the correct transfer of forces in the system of seismic resistance of the structure.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alvaro Viviescas, Phd. En Ingeniería Estructural

Introducción

En la historia ha sido evidente como en la construcción de obras civiles ha tenido un gran impacto la tecnología, haciendo que cada vez sean más impresionantes los proyectos de vivienda y obras de construcción.

Así mismo, el desarrollo de las naciones va ligado con el bienestar de sus habitantes, hecho de conocimiento colectivo y por el cual se busca en todo momento mejorar las condiciones de habitabilidad y libre desarrollo, siendo esto un factor fundamental en la búsqueda de construcciones asertivas e ingeniosas que logren satisfacer la demanda sin dejar a un lado aspectos importantes como los costos, calidad y los tiempos de ejecución.

Las estructuras por medio de elementos prefabricados, nacen con la necesidad antes nombrada, junto con la de industrializar el sector de la construcción haciendo de ella un proceso con una organización mucho más óptima en diversos factores, integrados de tal manera que ofrezcan como resultado mayor productividad del trabajo a través del empleo de métodos afines a otras ramas industriales, que permiten la mecanización de actividades, la racionalización de procesos y la elaboración en forma seriada de elementos de construcción.

Dichas estructuras desde una perspectiva práctica, se remontan a las civilizaciones de la edad Antigua, en la cual el hombre encontró la forma de cortar y tallar troncos o rocas para luego transportarlos y disponerlos como parte de una estructura completa, o incluso antiguos

constructores romanos que comenzaron a verter el “Hormigón romano” en moldes para la construcción de sus sistemas de drenajes, o piezas de estructuras de viviendas, palacios, templos, murallas, fortalezas, cruces de ríos entre otros.

Así que, actualmente este tipo de construcción no es del todo novedosa y aunque por un tiempo fue desmeritada por la deficiencia en el control de calidad y el transporte de las piezas, hoy en día ha tomado un nuevo auge, ya que permite mayor productividad en el sector.

Es un hecho considerar que el futuro de los métodos constructivos va a estar basado en la prefabricación, incluso actualmente hay campos de la construcción donde el método más empleado es la prefabricación, como lo es la construcción de puentes vehiculares y peatonales, mediante las técnicas ABC (Accelerated Bridge Construction), las comúnmente conocidas viviendas de interés social, tanques de almacenamiento, entre otros.

Ahora, no muy lejos ni dejando de lado este campo en el ámbito socioeconómico, “Colombia, es el tercer país mas desigual de America Latina” (Lizcano, 2011, p. 1), lo que se traducen en pocas oportunidades para la población la cual busca satisfacer una necesidad básica como lo es una vivienda digna. Y aunque en nuestro país el prefabricado no ha logrado un gran auge, si ha llegado a ser una alternativa rápida, económica y sobre todo segura como respuesta a esta necesidad. Según estudios Colombia tiene un gran déficit en infraestructura, lo que genera sobre aranceles que oscilan entre el 16% y 18% (Consejo Privado de Competitividad, 2011), los cuales pueden ser solucionados de una forma más rápida, ágil y sobre todo económica con el uso de prefabricados.

Con todo esto se hace necesario sumar esfuerzos con el fin de desarrollar, aplicar y mejorar las tecnologías existentes en cuanto a la construcción con sistemas prefabricados, con el fin de dar una mayor solución de habitabilidad previendo que entre otras cosas la mayor densidad poblacional del país se encuentra en zonas de Medio y Alto “Riesgo sísmico” (Norma Sismo Resistente, 2010, p. A-132), siendo esto último un factor determinante y que ha frenado el libre desarrollo de las edificaciones con el sistema antes nombrado.

En el desarrollo de este documento se describen los aspectos más relevantes de los sistemas prefabricados dando un enfoque principalmente al comportamiento y respuesta de sus conexiones con el fin de determinar el posible uso de dichas prácticas en Colombia.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Identificar los tipos de conexiones más adecuados para su uso en estructuras prefabricadas en edificaciones ubicadas en zona de amenaza sísmica “alta” en concreto y determinar su posible uso en Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

- Examinar información acerca del uso y comportamiento ante eventos sísmicos de elementos prefabricados de concreto en edificaciones alrededor del mundo.
- Comparar la normativa colombiana que regula el diseño de estructuras con reglamentos de otros países.
- Sugerir los tipos de conexiones más adecuados para las zonas de amenaza sísmica “Alta” en Colombia.

2. Estructuras Prefabricadas

2.1 Definición

Las estructuras prefabricadas son un método de tipo industrial en la elaboración de elementos y partes de una construcción o estructura, ya sea en obra o planta que posteriormente son transportados a su lugar de instalación donde finalmente forman una estructura completa. La aplicación de este sistema, otorga como principal consideración el diseño, detalle de las conexiones y uniones entre los elementos, los cuales tienen una gran importancia en el sistema de resistencia sísmica ya que, tienen como función principal, la transferencia de las fuerzas entre los elementos presentes.

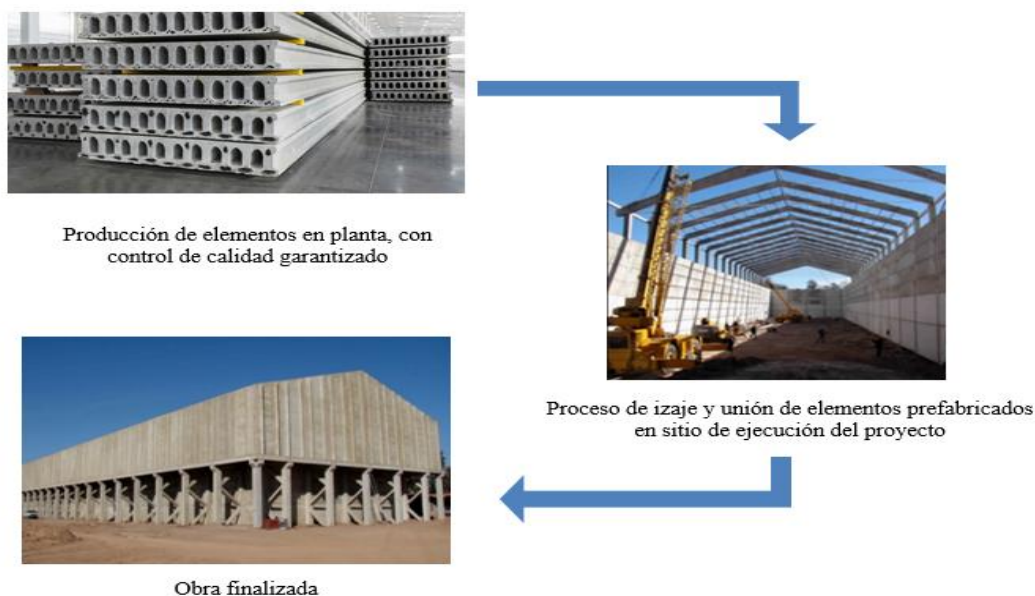


Figura 1. Proceso constructivo con elementos prefabricados. Adaptado de: Astori estructura S.A., (s.f). Construcción Silo Palmar, Recuperado de: <http://www.astoriestructuras.com.ar/obra/silo-palmar>.

Este tipo de estructuras surgen con la necesidad de tener una mayor productividad en el sector de la construcción y aunque lo parezca, este método no resulta tan novedoso, ya que desde una perspectiva práctica se remonta directamente a la antigua Roma, donde se afirma que los constructores vertían su material en moldes para la construcción de las redes de acueductos, sistemas de túneles y drenajes (Cordovi, 2017, p. 106).

No obstante, durante un tiempo se vio redujo su utilización, ya que no se contaba con un suficiente control de calidad y transporte de piezas desde el proceso de fabricación hasta instalación, así mismo numerosos estudios han recomendado “abstenerse” a la aplicación de sistema prefabricado en zonas de amenaza sísmica, referenciando un deficiente desempeño ya que, al ser sometidas a fuerzas horizontales sus conexiones parecen ser débiles.

Sin embargo, hoy en día ha tomado un fuerte y nuevo auge, ya que brinda una mayor solución a las necesidades vitales en el área de la construcción como lo es el incremento en los rendimientos y mejora en la calidad de las estructuras de concreto, como muestra de esto, se observa que para el año 2012 hubo un incremento del 167% (Bustamante, 2007, p. 1), en este tipo de construcción en el país cifra que sigue creciendo anualmente principalmente en los proyectos de vivienda de interés social (VIS). Del mismo modo se ha visto un aumento en la aplicación de este sistema en construcciones de infraestructura vial y portuaria. Paralelamente, incrementan las consideraciones a tener en cuenta no solo en su etapa constructiva, sino también en su etapa de diseño en el cual se debe garantizar en las conexiones bajos niveles de agrietamiento y plastificación que es logrado gracias a la ayuda de una variedad de técnicas constructivas existentes, además, cada conexión es distinta en base a la demanda de ductilidad contemplada y su ubicación dentro de la estructura.

2.2 Historia Sistema Prefabricado

El sistema prefabricado es un sistema estructural popular a nivel mundial y de uso recurrente en los países industrializados, sus beneficios como lo son la eficiencia en procesos constructivos y economía en los costos de los proyectos, le permite competir sin ningún problema en el mercado de la construcción ante otros sistemas estructurales mas cotidianos o tradicionales. “La introducción del sistema prefabricado comienza través de las armaduras en el hormigón en la segunda mitad del siglo XIX, cuando se prefabricaban barcos para su uso en la guerra, a través de ese acontecimiento histórico el continente europeo surge como pionero del sistema prefabricado” (Buron y Ordoñez, 1997, p. 1). Si bien es posible decir que el sistema prefabricado es tan antiguo en comparación con la civilización humana, existen proyectos o monumentos en las antiguas civilizaciones que fueron construidas por elementos previamente elaborados, casos específicos se presentan en la civilización romana con sus puentes en arco u coliseos y la egipcia con las pirámides o esfinges, estas obras fueron de gran envergadura y por ello tuvieron la necesidad de implantar una metodología de fabricar primero los elementos y posteriormente trasladados a el lugar donde se realizaría el ensamble de los elementos; esta metodología usada por estas antiguas civilizaciones encaja en el campo del sistema prefabricado.

En Estados Unidos durante la década de 1850, en la ciudad de Chicago, se dio lugar a la producción de los primeros bloques de concreto prefabricado con el fin de sustituir el uso de piedra natural y cal, los cuales eran usados para la construcción de muros (Preinco S.A, 2005, p. 2). Sin embargo, en 1820, el francés Louis Joseph Vicat ya había iniciado la fabricación de piezas prismáticas de concreto del tamaño de la mampostería, con el fin de obtener su resistencia al fallo

mediante ensayos de rotura, Los trabajos de Joseph Vicat fueron publicados en el año 1828 y aún siguen vigentes, su entorno investigador dio pie a el desarrollo del concreto prefabricado como material de estudio (Preinco S.A, 2005, p. 2). En los últimos años se registra un crecimiento en el desarrollo del concreto prefabricado en zonas de alta actividad sísmica; Nueva Zelanda, Japón y Estados Unidos son países que lideran las investigaciones en la aplicación del sistema prefabricado, indicando que las teorías sobre el bajo desempeño de los elementos prefabricados en zonas de amenaza sísmica alta pueden cuestionarse y re formularse para dar paso a su implementación en el proyectos de vivienda de varios niveles (edificios, casas).

El caso de España, presenta una gran demanda en la construcción de viviendas y edificios, antiguamente el material por excelencia para la construcción era la mampostería mientras el prefabricado era una técnica reservada para proyectos industriales. Según datos de la Asociación Nacional de Prefabricados de Hormigón de España “El sector del prefabricado de hormigón goza de buena salud en España, la industria del prefabricado española está altamente cualificada, siendo el segundo país productor de prefabricados en Europa” (Preinco S.A, 2005, p. 3). La producción y ensamblaje de piezas industrializadas se ha diversificado gracias a la acogida de grandes constructores y arquitectos, que han visto la facilidad de la fabricación de cualquier elemento estructural sin limitaciones estéticas. La clave del posicionamiento de España en la producción y construcción de estructuras prefabricadas se ubica en la inversión en nuevas plantas de producción, que expanden las ya existentes y generan inversión internacional, de esta manera se produce un balance en los gastos que demanda el transporte de los elementos; este cambio de ideología en la construcción en España ha sido el puente a la generación de proyectos de edificaciones nunca antes

vistos, atreviéndose a construir edificios de mayor altura, áreas de mayor amplitud y geometría de los elementos no convencionales.

A mediados del siglo XIX, en América del Sur, el conocimiento sobre fenómenos sísmicos y la comprensión de sus efectos sobre las construcciones era prácticamente nulo (Cirvini, 2001, p. 2). En el caso de la Argentina, se desarrollaba una situación de déficit entorno a las edificaciones sismo resistentes por la ausencia de tecnología propia, el alto costo para la implementación del sistema hacía imposible su ejecución en el país; en Mendoza, Argentina, el manejo empírico de materiales y tecnologías locales provenientes de la época hispano-colonial, dieron como resultado una construcción homogénea de tapia, techos de caña y barro sobre tirantes de madera, limitando la altura en los edificios . En 1782, Argentina sufrió un sismo de gran magnitud “El sismo de Santa Rita” (Cirvini, 2001, p. 2), posteriormente, la ocurrencia de este evento sísmico se instauró como foco de atención para la llegada de ingenieros extranjeros, permitiendo avances tecnológicos en la construcción de edificaciones, la influencia del ingeniero Carlos M. Rivera (Liguria, Italia), contribuyó a la llegada de la madera como elemento estructural, donde se empieza la producción de elementos armados en sitio y posteriormente instalados (Muros, vigas, columnas), esto se define como los primeros desarrollos del sistema prefabricado de concreto. En 1861, el sistema estructural prefabricado alcanza una gran difusión luego del suceso de un fuerte y destructivo sismo que modificó notablemente el uso de los materiales en la construcción prefabricada, optando por el uso de mampostería y concreto.

Los elementos prefabricados presentan una gran demanda en países desarrollados, especialmente para alcanzar la eficiencia en la construcción de viviendas, múltiples estudios se

han llevado a cabo con el objetivo de lograr un óptimo desempeño desde el instante en que se sometan a esfuerzos; otro tipo de estudios han demostrado que los sistemas prefabricados pueden sostener altos valores de desplazamiento sin mayor pérdida de rigidez y se pueden diseñar para obtener sistemas estructurales más eficientes.

2.3 Aplicaciones

El concreto es el material más utilizado en el área de la construcción, ofrece maleabilidad en su estado líquido y resistencia en su estado sólido, características que atribuyen estabilidad en las estructuras; ahora incluyendo la tecnología del prefabricado dan como resultado una ilimitada variedad de aplicaciones gracias a su versatilidad alcanzada. El concreto prefabricado permite lograr geometrías inimaginables en los elementos, abre la puerta a diseños inusuales o inimaginables, además de otras múltiples ventajas como lo son la obtención de rapidez en la construcción y montajes de estructuras, otorga calidad en sus acabados y durabilidad en la vida útil de las estructuras.

Una de las garantías que otorga el sistema prefabricado es la omisión del tiempo de curado, cuando se emplea concreto convencional o reforzado se requiere un periodo de curado promedio de 28 días después de fundido cualquier elemento, “Los países con clima húmedo tienen un gran aliado en este tipo de estructuras” (Preinco S.A, 2005, p. 4), por ello no es novedad que los países que poseen estaciones del año no solo empleen este sistema constructivo, sino que inviertan además en la investigación para el desarrollo tecnológico del prefabricado.

La construcción de puentes ha encontrado en el sistema prefabricado un aliado para la aceleración del proceso constructivo, la tecnología del prefabricado ha sido implementada en la producción del tablero y elementos de subestructura como las zapatas, pilares, muro de contención y estribos. Los elementos se pueden fabricar en un lugar distante a la ubicación del puente, permitiendo la simultaneidad con la construcción de otros elementos de mayor envergadura como la cimentación o estribos y a su vez favorece a la reducción en la programación de obra, además el uso del sistema prefabricado le otorga ventajas al diseño del puente con respecto a su geometría y longitud a contemplar. En Eslovaquia, el sistema prefabricado ha beneficiado las técnicas constructivas en la construcción de puentes en los últimos 50 años, pero el último año ha significado un crecimiento en el desarrollo e innovación del prefabricado, a pesar de las ventajas bien conocidas de los puentes prefabricados, existía una demanda de soluciones innovadoras que mejorarían la competitividad de estas estructuras (Halvnoik, Fillo, Borzovic y Benko, 2007, p. 68); el conocimiento adquirido a través de la práctica en la producción de elementos prefabricados significó perfeccionar la geometría de las vigas prefabricadas al encontrar la figura óptima posterior a su tensionado, las vigas prefabricadas pre tensionadas fueron fabricadas y producidas a partir de 1990. La mayoría de puentes en Eslovaquia han empleado vigas prefabricadas con geometría “I”, “T” y “T invertida” fundidas en un solo elemento con la losa de concreto, una vez finalizada la sección del tablero, esta se convierte en un elemento compuesto de gran rigidez y ductilidad (Halvnoik, Fillo, Borzovic y Benko, 2007, p. 67). El tiempo de servicio de los puentes con elementos prefabricados registran un promedio entre 50 y 60 años, solicitando mantenimiento en el recubrimiento de los elementos y el cambio de cables en los torones por fallo, representando un costo bajo para volver a obtener la estructura en óptimo servicio.

Los elementos prefabricados también son utilizados en la construcción de viviendas, ya sea viviendas de unifamiliares o de varias plantas como lo son los edificios, son una alternativa que permite generar diseños creativos en las fachadas y variabilidad en la distribución de los espacios gracias a la fabricación de elementos con geometrías diferentes. Otra virtud es el control en la calidad en los elementos que garantiza un excelente desempeño individual y global en la estructura, a su vez de ser necesario intervenir algún elemento que haga parte del sistema estructura permite una metodología de reparación más sencilla y en menor tiempo, los elementos prefabricados no requieren mantenimiento a lo largo de su vida útil. Inclusive, en caso de demolición, cambios estructurales o reformas; los elementos prefabricados pueden ser removidos y reutilizados en otros espacios (Van Geem, 2006, p. 42-60).

Actualmente existen muchas aplicaciones para el sistema prefabricado, no solamente en las estructuras cotidianas, un ejemplo se presenta en la gran difusión en los elementos de cimentaciones, ofreciendo carta de opciones en el uso de losas de cimentación, cimentaciones semi-profundas y cimentaciones profundas, donde los pilotes y muros de pantalla son los más empleados en la construcción; para estos elementos de gran longitud se debe considerar el ítem de transporte, por ello el armado in situ de elementos prefabricados de gran longitud o de secciones de gran tamaño son una excelente alternativa, el recurso humano en un proceso constructivo a base de elementos prefabricados no exige personal especializado durante el montaje pero si un conocimiento previo del proceso de armado de manera que los ensambles (uniones) se realicen de una manera adecuada.”(Serrano, Pérez, Solarte, Torrado y Serrano, 2014, p. 26), los montajes en obra no son síntomas de contra tiempos, en cambio ofrece mayor supervisión calidad y

maniobrabilidad en su disposición final, el elemento puede ser armado en un espacio asignado aledaño a el proyecto o ser armado en su ubicación final.

2.3.1 Puentes. El Sistema prefabricado permite la construcción de grandes proyectos civiles, entre ellos están los puentes segmentados, este tipo de puente tiene su origen en el sistema postensado y la tecnología en materiales desarrollados posteriormente a la segunda guerra mundial; una característica de este tipo de puente son los vanos de gran longitud, generando que la metodología a emplear para fabricar los primeros elementos fuera armarlos y fundirlos en sitios donde existieran voladizos prolongados, además de usar formaletas móviles. En esencia los puentes segmentados aportan al proyecto un desarrollo eficiente, producción en serie de los elementos de dovelas prefabricadas, elimina el costo de formaleta en valles profundos y el transporte del mismo; en el caso de las ciudades en una solución óptima contra las restricciones en las zonas de congestión urbana y áreas ambientalmente sensibles.

El ejemplo más destacado de puentes segmentados es el viaducto de Linn Cove, localizado en la montaña Grandfather en el estado de Carolina del Norte (Moreton, 1990, p. 382), este puente fue construido desde la cima, incluyendo la cimentaciones y muelles a su alrededor con el de conservar el medio ambiente a su alrededor; el diseño de este estilo de puente ha sido implementado en el estado de Florida durante los últimos diez años, se tiene un registro de 31 estructuras construidas en base a este sistema, destacando el puente atirantado Sunshine Skyway, el puente Long Key fue el primer puente prefabricado segmentado construido en el estado de Florida (Moreton, 1990, p. 390).



Figura 2. Puente Long Key, Florida. West Palm Beach TV. (2019). Adaptado de: Florida Key's Seven Mile Bridge temporarily closed for footrace Saturday morning. <https://www.wptv.com/news/state/florida-keys-seven-mile-bridge-to-close-for-footrace-saturday>

Los puentes segmentados prefabricados se conforman de unidades prefabricadas individuales, elaboradas en planta o en sitio, estos elementos se izan y se unen mediante la tensión de cables que conformaran posteriormente el tramo o voladizo, dentro de este sistema se pueden reconocer derivar una clasificación basado en la metodología de construcción:

Vano a vano, todos los segmentos de un tramo entre pilares se erigen para formar un pórtico de soporte especial y se tensionan posteriormente de realizar juntas de cierre en uno o ambos extremos. La construcción se puede dar mediante dovelas previamente ensambladas o un vano completamente prefabricado.

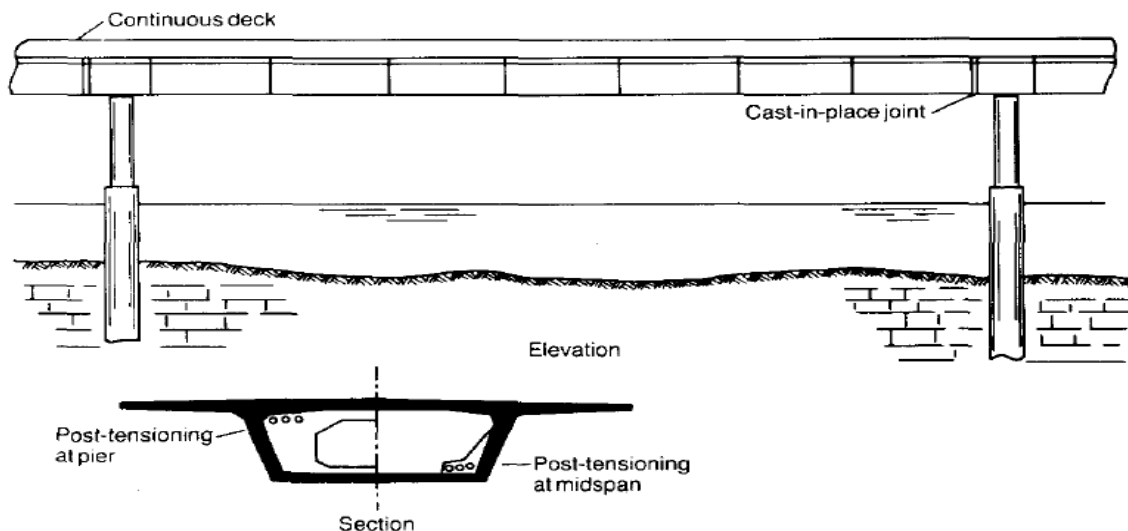


Figura 3. Esquema típico superestructura vano a vano. Adaptado de: Moreton A.J. (1990). Segmental bridge construction in Florida: a review and perspective.

Voladizo equilibrado, los segmentos se erigen secuencialmente en un voladizo a cada lado de un segmento inicial ubicado en la parte superior del muelle. La estabilidad es proporcionada por una torre temporal u otro soporte cerca del muelle.

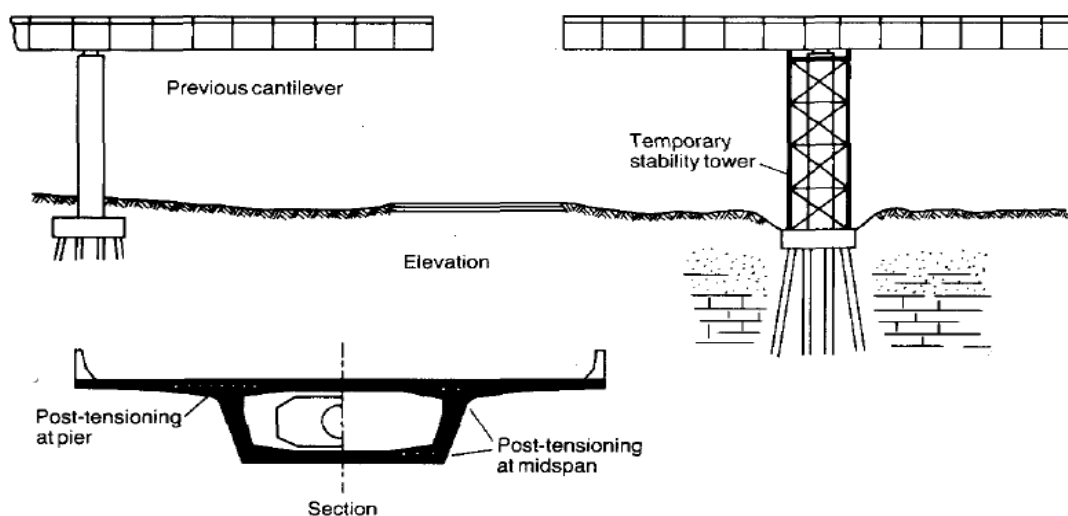


Figura 4. Esquema típico superestructura voladizo equilibrado. Adaptado de: Moreton A.J. (1990). Segmental bridge construction in Florida: a review and perspective.

Voladizo progresivo, los segmentos se erigen en voladizo en una sola dirección, comenzando en un extremo del puente y avanzando sobre los muelles en secuencia. Se necesitarán muelles o torres temporales para facilitar la construcción en voladizo entre muelles.

En todas las metodologías de construcción, el segmento prefabricado se fabrica de manera especial en forma de celdas, donde el segmento de dovela se une enfrentando a otra dovela ya puesta en sitio, logrando así desarrollar la unión entre elementos. La economía estructural y eficiencia en materiales se ha alcanzado en la metodología de construcción segmentada gracias a la continuidad en las superestructuras en comparación a las vigas tradicionales simples; además la continuidad en la superestructura favorece a la reducción de la carga muerta en la estructura global, beneficiando el ahorro en las cantidades en la cimentación y subestructura del puente, en general la metodología en construcción segmentada va de la mano con la eficiencia estructural y economía.

2.3.1.1 Metodología ABC (*Accelerated Bridge Construction*). La construcción de puentes en la mayoría de los casos genera retrasos en el tráfico, incurren en costos medidos en tiempo y dinero, el incremento de los proyectos en autopistas alrededor de Estados Unidos ha generado en los departamentos de tránsito la necesidad de elaborar metodologías que ofrezcan ventajas en la construcción rápida, disminución en la interrupción del tráfico, reducción en el tiempo de entrega del proyecto. Accelerate Bridge Construction (ABC), es la metodología que ha empezado a tomar fuerza en los Estados Unidos y en otros países del mundo, la metodología ABC se enfoca en métodos innovadores para disminuir el tiempo de construcción de los puentes; por lo general, los elementos del puente son contruidos fuera del sitio del proyecto o del área de tráfico, una vez

finalizado los elementos o una sección completa del puente, se transportan al sitio y se instalan en el menor tiempo posible.

La metodología ABC ha conseguido minimizar los peligros que proporciona el tráfico para el desarrollo del proyecto y proporciona mejoras en la infraestructura a un ritmo acelerado, los resultados de la metodología se ven reflejados en el servicio prestado a los usuarios y la economía de la region (Khaleghi, 2010, p. 3). La metodología requiere una construcción especial que normalmente exige un costo elevado en el presupuesto, comparado con un día laboral en obra de un proyecto convencional, los costos de entrega de proyectos con metodología ABC podrían generar un aumento de 30% a 100% (khaleghi, 2010, p. 6) por causa de su menor eficiencia. Sin embargo, la metodología provee beneficio económicos substanciales que compensa los elevados costos, la construcción de puentes convencionales induce a retrasos de tráfico y congestión durante un periodo de tiempo indeterminado, indirectamente afecta la calidad del aire por causa del aumento de las emisiones de los vehículos al estar inmóviles por periodos de tiempos indeterminados; además, el servicio inoportuno en la mano de obra puede incurrir en costos significativos en el transporte de una región, en algunos casos los costos asociados al público por demoras en el trafico pueden llegar a decenas de miles de dólares por día laborable.



Figura 5. Construcción del modelo de estudio en la universidad de Washington. Adaptado de: Bijan Khaleghi. (2010). Washinton State Departamente of Transportation Plan for Accelerated Bridge Construction. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Reach Board

La cuestión del detallado del sistema de la subestructura no ha sido un pormenor para ejecutar una construcción rápida, a su vez se ha logrado un rendimiento sísmico satisfactorio. La universidad de Washington ha desarrollado ensayos de laboratorio en puentes prefabricados de tres segmentos en la zona sísmica alta del oeste de Washington, los estudios destacaron el uso de las vigas prefabricadas en la superestructura basado en su durabilidad, bajo costo de mantenimiento y ciclo de vida; el uso del prefabricado trae consigo aumento en la seguridad en las operaciones y una convivencia amena con el público durante la construcción al reducir los cierres viales y eliminar la ocupación innecesaria de carriles por maquinaria o materiales en obra. Estas conclusiones

reflejan los beneficios en seguridad y movilidad para la construcción de puentes que manifiesta la metodología ABC en las metrópolis.

3. Tipos de Conexiones

Desde el punto de vista estructural, la conexión es un aspecto muy importante en las construcciones prefabricadas, es por esto que muros, escaleras, cimentaciones, vigas y losas deben conectarse formando un conjunto que, aunque la calidad de sus componentes son parte fundamental del buen comportamiento de la estructura, son las conexiones las que finalmente establecen el funcionamiento o comportamiento de una estructura completa frente a cargas sísmicas o gravitacionales.

Así mismo en el momento de hablar de los tipos de conexiones existentes se debe primero determinar su comportamiento estructural y su forma constructiva para poder llegar a una correcta clasificación de ellas.

3.1 Tipos de conexiones según su comportamiento estructural

En la actualidad, podemos clasificar las conexiones de diversas formas, una de ellas es por el comportamiento estructural al ser sometidas a cargas verticales, horizontales o en combinación de estas y se dividen en: Conexiones emulativas o sistemas monolíticos equivalentes y las conexiones no emulativas o sistemas articulados.

3.1.1 Conexiones Emulativas. Son conexiones cuyas capacidades son similares a aquellas que han sido monolíticamente efectuadas en sitio, en cuanto a respuesta de resistencia y comportamiento ante cargas sísmicas o gravitacionales.

Este tipo de conexión a su vez, se divide en dos subgrupos: Conexiones fuertes y conexiones dúctiles, esta clasificación depende de la ubicación donde se pretende que ocurra la deformación inelástica, cuando esta deformación ocurre en la conexión se conoce como dúctil y si este comportamiento ocurre en el elemento prefabricado se conoce como fuerte.

Conexiones fuertes: De acuerdo con el UBC (1997) y citado por (Reinoso, Rodriguez, Betancourt, 2000, p. 50):

Una conexión fuerte es aquella que permanece elástica mientras que las zonas diseñadas para tener un comportamiento inelástico tienen incursiones inelásticas para el sismo de diseño considerado por el reglamento empleado.

Además lo describe (Penagos, 2017, p. 33) como conexiones que resultan ser más resistentes que el elemento prefabricado, permaneciendo en la zona elástica con el fin de satisfacer la demanda de ductilidad ante una carga lateral en la estructura.

Conexiones Dúctiles: Son conexiones que se diseñan para que lleguen a la zona post-elástica cuando la estructura se vea sometida a una carga lateral sísmica severa. Al igual que la construcción in-situ, estas conexiones pueden hacer extender la región de la rótula plástica a lo

largo del extremo del elemento. Experimentalmente se ha probado que cuando esta conexión se diseña y se construye adecuadamente su desempeño es bastante bueno (FIB, 2003, p. 201-207).

3.1.2 Conexiones no Emulativas. Las conexiones no emulativas son aquellas que no imitan el comportamiento estructural de una conexión construida in situ, esto quiere decir que su capacidad de disipación de energía no se hace a través de daños en los elementos estructurales, sino por medio de dispositivos que absorben esta energía. (Penagos, 2017, p. 33)

A esto, se considera que este tipo de conexiones resultan incluso más débiles que los elementos prefabricados que conforman el conjunto o unión.

Este tipo de conexiones se dividen en dos subgrupos: Conexiones de ductilidad limitada y conexiones dúctiles.

Conexiones de ductilidad limitada: En este tipo de conexiones los elementos que conforman el conjunto o unión, resultan con un desempeño menor que el de los componentes estructurales que forman el ensamble y son usadas en estructuras que se desempeñan en el rango elástico y que poseen ductilidad limitada. Su capacidad de disipación se da a través de mecanismos de falla local de los elementos que conforman el conjunto. Dentro de esta categorización, se encuentran algunas conexiones de tipo soldada y Pernada.

Conexiones dúctiles: Para este tipo de conexiones, el área de plastificación de los elementos, “está determinado por la localización de los planos de falla definidos entre la unión de los

elementos prefabricados lo que ocasiona una concentración de esfuerzos mayor en las barras de refuerzo” (Maya, 2011, p. 18). Esto significa que la deformación del refuerzo se distribuye en una longitud mucho menor que aquellas conexiones tipo emulativas dúctiles y por lo general dicha longitud está determinada por la abertura de la fisura en la unión de los elementos prefabricados y la longitud de pérdida de adherencia en la viga y en el interior del nudo.

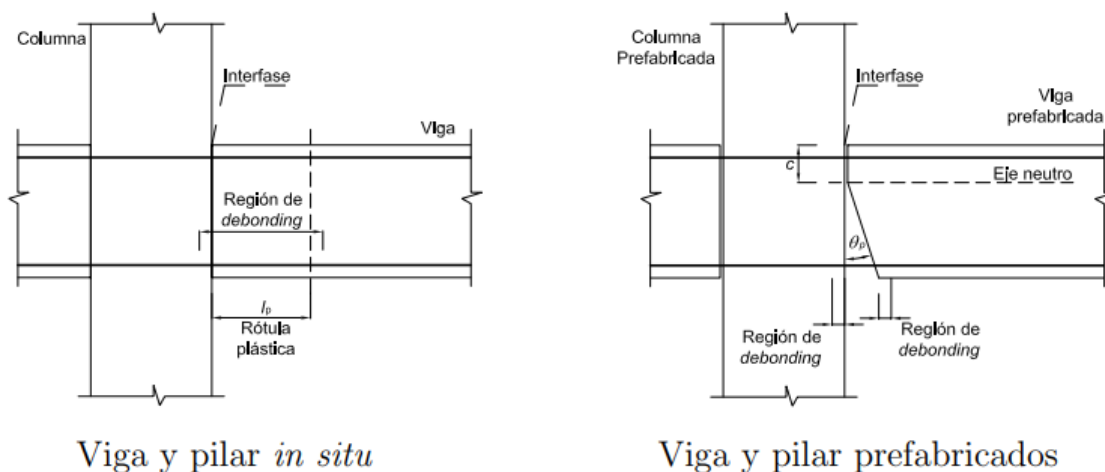


Figura 6. Regiones inelásticas en elementos fabricados In situ y elementos prefabricados. Adaptado de: (Englekirk 2003) citado en Maya Luis (2011), Estudio de esestructuras aporticadas prefabricadas con uniones basadas en hormigones con fibras, Universidad politécnica de Madrid, Madrid, España.

En la figura 6 se puede observar esquemáticamente un resumen de los tipos de conexiones anteriormente mencionados.

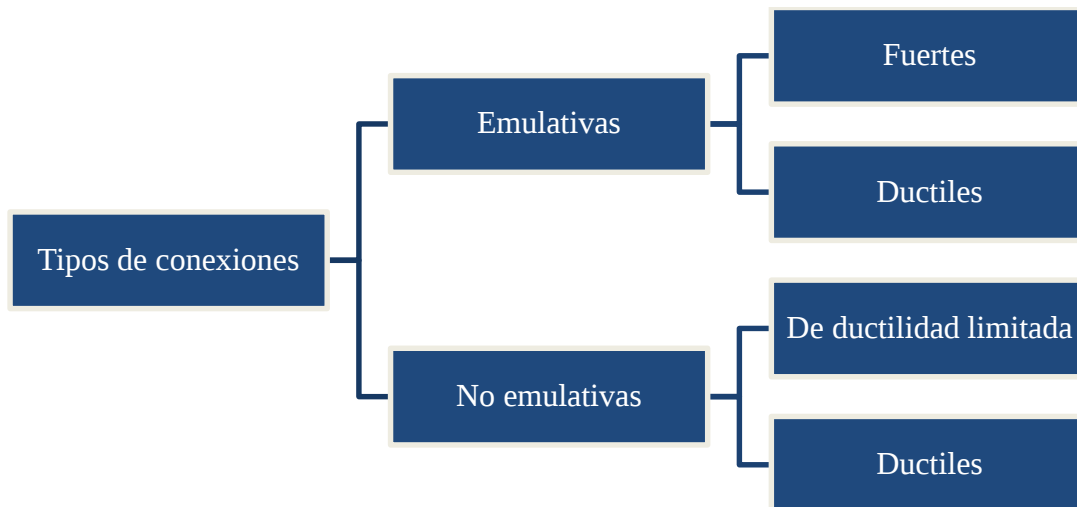


Figura 7. Tipos de las conexiones según su comportamiento estructural.

3.2 Tipos de conexiones según su forma constructiva

Así mismo, las condiciones de construcción hacen que las conexiones puedan tener otro tipo de clasificación según su técnica de fabricación.

3.2.1 Conexiones Húmedas. Son aquellas conexiones “capaces de tener incursiones cíclicas inelásticas”, característico de sismos, ya sean intensos o moderados, haciendo que la resistencia de la estructura no se vea afectada. En este tipo de conexiones se usa concreto mezclado en obra o mortero para llenar los vacíos entre aceros de refuerzo existente en las conexiones. (Reinoso, 2000, p. 50).

No obstante, en este tipo de conexiones se emplea cualquier tipo de método de conexión de acero de refuerzo impuesto por el ACI 318-14 (Traslapos o conectores mecánicos).

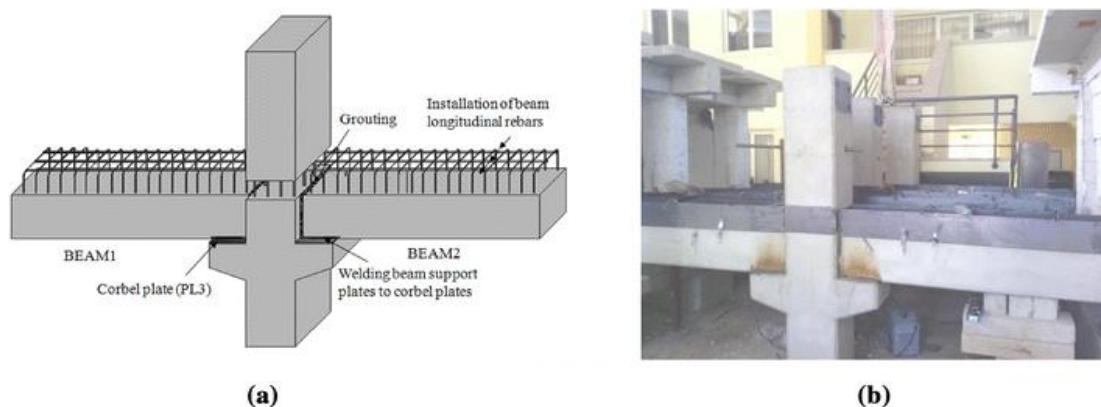


Figura 8. (a) Esquema para el proceso de instalación de muestras de conexión de viga y columna prefabricada de tipo “húmeda”, (b) Conexión luego de la fundición del concreto de acabado. Adaptado de: Girgin, SC, Misir, IS y Kaharaman, S. Int J Concr Struct Mater (2017). Experimental Cyclic Behavior of Precast Hybrid Beam-Column Connections with Welded Components, International Journal of Concrete Structures and Materials, volume 11, pp 229-245, Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40069-017-0190-y>

3.2.2 Conexiones post-tensadas. En este tipo de conexiones, se ensamblan los elementos prefabricados a través de cables de acero que funcionan gracias a la alta fuerza de tensión impuesta en ellos lo que hace que resulte una excelente solución en marcos prefabricados de concreto. No obstante, necesitan de un sistema técnico y de cálculo mucho más complejo.

Durante su construcción se debe tener especial cuidado sobre todo en el proceso de colocación de los ductos y el tensionado de los cables con el fin de evitar esfuerzos excesivos que afecten el elemento, así mismo es necesario que las columnas tengan ménsulas con el fin de evitar los puntales y en el dado caso que la columna no las posea, se debe proveer la instalación de puntales temporales que soporten la viga hasta que se termine la conexión.



Figura 9. Proceso de post-tensado entre columna y viga prefabricada. Adaptado de: Midstate Precast, L.P (s.f) Concrete solution for high-performance buildings, Recuperado de: <https://csengineermag.com/article/concrete-solution-for-high-performance-buildings/>

3.2.3 Conexiones Pernadas. Las conexiones pernadas se realiza fijando los miembros prefabricados por medio de tornillos los cuales tienen la función de transmitir los esfuerzos. Para este tipo de conexión se debe considerar dos tipos de fuerzas, la de tensión y corte (Lin y Yoda, 2017, p. 111-136) a la cual estará sometida dicha unión, así mismo se debe establecer la capacidad de rotación del elemento ante eventos sísmicos o cargas laterales que determinan si la conexión es rígida o flexible.



Figura 10. Detalle de conexión pernada. Adaptado de: Pikko group (s.f), Bolted Column Connectiosn, Recuperado de: <https://www.pikko.com/products/bolted-column-connections/overview/>

Este tipo de conexiones requieren una alta precisión en el tamaño de agujeros y ubicación de los pernos, así como una protección contra la corrosión y el fuego (Arteneva, 2018, p. 12) con el fin de evitar deformaciones excesivas que lleven las partes a su punto de ruptura.

3.2.4 Conexiones Mecánicas. Son conexiones que utilizan el traslapo de refuerzo longitudinal a través de acopladores mecánicos. Estas conexiones funcionan por trabe, transmitiendo los esfuerzos de tracción en la barra como un esfuerzo cortante en los acopladores. Estos acopladores pueden ser roscados, de encerramiento o de encapsulamiento relleno de mortero o epóxico de alta Resistencia (Penagos, 2017, p. 36).

3.2.5 Conexiones Soldadas. Este tipo de conexiones se dan, soldando placas. Desde hace mucho tiempo se vienen usando, pese a que poco a poco su uso ha ido disminuyendo ya que resultan costosas y poco apropiadas ante cargas sísmicas, observándose fallas en ellas, ya que la naturaleza de este tipo de conexión es incapaz de desarrollar ductilidad durante solicitaciones sísmicas (Rodríguez, 2001, p. 8-9). Con un historial de comportamiento poco satisfactorio, no se recomienda el uso de este tipo de conexiones en zonas de moderado y alto riesgo sísmico.



Figura 11. Conexión típica soldada. Adaptado de: Zermeño et al., 1992 citado en Rodríguez, M., y Torres, M. (2012). Evaluación del comportamiento sísmico de conexiones trabe-columna de concreto prefabricado con soldadura en las barras de refuerzo- cambios necesarios en la normativa mexicana para el diseño sísmico de edificios de concreto. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (87), 95-114.

En la figura 12 se puede observar esquemáticamente un resumen de los tipos de conexiones anteriormente mencionados.

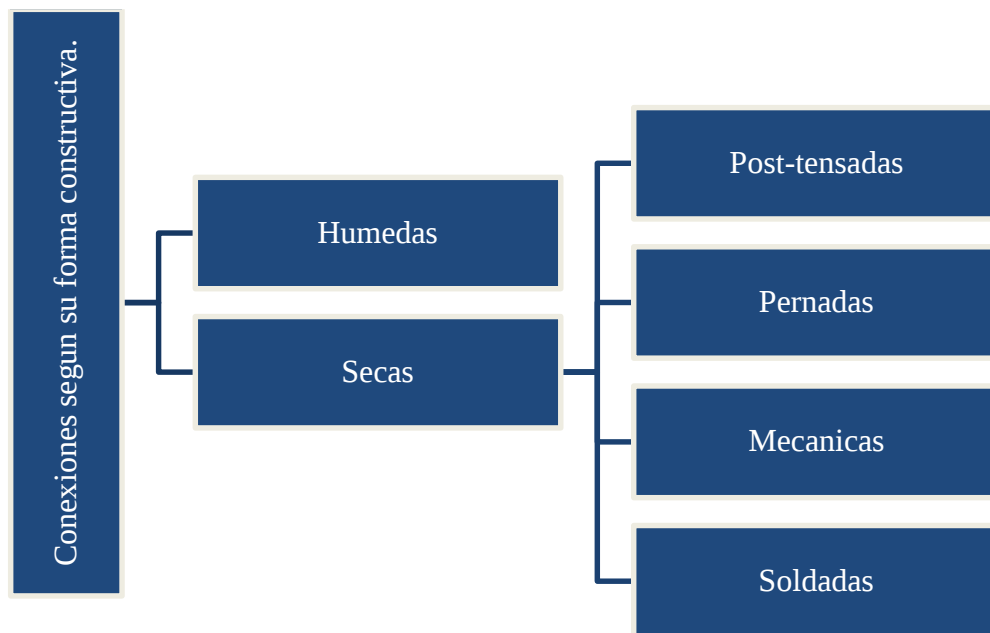


Figura 12. Clasificación de las conexiones según su forma constructiva.

4. Criterios Normativos

Los criterios tratados a continuación son extraídos de las normas ACI 318 y Euro Código, ambas normas son internacionales provenientes de países donde el prefabricado ha presentado grandes avances y su aplicación es más frecuente en soluciones constructivas comparado con la realidad en otros países. Las normativas referenciadas no presentan gran variación desde el punto de vista del análisis estructural, ambas coinciden en los puntos de importancia a tener en cuenta en el diseño de elementos prefabricados y lo influyente que es garantizar la transferencia de fuerzas entre los elementos que hacen parte del sistema estructural global.

4.1 Generalidades del Análisis

El Euro Código establece criterios normativos para ser aplicado a estructuras constituidas por elementos de concreto prefabricado, para ello establece conceptos en el diseño y detallado de estos elementos:

- Situaciones específicas
- Conexiones y uniones entre elementos

Las situaciones transitorias son descritas en el Euro Código (Euro Código, 2004, p. 172)

- Desmoldeo
- Transporte al patio de almacenamiento
- Almacenamiento (soporte y condiciones de carga)
- Transporte al sitio de izado (levantamiento)
- Construcción (montaje)

Estas situaciones transitorias serán consideradas en casos relevantes, sus efectos dinámicos pueden influir en el desempeño de los elementos en su estado final. El diseño de cualquier elemento prefabricado debe haber considerado condiciones de carga, las cuales regirán su funcionamiento, todas sus etapas desde el diseño hasta el montaje deben ser tenidas en cuenta, los esfuerzos desarrollados en los elementos prefabricados durante el período que va entre el momento en que se coloca el concreto y la conexión final, pueden ser mayores que los esfuerzos para cargas de servicio (ACI comité 318, 2014, n. 16.2.1), cualquier procedimiento a emplear en prefabricado debe cumplir necesariamente la reglamentación.

La ACI 318 en su desarrollo expresa que la construcción de elementos prefabricados debe enfocar máxima atención en el diseño de conexiones entre elementos, debido que estos elementos incorporan la transmisión de fuerzas por retracción, deformaciones elásticas, fuerzas por sismo, entre otras, cuando se incorporen elementos prefabricados a un sistema estructural, las fuerzas y deformaciones que se produzcan dentro y junto a las conexiones deben ser incluidas en el diseño (ACI comité 318, 2014, n. 16.2.2). El Euro Código también hace énfasis en la consideración de conexiones y uniones entre elementos temporales y permanentes, pero adicionando las situaciones transitorias, las cuales pueden producir efectos dinámicos o cargas dinámicas como por ejemplo el izado y ensamble de una viga, sin embargo estas situaciones no se aplican en casos de accidentes, el código no contempla el cálculo para la carga dinámica pero la asume con el aumento de la carga estática al multiplicarla por un factor entre 0.8-0.12, el valor de dicho factor se rige dependiendo si los efectos estáticos fueron favorables o desfavorables, también se debe tener en cuenta que la construcción in situ considera situaciones transitorias que deben ser evaluadas. Existe una aclaración para el cálculo de la resistencia a compresión de los elementos de concreto prefabricado, la resistencia del concreto a una edad menor a 28 días debe sustituirse por la edad ajustada por temperatura (f_{cmp}) (Euro Código, 2004, p. 173).

Ecuación de curado con calor de concreto.

$$f_{cm}(t) = f_{cmp} + \frac{f_{cm} - f_{cmp}}{\log(28 - t_p + 1)} \log(t - t_p + 1)$$

f_{cmp} , es la resistencia media a la compresión medida después del curado térmico. Esta sección del código se enfoca en el proceso del curado por calor y su influencia en la resistencia a la compresión, propiedades de deformación y contracción del concreto; el aumento de la edad por

calor del concreto concibe un cambio en el comportamiento del aglomerado conduciendo a disminuir los efectos de la fluencia asociados a las deformaciones por gradiente de humedad y aplicación de una tensión permanente, en elementos prefabricados se puede suponer que la tensión de contracción no es significativa durante el calor y a su vez es despreciable (Euro Código, 2004, p. 173).

Enfatizando en el análisis estructural de elementos prefabricados, el Euro Código propone una serie de criterios con respecto al comportamiento de los elementos en sus etapas constructivas y del sistema estructural enfatizando en las conexiones entre elementos; no solamente se enfoca entre elementos prefabricados sino en casos donde coexiste prefabricado y concreto reforzado, el diseñador debe desarrollar un análisis compuesto de miembros desde su funcionamiento hasta la geometría y distribución de espacio in situ, se debe priorizar la geometría y propiedades apropiadas en la acción contra el hormigón in situ y unidades prefabricadas (Euro Código, 2004, p. 174), el funcionamiento global de una estructura puede mejorar considerablemente con la modificación en los detalles relacionados al refuerzo, las conexiones y ubicación de elementos. Un criterio importante es la distribución de fuerzas entre elementos va considerar el plano donde estén aplicadas e involucrara más factores para en el análisis del desempeño estructural, en el caso específico de las cargas puntuales y lineales, la garantía de su correcta distribución va de la mano con la rigidez torsional del elemento y la capacidad de transmitir la fuerzas cortante en las juntas de unión, la distribución de fuerzas perpendiculares al plano de los elementos debe establecerse por medio de análisis o ensayos (ACI comité 318, 2014, n. 16.3.1), en el caso de las fuerzas presentes en el plano, pueden participar fuerzas de tracción, compresión o cortante, actuando en el diafragma de los elementos de losa, la trayectoria de las fuerzas en el plano debe ser continua a

través de las conexiones como de los elementos (ACI comité 318, 2014, n. 16.3.2), este criterio normativo se consigue con la puesta del refuerzo principal en los elementos que participen en la transferencia de fuerzas.

En el caso de las conexiones, los efectos que genera la restricción horizontal causada por la fricción del peso propio del elemento aumentan o disminuyen su impacto dependiendo de otras características como la esbeltez, área de carga y sección, para los pesos propios de los elementos no se define una proporcionalidad aplicable, los efectos beneficiosos de la restricción horizontal causada por la fricción debida al peso de cualquier elemento soportado solo se pueden usar en zonas no sísmicas (Euro Código, 2004, p. 175) no solamente se debe considerar la zona sísmica como única fuerza en interacción, también existe la posibilidad de impacto por carga que afecte el desempeño de los elementos en conjunto, en ambos casos tendría como consecuencia la neutralización temporal de las reacciones por compresión que se relacionan de forma directa a las restricciones por fricción, esto se aplica para prefabricados producidos en fabrica como los formados in situ. Las restricciones adicionales no consideran la fricción como único medio para obtener la estabilidad estructural, adicionalmente la geometría y la disposición los apoyos entre elementos juegan un papel importante para la transferencia de carga, cualquier desigualdad en fuerzas se puede manifestar en momentos traslacionales irreversibles, las disposiciones de apoyos tipo rodamiento excluyen la posibilidad de acumulación de deslizamientos irreversibles de los elementos, como los causados por un comportamiento desigual en acciones alternativas (por ejemplo, cíclicas) (Euro Código, 2004, p. 178), los efectos mencionados anteriormente deben ser considerados con respecto a la resistencia de la estructura y la integridad de las conexiones.

4.2 Conexiones en muros y losas

El Euro Código también considera las losas prefabricadas debido a los momentos a flexión, los cuales menciona como momentos de restricción, para soportar estos momentos se señala la necesidad de colocar un refuerzo en la parte superior de la losa, este refuerzo esta descrito en el numeral 9.2.1.3 Euro Código, otra alternativa es el uso de unidades de núcleos huecos, ante la presencia de cortante en las conexiones de la placa se debe verificar en el numeral 6.2.5 Euro Código, también se debe verificar la transferencia de fuerzas en el caso específico del uso de unidades de núcleo y el concreto según el numeral 6.2.5 Euro Código, la losa sufre efectos de restricción no intencionados que requieren un refuerzo especial o detallado en el refuerzo.

Las fuerzas en el plano de los muros prefabricados son resultado de la interacción del diafragma con las cargas laterales externas, cuando el comportamiento del sistema requiera que las fuerzas en el plano sean transferidas entre los elementos de un sistema de muro o piso prefabricado debe aplicarse una trayectoria continua de acero o refuerzo (ACI comité 318, 2014, n. 16.3.2). La unión entre elementos de muro y losas puede generar excentricidades y llamar concentraciones de carga vertical en la zona de los extremos del muro, es necesario proporcionar un refuerzo en la zona afectada, en el caso de la aparición de fisuras en el elemento, estas deben ser proporcionales con las fuerzas y el grado de capacidad de disipación de energía. El Euro Código establece condiciones específicas donde no se considera proveer refuerzo en el sistema muro-losa, la carga vertical por unidad de longitud es $\leq 0,5 h \cdot f_{cd}$; la carga puede aumentar a $0.6 h \cdot f_{cd}$ con la consideración de un refuerzo con diámetro $\varnothing \geq 6$ mm y una separación menor o igual a el menor valor entre el espesor del muro o 200 mm $S \leq h$ ó 200 mm (Euro Código, 2004, p. 175), para considerar una carga mayor

se debe revisar la cláusula 10.9.1 Euro Código, al mismo tiempo revisar los efectos torsionales y variación de carga en la parte inferior del muro.

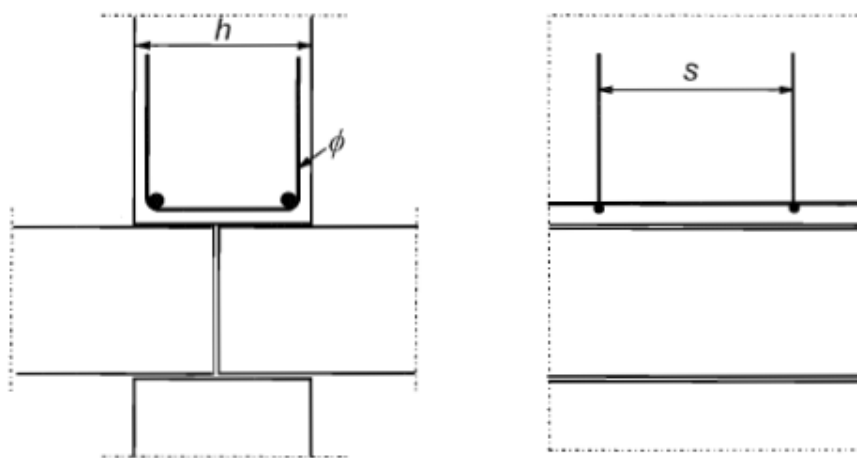


Figura 13. Ejemplo del refuerzo de muro sobre la conexión entre dos losas de piso. Adaptado de: Eurocode 2: Design of Concrete Structures. (2004).

En losas de piso y en paneles de muros prefabricados con anchos menores a 4 m y no estén unidos mecánicamente para inducir una restricción en la dirección transversal, se podrá omitir el uso de un refuerzo transversal que limite el accionar de los esfuerzos por retracción y gradiente por variación de temperatura en la dirección transversal, la condición establecida para el ancho de los elementos no permite que los esfuerzos de retracción y gradiente de temperatura desarrollen una magnitud considerable para afectar el sistema estructural, se permite que los requisitos de refuerzo por retracción y temperatura de 7.12 en la dirección normal al refuerzo por flexión sean omitidos. Esta omisión no se aplica a elementos que requieren el refuerzo para resistir esfuerzos transversales de flexión (ACI comité 318, 2014, n. 16.4.1). Los elementos desarrollan su mayor

magnitud de esfuerzos antes de hacer parte del sistema estructural; la condición en el ancho no aplica en elementos como T simples o dobles.

Es importante considerar en el sistema de losas de piso un análisis de cargas influenciada por la normativa de los productos a usar, dichos productos cumplen muchas funcionalidades en los elementos prefabricados, pero se toma principal atención a su empleo en las conexiones; en el caso específico de las losas, la proporción de conexiones a cortante se debe a la cantidad de elementos adyacentes presentes en el sistema, entre cada elemento existe una distribución de carga transversal. La transferencia de cortante en las conexiones se puede lograr a través de diferentes opciones, el Euro Código menciona tres opciones: conexiones con concreto o grout, conexiones soldadas o Pernada y conexión de refuerzo vertical (Euro Código, 2004, p. 176), las concentraciones de tensión en las conexiones deben considerarse en el detalle del refuerzo a proporcionar.

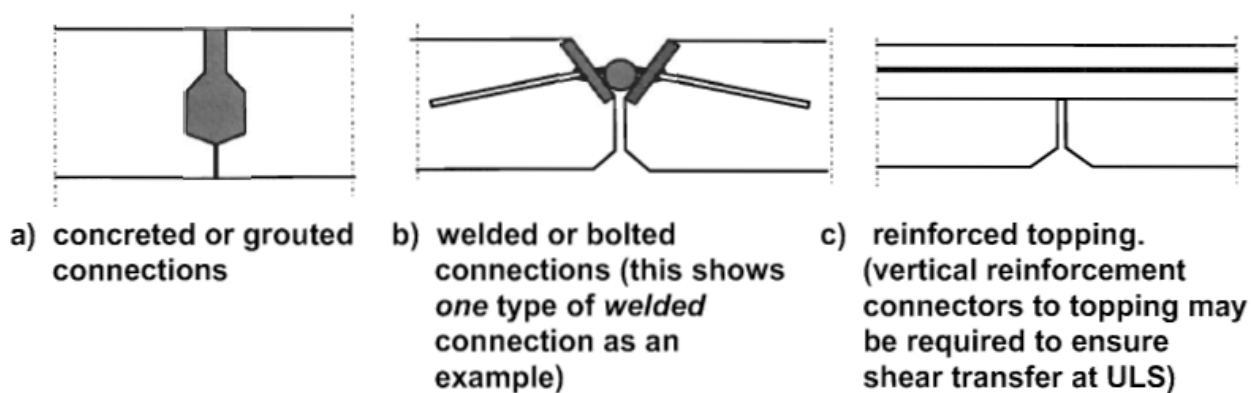


Figura 14. Conexiones a cortante. Adaptado de: Eurocode 2: Design of Concrete Structures (2004)

4.3 Diseño y detalle de conexiones

El detallado de las conexiones para elementos prefabricados de concreto es un aspecto crítico para considerar, el Euro Código propone recomendaciones específicas con respecto a los materiales a emplear en juntas inyectadas, reglas generales para el detalle y diseño de las conexiones; y consideraciones para la transferencia de fuerzas.

El código no limita a el uso de materiales específicos, pero manifiesta una serie de características a cumplir, los materiales usados para las conexiones deben ser: estables y duraderos para la vida útil de la estructura; química y físicamente compatible; protección ante adversidades químicas y físicas; igual resistencia a el fuego como el de la estructura (Euro Código, 2004, p. 177). La norma ACI 318 no señala discrepancia respecto al uso de materiales en juntas inyectadas, permite el uso de una variedad de metodologías para conexiones entre elementos, recalca la necesidad de cumplir la transferencia de fuerzas tanto en el plano del elemento como en el plano perpendicular, se permite que las fuerzas transmitidas entre elementos a través de juntas inyectadas con mortero, conectores mecánicos, conexiones con refuerzo de acero o combinación de estos métodos (ACI comité 318, 2014, n. 16.6.1), se recomienda ensayar las conexiones a través del análisis y ensayos de laboratorio con el fin de evaluar la efectividad de transferencia de fuerzas entre elementos; existen casos donde las conexiones se pueden componer de materiales de diferentes propiedades y afectar el comportamiento de la conexión (pernos, soldadura, platinas, etc.), cuando se diseña un conexión usando materiales con diferentes propiedades estructurales, deben considerarse sus rigideces, resistencias y ductilidades relativas (ACI comité 318, 2014, n. 16.6.1).

Dentro de las especificaciones del diseño de conexiones se indica la importancia de la capacidad de la resistir los efectos de las fuerzas aplicadas, asumiendo un buen desempeño ante las deformaciones y aportando a la resistencia de la estructura, también la importancia de evitar disfuncionamiento monolítico de los elementos producidos por los desprendimientos prematuro del material en las zonas débiles, se evitara el desprendimiento prematuro del concreto teniendo en cuenta: movimientos relativos entre elementos, desviaciones, requisitos de ensamblaje, facilidad de ejecución y facilidad de inspección (Euro Código, 2004, p. 178).

Se proporcionan demás reglas específicas para el detalle de las conexiones para asegurar la transferencia de fuerzas de compresión, fuerzas de cortante, fuerzas de tracción y momentos de flexión, las cuales están establecen en las clausulas 10.9.4.1 y 10.9.4.2. En términos de la resistencia , el ACI 318 sugiere procedimientos para la evaluación de la resistencia de los elementos, dentro de sus sustentaciones menciona un concepto importante que aplicara para las disposiciones ante fuerzas de compresión y deflexión, es la transformación de un elemento prefabricado en uno compuesto mediante el concreto fundido en sitio, refiriéndose a todos los elementos prefabricados de concreto y fabricados en obra construidos en etapas diferentes pero interconectados de manera que respondan como una sola unidad; dentro de los procedimientos se destaca la determinación de las cargas de ensayo y su influencia en los elementos evaluados, La carga de ensayo debe ser la carga que, cuando se aplica al elemento prefabricado aislado, induce las mismas fuerzas totales en el refuerzo en el refuerzo a tracción que las que inducirían al cargar el elemento compuesto (ACI comité 318, 2014, n. 16.10.1.2) esta afirmación hace parte del grupo de disposiciones para determinar la aprobación del uso de un elemento prefabricado en el sistema estructural.

Existe un rasgo que hace distinguir la norma ACI 318 y es su enfoque en el contacto del elemento con su apoyo o entre cualquier elemento de apoyo intermedio, al entrar en funcionamiento con respecto al sistema estructural se producirán fuerzas a tracción en el plano de contacto, estas fuerzas deben tenerse presente en el diseño y por ello cabe la consideración de reducir el esfuerzo admisible de confinamiento, el esfuerzo de aplastamiento admisible no debe exceder la resistencia de aplastamiento de cualquiera de las superficies ni del elemento de apoyo (ACI comité 318, 2014, n. 16.6.2.1) es factible optar por el uso de un refuerzo de confinamiento para garantizar un esfuerzo de aplastamiento admisible.

Refiriéndose al sistema de apoyo de los elementos, se aconseja el uso de almohadillas de soporte, estas bases permiten la distribución de las cargas y reacciones concentradas en las superficies de contacto, a su vez restringe los movimientos horizontales y rotacionales disminuyendo los esfuerzos, el sistema de apoyo debe tener dimensiones de diseño determinadas de manera que, después de considerar las tolerancias, la distancia desde el borde del apoyo al extremo del elemento prefabricado en la dirección de la luz sea al menos $L_n/180$ (ACI comité 318, 2014, n. 16.6.2.2) siendo L_n la longitud apoyada, esta longitud varía según los elementos que se encuentren en contacto; también las almohadillas cumplen la función de protección de las zonas de contacto que presentan una carga elevada ante el descascaramiento.

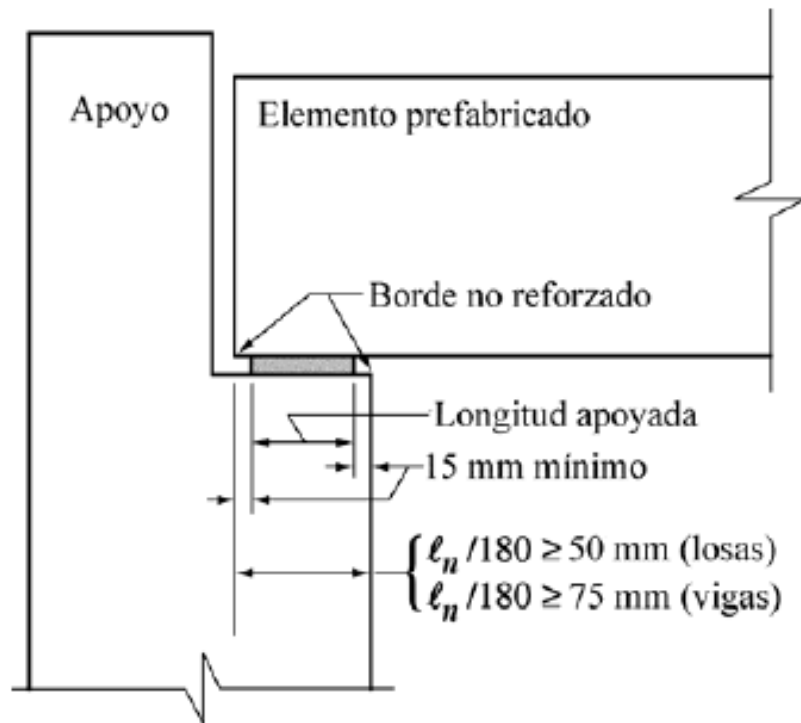


Figura 15. Longitud de apoyo. Adaptado de: ACI Committe 318 (2014)

5. Conexiones prefabricadas para uso en zonas de riesgo de amenaza sísmica alta en Colombia

El concreto prefabricado se ha posicionado como uno de los sistemas más populares, bajo ciertas condiciones, este sistema ofrece mayor eficiencia, economía y estéticamente agradable. Diferentes artículos científicos plasman el uso del sistema en países con regiones de alta actividad sísmica, donde la construcción de edificios prefabricados altos y bajos se ha comportado de forma eficiente ante la incorporación al sistema de muros estructurales y pórticos resistentes a momentos. Existen ejemplos reales de edificaciones bien diseñadas y construidas, que registraron daño menor y

excelente desempeño sísmico, se incluyen los casos informados durante el suceso de gran magnitud de terremotos en los años 2010 y 2011 en Nueva Zelanda (Arango, Blandon, Restrepo y Carmona, 2018, p. 687). Sin embargo, el desafío en el diseño de edificaciones sismo resistentes incorporando elementos prefabricados está en encontrar la metodología correcta para la conexión de elementos, que puedan proporcionar la suficiente rigidez y resistencia ante fuerzas sísmicas, pero también otorgue una capacidad de deformación inelástica y un comportamiento estable en el sistema estructural ante cargas cíclicas. Se han desarrollado múltiples estudios en relación a la capacidad de respuesta de diferentes tipos de conexiones ante cargas impuestas, los resultados demuestran que las conexiones diseñadas bajo las condiciones de resistencia sísmica y asocien elementos prefabricados de concreto, al someterse a deformaciones constantes, presentaran características de resistencia, rigidez, ductilidad y disipación de energía.

La norma sismo resistente NSR-10, norma que rige la construcción en Colombia, presenta el título C- capítulo 16, la normativa para la construcción de estructuras prefabricadas, la aplicación de esta normativa tiene sus dificultades de aplicación debido a que se basa textualmente de la norma americana ACI-318, metodologías planteadas para el diseño y detalle de las conexiones no son posibles de realizar al no contar con los equipos o personal especializado en el país; Colombia dentro de la norma NSR-10 está dividido en zonas de amenaza sísmica representado en el mapa de zonas de amenaza sísmica aplicable en edificaciones en función de las aceleraciones, las cuales se clasifican en alta, intermedia y baja, esta división restringirá o establecerá el uso de las conexiones según la zona donde se construirá la estructura; la NSR-10 no expresa criterios especiales para el diseño de las conexiones basadas en la resistencia sísmica, adicional referencia criterios generales de diseño extraídos del ACI C.16.6 (ACI comité 318, 2014, n. 16.6), el cual aplica disposiciones

generales de concreto reforzado a elementos prefabricados; lograr la asociación de conceptos entre la zonificación sísmica colombiana y el criterio normativo base permitiría la formación de criterios propios aplicables en el diseño de las conexiones y la posibilidad de generar conexiones propias ante la demanda sísmica en cada zona del país.

Adicionalmente se debe resaltar que para la plena “Identificación de un tipo de conexión más adecuado para su uso en Colombia” se deberán tener en cuenta un conjunto de aspectos que influyen de forma directa e indirecta en el uso de sistemas prefabricados y se podrían clasificar en Influyentes y Sub-aspectos tal y como lo describe (Elliott, 2002). Sin embargo, para el desarrollo de este documento se establecerá el diseño y el proceso de producción e instalación como ejes principales para la determinación de un conjunto de conexiones más adecuado, teniendo en cuenta que estos factores tienden a ser considerados en la etapa de pre construcción y que tal y como se ha descrito anteriormente, se requiere de una gran responsabilidad en el desarrollo de esta etapa ya que, una estructura de este tipo tendrá un buen comportamiento ante cargas externas siempre y cuando la respuesta de los elementos individuales sea óptima.

5.1 Parámetros de Evaluación

Los parámetros a evaluar hacen parte de la etapa inicial en la que se verifican las solicitudes y características de la estructura a construir y que hacen parte de aspectos influyentes a la hora de seleccionar la conexión más adecuada. Dentro de estos parámetros tenemos:

5.1.1 Diseño de conexión. Es uno de los parámetros con mayor relevancia en la medida en que el comportamiento de toda la estructura dependerá de cómo se hayan previsto las conexiones entre los elementos prefabricados, así como en una construcción in-situ, en la que se debe garantizar que durante la aplicación de las cargas haya una transferencia de las mismas sin que esto afecte de manera significativa los nudos (conexiones), cumpliendo así con la filosofía de diseño “Columna fuerte, viga débil” que entre otras cosas otorga cierta garantía a la edificación cuando ha sido afectada de que no se produzca un inminente colapso.

Para efectos de esta evaluación veremos el “diseño de la conexión” a partir de algunos parámetros contemplados en el PCI 2008 y que tienen que ver con la capacidad estructural del elemento cuando es sometido a fuerzas externas, entre los cuales están la resistencia, la ductilidad y los requerimientos sísmicos.

Entendiéndose la resistencia como la capacidad de soportar la transferencia de fuerzas gravitacionales, de viento por presión de agua y eventos sísmicos entre los elementos adyacentes durante toda su vida útil (Technology Development Division of the Building and Construction Authority, 2001), la ductilidad como la capacidad de deformación entre el estado límite elástico y la falla (Precast Concrete Institute, 2008) y los requerimientos sísmicos que van ligados a los coeficientes de sitio definidos en la NSR-10 la cual describe las zonas del país que son altamente vulnerables ante este tipo de eventos, ya que la estructura debe ser capaz de desarrollar grandes desplazamientos inelásticos que disipen la energía sin que produzcan el colapso (Precast Concrete Institute, 2008).

5.1.2 Proceso de producción e instalación. Este criterio permite determinar el grado de detalle y dificultad que pueda tener la conexión a evaluar y que va ligado a los costos adicionales que pueda acarrear la estructura cuando se aplican los distintos tipos de conexión. Al igual que la etapa de diseño, esta conlleva un alto grado de responsabilidad ya que cualquier error en la implementación de la conexión y ensamble, puede repercutir en el comportamiento general de la estructura (Penagos, 2017, p. 74).

Se deben tener en cuenta ciertas consideraciones que permiten que la conexión se pueda fabricar e instalar de una manera sencilla (Technology Development Division of the Building and Construction Authority, 2001) y entre las cuales se tienen:

- Evitar la congestión
- Evitar conexiones proyectas
- Minimizar el uso de elementos embebidos
- Evitar operaciones adicionales luego del desencofrado
- Permitir tolerancias constructivas
- Usar elementos estándar
- Usar detalles repetitivos

5.2 Puntaje de Participación

Teniendo en cuenta los parámetros de calificación definidos, se dará un valor conforme a su participación dentro del proceso de selección de la conexión más adecuada para las estructuras ubicadas en regiones de alta amenaza sísmica como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Puntajes de participación de parámetros dentro del proceso de selección.

Parámetro	Participación
Diseño	60%
Proceso constructivo e instalación	40%

5.3 Condición de Evaluación

Teniendo en cuenta los parámetros mencionados se tomarán en cuenta las ventajas y desventajas de los tipos de conexiones “según su forma constructiva” definidos en este documento, así como algunos resultados de ensayos o antecedentes consignados por distintos autores en el mundo y se contrastara dicha información con los aspectos descritos en este numeral.

Con el fin de asignar una calificación se le otorgara un valor al cumplimiento de estos aspectos que van desde 1 a 3, siendo 1 el menos adecuado y 3 el más adecuado, con el fin de facilitar el proceso de selección

5.3.1 Parámetro de diseño.

Tabla 2.

Condiciones para evaluación del parámetro de diseño.

Calificación	Aspecto
3	La capacidad de disipación de la energía se da a través de la transferencia a los miembros contiguos, siguiendo una filosofía de “columna fuerte, viga débil” sin que se vea afectada la conexión y la ductilidad del elemento es alta.
2	La disipación de energía se da en el medio (material de conexión) y los elementos que une, presentando una falla generalizada en toda la conexión, además tiene un grado de ductilidad limitado.
1	La disipación de energía se da a través de la conexión sin dejar que el elemento alcance un comportamiento inelástico que se traduce en fallas del tipo frágil, además presenta poca ductilidad.

5.3.2 Parámetro de proceso constructivo e instalación.

Tabla 3.

Condiciones para evaluación del parámetro de proceso constructivo e instalación.

Calificación	Aspecto
3	El proceso de construcción no requiere el uso de equipos y mano de obra especializada, no requiere de ajustadas tolerancias constructivas y se pueden usar elementos estándar o repetitivos.
2	El proceso de construcción requiere el uso de algunos equipos y mano de obra especializada, conlleva moderadas tolerancias durante el proceso de instalación y puede usar algunos elementos estándar o repetitivos.
1	El proceso constructivo requiere el uso de grandes equipos y mano de obra calificada, no da lugar a tolerancias constructivas y cada conexión tiende a ser única dentro de toda la edificación.

5.4 Ventajas y Desventajas de los tipos de conexión según su “Forma Constructiva”

5.4.1 Conexión tipo húmeda.

5.4.1.1 Ventajas.

- Capaces de tener incursiones cíclicas inelásticas, típicas en sismos moderados o intensos, sin que la resistencia se vea afectada. (Reinoso, 2000, p. 50).
- No requiere el uso de mano de obra especializada.
- No requiere el uso de equipos sofisticados.
- Respuesta estructural semejante a la colada en sitio.

5.4.1.2 Desventajas.

- Tiempos de espera durante el fraguado del concreto.
- Requiere personal especializado en la etapa de diseño.

Con la información recopilada en cuanto a los ensayos realizados a este tipo de conexiones, se puede apreciar que tiene un buen funcionamiento ante la aplicación de cargas sísmicas, ya que permiten que los elementos involucrados tengan un comportamiento inelástico durante un evento sísmico cumpliendo con el concepto de columna fuerte-viga débil, semejante a una conexión monolítica (Zermeño, 1992). Sin embargo, se debe tener especial cuidado en la continuidad y las longitudes de desarrollo del acero de refuerzo de la conexión, el refuerzo inferior no logro desarrollar su capacidad resistente al momento positivo ya que no se contaba con una longitud de desarrollo necesaria y que adicionalmente los estribos cerrados instalados diseñados para lograr la continuidad requerida no cumplieron este objetivo. (Rodriguez y Blandon, 2001, p. 115).

Para finalizar, este método de conexión usado en una estructura que además combiné muros de cortante que ayuden a contrarrestar las cargas laterales, podría funcionar de una manera muy eficiente (Rodriguez y Blandon, 2001, p. 115).

5.4.2 Conexión tipo postensada.

5.4.2.1 Ventajas.

- Buena solución en pórticos prefabricados de concreto con luces grandes entre columnas.
- Altas propiedades de amortiguación de energía histeretica.

5.4.2.2 Desventajas.

- Requiere un desarrollo de cálculo y técnico más especializado.
- Uso de ménsulas, temporales o fijas durante el proceso de ensamble y tensionado.

- Requiere personal capacitado y maquinaria especializada que efectúe las labores de tensionamiento de los cables.
- Requiere una tolerancia muy ajustada.
- No se pueden usar elementos repetitivos.

El resultado de ensayos de muestras a escala en el laboratorio y de experimentación en campo permiten demostrar que este tipo de conexión tienen un buen comportamiento ante las cargas sísmicas tal y como lo demuestran los resultados experimentales de Thnh, Kusunoki, Tasai (2008), quienes expresan que las muestras tienen un buen rendimiento sísmico incluso bajo la acción combinada de una carga gravitacional muy grande y la carga que ocasiona el mayor desplazamiento lateral por piso.

Así mismo se tienen resultados satisfactorios en los ensayos realizados por (Özdil, Arioğlu, Yorulmaz, Manzak, Alper (s.f) los cuales determinan que este tipo de conexiones pueden ser usados fácilmente como una alternativa mejorada a otros sistemas de conexiones resistentes a momentos en áreas susceptibles eventos sísmicos, además dicho sistema es totalmente compatible con el Turkish Seismic Code y Turkish Satandard 3233.

Además, en la Universidad de Canterbury, en Nueva Zelanda se han efectuado ensayos de muros postensados sin adherencia sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles, en lo que finalmente describe (Rahaman y Restrepo, 2000), que dichos especímenes alcanzaron deformaciones relativas del extremo superior del muro respecto a la base cercanas a 0,03, con solo el desprendimiento del recubrimiento en un área de 5 cm² en las esquinas del muro.

Con lo antes descrito, se puede apoyar la tesis de que este tipo de conexiones tiene un comportamiento muy favorable ante eventos sísmicos.

5.4.3 Conexión tipo pernada.

5.4.3.1 Ventajas.

- Fácil instalación y conexión de los elementos prefabricados.
- No requiere de mano de obra especializada.
- Bajos costos de construcción.
- Si alguno de los elementos conectados sufre algún daño, este puede ser remplazado fácilmente.

5.4.3.2 Desventajas.

- El comportamiento de la conexión depende de cómo se diseñe y construya, requiere de un equipo especializado para su diseño y ensayos que garanticen su actuar.
- Requiere de una tolerancia muy ajustada.
- Requiere de un buen detallado en planos.
- Ajuste de orificios que pueden debilitar el material base.

En ensayos realizados con este tipo de conexión, se puede determinar que su desempeño, va ligado a la forma en la que se conectan los elementos entre sí, ya que se puede dar el caso en el que se proyecten para recibir momentos o simplemente que permitan transferir esfuerzos cortantes.

Tal y como se puede apreciar en los ensayos realizados por Ahmad Baharuddin Abd. Rahman, Dennis Chan Paul Leong, A.Azis Saim, ohd. Hanim Osman (2006) en el cual ensayan un tipo de conexión simple y concluyen que la resistencia a momento y la rigidez de este tipo de conexión es muy minina, por lo que no podría hacer parte del sistema de resistencia a cargas laterales y se hace necesario que se empleen otros sistemas como riostras o muros de cortante que permitan garantizar la estabilidad de la obra.

En contraste con esto, se observa que, en los ensayos realizados por Selim Pul, Mehment Senturk (2017), es posible construir marcos resistentes a momentos siempre y cuando se use la conexión sugerida por los autores en dicho estudio, que a su vez garantiza su uso en regiones sísmicas.

Lo anterior permite ilustrar lo que se toma como “Desventaja” y es que se debe proporcionar un diseño muy especializado con el fin de evitar comportamientos de la conexión no deseados.

5.4.4 Conexión tipo mecánica.

5.4.4.1 Ventajas.

- Bajo costo de instalación y rapidez en construcción
- Asegura la continuidad y distribución de las cargas en el refuerzo, sin depender de la condición del concreto.
- Se pueden usar conexiones tipo “estándar”

5.4.4.2 Desventajas.

- Requiere de equipos especializados durante el proceso de instalación y acople de las partes.
- El tipo de conector no permite que la conexión presente deformaciones en el rango inelástico.

5.4.5 Conexión tipo soldada.

5.4.5.1 Ventajas.

- Rapidez en la conexión.
- No requiere maquinaria ni equipos especializados.

5.4.5.2 Desventajas.

- No tiene la capacidad de deformación suficiente para resistir las acciones sísmicas (IV Simposio Nacional de Mampostería de Vivienda, 2015, p. 4)
- Ductilidad muy baja.
- Requiere de mano de obra calificada.
- Nivel de tolerancia alto.
- Nivel de detalle y especificación en planos.
- Alto costo y poca eficiencia

De la información encontrada acerca de los ensayos a este tipo de conexión nos podemos referir a los resultados citados por (Rodríguez M, Torres M., 2012, p. 108) los cuales fueron obtenidos por Zermeño et al. (1992) y Rodríguez y Rodríguez Asabay (2006) en los que se observa que en las conexiones se fractura la barra soldada para valores calculados de la deformación a tracción de

estas barras en el intervalo de 0,02 a 0,05 ya que debido a su naturaleza, acumulan deformaciones permanentes que ocasionan la fractura de la barra sin que esta alcance su capacidad resistente a flexión positiva, demostrando que tienen poca o nula capacidad de deformación ante cargas sísmicas.

5.5 Calificación de Aspectos

5.5.1 Calificación cualitativa según los aspectos definidos.

Tabla 4.

Calificación de tipos de conexión según los parámetros de evaluación.

Aspecto	Diseño	Proceso constructivo e instalación
Tipo de conexión		
Húmeda	2	3
Postensada	2	2
Pernada	1	3
Mecánica	1	2
Soldada	1	2

5.5.2 Calificación ponderada de los parámetros del proceso de selección.

Tabla 5. *Calificación ponderada de tipos de conexión dentro del proceso de selección.*

Tipo de conexión	% Parámetro de selección	Diseño	Proceso constructivo e instalación	Total
Húmeda	30%	40%		80%
Postensada	30%	20%		50%
Pernada	0%	40%		40%
Mecánica	0%	20%		20%
Soldada	0%	20%		20%

6. Conclusiones

La información recopilada en las diferentes fuentes de búsqueda muestra un panorama escaso para los ensayos de estructuras prefabricadas, específicamente la falta de investigación en nuestro país referente a este tema, siendo una de las principales causas de la poca aplicación de este sistema estructural. Se hace necesario desde la academia el fortalecimiento cognitivo e investigativo para la innovación de metodologías en el proceso constructivo, así como el asimilar técnicas desarrolladas en otros países para adaptarlas a Colombia según las condiciones inherentes a nuestra ingeniería y desarrollo tecnológico.

La normativa colombiana no presenta un progreso propio ante el desarrollo del sistema estructural, la adaptación de la norma American Concrete Institute-ACI 318 ha sido demasiado textual y no hubo la intención de desarrollar una norma compatible ante el riesgo sísmico presente en el país, los criterios de diseño deben reflejar conceptualmente la acción sísmica registrada históricamente por sucesos anteriores, buena parte de las incertidumbres ante el diseño de estructuras prefabricadas surge del desconocimiento de los conceptos normativos aplicados y las acciones a las cuales se pueden ver expuesta la construcción.

El tipo de conexión según su forma de construcción con la mayor calificación hace referencia a las construcciones de tipo húmeda ya que cumple con 80% de los aspectos valorados cualitativamente para el proceso de selección, seguido de las conexiones Postensadas con un 50%. Por otro lado, la conexión más desfavorable es la de tipo soldada ya que cuenta con una calificación

de 20%, lo cual demuestra su inadecuado comportamiento ante cargas sísmicas y su complejidad a la hora de efectuar las labores en obra.

Con los resultados anteriores, se sugiere como conexiones favorables para obtener un mejor comportamiento en las zonas de amenaza sísmica alta en Colombia, aquellas que se ejecuten de forma humeda o postensada, debido al grado de ductilidad y respuesta ante la aplicación de cargas laterales, así como la facilidad en el proceso de instalación. Así mismo cabe destacar aquellas que por su comportamiento estructural se definen como emulativas y funcionan de forma similar a las fundidas in-situ, por lo que otorgan una mayor garantía al proceso constructivo de la edificación.

Referencias Bibliograficas

- ACI Committe 318 (ACI 318,2014), Bulding Code Requirements for Reinforce Concrete (ACI 318-14). American Concrete Institute, Farmintong Hills, ML
- Ahmad Baharuddin Abd. Rahman, Dennis Chan Paul Leong, A.Azis Saim, ohd. Hanim Osman, (2006) Hybrid beam-to-column connections for precast concrete frames. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia.
- Alver N., Selman M., & Akgun O. (Octubre de 2012). The effect of short cantilever beam formation on the structural behavior of precast post-tensioned connections. *Construction and Building Materials*, 35, 232-239. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.03.012.
- Arango J., Blandon C., Restrepo J., & Cardona F. (2018). Sismic Perfomance of Precast concrete column-to-column lap-splice connections. *Engineering Structures*.
- Arteneva M. (2018) Connections of wall precast concrete elements, Saimaa University of Applied Sciences.
- BCA (2001). *Structural Precast Concrete Handbook*. Singapore: Technology Development Division of the Building and Construction Authority.
- Buron M., Ordoñez D. (1997) M.Sc. Evolution of building prefabrication in Spain half century of experience.
- Bustamante C. (2007). Construcciones prefabricadas crecieron 167% en 5 años, Redacción Portafolio; Colombia.

- C.e Özdil E., Ph.D Arioglu E., Prof. Yorulmaz M., M.S. Manzak O., M.S. Alper T. (s.f) Full scale testing of post tensioned moment resisting connections of a precast concrete structure. Yapi Markezi Prefabrication Incorporated, Istanbul, Turkey.
- Cirvini S. (2001), La Edificación “Contra Temblores” Aportes para una historia de la construcción sismorresistente en Argentina, Mendoza, Argentina.
- Consejo Privado de Competitividad, CPC., (2011). Informe nacional de competitividad (2010-2011). Bogotá, Colombia.
- Cordovi Y., Vidaud I. (2017). Desde la tecnología del prefabricado actual hasta la prefabricación contra pedido, Santiago de Cuba, Cuba: Universidad del oriente.
- Elliott, K. (2002). Precast Concrete Structures. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Estructuras prefabricadas de Hormigón, Preinco S.A. (2005).
- Euro Code 2: Design of Concrete Structures (2004).
- FIB (2003). Seismic design of precast concrete building structures. FIB Publications, Bulletin N° 27. 201-203.
- Humbert, L. (2014) Design and construction preferences for connections in the precast concrete industry of South Africa. Stellenbosch University.
- IV Simposio Nacional de Mampostería y Vivienda, (2005), Veracruz, México.
- Jaroslav H., L’udovit F., Viktor B., Vladimir B. Experiences with Application of Various Slab-on-girder Bridge Systems in Slovakia.
- Khaleghi B. (2010). Washinton State Departamente of Transportation Plan for Accelerated Bridge Construction. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Reach Board, No. 2200.

- Lin W., & Yoda T., (2017) Bridge Engineering, Classifications, Design Loading, and Analysis Methods, cap 7 111-136, Butterworth-Heinemann.
- Lizcano M. (2011). Colombia un país desigual, Redacción Portafolio; Colombia.
- Maya L. (2011) Estudio de estructuras aporticadas prefabricadas con uniones basadas en hormigones con fibras, Universidad politécnica de Madrid.
- Moreton A. J. (1990). Segmental Bridge Construction in Florida: A Review and perspective. Structural Engineering Group.
- Norma Sismo Resistente, NSR, (2010). Colombia.
- PCI (2008) Connections Manual for Precast and Prestressed Concrete Construction. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute.
- Penagos J. (2017), Guía de diseño de cimentaciones superficiales prefabricadas para edificaciones. Universidad EIA.
- Pul S., Senturk M. (2017), A Bolted Moment Connection Model for Precast Column-Beam Joint. Enginnering Faculty, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
- Rahman y Restrepo, (2000) Earthquake resistant precast building: seismic performance of cantilever walls prestressed using unbonded tendons, Research Report 2000-5, Dept. of Civil Engineering., University of Canterbury, Christchurch, NZ.
- Reinoso E., Rodriguez M., Betancourt R. (2000), Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas. Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- Rodriguez M. (2001) Comportamiento de estructuras prefabricadas de concreto reforzado para edificaciones en zonas símicas, innovaciones y tendencias en su empleo. UNAM.

- Rodríguez M. E. y J. Rodríguez Asabay (2006), Se debe evitar la soldadura de barras de refuerzo en estructuras de concreto reforzado en zonas sísmicas de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Vol 75, pp 69-95.
- Rodriguez M. y Blandon J.J., (2001) Ensayes ante cargas laterales cíclicas reversibles de una estructura prefabricada de concreto reforzado de dos niveles. Entregado para publicación en la Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM. Mexico.
- Rodríguez, M., y Torres, M. (2012). Evaluación del comportamiento sísmico de conexiones trabe-columna de concreto prefabricado con soldadura en las barras de refuerzo- cambios necesarios en la normativa mexicana para el diseño sísmico de edificios de concreto. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (87), 95-114.
- Serrano M., Pérez D., Solarte N., Torrado L. & Serrano D., (2014). Aplicación de Prefabricados Ecológicos: Análisis de Mercado. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Thinh D. T., Kusunoli K., Tasai A. (2008), Experimental study on a new precast post-tensioned concrete beam column connection system. World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- VanGeem, M. (2006). Achieving Sustainability with Precast Concrete. *PCI Journal*, 42-60.
- Yen W. P., Dekelbab W. & Khaleghi B. (2017). Connections for Integral Jointless Bridge in Seismic Regions Suitable for Accelerated Bridge Construction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Reach Board*, No. 2642.
- Zermeño, M. (1992) Comportamiento de conexiones entre elementos prefabricados de concreto ante cargas alternadas. Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM.