

**Estado del Arte de las Técnicas de Reforzamiento Estructural para Edificaciones
Existentes Hechas en Concreto Reforzado en Colombia**

Jaime Acuña Llanes

José Ramón Forero Orozco

Trabajo de Grado para Optar el Título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ph.D Ingeniería Estructural

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2017

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos	11
1.3 Alcance del trabajo	12
2. Justificación	12
3. Técnicas de reforzamiento estructural	14
3.1 Técnicas de reforzamiento basadas en la adición de concreto reforzado.	16
3.1.1 Adición de muros de cortante	16
3.1.2 Encamisado con elementos de concreto	19
3.1.3 Concreto lanzado	21
3.2 Técnicas de reforzamiento basadas en la adición de elementos de acero.....	23
3.2.1 Adición de marcos de acero y tirantes diagonales	23
3.2.2 Contravientos de acero.....	25
3.2.3 Encamisado con elementos de acero.....	27
3.2.4 Instalación de Haunch metálico	29
3.3 Técnicas de reforzamiento basadas en materiales especiales o compuestos.	32
3.3.1 Fibras de carbono.....	33

3.3.2 Ventajas y desventajas del refuerzo FRP	36
3.3.3 Tejido TRM matriz de mortero y tejido de refuerzo.....	38
3.4 Técnicas de reforzamiento basadas en el aislamiento sísmico.	40
3.4.1 Aisladores elastoméricos	42
3.4.2 Aislador de Péndulo de fricción.....	44
3.4.3 Control pasivo con sistemas inerciales acoplados	45
3.4.4 Control pasivo con disipadores de energía	47
5. Conclusiones.....	52
Referencias Bibliográficas	54

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Detalle de muro y diafragma..	19
Figura 2. Columna con revestimiento de concreto.	21
Figura 3. Esquema de marcos de acero con tirantes diagonales..	25
Figura 4. Esquema de contravientos de acero.....	27
Figura 5. Esquema de encamisado utilizando elementos de acero.	29
Figura 6. Esquema de instalación del Haunch.	32
Figura 7. Esquema de un material compuesto.	35
Figura 8. barras de refuerzo de FRP.	36
Figura 9. Aislador de base elastomérico.	43
Figura 10. Aislador elastomérico de base de tipo LRB	44
Figura 11. Aislador de péndulo friccional.....	45
Figura 12. Esquema de un sistema de amortiguamiento de masa sintonizada.	47
Figura 13. Dispositivo de disipación histerética de energía ADAS.....	48
Figura 14. Disipador de energía histerético por fricción.	49
Figura 15. Disipador de fluido viscoelastico.	51
Figura 16. Esquema de un amortiguados viscoelastico basado en la extrusión de plomo.....	52

Resumen

Título: Estado del Arte de las Técnicas de Reforzamiento Estructural para Edificaciones Existentes Hechas en Concreto Reforzado en Colombia*.

Autores: Jaime Acuña Llanes
José Ramón Forero Orozco**

Palabras Clave: Técnicas de reforzamiento, Materiales compuestos, Aislamiento de base, Seguridad estructural.

Descripción:

En el presente estudio se presentan las técnicas de reforzamiento estructural más relevantes desarrolladas para edificaciones de concreto reforzado, para la elaboración del estudio se decidió agrupar las técnicas de reforzamiento en cuatro grandes grupos a saber, técnicas basadas en la adición de elementos de concreto reforzado incluyendo morteros de alta resistencia reforzados con mallas, adición de elementos metálicos, técnicas basadas en la utilización de materiales especiales y técnicas basadas en el aislamiento de base y disipación de energía. Para cada grupo de técnicas se resaltan los beneficios, pero también se mencionan las desventajas y limitantes asociadas a estas, el objetivo principal es mostrar algunas de las técnicas más relevantes dentro de la disciplina de la rehabilitación estructural para incentivar el uso de estas en vez de procesos de demolición. En el apartado de aislamiento de base se intenta destacar los múltiples dispositivos existentes para tal fin, esto debido a que los autores consideran que dentro de la práctica de la rehabilitación estructural en el contexto colombiano es de importancia que técnicas como estas empiecen a ser implementadas en edificaciones de suma importancia. Por último, se plasman algunas conclusiones en base a lo expuesto en la revisión del estado de conocimiento de las técnicas de reforzamiento estructural expuestas en el desarrollo del documento.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Especialización en Estructuras. Director: Alvaro Viviescas Jaimes

Abstract

Title: Title: State of the Art of Structural Reinforcement Techniques for Existing Buildings Made in Reinforced Concrete in Colombia *.

Authors: Jaime Acuña Llanes
José Ramón Forero Orozco **

Key words: Technologies of reinforcement, Materials compounds, Isolation of base, structural Security.

Description:

In the present study we present the most relevant structural reinforcement techniques developed for reinforced concrete buildings, for the elaboration of the study it was decided to group the reinforcement techniques into four large groups namely, techniques based on the addition of reinforced concrete elements including high strength mortars reinforced with meshes, addition of metal elements, techniques based on the use of special materials and techniques based on base insulation and energy dissipation. For each group of techniques the benefits are highlighted, but the disadvantages and limitations associated with these are also mentioned, the main objective is to show some of the most relevant techniques within the discipline of structural rehabilitation to encourage the use of these instead of demolition processes. In the section of isolation of base it is tried to emphasize the multiple existing devices for such aim, this because the authors consider that within the practice of the structural rehabilitation in the Colombian context it is of importance that techniques like these begin to be implemented in buildings of great importance. Finally, some conclusions are expressed based on what was stated in the review of the state of knowledge of the structural reinforcement techniques exposed in the development of the document.

* Graduation project

** Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering, Specialization in Structures. Director: Alvaro Viviescas Jaimes

Introducción

Con el presente trabajo se pretende realizar una revisión del estado del conocimiento sobre las técnicas de reforzamiento estructural desarrolladas hasta la fecha e implementadas en estructuras de concreto reforzado, para tal fin, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica en la cual se mencionan cada una de las características que destacan a las distintas técnicas de reforzamiento estructural existentes y los beneficios alcanzados a raíz de la efectividad en la aplicación de estas para cada caso en particular. También se pretende hacer énfasis en las técnicas de reforzamiento basadas en la utilización de materiales especiales y del aislamiento sísmico de base ya que estas, se perfilan a ser las técnicas de mayor uso a nivel mundial por los múltiples beneficios que proveen además de un excelente comportamiento mecánico y de respuesta sísmica en las estructuras.

Como primera medida se realiza una presentación formal del objetivo general del estudio, seguidamente se desarrolla una justificación para establecer la importancia y pertinencia de la revisión del estado del conocimiento, mostrando la necesidad apremiante en la industria de la construcción de conocer las ventajas y desventajas de cada técnica de reforzamiento estructural y así mismo, seguir desarrollando nuevas técnicas para suplir las necesidades de conservación de monumentos históricos así como el mejoramiento del nivel de seguridad de las diferentes estructuras existentes; seguidamente se desarrolla la presentación formal de cada una de las técnicas orientadas a la rehabilitación de estructuras en concreto reforzado que componen el estudio, estas técnicas están enmarcadas en el uso nacional y en las tendencias actuales, en este punto se destacan los avances logrados mediante investigaciones exhaustivas en el campo de la

rehabilitación estructural, avances que han dado paso al desarrollo de las técnicas de rehabilitación modernas las cuales han sido implementadas en primera instancia sobre prototipos a escala en el laboratorio, obteniendo resultados exitosos y posteriormente han sido implementadas a escala real ratificando los buenos resultados. Por último, se plasman algunas conclusiones relevantes en aras de reconocer el avance y las contribuciones que múltiples investigadores han hecho al campo de la rehabilitación estructural.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar una revisión del estado del conocimiento de las técnicas de reforzamiento estructural aplicadas a estructuras en concreto reforzado, orientada a los usos y tendencias actuales en la industria de la construcción.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar y clasificar las tendencias actuales en técnicas de reforzamiento estructural para edificaciones existentes y detallar sus campos de aplicación.
- Realizar un inventario de los principales reforzamientos estructurales realizados en zonas de amenaza media y alta en Colombia.

- Recomendar las técnicas de reforzamiento estructural más adecuadas para su aplicación a los daños estructurales más representativos en Colombia.
- Exponer el concepto y los beneficios de las técnicas de reforzamiento estructural modernas implementadas en países con zonas de alta amenaza sísmica.

1.3 Alcance del trabajo

Debido a que se trata de una monografía que pretende dar cuenta del estado actual del conocimiento en el campo de la rehabilitación estructural, la base principal para el desarrollo de esta será la bibliografía existente. Aunque el trabajo presenta algunas aplicaciones locales de las técnicas de reforzamiento, se hace necesario utilizar casos a nivel mundial para mostrar las tendencias actuales y enriquecer el trabajo, mostrando los beneficios que se obtuvieron al aplicar estas técnicas en otros países con mayor desarrollo científico que el nuestro.

2. Justificación

En Colombia al igual que en otros países de la región es común ver edificaciones hechas en concreto reforzado, debido principalmente a que este material es el más usado en la industria de la construcción, sin embargo, se estima que un alto porcentaje de construcciones en el país no cuentan con especificaciones y controles constructivos que garanticen un buen comportamiento ante la eventual ocurrencia de un sismo que le permita a la estructura continuar con la funcionalidad

una vez finalizado el evento sísmico y al mismo tiempo tengan proporciones espaciales adecuadas que le provean estética. Esto es debido a que las construcciones fueron concebidas en épocas donde los códigos sísmicos modernos no estaban disponibles y el control sobre la ejecución de los trabajos constructivos eran precarios tal como lo exponen (Gallego & Sarria, 2010). Existen varias razones por las cuales una estructura puede ser catalogada como insegura, entre estas están la ausencia de un reglamento de construcción sismo resistente, como el que rige actualmente la construcción en Colombia, NSR-10, durante las etapas de análisis diseño y construcción, también, la negligencia del personal en obra o la falta de personal de supervisión técnica conlleva muchas veces al armado incorrecto de los elementos estructurales, elementos que deberán empezar a cumplir con su función de resistencia bajo una condición de sub reforzamiento. Una estructura con miembros subreforzados, o con el refuerzo insuficiente para resistir las cargas a las cuales va a ser sometida durante toda su vida útil, se convierte en un potencial peligro para todas aquellas personas que diariamente hacen uso de esta, del mismo modo puede resultar en un detrimento patrimonial ante un eventual colapso o superación de su estado límite de servicio para el cual fue diseñada sin que se cumpla con las cargas ultimas que fueron especificadas en el diseño o incluso presente daños graves sin que se presente el sismo de diseño de acuerdo con (Rochel, 2012) . Otro caso que se puede presentar es cuando la estructura ha cumplido su vida útil pero resulta factible su reparación para que se pueda extender un poco más su periodo de servicio, o se hace necesario la conservación de dicha estructura por ser declarada como patrimonio de la humanidad por su valor histórico, en este caso es fundamental que la técnica de reforzamiento escogida para la rehabilitación resulte conveniente para no alterar drásticamente las condiciones geométricas y de apariencia en general de la estructura a ser intervenida (catedrales, monasterios, colegios, universidades). También se puede encontrar el caso en el cual una estructura es inicialmente

diseñada siguiendo las normas sísmicas vigentes y su proceso constructivo controlado eficientemente, sin embargo, al ser expuesta a ambientes agresivos, esta puede presentar fuertes degradaciones a mediano plazo, los daños más comunes en las estructuras de concreto reforzado expuestas a ambientes agresivos son, corrosión en el refuerzo, carbonatación y proceso continuo de congelamiento y deshielo, estos efectos fueron estudiados por (Adhikary & Mutsuyoshi, 2006) para estructuras en concreto reforzado. Una forma de afrontar el problema de la inseguridad estructural es mediante la aplicación de las técnicas de reforzamiento estructural, la aplicación de las diversas técnicas de reforzamiento estructural desarrolladas a lo largo de la historia busca de acuerdo con (Machi & Gun, 1996) recuperar el comportamiento original de la estructura, mejorar el comportamiento o actualizarlo de acuerdo a las nuevas normativas vigentes y en general buscan disminuir la respuesta sísmica de la estructura, esto con el fin de evitar tareas de demolición y posterior construcción de nuevas estructuras ya que este proceso en muchos casos resulta más costoso comparado con el costo de implementar una técnica de reforzamiento.

3. Técnicas de reforzamiento estructural

Para una mejor comprensión de las técnicas de reforzamiento estructural para edificaciones existentes de concreto reforzado, los autores han decidido clasificar cada una de las técnicas en cuatro grandes grupos, los cuales son, técnicas basadas en la adición de elementos de concreto reforzado, técnicas basadas en la adición de elementos de acero estructural, técnicas basadas en la utilización de los materiales especiales y por ultimo las técnicas referentes al aislamiento sísmico

de base. Todas las edificaciones de concreto reforzado mantienen una relación entre el daño presentado y la intensidad del movimiento, por lo general, el daño es cuantificado mediante estimaciones estadísticas las cuales permiten predecir el grado de vulnerabilidad de la estructura, la curva que relaciona el índice de daño con la intensidad del movimiento que desencadena dicho daño se denomina funciones de vulnerabilidad. De acuerdo con (Gallego & Sarria, 2010) cuando se evalúa la vulnerabilidad estructural, se encuentra que muchas edificaciones son inseguras frente a un movimiento sísmico en particular, en tal caso se hace necesario rehabilitar las edificaciones para llevarlas a un nivel mínimo de vulnerabilidad que garantice seguridad y confiabilidad del sistema estructural frente a las exposiciones de tipo sísmico a las cuales pueda estar sometida durante toda la vida útil, de esta manera, cuando se habla de rehabilitación se hace referencia a reducir la vulnerabilidad e igualmente el riesgo sísmico.

Según (M.Rodriguez & R.Park, 1991) la decisión de reforzar una estructura existente no solo depende del resultado obtenido en una evaluación e inspección del daño presentado por la estructura después de ocurrido el sismo, también depende de un análisis económico que contemple el factor beneficio costo. El objetivo de un reforzamiento estructural es proveer una combinación adecuada del aumento de resistencia y aumento de ductilidad a la estructura objeto de la rehabilitación.

Una estructura de concreto reforzado puede presentar diversas patologías o errores ya sea en su etapa de diseño o construcción, esto ocasiona que sean altamente vulnerables e inseguras y por ende sea necesario la aplicación de una técnica de reforzamiento estructural, de acuerdo con (Pampanin, Christopoulos, & Chen, 2006), (Inci, Goksu, Ilki, & Kumbasar, 2012) y (Vaghani, Vasanwala, & Desai, 2014) algunas de las causas más frecuentes registradas en la literatura que hacen que las estructuras presenten débiles son, las configuraciones inadecuadas de los efectos en

las regiones donde se espera se forme rotulas plásticas, cantidad insuficiente o ausencia total de refuerzo transversal en la zona de los nodos, baja cantidad de refuerzo longitudinal y transversal en columnas y vigas, inadecuado detallado de anclaje, ausencia de ganchos en el refuerzo longitudinal en los extremos de los elementos, empalmes de refuerzo en columnas justo debajo del nivel de piso, la baja calidad de los materiales empleados para la construcción, los efectos desfavorables de la corrosión en el refuerzo debido a que se reduce la sección transversal de la varilla afectada y al mismo tiempo se reduce la capacidad de fluencia y por último la condición de diseño de columna débil y viga fuerte. A continuación, se presenta un recuento de cada una de las técnicas con acogida en el ámbito de la ingeniería estructural en Colombia.

3.1 Técnicas de reforzamiento basadas en la adición de concreto reforzado.

Dentro de este tipo de técnicas se agrupan todas las que tienen que ver con la adición tanto de elemento hechos en concreto reforzado o presforzado como aquellas que utilizan el concreto para engrosar los elementos existentes. Las principales técnicas usadas comúnmente en el territorio nacional se explican a continuación.

3.1.1 Adición de muros de cortante. Esta técnica es el método más común para agregar resistencia y rigidez significativa a una estructura. El nuevo muro puede ser construido en sitio, utilizando la técnica del concreto lanzado, explicada más adelante, o utilizando unidades de mampostería de concreto. La primera consideración de diseño debe ser la determinación de si es posible o no, que el pórtico existente pueda ser usado como parte efectiva de un sistema combinado, esto implica determinar si las columnas existentes son lo suficientemente fuertes y

presentan el suficiente nivel de detalle para ser consideradas como elementos de borde dentro del muro, así mismo determinar si las vigas tienen el suficiente nivel de detalle para ser consideradas como vigas de acople o ser incorporadas dentro del muro. De acuerdo con (Fema 547, 2006) las consideraciones anteriormente mencionadas limitan la selección de la relación física entre el muro y el pórtico surgiendo una serie de planteamientos tales como:

- El muro puede ser metido dentro del plano del pórtico de concreto existente.
- El muro puede ser metido como un elemento vertical continuo unido a los pórticos existentes.
- El muro puede ser metido como un elemento vertical independiente separado de los pórticos.

El primer planteamiento a menudo es descartado quedando como alternativas de selección el planteamiento dos y tres, los cuales se basan en determinar si los marcos tienen la suficiente capacidad para ser tenidos en cuenta como parte del muro o realizar una evaluación para determinar que tan benéfico resulta construir muros de cortante dentro de las áreas de los pórticos resistentes a momento.

Los muros de cortante pueden ser ubicados en el exterior o en el interior del edificio. Cuando son ubicados en la parte exterior por lo general el proceso constructivo se vuelve más fácil, pero impacta la fachada del edificio modificando los acabados planteados en el diseño arquitectónico. Por su parte los muros ubicados en el interior no afectan la estética externa de la edificación y son contruidos sobre los ejes estructurales de los pórticos existentes, en general decidir cuál será la ubicación de los nuevos muros se convierte en un problema, ya que cualquiera que sea la ubicación de estos, las características arquitectónicas de las edificaciones se modifican.

Los muros de cortante a menudo son utilizados para eliminar rigideces excéntricas e incrementar la capacidad de carga y según (Soto, 2008), la solución más factible se obtiene colocando los muros en el perímetro de la estructura.

Algunos de los problemas de mayor relevancia que se presentan en los edificios de concreto reforzado y que pueden ser solucionados mediante la adición de muros de cortante de acuerdo con (Lombard, Lau, & Humar, 2000) son, irregularidades torsionales, discontinuidad de muros existentes, muros con dimensiones insuficientes, uniones con deficiencias en el acero de confinamiento y vigas de acoplamiento inadecuadas.

Uno de los detalles más significativos al momento de la implementación de esta técnica es la conexión de la parte superior del nuevo muro de cortante con la parte inferior del diafragma de concreto existente, la construcción de la junta debe estar muy bien hecha, evitando dejar espacios o vacíos que impidan la transferencia efectiva de fuerza cortante desde la parte inferior del diafragma hacia el nuevo muro y minimizar la posibilidad de deslizamiento de las juntas.

Para proporcionar ductilidad a los nuevos muros es necesario limitar la cuantía de refuerzo longitudinal, la totalidad del refuerzo longitudinal debe pasar por la losa y alrededor de las vigas existentes, por su parte, el refuerzo transversal debe confinar las zonas donde el concreto se encuentre bajo esfuerzos de compresión con el propósito de evitar la falla en esta zona y el efecto de pandeo de las barras de acero que se encuentren en compresión.

Para la implementación de esta técnica se debe construir la nueva cimentación que soportará el nuevo muro de cortante o ampliar la cimentación existente, la cimentación cumple básicamente dos funciones, soportar el nuevo peso inducido por los nuevos elementos y aumentar la resistencia sobre la demanda de volcamiento. En la Figura 1 se muestra un detallado del muro de cortante nuevo y el diafragma existente.

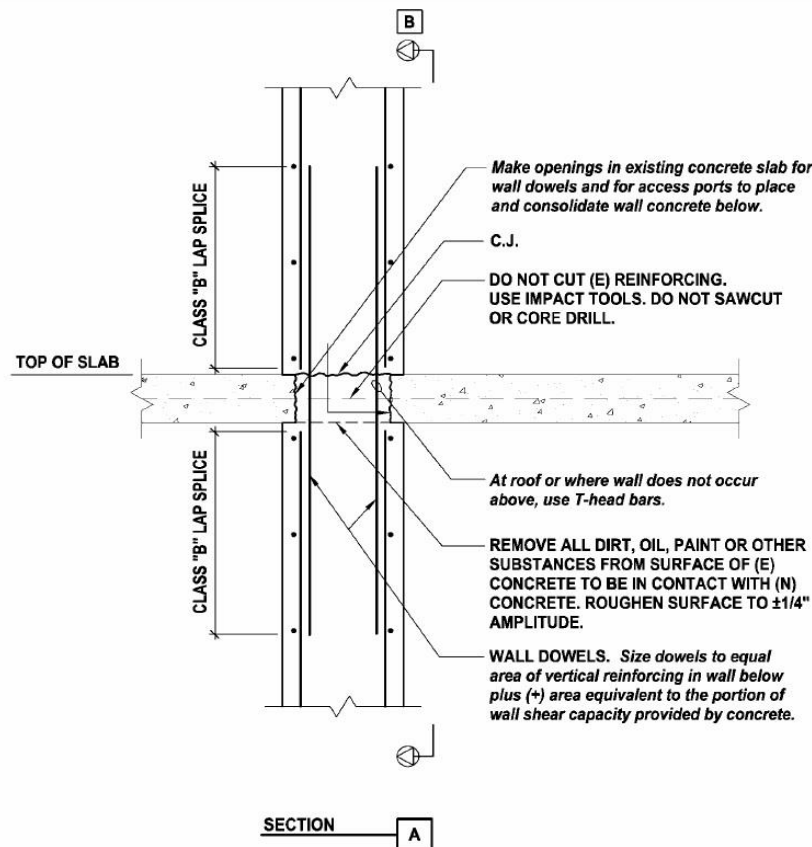


Figura 1. Detalle de muro y diafragma. Adaptado de FEMA 547 Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.

3.1.2 Encamisado con elementos de concreto Esta técnica está orientada a mejorar la capacidad a cortante, compresión y flexión, además mejora el confinamiento en las zonas de rotulas plásticas y corrige problemas referentes a traslapos inadecuados. La utilización del revestimiento en concreto reforzado para un elemento existente es una técnica tradicional, sin embargo, como se podrá ver más adelante la utilización de los nuevos materiales para el revestimiento de los elementos existentes es el nuevo enfoque de la ingeniería de la rehabilitación estructural.

Para lograr una aplicación efectiva de esta técnica, se debe proveer de acuerdo con (M.Rodriguez & R.Park, 1991) un número suficiente de anclajes entre el revestimiento y el

concreto existente con el fin de lograr una acción compuesta. Si se compara el revestimiento en concreto con el revestimiento en acero, el primero resulta tener una mayor área de sección transversal, para la aplicación de la técnica del revestimiento en concreto se deben tener en cuenta los siguientes aspectos, la superficie del elemento existente a ser intervenido deberá estar rugosa para evitar que se formen capas deslizantes, el acero de refuerzo deberá estar en al menos dos piezas para que se coloque alrededor de la columna existente, es necesario que los estribos de confinamiento tengan ganchos a 135° y estos pueden gobernar el tamaño del revestimiento con el fin de proporcionar suficiente espacio para la extensión del gancho.

Investigaciones como la realizada por (Machi & Gun, 1996) demuestran que la capacidad a flexión de los pórticos aumenta cuando se logra implementar la técnica del revestimiento tanto en concreto como en acero, ya que, se provee nuevo refuerzo longitudinal y lateral pero a su vez este refuerzo debe ser proporcionado de tal forma que no se afecte el comportamiento dúctil del elemento, evitando el reforzamiento en exceso y de la misma forma la ocurrencia de una falla frágil. Es aconsejable que durante el proceso constructivo se deje una brecha angosta en el extremo superior del concreto confinado, para evitar el aumento indeseable de la fuerza cortante debido al incremento de la capacidad de flexión.

El costo de aplicación de esta técnica está ligado a varios factores, entre los más comunes en la literatura (Fema 547, 2006) (Moehle, 2000) y (Elwood, 2009) se encuentran, el grado de especialización que necesita poseer el personal que instalara el recubrimiento, los costos de los equipos, el costo de la calidad de control o supervisión en campo y las pérdidas originadas por la inactividad económica en la edificación cuando esta cumple funciones empresariales.

Generalmente los recubrimientos utilizando concreto reforzado son trabajos realizados en sitio además la necesidad del uso de encofrado se convierte en una desventaja cuando se compara con

los recubrimientos hechos de acero o materiales especiales, así mismo la instalación del concreto dentro de la formaleta y el vibrado de este puede desencadenar serias dificultades en obra.

La Figura 2 muestra el esquema de una sección transversal de columna rehabilitada mediante el revestimiento de concreto.

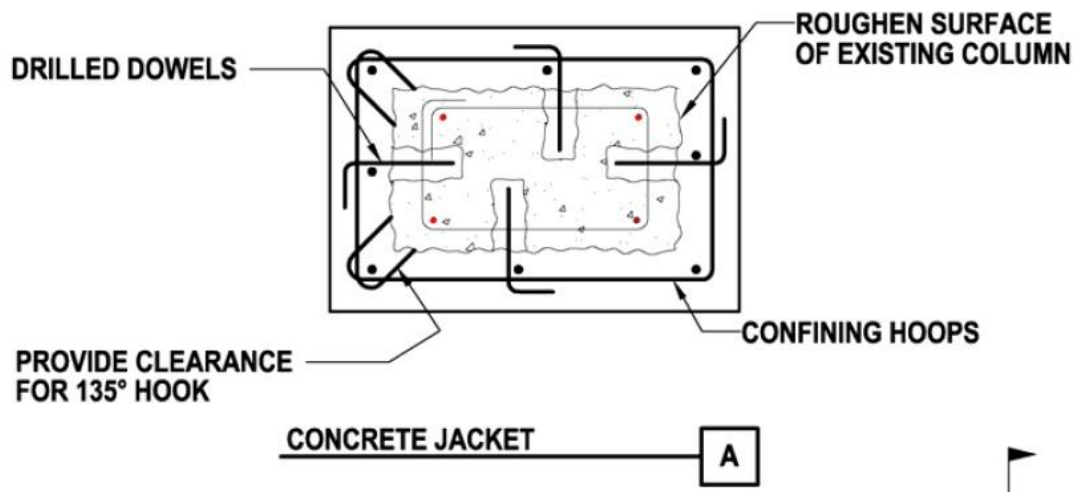


Figura 2. Columna con revestimiento de concreto. Adaptado de FEMA 547 Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings.

3.1.3 Concreto lanzado El concreto lanzado es un mortero de alta resistencia el cual es expulsado a gran velocidad a través de un mecanismo neumático sobre la superficie a ser tratada. La velocidad con la cual el concreto lanzado impacta la superficie es suficiente para hacer que la mezcla quede compacta, las observaciones hechas en campo indican que este tipo de mortero puede sostenerse por si mismo.

Se pueden distinguir dos tipos de morteros de acuerdo a (Soto, 2008), el lanzado via humeda y el lanzado vía seca, la diferencia está en la mezcla de los diferentes materiales que componen la mezcla, en el primer caso, todos los materiales son mezclados antes de comenzar el proceso de

lanzamiento, en el segundo caso, la mezcla solo es humedecida un poco al principio y durante su expulsión recibe la cantidad de agua faltante para culminar su proceso de hidratación. Algunas ventajas que ofrece esta técnica son, la alta adherencia a la superficie tratada, alta resistencia a compresión esto raíz del impacto que se genera entre las partículas durante el proceso de instalación, la alta densidad que se logra permite que se forme una barrera contra los ataques químicos y por último el empleo de formaleta se ve drásticamente reducido. Sin embargo, algunas de sus desventajas son, la mano de obra debe ser especializada ya que es fundamental que los trabajadores cuenten con la suficiente habilidad para poder aplicar con éxito esta técnica, se debe controlar los efectos de rebote empleando para esto aditivos químicos tales como el humo de sílice.

Una característica propia en el empleo del concreto lanzado es el uso de aditivos, sin embargo, hay que tener en cuenta que no todos los concretos lanzados deben usarlos, los aditivos usados para esta técnica tienen la función de desarrollar resistencias tempranas, acelerar el fraguado y disminuir el efecto de rebote.

A menudo el concreto lanzado se utiliza para encamisar elementos de concreto afectados por un evento sísmico, generalmente se aplica a superficies verticales u horizontales y resulta más beneficioso en comparación con la mezcla tradicional en situaciones donde el uso de la formaleta sea una limitante.

Actualmente existen varios concretos lanzados los cuales incorporan materiales cementantes adicionales, entre estos se encuentran, los concretos lanzados con humo de sílice estos tienen una mayor adherencia y cohesión en estado plástico, una mayor resistencia al lavado cuando la superficie presenta filtraciones, disminución del efecto de rebote y mayor resistencia a los ciclos de hielo y deshielo; concreto lanzado con ceniza volante estos mejoran la trabajabilidad y el bombeo de la mezcla, reduce el calor de hidratación, disminuye los efectos de la retracción térmica

e incrementa la resistencia al ataque de sulfatos; por su parte el concreto lanzado con escorias de alto horno le provee al cemento mejores propiedades mecánicas, resistencia, rigidez y durabilidad.

3.2 Técnicas de reforzamiento basadas en la adición de elementos de acero.

3.2.1 Adición de marcos de acero y tirantes diagonales. Esta técnica está orientada a mejorar la capacidad global a cortante, así como la capacidad lateral al desplazamiento, esta última ligada fuertemente a la rigidez global (Fema 547, 2006) (Almeida, Ferreira, Proenca, & Gago, 2017) (Inci et al., 2012). La adición de tirantes diagonales de acero conectados a un marco de acero adherido a una estructura aporricada de concreto reforzado busca agregar rigidez y resistencia al sistema estructural. Los tirantes de acero no representan un aumento significativo en la masa de la edificación, estos pueden ubicarse dentro del plano del marco en forma concéntrica u excéntricamente, aunque esta última configuración sea poco común. La mayoría de los diseños de tirantes de acero se rigen por mantener las derivas dentro del rango aceptable para los elementos de concreto reforzado existentes, esto es logrado mediante la elaboración de un modelo que incluye tanto la rigidez de los tirantes del marco de acero como del marco de concreto y que también incluya el cumplimiento de los requisitos de aceptabilidad para los desplazamientos o pseudo fuerzas en los elementos de concreto. Sin embargo, algunos diseñadores prefieren considerar únicamente los tirantes del marco como el nuevo sistema lateral determinando la deriva real para este sistema.

El sistema de tirantes puede ser ubicado en el exterior o interior del edificio (Vaghani et al., 2014), la ubicación en la parte externa facilita el proceso constructivo y posiblemente disminuye

los costos, pero es visible quedando expuesto al medioambiente y formando parte de la fachada del edificio.

Los sistemas de tirantes instalados en dirección paralela a la fachada, es decir, conectados a las caras exteriores de los perímetros de los marcos resistentes a momento o a los bordes de los diafragmas de piso y cubierta, proveen una mayor practicidad en la instalación, pero muy probablemente atravesaran frontalmente algunas ventanas sacrificando de esta forma estética y diseño arquitectónico. Alternativamente los tirantes exteriores pueden ser instalados perpendicularmente a la fachada existente, pero esta configuración probablemente requiere un mayor número de conectores para transmitir eficientemente la fuerza lateral desde los diafragmas, así como también puede ser posible la construcción de nuevos ejes para escaleras y elevadores.

Los tirantes internos son comúnmente instalados en el área o contorno de los marcos resistentes a momento, esto permitirá un mejor uso de cualquier diafragma existente y una mejor interacción entre el marco y los tirantes de acero con el pórtico resistente a momento, sin embargo en algunos casos los tirantes internos son instalados con un desface del eje del pórtico para minimizar el impacto sobre la estructura existente o sobre los componentes arquitectónicos además de simplificar la conexión entre el diafragma y el arco de acero.

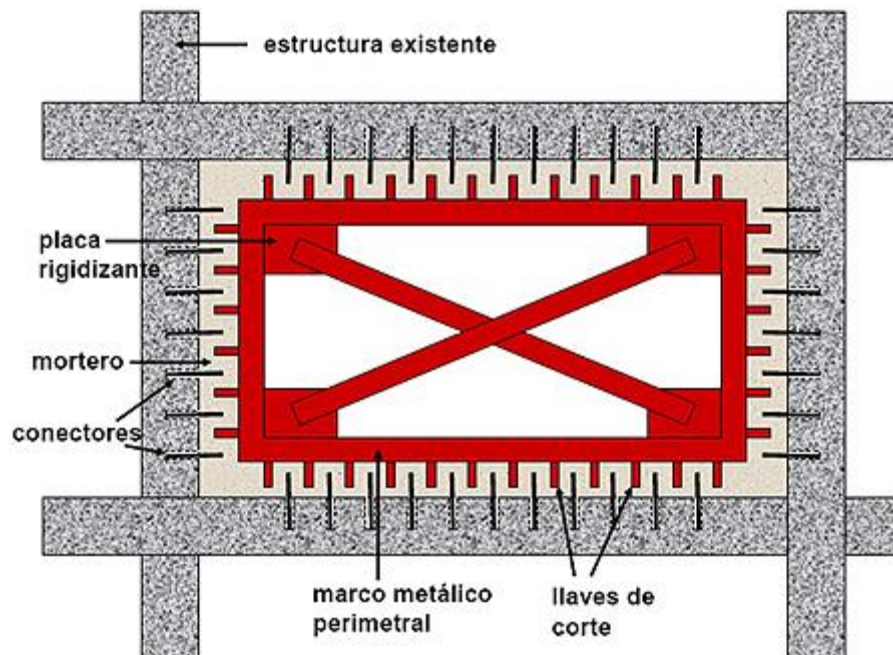


Figura 3. Esquema de marcos de acero con tirantes diagonales. Adaptado de http://dione.cuaed.unam.mx:3003/jddfr_multimedia/propuestas.graficas/CENAPRED/unidad_06/fichero_pag_13/index2.html.

3.2.2 Contravientos de acero Se puede considerar que los contravientos trabajan como una armadura y pueden ser instalados en el interior o exterior del edificio, esta técnica de reforzamiento provee resistencia lateral y ductilidad, la consideración de diseño fundamental es la transmisión de fuerzas entre el contraviento y la estructura de concreto; mediante varios estudios realizados sobre las características de los contravientos se ha podido determinar la disposición que mejor desarrolla la capacidad de respuesta, siendo esta en forma de “X” (Fema 547, 2006) y (Soto, 2008).

La correcta configuración de los contravientos es fundamental para alcanzar el éxito en la aplicación de la técnica, ya que estos inducen fuerzas axiales extras a los elementos existentes que conforman el marco sobre el cual es instalado el sistema de contravientos, las fuerzas axiales

pueden ser benéficas o perjudiciales para la capacidad de deformación de la estructura, esto, es función únicamente de la configuración inicialmente adoptada.

La rehabilitación de estructuras existentes utilizando contravientos, ofrece unas características favorables y muy atractivas para el diseñador, entre estas están:

El peso de la estructura no se incrementa de forma significativa lo que resulta en una gran ventaja desde el punto de vista de la cimentación, al no necesitar un reforzamiento de esta, y de la fuerza sísmica; la instalación de los contravientos no influye en el desarrollo de la actividad de la edificación. Sin embargo, en algunas ocasiones se hace necesario reforzar parte de las losas las cuales son utilizadas como mecanismos para transmitir las fuerzas laterales a los elementos de acero. Los esfuerzos de flexión que se desarrollan son compartidos por el concreto y la conexión de acero, el esfuerzo cortante es transmitido por medio de ménsulas de concreto, la conexión entre el marco de concreto existente y el contraviento debe estar bien detallada ya que, es vulnerable ante fuerzas sísmicas y se debe garantizar la transferencia de cortante. La ubicación de los contravientos debe ser lo más simétricamente posible, con el fin de minimizar los efectos torsionales y la cantidad de contravientos instalados dependerá de la magnitud de la carga aplicada.

Uno de los problemas de mayor relevancia es el anclaje de los contravientos a la estructura de concreto existente, por lo general se utilizan conexiones soldadas.

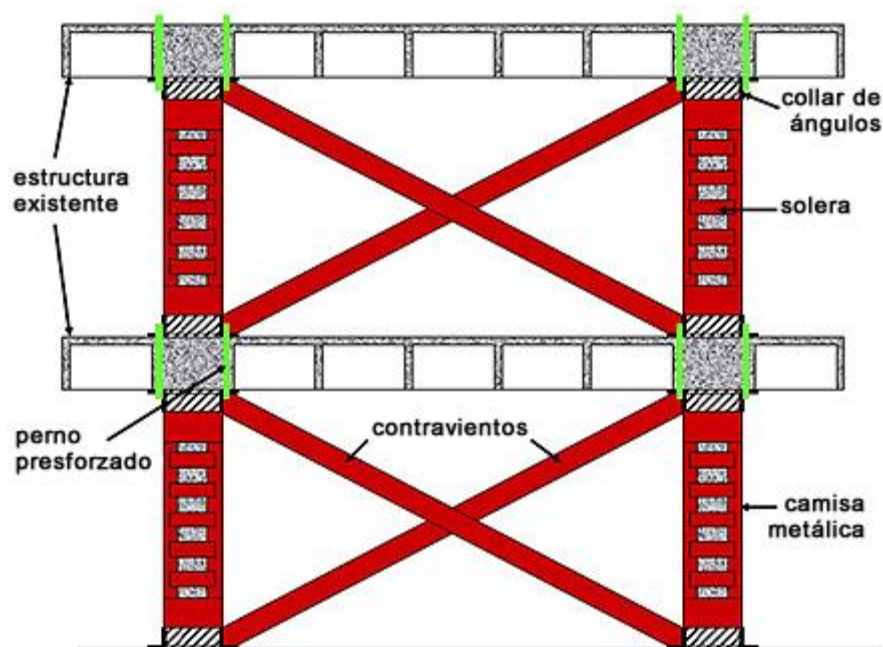


Figura 4. Esquema de contravientos de acero. Adaptado de http://dione.cuaed.unam.mx:3003/jddfr_multimedia/propuestas.graficas/CENAPRED/unidad_06/g00_p13.html.

3.2.3 Encamisado con elementos de acero Esta técnica se utiliza cuando se necesita que la estructura aumente su capacidad resistente, básicamente con esta técnica se busca aumentar la sección transversal agregando elementos que rodean al elemento a ser tratado. En general la estructura experimenta un incremento en la capacidad resistente de carga axial, flexión y cortante como consecuencia del aumento de sección.

Esta técnica también es capaz de devolver o restaurar la rigidez inicial de una columna afectada por fuerzas externas (Nagaprasad, Dipti, & Rai, 2015).

Por la experiencia que han dejado los sismos pasados se sabe que una columna es propensa a fallar por cortante y por lo tanto se debe mejorar la ductilidad y resistencia, para esto, se debe configurar las propiedades mecánicas del elemento columna para que falle por flexión, antes que por cortante. En la aplicación de la técnica se puede utilizar perfiles, soleras, placas de acero o

varillas soldadas, en el caso de las placas, estas pueden ser pegadas a la superficie del concreto, lo que conforma una sección compuesta, sin importar el elemento a ser utilizado en esta técnica, se debe diseñar cuidadosamente la conexión o unión del encamisado con la losa existente. A diferencia del encamisado hecho en concreto reforzado explicado anteriormente, el encamisado utilizando elementos de acero estructural, proporciona una ventaja en el proceso constructivo, ya que no es necesario utilizar formaleta para la instalación, pero por otro lado la dificultad de proporcionar continuidad a lo largo de la columna se convierte en un impedimento para mejorar la capacidad a cortante y la ductilidad de la columna, la desventaja surge como consecuencia de la imposibilidad de modificar la resistencia en los extremos del elemento.

Dentro de las principales consideraciones que se deben tener en cuenta en la implementación de esta técnica se encuentra (Fema 547, 2006), la limpieza de la superficie de concreto sobre la cual será instalado el encamisado de acero, esta limpieza se realiza con el propósito de mejorar y garantizar adherencia, los espacios libres que queden entre la interfaz del concreto y el acero deben ser rellenados con epóxico, según las conclusiones obtenidas de varios estudios se ha determinado que la forma geométrica de encamisado con mayor eficiencia es la circular o elíptica, siendo la cuadrada una forma de poca eficiencia.

Es frecuente el uso de ángulos como elementos principales del encamisado metálico (Soto, 2008) (M.Rodriguez & R.Park, 1991), estos ángulos sirven como soporte para soldar placas metálicas ya sea de forma horizontal o vertical conformando una cercha. Para la conexión del encamisado a la losa existente se utilizan un collar de acero, el cual es instalado alrededor de la columna, el collar distribuye los esfuerzos en la conexión losa columna y así evitar una falla por punzonamiento.

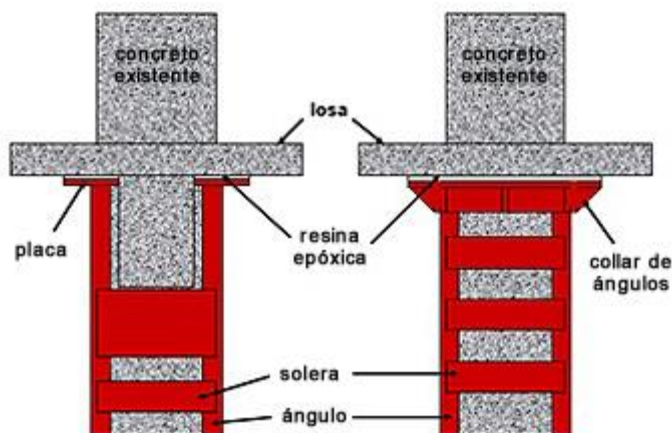


Figura 5. Esquema de encamisado utilizando elementos de acero. Adaptado de http://dione.cuaed.unam.mx:3003/jddfr_multimedia/propuestas.graficas/CENAPRED/unidad_06/g00_p13.html.

3.2.4 Instalación de Haunch metálico. En esta técnica se instala un haunch metálico con el propósito de proteger la zona del nodo donde se conectan vigas y columnas, evitando que se generen grandes daños y se formen mecanismos de falla frágiles dominados por la fuerza cortante, como este tipo de técnicas de reforzamiento están orientadas a mejorar y proteger la zona del nodo, es indispensable que se realice un planteamiento analítico sobre el flujo de fuerzas internas que se presentan en los diferentes nodos que serán objeto del trabajo de actualización sísmica (Pampanin et al., 2006). Un daño en la zona de los nodos o incluso la falla en algunos de ellos, implica un severo deterioro de la capacidad total de carga lateral de la estructura o un colapso total de esta. El haunch puede ser instalado tanto en el interior como en el exterior del nodo, el diseño de estos dispositivos depende de la geometría, es decir, la distancia entre la conexión de la viga y la cara de la columna y de la rigidez axial del elemento metálico K_d , todos estos parámetros deben estar orientados a controlar el momento que se produce en la viga y la cara de la columna, además, es posible que se pueda producir la formación de la rótula plástica cerca de la zona donde el haunch se conecta a la viga, lo que resulta benéfico, ya que el diseñador cuenta con una herramienta que

le permite tener cierto grado de confiabilidad en la formación del sistema de rotulación de la estructura.

A raíz de las múltiples pruebas hechas en el laboratorio sobre el comportamiento de los marcos de concreto reforzado actualizados mediante la instalación de haunch (Pampanin et al., 2006), es posible realizar una descripción del comportamiento modificado que se presenta en las estructuras; las fuerzas internas de las vigas y columnas son alteradas significativamente, si el diseño del haunch es adecuado y este es instalado tanto en la parte externa como en la interna del nodo, se presenta una considerable disminución del momento flector en la región del nodo, además, el máximo valor de momento es reubicado en el punto de la viga donde el haunch es conectado y es justamente esta migración de fuerzas internas la que ocasiona un entorno propicio para la formación de la rótula plástica.

El proceso que se emplea en el diseño de un dispositivo como el descrito en esta sección es una interacción entre las propiedades que definen el sistema, en primer lugar se realiza un pre dimensionamiento del haunch, actualmente se cuenta con unas tendencias basadas en la experiencia, cuando el trabajo de actualización incluye problemas de columna débil, entonces se puede proporcionar valores elevados del ángulo de conexión, pero si el problema tiene que ver con el mínimo impacto de la técnica sobre la arquitectura de la edificación, entonces resulta conveniente proporcionar valores bajos de la distancia L , distancia desde el punto de conexión en la viga hasta la cara de la columna, de lo anterior se infiere que es posible obtener diversas configuraciones de estos dispositivos, los cuales serán diseñados de acuerdo a los requerimientos propios del problema. El siguiente paso es la definición del daño aceptable o del estado límite permitido en el nodo, se acostumbra a usar los esfuerzos principales ya que son más confiables que los esfuerzos de cortante nominal al instante de capturar la respuesta de los nodos, ya que los

esfuerzos principales consideran el estado actual de esfuerzo de un nodo dado como una combinación de la fuerza cortante nominal y la carga axial de la columna, durante el procedimiento de configuración del dispositivo, la fuerza cortante nominal en el nodo puede ser expresada como función del momento en la viga y en la interfaz del nodo. El tercer paso es el desarrollo de fuerza para la formación de una rotula plástica en la viga, se asume que la viga se rotula cuando el momento desarrollado en la conexión del haunch alcanza el momento de fluencia, pero la garantía de que la rotulación ocurrirá antes de que se alcance la capacidad máxima a momento en la viga es el nivel de daño predefinido y permitido para el nodo. El cuarto paso es chequear que la columna no se rotule primero que la viga o el nodo, es importante garantizar que la jerarquía de rotulación tenga como prioridad la formación de rotulas en la conexión del haunch y la viga antes que en la conexión del haunch y la columna y por último se debe chequear la capacidad de cortante de los miembros y el control global de la jerarquía de resistencia y secuencia de falla; el control de los parámetros de diseño del haunch, también está orientado a proteger a los elementos viga y columna de fuerzas excesivas de cortante y por lo tanto de fallas frágiles.

Las pruebas hechas en el laboratorio demuestran que este sistema de actualización sísmica aumenta la resistencia lateral y proporciona un comportamiento histerético estable, mejorando la capacidad de disipación de energía. La Figura 6 muestra un esquema de un pórtico rehabilitado mediante la instalación del haunch.

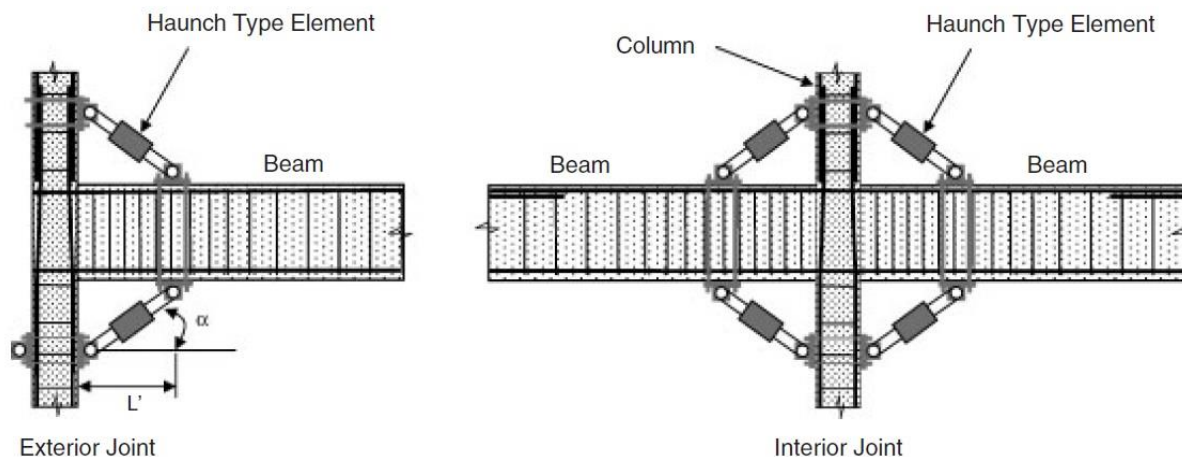


Figura 6. Esquema de instalación del Haunch.

3.3 Técnicas de reforzamiento basadas en materiales especiales o compuestos.

Los materiales compuestos tienen un comportamiento anisotrópico lo que los diferencia notablemente de materiales considerados como homogéneos, estos materiales resultan de la unión de dos o más componentes no solubles entre ellos (Barbat et al., 2014) de los cuales, algunos de ellos pueden constituir la fase de refuerzo y otros la fase de aglutinante o matriz del material compuesto, la fase de refuerzo se encarga de rigidizar y es la parte esencial de la resistencia desarrollada por el material compuesto, la fase de matriz se encarga de la unificación de las partículas o fibras así como de la protección de estas. Desde la perspectiva estructural los materiales compuestos facilitan la materialización de estructuras con geometrías complejas debido a sus altos módulos de rigidez, sin embargo, actualmente los fabricantes de estos materiales no proporcionan la totalidad de información en cuanto a propiedades mecánicas de estos materiales debido a que requieren procesos y ensayos complejos para su determinación (Vaghani et al., 2014) y (Khalifa, 2016).

El propósito de usar materiales compuestos como solución a los problemas de inseguridad estructural es el aumento de la capacidad portante obtenida mediante la instalación de estos compuestos los cuales actúan como armaduras externas y son adheridos a los elementos estructurales existentes (El-Gamal, Al-Nuaimi, Al-Saidy, & Al-Lawati, 2016) y (Protchenko, Wlodarczyk, & Szmigiera, 2015). Los refuerzos con FRP (Fiber Reinforced Polymers) son una tecnología abanderada de los materiales compuestos, ha sido utilizada desde la década de los 90 en la rehabilitación estructural de edificaciones importantes hechas en concreto reforzado en Europa (Vaghani et al., 2014), algunas de sus ventajas son la relación resistencia/peso y la resistencia a la oxidación uno de los principales agentes nocivos en el acero estructural, los materiales FRP han encontrado aplicación en la ingeniería civil según (Costa, Guedes, & Varum, 2014) debido al bajo peso, buenas propiedades mecánicas, buen comportamiento a la fatiga, fácil aplicación y disponibilidad de variedad de formas, estas ventajas hacen que la tecnología tenga aceptación dentro de la industria de la construcción, sin embargo, factores como el costo de la implementación de la tecnología y la falta de reglamentos que regulen la aplicación de esta, dificultan la utilización masiva.

3.3.1 Fibras de carbono El carbono se encuentra en la naturaleza en tres formas cristalinas, grafito, diamante y buckminsterfullereno, en el caso del grafito, este es un sólido suave, tiene lustre metálico y es conductor de la electricidad (Flores, 2012).

Las propiedades del grafito son anisotrópicas, por ende, dependen de la dirección en la cual se analice, a lo largo de los planos de carbono, el grafito posee gran resistencia debido a la fuerza de los múltiples enlaces entre los átomos de carbono, sin embargo, en dirección perpendicular a los

planos que constituyen el grafito, el número de enlaces mengua considerablemente, lo que se traduce como una disminución sustancial de la resistencia del material.

Hoy en día la industria de la construcción ha logrado fabricar fibras de carbono en las cuales los planos del grafito son alineados paralelamente al eje de la fibra, aprovechando así la propiedad de resistencia proporcionada por los enlaces. En los materiales compuestos de carbono las fibras de carbono se tejen para formar una tela que se incrusta en una matriz que aglutina las fibras para formar una estructura sólida, una vez el material es terminado, su resistencia se hace mayor al compararla con la resistencia de cada material que lo compone por separado (Flores, 2012).

Por lo general los polímeros reforzados con fibra de carbono se encuentran en dos presentaciones para su aplicación en la industria de la construcción; platinas de fibras de carbono, rectas o en forma de L o tejidos de fibra de carbono.

En el caso de las platinas de fibras de carbono, estas son conformadas por una matriz de resina epóxica en combinación con fibras de carbono, las fibras son el componente con capacidad portante y la matriz epóxica es la que las une entre si al mismo tiempo que permite la transferencia de carga y protege a las fibras de los agentes corrosivos y dañinos del ambiente (Barbat et al., 2014).

La platina aporta en dirección de las fibras una alta resistencia y rigidez, así como una gran resistencia a la fatiga y a la fluencia plástica. Las propiedades mecánicas de las platinas están condicionadas por la cantidad de fibras que posean, por las razones anteriormente expuestas, en dirección transversal la resistencia a flexión y cortante es baja.

En el caso de los tejidos de fibra de carbono, estos son unidireccionales, durante su instalación son saturados con una resina epóxica y es colocado en capas, no solo existen tejidos de fibra de carbono, también es posible encontrar tejidos de fibra de vidrio, una ventaja que presentan los

tejidos en comparación con las platinas es su capacidad de ajustarse a geometrías irregulares, siendo útil en cualquier tipo de superficie (Liu, Zwingmann, & Schlaich, 2015) y (Bousselham, 2010).

Los pasos necesarios para lograr una aplicación exitosa de la técnica de reforzamiento utilizando FRP dados en (Costa et al., 2014) son, proveer de rugosidad a la superficie donde se instalara el FRP, limpiar la superficie y aplicar el epóxico adhesivo, colocar el FRP sobre la capa de epóxico creando un espesor uniforme de 1 a 2 mm. Los usos directos de los polímeros reforzados con fibras de carbono son en el reforzamiento de vigas de concreto reforzado para mejorar la capacidad a flexión, al igual que en vigas en madera, también son usados como material para aumentar la capacidad a momento torsor de vigas en concreto reforzado, mejorar la capacidad a compresión, flexión y cortante de columnas en concreto reforzado aumentado la ductilidad de estas, reforzamiento de muros de mampostería a flexión y cortante y por último en placas de concreto reforzado.

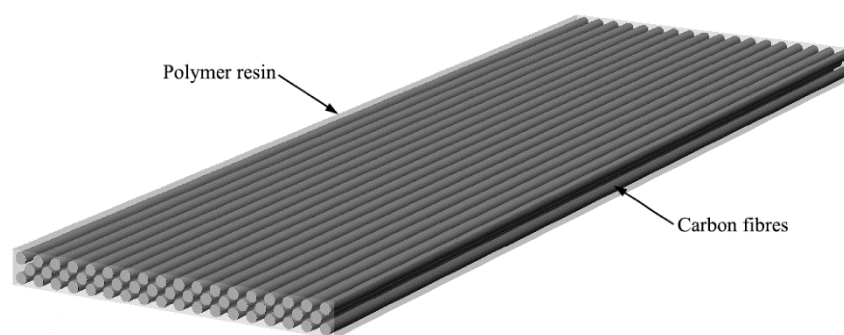


Figura 7. Esquema de un material compuesto.



Figura 8. barras de refuerzo de FRP. ZHONGAO CARBON <http://www.zacarbon.com/cfrp-rebar>

3.3.2 Ventajas y desventajas del refuerzo FRP La decisión de utilizar los compuestos FRP para el reforzamiento está en los objetivos de alargamiento de la vida útil de la estructura. La fibra de carbono como bien se explicó anteriormente, tiene unas propiedades comparables a las del acero. Los compuestos de fibra de carbono tienen un límite elástico mayor que el del acero y una densidad mucho menor, (Tahenni, Chemrouk, & Lecompte, 2016) y (Barbat et al., 2014).

Las dos propiedades mecánicas mencionadas anteriormente, conducen a que los compuestos de fibra de carbono tengan una relación resistencia / peso mejor que la del acero. En el caso de las fibras de vidrio la capacidad ultima de esta podría ser semejante a la del acero, pero su rigidez es mucho menor.

El bajo peso de los compuestos hace que la manipulación y la instalación de estos sea significativamente más fácil que la solución semejante con acero, facilitando la implementación en zonas con problemas de acceso, esto se traduce como seguridad para los trabajadores que ejecutan el reforzamiento con este tipo de materiales. Otra ventaja está en el tiempo de aplicación, ya que por medio de la aplicación de estos materiales se reduce considerablemente los tiempos de trabajo causando interrupciones de poca duración en caso de que la estructura sea utilizada para

actividades de importancia. Para la instalación de los materiales especiales no se necesitan anclajes, ya que la propia resina del compuesto garantiza la unión con el hormigón y no es necesario perforar el material compuesto para introducir anclajes mecánicos. El material compuesto no necesita juntas debido a que las platinas o tejidos de FPR se colocan directamente sobre el hormigón en toda su longitud incluso es viable superponer capas del polímero (Bousselham, 2010) y (Costa et al., 2014).

Por otro lado, posee una gran adaptabilidad a las superficies curvas e irregulares, en caso de cúpulas o arcos la solución del laminado de FRP es muy competitiva en comparación con la del acero.

La durabilidad de los materiales compuestos es otra característica que los hacen llamativos, esta propiedad se da siempre y cuando el material este bien fabricado, si durante el uso las láminas o tejidos aparecen averiados resulta relativamente sencillo repararlos mediante la adición de una nueva capa, el uso de compuestos de fibras no produce aumentos significativos del peso de la estructura ni de las dimensiones del elemento. Se ha demostrado mediante estudios que la energía requerida para producir materiales FRP es menor que la empleada para producir otros materiales convencionales.

A pesar de las múltiples ventajas que poseen los materiales compuestos, también presentan desventajas tales como la alta probabilidad de propiciar incendios, vandalismo o daños accidentales, en la actualidad no existen estudios sobre la durabilidad a largo plazo de los materiales compuestos, lo que se traduce como en incertidumbre cuando son empleados en estructuras en las cuales se planean largos periodos de vida útil (Tahenni et al., 2016) (Barros et al., 2017).

Una barrera fuerte que han encontrado los materiales especiales en su camino a convertirse en materiales ampliamente usados es su costo, pero este problema es posible superarlo a medida que el consumo aumente, ya que a mayor uso mayor producción y reducción de costos, además el uso de este tipo de materiales promete retribuciones o en otras palabras un mejor beneficio costo a largo plazo en comparación con materiales convencionales (Barbat et al., 2014).

Otro desestimulante del uso de los materiales especiales, es la poca experiencia con la que cuentan las personas que se enfrentan a los trabajos de rehabilitación usando este tipo de materiales, además el uso de materiales orgánicos y la emisión de sustancias tóxicas pueden representar riesgos importantes para la salud de los trabajadores, por tal motivo es de suma importancia contar con manuales técnicos que fomenten las buenas prácticas en el empleo de este tipo de materiales. Para finalizar las desventajas se encuentra la ausencia de reglamentos que direccionen el diseño de estructuras empleando materiales compuestos, esto hace que la implementación de estos materiales sea reducida.

3.3.3 Tejido TRM matriz de mortero y tejido de refuerzo. El mortero reforzado con tejido TRM es considerado como la evolución del FRP (Barbat et al., 2014) y (Liu et al., 2015), este tipo de tejido sustituye la matriz de polímero por una matriz de mortero, este tipo de material presenta un comportamiento de fisuración bajo esfuerzos de tensión mucho antes del fallo de las fibras de modo que el tejido soporta carga cuando la matriz comienza a desarrollar fisuras. Según pruebas de laboratorio se pueden distinguir tres fases antes de que ocurra el fallo, en la primera se presenta una transmisión uniforme de esfuerzos en toda la sección, siendo la rigidez inicial la del propio mortero, esta fase concluye con la aparición de la primera fisura, en la segunda fase a raíz del incremento de la fuerza de tracción se producen nuevas fisuras, la distancia entre fisuras y su

espesor está directamente afectado por el material de refuerzo, la cuantía, la interacción entre matriz y tejido y de la resistencia a tracción del mortero, por último, una vez finalizada la formación de las fisuras solo el núcleo reforzante soporta la carga, no existe adherencia entre el tejido y la matriz de mortero.

Las principales aplicaciones que se conocen hasta el momento de del TRM son en elementos prefabricados autoportantes, encofrados no recuperables y en el reforzamiento de estructuras de fábrica, sin embargo, la aplicación de TRM en estructuras de concreto reforzado es muy limitada, aunque ya se han hecho ensayos sobre pilares, refuerzo a cortante y a flexión, pero únicamente en hormigones de media y alta resistencia.

Las propiedades mecánicas del mortero que se utiliza como matriz, se determinan por medio de un ensayo de probetas, obteniéndose una resistencia media a compresión y flexotracción de hasta 20 Mpa y 7.2 Mpa, respectivamente. Con respecto a las fibras, se han empleado dos tipos de fibras, tejido de carbono en ambas direcciones cuyo peso de tejido es de 200 g/m² y tejido de acero unidireccional compuesto por alambres entrelazados fijados con la ayuda de una malla auxiliar elaborada con polipropileno.

A pesar de los esfuerzos en investigación que se han realizado para desarrollar completamente esta técnica de reforzamiento, resulta prudente mencionar que aún se encuentra en vía de desarrollo sobretodo en el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón armado, se ha logrado evidenciar mediante ensayos de laboratorio, que vigas reforzadas a cortante utilizando configuración geométrica en U de TRM es capaz de incrementar entre 40% y 60% la capacidad de resistencia a cortante del miembro estructural intervenido y además algunos tejidos son capaces de evitar la falla frágil, lo que se constituye como un aspecto importante desde el punto de vista de la seguridad estructural. Varios estudios comprueban el incremento de resistencia a cortante en vigas de

concreto reforzado mediante distintas configuraciones de TRM, se ha podido evidenciar el incremento de la capacidad por corte hasta en la cuarta capa de aplicación, sin embargo, también se ha comprobado que a partir de la segunda capa la eficiencia de la técnica se reduce en el caso de la inexistencia de conectores mecánicos externos que garanticen la adherencia.

A pesar de ser un refuerzo competitivo a nivel del incremento de resistencia y solucionar algunos de los inconvenientes que presenta el FRP, el TRM presenta algunas desventajas, la más notoria es en el tiempo de espera para poder dar al servicio la estructura rehabilitada, esto debido a que es necesario esperar en promedio 28 días para que se produzca el proceso de curado y garantizar la resistencia deseada.

3.4 Técnicas de reforzamiento basadas en el aislamiento sísmico.

Aunque este tipo de técnicas no han llegado a formar parte de las prácticas comunes en la rehabilitación estructural en Colombia (Gallego & Sarria, 2010), los autores consideran pertinente la inclusión de estas en el presente estudio, ya que, este tipo de técnicas representan una solución muy eficaz al momento de proporcionar seguridad a las nuevas edificaciones de gran altura o de gran importancia que serán construidas en los próximos años en las zonas de mayor amenaza sísmica del país. Los aisladores de base, situados sobre la cimentación desacoplan parcialmente la estructura del edificio de las componentes de aceleración provenientes del suelo disminuyendo la energía de entrada y por lo tanto causando una menor demanda en cada uno de los elementos estructurales. Para este trabajo, se hace referencia a los sistemas de aislamiento sísmico pasivos, aunque cabe mencionar que también existen sistemas de aislamiento sísmico activos e híbridos, sin embargo, estos últimos consumen energía en su proceso de operación lo que los hace poco

llamativos para su implementación a gran escala (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009) y (Dutta, Sumnicht, Mayes, Hamburger, & Citipitioglu, 2008).

Los sistemas pasivos, son de carácter reactivo y su respuesta no es controlable, dependiendo de las condiciones de trabajo a las cuales estén sometidos. El modo de funcionamiento consiste en alterar las propiedades dinámicas del edificio, propiedades que están en función de la masa, rigidez y amortiguamiento propio del sistema estructural, provocando una sustancial disminución en la respuesta estructural. Los sistemas pasivos se pueden agrupar en control pasivo con aislamiento de base, control pasivo con sistemas inerciales acoplados y control pasivo con disipadores de energía.

El control pasivo con aislamiento de base se fundamenta en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo y así proporcionar un grado de seguridad a la edificación cuando esta se somete a las acciones sísmicas, los dispositivos que se rigen mediante este principio de funcionamiento son flexibles al movimiento horizontal y rígidos al desplazamiento vertical y son ubicados o instalados entre la cimentación y la superestructura. Una de las consecuencias del empleo de estos dispositivos es que el periodo de vibración de la estructura es alargado y de esta manera se limita la entrada de energía al sistema estructural, otra consecuencia es la disminución de los desplazamientos lo que infiere menor demanda de capacidad de la estructura.

La técnica del aislamiento de base es recomendada para estructuras que presenten gran rigidez, o periodos de vibración cortos y que estén cimentadas sobre suelos rígidos, ya que estos garantizan en cierta forma la no amplificación de la señal sísmica (Kani & Katsuta, 2009).

La elección final sobre cuál de los sistemas mencionados es el adecuado para un determinado caso está condicionada por la forma como se pueda predecir correctamente el comportamiento

sísmico y que a su vez conduzca a un diseño racional y económico (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009) (Kani & Katsuta, 2009).

Dentro del grupo de sistemas de aislamiento de base se destacan los siguientes:

3.4.1 Aisladores elastoméricos Este apoyo lo componen capas alternadas de goma y placas de acero unidas entre si por un proceso de vulcanización, de esta forma la rigidez del apoyo es controlada por el espesor de las capas de goma, entre más gruesas son las capas de goma, mayor es la flexibilidad del apoyo en la dirección horizontal, por el contrario, la rigidez en la dirección vertical es controlada mediante las placas de acero que limitan la expansión lateral de la goma como resultado de la presión vertical (Matsagar & Jangid, 2008) y (R. Aguiar, J.L Almazan P, P. Dechent, 2008).

Con el objetivo de aumentar la capacidad de disipación de un sistema de aislación sísmica de base es posible contemplar algunas alternativas como:

- Adición de aditivos a la goma para aumentar sus propiedades de amortiguamiento.
- Agregar un núcleo de plomo en el centro del disipador para aprovechar las propiedades disipadoras del plomo.
- Acoplar a los aisladores dispositivos amortiguadores, ya sea viscosos, de fricción o por extrusión de plomo.

En la Figura 9 se muestra un aislador elastomérico típico, en el corte se observan las láminas de acero representadas por las franjas grises y las láminas de goma representadas por las franjas negras.

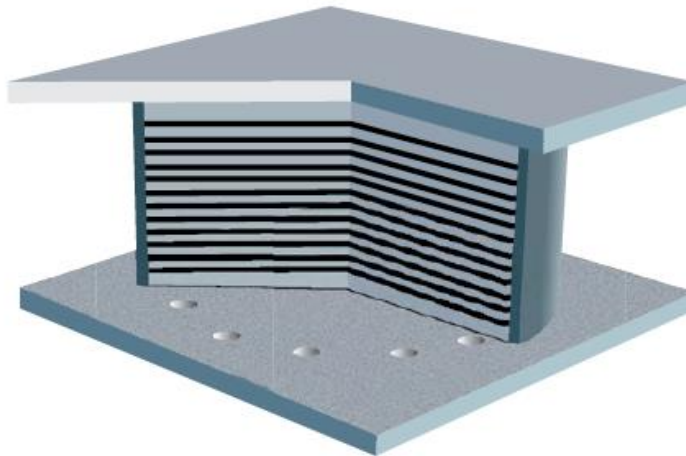


Figura 9. Aislador de base elastomérico. Adaptado de REHABTEC
<http://rehabtec.blogspot.com.co/2016/04/aisladores-simicos.html>

Dentro de la familia de aisladores elastoméricos se destaca el aislador elastómero de núcleo de plomo LRB, este posee un núcleo de plomo que le permite adquirir una mayor capacidad de disipación de energía, así como también puede absorber energía por medio de mecanismos histeréticos haciendo uso de la flexibilidad del núcleo de plomo. En la Figura 10 se muestra un aislador de base tipo LRB (R. Aguiar, J.L Almazan P, P. Dechent, 2008).

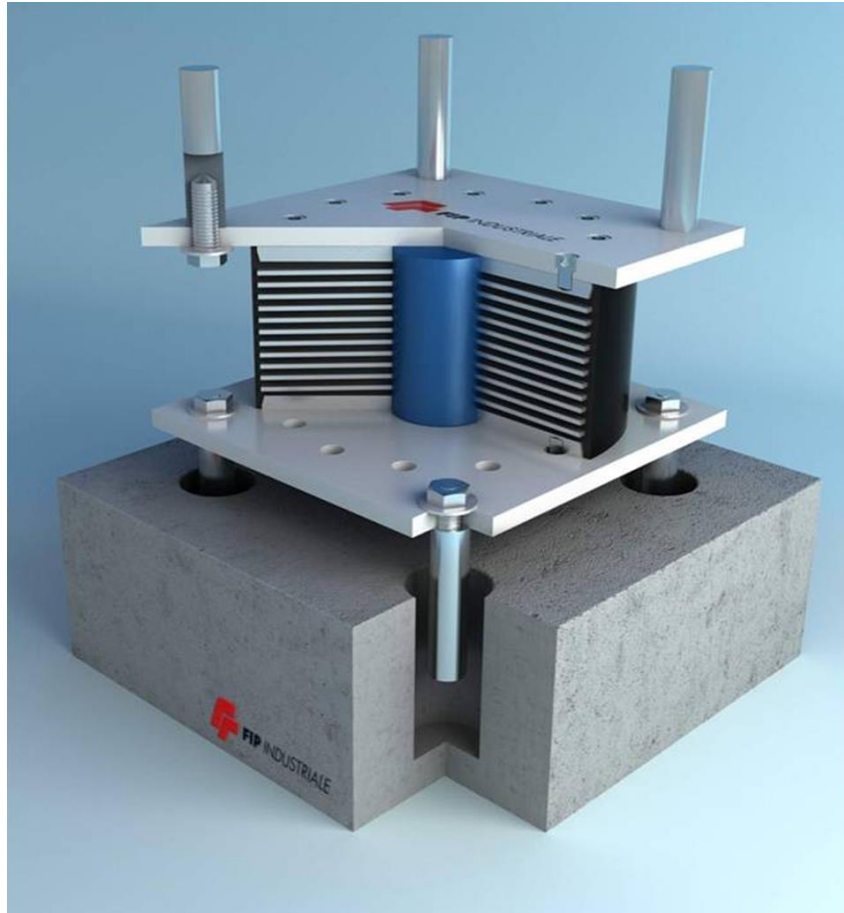


Figura 10. Aislador elastomérico de base de tipo LRB. Adaptado de Sismica <http://www.sismica.cl/?portfolio=aisladores-elastomericos-con-nucleo-de-plomo-lrb>

3.4.2 Aislador de Péndulo de fricción Es un apoyo de tipo deslizante el cual consiste en un deslizador articulado sobre una superficie de acero inoxidable esférica y pulida, el deslizador está revestido con un material compuesto de alta capacidad de soporte basado en politetrafluoroetileno que tiene un bajo coeficiente de fricción (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009) y (Su, Ahmadi, & Tadjbakhsh, 1991). Los apoyos están sellados e instalados con la superficie deslizante boca abajo para evitar la contaminación de la interface de deslizamiento, El apoyo de péndulo de fricción es activado únicamente cuando la fuerza de corte sobre la interface de aislación, debida a las fuerzas sísmicas, supera a la fuerza de fricción estática. Una vez en movimiento, el deslizador

articulado se mueve a lo largo de la superficie esférica cóncava, causando la elevación de la masa soportada, con movimientos equivalentes a los de un péndulo simple, los resultados del aislamiento de base deseados se logran por medio de la geometría del apoyo y la acción de la gravedad. Durante la elevación a lo largo de la superficie esférica, el apoyo desarrolla una fuerza resistente lateral igual a la combinación de la fuerza friccional movilizada y una fuerza restauradora inducida por la gravedad, esta última es la fuerza restauradora del sistema. Este tipo de apoyo tienen dos fases una en la que el deslizador no se mueve, conocida como fase de agripamiento, y otra en donde el deslizador entra en movimiento (R. Aguiar, J.L Almazan P, P. Dechent, 2008) y (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009).



Figura 11. Aislador de péndulo friccionante.

3.4.3 Control pasivo con sistemas inerciales acoplados Un sistema Tuned Mass Damper o sistema de amortiguamiento de masa sintonizada, consta de los siguientes componentes:

- Un oscilador de un grado de libertad.
- Un mecanismo de muelle.
- Un mecanismo de amortiguamiento

La Figura 12 muestra un esquema de este tipo de sistemas de control pasivo, generalmente es instalado en la parte superior de los edificios, la masa y la rigidez del muelle se determina de forma tal que la frecuencia de oscilación sea la misma que la frecuencia fundamental de la estructura. Este tipo de mecanismo de control también es efectivo para reducir la vibración ocasionada por el viento, la principal desventaja es que se requiere de una enorme masa y un gran espacio disponible para su instalación, para solucionar este problema en los últimos años se han propuesto el uso de cubiertas con aislamiento respecto a la estructura inferior o el uso de tanques elevados de agua como masas pendulares. Una de las desventajas más importantes es que este mecanismo se sitúa en un rango de frecuencias muy limitado por la frecuencia fundamental de la estructura, lo que lo hace ineficiente en caso de que la estructura presente modos de vibración altos, característicos de las edificaciones esbeltas, o también puede llegar a perderse la sintonía como consecuencia de sismos severos en los cuales la estructura se comporta plásticamente alargando el periodo de vibración (R. Aguiar, J.L Almazan P, P. Dechent, 2008).

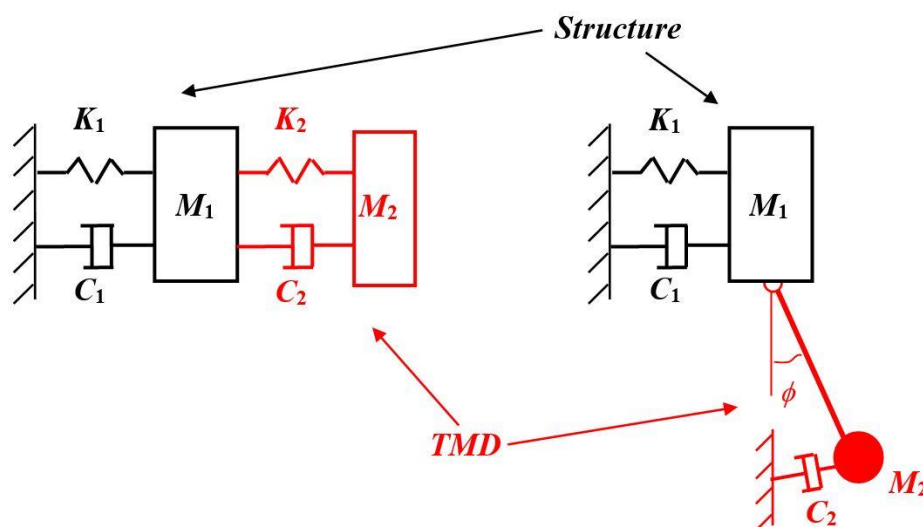


Figura 12. Esquema de un sistema de amortiguamiento de masa sintonizada. Adaptado de DEICON Dynamics & Controls <http://www.deicon.com/tuned-mass-dampers/>

3.4.4 Control pasivo con disipadores de energía Para este tipo de sistemas de control, existen dos clasificaciones, disipadores histeréticos o disipadores viscoelásticos, el primer grupo de disipadores se basan en el desplazamiento y dependen de la plastificación de los metales por flexión, cortante o extrusión, así como de la fricción entre superficies, el segundo grupo dependen de la velocidad y se basan en sólidos viscoelásticos, fluidos conducidos a través de orificios y fluidos viscoelásticos.

Para el caso de los disipadores basados en el comportamiento histerético, la plastificación de los metales se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo ya sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación en metales, el acero es el metal más utilizado en los disipadores debido a su bajo costo y su elevada ductilidad o alta capacidad de deformación plástica (Kani & Katsuta, 2009).

En la Figura 13 se muestra un dispositivo de disipación de energía de tipo histerético por flexión denominado como ADAS, el cual está formado por un conjunto de chapas en paralelo, de espesor constante y sección variable en forma de “X”, el número frontal de chapas en paralelo resulta variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura, cada una de las placas se encuentra restringida a giro en ambos extremos, esto produce una distribución de momentos flectores lineales simétricos y con doble curvatura ante un desplazamiento relativo entre las placas en dirección perpendicular al plano de estas.



Figura 13. Dispositivo de disipación histerética de energía ADAS. Adaptado de Sirve SEISMIC PROTECTION TECHNOLOGIES, <http://sirve.cl/en/archivos/proyectos/cooper-basis-energy-devices/disipador-adas-cobre-2-2>

En la Figura 14 se muestra el esquema de un dispositivo de disipación de energía histerético por fricción, estos se basan en el rozamiento existente entre dos superficies en contacto bajo presión y en el deslizamiento entre ellas. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal y el coeficiente de rozamiento. Las curvas histeréticas características de este tipo de disipadores son prácticamente rectangulares con lo cual la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento.

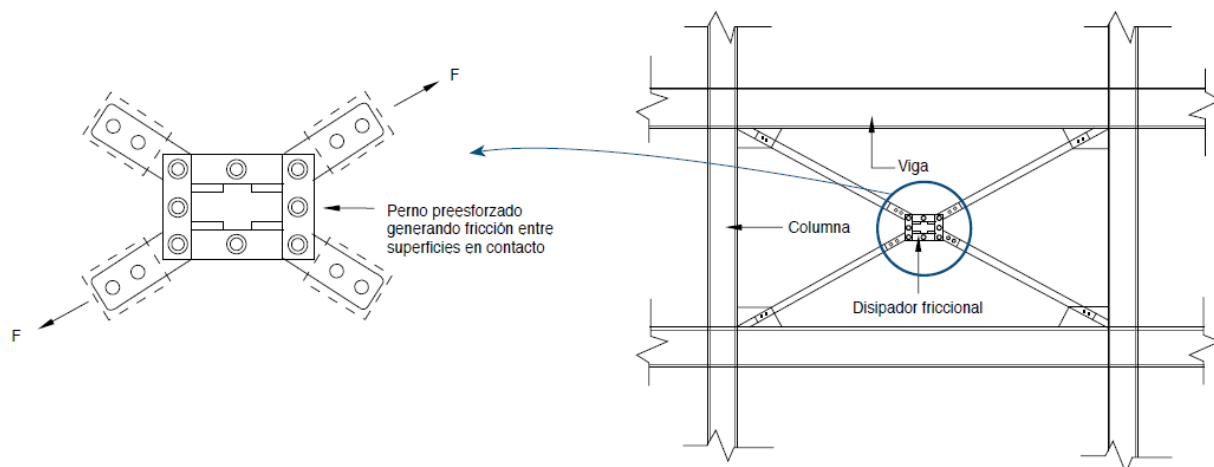


Figura 14. Disipador de energía histerético por fricción. Adaptado de Tecnología Anti-Sismica, <http://antisismos.blogspot.com.co/2015/06/5.html>.

Para el caso de los disipadores con comportamiento viscoelástico, estos han sido empleados con éxito para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento (Matsagar & Jangid, 2008). Sin embargo, se ha estudiado la aplicación de estos con propósitos sismoresistentes. Los disipadores viscoelásticos están formados con chapas metálicas unidas con capas finas de material viscoelástico y presentan ciclos histeréticos característicos de forma elíptica. La acción disipadora de este tipo de disipadores se basa en el aumento del amortiguamiento estructural y presentan ventajas con relación a los disipadores histeréticos tales como:

- No necesitan de una fuerza umbral para disipar energía.
- No cambian significativamente los periodos de vibración y por lo tanto resulta viable linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación más sencilla.

Sin embargo, este tipo de disipadores presentan desventajas, algunas de estas son:

- La poca variación del periodo fundamental no evita el comportamiento resonante.
- Los materiales viscoelásticos por lo general son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación, lo que hace necesario minimizar la influencia de estas variables

en sus rangos de servicio en estructuras sismoresistentes para que su comportamiento resulte predecible.

- Se necesita una gran cantidad de dispositivos para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural de tal forma que se reduzca significativamente la respuesta estructural ante un evento sísmico severo.

En la Figura 15 se muestra un disipador de flujo viscoso, estos tienen la propiedad de reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura, esta propiedad se debe a que este tipo de disipadores varían la fuerza como función únicamente de la velocidad, esto hace que se provea una respuesta que este fuera de fase con los esfuerzos debido a la flexibilidad de la estructura. Básicamente un disipador basado en fluido viscoso es un mecanismo lleno de flujo y capaz de mantenerse en servicio durante grandes periodos de tiempo sin ningún tipo de mantenimiento, los materiales con los que se elaboran deben ser resistentes a la corrosión, al desportillamiento y libres de esfuerzos de ruptura además de alta resistencia al impacto.

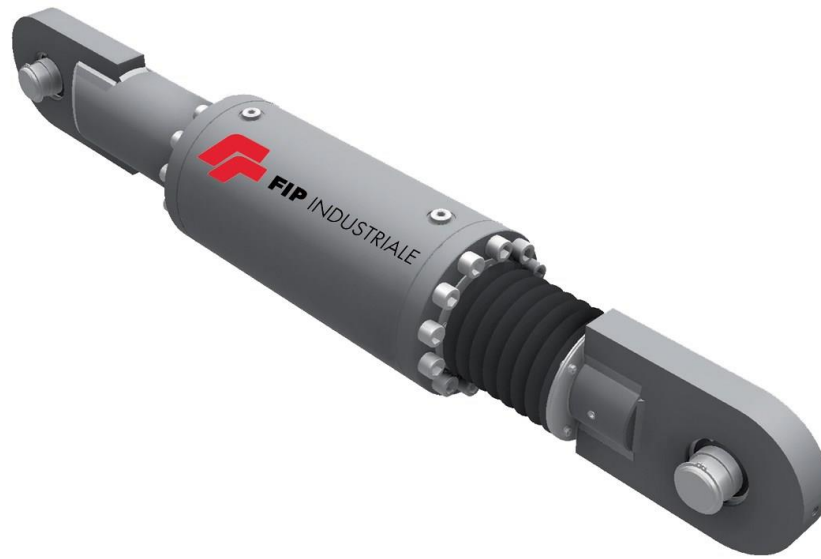


Figura 15. Disipador de fluido viscoelastico. Adaptado de archiproductos http://www.archiproducts.com/it/prodotti/fip-industriale/dissipatori-sismici-dissipatori-di-energia-isteretici-e-viscosi_4463

Otro tipo de disipadores viscoelásticos son los amortiguadores de extrusión de plomo (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009), actualmente este tipo de amortiguadores son usados ampliamente en edificios y puentes en Japón, Estados Unidos, Italia y Nueva Zelanda. Este dispositivo basa el funcionamiento en la extrusión del material alojado en el cuerpo cilíndrico de acero, como su nombre lo indica el material a extruir es el plomo, mediante un émbolo se obliga al material a fluir a través de un orificio, este fenómeno de extrusión resulta ser un problema elasto plástico, en el cual se producen grandes deformaciones plásticas. El proceso de recuperación de las propiedades mecánicas después y durante la deformación plástica es rápido, sin embargo, es eficiente únicamente bajo temperatura ambiente debido al bajo punto de fusión del plomo, es decir la fluencia del plomo a un nivel bajo de tensiones implica un aumento en el amortiguamiento

efectivo del sistema. En la Figura 16 se muestra el esquema de un amortiguador viscoelástico basado en la extrusión de plomo.

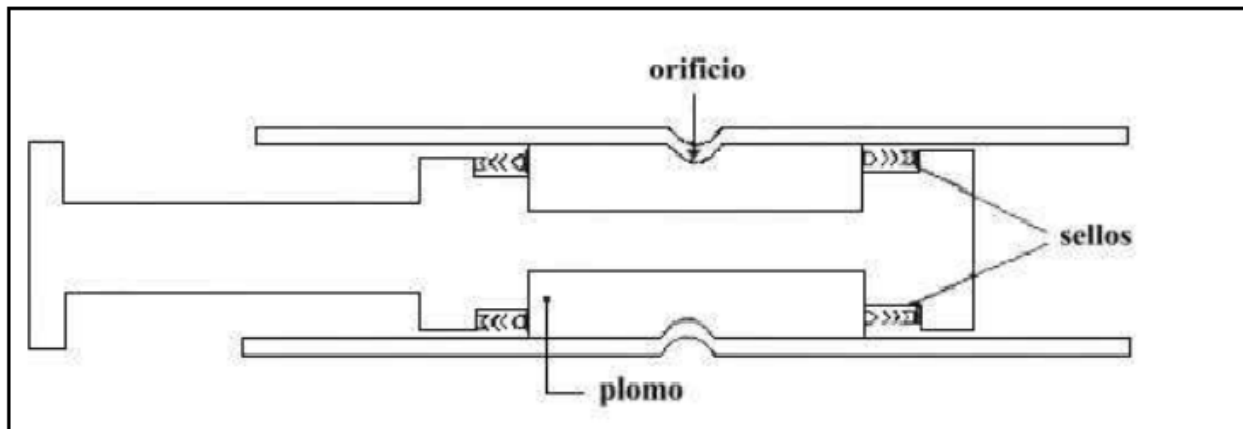


Figura 16. Esquema de un amortiguador viscoelástico basado en la extrusión de plomo. Adaptado de Tecnología Anti-Sísmica <http://antisismos.blogspot.com.co/2015/06/5.html>

5. Conclusiones

En el presente documento, se presentó un breve recuento sobre las técnicas de reforzamiento estructural, tanto tradicionales como basadas en las nuevas tendencias, se describen algunas técnicas basadas en la adición de elementos de concreto, adición de elementos de acero, basadas en materiales especiales y aislamiento sísmico, se destacan sus propiedades, así como sus desventajas, de acuerdo a lo expuesto en las páginas anteriores, los autores plantean las siguientes conclusiones:

- Si bien las técnicas basadas en el aislamiento de base no han tenido un amplio uso dentro de la práctica de la ingeniería de rehabilitación estructural en Colombia, son una muy buena

opción para ser implementadas en edificaciones de suma importancia, ubicadas en zonas de alta amenaza sísmica, esto teniendo en cuenta que este tipo de edificaciones deben sobrevivir a fuertes sismos, ya que por su funcionabilidad resultan de vital importancia.

- Los materiales especiales a pesar de que brindan propiedades y beneficios superiores que los del acero estructural, presentan limitaciones desde el punto de vista de reglamentos que le permitan a los diseñadores contar con directrices mínimas para diseñar rehabilitaciones estructurales seguras y de igual forma la ausencia de manuales de buenas prácticas para los constructores, se convierte en una barrera para la implementación a gran escala de este tipo de técnicas modernas.
- Los autores consideran pertinente realizar estudios de factibilidad de implementación de las técnicas modernas en el contexto colombiano, es decir, se debe identificar cuales aspectos hacen que los constructores sean reacios a la utilización de este tipo de técnicas y basados en opiniones de expertos sugerir correctivos que aporten al desarrollo de estas técnicas en el territorio nacional.
- A pesar de que las técnicas de reforzamiento estructural clásicas, son efectivas y demuestran buen comportamiento durante la respuesta estructural, estas técnicas en muchas ocasiones no son apetecidas por el hecho de tener que suspender la actividad económica o habitacional de las estructuras por largos periodos de tiempo, además en edificaciones comerciales, la inactividad repercute en sobrecostos operacionales, por otro lado la afectación sobre la arquitectura original hace que las técnicas de reforzamiento estructural clásicas, basadas en el engrosamiento de secciones o en la adición de elementos de acero o de concreto, presenten considerables desventajas.

Referencias Bibliográficas

- Adhikary, B. B., & Mutsuyoshi, H. (2006). Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques. *Construction and Building Materials*, 20(6), 366–373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.024>
- Almeida, A., Ferreira, R., Proenca, J. M., & Gago, A. S. (2017). Seismic retrofit of RC building structures with Buckling Restrained Braces. *Engineering Structures*, 130, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.036>
- Barbat, A., Bernat-Maso, E., Escrig, C., Gil, L., Larrinaga, P., & Marcos, I. (2014). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. (M. Pérez, Ed.) (1st ed.). Barcelona: Omnia Publisher. <https://doi.org/10.3926/oms.210>
- Barros, J. A. O., Rezazadeh, M., Laranjeira, J. P. S., Hosseini, M. R. M., Mastali, M., & Ramezansefat, H. (2017). Simultaneous flexural and punching strengthening of RC slabs according to a new hybrid technique using U-shape CFRP laminates. *Composite Structures*, 159, 600–614. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.009>
- Bousselham, A. (2010). State of Research on Seismic Retrofit of RC Beam-Column Joints with Externally Bonded FRP. *Journal of Composites for Construction*, 14(1), 49–61. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000049)
- Costa, A. G. (FEUP), Guedes, J. (FEUP), & Varum, H. (2014). *Building Pathology and Rehabilitation. Structural Rehabilitation of Old Buildings* (1st ed., Vol. 2). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1>
- Dutta, A., Sumnicht, J. F., Mayes, R. L., Hamburger, R. O., & Citipitioglu, A. (2008). An innovative application of base isolation technology. *18th Analysis and Computation Specialty Conference, ASCE Structures Congress*, 18–20. [https://doi.org/10.1061/41084\(364\)77](https://doi.org/10.1061/41084(364)77)
- El-Gamal, S. E., Al-Nuaimi, A., Al-Saidy, A., & Al-Lawati, A. (2016). Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC

- beams. *Construction and Building Materials*, 118, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.152>
- Elwood, K. . (2009). Guide for Seismic Rehabilitation of Existing Concrete Buildings: Vision. In *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures* (p. 35). San Francisco. [https://doi.org/10.1061/41084\(364\)50](https://doi.org/10.1061/41084(364)50)
- Fema 547. (2006). *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. (nehrp, Ed.), Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (1st ed.). <https://doi.org/10.1061/9780784408841>
- Flores, M. F. (2012). Aplicaciones De Refuerzos De Estructuras En Base a Fibras De Carbono. Facultad de Arquitectura - UdelaR.
- Gallego, M., & Sarria, A. (2010). *El Concreto y los TERREMOTOS: Conceptos, Comportamiento, Patología y rehabilitación*. (Nomos Impresores, Ed.) (2nd ed.). Bogotá: ASOCRETO.
- Inci, P., Goksu, C., Ilki, A., & Kumbasar, N. (2012). Effects of Reinforcement Corrosion on the Performance of RC Frame Buildings Subjected to Seismic Actions. *Journal of Performance of ...*, 27(6), 683–696. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000378](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000378).
- Kani, N., & Katsuta, S. (2009). Seismic Isolation Retrofit for Existing Buildings in Japan. In *ATC ans SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures* (pp. 867–878). San Francisco.
- Khalifa, A. M. (2016). Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1497–1505. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.033>
- Liu, Y., Zwingmann, B., & Schlaich, M. (2015). Carbon fiber reinforced polymer for cable structures-a review. *Polymers*, 7(10), 2078–2099. <https://doi.org/10.3390/polym7101501>
- Lombard, J., Lau, D., & Humar, J. (2000). Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls. *Proc., 12th World Conf. on ...*, 1–8. Retrieved from <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2032.pdf>

- M.Rodriguez, & R.Park. (1991). Repair and strengthening of reinforced concrete buildings for seismic Resistance. *Earthquake Spectra (EERI)*, 7(3), 439–459. <https://doi.org/10.1193/1.1585636>
- Machi, I., & Gun, I. (1996). State of The Art in Rechniques for rehabilitation of buildings. In *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*. Chiba. Retrieved from http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_2175.PDF
- Matsagar, V. a., & Jangid, R. S. (2008). Base Isolation for Seismic Retrofitting of Structures. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(4), 175–185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2008\)13:4\(175\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:4(175))
- Moehle, J. (2000). State of Research on Seismic retrofit of concrete building structures in the US. *US-Japan Symposium and Workshop on Seismic Retrofit of Concrete Structures*.
- Nagaprasad, P., Dipti, R., & Rai, D. (2015). Seismic strengthening of RC columns using external steel cage. *International Association for Earthquake Engineering*, 44(April), 657–675. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Pampanin, S., Christopoulos, C., & Chen, T.-H. (2006). Development and validation of a metallic haunch seismic retrofit solution for existing under designed RC frame buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(14), 1739–1766. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Protchenko, K., Wlodarczyk, M., & Szmigiera, E. (2015). Investigation of behavior of reinforced concrete elements strengthened with FRP. *Procedia Engineering*, 111(TFoCE), 679–686. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.132>
- R. Aguiar, J.L Almazan P, P. Dechent, V. S. (2008). *Aisladores de Base Elastomericos y FPS*. (Centro de Investigaciones Científicas, Ed.) (1st ed.). Quito: Escuela Politécnica del Ejército Quito - Ecuador.
- Rochel, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios* (2nd ed.). Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Soto, E. (2008). *Rehabilitación de estructuras de concreto*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Su, L., Ahmadi, G., & Tadjbakhsh, I. G. (1991). Performance of sliding resilient-friction base-isolation system. *Journal of Structural Engineering New York, N.Y.*, 117(1), 165–181. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:1\(165\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:1(165))
- Tahenni, T., Chemrouk, M., & Lecompte, T. (2016). Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. *Construction and Building Materials*, 105, 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.010>
- Vaghani, M., Vasanwala, S., & Desai, A. (2014). Advanced Retrofitting Techniques for RC Building : A State of an Art Review. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4(2), 579–584. Retrieved from <http://inpressco.com/wp-content/uploads/2014/03/Paper25579-584.pdf>
- Villareal Castro, D. G., & Oviedo Sarmiento, M. S. R. (2009). “*Edificios con Disipadores de Energia*” (1st ed.). Lima.