



**TENDENCIAS ACTUALES DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO EN
UNIONES DE VIGA-COLUMNA CON ANCLAJES POST-
INSTALADOS.**

SERGIO ALONSO GUTIÉRREZ BLANCO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACION EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA
2015**

**TENDENCIAS ACTUALES DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO EN
UNIONES DE VIGA-COLUMNA CON ANCLAJES POST-
INSTALADOS.**

SERGIO ALONSO GUTIÉRREZ BLANCO

Trabajo de grado para optar al título de:
ESPECIALISTA EN ESTRUCTURAS

Director:
PH.D. GUSTAVO CHIO CHO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
ESPECIALIZACION EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA
2015**

Dedicatoria

A Dios... a quién doy gracias por todas las bendiciones que me da cada día.

A mi esposa y a mi hijo por el apoyo y la paciencia que me brindaron durante esta etapa de mi vida.

A la memoria de mis padres porque siempre creyeron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A la escuela de ingeniería civil de la universidad Industrial de Santander por la oportunidad que me dio para poder finalizar mis estudios de especialización.

A todos los profesores de la especialización por compartir sus conocimientos con todos nosotros.

.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1 UNIÓN VIGA COLUMNA	15
1.1.1 Generalidades	15
1.1.2 Comportamiento de las uniones	16
1.1.3 Clasificación de las uniones.....	17
1.2 ANCLAJE EN CONCRETO	20
1.2.1 Sistemas de anclajes	21
1.2.2 Comportamiento de los anclajes.....	21
1.2.3 Fallas de anclajes bajo cargas de tracción.....	22
1.2.4 Fallas de anclajes por cortante	22
1.2.5 Comportamiento de anclajes en las zonas fisuradas.....	23
1.2.6 Resistencia última a tensión en concreto fisurado	23
1.2.7 Resistencia última a cortante en concreto fisurado.....	24
1.2.8 Consideraciones de diseño	25
1.2.9 Condiciones de carga	25
1.2.10 Diseño de varillas de anclaje	26
1.2.11 Longitud de anclaje	26
1.2.12 Comportamiento histerético en las uniones	26
1.2.13 Momento curvatura	28
1.2.14 Ductilidad.....	31
1.2.15 Degradación de la rigidez	32
1.2.16 Disipación de energía	32
2. TENDENCIAS ACTUALES	33
2.1 GENERALIDADES	33
2.2 TENDENCIAS INTERNACIONALES	34
2.2.1 Tendencias de comportamiento unión viga columna.....	34
2.2.2 Tendencias de comportamiento unión viga columna con anclajes químicos	42
2.3 TENDENCIAS EN NUESTRO MEDIO	44
3. CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXO	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Uniones viga columna interiores (Alcocer,1995)	17
Figura 2. Uniones viga columna externas (Alcocer,1995)	18
Figura 3. Uniones viga columna esquineras (Alcocer,1995)	18
Figura 4. Nudo tipo 1; diagrama de momentos dominado por cargas gravitacionales. (Nilson & Winter, 1994).....	19
Figura 5. Nudo tipo 2; diagrama de momentos dominado por efectos sísmicos (Nilson & Winter, 1994)	20
Figura 6. Diferentes tipos de falla en anclajes a tracción (ACI-355,1991)	23
Figura 7. Deterioro de la rigidez y la resistencia por la alternancia de cargas sísmicas intensas (Asocreto, 2006)	28
Figura 8. Relación momento curvatura para una viga de concreto reforzado (Garcia Reyes, 1997)	29
Figura 9. Relación momento vs curvatura para una viga de concreto reforzado (Garcia Reyes,1997).....	30
Figura 10. Patrones de fisuramiento de concreto (Ma & Sun, 2012).....	35
Figura 11. Detalles de modelos de unión interior y exterior(Kuramoto,Li,Meas, & Fauzan, 2011).....	36
Figura 12. Vista total de la prueba de carga de un modelo de nudo interior (Kuramoto, Li, Meas & Fauzan, 2011).....	37
Figura 13. Detalles de refuerzo para modelos de concreto reforzado(Ravi,Arulraj, 2010).....	38
Figura 14. Detalles de reforzamiento en CFRP para modelos en concreto reforzado. (Ravi & Arulraj, 2010)	38
Figura 15 Detalle refuerzo unión viga columna en edificios de los años setenta (Russo & Pauletta, 2012)	40
Figura 16. Detalle reforzamiento con anclaje mecánico (Russo & Pauletta, 2012) ..	41
Figura 17. Detalle reforzamiento con láminas CFRP (Russo & Pauletta, 2012).....	41
Figura 18. Detalle de refuerzo de unión viga columna con refuerzo anclado (Guzman, 2007).....	46
Figura 19. Detalle del reforzamiento de los prototipos construidos en zona confinada. (Ramirez, 2014).....	47
Figura 20. Detalle del reforzamiento de los prototipos construidos con pobre confinamiento (Ramirez, 2014).....	47
Figura 21. Esquema de ensayo en marco metálico con actuador (Ramirez, 2014) 48	48

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A.	INFORMACION DE PROVEEDORES DE ANCLAJES QUIMICOS	53
-----------------	---	----

RESUMEN

TITULO:

TENDENCIAS ACTUALES DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO EN UNIONES DE VIGA-COLUMNA CON ANCLAJES POST-INSTALADOS*

AUTOR:

Sergio Alonso Gutiérrez Blanco**

PALABRAS CLAVES:

Unión viga columna, Comportamiento de uniones, Anclaje con Adhesivo, materiales de reforzamiento.

DESCRIPCION:

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos en la investigación realizada sobre las tendencias de los estudios que se están realizando actualmente para entender mejor el comportamiento dinámico en uniones de viga-columna efectuadas en concreto reforzado. Se realizó una búsqueda de las diferentes tendencias en el ámbito internacional para conocer cual tipo de investigación se estaba realizando en cuanto a aspectos relacionados con dicho tema.

Se encontró que muchas investigaciones apuntan al desarrollo de temas de reforzamiento de estructuras de concreto reforzado utilizando materiales como el acero, la madera y el FRP. En cuanto a las tendencias que llevan a investigar sobre barras ancladas con adhesivos químicos se encontró que las empresas proveedoras de sistemas y productos para reforzamiento, rehabilitación y reparación, son las más interesadas en desarrollar investigación sobre este tema.

En el ámbito nacional la investigación se concentra en los aspectos relacionados con el anclaje de barras corrugadas para unir elementos estructurales nuevos a elementos estructurales existentes y poder validar o no los procedimientos recomendados por las empresas proveedoras de estos sistemas de anclaje tan utilizados en nuestro país. Al final se presentaron las conclusiones, las cuales muestran que se debe seguir buscando alternativas para poder desarrollar más investigación sobre los temas relacionados con el comportamiento de las uniones, ya que el conocer más de ellas nos puede llevar a diseñar y construir estructuras más seguras.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Especialización en Estructuras, Director: Ph.D., Gustavo Chio Cho

ABSTRACT

TITLE:

TRENDS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF BEAM-COLUMN JOINTS WITH POST-INSTALLED ANCHORS *

AUTHOR:

Sergio Alonso Gutierrez Blanco **

KEYWORDS:

Union beam column joints behavior, Anchor adhesive, reinforcing materials.

DESCRIPTION:

This paper presents the results of the research on the trends of the studies currently being conducted to better understand the dynamic behavior of beam-column joints made in reinforced concrete. A search of the different tendencies was held at the international level to know which type of research is being done in terms of aspects related to this issue.

It was found that much research aimed at developing issues of strengthening of reinforced concrete structures using materials such as steel, wood and FRP. As for the trends that lead to investigate bars anchored with chemical adhesives it found that the companies providing systems and products for reinforcement, rehabilitation and repair, are more interested in developing research on this topic.

Nationally research focuses on issues related to the anchoring of rebars to join new structural elements to existing structural elements and can not validate or recommended by the suppliers of these anchoring systems as used in our country procedures. Finally, conclusions are presented, which show that it must continue to seek alternatives to develop more research on issues related to the behavior of the unions, and that knowing more of them can lead us to design and build safer structures.

* Work Degree

** School of Physics and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Specialization in Structures, Director: Ph.D., Gustavo Chio Cho

INTRODUCCIÓN

Varios han sido los estudios realizados sobre el comportamiento sísmico de las conexiones viga-columna, en los cuales se ha visto que las uniones o nudos son zonas que merecen una atención especial tanto en el momento del diseño como en el momento de la construcción, especialmente en las regiones donde las fuerzas sísmicas son importantes. Muchos de estos estudios han servido para conocer mejor el comportamiento de las uniones y han proporcionado información nueva a las normas y códigos que ha servido para su actualización. El tema es de bastante interés en nuestro país, porque es común ver cómo tanto en el diseño como en la construcción a los nudos muchas veces no se les dedica la atención que se merece y se pasan por alto muchas de las recomendaciones dadas por las normas sismo resistentes vigentes.

El tema viene al caso porque en la actualidad en nuestro país cuando se realizan trabajos de reforzamiento, reparación o rehabilitación de estructuras, es muy común usar uniones de vigas nuevas con columnas existentes usando como elementos de anclaje entre los dos elementos estructurales, las barras de refuerzo o los pernos de anclaje. Generalmente esta actividad se le delega a las empresas que venden sistemas de anclajes químicos, las cuales han realizado ciertas comprobaciones en laboratorio sobre dichos sistemas. Es bien sabido que en nuestro país es poca la investigación que se ha realizado sobre el comportamiento real de este tipo de uniones, si bien algunas entidades están realizando algún tipo de investigación al respecto, la práctica común en la construcción se basa más en la experiencia, que en el conocimiento técnico. Es por este motivo que en el presente trabajo se pretende revisar las tendencias actuales que se están investigando para compararlas con las que se realizan en nuestro país y ver cómo estamos con respecto a las tendencias mundiales.

En la actualidad en nuestro país se ha ido incrementando la ejecución de estudios de vulnerabilidad sísmica, actividades de reparación y de rehabilitación de estructuras. La mayoría de veces las anteriores actividades determinan que la edificación deba ser intervenida. Las actividades que se deben realizar y que con mayor frecuencia se están desarrollando requieren casi siempre del anclaje de elementos nuevos a la estructura

existente, de tal forma que se deba implementar el uso de sistemas de fijación y anclaje a la estructura a intervenir. Generalmente se realizan anclajes de vigas nuevas a columnas existentes, usando sistemas de anclajes mecánicos y anclajes químicos. El auge y el uso de estos últimos ha sido importante en nuestro medio, y en la mayoría de reforzamientos, reparaciones o rehabilitaciones se han estado usando pero de una forma indiscriminada y poco técnica. En casi todas las situaciones el procedimiento a seguir es el de asesorarse de una empresa que ofrezca productos para todo tipo de reparaciones de estructuras y realizar los trabajos de acuerdo a los procedimientos que cada uno de estos proveedores sugiere y a la experiencia que tenga el contratista que ejecute el proyecto. Lamentablemente nuestras normas presentan pocos controles para los materiales y sistemas que se utilizan para estos trabajos de reforzamiento, reparación y rehabilitación siendo este motivo muchas veces para que se utilicen materiales y sistemas que no ofrecen una solución acertada a la actividad a realizar. Por esta razón algunas universidades en el país se han dado a la tarea de dedicar tiempo a la investigación de dicho tema, con el objetivo de conocer mejor el comportamiento real de estos materiales y sistemas, y validar los productos y procedimientos sugeridos por los proveedores o recomendar alternativas diferentes de sistemas de anclaje en las uniones.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se realizará una revisión de las tendencias actuales en cuanto a las investigaciones que se han realizado y que se están realizando con respecto a los materiales y sistemas y al comportamiento en sí de las conexiones viga-columna tan usado en nuestro medio.

El objetivo general es revisar las tendencias actuales del comportamiento en uniones viga-columna, para compararlas con las aplicadas en nuestro país en el campo y de esta forma poder establecer las condiciones en las que se encuentra la ingeniería Colombiana en esta área.

Como objetivos particulares tenemos:

- Realizar una búsqueda de las tendencias actuales de forma general en las bases de datos disponibles.
- Analizar e interpretar las tendencias encontradas.

- Realizar una comparación entre las tendencias encontradas y lo que se está haciendo en el país.
- Analizar los resultados encontrados.

La metodología que se va a usar es fundamentalmente una búsqueda, organización y clasificación de la información a partir de la cual se construirá un concepto propio del tema objeto de análisis, que le proporcionará a éste una coherencia y sentido, trazando un horizonte por el cual este se va estructurando. La búsqueda se realiza en las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander y de otras universidades, en libros y en códigos de diseño y construcción vigentes y en la información técnica ofrecida por varios proveedores de anclajes químicos establecidos en nuestro país. En cuanto a la organización y clasificación se hace de manera que la información encontrada sea de contenido lo más actualizado posible y sea de fuentes reconocidas las cuales nos ofrezcan buena credibilidad. En esta etapa se realiza el análisis de toda la información para tomar los datos más relevantes y con ellos elaborar una descripción del estado actual de las tendencias sobre el comportamiento de las uniones viga-columna. Al final se enunciarán una serie de conclusiones con respecto a la situación y el estado actual de nuestro país comparado con las tendencias en otras partes del mundo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 UNIÓN VIGA COLUMNA

1.1.1 Generalidades

Cuando se proyectan estructuras en concreto a parte de dedicar tiempo a la resistencia, la rigidez y la ductilidad de la estructura, es muy importante revisar la conexión o unión que se le va a dar a estos elementos; estas uniones o conexiones son parte primordial del sistema estructural para poder garantizar que las características antes citadas se puedan desarrollar plenamente. En el sistema apertado la unión, al igual que las vigas, las columnas y la cimentación, hacen parte del sistema de resistencia sísmica de una estructura y son parte esencial de ella.

Durante las excitaciones sísmicas se pueden presentar esfuerzos máximos, rotaciones y daños que pueden terminar en colapso total o parcial de la estructura. Es común la creencia que debido a la cantidad de barras de acero de refuerzo y concreto en las uniones, estas no eran sectores críticos dentro de la estructura. Sin embargo esto no es así, debido a que estas uniones están sujetas a condiciones complejas en su frontera y a defectos, producto de su construcción y detallado, son sectores muy propensos a daño y falla en condiciones donde los elementos estructurales adjuntos no han alcanzado su capacidad última. (Asociación Colombiana de Productores de Concreto - Asocreto, 2006)

La mayor parte de las fallas en el concreto reforzado ocurren, no por deficiencias en el análisis de la estructura o en el diseño de los elementos, sino por la atención inadecuada que se le presta al despiece del refuerzo. En muchos casos, el problema está localizado en las conexiones de los elementos estructurales principales. (Nilson & Winter, 1994, pág. 299).

Los aspectos más importantes y críticos en el comportamiento de las uniones vigas – columnas en concreto reforzado son: el confinamiento, el cortante y la adherencia. Es importante destacar que se debe tener una buena longitud de desarrollo del refuerzo y una

buena resistencia al cortante para impedir la aparición de fisuras diagonales debido a que esto puede llevar al nudo a un deterioro considerable.

Las fuerzas en los extremos de todos los elementos estructurales deben transmitirse a los elementos de soporte de la estructura por intermedio de las uniones; lo anterior es el requisito más importante que se debe cumplir en una unión. En los sistemas estructurales se presentan estados de esfuerzos complejos en las intersecciones de vigas y columnas, los cuales deben tenerse en cuenta al momento de diseñar el refuerzo a colocar en dichos puntos (nudos). Por otra parte las fuerzas internas presentan cambios repentinos en la dirección y se hace necesario colocar barras de refuerzo ancladas en forma adecuada para resistir las tensiones resultantes. En ensayos de laboratorio se ha encontrado que el detallamiento del refuerzo utilizado comúnmente en las uniones, no alcanza a proporcionar más del 30% de la resistencia requerida. (Nilson & Winter, 1994).

1.1.2 Comportamiento de las uniones

El comportamiento de las uniones viga-columna es función de los mecanismos de cortante y adherencia los cuales desarrollan procesos de histéresis deficientes, por esta razón no se puede considerar a la unión viga-columna como un elemento de buena disipación de energía y por consiguiente la unión solo podrá asumir estados de agrietamiento y plastificación bajos. Los nudos están sometidos a fuerzas varias veces más grandes que las fuerzas que generalmente deben soportar las vigas y las columnas. Dichas fuerzas hacen que la unión sufra deformaciones en cortante, produciendo tracción y compresión a lo largo de las dos diagonales de la unión. Cuando las fuerzas de tensión actuantes superan la capacidad a tracción del concreto comienzan a aparecer las grietas en el nudo, dichas grietas son parecidas a las que se generan por fuerzas cortantes, por este motivo las primeras recomendaciones de los códigos fueron con base en ecuaciones de diseño a cortante adaptadas a las uniones. (Alcocer, 1995).

Los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta en el diseño de uniones para sistemas apertados bajo cargas sísmicas son:

- El confinamiento del concreto en el área de la unión.
- El anclaje y la adherencia del refuerzo que atraviesa el nudo.
- La capacidad a fuerza cortante de la unión.

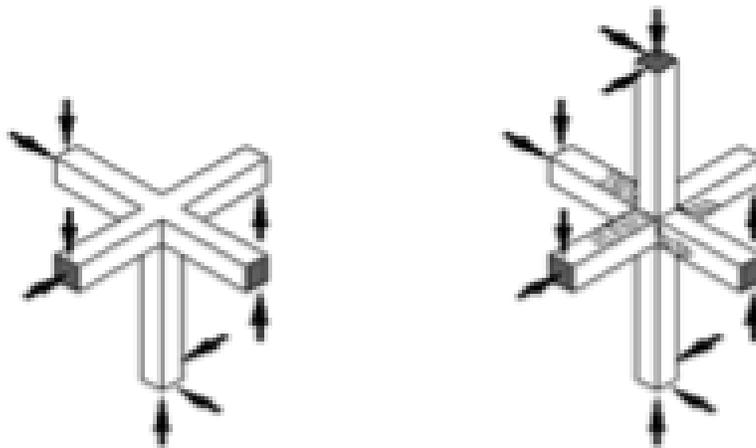
1.1.3 Clasificación de las uniones

▪ Según su geometría y su confinamiento

Las uniones se clasifican en interiores, exteriores y de esquina de acuerdo a su localización dentro de la estructura. El tipo de unión depende del número de vigas que llegan a las caras laterales de la columna y al tipo de anclaje de las barras de las vigas. El confinamiento que ofrece dichas vigas al nudo es importante porque de le depende su resistencia, a mayor confinamiento mayor resistencia.

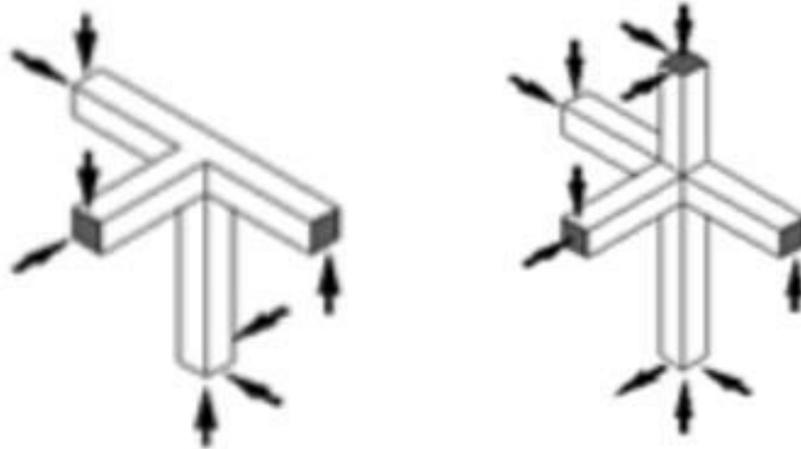
En los nudos interiores las vigas llegan a las cuatro caras de la columna confinándola y su refuerzo longitudinal pasa a través de la unión. Se considera como nudo interior cuando el ancho de las vigas que llegan a la unión son por lo menos 0.75 veces el ancho de la columna. Un nudo se considera como exterior si el anterior requisito solo se cumple en una dirección y se considera como nudo de esquina si el requisito no se cumple en ninguna de las dos direcciones.

Figura 1. Uniones viga columna interiores



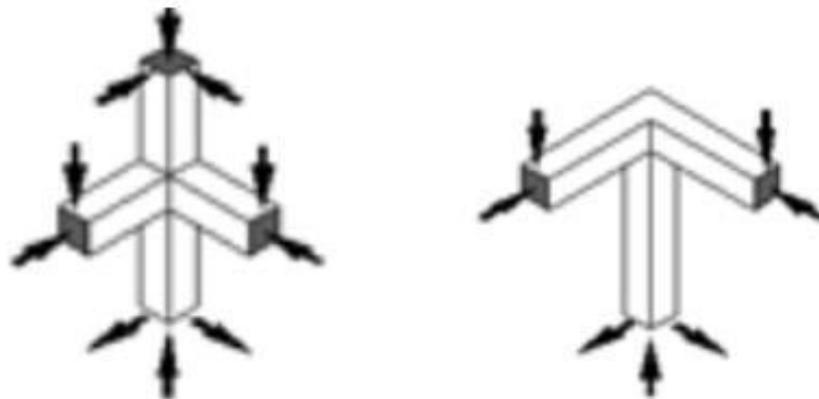
Fuente: (Alcocer, 1995)

Figura 2. Uniones viga columna externas



Fuente: (Alcocer, 1995)

Figura 3. Uniones Viga columna esquineras



Fuente: (Alcocer, 1995)

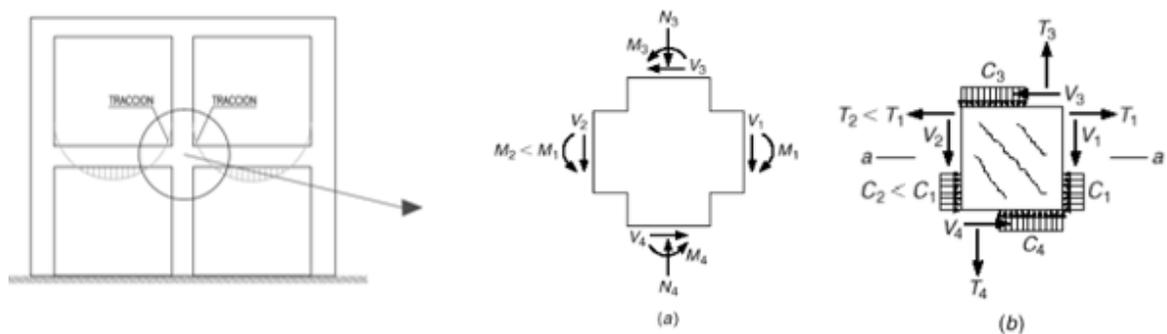
▪ **Clasificación del ACI según su comportamiento**

La publicación Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Structures del ACI, clasifica las uniones estructurales en dos categorías. La tipo 1 y la tipo 2. Dichos tipos se diseñan dependiendo de si forman parte de estructuras corrientes o

estructuras sometidas a cargas cíclicas considerables en el intervalo inelástico. (Nilson & Winter, 1994)

Un nudo tipo 1 conecta elementos en estructuras corrientes diseñadas con base en la resistencia, bajo cargas de gravedad y cargas normales de viento, y sin considerar requisitos especiales de ductilidad. En estas uniones no se presenta inversión de esfuerzos dentro del nudo y por ende no hay problemas de adherencia.

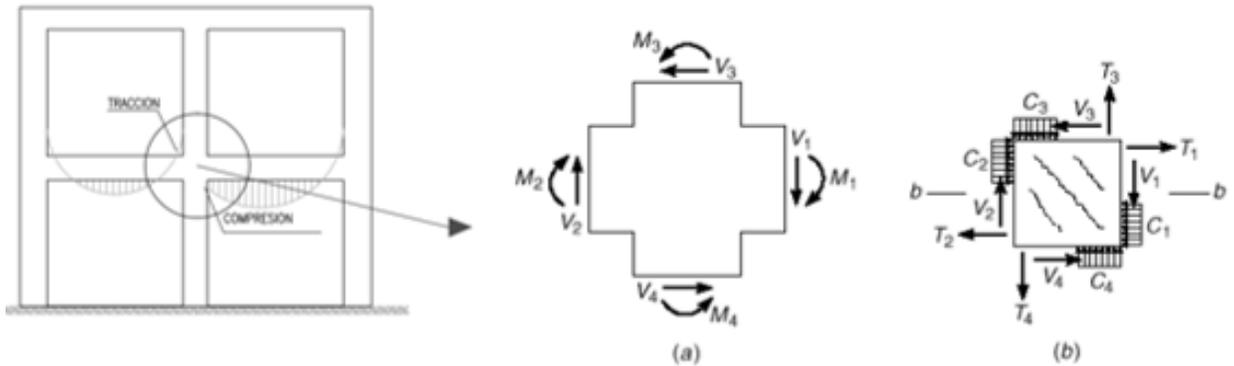
Figura 4. Nudo tipo 1; diagrama de momentos dominados por cargas gravitacionales.



Fuente: (Nilson & Winter, 1994)

Los nudos “tipo 2 acoplan aquellos elementos proyectados para mantener la resistencia cuando se invierten las deformaciones dentro del intervalo inelástico, como elementos de una estructura esquematizada para movimientos sísmicos, para cargas de viento grandes o para efectos de explosiones.” (Nilson & Winter, 1994, págs. 300-301).

Figura 5. Nudo tipo 2; diagrama de momentos dominados por efectos sísmicos



Fuente: (Nilson & Winter, 1994)

▪ Clasificación de los nudos por la NSR-10-según el comportamiento

El reglamento NSR-10 presenta tres tipos de ductilidad aplicables a los sistemas de resistencia sísmica, estos son demanda mínima, moderada y especial. Para los nudos correspondientes a los sistemas de demanda sísmica mínima (DMI) y moderada (DMO), el reglamento no aplica especificaciones especiales y estos nudos quedan clasificados como nudos tipo 1 del ACI; para los nudos o uniones correspondientes al sistema de resistencia sísmica especial (DES) aplica especificaciones especiales tal y como lo aplica el ACI para los nudos tipo 2. Resumiendo para nudos con demanda sísmica (DMI) y (DMO) son uniones en donde no se presenta inversión de momentos y para los nudos con demanda (DES) las uniones pueden desarrollar buen comportamiento cuando se presente inversión de momentos.

1.2 ANCLAJE EN CONCRETO

Actualmente se puede encontrar diferentes tipos de anclajes para usar en la unión de elementos estructurales en concreto. El diseño y construcción de dichos anclajes se basa generalmente en la experiencia de los profesionales encargados de dichos trabajos, en ensayos realizados, en recomendaciones de los fabricantes y en los requisitos ofrecidos

por los códigos o normas vigentes. Cabe anotar que muchas de estas recomendaciones ya son obsoletas.

1.2.1 Sistemas de anclajes

Los anclajes se dividen en dos grupos: los anclajes pre-instalados (anclajes que se instalan antes de fundir el concreto) y los anclajes post-instalados (anclajes que se instalan después de que el concreto a endurecido).

Entre los anclajes pre-instalados se encuentran los anclajes embebidos y no regulables, como pernos, varillas roscadas y anclajes ajustables colocados en el sitio antes de realizar el vaciado de concreto. Así, se puede catalogar las barras de refuerzo instaladas en una construcción de concreto nueva, con sus longitudes de anclaje y traslapes requeridos para lograr la fluencia del acero. Los anclajes post-instalados se pueden catalogar en dos tipos, el primero son los anclajes cementados y son aquellos que son adheridos, pueden ser adheridos con mortero (portland y arena o cualquier otro mortero premezclado comercial) y los que consisten en pernos que se fijan al concreto por medio de morteros poliésteres, vinilésteres ó epóxicos y se conocen como anclajes químicos, ya que la adición de una sustancia química compuesta por lo general de dos componentes que al unirse logran una gran resistencia. Los segundos son los anclajes de expansión (mecánicos), estos no requieren de un elemento que realice la adherencia para lograr la función de anclaje propiamente dicho, sino que la resistencia a tracción es realizada por el propio anclaje, entre estos tenemos los anclajes de torque controlado con camisa para cargas pesadas, anclaje con camisa, anclajes de expansión con casquillo, anclajes con cuña, anclajes autoperforantes, pernos de anclaje, anclajes rebajados y anclajes tipo drop in. (ACI-355, 1991).

1.2.2 Comportamiento de los anclajes

Para poder determinar cuál es el anclaje más adecuado para una aplicación determinada, se debe tener conocimiento de varios aspectos importantes dentro de los sistemas de anclaje como: los modos de falla, resistencia, relación carga-desplazamiento y aspectos sobre la relajación de los anclajes. Los anclajes pueden estar solicitados a tracción, corte,

combinación de tracción y corte y a flexión. El conocimiento del comportamiento a cargas de tracción es fundamental cuando se manejan sistemas de anclaje. Por otro lado la mayoría de investigaciones que se hacen con anclaje se hacen en concreto no-fisurado, aunque la realidad es que casi siempre el concreto presenta fisuras, sin embargo conocer el comportamiento en concreto no fisurado nos ofrece las bases para entender mejor los sistemas de anclajes. Todos los tipos de anclajes deben presentar comportamiento elástico con poco desplazamiento después de su instalación bajo cargas de servicio, comportamiento plástico bajo cargas últimas y bajo cargas cíclicas un comportamiento con degradación limitada de la resistencia. En cuanto a los anclajes adhesivos su comportamiento es elástico hasta casi su resistencia máxima y esta capacidad depende prácticamente de la mezcla de los componentes del adhesivo y de su método de instalación. (ACI-355, 1991).

1.2.3 Fallas de anclajes bajo cargas de tracción

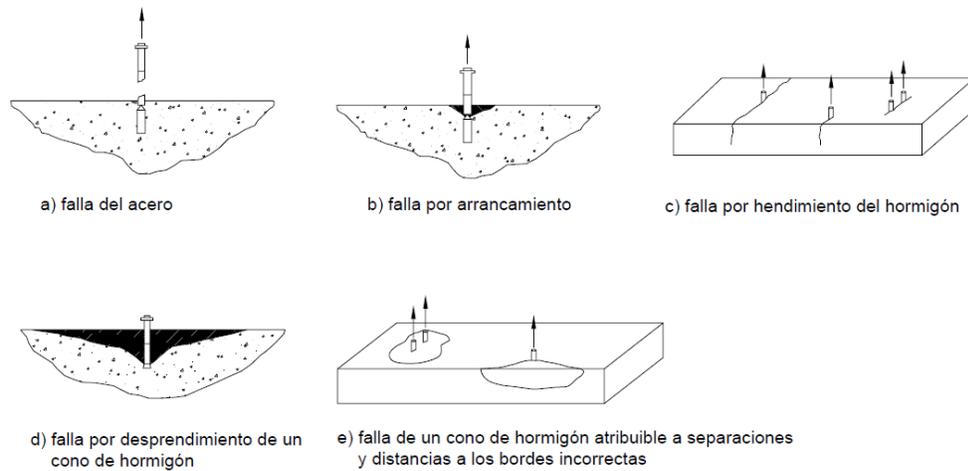
Al presentarse cargas de tensión se presentan cinco diferentes tipos de falla, en la figura 6: se ilustran los tipos de falla:

- Falla del acero
- Falla por arrancamiento
- Falla por hendimiento del concreto
- Falla por desprendimiento de cono de concreto.
- Falla de cono de concreto atribuible a separación y distancia a los bordes.

1.2.4 Fallas de anclajes por cortante

Este tipo de falla depende de las distancias a borde que se encuentra el anclaje, si el embebido es lo bastante profundo se puede lograr la falla en el anclaje por corte, produciendo un desprendimiento o no del concreto. Este tipo de falla generalmente produce desplazamientos más grandes que los producidos en las fallas a tensión, por lo general es generado por la flexión del anclaje y deformación del concreto en la dirección de la carga. (ACI-355, 1991).

Figura 6. Diferentes tipos de falla en anclajes a tracción..



Fuente: (ACI-355, 1991)

1.2.5 Comportamiento de anclajes en las zonas fisuradas

Cuando se instalan anclajes en la zona de tensión del concreto reforzado, se asume que se presenten una serie de fisuras producto de la baja resistencia del concreto a tracción, este es el caso de una viga que se instala en una columna donde las barras de refuerzo que trabajan a tensión pueden producir este tipo de fisura, estas pueden ser en una dirección conocidas como simples y en dos direcciones o cruzadas como es el caso de losas que trabajan en dos direcciones. Cuando se presentan este tipo de fisuras existe una gran posibilidad que esta se extienda a lo largo del anclaje y más aún cuando son instalados los anclajes post–instalados, la perforación realizada para su colocación puede actuar como un inicio de corte por la reducción de área en el concreto. Los anclajes que se vayan a usar en zonas donde se produzca fisuramiento, como en zonas de tracción en el concreto, se deben utilizar anclajes adecuados para este comportamiento. (ACI-355, 1991).

1.2.6 Resistencia última a tensión en concreto fisurado

Los anclajes que se instalan en una fisura o próximos a una fisura en el concreto presentan una reducción en su carga última con respecto a los instalados en concreto no fisurado. Entonces las fuerzas de tracción no se pueden transmitir a través de la fisura, por lo cual el área para transmitir la carga al concreto es menor que en el caso de un concreto no fisurado. En el caso de los anclajes químicos, las fisuras que se puedan presentar en el concreto

logra generar una interferencia entre la adherencia del concreto y el relleno químico, esto hace que la carga de falla en los anclajes adheridos en el concreto fisurado es mucho menor que el valor medio del concreto sin fisuras. Cuando los anclajes se utilizan para actuar de forma estructural los esfuerzos de tensión y los esfuerzos inducidos localmente por efecto de la carga afectan la resistencia misma de anclaje y pueden reducir la resistencia del elemento donde se encuentra instalado el anclaje; como ejemplo de esto tenemos los anclajes colocados en las zonas donde se presenta el cortante en vigas y losas y en la zona de anclaje y traslapes de refuerzo, donde se presentan altos esfuerzos de tensión locales en el concreto debido a las cargas propias de la estructura y se combinan con los esfuerzos de tensión inducidos en el concreto por el anclaje. Este efecto es más crítico en las zonas de traslapo si no se tiene un adecuado confinamiento de estribos. La resistencia del concreto en la zona del recubrimiento y alrededor de la barras de refuerzo puede ser inferior que en el núcleo mismo del elemento debido a la pobre compactación y especialmente en las secciones con refuerzo que tiene poco espaciamiento entre barras. Este acero de refuerzo reduce el área de concreto destinado a la transferencia de fuerzas de tensión, en consecuencia estas condiciones generan una reducción significativa de la carga de falla de todos los tipos de anclajes post–instalados; en promedio se tiene una reducción en la resistencia de hasta el 60% en la carga en concretos fisurados comparados con las zonas en que el concreto no está fisurado. (ACI-355, 1991).

1.2.7 Resistencia última a cortante en concreto fisurado

En anclajes instalados en concreto fisurado y cargados a corte, se presenta la falla en el bloque de concreto cuando estos se encuentran ubicados muy cerca del borde o falla el perno si se tiene una gran distancia al borde, o se puede presentar una combinación de los dos. En anclajes instalados con poca distancia al borde y cargados hacia el borde, la carga de falla será menor en el concreto fisurado que en el concreto sin fisurar, debido a la interferencia en la distribución de esfuerzos en el concreto por las fisuras; esta reducción en la resistencia es muy similar a la existente en las cargas de tensión, siendo esta de un 40% pero se puede reducir si se tiene refuerzo en el borde. (ACI-355, 1991).

1.2.8 Consideraciones de diseño

La resistencia del sistema de anclaje y su adecuado desempeño en el largo plazo es función de una serie de factores, los cuales inciden en su resistencia como lo es el tipo de material utilizado en el anclaje, su resistencia a la fluencia y su resistencia última, el diámetro de la perforación y el sistema utilizado para su realización, la profundidad del anclaje y su longitud, la tolerancia existente entre el anclaje y la pared de la perforación, la resistencia y condición del concreto, el tipo y aplicación de la carga (estática, dinámica, a tensión, a cortante, a flexión o cargas combinadas), la distancia entre otros anclajes, el tipo de falla del sistema de anclaje (rotura de concreto, del acero o pérdida de adherencia), limpieza de la perforación al momento de instalar el anclaje, corrosión existente en la barras de anclaje y el comportamiento a fluencia plástica. Al realizar la instalación de un sistema de anclajes se debe verificar las condiciones de la estructura o del elemento al cual se realiza la fijación, con el fin de determinar el nivel de desempeño del anclaje para las condiciones críticas. Los anclajes químicos se deben diseñar para que logren desarrollar su máxima capacidad a la fluencia plástica a largo plazo.

1.2.9 Condiciones de carga

Para determinar los requerimientos del sistema de anclaje se debe establecer el tipo de carga que este experimentará, y saber si tiene la posibilidad que el concreto se fisure alrededor de la zona del anclaje. Como se mencionó anteriormente existe una gran posibilidad que en presencia de fisuras para anclajes ubicados en la zona de tensión del concreto, la capacidad de los anclajes se reduzca con respecto al concreto no fisurado. Como se sabe las fisuras son mayores en la zona en que el concreto está a tensión, pero estas se reducen a medida que se profundiza en el elemento y se aleja de la zona de tracción así que el diseñador debe establecer si los anclajes deben ser diseñados para trabajar en la zona de compresión del elemento (anclajes profundos) o si deben desempeñarse en la zona de concreto fisurado, esto indica que anclajes diseñados para desempeñarse en la zona de concreto no fisurado bajo una carga dada, puede fallar completamente en el concreto fisurado bajo la acción de la misma carga. Se recomienda que todas las conexiones estructurales en zonas de tracción (concreto fisurado) tengan comportamiento dúctil. (ACI-355, 1991).

1.2.10 Diseño de varillas de anclaje

Existen dos métodos de diseño para el anclaje de varillas post – instaladas. El primero es un método simplificado el cual consiste en diseñar el anclaje conforme a lo establecido en los códigos de concreto reforzado como el ACI – 318 capítulo 12 o el CEB – FIB (*Model Code*) o el EC2. El segundo método, es el de un cálculo más exacto, el cual tiene en cuenta las características geométricas existentes de los elementos de concreto y no las condiciones mínimas de espaciamiento y distancia al borde más conservadoras que las que definen los códigos de diseño de concreto reforzado. Además es tomada en cuenta la adherencia real del mortero adhesivo, con lo cual la resistencia de los morteros adhesivos es mejor aprovechada logrando menores longitudes de anclaje y de traslapo que las que se definen en los códigos. (Zambrano López, 2015)

1.2.11 Longitud de anclaje

Cuando se diseñan uniones viga-columna bajo cargas sísmicas, se debe tener en cuenta que su comportamiento se verá afectado por la adherencia, la fuerza cortante y el confinamiento. Tanto en las uniones exteriores como interiores la situación no es tan sencilla porque debido a las fuerzas grandes que se deben transmitir del acero al concreto, se debe darle anclaje con ganchos a las varillas en los extremos (para nudo exterior) y garantizar longitud de desarrollo a las varillas que pasan por los nudos interiores en donde se presenta inversión de signos en los momentos. Por estos motivos la longitud de anclaje, en pórticos de concreto armado, varía según el tipo de unión viga-columna. La adherencia se disminuye cuando se presentan grietas por esfuerzo cortante. Cuando la unión no cuenta con buen confinamiento (refuerzo transversal) o cuando el refuerzo longitudinal no cuenta con suficiente longitud de desarrollo para evitar la aparición de grietas por corte, “los lazos de histéresis presentan una zona de rigidez muy baja y un deterioro considerable”. (Bazán & Meli, 2002).

1.2.12 Comportamiento histerético en las uniones

“La histéresis es un fenómeno por medio del cual dos, o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo”. (García Reyes, 1997, pág. 12). Cuando la estructura tiene que soportar cargas alternadas se

producen ciclos de histéresis amplios y estables, solo si las secciones son subreforzadas y doblemente armadas y no se producen efectos críticos de cortante, torsión o adherencia. Si los esfuerzos cortantes son importantes entonces se establecen deterioros en rigidez y resistencia y la capacidad de deformación inelástica se disminuye. La anterior situación es muy diferente a la estática y complica el comportamiento del material. En las uniones la alternancia de cargas (sismo) produce degradación de su integridad. Si las cargas en el nudo se incrementan, se produce propagación de fisuras.

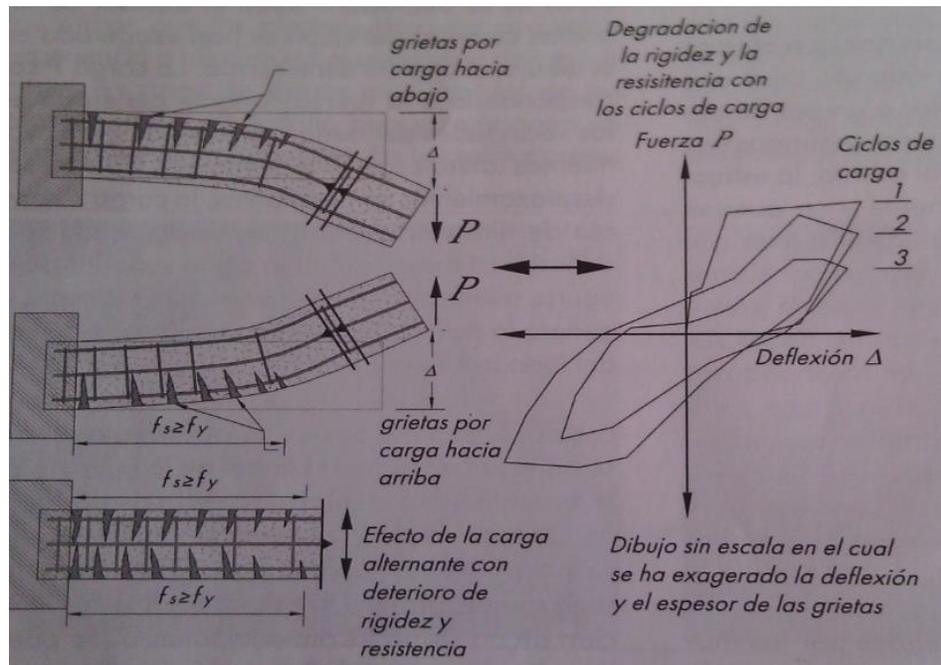
En presencia de repeticiones de cargas alternadas se generarán deterioros grandes de rigidez y resistencia en el nudo, especialmente y en mayor proporción en las columnas que en las vigas. La causa de este deterioro en las columnas es que así estén bien confinadas con flejes, la carga axial (si es grande) reducirá el área del ciclo de histéresis disminuyendo la capacidad de disipación de energía. Por lo anterior es que las normas recomiendan buen confinamiento, bajos niveles de carga axial mediante tamaños generosos de las secciones de columna y el empleo de factores de seguridad, mayores en las columnas que en las vigas. (Bazán & Meli, 2002).

Por causa de las cargas externas alternantes, el concreto y el acero son sometidos a esfuerzos que sobrepasan el comportamiento lineal y que llevan a que se pierda la adherencia entre estos materiales. La combinación de esfuerzos tanto normales como transversales conduce a la formación de grietas inclinadas que generan una degradación del material. En un determinado ciclo de histéresis se comienza a producir la fluencia del acero generándose deformaciones residuales grandes que lo llevaran al endurecimiento y por ende a presentar deformaciones permanentes. A medida que se incrementan los ciclos de histéresis la carga resistente empieza a disminuir y esto conlleva a un aumento en las deflexiones y por consiguiente a la pérdida de rigidez y resistencia del nudo, lo cual conduce a una disminución de la capacidad de disipación de energía. Si durante un sismo se llega a un número suficiente de ciclos de histéresis que agoten la capacidad de disipar energía, se darán mecanismos de falla suficientes para que se produzca el colapso de toda la estructura.

La respuesta sísmica de una estructura está determinada por las características del material que la compone. Para el concreto lo principal es: Peso volumétrico, módulo de elasticidad,

curva esfuerzo-deformación, la ductilidad y la forma de los ciclos de histéresis la cual define el amortiguamiento inelástico con que puede contarse. (Bazán & Meli, 2002).

Figura 7. Deterioro de la rigidez y la resistencia por la alternancia de cargas sísmicas intensas

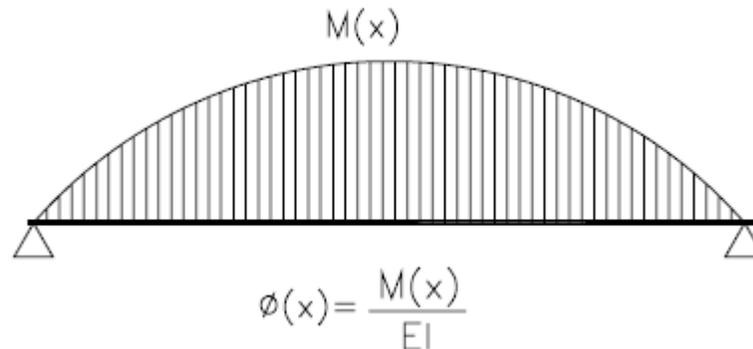


Fuente: (Asociación Colombiana de Productores de Concreto - Asocreto, 2006)

1.2.13 Momento curvatura

Es importante conocer como es el comportamiento de un elemento estructural sometido a carga estática, pero en esta ocasión no es en función de los desplazamientos sino del giro producido por el momento flector aplicado en el extremo del elemento. Para lograr esto se ilustra en la figura 8. como es el proceso para establecer los análisis momento curvatura de una sección. Las secciones pasan por diferentes etapas desde el momento de aplicar la carga hasta el momento que se produce la falla final del elemento, estos son: Curvatura a la fisuración del concreto a la tracción. Curvatura a la primera fluencia del acero de refuerzo. Curvatura a la última deformación del concreto confinado. Curvatura a la última deformación del concreto confinado. (García Reyes, 1997).

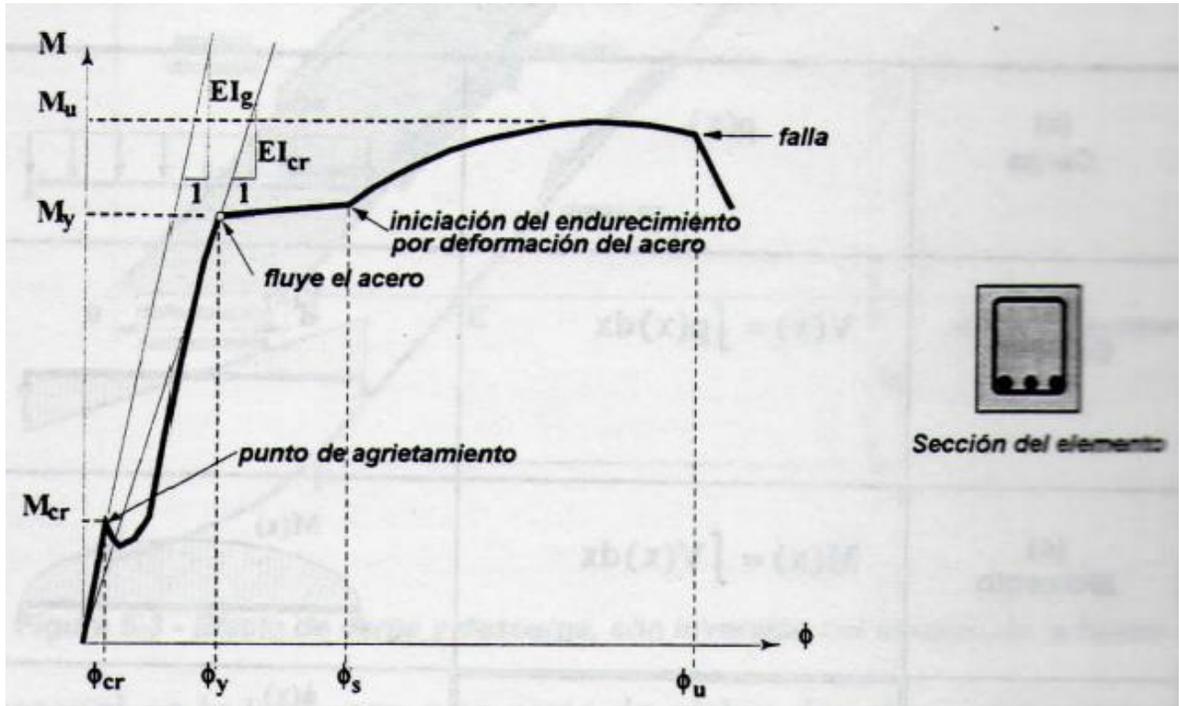
Figura 8. Relación momento curvatura para una viga de concreto reforzado



Fuente: (García Reyes, 1997)

Cuando el elemento estructural trabaja en el rango inelástico, si se conoce la relación momento curvatura de la sección, es posible conocer sus deformaciones o deflexiones mediante procedimientos matemáticos. Figura 1-8: Diagrama momento – curvatura para una viga de concreto reforzado. En la figura anterior se muestra cómo se comporta un elemento estructural sometido a una carga monótonica; en esta la sección se comporta elásticamente hasta que se presenta una falla por tensión del concreto, este punto se conoce como punto de agrietamiento y a este le pertenece un momento de agrietamiento M_{cr} y una curva de agrietamiento ϕ_{cr} , a medida que aumenta el momento aumenta las fisuras en la viga, el eje neutro se desplaza y sube, esto hace que se incremente los esfuerzos en el concreto y en el acero. En el momento que llega a su resistencia de fluencia F_y el acero de refuerzo, hay un cambio en el comportamiento de la sección, en este punto se define el momento M_y y una curvatura de fluencia ϕ_y , después de este punto se presenta un aumento en la curvatura del elemento sin que se presente un gran incremento del momento flector, presentándose una degradación de la rigidez. Esto se sigue presentando hasta que se logra un aumento de la resistencia de la sección debida al endurecimiento por deformación en el acero de refuerzo. En este punto se define la curvatura por deformación ϕ_s , y la resistencia a momento se incrementa hasta que el acero de refuerzo logra llegar a su resistencia máxima F_u y el momento logra su máxima resistencia M_u , finalmente el momento comienza a disminuir proporcionalmente a medida que el acero baja su resistencia hasta que este falla a tensión, este último punto se conoce como curvatura máxima de la sección ϕ_u . (García Reyes, 1997).

Figura 9. Relación momento vs curvatura de una viga de concreto reforzado.



Fuente: (García Reyes, 1997)

La gran parte de los diseños de vigas se basan en el diseño por la teoría simple de la flexión, donde principalmente se trata de calcular el momento de flexión máximo y determinar una viga que tenga un momento igual o mayor al requerido en el diseño, así que:

$$\phi Mn > Mu$$

En donde (Mn) es el momento resistente de la sección y (ϕ) es el factor de reducción requerido en el diseño.

Dado que (f_b) es igual al módulo de elasticidad (E) multiplicado por la deformación unitaria (ϵ), por lo cual el esfuerzo debido a la flexión será:

$$f_b = E * \epsilon$$

Ec. 1

En donde \emptyset es la deformación unitaria.

Para el diseño de vigas de acero el esfuerzo debido a la flexión se calcula usualmente como función del momento flector, que es proporcionalmente a la curvatura. Si (EI) es la constante de proporcionalidad entre el momento flector y la curvatura, se tiene:

$$M = EI\emptyset \quad \text{Ec. 2}$$

Combinando las ecuaciones 1 y 2 se tiene:

$$F_b = My / I \quad \text{Ec. 3}$$

Si lo tomamos a partir del eje centroidal (eje neutro) tenemos:

$$F_b \text{ max} = M (\text{max}) c / I \quad \text{Ec. 4}$$

1.2.14 Ductilidad

La ductilidad es la capacidad que tiene un material estructural de deformarse de manera plástica antes de fallar. Es decir el material puede sufrir deformaciones más allá del límite elástico (deformación linealmente proporcional a la fuerza aplicada) o sea puede presentar deformaciones permanentes sin fallar. La ductilidad se determina de acuerdo a un parámetro definido: Si la ductilidad se mide con respecto a la curvatura de la sección del elemento estructural se denomina ductilidad por curvatura; si se mide con respecto a la rotación sobre la elástica (rotación en una rótula elástica por ejemplo) se le llama ductilidad de rotación; si se determina en el diagrama esfuerzo-deformación de un material se le llama ductilidad de deformación y si se utiliza el desplazamiento o la deflexión para medirla, se denomina ductilidad por desplazamiento. Es importante aclarar que los anteriores valores de ductilidad no se pueden comparar entre si directamente. (Garcia Reyes, 1997).

1.2.15 Degradación de la rigidez

Debido a la alternancia de fuerzas de compresión y de tracción en los ciclos de histéresis en las uniones, se pierde gradualmente la adherencia de las barras de acero con el concreto en los sitios en donde aparecen grietas. Con el aumento del número de ciclos el cual produce alternancia de esfuerzos de tracción y compresión en un mismo ciclo, la pérdida de adherencia se vuelve mayor y se propaga más allá de las grietas, hasta el punto que dicha pérdida puede llegar a los nudos de vigas y columnas, produciéndose una degradación gradual en la rigidez en ellas, que implica mayor flexibilidad de la estructura y menor capacidad de disipación de energía lo cual puede llevar al colapso de la estructura.

1.2.16 Disipación de energía

Un aspecto esencial en el diseño sísmico es proveer a la estructura, además de la capacidad resistente, una buena capacidad de deformación que le permita lograr la mayor ductilidad posible. La disipación de energía consiste en la capacidad que posee la estructura o elemento estructural de trabajar dentro del rango inelástico sin llegar a perder resistencia. Se cuantifica por medio de la energía de deformación que el sistema es capaz de disipar en ciclos de histéresis consecutivos. “El detallado de las secciones para evitar una falla frágil y proporcionar capacidad de deformación es un aspecto básico del diseño” (Bazán & Meli, 2002, pág. 34).

Cuando nos referimos al sistema de resistencia sísmica de la edificación como un todo, este se define por medio del coeficiente de disipación de energía R . El reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 define tres grados de disipación de energía: mínimo (DMI), moderado (DMO) y especial (DES). El coeficiente R se da para cada sistema estructural de resistencia sísmica y depende de dos parámetros como son, el sistema estructural y las características de capacidad de disipación de energía del material de la estructura. El coeficiente R “es una medida de la capacidad de disipación de energía general del sistema de resistencia sísmica cuando los movimientos sísmicos hacen que responda inelásticamente”. (García Reyes, 1997, pág. 152) .

2. TENDENCIAS ACTUALES

2.1 GENERALIDADES

Para alcanzar el objetivo de esta monografía, el cual consiste en revisar las tendencias actuales del comportamiento dinámico en uniones de viga-columna con anclajes post-instalados, se realizó una búsqueda en las bases de datos de varias universidades, especialmente en la Universidad Industrial de Santander, para indagar que tipo de investigaciones se están desarrollando relacionadas con el tema objeto del presente trabajo.

Se encontró que la tendencia internacional es la de investigar sobre el comportamiento de las uniones en sistemas aporticados es decir uniones entre vigas y columnas fundidas insitu, para entender mejor el comportamientos de estos tipos de unión, en especial la unión tipo 2, que es la que incluye cargas sísmicas y poder validar o mejorar las recomendaciones para las futuras actualizaciones de las diferentes normas y códigos sismo resistentes.

Algunas investigaciones en Estados Unidos apuntan al comportamiento de uniones viga columna en reforzamiento con barras de refuerzo pero con anclajes mecánicos. (Russo & Pauletta, 2012). En cuanto a los anclajes químicos post instalados usados en uniones viga columna, el desarrollo se ha realizado por cuenta de las diferentes empresas dedicadas a ofrecer soluciones para actividades de reforzamiento, rehabilitación y reparación de estructuras; las cuales han introducido en el mercado sistemas y productos con base en adhesivos para anclajes de barras de refuerzo y pernos de anclaje. Recordemos que los anclajes químicos post instalados con barras de refuerzo para zonas de amenaza sísmica importante (amenaza sísmica intermedia y alta en nuestro país) que vayan a cumplir una función estructural, deben comportarse como uniones dúctiles y no frágiles, es decir que la falla no vaya a ocurrir en el concreto. Por lo anterior de acuerdo a los códigos sismo resistentes las barras deben cumplir con longitudes de anclaje iguales a las ubicadas en una unión fundida insitu de una construcción nueva, para poder desarrollarse como una unión dúctil; esto quiere decir que las longitudes de anclaje de dichas barras van a ser importantes (de gran longitud), generalmente estas longitudes están alrededor de los 50 diámetros de barra. Es común que muchos proveedores recomiendan para estos anclajes

longitudes pequeñas las cuales son a menudo adoptadas por muchos diseñadores y constructores en sus proyectos, siendo estas longitudes avaladas por sus investigaciones y pruebas de laboratorio. Sin embargo todavía los códigos y normas no avalan dichas recomendaciones y siguen prohibiendo los anclajes de barras de refuerzo con adhesivos de poca longitud de anclaje.

Por la anterior razón y por ser una práctica común en nuestro medio realizada por los diseñadores y constructores en actividades de reforzamiento, rehabilitación y reparación, en Colombia varias universidades preocupadas por dicha práctica se han dado a la tarea de realizar investigaciones para entender mejor el comportamiento de dichos anclajes (de poca longitud) en las uniones viga columna y desarrollar de esta manera validaciones o recomendaciones en el uso de dichos sistemas y productos ofrecidos por empresas proveedoras de este tipo de práctica.

2.2 TENDENCIAS INTERNACIONALES

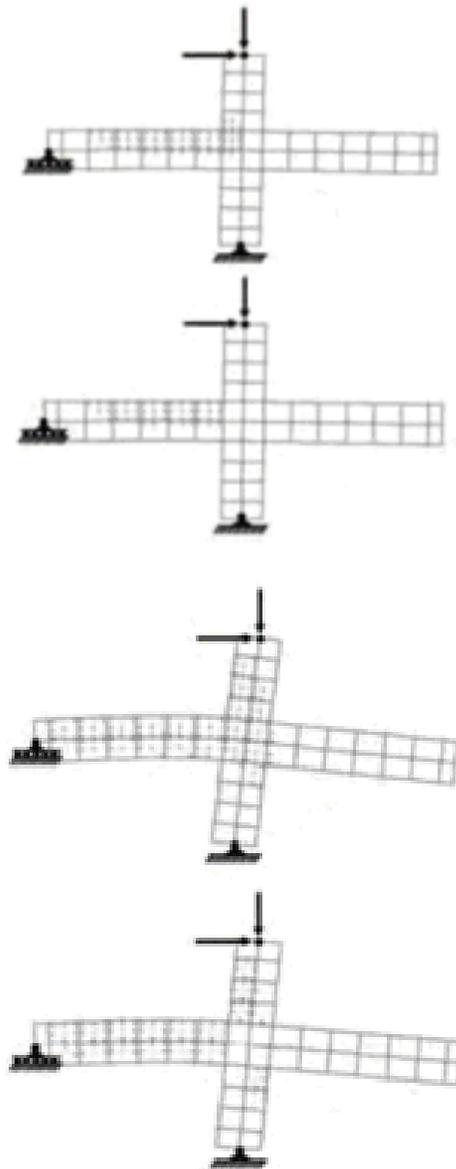
2.2.1 Tendencias de comportamiento unión viga columna

Las tendencias internacionales apuntan a investigaciones sobre el comportamiento de uniones de vigas y columnas en sistemas de marcos en concreto reforzado sin reforzamiento adicional y con reforzamiento adicional. Algunas de las investigaciones encontradas fueron:

En la República popular de China se han realizado investigaciones sobre estas conexiones; en la Liaoning Universidad Tecnológica de Jinzhou, realizó una investigación analítica en donde se utilizó un modelo de elementos finitos tridimensional para uniones viga columna bajo cargas monotónicas y cíclicas, en un intento para evaluar el comportamiento estructural del nudo, encontrándose que la formación de fisuras en el concreto dentro del nudo influye de manera significativa en el comportamiento total de dicha unión. Los desplazamientos se aumentan casi al doble por causa de la influencia del fisuramiento del concreto como se observa en la figura 2-1. Por lo anterior la suposición de nudo rígido que se le da a las uniones de los marcos en los actuales métodos de análisis estructural no es aplicable para estructuras en concreto reforzado, por lo cual la recomendación de esta

investigación es la de realizar un esfuerzo por mejorar los actuales métodos de diseño estructural para salvaguardar la condición de comportamiento de nudo rígido que subyace en los métodos actuales para análisis de marcos. (Ma & Sun, 2012)

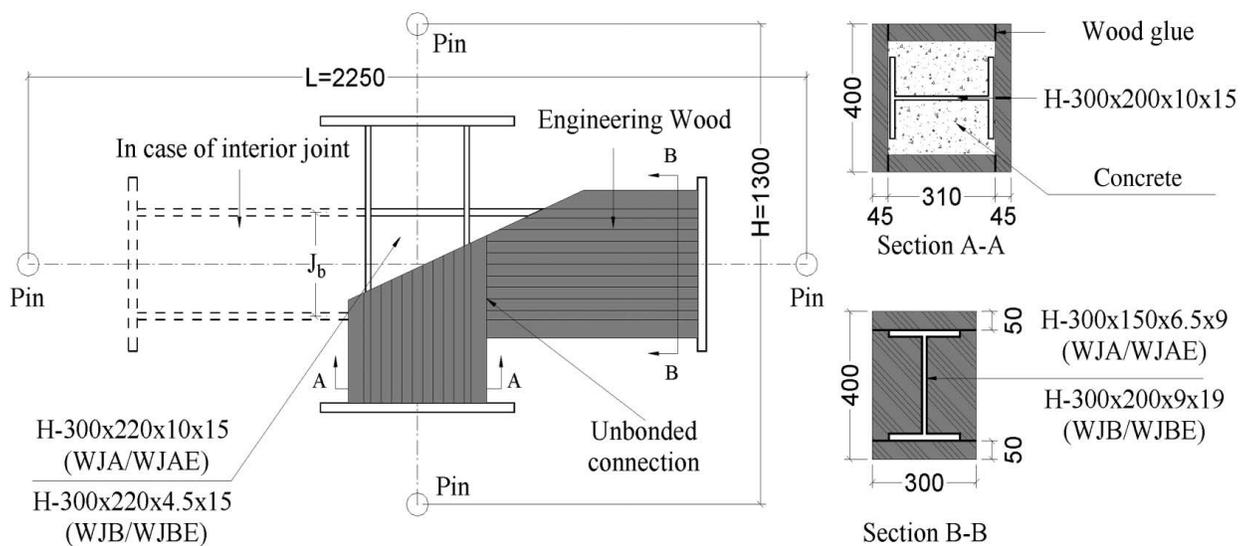
Figura 10. Patrones de fisuramiento del concreto



Fuente: (Ma & Sun, 2012)

Por otro lado el ingeniero Hiroshi Kuramoto de la Universidad de Osaka en Japón, realizó junto con otros colegas una investigación experimental y analítica sobre el comportamiento de uniones viga columna formadas por columnas de acero embebidas en concreto y enchaquetadas por sus cuatro caras con madera, y vigas de acero enchaquetadas con madera como se muestra en la figura 11. Se usaron dos tipos de unión, una unión exterior y otra unión interior.

Figura 11. Detalle de modelos de unión interior y exterior.



Fuente: (Kuramoto, Li, Meas, & Fauzan, 2011)

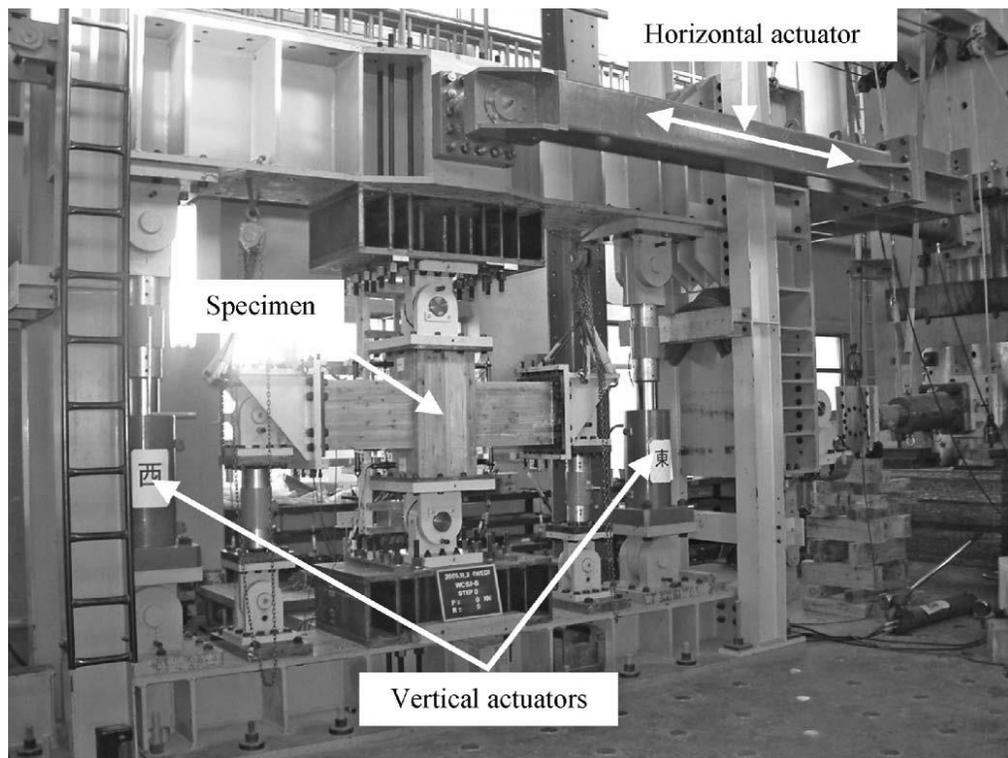
Los modelos se diseñaron para dos tipos de falla: falla a flexión de la viga, y falla a cortante del nudo. Se aplicaron cargas cíclicas laterales de fuerza cortante y simultáneamente carga axial constante. En la figura 12. se observa la prueba de carga de un modelo de viga interior.

Las dos principales conclusiones que se sacaron después de realizados los ensayos experimentales y los chequeos analíticos son:

Las uniones reforzadas con enchaquetado en madera, presentan buen rendimiento estructural mostrando buen comportamiento histerético dúctil y estable.

El máximo esfuerzo a cortante del modelo de unión viga columna exterior diseñado para fallar por cortante fue de 11.5% más pequeño cuando la fuerza fue a tensión, que cuando la fuerza presentada fue a compresión. Esto se debió a que la columna de concreto encaquetada en madera no ofreció contribución a la unión cuando la fuerza que se presentó fue a tensión. (Kuramoto, Li, Meas, & Fauzan, 2011)

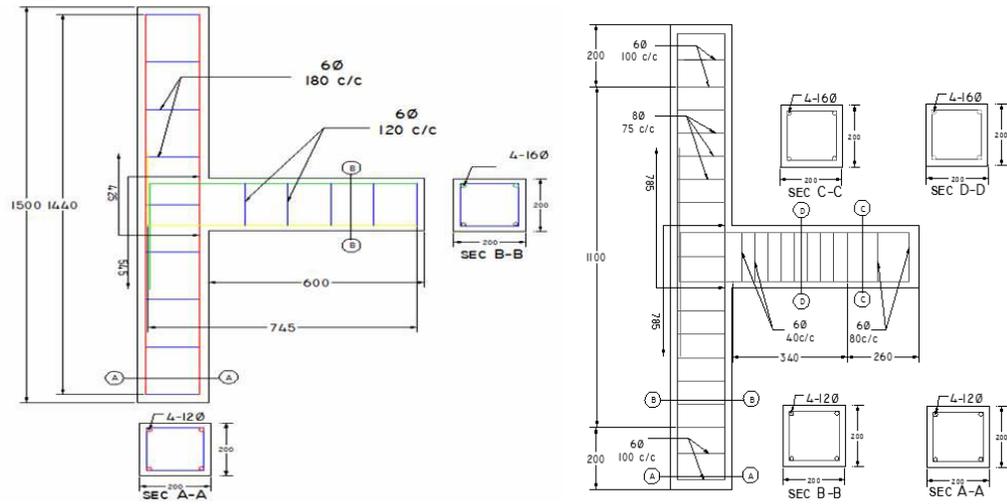
Figura 12. Vista total de la prueba de carga de un modelo de nudo interior..



Fuente: (Kuramoto, Li, Meas, & Fauzan, 2011)

También en la School of Civil Engineering, Karunya University, Coimbatore, en la India se desarrolló una investigación experimental de uniones viga columna fundidas en concreto reforzado y luego reforzadas con fibras de carbono CFRP ensayadas bajo cargas inversas. Se desarrollaron modelos en concreto reforzado con dos cuantías y detallado de refuerzo diferente como se observa en la figura 13. y modelos en concreto reforzado y con reforzamiento adicional en fibra de carbono CFRP como se observa en la figura 14.

Figura 13. Detalles de refuerzo para modelos en concreto reforzado



Fuente: (Ravi & Arulraj, 2010)

Figura 14. Detalles de reforzamiento en CFRP para modelos en concreto reforzado



Fuente: (Ravi & Arulraj, 2010)

Los modelos se ensayaron en laboratorio bajo cargas inversas y se determinaron resultados para características como capacidad de carga y capacidad de absorción de energía. Los resultados obtenidos fueron:

Los modelos en concreto reforzado con refuerzo adicional en CFRP presentaron capacidades de carga mayores en 30.5% a 37.5% que las que presentaron los modelos en concreto reforzado.

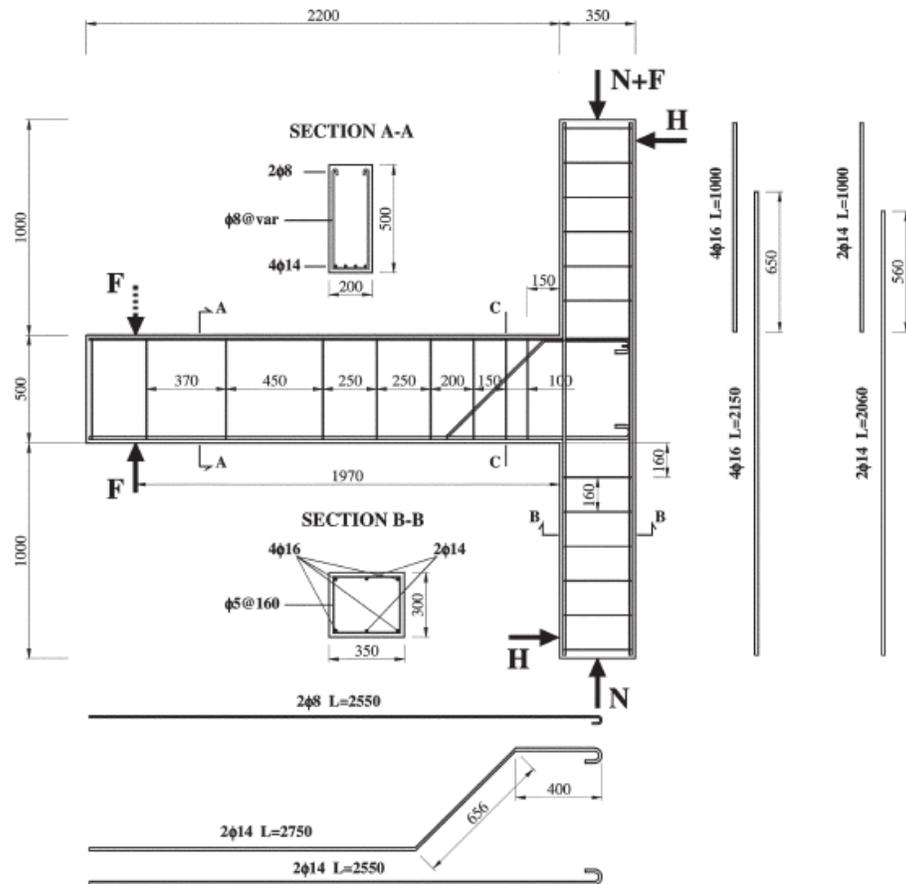
Los modelos en concreto reforzado con refuerzo adicional en CFRP presentaron capacidades de absorción de energía mayores en 22% a 40.5% que las que presentaron los modelos en concreto reforzado.

El resultado más importante es que los modelos reforzados con CFRP presentaron la falla en un tramo cerca al nudo pero en la viga, conservándose en buenas condiciones la columna, mientras que los modelos en concreto reforzado presentaron la falla siempre en la columna, lo cual debe ser evitado para estructuras en condiciones de amenaza sísmica importante. (Ravi & Arulraj, 2010)

Otro trabajo de investigación interesante presenta pruebas a modelos de uniones viga columna en edificios de los años setenta los cuales presentan deficiencias en refuerzo y detallado del mismo, debido a que en esa época se diseñaba prácticamente solo para cargas gravitacionales y poco se tenía en cuenta las cargas sísmicas; además en esa época se utilizaba acero de refuerzo liso. En este trabajo se realizaron modelos experimentales en concreto reforzado con deficiencias en el refuerzo y en el detallado, colocando estribos separados y poco acero de refuerzo (barras lisas) para simular uniones viga columna de la época de los años setenta. En la figura 15. se puede observar detalle del refuerzo de la unión viga columna propuesta. También se proponen varios niveles de reforzamiento para estos modelos con el objetivo de estudiar las posibles soluciones de reforzamiento para este tipo de estructuras tan comunes en nuestras ciudades. El primer nivel de reforzamiento que se propone es el de reemplazar el concreto fisurado en los nudos por un mortero de reparación apto para trabajar bajo estos nuevos esfuerzos; la segunda técnica es romper el concreto en los sitios donde se localiza el refuerzo longitudinal de las vigas y soldarle en sus extremos varillas con rosca a las cuales se les colocaron platinas y tuercas para generar

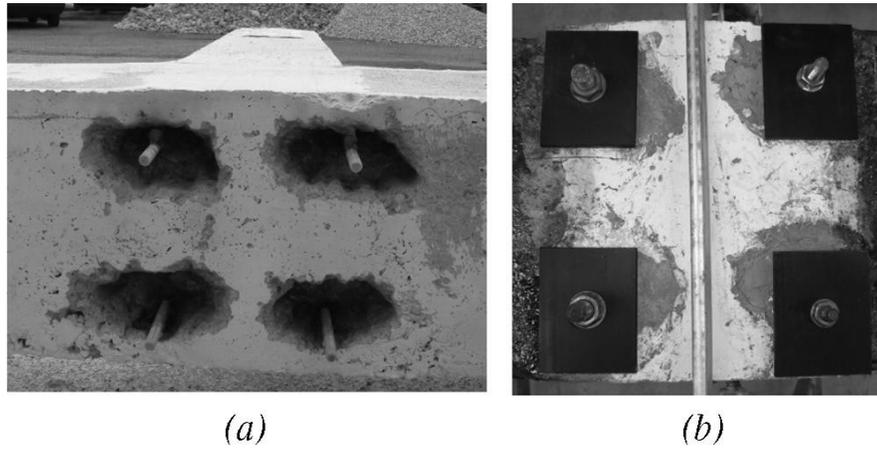
un anclaje mecánico (ver figura 16.) y el tercer nivel es el de reforzar las vigas y columnas mediante láminas de fibra de carbono CFRP para darle confinamiento a la viga y a la columna y también aumentar la cuantía de refuerzo longitudinal de la viga (ver figura 17.).

Figura 15. Detalle refuerzo unión viga columna en edificios de los años setenta



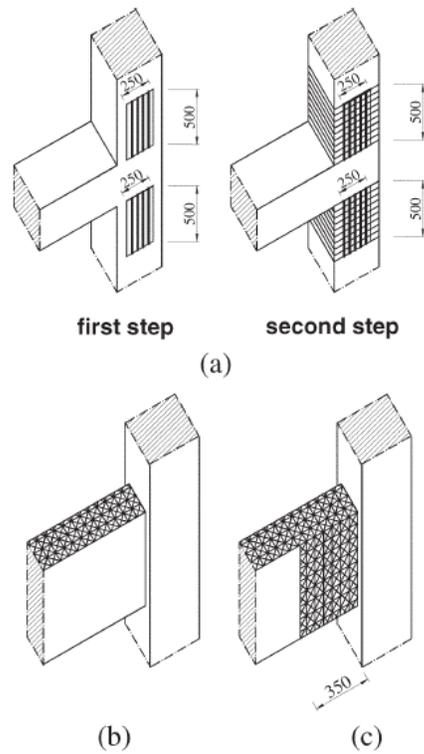
Fuente: (Russo & Pauletta, 2012)

Figura 16. Detalle reforzamiento con anclaje mecánico



Fuente: (Russo & Pauletta, 2012)

Figura 17. Detalle reforzamiento con láminas de CFRP



Fuente: (Russo & Pauletta, 2012)

En esta investigación experimental se llegó a la conclusión que las uniones viga columna en concreto reforzado que usaban refuerzo de varillas lisa en los edificios de los años setenta fallan ante cargas sísmicas por perdida de anclaje del refuerzo longitudinal y por exceder los esfuerzos de flexión en las vigas. Se determinó que el reforzamiento del nudo generando anclajes mecánicos en el refuerzo de la viga funciona muy bien porque mejora la capacidad del nudo para disipar energía y porque es una técnica fácil y viable de aplicar en edificaciones existentes. En cuanto al nivel de reforzamiento utilizando láminas de fibra de carbono CFRP es bastante efectiva cuando se utiliza como refuerzo de vigas porque produce incrementos en los esfuerzos de hasta 49% en algunos casos, pero resulta bastante costosa; y es poco efectiva cuando se usa para confinar las columnas. (Russo & Pauletta, 2012)

2.2.2 Tendencias de comportamiento unión viga columna con anclajes químicos

Como se dijo anteriormente los anclajes post instalados que más se están utilizando en las actividades de reforzamiento, rehabilitación y reparación, son los anclajes con adhesivos químicos. La mayor parte del desarrollo de dichos anclajes ha sido impulsada por los grandes avances de agentes químicos tales como el polyester, el vinylester y el epóxico.

En las estructuras de concreto estos anclajes químicos son bastante usados tanto para uso estructural como no estructural y son muchas veces preferidos en lugar de métodos insitu, debido a que a veces son prácticamente la forma más viable de ejecutar alguna actividad en la construcción. Sin embargo el uso de dichos anclajes requiere la completa comprensión de los esfuerzos de distribución, tipos de falla, y de muchos otros factores que influyen la capacidad de estos sistemas. La mayoría de investigaciones que se han realizado hasta ahora se han concentrado en el comportamiento de los anclajes pero bajo cargas estáticas. El comportamiento bajo cargas dinámicas y cíclicas como el sismo hasta ahora se está investigando y es por eso que la mayoría de normas y códigos vigentes recomiendan diseñar estos tipos de anclajes como si fueran barras de refuerzo fundidas in situ en el concreto.

Empresas dedicadas a proveer sistemas y productos para uso en actividades de la construcción, han desarrollado investigaciones experimentales y analíticas sobre los anclajes químicos. Por ejemplo la firma de anclajes Hilti a realizado investigación sobre el diseño y aplicación de anclajes post instalados con adhesivos de alto poder de unión (High bond adhesive).

Cuando las barras de refuerzo son post instaladas en huecos taladrados en concreto endurecido, morteros adhesivos se utilizan para servir de unión entre las barras y el concreto endurecido. Usando adhesivos especiales se pueden lograr esfuerzos de unión más altos que los que se logran cuando se usan barras corrugadas fundidas insitu en el concreto. En esta investigación se ejecutaron pruebas para determinar la afectación de la longitud de anclaje necesaria para las barras corrugadas post instaladas teniendo en cuenta las fallas por splitting/spalling y pullout que se pueden producir al anclar dichas barras. Se realizaron varias pruebas de splitting y pullout a las barras ancladas en el concreto endurecido usando diferentes tipos de adhesivo, diferentes calidades de concreto y diferentes espesores de recubrimiento. Es importante aclarar que el esfuerzo de unión entre el concreto y las barras ancladas de acuerdo al EUROCODIGO 2 es función del esfuerzo de tensión del concreto, y la longitud básica de anclaje de una barra es función del diámetro de la barra, del esfuerzo de diseño de la barra y del esfuerzo de unión. A mayor esfuerzo de unión menor longitud básica de anclaje. La resistencia al efecto de falla splitting es incrementada cuando el recubrimiento del concreto aumenta y este incremento puede variar desde el 15% al 30%. (Randl & Kunz, 2012).

Los resultados de esta investigación muestran que el comportamiento de las barras de refuerzo post instaladas en el concreto endurecido ancladas utilizando adhesivos químicos, es bastante bueno y en algunos aspectos superan al comportamiento de las barras corrugadas fundidas insitu en el concreto. Sin embargo los buenos resultados dependen de la calidad del adhesivo, es por eso que se recomienda realizar pruebas a cada marca de producto las cuales deben garantizar que la rigidez del adhesivo sea tal que este no cree concentraciones de esfuerzo de unión (bond stress) en un extremo de la zona de anclaje lo cual llevaría a una falla splitting prematura. Ya que para el diseño de barras post instaladas en el concreto reforzado se tiene en cuenta el valor alto de esfuerzo de unión ofrecido por el adhesivo químico, este esfuerzo se deberá chequear con niveles de idoneidad y servicio,

sobre todo en aspectos como deformación, creep y agrietamiento. Este trabajo recomienda seguir realizando investigaciones para conocer de manera mejor el real comportamiento de las barras de refuerzo post instaladas en el concreto endurecido. (Randl & Kunz, 2012)

Algunas otras empresas como Sika y Simpson strong-tie, han dedicado esfuerzos también para conocer mejor el comportamiento de los anclajes post instalados y presentan especies de manuales en donde ofrecen además de sus sistemas y productos algunas recomendaciones de instalación y procedimientos de diseño acordes con algunos códigos vigentes. Hoy en día están ofreciendo adhesivos químicos que se pueden usar en anclajes de barras de refuerzo a concreto endurecido no fisurado y concreto endurecido fisurado y que son aptos para trabajar bajo cargas dinámicas o de sismo. En los anexos se presentan información ofrecida por estas empresas en especial lo que se refiere a adhesivos químicos que se pueden usar en concreto fisurado y bajo cargas sísmicas.

2.3 TENDENCIAS EN NUESTRO MEDIO

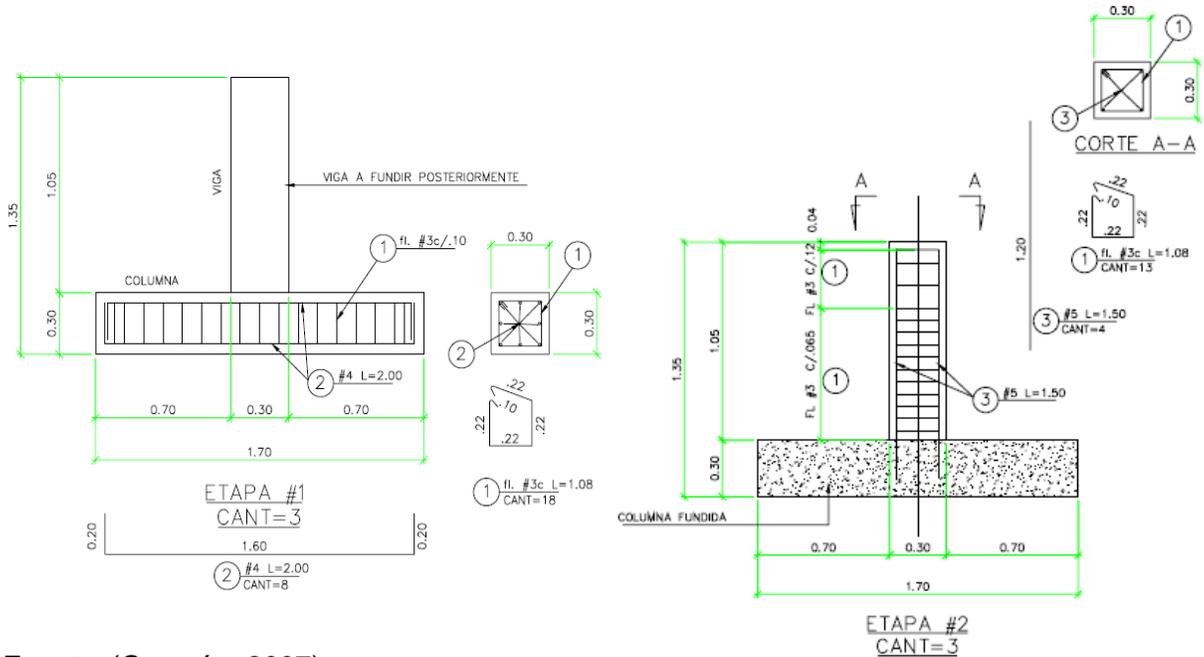
En nuestro medio en la mayoría de actividades de reforzamiento, rehabilitación y reparación en donde se incluyen sistemas de anclajes de elementos nuevos con elementos existentes por lo general se aplican anclajes post instalados con adhesivos químicos. La mayoría de veces los diseñadores y constructores se asesoran de las empresas proveedoras de sistemas y productos desarrollados para ser usados en diferentes actividades de construcción incluyendo los anclajes post instalados. Por lo general se termina usando los productos recomendados por ellos en nuestros proyectos sin tener conocimiento alguno de dichas soluciones y confiando plenamente en dicha especificación. Por consiguiente terminamos aplicando productos comerciales que muchas veces no son la solución más acertada para el trabajo a realizar. La aplicación de los anclajes post instalados con adhesivos químicos no es la excepción, y desafortunadamente terminamos realizando anclajes en el concreto endurecido con longitudes de anclaje tan pequeñas con las cuales no sabemos si nos podrán dar garantía de buen comportamiento estructural. Uno de los errores frecuentes es el de diseñar y ejecutar anclajes con falla frágil en ciudades de amenaza intermedia y alta en donde de acuerdo a las normas NSR-10 solo se permiten anclajes que tengan comportamiento dúctil. Está claro que para diseñar un anclaje con

comportamiento dúctil con barras de refuerzo, se debe realizar (de acuerdo a los códigos de reparación vigentes) como si fuera una barra de refuerzo corrugado que se va a usar en una estructura nueva fundida insitu y por lo tanto se deberán respetar las longitudes de anclaje y desarrollo recomendadas para poder garantizar un comportamiento dúctil para dichos anclajes. Lamentablemente vemos en la mayoría de obras que se utilizan longitudes de anclaje muy pequeñas entre 15cm y 30cm y con adhesivos que no cumplen con las propiedades necesarias para el buen comportamiento del anclaje.

Por lo anterior algunas universidades del país se han dedicado a realizar investigaciones sobre anclajes preinstalados y post instalados con adhesivos químicos en concreto endurecido y bajo cargas dinámicas y cíclicas, usando como variables principales: el tipo de unión viga-columna, la longitud de anclaje, el confinamiento, el tipo de adhesivo etc.

En la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” se han realizado varios trabajos que incluyen el estudio del comportamiento dinámico de la unión viga columna con anclajes post instalados y bajo cargas cíclicas. En el año 2007 se realizó un programa experimental en el cual se efectuaron pruebas con prototipos a escala real de uniones viga columna. Se construyeron tres prototipos viga-columna; primero se fundieron las columnas con refuerzo longitudinal y transversal y luego de que fraguaron se les adicionó refuerzo longitudinal anclado con un adhesivo epóxico para conformar la viga y luego se fundieron. La longitud de anclaje fue de 0.15m. Detalles del refuerzo se observan en la figura 18. También se construyeron dos prototipos que fueron fundidos de manera monolítica, es decir como una unión monolítica tradicional. Todos los prototipos se ensayaron bajo cargas cíclicas (dinámicas). Los resultados mostraron que los modos de falla de las uniones con anclajes químicos fueron fallas frágiles con poca disipación de energía en donde perdieron adherencia los anclajes, y que además su resistencia fue mucho menor comparada con los prototipos monolíticos. El modo de falla de los prototipos monolíticos fueron dúctiles. La poca longitud de anclaje fue la causa de la poca ductilidad y de la falla por adherencia de los prototipos con refuerzo post instalado. (Guzmán, 2007).

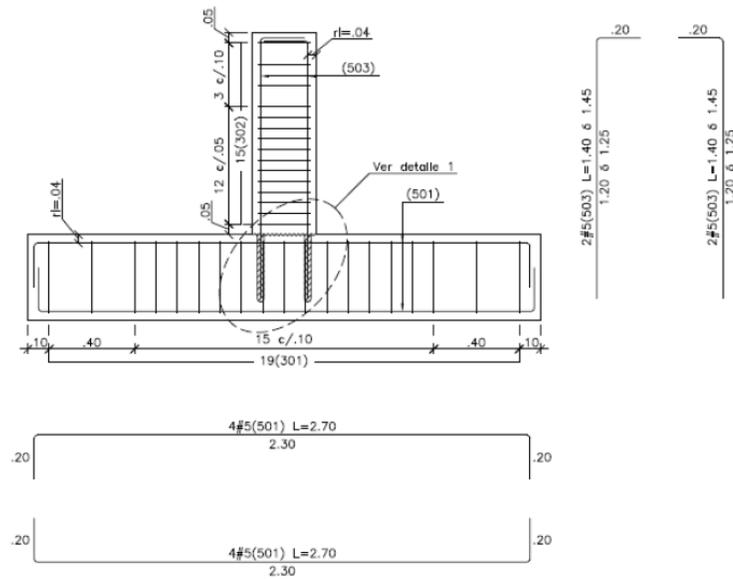
Figura 18. Detalle de refuerzo de unión viga columna con refuerzo anclado



Fuente: (Guzmán, 2007)

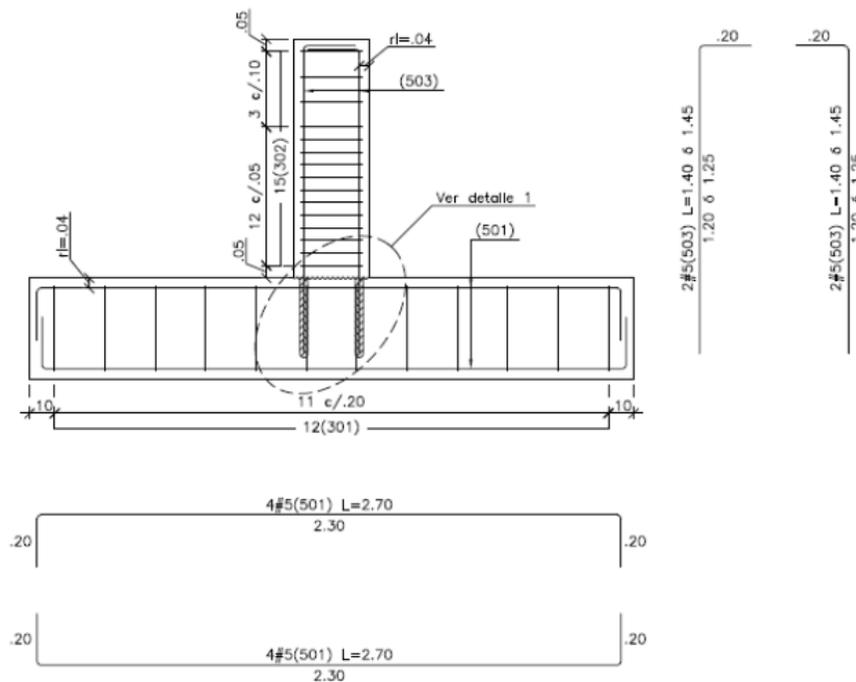
En el año 2014 se realizaron nuevos trabajos con uniones viga columna y barras ancladas con adhesivos químicos. En este trabajo se construyeron diez prototipos; ocho prototipos se construyeron en dos etapas; en la primera se fundieron las columnas y después de fraguado el concreto se hicieron anclajes para las barras de refuerzo de las vigas. En este trabajo se usaron longitudes de anclaje de 0.30m y de 0.35m. y además en las columnas se variaron las separaciones de los flejes de refuerzo transversal obteniendo columnas con buen confinamiento y pobre confinamiento en el área del nudo. Los otros dos prototipos fueron construidos de manera monolítica. En la figura 2-19: se observa el detalle del reforzamiento de los prototipos construidos con zona confinada y en la figura 2-20. el detalle del reforzamiento de los prototipos construidos con pobre confinamiento.

Figura 19. Detalle del reforzamiento de los prototipos construidos con zona confinada



Fuente: (Ramirez, 2014)

Figura 20.. Detalle del reforzamiento de los prototipos construidos con pobre confinamiento



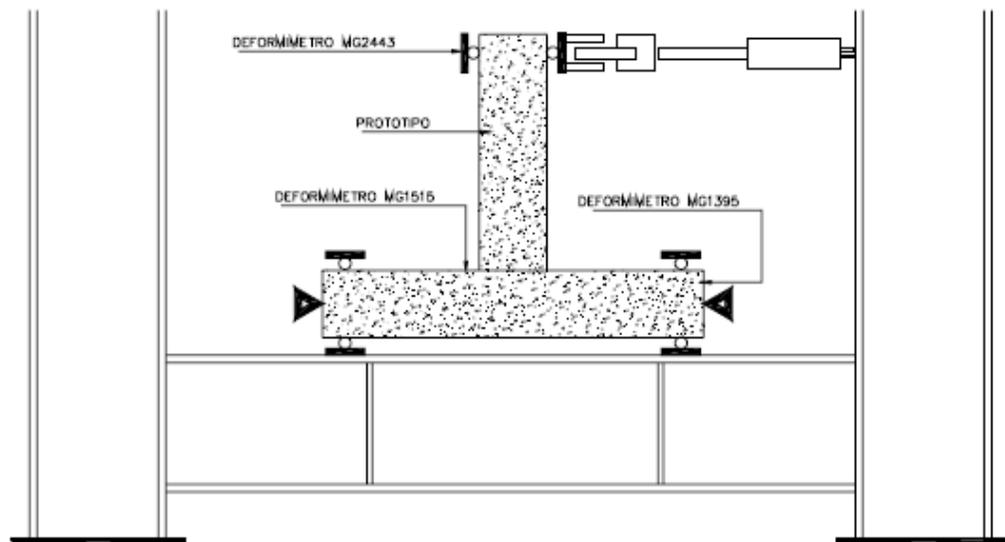
Fuente: (Ramirez, 2014)

Los prototipos se ensayaron bajo cargas cíclicas (dinámicas) en un marco estructural y con ayuda de un actuador en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería como se puede observar en la figura 2-21.

Después de obtener los resultados de los ensayos se pudo concluir que el modo de falla de las uniones monolíticas fueron de buen comportamiento dúctil con buena disipación de energía y buena resistencia. Los prototipos con barras ancladas con longitud de 0.35m se comportaron mejor que los que tuvieron longitud de anclaje de 0.30m, su falla tuvo cierto grado de ductilidad y se presentó poca pérdida de adherencia. Los prototipos con barras ancladas con longitudes de 0.30m presentaron modos de falla frágiles y por lo tanto poca disipación de energía.

Se confirmó que el buen confinamiento de la unión ayuda a mejorar la ductilidad del nudo; se pudo comprobar que la instalación de los anclajes debe ser realizada por personal calificado para poder obtener buenos resultados en las uniones. (Ramirez, 2014)

Figura 21. Esquema de ensayo en marco metálico con actuador



Fuente: (Ramirez, 2014)

3. CONCLUSIONES

Después de revisada la información encontrada en cuanto a las tendencias internacionales actuales del comportamiento dinámico de uniones viga columna se puede observar que dichas tendencias apuntan a investigaciones que buscan conocer comportamientos relacionados con actividades de reforzamiento de los elementos que conforman dichas uniones utilizando materiales complementarios como la madera, el acero y definitivamente el interés general por indagar más sobre los materiales FRP en especial las fibras de carbono y de vidrio. Se encontró bastante interés de países como China y la India en realizar investigación experimental y analítica sobre este tema.

En cuanto al tema de los anclajes post instalados con adhesivos químicos, las tendencias indican que los más interesados en este tema son las empresas proveedoras de sistemas y productos para actividades de reforzamiento, rehabilitación y reparación de estructuras. Estas empresas inviertan grandes esfuerzos en investigaciones que los lleven a proponer métodos de diseño basados en el desarrollo y eficiencia de los adhesivos químicos para poder ofrecer anclajes seguros. Las investigaciones apuntan a desarrollar adhesivos que mejoren la adherencia entre las barras y el concreto para de esta forma poder disminuir las longitudes de anclaje que hasta este momento son bastante grandes y que por lo pronto se seguirán diseñando con base en los métodos tradicionales de diseño del concreto reforzado.

En el ámbito nacional existe un interés por parte de algunas universidades en investigar el comportamiento de anclajes con barras de refuerzo y adhesivos químicos, debido a que dicha actividad es una práctica común en nuestro medio y es preocupante ver como se está realizando de manera irresponsable en muchos proyectos. Es bien sabido que cuando se efectúan anclajes de varillas en el concreto endurecido generalmente esta actividad se deja bajo la responsabilidad de personal poco calificado. Generalmente se hacen anclajes con longitudes muy pequeñas siguiendo muchas veces procedimientos poco acertados que nos pueden llevar a cometer graves errores en un proyecto. La poca investigación realizada hasta ahora en nuestro país nos muestra que estamos utilizando anclajes post instalados con longitudes muy bajas, las cuales en el momento de trabajar bajo cargas sísmicas no

nos van a garantizar uniones dúctiles lo cual nos puede llevar a un modo de falla por adherencia y por consiguiente a una falla frágil.

Definitivamente todas las investigaciones coinciden en establecer protocolos de carga que incluyan las cargas dinámicas y cíclicas, en especial las cargas sísmicas. El interés general es el de buscar mecanismos bajo los cuales se pueda mejorar el comportamiento inelástico de las uniones viga-columna, con el objetivo de alcanzar conocimientos que nos lleven a conocer y entender mejor el comportamiento inelástico de los materiales en este caso el del concreto reforzado y poder diseñar y construir estructuras más seguras.

De acuerdo a todo lo anterior podemos ver que la investigación que realizamos en nuestro país con respecto al tema en cuestión es bastante pobre, y que las pocas entidades que las desarrollan lo hacen con poco presupuesto.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI 318 - 11. (2011). *Building code requirements for structural concrete and commentary Apendice D Anclajes en concreto*. American Concrete Institute ACI.
- ACI 355.4-11. (2011). *qualification of Post-installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary*. American Concrete Institute ACI.
- ACI SP-283(10). (s.f.). *Understanding adhesive anchors: Behavior, materials, installation, design*. (R. E. wollmarshausen, & D. F. Meinhelt, Edits.) American Concrete Institute.
- ACI-355, A. C. (1991). *Informe sobre el estado del arte de los anclajes en hormigón (ACI 355.1R-91)*. American Concrete Institute.
- AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, Colombia: 3R Editores Ltda.
- Alcocer, S. M. (1995). *Comportamiento y diseño de estructuras de concreto: uniones de elementos*. Mexico: Centro Nacional de Prevención de Desastres e Instituto de Ingeniería.
- Asociación Colombiana de Productores de Concreto - Asocreto. (2006). *El concreto y los terremotos: Conceptos, comportamiento, patología y rehabilitación (1a ed.)*. Santafé de Bogotá: Instituto del Concreto.
- Bazán, E., & Meli, R. (2002). *Diseño Sísmico de Edificios (1a ed.)*. Mexico D.F, Mexico: Limusa S.A de C.V.
- Cook, R. A., & Burtz, J. L. (Agosto de 2003). Design Guidelines and Specifications for Engineered Grouts used in Anchorages and Pile Splice Applications. *Report No. BC 354 RPWO #48 Florida Department of Transportation*, 119.
- Cook, R. A., & Konz, R. C. (2001). Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. *ACI Journal Structure Engineers*, 98(1), 76-86.
- García Reyes, L. E. (1997). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: UNIANDES.
- Guzmán, L. (2007). *Tesis de Posgrado no publicada Programa experimental para el estudio de la unión viga-columna*. Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", Facultad de ingeniería Civil, Bogotá.
- James, R. W., De la Guardia, C., & Mc Creary, C. R. (1987). Strength of Epoxy-Grouted Anchor Bolts in concrete. *Journal of Structural Engineering*, 2365-2381.

- Klingner, R. (2007). *Seminario Anclajes al concreto*. Instituto de Ingeniería UNAM, Mexico D.F.
- Kuramoto, H., Li, B., Meas, K., & Fauzan, a. (01 de august de 2011). Experimental and Analytical Performance Evaluation of Engineering Wood Encased Concrete-Steel Beam-Column Joints. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING - ASCE*, 137(8), 822-833.
- Lehr, B., & Eligehausen, R. (2001). *Design of anchorages with bonded anchors tension load*. Stuttgart, Alemania: RILEM Publications.
- Ma, D., & Sun, H. (2012). Studying on Cracking of reinforced-concrete beam. 613-616.
- Muenger, F., Kupfer, H., Jaehring, A., & Kunz, J. (2002). Bonded-in reinforcement for frame node connections. *Bond in concrete - From resarch to standards*, 8.
- Nilson, A. H., & Winter, G. (1994). *Diseño de estructuras de concreto* (11a ed.). Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Park, R., & Paulay, T. (1997). *Estructuras de Concreto Reforzado*. Mexico D.F, Mexico: Limusa S.A.
- Ramirez, D. J. (2014). *Tesis de posgrado Comportamiento Dinámico de Uniones Viga-columna*. Escuela Colombiana de Ingeniera "Julio Garavito", Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá.
- Randl, N., & Kunz, J. (2012). Concrete Splitting for Rebars Post-Installed with High Bond Adhesives. *International Conference on Bond in Concrete 2012*.
- Ravi, R., & Arulraj, P. (2010). Experimental Investigation on the Behavior of Retrofitted Reinforced Concrete Beam-Column Joints with CFRP Wrap Subjected to Load Reversal. *International Journal of Applied Engineering Research*, 5(1), 109-120.
- Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño Sísmico de edificios*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Russo, G., & Pauletta, M. (Abril de 2012). Seismic Behavior of Exterior Beam-Column Connections with Plain Bars and Effects of Upgrade. *ACI Structural Journal*, 109(2), 225-233.
- Zambrano López, J. L. (2015). *Notas de clase "Anclajes adheridos"*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Zamora, N. A., Cook, R. A., Konz, R. C., & Consolazio, G. R. (2003). Behavior and Design of Headed and Unheaded Grouted Anchors Loaded in Tension. *ACI Structural Journal*, 100(2), 222-230.

ANEXO

Anexo A: Información de proveedores de anclajes químicos

Anclajes de barras corrugadas a posteriori: modelos de cálculos.

La conexión estructural entre elementos de hormigón armado ejecutados en diferentes fases es cada vez más frecuente, tanto en proyectos de obra civil como de edificación y muy particularmente en la conexión entre forjados y elementos perimetrales de cimentación como muros continuos, muros pantalla o pantallas de pilotes.

Por **Afonso González**, Ingeniero, Oficina Técnica, Hilti Española, S.A.

La conexión realizada con barras corrugadas *a posteriori* e instaladas con resina de alta adherencia proporciona fiabilidad en el diseño, sin perder de vista otros aspectos como la sencillez, reducción del tiempo de ejecución de la obra y costes, frente a otras soluciones tradicionales tales como dejar esperas embebidas en los armados de muros o pilotes.

En este artículo se desarrollan diferentes modelos de cálculo para el detalle de este tipo de conexiones simplemente apoyadas, discutiéndose las diferentes características e hipótesis a considerar.

El diseño de este tipo de uniones es un caso particular de conexión entre elementos de hormigón armado ejecutados en diferentes fases, tema ya tratado en el número 1 de esta revista¹. El funcionamiento de la conexión está basado en la capacidad de las barras ancladas *a posteriori* para transmitir tracciones y/o cortantes entre las dos secciones. Su diseño se puede abordar de dos maneras diferentes:

1. Diseños basados en el comportamiento equivalente de barras corrugadas instaladas

¹ Ver en el número 1 de esta revista el artículo "Anclaje de barras corrugadas a posteriori".

a posteriori con resinas de alta adherencia y barras corrugadas *in situ*. En este caso es posible diseñar según las reglas habituales del hormigón, siempre y cuando la resina empleada cumpla unas condiciones mínimas (Ver figura 1).

En el caso de barras *a posteriori* el anclaje deberá realizarse en prolongación recta dentro de la estructura o ser solapadas con la armadura existente en el elemento base. La longitud de anclaje es función directa de la adherencia que es posible desarrollar siendo necesario analizar la estructura de manera global de acuerdo a un modelo de bielas y tirantes.

Las características fundamentales de este modelo son:

- Gran profundidad de empotramiento de las barras en general.
- Esfuerzos elevados.
- Las barras únicamente trabajan a tracción. El cortante es recogido por la junta entre hormigones.
- Se desprecia la resistencia a tracción del hormigón.
- Se permiten distancias a borde y entre barras muy reducidas, estableciéndose los mínimos en 2ϕ o 30 mm al borde y 5ϕ entre ejes de barras.
- Se persigue anclar la máxima capacidad de la barra ($A_s \cdot f_{yd}$), con lo que se consigue que el fallo asociado sea dúctil.

2. Diseños basados en el comportamiento de la barra corrugada instalada a posteriori como un anclaje.

Las barras de conexión trabajan como un anclaje químico *a posteriori* y deben calcularse según un método de cálculo de anclajes que evalúe la resistencia del material base (p.e. SOFA, Hilti CC)².

Las características de este diseño son:

- Análisis local de la zona de anclaje.
- Profundidad menor de empotramiento respecto al diseño anterior.
- Esfuerzos más reducidos.
- Las barras trabajan tanto a tracción como a cortante.
- Es necesario tener en cuenta la resistencia a tracción del hormigón (rotura por cono de hormigón y por borde de hormigón posibles).
- Requerimientos geométricos más exigentes (distancias mínimas a borde y entre anclajes mayores).
- En este modelo es posible anclar únicamente la fuerza necesaria, si bien el modo de fallo

² Métodos de cálculo de anclajes a posteriori:
- Hilti SOFA: Solutions For Fastening.
- Hilti CC: Concrete Capacity Method.

asociado puede ser frágil si no se llega a la plastificación del acero de la barra.

Existen dentro de los códigos estructurales de hormigón armado referencias no explícitas a la teoría de anclajes, como puede ser el denominado *efecto pasador* (Código Modelo CEB-FIB 1990 para hormigón estructural). Este efecto se basa en la capacidad de las barras de recoger esfuerzo cortante contra un borde.

Por otro lado, el comportamiento de anclajes *a posteriori* trabajando a cortante viene recogido en el Anexo C de la ETAG 001. En este documento se presenta un modelo de cálculo para estimar la resistencia de estos elementos, proponiéndose diferentes modos de fallo a cortante (acero, desconchamiento y rotura por borde)³.

Teoría de corrugados

Este tipo de diseño es el recogido habitualmente por los códigos estructurales en artículos correspondientes al diseño de la zona de apoyo. Es posible, por tanto, el uso de una barra anclada *a posteriori* con resinas de alta adherencia para reproducir este modelo. Esta resina debe disponer de las homologaciones correspondientes para permitir un diseño con seguridad. La resina Hilti HIT-RE 500 es una de las primeras resinas homologadas a nivel europeo para este uso.

³ ETAG 001: Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete. Annex C: Design Methods for Anchorages.

Figura 1. Propiedades exigibles a resina en el diseño de barras corrugadas a posteriori.

- Propiedades similares al hormigón (alta resistencia a compresión pero baja a tracción).
- Resistencia (Pull-Out) mayor o similar que la de barras embebidas para la misma longitud de anclaje.
- Rigidez similar a la de barras embebidas.
- Resistencia a corrosión, fatiga o fuego.
- Permanencia de propiedades en el tiempo.

El primer paso es la estimación de las cuantías mínimas necesarias a anclar en la zona de apoyo para la correcta transmisión de esfuerzos y garantizar el correcto funcionamiento de la junta. En general esta cuantía dependerá de:

1. Esfuerzos (cortante a transmitir).
2. Cuantías mínimas (geométricas, control de figuración).
3. Cuantías mínimas por control de E.L.S.

Los valores de estas cuantías están definidos en los articulados de la norma de hormigón estructural correspondiente. En la figura 2 se indican los valores recogidos en el EC-2.

Estas cuantías determinadas deben ser ancladas en el elemento de hormigón ya ejecutado (muro/pantalla de pilotes), determinando el número de barras y diámetro necesario.

Por último, se calcula la longitud de anclaje de la barra siguiendo la norma correspondiente para garantizar la plastificación de la sección de acero. Para ello es fundamental la determinación del punto a partir del cual la barra se encuentra en una zona comprimida (incidencia de biela de compresión), siendo el anclaje efectivo (Ver figura 3).

Figura 2. Cuantías mínimas y máximas de armadura según el EC-2

Mínimo y máximo armado longitudinal de vigas (EC-2 Art 5.4.2.1.1.)	
Armadura mínima en tracción (control fisuración) (1)	$A_{s_inf,min} = 0,6 \cdot b \cdot d / f_{yk}$
Armadura mínima en tracción (control fisuración) (2)	$A_{s_inf,min} \geq 0,0015 \cdot b \cdot d$
Armadura máxima (tracción o compresión)	$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c$
Armaduras de losas en las proximidades de apoyos (EC-2 Art 5.4.3.2.2.)	
Armadura mínima inferior (apoyo simple)	$A_{s_inf,min} = 0,50 \cdot A_{s,cv}$
Tracción a resistir por armadura inferior	$F_t = V_{sd}$
Armadura de tracción correspondiente a V_{sd}	$A_{s_inf,req} = F_t / f_{yd}$
Armadura superior por empotramiento parcial	$A_{s_sup,req} = 0,25 \cdot A_{s,cv}$
Área mínima de armaduras por control E.L.S. (EC-2 4.4.2.2.)	
Armadura mínima inferior (apoyo simple)	$A_{s_fis,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,ef} \cdot A_{ct} / s_s$
con	
$f_{ctk0,95}$: Resistencia característica a tracción (fractil 95%)	k : Coeficiente de tensiones no uniformes
$f_{ct,ef}$: Resistencia efectiva a tracción	A_{ct} : Área de hormigón en zona de tracción
k_c : Coeficiente de distribución de tensiones	s_s : Tensión máxima permitida en armadura tras fisuración

El uso de una resina homologada permite el cálculo de una longitud de anclaje en prolongación recta al menos igual que la reflejada en cualquier código de hormigón para barras en condiciones de buena adherencia.

Los valores de adherencia recogidos en la homologación están muy penalizados al asumir condiciones de ejecución muy exigentes.

El uso de la resina Hilti HIT-RE 500 o Hilti HIT-HY 150 permite reducir la longitud de anclaje de una barra a posteriori frente a una embebida siempre y cuando las condiciones geométricas de distancias entre barras y a borde lo permitan. Esta reducción, al

aumentar las tensiones de adherencia entre barra corrugada y material base, requiere un control específico del hormigón (fallo por *splitting*). Siguiendo otros modelos contrastados de anclaje de barras, por ejemplo basado en ACI 318, que asumen valores de adherencia más altos y que diferencian fallos de *pull-out* y *splitting*, es posible calcular la longitud mínima necesaria para anclar un determinado esfuerzo. Adicionalmente es necesario garantizar que las condiciones de ejecución se respetan, poniendo especial aten-

ción en el proceso de limpieza del taladro e inyección.

Por otro lado, cabe indicar que existen otros métodos de diseño para la transmisión de cortante siguiendo teoría de corrugados recogidos en los diferentes articulados de Códigos de Hormigón Armado,

como puede ser el modelo de transmisión por corte fricción⁴.

El enfoque consiste en que a medida que comienza a producirse un desplazamiento a lo largo de la junta, la rugosidad de las superficies obliga a las caras opuestas a separarse. Esta separación es

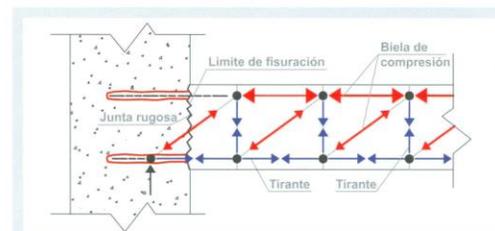
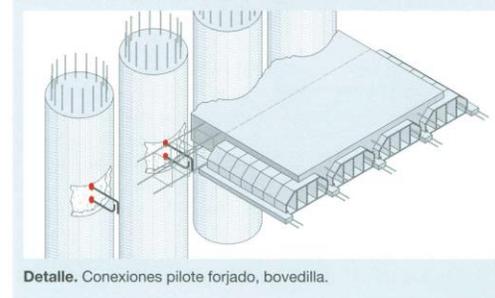


Figura 3. Anclaje de barra inferior efectivo a partir del punto de incidencia de la biela de compresión.



Detalle. Conexiones pilotes forjado, bovedilla.

resistida por medio de una armadura dispuesta de tal manera que cose la junta, y genera una reacción de compresión que aumenta el rozamiento.

Teoría de anclajes

Si se opta por un diseño siguiendo la teoría de anclajes, el primer paso es determinar los esfuerzos actuantes en la conexión. Si bien para elementos suficientemente rígidos el único esfuerzo podría ser el cortante, en general en la conexión existirán asimismo momentos flectores, debido a cierta excentricidad del cortante (Figura 4).

Como consecuencia de la teoría de anclajes, este modelo tiene en consideración la resistencia del material base. Por tanto, los modos de fallo a analizar son los siguientes:

TRACCIÓN

1. Rotura de acero.
2. Rotura por cono de hormigón.
3. Rotura por *splitting*.
4. Fallo por adherencia.

CORTANTE

1. Rotura de acero.
2. Rotura por desenchamamiento (*Pry out*).
3. Rotura por borde de hormigón

CARGA COMBINADA

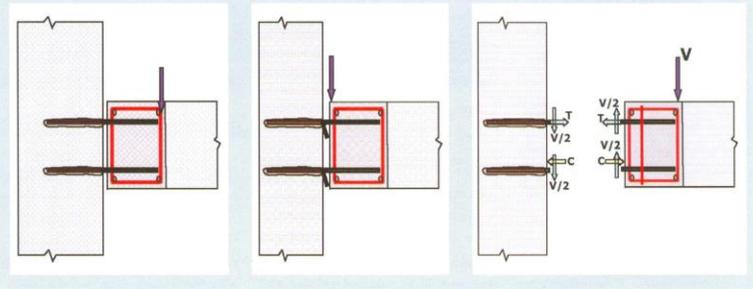
1. Tracción + Cortante

La junta entre hormigones se ha supuesto lisa y toda la carga debe ser resistida por las barras, considerando que estas forman un sistema de anclaje en sentido amplio. Es necesario estimar tanto la resistencia de la propia barra (fallo de acero) como del material base donde se ancla (fallo de hormigón).

4 • Artículo 47º Estado Límite de Agotamiento por esfuerzo rasante en juntas entre hormigones. EHE, Instrucción de Hormigón Estructural.
 • Artículo 4.5.3.3 Resistencia de cálculo a cortante. (103). EC-2.
 • Artículo 11.7 Shear-Friction BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE AND COMMENTARY (ACI 318).

Figura 4. Una propuesta de modelo para la conexión de forjados a muros puede ser la siguiente: el forjado apoya directamente sobre una viga perimetral diseñada para comportarse de manera rígida. Se supone que este apoyo se materializa a una distancia estimada de 0.75 veces el ancho de la viga perimetral, la distancia se basa en una relación similar a la que encontraríamos para ménsula corta, lo que induce un momento torsor en esta viga (es necesario tener en cuenta este hecho a la hora de armarla) y un flector en la conexión, con la correspondiente tracción en las barras superiores.

Adicionalmente a las tracciones que estas barras recogen se considera que tanto las barras superiores como las inferiores, si las hubiese, recogerían cortante. Es posible asumir que las barras superiores de la conexión son capaces de recoger la totalidad del este esfuerzo y únicamente en el caso de que no sea posible recogerlo con las barras superiores se deberá incluir una fila de barras inferiores considerando la mitad de la carga para cada fila de corrugados.



Adicionalmente es necesaria la comprobación de la resistencia de la conexión en el anclaje a la viga perimetral, debida a la reacción de cortante. Puede ser el punto débil de la conexión debido a la proximidad de borde (Ver figura 5).

Conclusiones

Existen varios modelos posibles para realizar el diseño del apoyo de un elemento en otro, desde modelos monolíticos en hormigón armado hasta modelos basados en la teoría de anclajes, con menor grado de continuidad. La transición entre uno y otro depende no sólo de la longitud de anclaje, sino de parámetros que afectan a la propia junta, como puede ser el rozamiento.

El uso de resinas de alta adherencia para anclaje de barras corrugadas a posteriori es una buena opción para ejecutar conexiones entre hormigones permitiendo reproducir detalles de armado similares a los contemplados en los códigos, como demuestra su aplicación en importantes obras como, por ejemplo, la conexión de las ménsulas de apoyo de las losas de

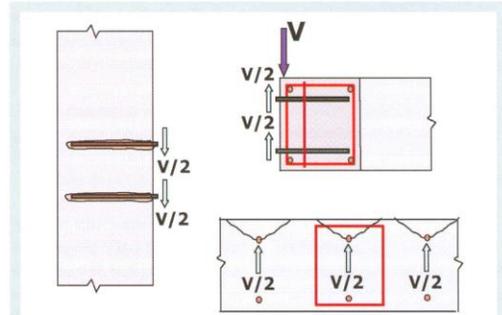


Figura 5. Comprobación de Rotura por borde de hormigón en viga perimetral.

rodadura en el proyecto del By Pass Sur de la M30.⁵

Su uso no obstante requiere del control sobre el producto. La homologación para su uso con barras corrugadas es una garantía del nivel de adherencia que sean capaces de desarrollar. No debe olvidarse, por su-

5 Ver en el número 4 de esta revista el artículo "Detalles de una conexión singular".

puesto, la importancia de una ejecución conforme a las especificaciones del fabricante.

En el caso de Hilti, dos son las resinas adecuadas para su uso con barras corrugadas instaladas a posteriori: **Hilti HIT-RE 500** y **Hilti HIT-HY 150**. Para más información respecto a estos productos consulte con la Oficina Técnica de Hilti o visite la librería técnica en nuestra página web www.hilti.es.

Garantía total en las conexiones de corrugados a posteriori.

Nueva DITE 08/105 para Hilti HIT-RE 500

La nueva homologación Europea, DITE 08/105 "Sistema de inyección Hilti HIT-RE 500 para conexiones de corrugados a posteriori" supone un paso más en la apuesta de Hilti de proveer herramientas óptimas a los profesionales de la construcción conforme a los más exigentes criterios técnicos aportando a su vez flexibilidad para ajustarse a los nuevos procesos constructivos.

Habituales para el caso de anclajes metálicos en hormigón según la ETAG 001 (Guía para Anclajes metálicos en Hormigón)¹, el requerimiento del uso de resinas con Homologación Europea para el anclaje de barras corrugadas a posteriori es muy reciente, siendo por tanto una información relevante para la comunidad técnica.

Contenido del DITE 08/105

La homologación, publicada el 30 de Julio del 2008 aborda el anclaje a posteriori de barras corrugadas con resina Hilti HIT-RE 500 en diferentes casos (Ver cuadro "aplicaciones contempladas en el TR 023"), todos ellos de acuerdo con

¹ Ver en el número 1 de esta revista el artículo "El marcado CE en el nuevo Código Técnico de Edificación".

las especificaciones de la norma EN 1992-1-1: 2004 (EC2).

De esta manera el proyectista encuentra un marco regulatorio al cual acogerse para realizar un diseño certificado de este tipo de uniones a posteriori. Se trata por tanto de una herramienta ideal para mejorar la calidad tanto a nivel de proyecto como de ejecución en obra.

Marco Normativo

A día de hoy el marco normativo para uniones con anclajes a posteriori está recogido en la Guía ETAG 001 (Anclajes Metálicos). Desarrollada en un primer momento para longitudes de anclaje pequeñas, la guía se ha comple-

tado, especialmente a partir de Noviembre del 2006 con el Informe Técnico TR 023, que recoge la base técnica y la documentación adecuada para este fin, permitiendo un diseño con el concepto de barra embebida.

Características de adherencia de la resina Hilti HIT-RE 500. Longitud de anclaje

La resina de inyección Hilti HIT-RE 500 es una resina bicomponente de base epoxídica que permite desarrollar, incluso en taladros húmedos y/o efectuados con broca de diamante, un nivel de adherencia al menos similar al de

una barra embebida. En la homologación europea DITE 08/105 encontrará cuadros resúmenes que permiten un diseño directo.

Los componentes –resina sintética y endurecedor– están envasados en cartuchos de aluminio flexible para mayor facilidad de aplicación. Mediante un mezclador, las pistolas dosificadoras manuales, neumáticas o de batería comprimida, mezclan e inyectan los componentes directamente en el taladro. **El anclaje químico HIT fragua y fija el elemento de sujeción de forma segura al material base. De este modo se garantiza una correcta instalación, dotando así al sistema de gran seguridad en la ejecución.**

Homologaciones disponibles para Hilti HIT-RE 500

Homologación	Código Homolg.	Descripción
EOTA	TR023	Technical Report. Assessment of post-installed rebar connections
ETA	ETA 04/0029	Homologación ETA para HIT-RE 500 con HAS (E) HCR hasta M30 (en inglés)
ETA	ETA 04/0028	Homologación ETA para HIT-RE 500 con HAS (E) R y HIS-RN hasta M30 (en inglés)
ETA	ETA 04/0027	Homologación ETA para HIT-RE 500 con HAS (E) y HIS-N hasta M30 (en inglés)
SOCOTEC	KX 0839	Homologación Socotec para HIT-RE 500 con corrugados de hasta 40 mm (en francés)
IBMB	3357/0550-5	Test de IBMB para HIT-RE 500 con corrugados (en inglés)
ICBO	ER-5010	Homologación ICBO para el sistema de anclaje HIT-RE 500 (en inglés)
Warrington Fire	C12 1086 Issue 2	Homologación de resistencia al fuego (en inglés)
Marque NF	NF 030	Admisión de la marca NF (en francés)

Hilti pone a su disposición un amplio número de homologaciones y ensayos para todos los anclajes. Para mayor información contacte con la Oficina Técnica de Hilti.