



UNIVERSIDAD MICHOACA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**SOFTWARE PARA ESTIMAR LA
RESISTENCIA A FLEXIÓN DE
VIGAS DE ACERO REFORZADAS
CON CFRP**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS

P R E S E N T A:

Ingeniera civil

WENDY PAMELA DE LA CRUZ NICANOR

A S E S O R A:

Doctora en Ingeniería

DRA. BERTHA ALEJANDRA OLMOS NAVARRETE



MORELIA MICHOACAN

AGOSTO

Dedicatorias

A mis padres Apolonio y Adolfinia que siempre han confiado en mí y por tener su constante amor en todas mis decisiones.

A mis hermanas Esmeralda, Lourdes y Adolfinia por darme el apoyo incondicional en cualquier situación.

A mi amiga Yesenia por haber estado conmigo en momentos difíciles de mi vida.

Y a Dios por a verme brindado todo lo que hasta hoy he logrado.

Agradecimientos

A la Dra. Bertha Alejandra Olmos Navarrete por su paciencia, y por el apoyo brindado durante esta etapa.

A la Universidad Michoacana por brindarme un espacio para concluir mis estudios.

Al ingeniero Heriberto Puga por sus consejos, amistad, paciencia y sobre todo por su cariño.

A todos mis amigos que de alguna manera han sido partícipes de la culminación de ésta etapa de mi vida, pero en especial a Yesenia, Zuleima, Jazmín y Briseida.

Contenido

Resumen **viii**

Abstract **ix**

Lista de figuras **x**

Lista de tablas **xix**

Lista de símbolos **xxii**

Objetivo general **xxviii**

Objetivos particulares **xxviii**

Introducción **xxix**

Organización de la tesis **xxxi**

CAPÍTULO 1: Fibras de refuerzo 1

1.1 Tipos de fibras de refuerzo **1**

1.1.1 Fibra de vidrio **2**

1.1.2 Fibra de aramida **2**

1.1.3 Fibra de carbono **3**

1.2 Proceso de obtención de las fibras de refuerzo **4**

1.2.1 Fibra de vidrio **4**

1.2.2 Fibra de aramida **5**

1.2.3 Fibra de carbono **6**

1.3 Clasificación y orientación de las fibras de refuerzo **9**

1.4 Características de las fibras de refuerzo **11**

1.5 Tipos de resinas **12**

1.6 Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de las fibras de refuerzo 13

capítulo 2: Usos y aplicaciones de CFRP en puentes con vigas de acero 16

2.1 Antecedentes 16

2.2 Aspectos generales para la implementación del refuerzo CFRP 20

2.3 Aplicaciones del refuerzo CFRP en la superficie de acero 21

2.4 Casos prácticos de vigas de acero y compuestas rehabilitadas con CFRP 22

2.5 Casos experimentales de vigas de acero con CFRP 28

Capítulo 3: Modos de falla que presentan las vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP 32

3.1 Comportamiento de la unión adhesiva entre los CFRP y la superficie de acero 32

3.1.1 Métodos de prueba para determinar el comportamiento de la unión entre el acero y los CFRP 35

3.1.2 Estudios analíticos y experimentales de elementos de acero reforzados con CFRP 38

3.2 Resistencia y longitud efectiva del adhesivo de unión entre el acero y los CFRP 51

3.2.1 Efecto de la temperatura en la resistencia de unión entre el acero y los CFRP 53

3.3 Esfuerzos en la interfase en vigas IR reforzadas con placas de CFRP 55

3.4 Modos de falla de un elemento de acero reforzado con CFRP sometido a tensión 57

3.5 Modos de falla en vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP 59

3.5.1 Falla en el plano 59

3.5.2 Falla por pandeo lateral 60

3.5.3 Falla por pandeo local y cortante 60

Capítulo 4: Resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP 62

- 4.1 Aspectos generales 62
- 4.2 Propiedades mecánicas del acero 63
- 4.3 Comportamiento de vigas IR de acero a flexión 64
- 4.4 Resistencia de diseño a flexión de vigas IR de acero 65
 - 4.4.1 Miembros en los que el pandeo lateral no es crítico ($L \leq L_U$) 67
 - 4.4.2 Miembros en los que el pandeo lateral es crítico ($L > L_U$) 68
- 4.5 Resistencia de diseño a flexión de vigas IR compuestas 69
- 4.6 Reglamentos para el diseño de elementos de acero reforzados con CFRP 72
- 4.7 Resistencia de diseño a flexión de vigas IR de acero reforzadas con CFRP 72
- 4.8 Resistencia de diseño a flexión de vigas IR compuestas reforzadas con CFRP 75
 - 4.8.1 Eje neutro en la losa de concreto 76
 - 4.8.2 Eje neutro en la viga de acero 77
- 4.9 Efectos de precarga 78
- 4.10 Predicción de falla 78
 - 4.10.1 Desadherencia final 79
 - 4.10.2 Desadherencia intermedia 80

Capítulo 5: Descripción del software desarrollado para la revisión de la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP 83

- 5.1 Manual de usuario 83
 - 5.1.1 Vigas IR de acero reforzadas con CFRP 87

5.1.2 Vigas IR compuestas reforzadas con CFRP 93

Capítulo 6: Ejemplos de aplicación del software desarrollado 98

6.1 Descripción de los casos de estudio 98

6.1.1 Vigas IR de acero 99

6.1.2 Vigas IR compuestas 112

6.2 Implementación del software desarrollado 113

6.3 Resultados 116

Conclusiones 126

Referencias 128

Apéndice A. Información y datos de los casos de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP 131

Resumen

Los puentes construidos en acero, concreto reforzado y/o compuestos son rehabilitados después de que se observa un deterioro o riesgo de falla importante. Para mantener el paso seguro y extender la vida útil de los puentes en acero estructural se practican tres tipos de técnicas de rehabilitación, la primera es a base de adhesivo para la unión del refuerzo, la segunda es atornillando los elementos de refuerzo y, la tercera es soldando una misma placa en acero que es colocada en la zona crítica de fatiga o sobreesfuerzo. La primer técnica es en la que se enfoca esta tesis, se emplea prácticamente para contra restar o hasta para mejorar el desempeño de las vigas de acero. Esto se logra usando el mejor de los polímeros de refuerzo de la actualidad, que es la fibra de carbono (CFRP), la cual posee una alta resistencia a tensión, a la corrosión y a la fatiga.

Dentro de la investigación se estudian varios aspectos relacionados con las propiedades mecánicas individuales de cada material y el comportamiento global de vigas reforzadas con CFRP. Además, se describe ampliamente la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP y los modos de falla que presentan (flexión, pandeo local y lateral, cortante y desadherencia). Así como también se demuestra analíticamente su capacidad a flexión con el desarrollo e implementación de un programa en Matlab. Con el mismo se analizaron 42 casos de vigas de sección IR reforzadas con láminas de CFRP, cuyas características son de sección compacta y con sujeción efectiva. La composición del refuerzo usado es a base de tres tipos de fibras de carbono (SikaWrap 301-C, 530-C y 601-C) y un solo adhesivo del tipo epoxi (Sikadur 301), recomendado por fabricante. La configuración de carga y de apoyo de las vigas es del tipo simplemente y bajo las cargas concentrada y distribuida.

Lo anterior, sirvió para evaluar y comparar la capacidad estructural y de momento último de vigas en acero A36 y reforzadas con CFRP. Con relación a esto, se observa que las variables de mayor influencia son las que tienen que ver con el adhesivo de unión y el número de capas de lámina de fibra de carbono.

Palabras claves: refuerzo, rehabilitación, unión, adhesivo, fibra de carbono y falla.

Abstract

The bridges built in steel, reinforced concrete and/or composites are rehabilitated after of that be observed an deterioration or risk of failure important. To maintain safe passage and extend the service life of the bridges in steel structural be practiced three types of techniques of rehabilitation, the first is to based of adhesive for the bonding reinforcement, the second is bolting the reinforcement elements and, the third is welding a same plate in steel that is placed on the fatigue critical zone or overstress. The first technique is in the that be focused this thesis, be used practically to counter or even to improve the performance of the steel beams. This be accomplished using the best of polymers reinforcing today, that is the carbon fiber (CFRP), which posses a high resistance to tension, to corrosion and to fatigue.

Inside of the research be studied various aspects related with the individual mechanical properties of each material and the global behavior of beams reinforced with CFRP. Moreover, be described the flexural strength of steel and composites beams reinforced with CFRP and the failure modes that presented (flexion, local and lateral buckling, shear and debonding). Just as also be demonstrated analytically its capacity to flexion with the development and implementation of a program in Matlab. With the same be analyzed 42 cases of beams of section IR reinforced with CFRP sheets, whose characteristics are of compact section and with effective clamping. The composition of the reinforcement used is to based of three types of carbon fibers (SikaWrap 301-C, 530-C y 601-C) and a single adhesive type epoxy (Sikadur 301), recommended by the manufacturer. The configuration of load and support of the beams is of type simply and under the concentrated and distributed loads.

The above, served to evaluate and compare the structural capacity and last moment in A36 steel beams and reinforced with CFRP. With relation to it, be observed that the most influential variables are the that have to do with adhesive bonding and the number of layers of carbon fiber sheet.

Keywords: reinforcement, rehabilitation, bonding, adhesive, carbon fiber and fails.

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Fibra de vidrio. Tomada de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2013/10/reparacion-de-piezasplasticas.html>.

Figura 1.2. Fibra de aramida. Tomada de: <http://www.all.biz/es/fibra-de-aramida-bgg1076342>.

Figura 1.3 Fibra de carbono. Tomada de: www.nauticexp.es.

Figura 1.4 Extracción y sistema de enfriamiento de los filamentos que forman la fibra de vidrio. Tomadas de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/12/fibra-de-vidrio.html>.

Figura 1.5 Procedimiento final de la fibra de vidrio. Tomada de: <http://vane2001.blogspot.mx>.

Figura 1.6 Estiramiento y orientación de la fibra. Tomada de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2012/08/fibras-polimericas.html>.

Figura 1.7 Horno de oxidación y carbonización. Tomadas de Águila Higuero Victoria, 2010.

Figura 1.8 Maquinaria para dar la orientación adecuada y para empacar a las fibras. Imágenes tomadas de: Águila Higuero Victoria, 2010.

Figura 1.9 Procedimiento de las fibras de carbono.

Figura 1.10 Orientación y tipo de laminado de las fibras de refuerzo. Donde: 1) fibras unidireccionales, 2) fibras bidireccionales, 3) fibras multidireccionales y 4) fibras con una orientación aleatoria.

Figura 1.11 Comparación de las fibras refuerzo.

Figura 1.12 Gráfica de Esfuerzo-Deformación de CFRP y del acero grado 42. Tomada de: Castillo Manzano Carlos Alejandro , 2007.

Capítulo 2

Figura 2.1 Puente Infiernillo. Tomada de: http://noticias.tradeco.com/wp-content/gallery/puente-infiernillo_1/Infiernillo-II-2.jpg.

Figura 2.2 Puente Matute Ramus. Tomada de: <http://www.obrasweb.mx/media/2011/08/09/puente-matute-remus-seis-no-publicar.jpg>.

Figura 2.3 Puente Albatros. Tomada de: <http://www.altonivel.com.mx/23548-4-grandes-proyectos-de-infraestructura-del-sexenio.html>.

Figura 2.4 Puente Barranca Honda. Tomada del IMT(Publicación Técnica No. 387).

Figura 2.5 Puente Alvarado. Tomada de: <http://alvarado.gob.mx/turismo/cruces-de-mayo>.

Figura 2.6 Puentes atirantados. Tomadas de: <http://www.gmd.com.mx/barranca-el-canon.html> y <https://www.flickr.com/photos/vazquez100/4564137127/in/set-72157623838680691>.

Figura 2.7 Aplicación de placas CFRP en vigas de acero. Tomada de: Hollaway L.C. y Cadei J., 2002 .

Figura 2.8 Puente Tickford. Tomada de: Hollaway L.C. and Cadei J., 2002.

Figura 2.9 Puente ferroviario de la calle King, Mold, Reino Unido. Tomada de: Hollaway L.C.and Cadei J., 2002.

Figura 2.10 Puente Bid, Kent, Reino Unido. Figura tomada de: Hollaway L.C. and Cadei J., 2002.

Figura 2.11 Puente canal Slattocks, Rochdale, Reino Unido. Tomada de: <http://www.ebay.es/itm/Print-Nettlefold-Grundy-Water-1935-Eltham-Bridge-Kent-Henry-Gastineau-/351114527737>.

Figura 2.12 Puente Bow, al este de Londres, Reino Unido. Tomada de: <https://londonhistorians.wordpress.com/category/business-and-retail>.

Figura 2.13 Puente en el Condado de Guthrie, Iowa, en la carretera estatal 141. Tomada de: Brent M. Phares, Terry J. Wipf, F. Wayne Klaiber, et al; 2003.

Figura 2.14 Puente en el Condado de Pottwattamie, Iowa, en la carretera estatal 92 . Tomada de: Brent M. Phares, Terry J. Wipf, F. Wayne Klaiber, et; 2003.

Figura 2.15 Puente Acto, al oeste de Londres. Tomada de: Moy S.S.J. and Bloodworth A.G.; 2007.

Figura 2.16 Viga G5 rehabilitada con placas de CFRP. Tomada de: Miller Trent C., Chajes Michael J., Mertz Dennis R. y Hastings Jason N.; 2001.

Figura 2.17 Viga principal curvada, Nottingham, Reino Unido. Tomada de: Hollaway L.C. and Cadei J., 2002.

Figura 2.18 Diferentes configuraciones geométricas de vigas de acero con CFRP.

Figura 2.19 Dimensiones de la sección transversal y configuración de carga de una viga.

Capítulo 3

Figura 3.1 Modelos de unión-desplazamiento.

Figura 3.2 Métodos de prueba para determinar el comportamiento de la unión entre el acero y el CFRP, cuando la carga se aplicada directamente en el elemento CFRP.

Figura 3.3 Métodos de prueba para determinar el comportamiento entre el acero y el CFRP, cuando la carga se aplica directamente en el elemento de acero.

Figura 3.4 Placa de acero reforzada con placas CFRP y configuración del adhesivo.

Figura 3.5 Espécimen con doble traslape

Figura 3.6 Detalle de configuraciones de unión de traslape para especímenes de pruebas a tensión (vista lateral).

Figura 3.7 Refuerzo lateral doble de una placa de acero (especimen R1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.8 Uniones de traslape doble (especimen H1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.9 Marco de referencia para refuerzo de doble traslape . Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.10 Gráfica de deformación Vs carga aplicada (strain-gages 1-5) en el espécimen R1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.11 Distribución de esfuerzos en los diferentes niveles de carga a lo largo de las láminas CFRP del espécimen R1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.12 Deformación Vs carga aplicada (strain-gages 8-11) H1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.13 Distribución de esfuerzos con diferentes niveles de carga a lo largo de la longitud de las láminas CFRP de espécimen H1. La línea sólida indica los resultados del MEF. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.14 Doble unión de traslape (espécimen J1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.15 Marco de referencia para uniones de doble traslape. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.16 Deformación Vs carga aplicada (strain-gages 2,4-6) en el espécimen J1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.17 Distribución de esfuerzos con diferentes niveles de carga a lo largo de la longitud de las láminas CFRP del espécimen J1. Las cruces indican los esfuerzos registrados con un nivel de carga de 60 kN. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.18 Deformación Vs carga aplicada (strain-gages 6-8) en el espécimen J3. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.19 Refuerzo en uniones atornilladas (espécimen B1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.20 Gráfica de carga-desplazamiento del espécimen B1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.21 Gráfica de carga-desplazamiento del espécimen B2. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Figura 3.22 Esfuerzos axiales y cortante en la interfase acero y CFRP, en una viga de acero simplemente apoyada.

Figura 3.23 Condiciones de carga, donde $L=l+a$.

Figura 3.24 Modos de falla en un elemento de acero reforzado con CFRP, sometido a tensión.

Figura 3.25 Falla a flexión de una viga compuesta acero-concreto reforzada con CFRP (falla de las láminas de CFRP por ruptura). Tomada de: CNR-DT 2002/2005.

Figura 3.26 Modos de falla de vigas IR reforzadas con CFRP. Tomada de: FRP-Strengthened Metallic Structures, Xiao-Ling Zhao, 2014.

Figura 3.27 Modos de falla por desadherencia en vigas IR reforzadas con CFRP. Tomadas de: FRP-Strengthened Metallic Structures, Xiao-Ling Zhao, 2014.

Figura 3.28 Falla por pandeo local y cortante en vigas existente reforzadas con CFRP. Tomada de: CNR-DT 2002/2005.

Capítulo 4

Figura 4.1 Curva esfuerzo-deformación para aceros con diferentes contenidos de carbono. Tomadas de: Instituto Mexicano de la Construcción en el Acero (IMCA), 2010.

Figura 4.2 Curvas esfuerzo-deformación de algunas calidades de acero. Tomadas de: Instituto Mexicano de la Construcción en el Acero (IMCA), 2010.

Figura 4.3 Diagrama de distribución de esfuerzos en una viga sometida a flexión.

Figura 4.4 Diagrama de esfuerzos plásticos de una sección compuesta acero-concreto.

Figura 4.5 Distribución de esfuerzos y deformaciones de una sección de acero reforzada con CFRP.

Figura 4.6 Sección compuesta, acero-concreto reforzada con CFRP y su Distribución de deformaciones.

Figura 4.7 Esfuerzos y deformaciones de una sección compuesta, acero-concreto reforzada con CFRP cuando el eje neutro se encuentra en la losa de concreto.

Figura 4.8 Esfuerzos y deformaciones de una sección compuesta, acero-concreto reforzada con CFRP cuando el eje neutro se encuentra en la viga de acero.

Capítulo 5

Figura 5.1 Geometría de la sección transversal IR.

Figura 5.2 Propiedades mecánicas de la sección transversal IR.

Figura 5.3 Cargas externas aplicadas en una viga de acero y compuesta, acero-concreto.

Figura 5.4 Cargas externas consideradas.

Figura 5.5 Revisión de pandeo local y lateral de la sección IR.

Figura 5.6 Momento Resistente y momento máximo de la sección IR.

Figura 5.7 Geometría de la lámina -CFRP.

Figura 5.8 Propiedades mecánicas de la lámina-CFRP.

Figura 5.9 Propiedades mecánicas del adhesivo de unión.

Figura 5.10 Resultados y recomendaciones de una viga de acero reforzada con CFRP

Figura 5.11 Resultados y recomendaciones de una viga compuesta, acero-concreto reforzada con CFRP

Capítulo 6

Figura 6.1 Casos establecidos de acuerdo al tipo de viga.

Figura 6.2 Propiedades geométricas de una viga IR de acero.

Figura 6.3 Propiedades mecánicas y condiciones de carga para una viga IR de acero.

Figura 6.4 Revisión del pandeo local y lateral para vigas de acero y compuestas, acero-concreto.

Figura 6.5 Momento resistente no reforzado, para vigas de acero y compuestas, acero-concreto.

Figura 6.6 Geometría, propiedades mecánicas de la fibra de carbono y del adhesivo de unión.

Figura 6.7 Momento resistente reforzado con CFRP, para vigas de acero y compuestas, acero-concreto.

Figura 6.8 Curva M_{Rcfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 6x9

Figura 6.9 Curva M_{Rcfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 6x12

Figura 6.10 Curva M_{Rcfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 6x16

Figura 6.11 Curva M_{Rcfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x10.

Figura 6.12 Curva M_{Rcfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x13.

Figura 6.13 Curva M_{Rcfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x15.

Figura 6.14 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x18.

Figura 6.15 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x21.

Figura 6.16 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x12.

Figura 6.17 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x15.

Figura 6.18 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x17.

Figura 6.19 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x19.

Figura 6.20 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x22.

Figura 6.21 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x26.

Figura 6.22 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x30.

Figura 6.23 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x14

Figura 6.24 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x16.

Figura 6.25 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x19.

Figura 6.26 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x22.

Figura 6.27 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x26.

Figura 6.28 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x30.

Figura 6.29 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x35.

Figura 6.30 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x40.

Figura 6.31 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x45.

Figura 6.32 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x50.

Figura 6.33 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x30.

Figura 6.34 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x34.

Figura 6.35 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x38.

Figura 6.36 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x43.

Figura 6.37 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x48.

Figura 6.38 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x53.

Figura 6.39 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16x36.

Figura 6.40 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16X40.

Figura 6.41 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16x45.

Figura 6.42 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16X50.

Figura 6.43 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 18X80.

Figura 6.44 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 18X65.

Figura 6.45 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 18x71.

Figura 6.46 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 30X99.

Figura 6.47 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 36X160.

Figura 6.48 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga compuesta con un perfil IR 6X9.

Figura 6.49 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga compuesta con un perfil IR 6x16 checar esta figura.

Lista de tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1 Propiedades típicas de las matrices termoeestables.

Tabla 1.2 Propiedades típicas de las matrices termoplásticas.

Tabla 1.3 Propiedades Físicas y Químicas de las Fibras de Refuerzo.

Capítulo 2

Tabla 2.1 Propiedades típicas de las fibras usadas en la placa de unión.

Capítulo 3

Tabla 3.1 Matriz de prueba para el proceso de selección de la capa humectante de resina.

Tabla 3.2 Propiedades nominales de los componentes de refuerzo.

Tabla 3.3 Especímenes Geométricos.

Capítulo 6

Tabla 6.1 Propiedades mecánicas del acero estructural y concreto.

Tabla 6.2 Propiedades mecánicas de los diferentes fibras de refuerzo.

Tabla 6.3 Espesor de la fibra de carbono y adhesivo.

Anexo

Tabla A.1 Momento resistente con CFRP (IR6X9).

Tabla A.2 Momento resistente con CFRP (IR6X12).

Tabla A.3 Momento resistente con CFRP (IR6X16).

Tabla A.4 Momento resistente con CFRP (IR8X10).

Tabla A.5 Momento resistente con CFRP (IR8X13).

Tabla A.6 Momento resistente con CFRP (IR8X15).

Tabla A.7 Momento resistente con CFRP (IR8X18).

Tabla A.8 Momento resistente con CFRP (IR8X21).

Tabla A.9 Momento resistente con CFRP (IR10X12).

Tabla A.10 Momento resistente con CFRP (IR10X15).

Tabla A.11 Momento resistente con CFRP (IR10X17).

Tabla A.12 Momento resistente con CFRP (IR10X19).

Tabla A.13 Momento resistente con CFRP (IR10X22).

Tabla A.14 Momento resistente con CFRP (IR10X26).

Tabla A.15 Momento resistente con CFRP (IR10X30)

Tabla A.16 Momento resistente con CFRP (IR12X14).

Tabla A.17 Momento resistente con CFRP (IR12X16).

Tabla A.18 Momento resistente con CFRP (IR12X19).

Tabla A.19 Momento resistente con CFRP (IR12X22).

Tabla A.20 Momento resistente con CFRP (IR12X26).

Tabla A.21 Momento resistente con CFRP (IR12X30).

Tabla A.22 Momento resistente con CFRP (IR12X35).

Tabla A.23 Momento resistente con CFRP (IR12X40)

Tabla A.24 Momento resistente con CFRP (IR12X45).

Tabla A.25 Momento resistente con CFRP (IR12X50).

Tabla A.26 Momento resistente con CFRP (IR14X30)

Tabla A.27 Momento resistente con CFRP (IR14X34).

Tabla A.28 Momento resistente con CFRP (IR14X38).

Tabla A.29 Momento resistente con CFRP (IR14X43).

Tabla A.30 Momento resistente con CFRP (IR14X48).

Tabla A.31 Momento resistente con CFRP (IR14X53).

Tabla A.32 Momento resistente con CFRP (IR16X36).

Tabla A.33 Momento resistente con CFRP (IR16X40).

Tabla A.34 Momento resistente con CFRP (IR16X45).

Tabla A.35 Momento resistente con CFRP (IR16X50).

Tabla A.36 Momento resistente con CFRP (IR18X60).

Tabla A.37 Momento resistente con CFRP (IR18X65).

Tabla A.38 Momento resistente con CFRP (IR18X71).

Tabla A.39 Momento resistente con CFRP (IR30X99).

Tabla A.40 Momento resistente con CFRP (IR36X160).

Tabla A.41 Momento resistente con CFRP (IR6X9).

Tabla A.42 Momento resistente con CFRP (IR6X16).

Lista de símbolos

A_g , factor preexponencial.

α_g , es el grado de conversión de la transición vítrea.

α_s , coeficiente de expansión térmica del sustrato del material.

α_p , coeficiente de expansión térmica del material reforzado.

A_s , área de la sección transversal.

a_r , cociente de las áreas del alma y del patín comprimido ($a_r < 10$).

β , constante de la relación de calor.

β_c , valor constante que reduce el espesor del concreto.

b_e , ancho efectivo de la losa de concreto.

b_{cfrp} , es el ancho de lámina CFRP.

b_{f1} es el ancho del patín superior.

b_{f2} es el ancho del patín inferior.

C_a , constante de torsión por alabeo de la sección.

C , valor constante.

C_m , propiedad del material, dominado por la resina como módulo de flexión, módulo de cortante o resistencia al corte.

$C_{inicial}$, propiedad en estado inicial (temperatura ambiente).

C_{final} , propiedad en estado final (después de la temperatura vítrea).

δ_1 , desplazamiento inicial del adhesivo.

δ_2 , desplazamiento en el extremo de la meseta del adhesivo.

δ_f , desplazamiento máximo del adhesivo.

ΔT , cambio de temperatura.

$E_{A,g}$, energía de activación, que es una constante para la transición vítrea.

E_{cfrp} , módulo de Young de las láminas de CFRP.

E_{rup} , módulo de elasticidad a la ruptura.

E_s , módulo de elasticidad del acero.

E_p , módulo de Young del material reforzado.

$\epsilon_{c,c}$, deformación a compresión en la superficie superior de la losa de concreto.

ϵ_{cfrp} , deformación en la superficie media de la lámina CFRP.

$\epsilon_{cfrpl,d}$, deformación límite de la lámina CFRP.

$\epsilon_{c,x}$, deformación de compresión en la superficie superior del acero, con un eje neutro (x).

$\epsilon_{c,u}$, deformación última del concreto.

ϵ_o , deformación inicial.

ϵ_i , deformación i th en el strain-gauge del extremo libre de la placa CFRP.

$\epsilon_{s,c}$, deformación del acero en la superficie del patín superior.

$\epsilon_{s,t}$, deformación del acero en la superficie del patín inferior.

$\epsilon_{s,i}$, deformación del acero a una profundidad h_i .

$\epsilon_{t,i}$, deformación inicial del acero debido a la precarga en la superficie inferior del patín de tensión de la viga.

F''_{cc} , esfuerzo de compresión en el concreto con un valor de 0.85, $f^*_c=0.8 f'_c$.

F_R , factor de resistencia a flexión del acero.

F_{RC} , factor de resistencia de una sección compuesta acero-concreto.

$f_{t,a}$, resistencia a tensión del adhesivo.

F_y , esfuerzo de fluencia.

G_a , módulo de cortante del adhesivo.

$G_a(T)$, es el módulo de cortante del adhesivo.

G_f , energía de la fractura en la interfase.

G_s , módulo de cortante del sustrato del material.

G_p , módulo de cortante del material reforzado.

h , altura de la sección de acero

h_c , peralte de la losa de concreto.

I_y , momento de inercia respecto al eje de simetría situado en el plano del alma.

J , constante de torsión.

K_s , rigidez cortante de la capa adhesiva.

$\lambda_{\text{dehaderencia}}$, factor de seguridad parcial para la falla de desunión.

γ_{cfrp} , factor parcial de seguridad para el CFRP.

γ_e , deformación de cortante elástica del adhesivo.

γ_p , deformación de cortante plástico del adhesivo.

$\gamma_p(T)$, deformación de cortante plástica del adhesivo que depende de la temperatura.

λ_e , parámetro de distribución de esfuerzos elásticos cortantes.

λ_c , factor de corrección.

l , longitud del refuerzo CFRP.

L_r , longitud que separa los intervalos de aplicación de la ecuación 4.11 y 4.12.

L_e , longitud efectiva de unión entre el acero y el CFRP.

L_i , distancia del strain-gauge i th del extremo libre de la placa CFRP.

M_0 , momento flexionante de una viga.

M_1 , momento mayor de una viga.

M_2 , momento menor de una viga.

M_p , momento plástico resistente nominal de la sección IR.

M_y , momento nominal a la iniciación de la fluencia en la sección IR.

M_R , resistencia de diseño en flexión.

M'_R , momento resistente reducido por esbeltez del alma.

M_u , momento nominal de la sección cuando el pandeo lateral se inicia en el intervalo elástico.

M_{RC} , momento resistente de una sección compuesta acero-concreto.

M_n , momento nominal de la sección compuesta acero-concreto.

N_0 , fuerza axial actuante en la sección de la placa final.

$N_{(x)}$, fuerza axial actuante en la sección en la sección de estudio.

P , carga aplicada por unidad de longitud.

P_T , carga de tensión aplicada por unidad de longitud.

P_i y P_o , resistencia de unión por unidad de ancho.

R , energía de deformación de tensión del adhesivo.

R_g , constante universal de gas (8.314 J/mol.K y 115.36 kJ/mol).

S , módulo de la sección completa, respecto al patín comprimido.

σ_{cfrp} , esfuerzo promedio axial de la lámina.

$\sigma_{s,y}$ esfuerzo de fluencia del acero.

$\sigma_{cfrp,rup}$, valor característico de la resistencia a tensión del refuerzo CFRP.

$\sigma_{s,i}$, esfuerzo del acero a una profundidad h_i que se toma igual al esfuerzo de fluencia.

σ_{cfrp} , esfuerzo promedio axial de la lámina.

σ_n , esfuerzo normal de tensión.

$\sigma(x)$, esfuerzo a tensión en el refuerzo CFRP.

σ_s , esfuerzo normal promedio en el sustrato del material.

σ_p , esfuerzo normal en el material reforzado.

t_a , espesor del adhesivo entre la placa de CFRP y el acero.

τ_a , esfuerzo a cortante del adhesivo.

τ_f , esfuerzo de cortante máximo.

$\tau(x)$, esfuerzo cortante de la capa adhesivo.

τ_f , esfuerzo de cortante del adhesivo.

t_{acero} , espesor de la placa del acero.

t_{cfrp} , espesor de la placa de CFRP.

$t_{\text{cfrp_lámina}}$, es el espesor de una capa de lámina de CFRP.

T_{cfrp} , espesor promedio total del espécimen de unión.

t_{acero} , espesor de la placa de acero.

t_s , espesor del sustrato del material.

t_p , espesor del material reforzado.

$t_{\text{cfrp_placa}}$, espesor de la placa de CFRP.

T , temperatura (K).

T_T , resistencia en tensión del acero y aplicada en el centroide de la zona en tensión.

t_w , espesor del alma.

t_{f1} , espesor del patín superior.

t_{f2} , espesor del patín inferior.

T_{TcfRP} , fuerza de tensión producida por el refuerzo CFRP que depende del número de capas de refuerzo.

$V_{(x)}$, fuerza cortante de una viga.

x , peralte del eje neutro de la sección considerada.

x_b , peralte del eje neutro balanceado de una sección compuesta con CFRP.

$x|_{\sigma_n(x)=0}$, distancia del extremo de la lámina al primer punto donde el esfuerzo normal de la lámina es cero.

X_u , valor límite de aplicación.

y , coordenada del eje en el punto; l , longitud del refuerzo.

y_1 , distancia de la superficie inferior del patín inferior para su eje neutro.

y_2 , distancia de la superficie superior de la placa CFRP para su eje neutro.

Z , módulo de sección plástico.

$N_{(x)}$, fuerza axial.

σ_{cfRP} , es el esfuerzo de tensión de lámina CFRP a tensión.

Objetivo general

Desarrollar un programa en Matlab para determinar la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con láminas de CFRP, que permita estudiar su comportamiento ante diversos escenarios de refuerzo.

Objetivos particulares

1. Estudiar las características, propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los diferentes tipos de fibra de carbono.
2. Estudiar la influencia en la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas que tienen los CFRP.
3. Estudiar los efectos que tienen en la resistencia a flexión la orientación de las CFRP.
4. Estudiar la eficiencia que tiene el número de láminas de CFRP en la resistencia a flexión.
5. Estudiar la influencia que tienen los adhesivos en la determinación de la resistencia de las vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP.
6. Estudiar el comportamiento de vigas reforzadas con láminas de CFRP

Introducción

Los puentes son una vía de comunicación entre ciudades que facilita el acceso al comercio, a la comunicación, a la educación entre otros servicios, así como el intercambio de bienes y servicios. Existe una gran variedad de tipos de puentes, pero en este trabajo sólo se hace énfasis en los construidos a base de acero y los compuestos, acero-concreto formados por un tablero de concreto reforzado apoyado en vigas de acero de sección IR. Este tipo de infraestructura nos permite diseñar grandes claros; sin embargo, a lo largo de su vida útil están expuestos a la acción corrosiva de aguas salinas, así como al incremento de cargas tanto vivas como muertas. Lo anterior infiere en una necesidad permanente de su mantenimiento, que en la mayoría de los casos su rehabilitación o refuerzo es considerablemente alta porque se usan técnicas de refuerzo como la unión adhesiva, tornillos y soldadura de placas de acero colocadas en la zona afectada, ocasionando que la estructura sea más pesada incrementado con ello los esfuerzos a que están sometidas las vigas por el efecto de refuerzo. Debido a estas consideraciones, es necesario implementar otras alternativas de refuerzo, donde se consideren los conocimientos desarrollados en estudios experimentales y analíticos, así como los adquiridos por la práctica profesional, conocimientos y tecnologías desarrolladas en países altamente desarrollados como Estados Unidos, Canadá, Inglaterra, Italia y Japón. La implementación de polímeros reforzados con fibra de carbono en la rehabilitación de vigas de acero es una innovación que se desarrollo hace apenas unas décadas y que es tema de continuos proyectos de investigación. La fibra de carbono como material para refuerzo/rehabilitación tiene varias ventajas con respecto de los técnicas tradicionales a base de acero y/o concreto reforzado, ya que el material por si mismo tiene mayor resistencia a tensión, a la fatiga y a la corrosión; además, es fácil su reparación e instalación, lo cual lleva a disminuir el costo de mano de obra y el tiempo de instalación.

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de vigas de acero y compuestas, acero-concreto reforzadas con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP). Para alcanzar nuestro objetivo primeramente se presenta una breve descripción de los tipos y propiedades de fibras de refuerzo, así como de su uso e implementación en una superficie de acero. Posteriormente, se hace una descripción de los casos en donde se ha utilizado este tipo de materiales compuestos, haciendo principal énfasis en puentes de acero y compuestos, así como en los beneficios obtenidos con la implementación de ésta técnica de refuerzo. Para fines de diseño es muy importante comprender los diferentes mecanismos de falla que se pueden presentar en vigas de acero sometidas a flexión reforzadas con CFRP, por lo cual se presenta una descripción detallada que nos permite definir el proceso de análisis y diseño a implementar en el software que se desarrolló en éste trabajo, donde se consideró la orientación de las fibras y número de capas de CFRP, para finalmente estimar la capacidad a flexión de las vigas de acero reforzadas con CFRP. El software que se

presenta en este trabajo es un programa de computo desarrollado en Matlab para estudiar el comportamiento a flexión de una viga de acero y compuesta reforzada con CFRP.

Organización de la tesis

Capítulo 1: Fibras de refuerzo

Se presenta una descripción de las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de las fibras de refuerzo, así como las principales diferencias que existen entre las fibras de refuerzo. Se hace mención sobre la elección de la fibra de carbono.

Capítulo 2: Usos y aplicaciones de CFRP en puentes con vigas de acero

Se hace una breve descripción de los casos en donde se han utilizado fibras de carbono para la rehabilitación de puentes de acero y compuestos, así como los posibles puentes que se pueden rehabilitar en México.

Capítulo 3: Modos de falla que presentan las vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

Se describe el comportamiento de una viga de acero con CFRP, y del adhesivo de unión mediante pruebas que se realizan para ver este efecto y sus modos de falla que se presentan, así como su descripción de cada una de ellas y como se puede tomar en cuenta.

Capítulo 4: Resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

Se describe el comportamiento del acero y del elemento viga. También, se realiza una descripción del cálculo de la capacidad a flexión de vigas de acero y compuestas, acero-concreto con y sin refuerzo CFRP, así como la predicción del modo de falla presente.

Capítulo 5: Descripción del software desarrollado para la revisión de la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas con CFRP

Se describe la implementación del software desarrollado para estimar la resistencia a flexión de vigas de sección IR de acero y compuestas, acero-concreto reforzadas con CFRP

Capítulo 6: Ejemplos de aplicación del software desarrollado

Se describen los casos de estudio, la implementación del software desarrollado para los dos casos de vigas, acero y compuestas. También, se presentan los resultados de las vigas diseñadas con CFRP.

Conclusiones

Se presentan las conclusiones y recomendaciones alcanzadas después de la evaluación de los resultados obtenidos de reforzar vigas IR reforzadas CFRP con diferentes configuraciones de CFRP, donde se dan recomendaciones sobre el uso de las fibras de carbono en el diseño de refuerzo.

1

C A P Í T U L O

Fibras de refuerzo

***E**n este capítulo se describen los diferentes tipos de fibras de refuerzo (vidrio, aramida y carbono), sus características, sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas, así como las diferencias que existen entre cada una de ellas. También se comenta la importancia que tienen tanto la orientación de las fibras, como las diferentes formas en que se pueden encontrar las fibras. Se hace especial énfasis en la selección del tipo de resina (matriz) para fijar las fibras y unir las en el elemento por reforzar o rehabilitar; así como en sus propiedades, características y diferencias que existen entre cada una de ellas, ya que el tipo de resina a implementar juega un papel muy importante en el comportamiento de las fibras de refuerzo.*

1.1 Tipos de fibras de refuerzo

Las fibras de refuerzo son componentes de los materiales compuestos, los cuales se forman de dos materiales: fibra y matriz, que al unirse incrementan sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. La matriz tiene como función rodear, unir y fijar las fibras para formar un sólo sistema; mientras que la fibra en sí es el refuerzo del material compuesto.

Los tipos de fibras de refuerzo que se utilizan en la construcción son: carbono, vidrio y aramida. Estas fibras se emplean para mejorar o fortalecer estructuras de acero, concreto y mampostería. Además, las fibras de refuerzo son una alternativa para la rehabilitación de estructuras existentes que compite con las técnicas de rehabilitación tradicionales. Una de las ventajas de las fibras de refuerzo es que son muy ligeras y fáciles de instalar, disminuyéndose el costo y tiempo de

ejecución; en cambio las técnicas tradicionales requieren más tiempo, maquinaria pesada y la obstrucción de la circulación de vehículos, por ende un aumento en el costo de ejecución, en contraparte se tiene el elevado costo de los materiales compuestos.

1.1.1 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio (Figura 1.1) por su proceso de obtención y su bajo costo, se ha implementado con mayor frecuencia en la rama de la ingeniería estructural.

Existe una gran variedad de clases de vidrio que se utilizan para producir la fibra, sin embargo solamente se mencionaran los vidrios implementados con mayor frecuencia. Estos se dividen en tres clases: vidrio-E (vidrio de borosilicato de aluminio), vidrio-S (vidrio de silicato de aluminio) y el



Figura 1.1 Fibra de vidrio. Tomada de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2013/10/repacion-de-piezas-plasticas.html>.

vidrio resistente a los álcalis (vidrio con un alto contenido de circonio). Las fibras de vidrio-E, son las más comunes y son las que se utilizan con mayor frecuencia debido a su bajo costo. Las fibras de vidrio-S son las más caras de todas, lo que las hace menos populares, a pesar de su elevado costo, este tipo de fibra tiene mayor resistencia a tensión utilizándose principalmente en el área militar o aeroespacial. Las fibras de vidrio resistentes a los álcalis son más adecuadas para elementos de concreto por la liberación de los álcalis durante su proceso de hidratación.

1.1.2 Fibra de aramida

La fibra de aramida es de origen orgánico y sintético, denominada fibra de poliamida aromática. Su estructura molecular se constituye de grupos amida y anillos aromáticos (en forma radial).

Las fibras de aramidas (Figura 1.2) se encuentran en el mercado como: Kevlar (DuPont), Technora (Teijin), Twaron (Akzo)

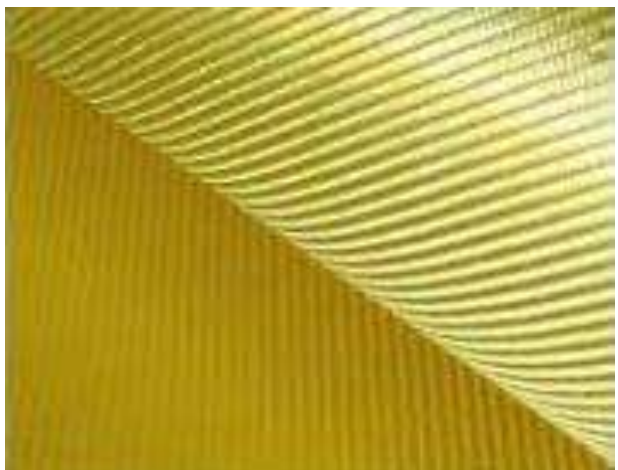


Figura 1.2. Fibra de aramida. Tomada de: <http://www.all.biz/es/fibra-de-aramida-bgg1076342>.

y SVM. Las fibras Kevlar son las más conocidas, en el mercado se presentan en tres tipos denominados Kevlar 29 (es la fibra menos resistente con una menor resistencia a tensión y al módulo de elasticidad), Kevlar 49 (es la fibra que ofrece la mayor resistencia a tensión), y el Kevlar 149 (es la fibra que ofrece el mayor módulo de elasticidad).

1.1.3 Fibra de carbono

Para la obtención de las fibras de carbono (Figura 1.3) hay tres procesos distintos:

- Fibras que se adquieren del alquitrán (PITCH), subproducto obtenido de la destilación del petróleo. Se utilizan para obtener fibras de alto y bajo módulo de elasticidad.
- Fibras que provienen de fibras precursoras de poliacrilonitrilo (PAN). Esta fibra presenta un elevado módulo de elasticidad y son llevadas a temperaturas a 1500°C.
- Fibras del tipo de fibras rayón que se utilizan para producir fibras de bajo módulo de elasticidad.



Figura 1.3 Fibra de carbono. Tomada de: www.nauticexp.es.

Existen dos tipos de fibras de carbono: fibras con alto módulo de elasticidad (grafito) y fibras con elevada resistencia (carbono), las cuales se distinguen por el arreglo molecular de la estructura de cada fibra, es decir, si la molécula hexagonal presenta arreglos tridimensionales el material se define como grafito, si la unión entre las capas es débil y presenta arreglos bidimensionales, el material se define como carbono. Es importante mencionar que el módulo de elasticidad incrementa a medida que aumenta el tratamiento térmico que oscila a temperaturas de 1000°C a 3000°C.

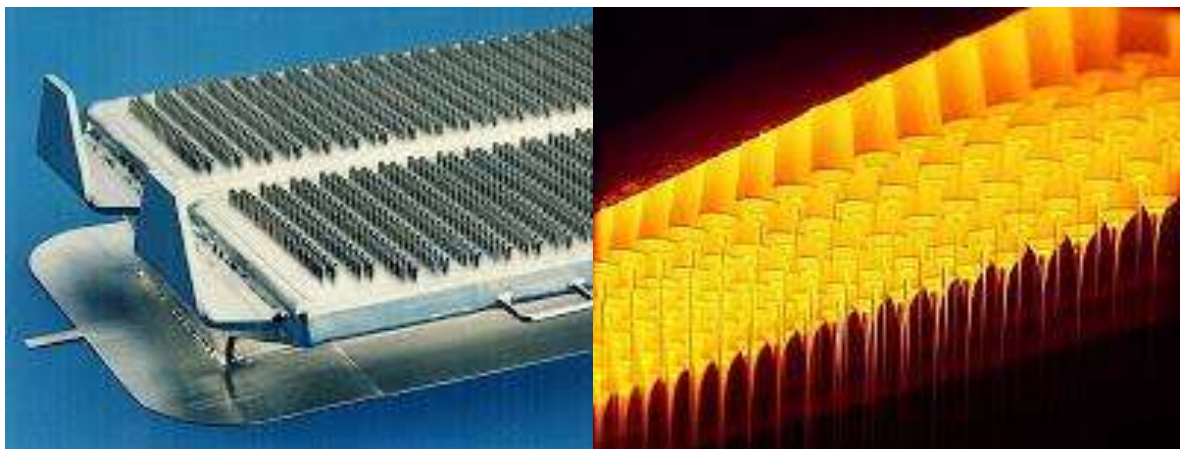
Una de las desventajas de las fibras de carbono es su costo elevado, debido al proceso de obtención de las fibras.

1.2 Proceso de obtención de las diferentes fibras de refuerzo

Para la producción de las fibras de refuerzo se sigue un proceso de fabricación que varía dependiendo del tipo de fibra que se esté elaborando; es decir, si es fibra de vidrio, aramida o carbono. A continuación se presenta una descripción de los procesos de obtención de las diferentes fibras de refuerzo.

1.2.1 Fibra de vidrio

Hoy en día las fibras de vidrio son las fibras más económicas en el mercado, esto se debe a su proceso de fabricación, el cual no requiere de un procedimiento muy complejo. Este consiste en moler y mezclar materias primas para posteriormente llevarlas a un horno donde se funden a temperaturas altas, aproximadamente 1550 °C. La temperatura de fusión depende de los elementos que conformen al vidrio. Una vez que esta fundido el vidrio, este se transporta por medio de unos canales que alimentan a un cabezal metálico que contiene boquillas. El cabezal se conoce con el nombre de bushing (Figura 1.4a), y se encarga de mantener el vidrio fundido a una temperatura aproximada a los 1250 °C para dar salida al vidrio fundido por medio de las boquillas, es decir, el vidrio fluye a través de las boquillas formando una gota que cae por gravedad integrando los filamentos como se muestra en la Figura 1.4b. El número de boquillas es de 200 a 4000 (Figura 1.4c), las cuales se diseñan con un determinado diámetro de salida para la formación de los filamentos. Los filamentos que se obtienen de las boquillas se enfrían al pasar por unas aletas de enfriamiento (Figura 1.4d), y posteriormente se cubren por una fina película (ensimaje) que sirve de unión para dar una formación de filamentos y a la vez enrollarlos en bobinas.



a) Bushing con doble plato de base

b) Salida del vidrio fundido de las boquillas



c) Boquillas

d) Aletas de enfriamiento en uso

Figura 1.4 Extracción y sistema de enfriamiento de los filamentos que forman la fibra de vidrio. Tomadas de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/12/fibra-de-vidrio.html>.

Los filamentos se manipulan por medio de la máquina que se muestra en la Figura 1.5, donde se unen, se impregnan de resina para dar formación a las fibras y orientarlas en una dirección, en dos direcciones (trenzado o tejido), y hasta en tres direcciones (tejido) o si se consideran fibras cortas. Finalmente se cortan en el tamaño requerido por el fabricante y se procesan mediante unas bandas metálicas para su empaque posterior.

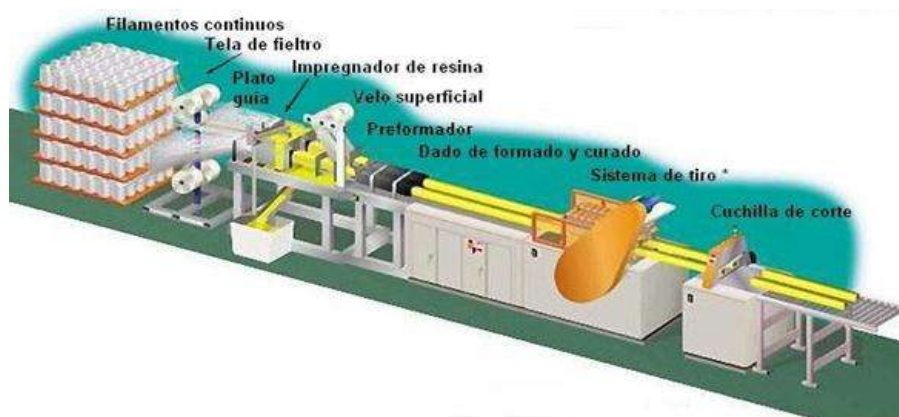


Figura 1.5 Procedimiento final de la fibra de vidrio. Tomada de: <http://vane2001.blogspot.mx>.

1.2.2 Fibra de aramida

Para la obtención de la fibra de aramida, se utiliza el proceso de extrusión e hilado (húmedo y seco). Este procedimiento se debe a que las aramiditas se descomponen antes de fundirse, lo cual no es factible y no se puede seguir con el mismo proceso que se implementa para las fibras de vidrio.

En el proceso de extrusión, consiste en utilizar ácido sulfúrico para disolver la solución del polímero a una temperatura entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, obteniendo un fluido viscoso que al ser disuelto pasa a través de unos orificios a una temperatura de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde el solvente (ácido sulfúrico) se libera en forma de vapor. Estos orificios se conocen como spinnerets o hileras, las cuales tienen como función formar los filamentos.

Cuando los filamentos salen a través de las hileras cada filamento se va solidificando, por lo que esta etapa se conoce como hilado. Existen dos métodos de hilado: hilado en húmedo e hilado en seco. El **hilado en húmedo**, consiste en llevar la materia prima ya disuelta a un baño químico, donde se encuentran los spinnerets sumergidos; posteriormente los filamentos surgen de la precipitación de la solución y se van solidificando. El **hilado en seco**, consiste en llevar la solución del polímero mediante la evaporación del solvente en una corriente de aire o gas inerte. Aquí los filamentos no entran en contacto con un líquido de precipitación, lo que elimina la necesidad de secado.



Figura 1.6 Estiramiento y orientación de la fibra. Tomada de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2012/08/fibras-polimericas.html>.

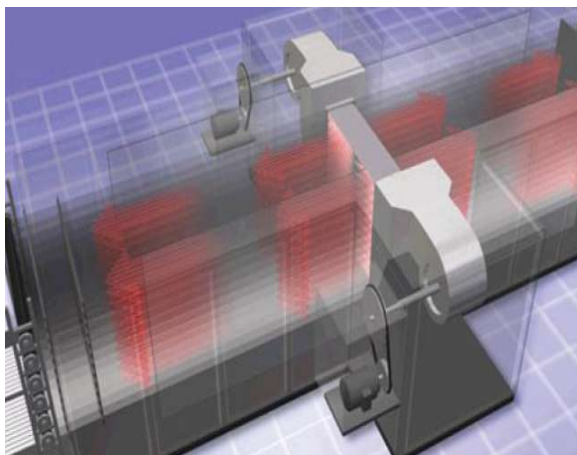
Una vez endurecidos los filamentos, se procede a estirarlos por medio de rodillos que giran a diferentes velocidades (Figura 1.6), a la vez se van uniendo y orientando hasta lograr la hoja de fibras. Estos rodillos calientan a los filamentos, originando una temperatura de transición para evitar la rotura de los mismos durante su estiramiento. Por último los filamentos se conducen a rodillos estabilizadores para evitar el acortamiento entre ellos.

1.2.3 Fibra de carbono

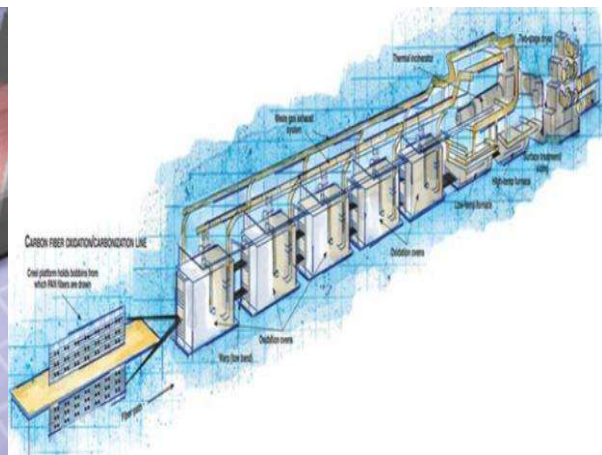
Para obtener la fibra de carbono, se inicia con una materia prima polimérica conocida como precursor. Este se encuentra en tres diferentes tipos: precursores de rayón, precursores de alquitrán y precursores de poliacrilonitrilo (PAN); el último es el más utilizado en la fabricación de fibras de carbono. El proceso de obtención depende del tipo de precursor que se emplee.

Los precursores son hilados en filamentos mediante procesos químicos y mecánicos que ayudan a aumentar las propiedades de resistencia de la fibra de carbono, esto se debe al arreglo lineal de los átomos de polímeros.

Para ejemplificar el proceso solamente hablaremos del precursor PAN, el cual se mezcla con metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato y cloruro de vinilo para la formación de la fibra. Una vez que se forman las fibras se procede a enrollarlas en bobinas, donde posteriormente se llevan a un horno de oxidación, donde se someten a temperaturas entre los 200 y 300 °C para realizar la combinación de moléculas de oxígeno con las fibras PAN, y así poder tener estabilidad dimensional y evitar que se fundan en el proceso de carbonización (Figura 1.7a). En la figura 1.7b se presenta el proceso de carbonización de las fibras que consiste en llevarlas a una serie de hornos sin oxígeno, donde van avanzando en forma progresiva. Se cubre y protege cada una de las fibras por unas cámaras al salir y entrar en los hornos para evitar el contacto con el oxígeno. Para eliminar los átomos que no sean de carbono y poder obtener la fibra final, las fibras se llevan mediante un procedimiento progresivo a temperaturas iniciales de 700 a 800 °C, y a temperaturas finales de 1200 a 1500 °C. Es importante mencionar que para obtener los dos tipos de fibras, grafito y carbono, éstas se carbonizan a diferentes temperaturas. Para las fibras de grafito se requieren temperaturas más altas, las cuales oscilan entre los 1900 y 2480 °C, mientras que para las fibras de carbono se requiere aproximadamente una temperatura de 1315 °C. Las fibras se cubren con una resina para su protección, y para brindar adherencia al momento de utilizarlas en el material compuesto. Finalmente se llevan a una máquina que le dará la forma a la fibra dependiendo del tipo de orientación que se requiera, es decir, si se requiere fibras en un solo sentido, fibras en tejido o fibras cortas sin ninguna orientación (Figura 1.8a). Las fibras de carbono se enrollan para su venta como se ilustra en Figura 1.8b. En general todas las fibras de carbono se enrollan en carretes para su entrega y venta (Figura 1.8b). Cada rollo tiene un ancho aproximado a 50 cm, con una longitud de 100 m y un espesor de lámina de fibra de 1 a 3 mm. También se entregan con un adhesivo que sirve de unión entre las fibras.



a) Horno de oxidación



b) Horno de carbonización

Figura 1.7 Horno de oxidación y carbonización. Tomadas de Águila Higuero Victoria, 2010.



a) Orientación de las fibras

b) Fibras empacadas

Figura 1.8 Maquinaria para dar la orientación adecuada y para empacar a las fibras. Imágenes tomadas de: Águila Higuero Victoria, 2010.

En la Figura 1.9 se presenta un resumen del procedimiento para la obtención de las fibras de carbono. Las etapas que comprende el proceso se describieron previamente, por lo que nos enfocaremos en el tipo de fibra de carbono, es decir, si es una fibra de carbono con un alto módulo de elasticidad o una fibra de carbono con una alta resistencia.

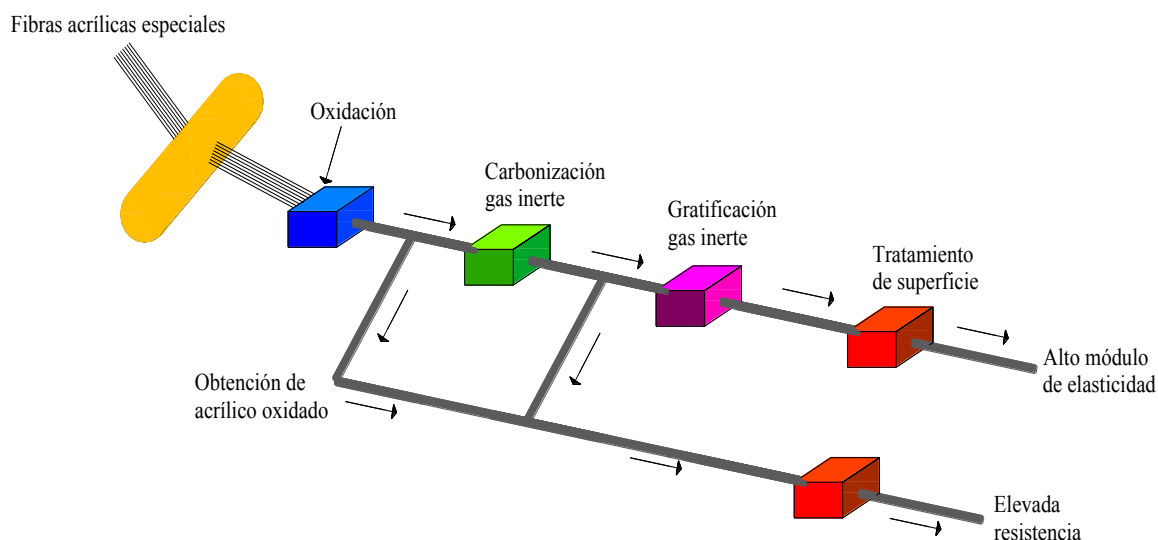


Figura 1.9 Procedimiento de las fibras de carbono.

El procedimiento consiste en llevar las fibras a diferentes etapas: oxidación, carbonización, gratificación, tratamiento superficial y la obtención de la fibra final. El proceso difiere en cada tipo de fibra; por ejemplo, si se desea obtener fibra de carbono con un alto módulo de elasticidad y menor resistencia se someten las fibras a un procedimiento más sofisticado tomando en cuenta todas las etapas de oxidación, carbonización, gratificación, tratamiento superficial y de obtención final de

la fibra. Es importante mencionar que a medida que se aumenta el tratamiento térmico (1000 a 3000 °C) en la etapa de gratificación, se aumenta el módulo de elasticidad, lo cual incrementa directamente su costo. En el caso de fibra de carbono con elevada resistencia y menor módulo de elasticidad, se mezclan fibras que salen de la etapa de oxidación con fibras que pasan por las etapas de oxidación y carbonización, las cuales se mezclan y procesan mediante un tratamiento superficial, para posteriormente llevarlas a las máquinas de orientación y empaque para su venta. Es importante mencionar que el procedimiento de obtención de fibra de carbono no cambia dependiendo del tipo de precursor que se utilice, ya que se sigue el mismo mecanismo y sólo se verifica que tipo de fibras se requieren para someterlas a las etapas correspondientes. Se hace hincapié en que sólo cambia el tipo de procedimiento químico que se requiere para obtener la fibra y llevarlas a las diferentes etapas (oxidación, carbonización, gratificación, tratamiento superficial y de obtención final de la fibra), ya que se trata de diferentes fibras precursoras (Rayón, Alquitrán y derivados del petróleo). Las fibras de carbono derivadas de las fibras precursoras del Alquitrán y Rayón se utilizan para obtener fibras con módulo de elasticidad elevado; mientras que las fibras con PAN y precursores del Alquitrán generan fibras con bajo módulo de elasticidad.

1.3 Clasificación y orientación de las fibras de refuerzo

Las fibras de refuerzo se clasifican como función de cómo se encuentran las fibras, es decir si estas son largas, cortas, continuas o discontinuas. Las fibras largas y continuas, se usan en fibras orientadas en uno o en varios sentidos. Las fibras cortas y discontinuas se utilizan en fibras donde no existe una orientación de las mismas, proporcionando una distribución uniforme y aleatoria en el material compuesto: acrílico.

La orientación de las fibras de refuerzo influye en el desempeño del material, por lo que se debe tomar en cuenta y definir claramente la orientación que se requiere para obtener un mejor comportamiento de los elementos donde se va a incorporar los materiales compuestos para reforzar o rehabilitar. La orientación que se da a las fibras generalmente corresponde a:

- ✓ Orientación a 0°
- ✓ Orientación a 90°
- ✓ Orientación a +45°
- ✓ Orientación a -45°
- ✓ De forma aleatoria

Las fibras de refuerzo se presentan en forma de hojas, las cuales se integran de varias capas hasta lograr el espesor deseado. En la Figura 1.10a se pueden observar las distintas orientaciones de las fibras que integran los laminados. 1) Se observa que todas las capas del laminado tienen las fibras orientadas en un sólo sentido con un ángulo de inclinación de 0°, es decir, fibras orientadas

en forma unidireccional, las cuales tienen un comportamiento anisotrópico, ya que depende de la orientación de las fibras, es decir, las fibras unidireccionales tienen un buen comportamiento a tensión y son muy frágiles perpendicular a ellas. 2) El laminado se compone de dos capas orientadas a 0° y dos capas orientadas a 90° , fibras bidireccionales, en este tipo de laminado el comportamiento es ortotrópico, ya que su comportamiento depende de la orientación de las fibras, es decir, resiste tensión en ambas direcciones. 3) El laminado tiene 4 capas, las cuales están orientadas a 0° , 45° , -45° y 90° , obteniéndose así un comportamiento casi isotrópico por el arreglo en las diferentes orientaciones de las fibras (fibras tridimensionales). 4) Las capas del laminado se integran de fibras cortadas y su orientación es indistinta, las cuales están distribuidas de forma aleatoria obteniéndose un comportamiento casi isotrópico. Es importante mencionar, que la mayoría de los casos de puentes se usan fibras unidireccionales para reforzar solo a flexión en vigas de acero.

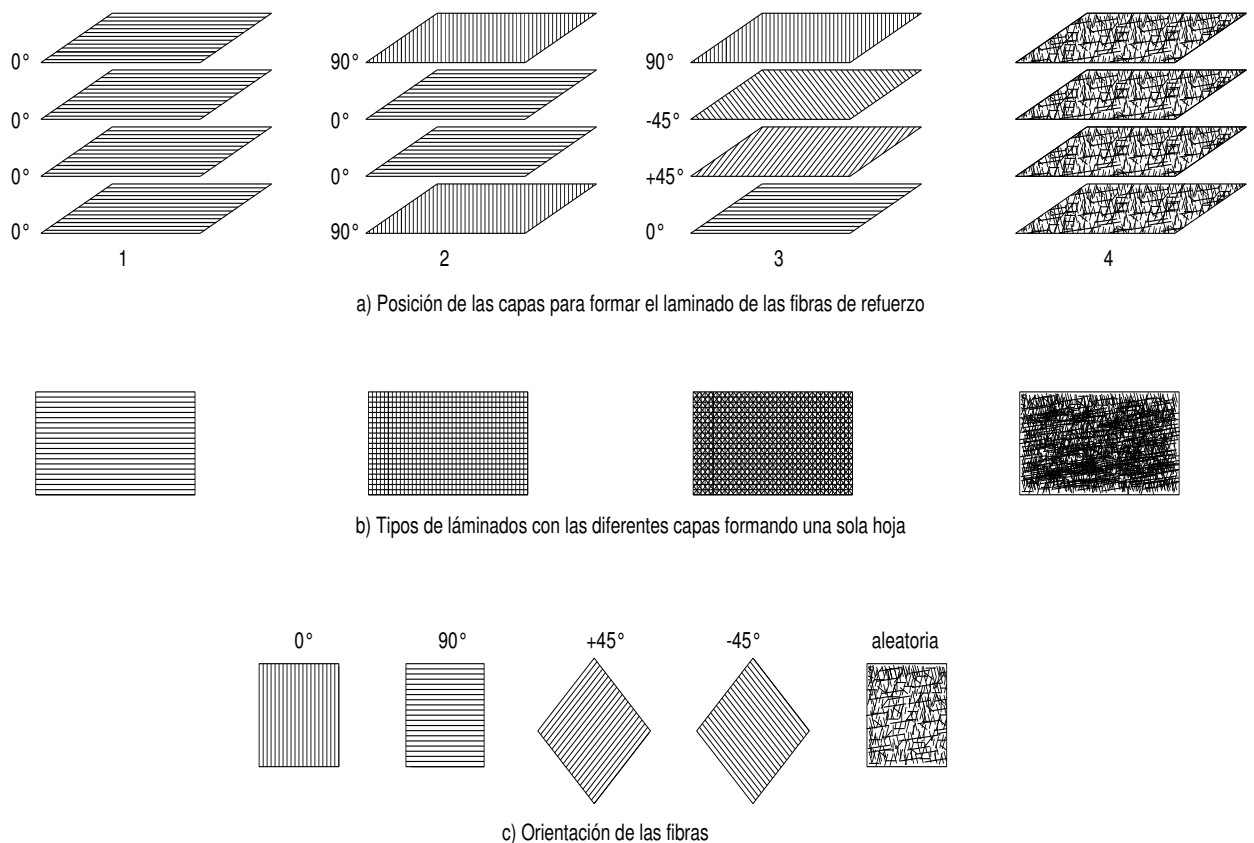


Figura 1.10 Orientación y tipo de laminado de las fibras de refuerzo. Donde: 1) fibras unidireccionales, 2) fibras bidireccionales, 3) fibras multidireccionales y 4) fibras con una orientación aleatoria.

También se debe tomar en cuenta la posición de las fibras que forman el laminado, por que será más frágil su comportamiento a tensión si las fibras se encuentran en diferentes direcciones. Es por esta razón que se utiliza laminados en una dirección para obtener una mayor resistencia a

tensión y poder rehabilitar de manera eficiente vigas de concreto y acero, columnas de concreto, muros de mampostería y concreto, entre otros elementos estructurales. En la Figura 1.10b se muestra como quedaría el laminado al unir las diferentes capas que lo conforman, y en la Figura 1.10c se muestra la orientación de cada una de las capas que conforman el laminado. Además como ya se mencionó las fibras de carbono tienen un buen comportamiento a tensión si éstas se encuentran en un solo sentido, sin embargo no presentan un buen comportamiento a cortante; es decir, las fibras son muy frágiles en esa dirección, por lo que no presentan una resistencia importante y de inmediato se produce su falla a cortante. Por lo que se debe tener en consideración en qué dirección se requiere el laminado para que ofrezca el mejor comportamiento deseado.

1.4 Características de las fibras de refuerzo

En general, las fibras de refuerzo (vidrio, aramida y carbono) aportan resistencia, rigidez y dureza al material compuesto. Los materiales compuestos tienen un alto módulo de elasticidad comparado con el acero, y son muy resistentes al estar sometidos a altas temperaturas y cambios bruscos de temperaturas. Las características generales que poseen las fibras de refuerzo son:

- ✓ Alta resistencia a tensión
- ✓ Resistencia a la corrosión
- ✓ Resistencia a la fatiga
- ✓ Resistencia a temperaturas altas
- ✓ Mayor rigidez
- ✓ Alta durabilidad
- ✓ Fácil instalación y reparación
- ✓ Fáciles de manipular
- ✓ Ligeras
- ✓ Se adaptan perfectamente a las superficies

De lo anterior podemos concluir que materiales compuestos presentan características muy apropiadas para adaptarse tanto a elementos estructurales de acero como de concreto, mejorando el comportamiento estructural de los elementos reforzados o rehabilitados con este tipo de materiales.

1.5 Tipos de matrices

Existen tres tipos de matrices denominadas poliméricas, metálicas y cerámicas. Para la selección de la matriz se debe establecer su uso y aplicación. Aquí sólo nos referiremos a las matrices poliméricas, ya que son las que se implementan con los polímeros reforzados con fibras (FRP), y se clasifican en termoestables y termoplásticas.

Es importante señalar que la matriz polimérica debe tener un alargamiento de ruptura mucho mayor al alargamiento de ruptura de la fibra de carbono, esto con el fin de garantizar que la matriz y la fibra presenten respectivamente, comportamientos dúctil y frágil. Así se asegura que el compuesto no falle frágilmente por la matriz logrando que el material siga fluyendo a pesar de que la fibra haya alcanzado su límite de resistencia a tensión. Es decir, que el comportamiento del material compuesto no sea afectado por el comportamiento de la matriz y falle por esta causa, permitiendo que trabajen en conjunto las fibras de carbono y alcanzar el comportamiento dúctil deseado en el material compuesto; lo que se busca es asegurar una mayor resistencia a tensión, a flexión, a cortante, al impacto y a compresión del elemento estructural al adherirle materiales compuestos.

Las resinas termoestables son fáciles de procesar y de bajo costo, presentan una baja viscosidad y un bajo coeficiente de expansión térmica. Existen diferentes tipos de resinas termoestables, entre las que podemos encontrar: epoxi, poliéster y vinil-éster. En la Tabla 1.1 se presentan las propiedades de las matrices termoestables, y en la Tabla 1.2 se muestran algunas propiedades de las resinas termoplásticas. Las resinas termoplásticas, son difíciles de procesar, debido a que durante su producción requieren altas temperaturas. Las matrices termoplásticas se clasifican en:

- Poliéster (PEEK): es la más común de todas, tiene un alto rendimiento y alta resistencia al daño.
- Polifenileno sulfuro (PPS): tiene una buena resistencia química.
- Polisulfona (PSUL): tiene un alto alargamiento a la rotura, estabilidad a altas temperaturas y en condiciones de humedad.

Tabla 1.1 Propiedades típicas de las matrices termoestables			
Propiedad	Matriz		
	Poliéster	Epoxi	Éster-vinil
Densidad	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Resistencia a tensión (MPa)	34.5-104	55-130	73-81
Módulo de elasticidad (GPa)	2.1-3.4	2.75-4.10	3-3.5
Coeficiente de Poisson	0.35-0.39	0.38-0.4	0.36-0.39
Coeficiente de expansión térmica (10/°C)	55-100	45-65	50-75
Contenido de humedad (%)	0.15-0.6	0.08-0.15	0.14-0.30

Tabla 1.2 Propiedades típicas de las matrices termoplásticas			
Propiedad	Matriz		
	PEEK	PPS	PSUL
Densidad	1320	1360	1240
Resistencia a tensión (MPa)	100	82.7	70.3
Módulo de elasticidad (GPa)	3.24	3.3	2.48
Deformación unitaria (%)	50	5	75
Coefficiente de Poisson	0.4	0.37	0.37
Coefficiente de expansión térmica (10-6/°C)	47	49	56

1.6 Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de las fibras de refuerzo

En la actualidad las fibras de refuerzo son materiales compuestos denominados polímeros reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés) implementados para rehabilitar o reforzar estructuras de diferentes materiales (mampostería, madera, concreto y acero). Estos materiales poseen propiedades mecánicas que mejoran el comportamiento estructural de los elementos que se desea reforzar o rehabilitar, lo que ha dado lugar a una nueva técnica del proceso constructivo.

Tabla 1.3 Propiedades Físicas y Químicas de las Fibras de Refuerzo						
Tipo de fibra	Densidad (kg/m3)	Resistencia a Tensión (Mpa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Deformación última de tensión (%)	Coefficiente de Expansión Térmica (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson
Vidrio-E	2500	3450	72.4	2.4	5	0.22
Vidrio-S	2500	4580	85.5	3.3	2.9	0.22
Vidrio resistente a los álcalis	2270	1800-3500	70-76	2.0-3.0	-	-
Carbono (módulo alto)	1950	2500-4000	350-650	0.5	-1.2...-0.1	0.2
Carbono (resistencia alta)	1750	3500	240	1.1	-0.6...-0.2	0.2
Aramida (Kevlar 29)	1440	2760	62	4.4	-2 longitudinal 59 radial	0.35
Aramida (Kevlar 49)	1440	3620	124	2.2	-2 longitudinal 59 radial	0.35
Aramida (kevlar 149)	1440	3450	175	1.4	-2 longitudinal 59 radial	0.35
Aramida (Technora H)	1390	3000	70	4.4	-2 longitudinal 59 radial	-
Aramida (SVM)	1430	3800-4200	130	3.5	-	-

La Tabla 1.3 presenta las propiedades físicas y mecánicas de los FRP para los diferentes tipos de fibras y su clasificación. Se observa (Figura 1.11) que las fibras de carbono tienen un módulo de elasticidad alto comparado con las demás fibras. Las fibras de vidrio y carbono son las que poseen

mayor resistencia. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las fibras de vidrio son muy sensibles a la presencia de pequeños defectos, mientras que las fibras de aramida no pueden estar sometidas a altas temperaturas como las fibras de carbono. Es importante mencionar que las fibras de aramida tienen alta resistencia a tensión y al impacto, pero presentan algunas desventajas, como lo es la habilidad de absorber humedad, provocando una pérdida de resistencia en sus propiedades mecánicas, además tiene una baja resistencia a compresión y a flexión. Las fibras de vidrio tienen alta resistencia a tensión y a la fatiga. Sin embargo presentan la desventaja de tener un deterioro del material con el paso del tiempo, produciendo una disminución en las propiedades mecánicas.

Las fibras de carbono son un material de refuerzo completo, ya que tienen una alta resistencia a tensión, alto módulo de elasticidad, son resistentes a la fatiga, entre otras propiedades, pero tienen el inconveniente de ser uno de los materiales de refuerzos más caros a causa de su proceso de obtención, comparados con las fibras de vidrio y aramida. Además, las fibras de refuerzo no tienen un comportamiento plástico, por el contrario presentan un comportamiento elástico-lineal hasta alcanzar la falla, como se puede observar en la Figura 1.11.

Resistencia a tensión VS Deformación última

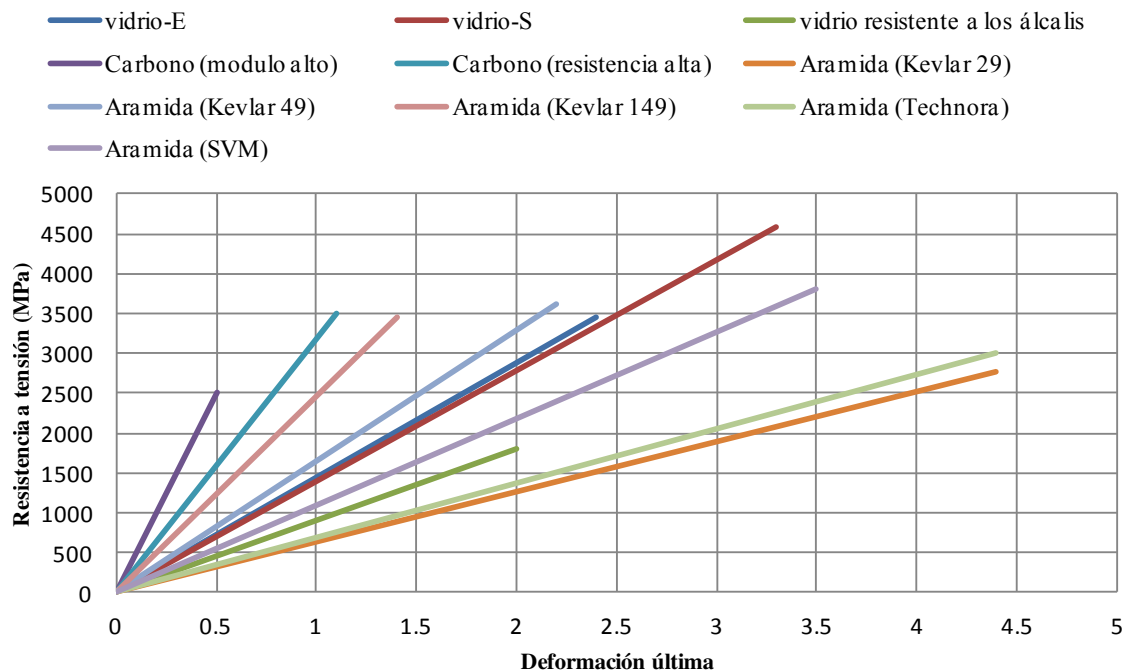


Figura 1.11 Comparación de las fibras refuerzo.

Todas las fibras alcanzan resistencias a tensión por arriba de los 18000 kg/cm², mientras que el acero alcanza una resistencia de tensión de 4200 kg/cm², su resistencia es alta con respecto del acero (Figura 1.12). A compresión las fibras no tienen un comportamiento muy favorable, ya que su resistencia a compresión es muy baja con respecto a la que ofrecen materiales como el concreto y la

mampostería. Además los materiales compuestos no tienen resistencia a cortante, ya que en esa dirección el compuesto es muy frágil, produciéndose una falla frágil.

Las propiedades térmicas de las fibras de refuerzo dependen de su composición química (estructuración molecular de las fibras), y de la materia que están constituidas, ya que no pueden estar sometidas a una misma temperatura todas por igual y pueden provocar la desintegración de las mismas. Por lo tanto, las fibras de aramida empiezan a tener problemas al estar sujetas a temperaturas de 200 °C, las fibras de vidrio pueden estar sometidas a temperaturas que varíen de 300 a

500 °C, mientras que las fibras de carbono pueden resistir temperaturas de 800 a 1000 °C. De lo anterior podemos decir que las fibras pueden estar sometidas a altas temperaturas, pero una vez que se incluye el adhesivo ante elevadas temperaturas éstas pueden presentar complicaciones, ya que los adhesivos son polímeros, y por lo tanto tenderán a derretirse, perdiendo su resistencia y provocando la desintegración de las fibras hasta alcanzar su falla. Por sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas, las fibras de carbono son las que brindan un refuerzo más apropiado en las estructuras de acero.

Además de tener una resistencia a tensión muy superior a la del acero como se puede observar en la figura 1.12. Esto origina que las estructuras de acero por reforzar aumenten su resistencia a flexión, a tensión, a cortante, a compresión y a torsión.

Por lo antes mencionado, solamente nos enfocaremos en el estudio de las fibras de carbono utilizadas como refuerzo en estructuras de puentes de acero.

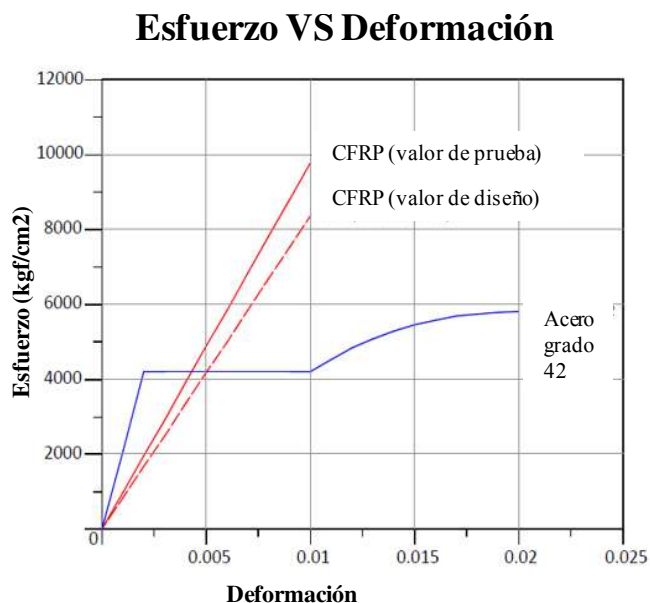


Figura 1.12 Gráfica de Esfuerzo-Deformación de CFRP y del acero grado 42. Tomada de: Castillo Manzano Carlos Alejandro, 2007.

2

C A P Í T U L O

Usos y aplicaciones de CFRP en puentes con vigas de acero

En este capítulo se hace mención de algunos puentes en México, donde se puede aplicar el refuerzo con fibra de carbono. Además, se describe el uso y aplicaciones de las fibras de refuerzo de carbono en vigas de acero y compuestas, acero-concreto, donde se presentan diferentes tipos de rehabilitaciones o refuerzos con CFRP. Se hace mención de las ventajas o desventajas que se encontraron en cada uno de los casos presentados. También se hace referencia a los diferentes tipos de fibras de carbono utilizadas, al igual que de los tipos de matrices utilizadas. Se reportan los espesores tanto de las fibras de carbono como del adhesivo que conforman la rehabilitación. Con esto se trata de presentar un panorama de la influencia que tienen los espesores en la resistencia a flexión, así como en la pérdida de adherencia entre la superficie de acero-adhesivo-fibras.

2.1 Antecedentes

En países como Inglaterra y Estados Unidos se tienen estructuras metálicas de gran importancia histórica, las cuales no son fáciles de reparar para asegurar el patrimonio histórico de estas naciones. Las estructuras metálicas se construyeron de hierro fundido, hierro forjado o acero, su deterioro condujo a buscar nuevas alternativas de rehabilitación y/o refuerzo. Las técnicas tradicionales (soldando, atornillando o mediante una unión adhesiva) no ofrecían grandes ventajas en su reparación, más sin embargo sí aumentaban el peso de la estructura, con lo que se exponían a sufrir aún más daño; además de que se requería de un largo tiempo de ejecución, y en algunas ocasiones era imposible su rehabilitación con las técnicas tradicionales. Las nuevas técnicas se basan en la implementación de materiales compuestos, particularmente, los denominados polímeros de refuerzo con fibra de carbono (CFRP) implementados para mejorar principalmente la resistencia

a flexión y a cortante de las superestructuras de puentes metálicos, en especial las vigas metálicas. Algunos casos de puentes metálicos, como el puente Tickford (hierro fundido), Newport Pagnell, Reino Unido; puente Acto (acero), al oeste de Londres; puente Bid, Kent, Reino Unido; entre otros, fueron reforzados utilizando placas o láminas de CFRP para incrementar la resistencia a flexión de las vigas.

En México la mayoría de los puentes carreteros son construidos de concreto reforzado y presforzado, son pocos los casos de estructuras de puentes construidos con acero. A continuación se darán algunos ejemplos, en los cuales se necesita brindar mantenimiento o refuerzo:

Puente Infiernillo: Este puente cruza el río balsas y se ubicado en el kilómetro 133.9, en la comunidad de Huiduri, municipio de Arteaga, Michoacán. Tiene una longitud total de 525 m, y está formado por 5 armaduras metálicas en forma de arco (Figura 2.1), una losa de concreto reforzado apoyada sobre pilas de concreto reforzado. El proceso constructivo de esta obra inició en Mayo de 2000 y se concluyó en Mayo de 2003.



Figura 2.1 Puente Infiernillo. Tomada de: http://noticias.tradeco.com/wp-content/gallery/puente-infiernillo_1/Infiernillo-II-2.jpg.

Puente Matute Ramus: Se construyó en el año de 2011 y se ubica en el estado de Jalisco, sobre la calzada Lázaro Cárdenas, cruzando las avenidas López Mateos y Guadalupe. El puente consta de una losa de concreto reforzado apoyada sobre vigas de acero, las cuales a su vez están soportadas por los cables atirantados (Figura 2.2). El puente se compone de tres partes denominadas oriente, poniente y central. La parte oriente cubre un claro de 122 m de longitud, 26 m de ancho y una altura de 7.10 m. La parte poniente con un claro de 119 m de longitud, mientras que la longitud del claro central es de 165 m que está soportado por tirantes galvanizados.



Figura 2.2 Puente Matute Ramus. Tomada de: <http://www.obrasweb.mx/media/2011/08/09/puente-matute-remus-seis-no-publicar.jpg>.

Puente Albatros: Localizado en el Puerto de Lázaro Cárdenas, Michoacán. Se construyó con la finalidad de unir el recinto portuario y comunicar a dos islas (Enmedio y Cayacal), las cuales están separadas por el río Balsas. Este puente carretero y naval, tiene una longitud total de 2.5 Km,

un ancho de 16 m, y 4 carriles de doble circulación. Los extremos del puente son de concreto reforzado, mientras que la parte central es de acero (Figura 2.3) y cuenta con un sistema de apertura de 60 m de ancho. Su construcción inició en Diciembre de 2005 y finalizó en Abril de 2010.

Puente Barranca Honda: Se ubica en el municipio de Córdoba, Veracruz. El puente está formado por dos vigas principales IR de acero de 2.5 m de peralte interior y con un ancho de patín de 0.9 m (Figura 2.4), las cuales se encuentran unidas por travesaños interiores y exteriores de acero, y están apoyadas sobre tres pilas de concreto reforzado con altura de 11 m. También tienen puntales de acero para proporcionar rigidez lateral a la estructura. El puente tiene una longitud total de 204 m que está formado de cuatro claros de 51 m, con un ancho de calzada de 11 m que permite la circulación de 4 carriles.

Puente Alvarado: Se ubica sobre el río Papaloapan (Figura 2.5), Veracruz, y está integrado por tres claros, dos de ellos (extremos del puente) contruidos de concreto reforzado y el tercero (parte central) contruido con una armadura de acero. Toda la superestructura se poyada sobre pilas de concreto reforzado.

Además, existen otros tipos de puentes, como son los puentes atirantados cuya superestructura es a base de acero y concreto reforzado. Este tipo de estructuras no son completamente de acero, sin embargo pertenecen a un grupo de futuras estructuras cuya rehabilitación puede conducirse mediante



Figura 2.3 Puente Albatros. Tomada de: <http://www.altonivel.com.mx/23548-4-grandes-proyectos-de-infraestructura-del-sexenio.html>.



Figura 2.4 Puente Barranca Honda. Tomada del IMT(Publicación Técnica No. 387)

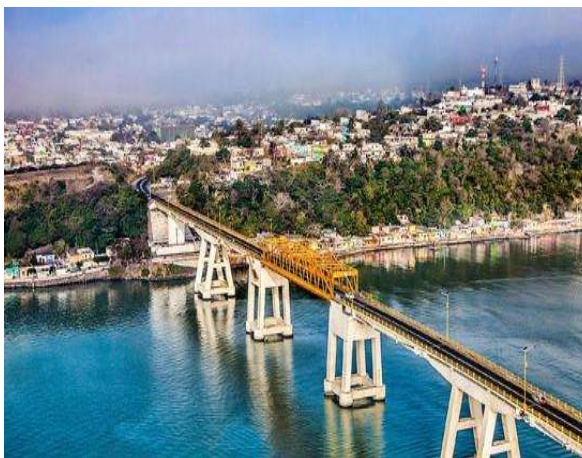
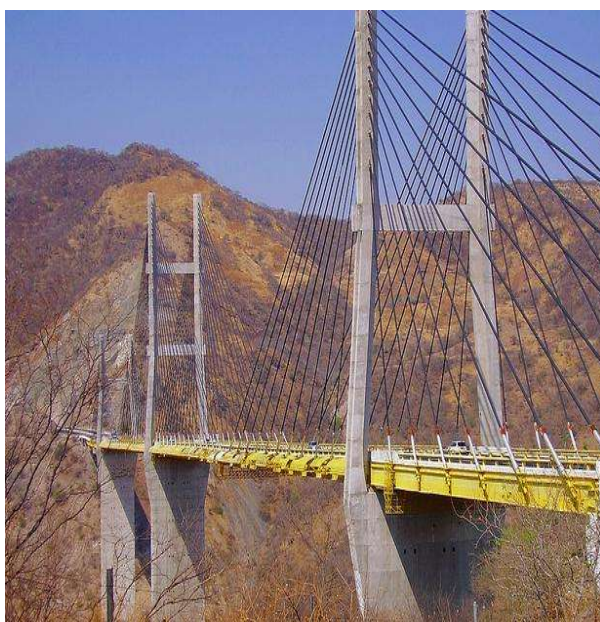


Figura 2.5 Puente Alvarado. Tomada de: <http://alvarado.gob.mx/turismo/cruces-de-mayo/>

el uso de CFRP. Un caso en especial, es el *Puente Mezcala* (Figura 2.6a), ubicado en el estado de Guerrero. La superestructura se forma con traveses metálicos longitudinales de sección transversal I que soportan una losa de concreto reforzado. El tablero suspendido por cables sujetos a las torres H que se apoyan directamente sobre las pilas. Otro caso corresponde al *Puente Barranca el Cañón* (Figura 2.6b), ubicado en el estado de Guerrero. El puente tiene una longitud total de 260.8 m, y está formado por tres claros laterales de 49.4, 24 y 21.4 m de longitud, y de un claro principal de 166 m. La superestructura se integra por traveses de placas de acero soldadas y una losa de concreto reforzado. El tablero del puente se apoya sobre pilas y está soportado por torres H atirantadas de concreto reforzado.



a) Puente Mezcala



b) Puente Barranca del Cañón

Figura 2.6 Puentes atirantados. Tomadas de: <http://www.gmd.com.mx/barranca-el-canon.html> y <https://www.flickr.com/photos/vazquez100/4564137127/in/set-72157623838680691>

Algunos puentes corresponden a construcciones nuevas que aún no requieren rehabilitación o refuerzo, pero con el paso del tiempo pueden sufrir daño por el aumento de cargas vivas o por las condiciones ambientales (lluvia ácida, altas o bajas temperaturas) y naturales (sismo y viento). Éstos están susceptibles de presentar algún estado daño a lo largo de su vida útil, requieren de mantenimiento inmediato, ya que en su mayoría presentan problemas de corrosión, por lo que es necesario brindarles rehabilitación o refuerzo para evitar problemas futuros. Éste tipo de acciones preventivas pueden brindarse mediante la implementación de materiales compuestos, polímeros reforzados con fibra de carbono, que brindan mejores propiedades mecánicas, físicas y térmicas en comparación a las proporcionadas con técnicas de rehabilitación mediante elementos de acero.

2.2 Aspectos generales para la implementación del refuerzo CFRP

El desarrollo e implementación de CFRP para la rehabilitación y/o refuerzo de estructuras, en especial puentes de acero iniciaron en EU, Canadá y Japón, entre otros países. Donde se han conducido tanto estudios experimentales como analíticos con el objetivo de encontrar posibles aplicaciones para solucionar los problemas que se presentan en la práctica profesional. Es importante mencionar que para la implementación de esta nueva técnica de rehabilitación, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Durabilidad
- Compatibilidad
- Transferencia de carga
- Fatiga

Generalmente la rehabilitación de puentes de acero se implementa para incrementar la resistencia a flexión y cortante, especialmente en vigas. El proceso consiste en adherir láminas o placas de CFRP con una resina al patín y/o alma de la sección transversal. Es necesario mencionar que el tipo las características del adhesivo juegan un papel importante tanto para el buen funcionamiento del sistema restaurado, como para la durabilidad de unión de los miembros, superficie acero-adhesivo-lámina de CFRP. Además, en el proceso de selección del tipo de adhesivo empleado se deben considerar los siguientes factores:

- Condiciones del medio ambiente como temperaturas extremas.
- Salinidad del agua.
- Agentes ácidos.
- Tipo de estructura, es decir si es de acero o concreto.
- Tipo de rehabilitación en los miembros de acero.

- Tiempo y temperatura de curado.

Estudios previos de estructuras de acero [13] han demostrado que las láminas de CFRP no eliminan las grietas, pero si reducen la velocidad de crecimiento de las mismas; así como el espesor del sistema de refuerzo no es función directa de su resistencia, ya que láminas de CFRP con gran espesor suelen presentar una falla frágil por falta de adherencia.

2.3 Aplicación del refuerzo CFRP en la superficie de acero

El procedimiento de aplicación de las fibras de refuerzo en estructuras de consiste en quitar imperfecciones mediante un disco, limpiar la superficie donde se va instalar el CFRP con acetona para desengrasar (Figura 2.7 a y b), cortar las tiras de fibras de refuerzo al tamaño requerido y colocar un adhesivo (Figura 2.7 c y d), el cual se aplica hasta lograr su impregnación total (primer) y no haya problemas para colocar la primera capa, así posteriormente se colocan las capas adicionales necesarias, las cuales se unen mediante una resina epóxica con la ayuda de un rodillo. Una vez colocadas las capas, se procede a sellarlas con el mismo adhesivo mediante la ayuda de una espátula, dejando una capa muy adherible a la superficie.

El adhesivo juega un papel muy importante, ya que es difícil asegurar una unión perfecta entre superficie-adhesivo-fibras, siendo importante la selección del tipo de adhesivo, espesor del adhesivo, para poder lograr que el adhesivo no sea la causa de la presencia de una falla frágil. Es importante mencionar que antes de que se proceda a colocar las placas o láminas de CFRP, se procede a colocar una capa de fibra de vidrio como aislante, para evitar el contacto entre el acero y los CFRP, evitando una reacción química que podría causar el inicio de corrosión en los elementos reforzados.



a) Preparación de la viga de acero y la placas CFRP



b) Colocación del adhesivo en la superficie de acero y en las placas CFRP

Figura 2.7 Aplicación de placas CFRP en vigas de acero. Tomada de: Hollaway L.C. y Cadei J., 2002

En placas de CFRP se utilizan pinzas para sujetar las placas de refuerzo y proporcionar que no se desprendan fácilmente. Como ya se mencionó, en puentes de acero la rehabilitación o refuerzo se realiza en vigas, para proporcionar un mejor comportamiento a flexión y a cortante.

2.4 Casos prácticos de vigas de acero y compuestas rehabilitadas con CFRP

La mayoría de los casos que han sido reforzados con CFRP son de concreto, y los trabajos de refuerzo corresponden a traveses y columnas. En el caso de las traveses reforzadas con CFRP se ha logrado incrementar la resistencia a flexión y cortante [5, 13]. Para proporcionar a las vigas refuerzo a flexión se colocan las fibras en la parte inferior de los patines de las traveses, asegurando una correcta instalación que permita una mayor resistencia a flexión. Para proveer de refuerzo a cortante, se colocan las CFRP en el alma de las traveses con un ángulo de inclinación de 45°. En el caso de estructuras de acero, el refuerzo se realiza en vigas para proporcionar resistencia a flexión, muros o paneles para incrementar su resistencia a cortante, placas de acero para incrementar su resistencia a tensión, entre otras. Estos elementos se encuentran principalmente en puentes de acero o puentes compuestos, acero-concreto, que están expuestos a un mal o nulo mantenimiento, así como al incremento de cargas vehiculares y de fenómenos naturales (viento, lluvias y sismos), los cuales van cambiando como función de la actualización de las cargas de diseño que rigen las normas a causa de los avances que se tienen en el entendimiento de su comportamiento. Teniéndose así la constante necesidad de brindar rehabilitación y/o refuerzo a las estructuras tipo puentes para prevenir su deterioro o su colapso. Lo anterior está directamente relacionado con el costo y el tiempo adicional para la ejecución de los procesos de reparación. Una de las innovaciones con que se cuenta en la industria de la construcción, es la utilización de materiales compuestos, polímeros

reforzados con fibras (FRP). Se recomienda usar fibras de refuerzo porque tienen una buena resistencia a tensión, a corrosión, a altas temperaturas y a la fatiga; además de que presentan alta durabilidad, son de peso ligero, fáciles de instalar y se adhieren fácilmente a las superficies.

En México la rehabilitación o refuerzo de puentes de acero con polímeros de fibras de refuerzo no es común, pero en países como Estados Unidos, Canadá y Japón se tiene un gran número de casos rehabilitados con CFRP, donde además cuentan con códigos de diseño específicos para la implementación de los materiales compuestos. Algunos casos de estos puentes reforzados, Tickford, Bid, canal Slattocks, entre otros [13], se han considerado para ejemplificar el uso de CFRP y tienen las siguientes propiedades de refuerzo CFRP (Tabla 2.1):

Tabla 2.1 Propiedades típicas de las fibras usadas en la placa de unión			
Propiedades	Fibra de carbono ultra-alto-módulo	Fibra de carbono alta-resistencia	Fibra de carbono alto-módulo
Peso específico	2.12	1.8	1.8
Módulo de elasticidad (MPa)	620-935	230	390
Resistencia a tensión (Mpa)	3600-3700	3400	2900
Deformación a la falla (%)	0.6	1.48	0.74
Coefficiente de expansión térmica (10-6/°C)	-	-1+0.4	-1+0.4

Puente Tickford, Newport Pagnell, Reino Unido [13]: Es un puente de hierro fundido (Figura 2.8), que se reforzó con láminas de CFRP adheridas al patín inferior de las vigas para incrementar su resistencia a flexión. La unión de ambos materiales se logró con un adhesivo tipo epoxi. La temperatura de curado del compuesto alcanzó entre los 50 y 60°C. Para evitar alguna posibilidad de corrosión galvánica, durante el proceso constructivo se insertaron unas capas de filamentos continuos de poliéster antes de colocar las láminas de CFRP. El refuerzo, consistió de fibras bidireccionales, carbono de alto módulo, que tiene la ventaja de ser empleado en superficies curvas; éste tiene un total de 120 m² de láminas pre-impregnadas, con 14 capas y un espesor máximo de 10 mm. El trabajo se completó en 10 semanas.

Puente ferroviario de la calle King, Mold, Reino Unido [13]: Es una estructura con base de arcos de mampostería (Figura 2.9) que se apoyan sobre 6 vigas de hierro forjado colocadas con un ángulo de esviajamiento de



Figura 2.8 Puente Tickford. Tomada de: Hollaway L.C. and Cadei J., 2002.

28°, las cuales se apoyan sobre estribos de mampostería. La sección transversal de las vigas interiores y exteriores es diferente. El puente tiene un claro total de 8.93 m con arcos que salvan una longitud de claro de 1.99 m, aproximadamente. Las trabes de acero se encuentran restringidas lateralmente por tirantes. Para la rehabilitación se emplearon dos tipos de fibra, carbono y vidrio, formando una placa de refuerzo. La fibra de carbono (unidireccionales, ultra-alto-módulo) se seleccionó por su alta rigidez, mientras que las fibras de vidrio se utilizaron para proveer resistencia lateral y para prevenir la acción galvánica. Las fibras tienen un módulo de elasticidad de 360 GPa y una resistencia a tensión de 1.1 GPa. El espesor de cada placa de refuerzo fue de 2-10 mm, con dimensiones de 170 x 33 mm para las 4 vigas interiores que se adhirieron con una resina tipo epoxi, con 2.5 m de longitud para cada placa de refuerzo. Se colocaron unas prensas para aplicar una pequeña fuerza y evitar el desprendimiento de la placa de CFRP durante el curado del adhesivo.



Figura 2.9 Puente ferroviario de la calle King, Mold, Reino Unido. Tomada de: Hollaway L.C. and Cadei J., 2002.



Figura 2.10 Puente Bid, Kent, Reino Unido. Figura tomada de: Hollaway L.C. and Cadei J., 2002.

Puente Bid, Kent, Reino Unido [13]:

El puente consiste de arcos de mampostería (Figura 2.10) apoyados sobre vigas de hierro fundido y reforzadas con placas CFRP de ultra-alto módulo de elasticidad. Doce placas de CFRP de 6 m de longitud y 0.5 mm de espesor se adhirieron a 7 de 9 vigas de hierro fundido para proporcionar un incremento en la resistencia a flexión.

Refuerzo de un puente canal

Slattocks, Rochdale, Reino Unido [13]: Es un puente histórico (Figura 2.11), con vigas de



Figura 2.11 Puente canal Slattocks, Rochdale, Reino Unido. Tomada de: <http://www.ebay.es/itm/Print-Nettlefold-Grundy-Water-1935-Eltham-Bridge-Kent-Henry-Gastineau-/351114527737>.

acero longitudinales y un tablero de concreto reforzado. Para su refuerzo se utilizaron placas de CFRP de 8 mm de espesor y 100 mm de ancho, colocadas en el patín inferior de la viga para mejorar su capacidad de resistencia a flexión.

Puente camino Bow, al Este de Londres, Reino Unido [13]: El puente está estructurado por medio de arcos de mampostería y placas de acero apoyadas sobre vigas de hierro fundido (Figura 2.12). Para el refuerzo se seleccionaron placas de CFRP de ultra-alto-módulo de elasticidad pegadas por medio de un adhesivo, curado a una temperatura ambiente arriba de 5°C; éstas cuentan con una sección transversal de 170 mm de ancho y 20 mm de espesor; además se pegaron en una longitud de 5 m, con el objetivo de brindar refuerzo a flexión.

Puente en el Condado de Guthrie, Iowa, en la carretera estatal 141 [5]: El puente se conforma por dos claros extremos de 64 ft de longitud y un claro central de 82 ft de longitud, con una superficie de rodamiento que descansa en 4 vigas de acero. El refuerzo del puente consiste de barras de 3/8 in de CFRP post-tensadas (P-T) que tienen una resistencia a tensión de 300 Ksi, un módulo de tensión de 20000 Ksi, una elongación última de 1.5% y, por lo tanto, van atornilladas al alma de la viga. Cuatro de las barras (Figura 2.13) se instalaron en las vigas exteriores de cada claro del puente. El puente se instrumentó para medir las deformaciones antes y después de la instalación del refuerzo, para estudiar el comportamiento del puente. También se realizó un análisis del comportamiento del puente ante carga viva (camión HS-20), colocando el camión en diferentes posiciones, en donde se observaron disminuciones del 5 al 10 % del momento generado por la acción de la carga viva a causa del refuerzo de barras de CFRP (P-T).

Puente en el Condado de Pottwattamie, Iowa, en la carretera estatal 92 [5]: Es un puente carretero formado por una losa de concreto reforzado con ancho de calzada de 30 ft apoyada sobre 6 vigas IR (Figura 2.14). El puente tiene tres claros, dos claros extremos de 45.5 ft y un claro central de 59 ft, con longitud total de 150 ft. El refuerzo se realizó mediante placas de CFRP, formadas por



Figura 2.12 Puente Bow, al este de Londres, Reino Unido. Tomada de: <https://londonhistorians.wordpress.com/category/business-and-retail/>.



Figura 2.13 Puente en el Condado de Guthrie, Iowa, en la carretera estatal 141. Tomada de: Brent M. Phares, Terry J. Wipf, F. Wayne Klaiber, et al; 2003.

fibras de carbono unidireccionales, unidas con un adhesivo tipo epoxi en el patín inferior de las vigas de acero para incrementar la resistencia a flexión. Las placas de refuerzo tienen un esfuerzo de tensión última de 300 Ksi, un módulo de elasticidad de 20000 Ksi y una deformación última de 1.5 %. Se utilizaron diferentes capas de CFRP en cada uno de los claros; en el extremo oeste se colocó una sola capa, mientras que en el extremo este se colocaron tres capas, ambas con 20 ft de longitud, y en el claro central se instalaron dos capas con 25 ft de longitud. Estas diferencias tienen como objetivo investigar la variación del incremento de resistencia como función de la cantidad de capas de CFRP, y la durabilidad del sistema de refuerzo. Se realizaron pruebas de carga antes y después de la incorporación del refuerzo para observar el comportamiento del puente.

Puente Acto, al oeste de Londres [18]:

Es un puente con vigas principales formadas por placas de acero conectadas a vigas secundarias con sección IR (Figura 2.15). Para el refuerzo se utilizaron placas de CFRP de ultra-alto-módulo elasticidad, instaladas en la superficie del patín inferior de las vigas secundarias con el objetivo de incrementar su resistencia a flexión; para la unión de éstas se utilizó sikadur BPA31, con un curado a temperatura ambiente. Se realizaron monitoreos antes y después de aplicar el refuerzo, donde se observó una disminución de los esfuerzos debidos a carga viva del 24%. Es importante mencionar que durante el proceso de rehabilitación el puente se mantuvo abierto a la circulación de vehículos, generándose así cargas cíclicas, lo cual tuvo un efecto directo en la resistencia final del adhesivo.

Puente I-704, Newark, Delaware [13, 17]: El puente tiene una longitud total de 35 m formados por tres claros con longitudes de 7.5 m en los extremos y 19 m en el central. El puente tiene un ángulo de esviajamiento de 13°. La superestructura consta de 6 vigas de acero, donde solamente se reforzó una de ellas (viga G5) con placas de CFRP adheridas en su patín inferior, las cuales tienen 37 mm de ancho y 5.25 mm de espesor, con un módulo de elasticidad de 112 GPa, un coeficiente térmico de 0.37 y un esfuerzo ultimo de 930 MPa. La selección de la viga reforzada, se



Figura 2.14 Puente en el Condado de Pottwattamie, Iowa, en la carretera estatal 92 . Tomada de: Brent M. Phares, Terry J. Wipf, F. Wayne Klaiber, et; 2003.



Figura 2.15 Puente Acto, al oeste de Londres. Tomada de: Moy S.S.J. and Bloodworth A.G.; 2007.

realizó mediante un análisis de carga viva para obtener la viga más desfavorable a esta sollicitación, donde se observó que la viga G5 fue en la que se transmitía mayor carga. Un factor importante en esta rehabilitación fue que el puente estuvo abierto a la circulación y sólo se evitó el paso en el área donde se encontraba la viga G5. Por tal motivo el elemento que se reforzó estuvo expuesto a cargas cíclicas, lo que llevo a tomar medidas para evitar que las placas se desprendieran durante el proceso de curado del adhesivo. Para esto, se utilizaron unos bloques de madera y algunas prensas metálicas para dar un poco de presión, estabilidad y dar sujeción a las placas de CFRP (Figura 2.16).

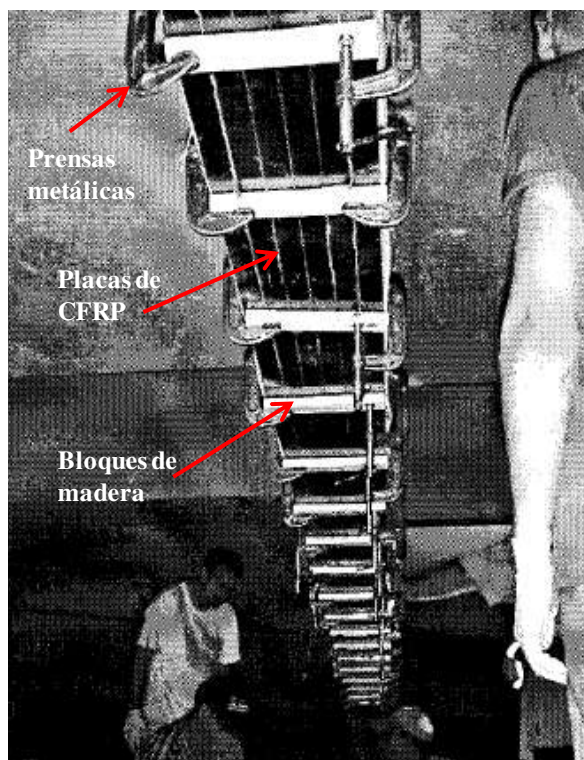


Figura 2.16 Viga G5 rehabilitada con placas de CFRP. Tomada de: Miller Trent C., Chajes Michael J., Mertz Dennis R. y Hastings Jason N.; 2001.

El refuerzo consta de 6 placas de CFRP de fibras unidireccionales (carbono T-300), colocadas lado a lado hasta cubrir el ancho del patín de la viga, unidas con dos tipos diferentes adhesivos: Ciba-Geigy AV8113/HV8114 y Plexus MA/555. El adhesivo Ciba-Geigy AV8113/HV8114 tiene una alta resistencia a cortante de 13.8-17.2 MPa, con un tiempo de curado a temperatura ambiente de 4 horas y cuenta con una durabilidad bajo condiciones ambientales severas y a ciclos de hielo-deshielo. El adhesivo Plexus MA/555 tiene una resistencia a cortante mucho menor que el anterior adhesivo de 8.6-10.3 GPa, pero tiene dos ventajas respecto al primero, es decir, se puede colocar en superficies no uniformes y su temperatura de curado a temperatura ambiente es de 2 horas. Cada uno de los adhesivos se implementó en la mitad de la longitud de la viga reforzada, esto con el objetivo de estudiar la durabilidad de los adhesivos, así como observar el comportamiento que presenta la viga. La viga se sometió a pruebas de carga antes (225 KN) y después del refuerzo (286 KN), donde se registró un aumento del 11.6% de su rigidez.

Existen también casos de refuerzos en estructuras, donde se utilizan láminas bidireccionales para reforzar vigas a torsión [6]. Es importante mencionar que sólo láminas con fibras bidireccionales de CFRP se pueden implementar en superficies curvas, por lo que se hace referencia al siguiente caso:

Viga de acero curvada del edificio Boots en Nottingham [13]: Para el refuerzo de la viga (Figura 2.17) se usaron fibras de carbono unidireccionales con orientación de $0/90^\circ$ y $\pm 45^\circ$ en su patín inferior, para mejorar su resistencia a flexión. En el alma de la viga se orientaron las fibras de

0 a 90° para proporcionar resistencia a torsión y a cortante. Antes de la colocación de las fibras de carbono se instaló una superficie de fibras de vidrio, la cual trabaja como aislante para evitar que los dos materiales entren en contacto, y así evitar que se presente corrosión en el acero. Para la unión de las láminas de CFRP se utilizó un adhesivo tipo epoxi; éstas tienen un alto módulo, un espesor total de 2 mm (láminas de CFRP y adhesivo epoxi) y una temperatura de curado de 65 °C.



Figura 2.17 Viga principal curvada, Nottingham, Reino Unido. Tomada de: Hollaway L.C. and Cadei J., 2002.

2.5 Casos experimentales de vigas de acero con CFRP

Se han llevado a cabo una serie de investigaciones y experimentos en elementos estructurales de acero reforzados con materiales compuestos donde se ha demostrado un aumento en la resistencia a flexión, a cortante y a tensión; en los siguientes párrafos se hacen referencia sobre algunos de los casos investigados en Inglaterra y E.U.

Dennis R. Mertz and John W. Gillespie, Jr University of Delaware [22]: Realizaron especímenes de vigas de acero W8x10 A709 grado 36, con una longitud de 1524 mm. El refuerzo se realizó para proporcionar mayor resistencia a flexión. A cada espécimen corresponde una geometría de refuerzo diferente:

Caso 1-Placa compuesta reforzada: el refuerzo consiste de una placa compuesta con fibras unidireccionales de carbono (Figura 2.18a) unidas directamente al patín de tensión de la viga usando un adhesivo epoxi (AV8113).

Caso 2-Sándwich-reforzado: consiste de una placa compuesta reforzada, de manera que en el centro hay una estructura de aluminio que no tiene ninguna influencia en el comportamiento a flexión. El refuerzo forma diferentes capas, como tipo sándwich (Figura 2.18b), con un espesor de refuerzo de 4.6 mm.

Caso 3-Encamisado-compuesto: esta prueba fue desarrollada para casos en los que podría estar presente una superficie variable, debido a las imperfecciones dentro de la construcción, donde no se puede emplear un elemento compuesto rígido. El refuerzo consiste de fibras de vidrio bidireccionales ($\pm 45^\circ$) colocadas en el alma y patín de tensión de la viga, donde se colocó una capa de adhesivo en la superficie de acero para posteriormente pegar el refuerzo. En la parte media del

adhesivo y el refuerzo se utilizó un núcleo de espuma (Figura 2.18c); después se utilizó una capa de adhesivo vinil éster.

Caso 4-Sección pulida reforzada: para el refuerzo de la viga de acero, se utiliza un canal compuesto (vidrio-E), el cual se une con un adhesivo y se atornilla al patín de tensión de la viga (Figura 2.18d).

Caso 5-Lámina-compuesta-reforzada (3 capas de fibras): la viga de acero fue reforzada con una lámina de CFRP de fibras unidireccionales colocadas en el patín de tensión de la viga (Figura 2.18e). Para el refuerzo se colocaron tres capas de placas compuestas unidas mediante un adhesivo (vinil éster). Las dimensiones de las láminas de refuerzo son: 6.4 mm de espesor y 38.1 mm de ancho.

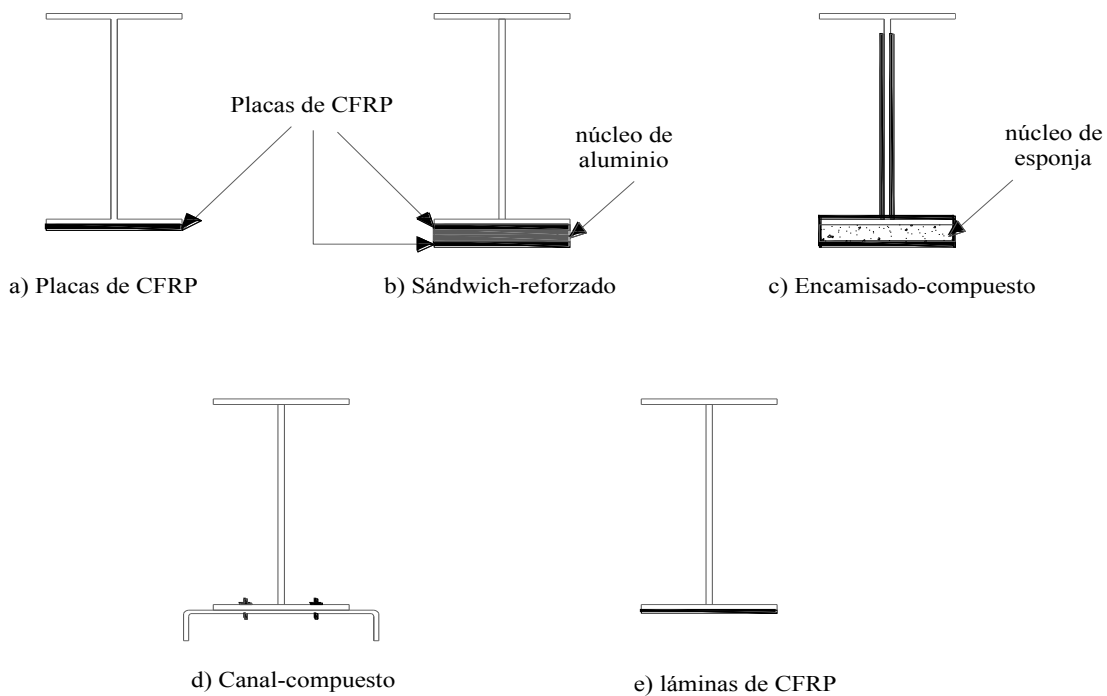


Figura 2.18 Diferentes configuraciones geométricas de vigas de acero con CFRP

El ensayo de las muestras fue a flexión, en una máquina con capacidad de carga es de 222 KN. La fuerza se aplicó en el centro de la viga de 1219 mm longitud. Las vigas se apoyaron en los extremos de 76.2 mm longitud a cada lado, con dos cargas aplicadas al centro de la misma, separación de 203 mm entre las cargas. Se utilizaron bloques de madera en los apoyos y en ambos lados de la viga donde se aplicó la carga para evitar el aplastamiento del alma. La deformación de cada muestra se midió por medio de strain-gages colocados en el centro del claro de la viga en la parte exterior e interior del patín de compresión y tensión de la viga de acero. También se colocaron

strain-gages en la configuración de cada refuerzo. Las vigas se sometieron a una carga objetivo de 89 KN (cíclica en cinco tiempos). Se observó que el mejor comportamiento de las vigas a flexión es con la utilización de placas compuestas (CFRP) unidas adhesivamente al patín de tensión, debido al incremento de rigidez. De igual forma estudio una viga control sometida a la misma prueba, sin refuerzo, para obtener una diferencia entre los especímenes reforzados y ver cuál es el incremento de rigidez y resistencia que se alcanza con el sistema de refuerzo. El espécimen del caso 3, mostró ser el más crítico, debido al rompimiento del refuerzo al llegar al cuarto ciclo de carga, donde se reporta degradación en la rigidez. En los demás casos no mostraron pérdida de rigidez. El espécimen que mostró tener un mejor comportamiento ante el refuerzo fue el caso 5, de acuerdo con lo reportado por los autores.

En la prueba de resistencia fue necesario modificar los especímenes colocando placas de acero, en el patín de compresión de cada viga, unidas adhesivamente y atornilladas, con el propósito de prevenir el modo de falla por torsión, y a la vez simular una viga que esté actuando en conjunto con una losa de concreto reforzado. Las vigas se sometieron a una carga monolíticamente utilizando una máquina universal con una capacidad de carga de 890 KN. Los autores monitorearon el desplazamiento, la carga y la deformación mediante strain-gages. Los elementos se cargaron más allá de la resistencia elástica hasta su falla. En el caso 1, el espécimen presento desadherencia de la placa de acero colocada en el patín de compresión. Las muestras 2, 4 y 5 fallaron por el desprendimiento del refuerzo. El espécimen 2, falló antes de alcanzar la fluencia de la viga de acero. Mientras que la muestra 3 tuvo múltiples fallas locales que disminuyeron progresivamente la resistencia de la sección.

David Schnerch, Kirk Stanford, Emmett A. Summer, y Sami Rizkalla [23,24], realizaron diferentes pruebas experimentales, donde el refuerzo consistió de láminas de CFRP con fibras unidireccionales de alto módulo, con un módulo de tensión de 640 GPa, una resistencia de ruptura a tensión de 2450 MPa y una elongación máxima de 0.4. La prueba consistió en vigas de acero grado A36 con la adición de placas de acero soldadas a lo largo de la longitud del patín de compresión (Figura 2.19). Esto con el fin de simular una losa de concreto reforzado actuando en conjunto con la viga de acero. Para esto, se utilizaron 6 resinas diferentes (Weld-On SS620, SP Spabond 345, Vantico Araldite 2015, Jeffco 121, Fyfe Tyfo MB2 y Sika Sikadur 30).

Los especímenes se realizaron con el propósito de seleccionar una resina adecuada para obtener una unión precisa y para determinar la longitud de desarrollo de la unión, tienen una sección transversal IR, con 864 mm de longitud, con 102 mm de ancho, con 3.3 mm de espesor de patín y 2.6 mm de espesor del alma de la viga. Las placas de acero soldadas tienen un espesor de 6.4 mm y las láminas de CFRP tienen un ancho de 36 mm, un espesor de 1.45 mm. Las vigas se apoyaron en los extremos y se cargaron con dos fuerzas separadas a 102 mm, con una velocidad de carga de 0.75 mm/min y con un sistema de curado a temperatura ambiente con una duración de 7 días.

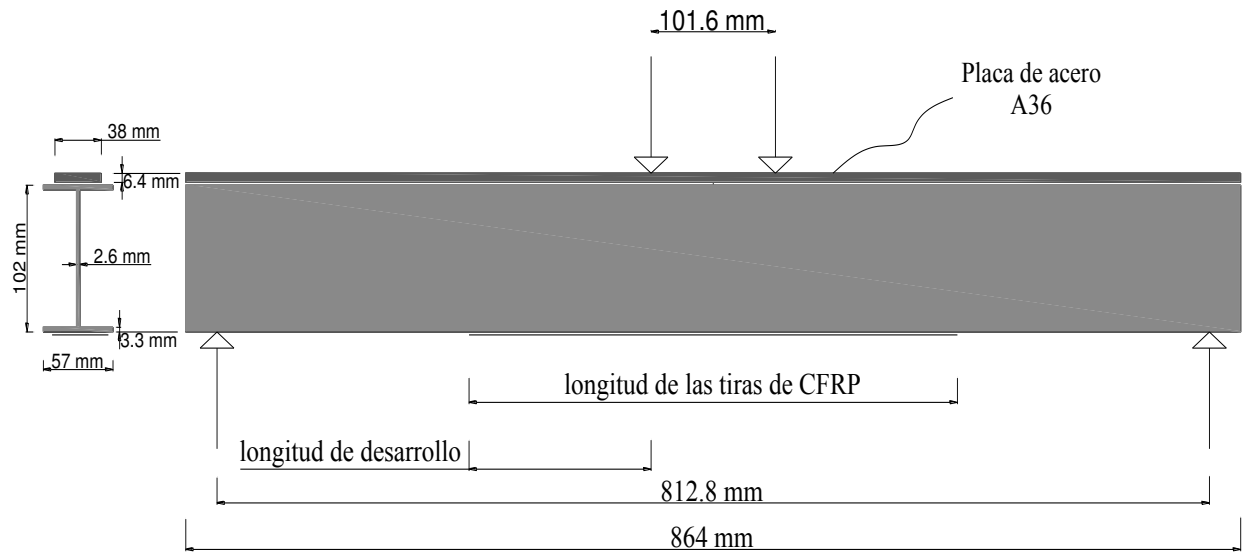


Figura 2.19 Dimensiones de la sección transversal y configuración de carga de una viga.

Los adhesivos más adecuados para la unión de las láminas de CFRP con la superficie de acero, son los especímenes que presentaron longitudes de desarrollo de CFRP más cortas, para lo cual se tienen dos adhesivos: Weld-On SS620 y SP Spabond 345.

3

C A P Í T U L O

Modos de falla que presentan las vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

***E**n este capítulo se describe el comportamiento de la unión adhesiva entre la superficie de acero y la capa adhesiva. Se realiza una descripción de pruebas experimentales realizadas por algunos autores sobre elementos placa de acero sometidos a carga axial, se hace énfasis en las diferencias que existen en aumentar el espesor del compuesto, número de capas de CFRP, usar diferentes configuraciones geométricas y de refuerzo. Se habla de los modos de falla que presentan las vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP.*

3.1 Comportamiento de la unión adhesiva entre los CFRP y la superficie de acero

El comportamiento del adhesivo de unión entre la superficie de acero y las láminas o placas de CFRP se estudia mediante la curva *unión-desplazamiento*, que consiste en relacionar los esfuerzos cortantes en la interfase acero-CFRP (eje y) con el desplazamiento relativo entre dos adherentes (eje x). Para obtener los esfuerzos cortantes en la interfase acero-CFRP, es necesario conocer las deformaciones registradas por los strain-gages colocados a lo largo de la longitud de unión entre el acero y CFRP, o deformaciones registradas por cámaras fotográficas; los cuales dependen del tipo de prueba, ya sea de tensión simple o cortante doble.

Además, el comportamiento de la junta de unión, depende del tipo de adhesivo que se utilice (lineal o no-lineal), del sistema de refuerzo de CFRP (láminas o placas) y del número de capas de CFRP que se colocan en la superficie del acero (ya que la distribución de deformaciones no es uniforme en todas capas de refuerzo), de las condiciones ambientales y de carga.

Las ecuaciones 3.1 a 3.4 permiten estimar la curva unión-desplazamiento, tomando en cuenta el tipo de prueba de cortante en el miembro de acero, tipo de adhesivo y refuerzo de CFRP, así como el número de capas de CFRP utilizado.

a) Prueba de cortante simple, establecidas por Pham y Al-Mahaidi (2005):

$$\tau_{i+\frac{1}{2}} = \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{(L_i - L_{i-1})} E_{\text{CFRP}} t_{\text{CFRP_placa}} \quad (3.1)$$

$$\delta_{i+\frac{1}{2}} = \frac{(L_i - L_{i-1})(\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1})}{4} + \frac{(L_{i-1} - L_{i-2})(\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i-2})}{2} + \sum_{i=3}^i \frac{(L_{i-2} - L_{i-3})(\varepsilon_{i-2} + \varepsilon_{i-3})}{2} \quad (3.2)$$

b) Prueba de tensión a cortante doble, establecidas por Wu et al. (2012):

$$\tau_{i+\frac{1}{2}} = \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{(L_{i+1} - L_i)} E_{\text{CFRP}} t_{\text{CFRP_placa}} \quad (3.3)$$

$$\delta_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (L_{i+1} - L_i)(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (3.4)$$

Donde: ε_i , es la deformación i th en el strain-gauge del extremo libre de la placa CFRP, con $\varepsilon_o = 0$; L_i , es la distancia del strain-gauge i th del extremo libre de la placa CFRP, con $L_o = 0$; E_{cfrp} , es el módulo de elasticidad de la placa de CFRP; t_{cfrp} , es el espesor de la placa de CFRP.

De acuerdo a las ecuaciones anteriores, 3.1 a 3.4, se han observado dos comportamientos en la unión adhesivo que se basan en pruebas experimentales de cortante simple o doble. Estos dos comportamientos se representaron en un modelo analítico propuesto por Xia y Teng (2005) y adaptado por Fawzia et al. (2010) a un modelo bilineal de unión-desplazamiento para adhesivos lineales y no lineales con láminas CFRP, definido por las ecuaciones 3.5 a 3.9. Para adhesivos lineales y no lineales con placas CFRP de acuerdo a Yu et al. (2012), se definen por las ecuaciones 3.10 a 3.16:

c) Sistema acero-láminas CFRP con adhesivos lineales y no-lineales de acuerdo a Fawzia et al (2010):

$$\tau_f = f_{t,a} \quad (3.5)$$

$$\delta_1 = \frac{t_a}{10} \quad (3.6)$$

$$\delta_f = \frac{t_a}{4} \quad \text{para } t_a = 0.1 \text{ a } 0.5 \text{ mm} \quad (3.7)$$

$$\delta_f = 0.125 + \frac{t_a - 0.5}{10} \quad \text{para } t_a = 0.5 \text{ a } 1 \text{ mm} \quad (3.8)$$

$$t_a = \frac{\frac{1}{2} \cdot (T_{cfrp} - t_{acero})}{n} t_{CFRP_lámina} \quad (3.9)$$

d) Sistema acero-placas CFRP con adhesivos lineales, de acuerdo a Yu y otros (2012):

$$\tau_f = 0.9f_{t,a} \quad (3.10)$$

$$\delta_1 = \frac{t_a}{40} \quad (3.11)$$

$$\delta_f = \frac{2 t_a}{15} \quad (3.12)$$

e) Sistema acero-placas CFRP con adhesivos no-lineales, de acuerdo a Yu et al. (2012):

$$\tau_f = f_{t,a} \quad (3.13)$$

$$\delta_1 = \frac{t_a}{10} \quad (3.14)$$

$$\delta_2 = \frac{3 t_a}{4} \quad (3.15)$$

$$\delta_f = t_a \quad (3.16)$$

Donde: $f_{t,a}$, es la resistencia a tensión del adhesivo; t_a , es el espesor del adhesivo entre la placa de CFRP y el acero; t_{acero} , es el espesor de la placa de acero; $t_{cfrp_lámina}$, es el espesor de una capa de lámina de CFRP; T_{cfrp} , es el espesor promedio total del espécimen de unión; τ_f , esfuerzo de cortante máximo; δ_1 , es el desplazamiento inicial del adhesivo; δ_2 , es el desplazamiento en el extremo del adhesivo; δ_f , es el desplazamiento máximo del adhesivo.

El modelo de unión-desplazamiento para el sistema 3 y 4, se rige por tres parámetros: el máximo esfuerzo cortante (τ_f), el desplazamiento inicial (δ_1) y el desplazamiento máximo (δ_f). En la Figura 3.1a se puede observar el modelo de unión-desplazamiento para ambos sistemas, acero-

láminas CFRP con adhesivos lineales o no-lineales y acero-placas CFRP con adhesivos lineales, donde se tiene una zona lineal y de ablandamiento hasta llegar a la desunión. El modelo de unión-desplazamiento para el sistema 5 (Figura 3.1b) se definen con el máximo esfuerzo cortante (τ_f), el desplazamiento inicial (δ_1), desplazamiento en el extremo de la meseta (δ_2) y el desplazamiento máximo (δ_f); por lo que el modelo de éste sistema tiene un comportamiento lineal, constante y de ablandamiento hasta llegar a la desunión.

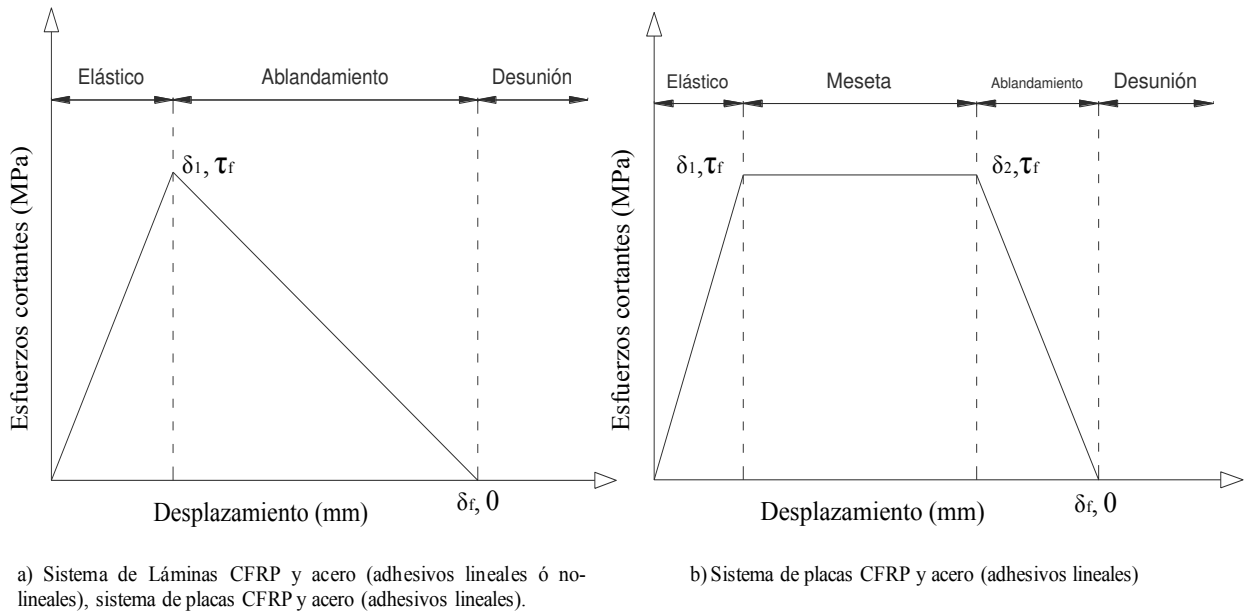


Figura 3.1 Modelos de unión-desplazamiento.

3.1.1 Métodos de prueba para determinar el comportamiento de la unión entre el acero y los CFRP

Se han realizado varios estudios sobre el comportamiento de la unión entre los CFRP y el acero, de donde se ha logrado identificar diferentes mecanismos de falla, entre las que se encuentra el mecanismo de desadherencia de los materiales. Los métodos más comunes para estudiar el comportamiento de la unión entre las placas de acero y las láminas o placas de CFRP son los siguientes:

a) Carga directamente aplicada al elemento de CFRP

La fuerza de compresión o tensión se aplica sobre las placas de CFRP. Si el polímero de refuerzo con fibra de carbono esta en compresión (Figura 3.2a), el método de prueba de unión es de cortante por traslape, donde existe un mecanismo de falla local en los CFRP debido a su baja

resistencia a compresión; este tipo de prueba nos ayuda a verificar el comportamiento de unión aplicado en columnas que además de reforzarlas por cortante existe un aumento en el confinamiento del elemento. Si el material compuesto esta adherido paralelamente a la superficie de acero con la fuerza de tensión, la prueba es de cortante simple o doble traslape (Figura 3.2b y 3.2c), donde este tipo de pruebas se pueden aplicar también en elementos de vigas sometidas a flexión, donde el patín inferior está trabajando a tensión provocando la ruptura del elemento CFRP cuando la viga tiene un comportamiento dúctil.

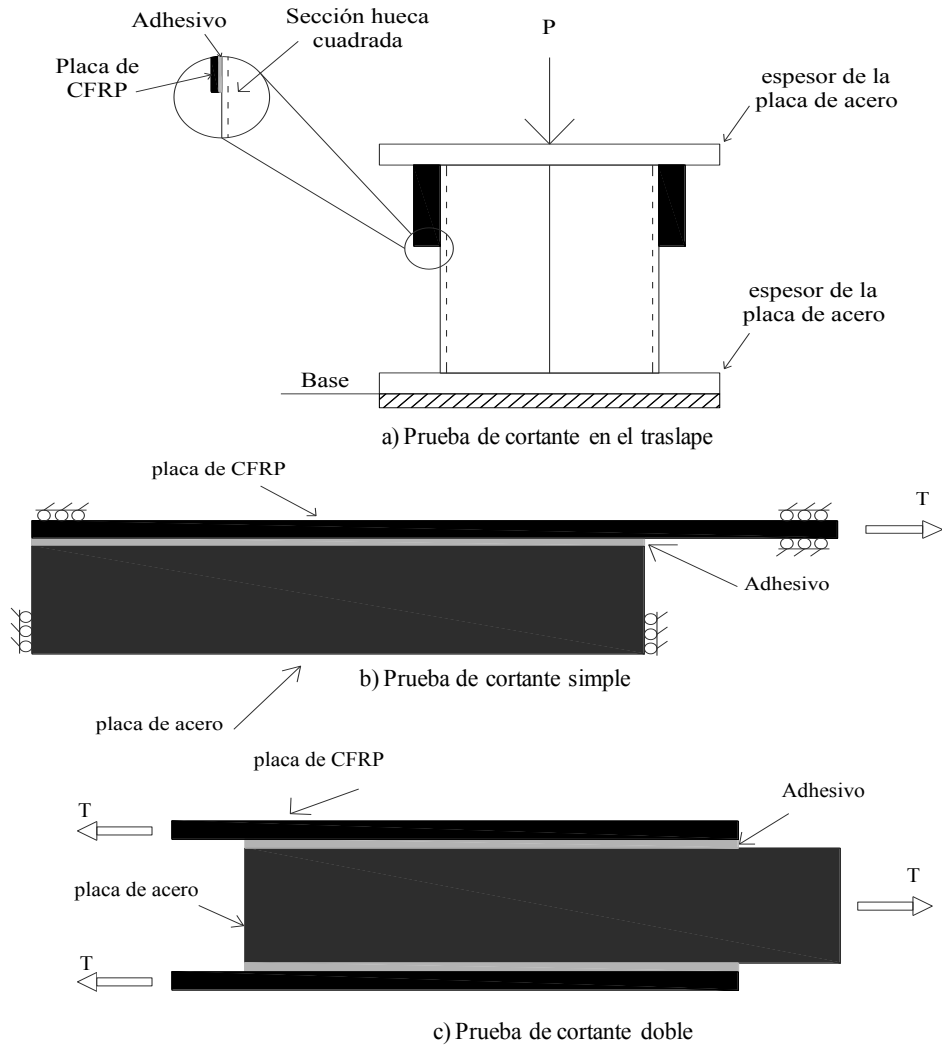


Figura 3.2 Métodos de prueba para determinar el comportamiento de la unión entre el acero y el CFRP, cuando la carga se aplica directamente en el elemento CFRP.

b) Carga directamente aplicada al elemento de acero

La fuerza de tensión es aplicada directamente sobre el elemento de acero. El método consiste en dos pruebas, donde se unen dos placas de acero con CFRP y espaciadas entre ellas. La primera

prueba es de cortante doble (Figura 3.3a), utilizada para estudiar la unión entre el material compuesto (láminas o placas de CFRP) y la superficie de acero. La segunda prueba es de cortante simple y es empleado en tuberías únicamente con láminas de CFRP por la curvatura del mismo (Figura 3.3b). Ambas pruebas se utilizan como referencia para estudiar el comportamiento de unión entre acero-CFRP para vigas IR reforzadas con CFRP, sometidas a flexión. Las deformaciones se registran mediante strain-gages colocados a lo largo de la longitud de la unión. Las deformaciones también pueden medirse con cámaras fotográficas monitoreadas por un software mediante una computadora que ayudan a registrar la distribución de las deformaciones en el área considerada.

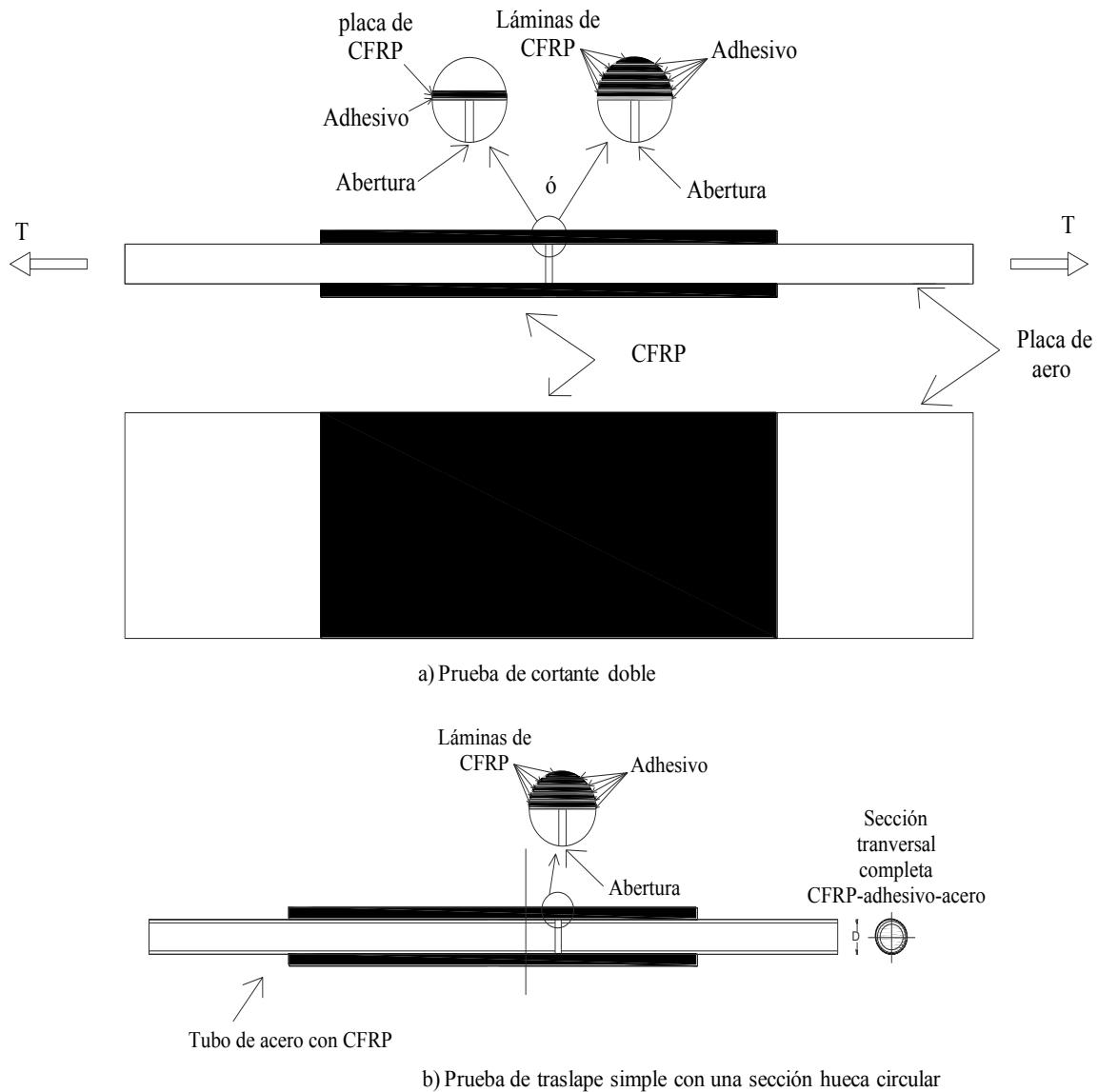


Figura 3.3 Métodos de prueba para determinar el comportamiento entre el acero y el CFRP, cuando la carga se aplica directamente en el elemento de acero.

3.1.2 Estudios analíticos y experimentales de elementos de acero reforzados con CFRP

Existen una variedad de pruebas experimentales y modelos analíticos sobre placas de acero sometidas a tensión, que sirven de apoyo para verificar el comportamiento de la unión entre la capa adhesiva y el refuerzo CFRP, las diferentes configuraciones geométricas y de refuerzo CFRP. A continuación se describen algunos casos:

Miller Trent C., Chajes Michael J., Mertz Dennis R. y Hastings Jason N. [13, 17] elaboraron seis especímenes de acero A36 con 38 mm de ancho, 12.7 mm espesor y 914 mm de longitud, reforzados con placas de CFRP colocadas en ambas caras de las muestras, es decir, doble traslape (Figura 3.4). Cada muestra fue sometida a carga axial (tensión), para determinar la relación de la transferencia de fuerza entre sustrato de acero y el refuerzo CFRP. Las placas de CFRP constan de 37 mm de ancho, 5.25 mm de espesor y 457 mm de longitud.

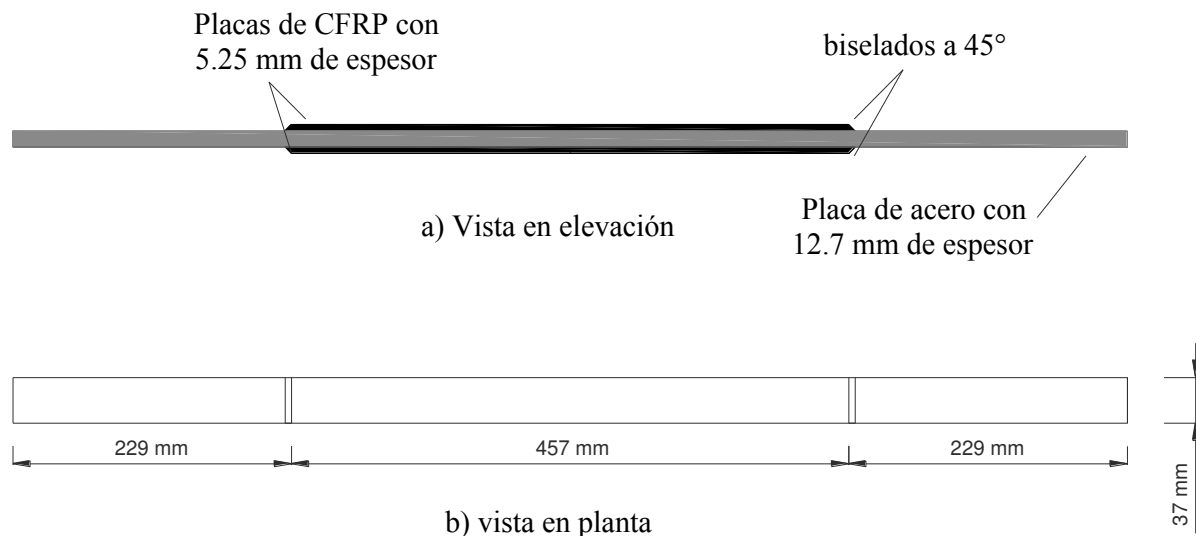


Figura 3.4 Placa de acero reforzada con placas CFRP y configuración del adhesivo.

Antes de la colocación de las placas de refuerzo, se puso una capa de fibra de vidrio (bidireccional). Los extremos de las placas compuestas fueron biselados a 45° para disminuir los esfuerzos a cortante y evitar el desprendimiento de las mismas. Algunas de las propiedades del refuerzo son el módulo de elasticidad de 112 GPa, coeficiente térmico de 0.37 y esfuerzo último de 930 MPa. Las muestras se dividieron en dos grupos:

Grupo 1, tres especímenes fueron unidos con un adhesivo epoxi AV8113/HV8113 con un espesor promedio de unión de 0.36 mm. La superficie de acero se trató previamente con un adhesivo Dow Corning Z-6040.

Grupo 2, las tres muestras restantes, se unieron con un adhesivo estructural ITW Plexus MA555 con un espesor de 0.3 mm. De igual forma, la superficie de acero tuvo un pre-tratamiento con un adhesivo ITW PC120 .

Los especímenes se probaron en una máquina Instron modelo 1332, donde se sometieron a tensión con incrementos de carga de 0-13.4 kN, 0-26.8 kN, 0-40.2 kN y 0-hasta la falla.

Modelo analítico

Un modelo analítico de la junta de unión fue realizado para investigar los esfuerzos a cortante y la distribución de las deformaciones en los CFRP. El modelo analítico propuesto originalmente por Albat y Romily, donde posteriormente se realizó una corrección para el desfase-cortante en los adherentes [7]. Las ecuaciones que definen el modelo son:

$$\tau_a(y) = -\frac{\frac{P}{E_s t_s} + (\alpha_s - \alpha_p)\Delta T}{\left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s}\right)} \lambda \frac{\sinh(\lambda y)}{\cosh(\lambda l)} \quad (3.17)$$

$$\sigma_p(y) = \left(\frac{\frac{P}{E_s t_s} + (\alpha_s - \alpha_p)\Delta T}{t_p \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s}\right)} \right) \left(1 - \frac{\cosh(\lambda y)}{\cosh(\lambda l)} \right) \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \sigma_s(y) = 2 \left(\frac{\frac{P}{E_s t_s} + (\alpha_s - \alpha_p)\Delta T}{t_s \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s}\right)} \right) \left(1 - \frac{\cosh(\lambda y)}{\cosh(\lambda l)} \right) \\ + \left(\frac{\frac{P}{E_s t_s} - 2(\alpha_{ss} - \alpha_p)\Delta T}{t_s \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s}\right)} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Donde $-l \leq y \leq l$

$$\lambda_{\text{desfase-cortante corrección}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_s t_s}\right)}{\left(\frac{1}{4} \frac{t_s}{G_s} + \frac{t_a}{G_a} + \frac{3}{8} \frac{t_p}{G_p}\right)}} \quad (3.20)$$

Donde: σ_s , esfuerzo normal promedio en el sustrato del material; σ_p , esfuerzo normal en el material reforzado; τ_a , esfuerzo a cortante del adhesivo; λ_e , parámetro de distribución de esfuerzos elásticos cortantes; y , coordenada del eje en el punto; l , longitud del refuerzo; P , carga aplicada por

unidad de longitud; E_s , módulo de Young del sustrato del material; E_p , módulo de Young del material reforzado; G_s , módulo de cortante del sustrato del material; G_p , módulo de cortante del material reforzado; G_a , módulo de cortante del adhesivo; t_s , espesor del sustrato del material; t_p , espesor del material reforzado; t_a , espesor de la línea de unión del adhesivo; α_s , coeficiente de expansión térmica del sustrato del material; α_p , coeficiente de expansión térmica del material reforzado; ΔT , cambio de temperatura.

De las ecuaciones anteriores, se observa que la longitud de transferencia de fuerza es una función de las propiedades geométricas y materiales del sustrato de acero, refuerzo CFRP y del adhesivo. Las variaciones en estos parámetros afectan la longitud de transferencia de fuerza y la magnitud de la fuerza tomada por las placas de CFRP. De todos los parámetros, la velocidad de transferencia es más sensible a los cambios de espesor de la línea de unión y al espesor de la placa CFRP. El análisis no toma en cuenta el comportamiento plástico del adhesivo de los modos de falla en cargas altas y su enfoque es el comportamiento del adhesivo bajo cargas de servicio, dentro del límite lineal-elástico. Los investigadores compararon los datos experimentales con los analíticos, de donde se observó que la solución analítica tubo una distribución de deformaciones longitudinal originada a lo largo de las placas CFRP, muy cercana a lo que se predijo experimentalmente para los tres niveles de carga y para los dos tipos de adhesivos empleados. Se encontró que el 98% de la transferencia de la fuerza se produce dentro de los primeros 100 mm del extremo de las placas. Por lo tanto, se determinó que la longitud de desarrollo para las placas implementadas fue del orden de 100 mm.

David Schnerch, Kirk Stanford, Emmett A. Summer, y Sami Rizkalla [23,24], realizaron diferentes pruebas experimentales, donde el refuerzo consistió de láminas de CFRP con fibras unidireccionales de alto módulo, con un módulo de tensión de 640 GPa, una resistencia de ruptura a tensión de 2450 MPa y una elongación máxima de 0.4%.

Especímenes con dos placas de acero, elaboración de especímenes con dos placas de acero A36 con 128.2 mm de longitud, 25.4 mm de ancho, 3.3 mm de espesor y 1.9 mm de abertura entre placas (Figura 3.5), las cuales se unieron mediante láminas unidireccionales de fibra de carbono de alto módulo con 52.7 mm de longitud, con 25.4 mm de ancho y 1.45 mm de espesor. En las muestras se variaron el tipo de adhesivo de unión, las temperaturas de curado y los tipos de agentes humectantes. La combinación de estos parámetros dio por resultado 10 especímenes elaborados con diferentes resinas (Tabla 3.1), curadas a temperatura ambiente, de las cuales dos muestras se repitieron para ser curadas con una alta temperatura de 50 °C, durante 16 horas. También se repitieron 3 muestras, humectadas por un agente de baja dosis (0.5 % del peso total de la resina) y 3 especímenes, humectados por un agente de alta dosis (1 % del peso total de la resina).

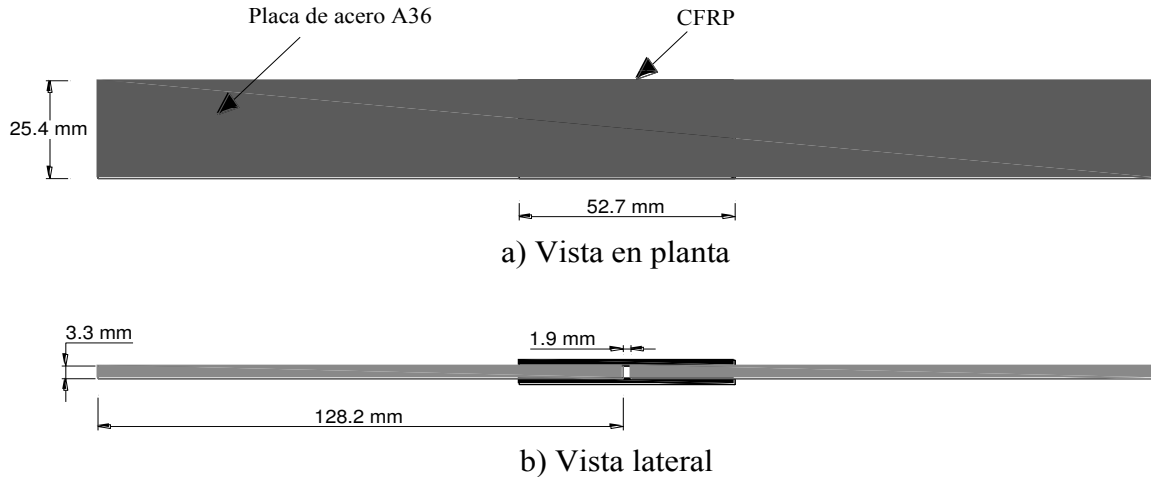


Figura 3.5 Espécimen con doble traslape

Tabla 3.1 Matriz de prueba para el proceso de selección de la capa humectante de resina				
Resina	curado a temperatura ambiente	curado con una alta temperatura	agente humectante de baja dosis	agente humectante de alta dosis
3-M DP-460	DP460.RT	-	DP460.LD	DP460.HD
3-M DP-810	DP810.RT	-	DP810.LD	DP810.HD
Degussa Mbrace Saturant	MBSAT.RT	-	-	-
Jeffco 121	J121.RT	-	-	-
Reichhold Atpime2	ATP2.RT	-	-	-
Resinlab EP 1246	EP1246.RT	-	-	-
Sika Sikadur 300	S300.RT	-	-	-
Sika Sikadur 330	S330.RT	S330.ET	S330.LD	S330.HD
SP Ampreg 22 (Fast Hardener)	AM22F.RT	-	-	-
SP Ampreg 22 (Slow Hardener)	AM22S.RT	AM22S.ET	-	-
Donde: RT=curado a temperatura ambiente, ET= curado a alta temperatura, LD= agente humectante de baja dosis, HD= agente humectante de alta dosis.				

Cada prueba se sometió a una prueba estática (prueba a flexión), con una velocidad de carga de 0.12 mm/min. En todos los especímenes se colocaron strain-gages en ambas caras, para obtener los datos de carga y desplazamiento, con el propósito de determinar cuál de los adhesivos es el más adecuado. De acuerdo a las pruebas experimentales, se observó que sólo tres resinas presentaron mejor comportamiento en comparación con el resto. Por lo tanto la resina MBSAT-RT, no presentó des-adherencia entre la resina y la superficie del acero, presentando una ventaja de resistencia a cortante de 12.3 MPa. En la resina S330-RT, el modo de falla predominante que se desarrolló fue a causa de la rotura en las fibras, esto debido a que se observó que no hubo humectación total en todas las fibras y por tener una viscosidad alta; también, presentó una ventaja de resistencia a cortante de 12.1 MPa. Por último, la resina DP810-RT, donde se observó que las fibras no estaban totalmente saturadas de resina, alcanzó una resistencia a cortante de 10.8 MPa. El resto de los especímenes obtuvieron una resistencia a cortante inferior de 10 MPa. En algunos especímenes se observó que las fibras no mostraron humectación total y contaban con la presencia de aire atrapado,

para lo cual se sugirió utilizar un agente humectante para mejorar las propiedades de la resina. Sin embargo, no encontraron ninguna mejoría al utilizar el agente humectante.

D. Schnerch, M. Dawood, S. Rizkalla, E. Summer [23], realizaron los ensayos a tensión que se resumen a continuación:

Ensayo a tensión, se utilizaron dos placas de CFRP de 8 mm de espesor unidas con doble traslape mediante láminas de CFRP de 400 mm de longitud, 4 mm de espesor y pegadas con adhesivo SP Spabond 345.

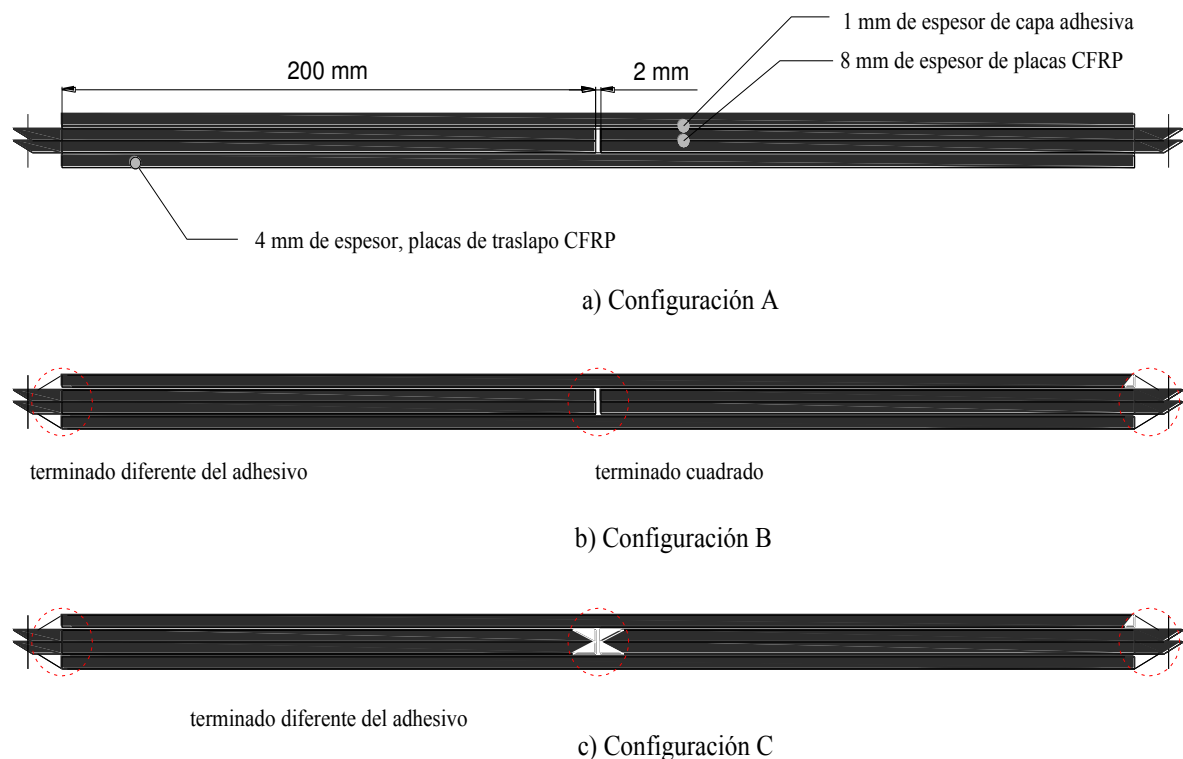


Figura 3.6 Detalle de configuraciones de unión de traslape para especímenes de pruebas a tensión (vista lateral).

Para esta prueba se utilizaron tres configuraciones de traslape: configuración A (Figura 3.6a) las láminas de CFRP se colocaron por ambos lados de la placa de CFRP, dejando una abertura entre placa y placa de 2 mm; configuración B (Figura 3.6b) las láminas de carbono se instalaron sobre ambos lados de las placas de CFRP, dejando una abertura entre las placas de acero de 2 mm y biselando las láminas de CFRP en la parte extrema de las mismas; configuración C (Figura 2.6c) las láminas de CFRP se colocaron similarmente a las configuraciones anteriores, con la adición de biselar la parte central y final. Se reporta para todos los especímenes un espesor promedio del adhesivo de 1 mm, y en las partes biseladas un ángulo de inclinación de 20°, lo anterior tienen la finalidad de reducir los esfuerzos concentrados en las zonas central y extremas.

En las tres configuraciones se reporta que el comportamiento de carga-deformación en el centro del punto de empalme conduce a un valor similar de la rigidez inicial hasta un nivel de carga de 40 KN, pero las configuraciones A y B con el nivel de carga de 40 KN presentaron un aumento de deformación debido al agrietamiento del adhesivo dentro del centro de unión. La configuración C no mostró un aumento de deformación, lo que resulta una disminución de los esfuerzos concentrados en el centro de unión. La configuración A, presentó una falla repentina debido a la pérdida de adherencia de las placas de CFRP de empalme a un nivel de carga de 90 KN, mientras que la configuración B falló por la des-adherencia de las placas de CFRP a un nivel de carga de 160 KN, mientras que se reporta que la configuración C tuvo una pérdida de adherencia de las placas de CFRP de empalme a un nivel de carga de 190 KN.

Pierluigi Colombi y Carlo Poggi [9], realizaron pruebas experimentales, modelos numéricos y analíticos para investigar los diferentes tipos de refuerzos, diferentes uniones geométricas como los tipos de adhesivos, utilizando CFRP como refuerzo en elementos de acero.

Las muestras experimentales consisten de placas de acero (grado 275), con 60 mm de ancho y 6 mm de espesor; éstas tienen un esfuerzo de fluencia de alrededor de 317.8 MPa y una resistencia a tensión de 433 MPa. Las láminas de CFRP, fibras unidireccionales, tienen un ancho de 60 mm y un espesor de 1.4 mm; con un módulo de tensión promedio de 197000 MPa, valor obtenido de pruebas experimentales. Para este estudio, se utilizaron dos tipos de adhesivo: Sikadur 30, con un tiempo de curado de 70 minutos a temperatura ambiente; y Sikadur 330, con una temperatura ambiente de curado y una duración de 30 minutos. También consideraron diferentes espesores de capa de adhesivo (1.1 mm y 0.8 mm), así como diferentes tipos de juntas geométricas (refuerzo lateral doble, refuerzo en uniones atornilladas y uniones de traslape doble).

En la tabla 3.2 y 3.3, se resumen respectivamente las propiedades de los componentes del refuerzo y las propiedades geométricas de cada espécimen. Todas las muestras se sometieron a cargas estáticas (carga axial a tensión) a una velocidad de carga constante de 0.008 mm/s. La máquina donde se probaron los especímenes contaba con una capacidad de 1000 kN, la desadherencia del refuerzo con la superficie de acero la estimaron visualmente. Los objetivos de las muestras eran investigar el mecanismo de transferencia de carga y el modo de falla de la unión adhesiva.

Tabla 3.2 Propiedades nominales de los componentes de refuerzo			
Propiedades del material	Sika Carbodur M614	Sikadur 30	Sikadur 330
Módulo de Young (MPa)	>200000	4500	3800
Resistencia a tensión (Mpa)	>2800	24.8 (7 días)	30
Resistencia a cortante (Mpa)	-	24.8 (14 días)	-
Elongación a la falla (-)	>0.0135	0.01	-

Tabla 3.3 Especímenes Geométricos					
Espécimen	Longitud del elemento de acero (cm)	Ancho del elemento de acero (cm)	CRFP tira geométrica Silka Carbono M614 (mm)	Tipo de adhesivo Sikadur	Espesor del adhesivo (mm)
R1	120	6	2X600X60X1.4	30	1.1
R2	120	6	2X500X60X1.4	30	1.1
H1	120	6	2X500X60X1.4	30	1.1
J1	2X60	6	2X620X60X1.4	30	1.1
J2	2X60	6	2X870X60X1.4	30	1.1
J3	2X60	6	2X500X60X1.4	330	0.8
B1	2X42, 2X35	6	2X250X60X1.4	330	0.8
B2	2X42, 2X35	6	2X250X60X1.4	30	1.1

Las diferentes muestras realizadas se detallan a continuación:

Refuerzo lateral doble (especímenes R1,R2 y H1)

Se consideraron dos casos: en el caso 1 se consideró una placa de acero reforzada por ambos lados del CFRP (Figura 3.7) del espécimen con diferentes longitudes de láminas de CFRP, es decir, en el espécimen R1 se consideró una longitud de 600 mm de CFRP y en el espécimen R2 una longitud de 500 mm de CFRP; el caso 2 (especimen H1) corresponde a la misma configuración de refuerzo pero con un agujero en el centro de la placa de 20 mm diámetro (Figura 3.8), y con una longitud de lámina de CFRP de 500 mm. Todos los especímenes tienen el mismo tipo de adhesivo y espesor. En estas pruebas experimentales, se observó que no hay un incremento en la resistencia última de los especímenes, debido a la presencia de las láminas de CFRP ya que presentaron un modo de *falla en la interfase acero-adhesivo*, es decir, la fluencia se presenta primero en las placas de acero y cuando la fluencia se lleva hasta el refuerzo, las láminas dan lugar a la desunión en los dos elementos y por ende se llega a la falla antes de lo previsto. Por lo tanto, los especímenes R1 y R2 no mostraron una diferencia significativa en la carga de fluencia entre el espécimen no-reforzado.

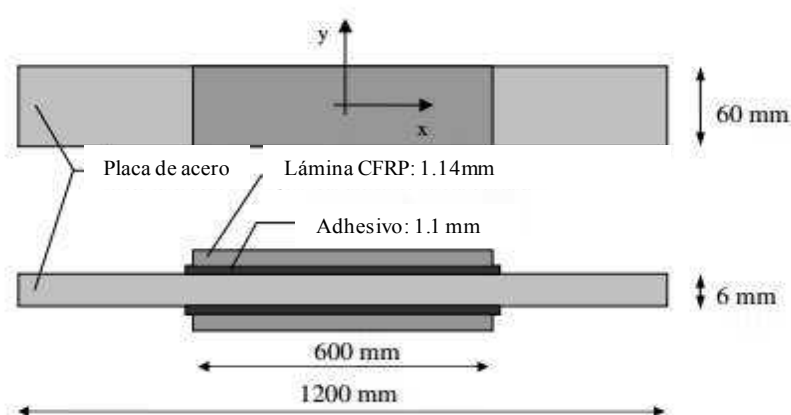


Figura 3.7 Refuerzo lateral doble de una placa de acero (especimen R1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

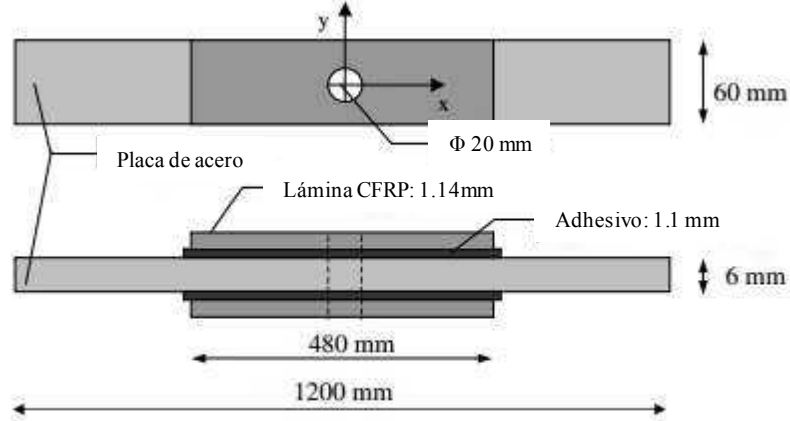


Figura 3.8 Uniones de traslape doble (espécimen H1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Posteriormente se realizó un modelo analítico, realizado por Albat AM y Romilly DP, para evaluar la respuesta estática del refuerzo de las placas de acero en el límite elástico lineal, el cual se basa en las siguientes suposiciones:

1. Comportamiento elástico del acero, CFRP y adhesivo.
2. No deslizamiento entre el acero y el CFRP, es decir, sección compuesta perfecta.
3. Los esfuerzos son constantes a través del espesor de la capa adhesiva, es decir, la capa adhesiva es delgada.

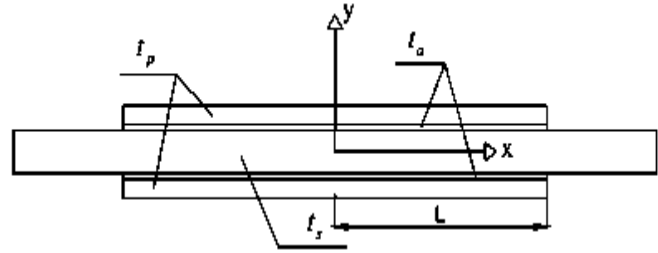


Figura 3.9 Marco de referencia para refuerzo de doble traslape. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Las ecuaciones que definen el modelo analítico (Figura 3.9) son:

$$\tau(x) = P \left(\frac{E_{cfrp} t_{cfrp}}{E_s t_s + 2E_{cfrp} t_{cfrp}} \right) \lambda \frac{\sinh(\lambda x)}{\cosh(\lambda L)} \quad (3.21)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{G_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_{cfrp} t_{cfrp}} + \frac{2}{E_s t_s} \right)} \quad (3.22)$$

$$\sigma(x) = P \left(\frac{E_{cfrp}}{E_s t_s + 2E_{cfrp} t_{cfrp}} \right) \left(1 - \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda L)} \right) \quad (3.23)$$

$$\sigma(x) = P \left(\frac{E_{cfrp}}{E_s t_s + 2E_{cfrp} t_{cfrp}} \right) \quad (3.24)$$

Donde: $\tau(x)$, esfuerzo cortante de la capa adhesiva; $\sigma(x)$, esfuerzo a tensión en el refuerzo CFRP; P , carga de tensión aplicada por unidad de longitud; E_p , módulo de Young de las láminas de CFRP; t_{cfrp} , espesor de las láminas de CFRP; E_s , módulo de Young de la placa de acero; t_s , espesor de la placa de acero; λ_c , factor de corrección; G_a , módulo de cortante del adhesivo; t_a , espesor del adhesivo; $\sigma(x)$, esfuerzo de tensión; L , longitud de desarrollo.

Se colocaron strain-gages (1-5) para ver la distribución de esfuerzos. El strain-gage 1 tiene un comportamiento no-lineal, con cargas menores, debido al incremento de los esfuerzos en la parte final del refuerzo (Figura 3.10). Por otra parte los strain-gages (2-5) tienen un comportamiento lineal hasta un nivel de carga aproximado de 110 kN, después de dicha carga, se presentó una falla debido a la desadherencia de la capa adhesiva. En todos los especímenes, R1 y R2, se presentó el mismo tipo de falla.

Posteriormente se realizó una comparación de la solución analítica con lo experimental (Figura 3.11). En la solución analítica se calculó la distribución de esfuerzos con diferentes niveles de carga a lo largo de la longitud de las láminas CFRP, lo cual se comparó con las deformaciones registradas por los strain-gages ante una carga de 60 kN, valores representados en la gráfica con cruces. En los resultados se observa una buena aproximación entre las dos soluciones; también se observa que pudieron determinar la longitud de desarrollo, aproximadamente 100 mm. Para el espécimen H1 no se empleó el modelo analítico anterior, sino un modelo tridimensional de elemento finito, realizado en el software ABACUS para ver la distribución de esfuerzos alrededor del agujero. La malla se refinó en los extremos del refuerzo y en el agujero. Se colocaron 11 strain-gages para observar su comportamiento entre la unión acero y CFRP. El strain-gage 11 presenta un comportamiento no-

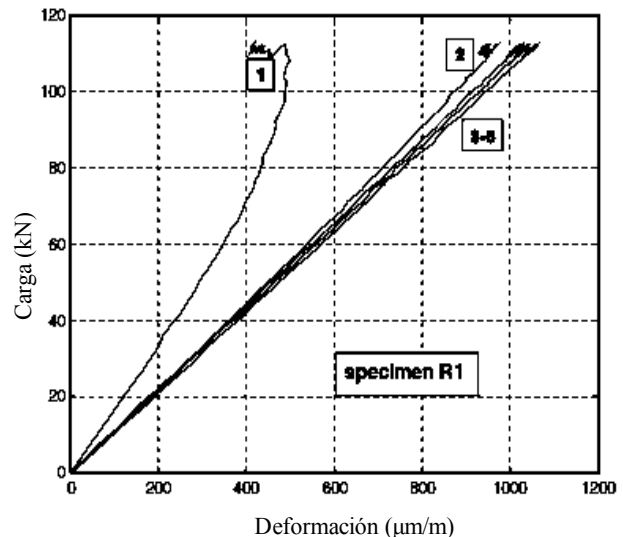


Figura 3.10 Gráfica de deformación Vs carga aplicada (strain-gages 1-5) en el espécimen R1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

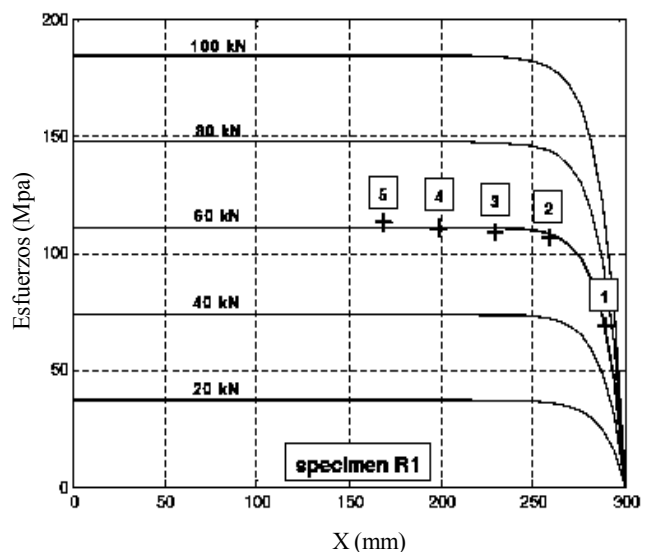


Figura 3.11 Distribución de esfuerzos en los diferentes niveles de carga a lo largo de las láminas CFRP del espécimen R1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

lineal con una aplicación de carga alta (8 kN) y los demás restantes strain-gages (8-10) tienen un comportamiento lineal hasta la carga de fluencia (Figura 3.12). En la Figura 3.13, se realiza una comparación de la solución numérica, empleando el método de elemento finito (MEF) con una carga de 60 kN, con los datos registrados con los strain-gages. La aproximación de las dos soluciones es muy buena con respecto a lo que se observa en la figura antes referida. Además verificaron los esfuerzos concentrados en el agujero mediante las deformaciones registradas en los strain-gages, como función de la distancia y para diferentes niveles de carga. También se realizó una comparación con la solución numérica del MEF con una carga de 60 kN. Para este caso también se reporta una buena aproximación entre las dos soluciones.

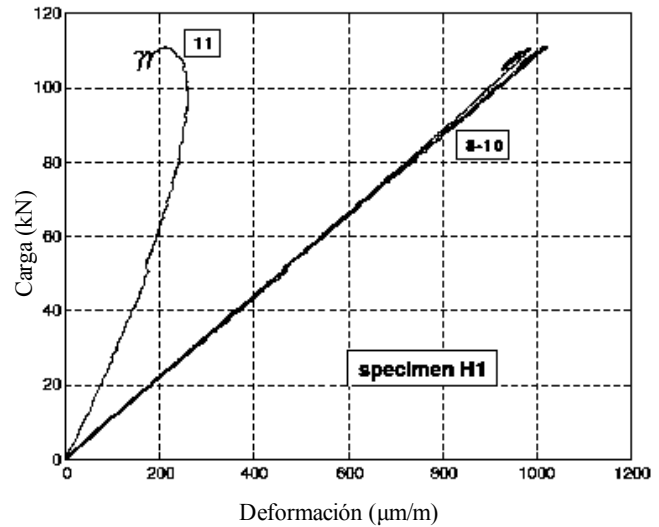


Figura 3.12 Deformación Vs carga aplicada (strain-gages 8-11) H1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

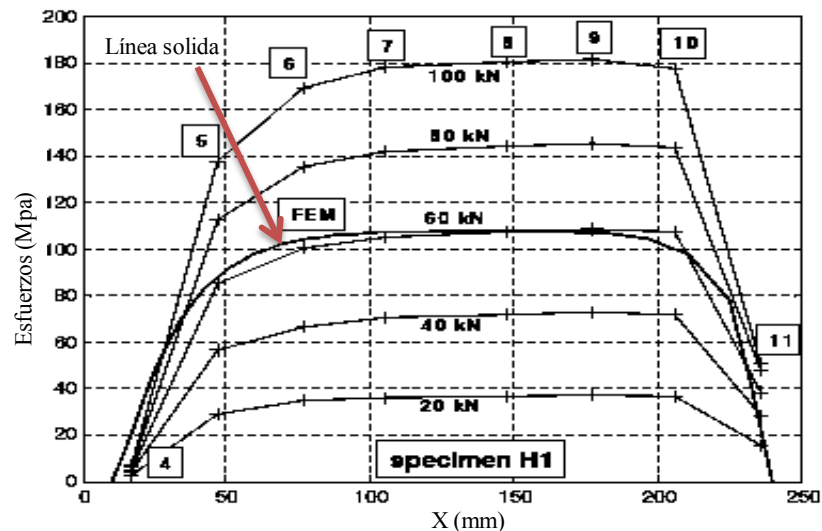


Figura 3.13 Distribución de esfuerzos con diferentes niveles de carga a lo largo de la longitud de las láminas CFRP de espécimen H1. La línea sólida indica los resultados del MEF. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

Para el espécimen H1 se reporta una falla por desadherencia de la capa adhesiva, debido a la desadherencia en los extremos del refuerzo.

Uniones de traslape doble (especímenes J1, J2 y J3):

Son placas de acero unidas con doble traslape (Figura 3.14). Las dos placas de acero utilizadas se separaron con 2 mm. En los especímenes J1 y J2 implementaron el adhesivo Sikadur

30, con un espesor de la capa adhesiva de 1.1 mm y una longitud de lámina de 620 mm y 870 mm, respectivamente; en el espécimen J3 utilizaron un adhesivo de unión Sikadur 330, con un espesor de 0.8 mm y con 500 mm de longitud de CFRP.

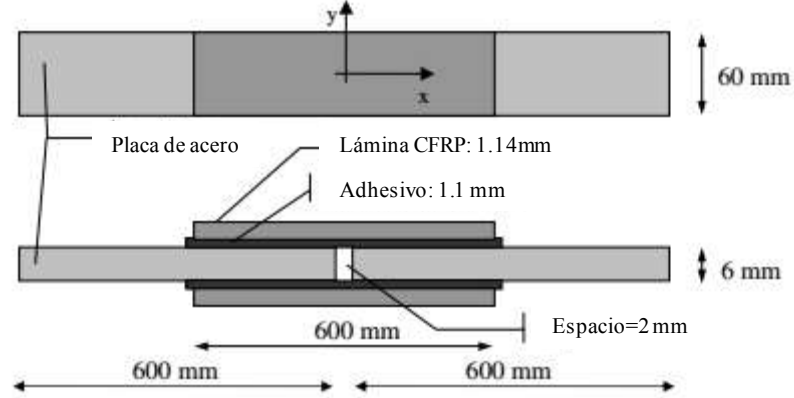


Figura 3.14 Doble unión de traslape (especimen J1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

El modo de falla correspondió a la desadherencia del adhesivo en la interface acero-adhesivo. El espécimen J3 falló antes de alcanzar la carga de fluencia de la placa de acero, ya que presentó un incremento en los esfuerzos con respecto a los dos especímenes (J1 y J2). Los especímenes J1 y J2, tuvieron delaminación compuesta, debido al desprendimiento de las CFRP. En los resultados no hubo un incremento en la carga de fluencia y existe una disminución del 10% de la carga última. Para realizar una comparación en este caso, implementaron un modelo analítico (Figura 2.15) siguiendo las hipótesis del caso anterior, el cual se define con las ecuaciones:

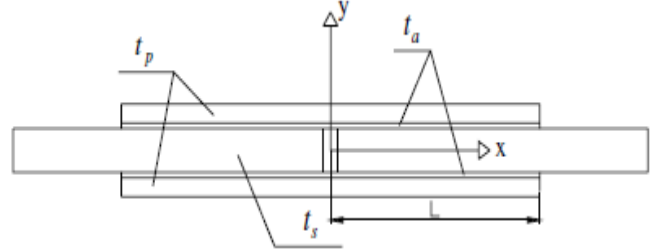


Figura 3.15 Marco de referencia para uniones de doble traslape. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

$$\tau(x) = \frac{P}{2} \left(\frac{E_s t_s}{E_s t_s + 2E_{cfrp} t_{cfrp}} \right) \lambda \left(\sinh(\lambda x) - \frac{\cosh(\lambda x)}{\tanh(\lambda L)} \right) - P \left(\frac{E_{cfrp} t_{cfrp}}{E_s t_s + 2E_{cfrp} t_{cfrp}} \right) \lambda \frac{\cosh(\lambda x)}{\sinh(\lambda L)} \quad (3.25)$$

$$\tau(x) = \frac{P}{2} \frac{t_s}{t_{cfrp}} \left(\frac{E_s}{E_s t_s + 2E_{cfrp} t_{cfrp}} \right) \left(\cosh(\lambda x) - \frac{\cosh(\lambda x)}{\tanh(\lambda L)} \right) + P \left(\frac{E_{cfrp} t_{cfrp}}{E_s t_s + 2E_{cfrp} t_{cfrp}} \right) \left(1 - \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda L)} \right) \quad (3.26)$$

Donde: $\tau(x)$, esfuerzo cortante de la capa adhesivo; $\sigma(x)$, esfuerzo a tensión en el refuerzo CFRP; P , carga de tensión aplicada por unidad de longitud; E_{cfrp} , módulo de Young de las láminas de CFRP; t_{cfrp} , espesor de las láminas de CFRP; E_s , módulo de Young de la placa de acero; t_s , espesor de la placa de acero; λ_c , factor de corrección, ecuación 34; G_a , módulo de cortante del adhesivo; t_a , espesor del adhesivo; $\sigma(x)$, esfuerzo de tensión. L , longitud de desarrollo.

Las deformaciones registradas por los strain-gages para el espécimen J1, muestran un comportamiento no-lineal sobre la fluencia del acero (Figura 3.16). La figura 3.17 muestra la comparación de los resultados analíticos con los experimentales, tomando en cuenta una carga de 60 kN en los datos experimentales, indicada con cruces, además de que encontraron una buena aproximación, también estimaron la longitud de desarrollo de 75 mm.

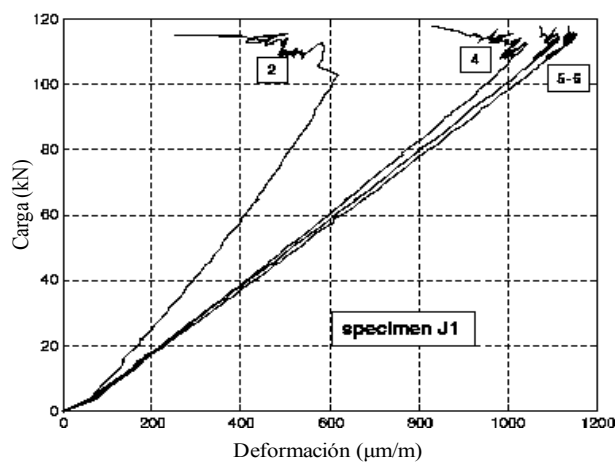


Figura 3.16 Deformación Vs carga aplicada (strain-gages 2,4-6) en el espécimen J1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

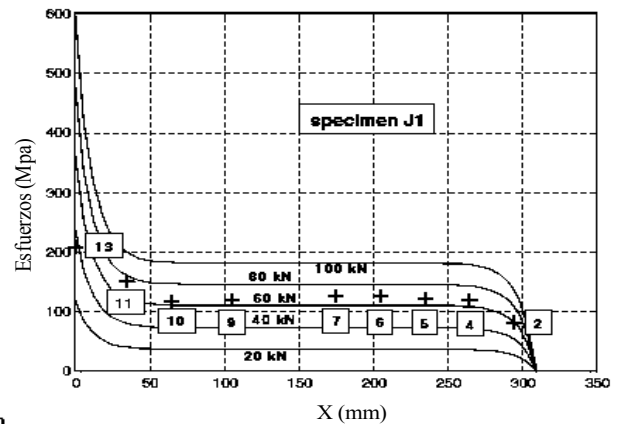


Figura 3.17 Distribución de esfuerzos con diferentes niveles de carga a lo largo de la longitud de las láminas CFRP del espécimen J1. Las cruces indican los esfuerzos registrados con un nivel de carga de 60 kN. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

En el espécimen J3 (Figura 3.18), se observa un comportamiento no-lineal (strain-gage 8) para cargas bajas. Los strain-gages (6 y 7) muestran un comportamiento lineal bajo una carga de 10.9 kN correspondiente a la delaminación de las tiras CFRP, esto es debido a las propiedades y al espesor del adhesivo.

Refuerzo en uniones atornillada (especímenes B1-B2):

Son placas de acero atornilladas y reforzadas con láminas de CFRP (Figura

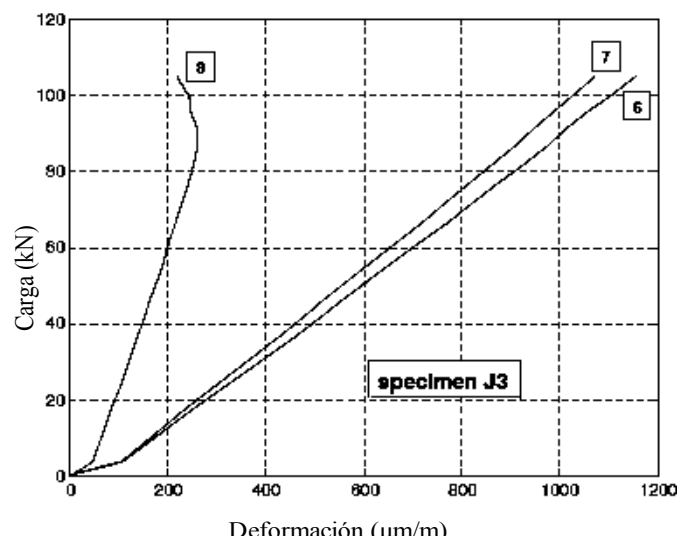


Figura 3.18 Deformación Vs carga aplicada (strain-gages 6-8) en el espécimen J3. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

3.19). En este caso se utilizaron dos placas de acero espaciadas a 5 mm, ambas atornilladas, unidas con láminas de CFRP y por último agregaron una placa de unión en la parte final a ambos lados. El espécimen B1, tiene una longitud de CFRP de 250, con un adhesivo de unión de Sikadur 330 de 0.8 de espesor. El espécimen B2 tiene 250 mm de longitud de refuerzo, un adhesivo Sikadur 30 y 1.1 mm de espesor. Los especímenes B1 y B2 fallaron por desadherencia de las láminas de refuerzo.

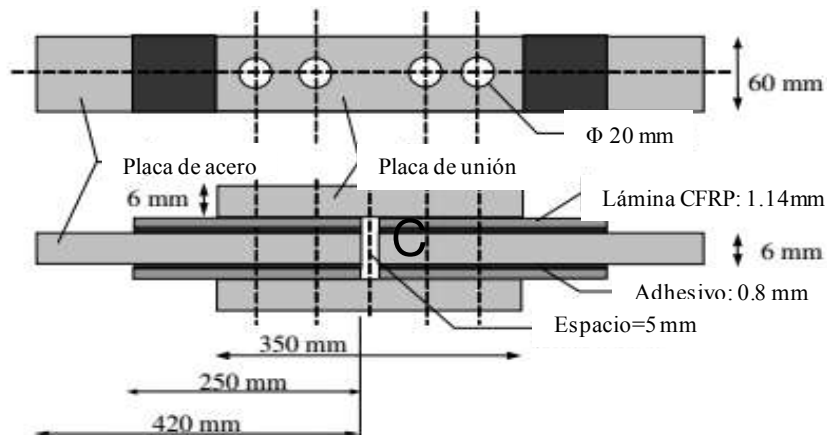


Figura 3.19 Refuerzo en uniones atornilladas (especimen B1 de la tabla 2.1). Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

En los resultados reportados por los autores, se observa un incremento en la carga última respecto al espécimen no reforzado atornillado. Además en la Figura 3.20, se observa un comportamiento lineal del espécimen B1 hasta alcanzar la carga de 84.1 kN, donde la falla compuesta se presenta por la desadherencia de las láminas de refuerzo. También se observa cómo se presenta la desunión total de las láminas. El espécimen B2 presentó un modo de falla por la delaminación compuesta, desadherencia del adhesivo, presentando dos grietas debido a la placa de unión que generan compresión sobre el refuerzo (Figura 3.21).

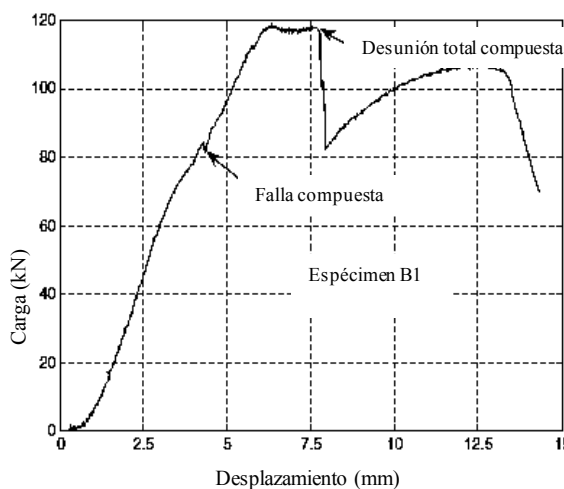


Figura 3.20 Gráfica de carga-desplazamiento del espécimen B1. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

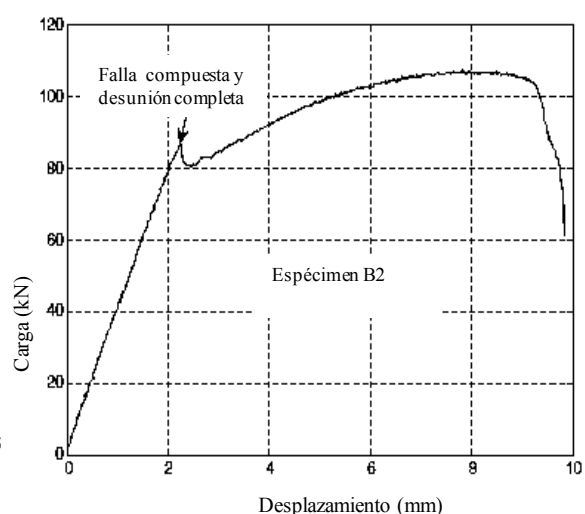


Figura 3.21 Gráfica de carga-desplazamiento del espécimen B2. Tomada de: Pierluigi Colombi y Carlo Poggi, 2005.

3.2 Resistencia y longitud efectiva del adhesivo de unión entre el acero y los CFRP

La resistencia y longitud efectiva de unión adhesiva para un sistema de placa CFRP y acero se estima a partir de los modelos teóricos de *Hart-Smith (1997)*, *Xia y Teng (2005)*. El modelo propuesto por Hart-Smith se desarrolló a partir de una prueba de tensión cortante doble, tomando dos longitudes de unión en las pruebas, de donde se estiman la resistencia máxima y longitud efectiva de unión como:

a) Especímenes con una longitud de unión más grande que la longitud efectiva de unión:

$$P_{ult} = b_{CFRP} \cdot \min\{P_i, P_o\} \quad (3.27)$$

Donde: b_{CFRP} , es el ancho de la placa CFRP; P_i y P_o , son la resistencia de unión por unidad de ancho, definidas por:

Si $E_{acero} t_{acero} < 2E_{CFRP} t_{CFRP_placa}$:

$$P_i = \sqrt{2\tau_f t_a \left(\frac{1}{2}\gamma_e + \gamma_p\right) 2E_{acero} t_{acero} \left(1 + \frac{E_{acero} t_{acero}}{2E_{CFRP} t_{CFRP_placa}}\right)} \quad (3.28)$$

Si $E_{acero} t_{acero} \geq 2E_{CFRP} t_{CFRP_placa}$:

$$P_o = \sqrt{2\tau_f t_a \left(\frac{1}{2}\gamma_e + \gamma_p\right) 4E_{CFRP} t_{CFRP_placa} \left(1 + \frac{E_{CFRP} t_{CFRP_placa}}{2E_{acero} t_{acero}}\right)} \quad (3.29)$$

La longitud efectiva de unión es:

$$L_e = \frac{P_{ult}}{2\tau_f b_{CFRP}} + \frac{2}{\lambda} \quad (3.30)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{G_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_{CFRP} t_{CFRP_placa}} + \frac{2}{E_{acero} t_{acero}} \right)} \quad (3.31)$$

Donde: E_{acero} y t_{acero} , módulo de elasticidad y espesor del acero; E_{CFRP} y t_{CFRP_placa} , módulo de elasticidad y espesor del CFRP; τ_f , esfuerzo de cortante del adhesivo; $\gamma_e = \frac{\tau_f}{G_a}$, deformación de cortante elástica del adhesivo; G_a , módulo de cortante del adhesivo; t_a , Espesor del adhesivo entre

la placa de acero y la primera capa de CFRP; γ_p , deformación de cortante plástico del adhesivo igual a:

$$\gamma_p = 3\gamma_e \quad \text{para placas de CFRP con módulo – normal} \quad (\text{Liu et al. 2005}) \quad (3.32)$$

$$\gamma_p = 5\gamma_e \quad \text{para placas de CFRP con alto} \\ \text{– módulo} \quad (\text{Wu et al. 2012}) \quad (3.33)$$

b) Especímenes con longitud de unión más corta que la longitud efectiva de unión:

$$P_{ult, L < L_e} = P_{ult} \cdot \frac{L}{L_e} \quad (3.34)$$

Las ecuaciones 3.27 a 3.34 son aplicables cuando se coloca una sola capa de CFRP en el elemento estructural de acero; sin embargo, existe la posibilidad de utilizar un mayor número de capas de CFRP unidas entre sí mediante adhesivo, para lo cual se modifican las ecuaciones como función de éste parámetro, el cambio conduce al modelo conocido como modelo *modificado de Hart-Smith* (Fawzia et al. 2006), donde siguen siendo aplicables las ecuaciones 3.27 a 3.34 una vez modificados los espesores del CFRP y del adhesivo como:

$$t_a = t_{a_capa} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (t_{cfrp} - t_{acero})}{n} - t_{cfrp_lámina} \quad (3.35)$$

$$t_{cfrp_placa} = n \cdot t_{cfrp_lámina} + (n - 1) \cdot t_{a_capa} \quad (3.36)$$

El segundo modelo Xia y Teng (propuesto por Xia y Teng 2005 y Yu et al. 2012), consideró solamente un caso de longitud de unión en las pruebas, donde se determinó que la resistencia máxima y longitud efectiva de unión se pueden estimar con:

c) Especímenes con longitud de unión mayor que la longitud efectiva de unión:

$$P_{ult} = b_{cfrp} \sqrt{2E_{CFRP} t_{cfrp_placa} G_f} \quad (3.37)$$

donde G_f es la energía de fractura desarrollada en la interfase, esta queda definida por el área que se encuentra bajo la curva unión-desplazamiento. Como ejemplo de la figura 3.1 podemos decir lo siguiente:

$$G_f = \frac{1}{2} \tau_f \delta_f \quad \text{para adhesivos lineales} \quad (3.38)$$

$$G_f = \frac{1}{2} \tau_f (\delta_f + \delta_2 - \delta_1) \quad \text{para adhesivos no – lineales} \quad (3.39)$$

δ_2 : Desplazamiento en el extremo de la meseta.

La longitud efectiva de unión se determina de acuerdo a la propuesta de Yuan et al (2004):

$$L_e = \frac{\pi}{2 \sqrt{\frac{\tau_f}{E_{cfrp} t_{cfrp_placa} \delta_f}}} \quad (3.40)$$

Donde: E_{cfrp} , módulo de elasticidad del CFRP; t_{cfrp_placa} , espesor de la placa de CFRP; τ_f , esfuerzo de cortante máximo; δ_f , Desplazamiento máximo; δ_2 , Desplazamiento en el extremo de la meseta; T_{cfrp} , es el espesor promedio de la capa de adhesivo.

3.2.1 Efecto de la temperatura en la resistencia de unión entre el acero y los CFRP

El comportamiento del material de refuerzo depende de si están expuesto a temperaturas altas o bajas. En temperaturas bajas, el comportamiento del refuerzo es frágil (las fibras se rompen cuando ésta disminuye), el módulo de elasticidad aumenta cuando la temperatura disminuye, por lo que no hay un efecto significativo en la resistencia de unión. En temperaturas altas, el adhesivo de unión tiende ablandarse produciendo una disminución en la resistencia de unión. Para considerar el efecto de temperaturas elevadas, Nguyen et al. (2011) desarrollaron un modelo basado en las propiedades mecánicas del adhesivo que dependen de la temperatura, acoplado al modelo Hart-Smith para describir el cambio de la longitud efectiva, la resistencia y rigidez de la unión. Las propiedades mecánicas del adhesivo se obtiene como:

$$C_m = C_{inicial}(1 - \alpha_g) + C_{final}\alpha_g \quad (3.41)$$

Donde: C_m , propiedad del material, dominado por la resina como módulo de flexión, módulo de cortante o resistencia al corte; $C_{inicial}$, es la propiedad en estado inicial (temperatura ambiente); C_{final} , es la propiedad en estado final (después de la temperatura vítrea). Este valor es cero debido a que la prueba de DMTA, por sus siglas en ingles (Dynamic Mechanical Thermal Analysis), revelo que después de la transición vítrea el módulo del epoxi era insignificante; α_g , es el grado de conversión de la transición vítrea, determinada por la ecuación de Arrhenius:

$$\frac{d\alpha_g}{dT} = \frac{A_g}{\beta} \exp\left(\frac{-E_{A,g}}{RT}\right) (1 - \alpha_g) \quad (3.42)$$

Donde: A_g , factor preexponencial; β , constante de la relación de calor; $E_{A,g}$, energía de activación, que es una constante para la transición vítrea; T , temperatura (K); R_g , constante universal de gas (8.314 J/mol.K y 115.36 kJ/mol)

De acuerdo al modelo Hart-Smith, a una cierta temperatura T , la carga última es:

$$P_{ult}(T) = b_{CFRP} \cdot \min\{P_i(T), P_o(T)\} \quad (3.43)$$

Donde: b_{cfrp} , ancho de la placa CFRP; P_i y P_o , son la resistencia de unión por unidad de ancho, definidas como:

Si $E_{acero} t_{acero} < 2E_{CFRP} t_{CFRP_placa}$:

$$P_i(T) = \sqrt{2\tau_f(T)t_a \left(\frac{1}{2}\gamma_e(T) + \gamma_p(T) \right) 2E_{acero} t_{acero} \left(1 + \frac{E_{acero} t_{acero}}{2E_{cfrp} t_{cfrp_placa}} \right)} \quad (3.44)$$

Si $E_{acero} t_{acero} \geq 2E_{cfrp} t_{cfrp_placa}$:

$$P_o(T) = \sqrt{2\tau_f(T)t_a \left(\frac{1}{2}\gamma_e(T) + \gamma_p(T) \right) 4E_{cfrp} t_{cfrp_placa} \left(1 + \frac{E_{cfrp} t_{cfrp_placa}}{2E_{acero} t_{acero}} \right)} \quad (3.45)$$

La longitud efectiva de unión es:

$$L_e(T) = \frac{P_{ult}(T)}{2\tau_f(T)b_{cfrp}} + \frac{2}{\lambda(T)} \quad (3.46)$$

$$\lambda(T) = \sqrt{\frac{G_a(T)}{t_a} \left(\frac{1}{E_{cfrp} t_{cfrp_placa}} + \frac{2}{E_{acero} t_{acero}} \right)} \quad (3.47)$$

Donde: E_{acero} y t_{acero} , son el módulo de elasticidad y espesor del acero; E_{cfrp} y t_{cfrp_placa} , son el módulo de elasticidad y espesor del CFRP; τ_f , es el esfuerzo de cortante del adhesivo; $\gamma_e = \frac{\tau_f(T)}{G_a(T)}$, es la deformación de cortante elástica del adhesivo; $G_a(T)$, es el módulo de cortante del adhesivo; t_a , es el espesor del adhesivo entre la placa de acero y la primera capa de CFRP; $\gamma_p(T)$, es la deformación de cortante plástica del adhesivo, donde puede tomarse igual a:

$$\gamma_p(T) = 3\gamma_e(T) \quad \text{para placas de CFRP con módulo – normal} \quad (3.48)$$

$$\gamma_p = 5\gamma_e \quad \text{para placas de CFRP con alto – módulo} \quad (3.49)$$

La resistencia de unión, para especímenes con una longitud de unión (L) más corta que la longitud efectiva $L_e(T)$ es:

$$P_{ult,L < L_e}(T) = P_{ult}(T) \cdot \frac{L}{L_e(T)} \quad (3.50)$$

3.3 Esfuerzos en la interfase en vigas IR reforzadas con placas de CFRP

Los esfuerzos en la interfase en vigas IR con placas CFRP (Figura 3.22) se deben a la concentración de esfuerzos en la zona final de la placa de refuerzo, produciendo una falla por desadherencia final. Varios investigadores han realizado estudios sobre el comportamiento de los esfuerzos en placas vigas y adhesivos con un comportamiento elástico-lineal. Zhang y Teng (2010) desarrollaron una solución analítica para los esfuerzos en la interfase en vigas cajón, aplicable para cualquier condición de carga. Además, en esta solución la deformación axial y de flexión son incluidos en la viga original y en la placa reforzada. Las deformaciones de cortante de los dos elementos no son consideradas debido a que su efecto es pequeño. Basados en esta solución, los esfuerzos cortantes en la interfase en una viga de sección IR con una sección transversal se obtiene con la ecuación 3.51.

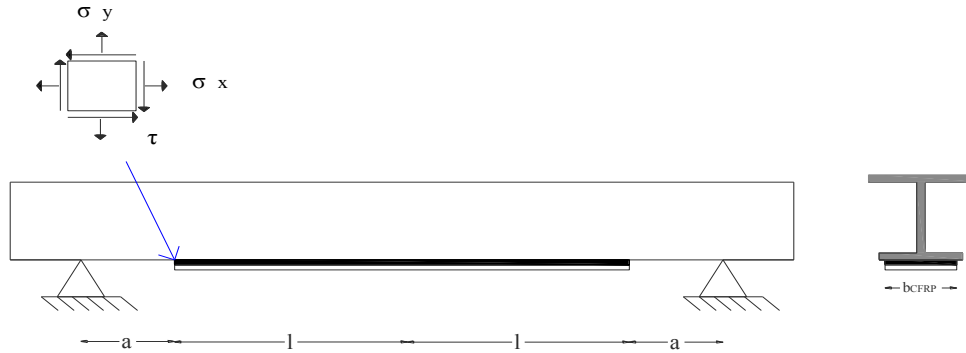


Figura 3.22 Esfuerzos axiales y cortante en la interfase acero y CFRP, en una viga de acero simplemente apoyada.

$$\tau(x) = \frac{S_1}{b_{cfrp}} \left[S_2 V(x) + \frac{dN(x)}{dx} \right] + \frac{S_1 (S_2 M_0 + N_0) k_s}{E_{cfrp} A_{cfrp} \lambda} e^{-\lambda x} \quad (3.51)$$

Donde: M_0 , es el momento flexionante; N_0 , es la fuerza axial actuante en la sección de la placa final; $V(x)$, es la fuerza cortante; $N(x)$, es la fuerza axial actuante en la sección de estudio; S_1 y S_2 son obtenidos por:

$$S_1 = \frac{E_{cfrp}A_{cfrp}}{E_{cfrp}A_{cfrp} + E_1A_1} \quad (3.52)$$

$$S_2 = \frac{(y_1 + y_2 + t_a)E_1A_1}{(EI)_{comp}} \quad (3.53)$$

$$(EI)_{comp} = E_1I_1 + E_{cfrp}I_{cfrp} + \frac{E_1A_1E_{cfrp}A_{cfrp}(y_1 + y_2 + t_a)^2}{E_1A_1 + E_{cfrp}A_{cfrp}} \quad (3.54)$$

Donde: y_1 , es la distancia de la superficie inferior del patín inferior para su eje neutro; y_2 , es la distancia de la superficie superior de la placa CFRP para su eje neutro; K_s , es la rigidez cortante de la capa adhesiva y se obtiene como:

$$K_s = \frac{G_a}{t_a} \quad (3.55)$$

λ , es dado por:

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_s}{E_{cfrp}t_{cfrp}}} \quad (3.56)$$

La solución para los esfuerzos normales en la interfase se definen con:

$$\sigma_n(x) = -K_n e^{-\beta x} [D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x)] + \frac{d\tau(x)}{dx} y_2 \quad (3.57)$$

En donde:

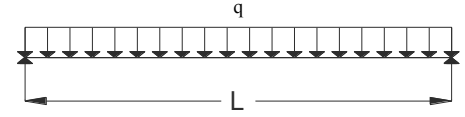
$$K_n = \frac{E_a}{t_a} \quad (3.58)$$

$$\beta^4 = \frac{K_n b_2}{4E_{cfrp}I_{cfrp}} \quad (3.59)$$

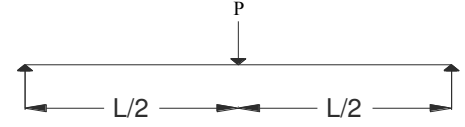
$$D_1 = \frac{V_{20} + \beta M_{20}}{2E_{cfrp}I_{cfrp}\beta^3} \quad (3.60)$$

$$D_2 = \frac{M_{20}}{2E_{cfrp}I_{cfrp}\beta^2} \quad (3.61)$$

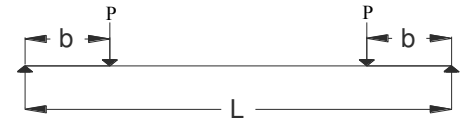
$$M_{20} = M_0 \left(\frac{E_{cfrp}I_{cfrp}}{E_1I_1 + E_{cfrp}I_{cfrp}} \right) \quad (3.62)$$



a) Carga distribuida



b) Carga Puntual



c) Dos cargas puntuales ($b > a$)

Figura 3.23 Condiciones de carga, donde $L = l + a$.

$$V_{20} = \frac{\tau_0 A_{cfrp}}{2} \quad (3.63)$$

La fuerza cortante $[V_{(x)}]$ y momento flexionante $[M_{(x)}]$ para tres condiciones de carga (Figura 3.23) son:

a) Carga distribuida en toda la longitud de la viga:

$$V_{(x)} = q \left(\frac{L}{2} - x - a \right) \quad 0 \leq x < \frac{L}{2} - a \quad (3.64)$$

$$M_{(x)} = \frac{qL}{2} (x + a) - \frac{q}{2} (x + a)^2 \quad 0 \leq x < \frac{L}{2} - a \quad (3.65)$$

b) Carga puntual aplicada al centro del claro de la viga:

$$V_{(x)} = \frac{P}{2} \quad 0 \leq x < \frac{L}{2} - a \quad (3.66)$$

$$M_{(x)} = \frac{P}{2} (a + x) \quad 0 \leq x < \frac{L}{2} - a \quad (3.67)$$

c) Dos cargas puntuales:

$$V_{(x)} = \begin{cases} P & 0 \leq x < b - a \\ 0 & b - a \leq x < \frac{L}{2} \end{cases} \quad (3.68)$$

$$M_{(x)} = \begin{cases} P(x + a) & 0 \leq x < b - a \\ 0 & b - a \leq x < \frac{L}{2} \end{cases} \quad (3.69)$$

La fuerza axial $N_{(x)}$, es cero para las tres condiciones de carga. Donde, $L=l+a$.

El esfuerzo normal máximo y el esfuerzo cortante máximo se predicen cuando ocurre la desadherencia al final del laminado CFRP. Además, los esfuerzos máximos en la interfase nos ayudan a predecir la carga de desadherencia final.

3.4 Modos de falla de un elemento de acero reforzado con CFRP sometido a tensión

Los modos de falla en un elemento de acero con CFRP (Figura 3.24) sometido a tensión dependen de la resistencia a tensión del material compuesto, es decir, del tipo de módulo de elasticidad, normal alto, espesor del adhesivo en placas de CFRP y la fluencia del elemento de acero. Si las láminas de CFRP tienen un módulo de elasticidad normal (aproximadamente 250 GPa) se suelen presentar dos tipos de falla: por adhesión entre el acero y el adhesivo, o por delaminación de las láminas de CFRP (alrededor de 640 GPa), también pueden presentarse las dos al mismo tiempo. Si las láminas de CFRP son de alto-módulo de elasticidad se presenta con mayor frecuencia la falla por ruptura de las láminas de CFRP. Los modos de falla en un elemento de acero reforzado con CFRP a tensión son los siguientes:

1. Falla de adhesión entre el acero y el adhesivo.
2. Falla de cohesión (falla la capa de adhesivo).
3. Falla de adhesión entre el CFRP y el adhesivo.
4. Delaminación del CFRP (separación de algunas fibras de carbono de la matriz de resina).
5. Ruptura del CFRP.
6. Fluencia del acero.

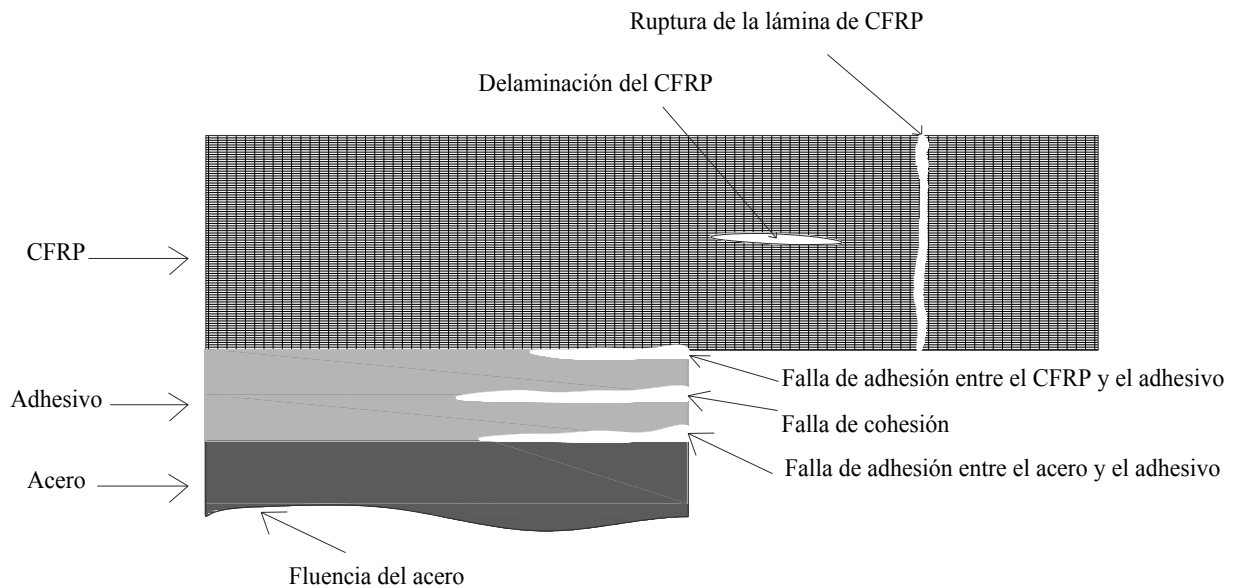


Figura 3.24 Modos de falla en un elemento de acero reforzado con CFRP, sometido a tensión.

3.5 Modos de falla en vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

Los modos de falla que pueden presentarse en vigas de acero y compuestas, acero-concreto, reforzadas con CFRP se definen como falla en el plano (flexión, desadherencia final e intermedia), falla por pandeo local y lateral.

3.5.1 Falla en el plano

a) Flexión

La flexión en el plano, en vigas de acero y de hierro forjado (Figura 3.25a), la falla se presenta cuando la deformación a tensión de la fibra extrema en la lámina CFRP alcanza su deformación por ruptura. En vigas de hierro fundido (Figura 3.25b), donde tienen una falla frágil producida por tensión, el refuerzo de CFRP se coloca para reducir los esfuerzos generados por las cargas viga y

muerta. En vigas compuestas acero-concreto, la falla se presenta de dos formas, por aplastamiento del concreto si el módulo de la lámina CFRP es normal y por ruptura a tensión de las láminas si el módulo de elasticidad de las láminas CFRP es alto (Figura 3.26).

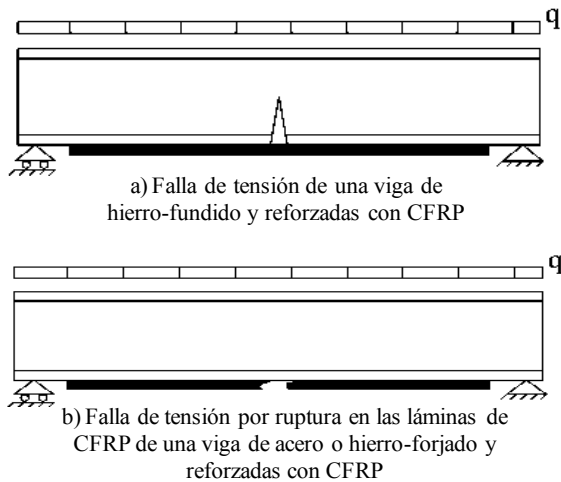


Figura 3.25 Falla a flexión de una viga compuesta acero-concreto (falla de las láminas de CFRP por ruptura). Tomada de: CNR-DT 2002/2005.



Figura 3.26 Modos de falla de vigas IR reforzadas con CFRP. Tomadas de: FRP-Strengthened Metallic Structures, Xiao-Ling Zhao, 2014.

b) Desadherencia Final

Cuando el patín inferior se encuentra a tensión se produce un mecanismo de falla por desprendimiento en los extremos de la lámina de CFRP (Figura 3.27a), esto ocurre porque los esfuerzos que se concentran en la parte extrema de la lámina requieren ser transferidos a la viga; también, existe la presencia de esfuerzos cortantes en las zonas extremas del refuerzo. La falla de desadherencia final se presenta tanto en vigas de acero como en vigas compuestas, acero-concreto. En la Figura 2.10a se muestra la falla por desadherencia final de una viga de acero reforzada con CFRP.

c) Desadherencia intermedia

Éste modo de falla se debe principalmente al daño localizado en una zona de la viga donde el momento flexionante es grande, generándose agrietamiento o fluencia en el acero. Los esfuerzos concentrados en la zona de daño se desplazan a hacia uno de los extremos de la lámina CFRP, donde los esfuerzos axiales son bajos, generando una falla frágil como se muestra en la Figura 3.27b.



a) Desadherencia final

b) Desadherencia intermedia en una viga agrietada

Figura 3.27 Modos de falla por desadherencia en vigas IR reforzadas con CFRP. Tomadas de: *FRP-Strengthened Metallic Structures*, Xiao-Ling Zhao, 2014.

3.5.2 Falla por pandeo lateral

Este tipo de falla se presenta cuando la viga no tiene soporte lateral efectivo y por lo tanto presenta una baja capacidad de resistencia a flexión, es decir no es capaz de soportar deformaciones torsionales fuera del plano de flexión. Esto sucede en vigas esbeltas y en vigas que no tienen soportes laterales adecuados. En vigas compuestas, acero-concreto, el pandeo lateral se evita en toda su longitud siempre y cuando estas se encuentren simplemente apoyadas, ya que la presencia de la losa de concreto da un soporte lateral continuo en toda la longitud de la viga; sin embargo debe tenerse cuidado de que se tenga la zonas de momento negativo un adecuado soporte lateral.

3.5.3 Falla por pandeo local y falla por cortante

La falla por pandeo local se puede presentar en el alma (Figura 3.28a) o en el patín de la viga. El efecto se presenta en elementos de la sección transversal muy esbeltos, donde generalmente se refuerza el patín de tensión con CFRP. La falla por cortante en vigas, se debe al incremento de cargas verticales (Figura 3.28b). Las almas se refuerzan con CFRP para disminuir los esfuerzos cortantes en esta zona de la sección transversal e incrementar la capacidad a carga vertical. Existen vigas antiguas donde se han presentado fallas por cortante o pandeo local, y que además resulta imposible reemplazar los elementos por su valor histórico, por lo que se opta por reforzarlos con CFRP. En estas vigas reforzadas también se pueden presentar los modos de fallas antes descritos: desadherencia final, intermedia, flexión y pandeo lateral.

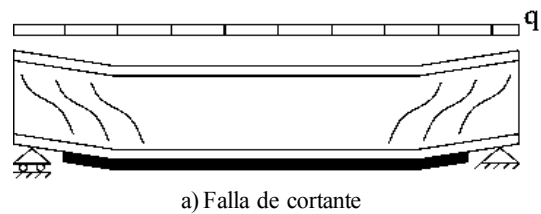
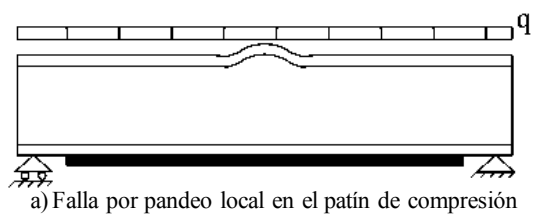


Figura 3.28 Falla por pandeo local y cortante en vigas existente reforzadas con CFRP. Tomada de: CNR-DT 2002/2005.

4

C A P Í T U L O

Resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas acero-concreto reforzadas con CFRP

En este capítulo se hace referencia al comportamiento mecánico de una viga de acero y compuesta, acero-concreto, sin y con refuerzo CFRP. También, se describe la capacidad a flexión de los elementos mencionados sin refuerzo de acuerdo a las Normas Técnicas del Distrito Federal para Estructuras Metálicas, así como la capacidad a flexión de vigas IR reforzadas con CFRP de acuerdo a lo establecido en las guías de diseño presentes y a las investigaciones realizadas, tomando en cuenta los diferentes modos de falla presentes en estos elementos.

4.1 Aspectos generales

El hierro forjado (a finales del siglo XIII) y fundido (a principios del siglo XIX), se utilizaba principalmente para la elaboración de herramientas, para las vías ferroviarias y en puentes. Con el avance tecnológico en el área de los materiales se logró desarrollar el acero estructural, reemplazando así al hierro forjado y fundido principalmente porque se necesitaba una menor temperatura de fundición, resultaba más económico y con mejores propiedades mecánicas.

El éxito del acero en elementos estructurales se debe a sus propiedades mecánicas: alta resistencia tanto a tensión como a compresión, alto módulo de elasticidad, dúctil por naturaleza, presenta un comportamiento estable ante cambios de carga, además de ser fácil de fabricar. Las propiedades mecánicas dependen del proceso de laminación, velocidad de enfriamiento, tratamiento térmico, composición química, entre otras. En la industria de la construcción existe una gran variedad de tipos y grados de acero estructural disponibles para cubrir las necesidades y demandas del cliente.

4.2 Propiedades mecánicas del acero

Las propiedades mecánicas se pueden obtener de un ensayo de tensión, que consiste en someter una barra de acero a carga axial, donde se registra a cada incremento de carga el esfuerzo y la deformación asociada desde el nivel de carga cero hasta la falla, los datos registrados generalmente se grafican asignando en el eje de las ordenadas los esfuerzos, y en el eje de las abscisas las deformaciones. Por medio de ésta información se estiman los esfuerzos axiales (f) como la relación de la carga de tensión (P) entre el área de la sección transversal original (A), y las deformaciones unitarias axiales (ϵ) definidas por el cambio de longitud (ΔL) entre la longitud del espécimen (L). El área de la sección transversal se reduce durante el proceso de carga, la cual se utiliza para determinar la deformación total y la resistencia a la ruptura.

Las propiedades mecánicas que se obtienen de un diagrama esfuerzo-deformación unitaria (Figura 4.1) son el límite de proporcionalidad, el módulo de elasticidad, el punto de fluencia superior e inferior, las deformaciones unitaria y última del elemento. También, se pueden determinar otras propiedades de interés para el proceso de diseño como son la *resistencia*: esfuerzo de fluencia, σ_y , esfuerzo último, σ_u , y esfuerzo de fractura o rotura, σ_F . La *rigidez* se representa por medio del módulo de elasticidad, y la *ductilidad*. La ductilidad se estima con el *alargamiento porcentual* y el *porcentaje de reducción de área*. El valor de las propiedades es función de la composición química del acero (Figura 4.2).

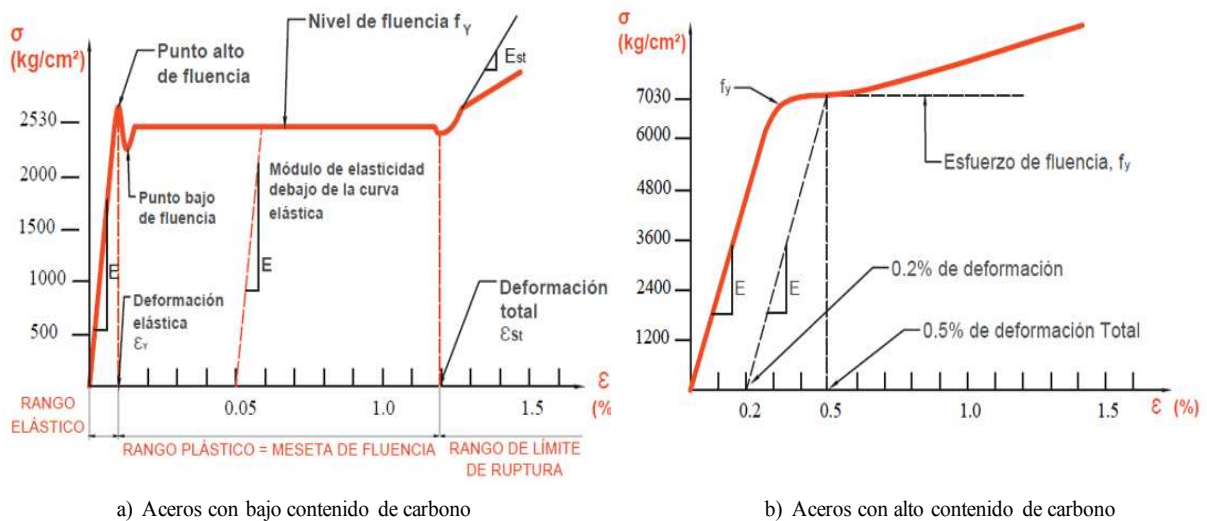


Figura 4.1 Curva esfuerzo-deformación para aceros con diferentes contenidos de carbono. Tomadas de: Instituto Mexicano de la Construcción en el Acero (IMCA), 2010.

Los componentes principales del acero son el hierro y el carbono, el último en pequeñas proporciones ayuda en la resistencia pero disminuye la ductilidad. Para mejorar las propiedades mecánicas del acero se incorporan otros elementos como el cobre, manganeso, níquel, cromo,

molibdeno y silicio. Por lo que de acuerdo a su composición química, el acero estructural se agrupa en *aceros simples al carbono*, con menos del 1% de carbono (Figura 4.1a); *aceros de baja aleación*, con una ductilidad baja por causa de componentes adicionales (Figura 4.1b); y *aceros de alta resistencia*, caracterizados por contener cantidades mayores de hierro y carbono, así como ser resistentes a la corrosión.

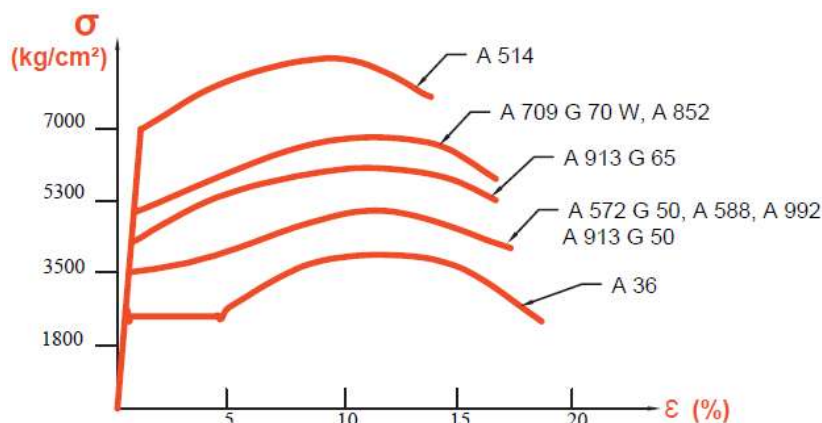


Figura 4.2 Curvas esfuerzo-deformación de algunas calidades de acero.
Tomadas de: Instituto Mexicano de la Construcción en el Acero (IMCA), 2010.

4.3 Comportamiento de vigas IR de acero a flexión

Las vigas IR de acero estructural son elementos que soportan cargas perpendiculares a su eje longitudinal, originando principalmente esfuerzos de flexión en su sección transversal. Este tipo de sección transversal se considera dentro las más apropiadas para resistir esfuerzos de flexión, siempre y cuando sea clasificada como una sección compacta, donde no se presentarán problemas de pandeo local; además, las secciones IR son las más usadas y fáciles de adquirir en el mercado. Los patines superior e inferior del elemento se encuentran sometidos, respectivamente, a fuerzas de compresión y tensión, mientras que el alma de la viga está completamente sujeta a los efectos de la flexión.

La figura 4.3 muestra el comportamiento de una viga sometida a una carga concentrada en el centro del claro, generando con ello esfuerzo de flexión en su sección transversal. Si analizamos el comportamiento de la sección transversal cuando la carga se incrementa gradualmente, observaríamos inicialmente un comportamiento elástico de la sección transversal (Figura 4.3b), donde los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones. Cuando el incremento de la carga es tal que el esfuerzo a que se ven sometidas las fibras extremas de la sección transversal es igual al esfuerzo máximo de fluencia, se dice que la sección comienza a fluir (Figura 4.3b). Si la carga sigue aumentando, en una mayor profundidad de la sección transversal los esfuerzos son iguales a los de fluencia hasta que casi toda el alma de la sección transversal está sujeta a estos esfuerzos, es cuando se produce un mecanismo de fluencia en el alma (Figura 4.3d), para después generar lo que se

conoce como la formación de una articulación plástica en una longitud definida de la viga, en este caso corresponde al centro del claro (Figura 4.3e).

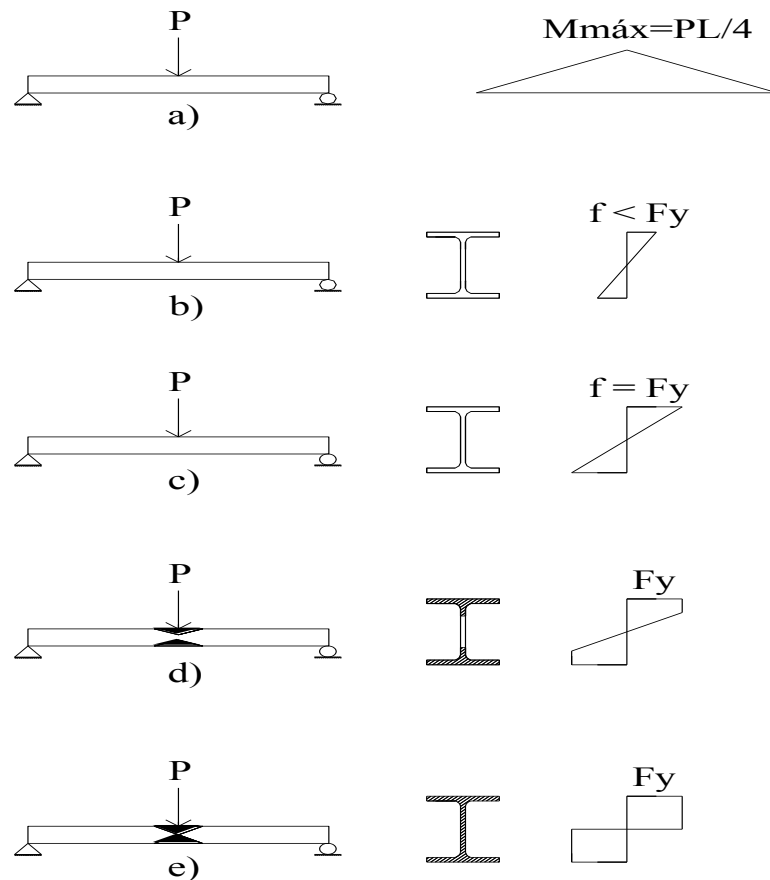


Figura 4.3 Diagrama de distribución de esfuerzos en una viga sometida a flexión.

4.4 Resistencia de diseño a flexión de vigas IR de acero

Antes de diseñar las vigas IR, se tiene que revisar el tipo de sección estructural de acuerdo a las relaciones ancho/grueso del patín y del alma en flexión, para así evitar el pandeo local. De acuerdo a las Normas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, sección 4.3, se clasifican en cuatro tipos de secciones. *Secciones tipo 1* son secciones compactas, donde éstas alcanzan la plastificación total y tienen grandes deformaciones inelásticas hasta formar una articulación plástica. *Secciones tipo 2* son secciones compactas y también alcanzan la plastificación, pero con una limitación en la rotación inelástica. *Secciones tipo 3* son no compactas, solo alcanzan el momento correspondiente a la iniciación de la primera fluencia y no son capaces de generar una articulación plástica. *Secciones tipo 4* son esbeltas, pierden su capacidad de carga antes de presentar la primera fluencia y no tienen capacidad de rotación inelástica post pandeo.

Para el cálculo de la resistencia a flexión de vigas IR, se considera los casos de pandeo lateral o sin la presencia de éste. Cuando el patín sujeto a compresión está soportado lateralmente en forma continua, no se tiene pandeo lateral; pero si éste está soportado solamente mediante puntos de sujeción lateral es necesario revisar que $L < L_u$, donde L es la distancia entre sujeción lateral y L_u es la longitud máxima no soportada, la cual depende exclusivamente de las propiedades geométricas y del material del elemento, evitando el mecanismo de falla por pandeo lateral.

Para revisar esta condición, se tienen que estimar los valores de L y L_u , el primero es definido por el diseñador y el segundo se estima con la ecuación 4.1.

$$L_u = \frac{\sqrt{2}\pi}{X_u} \sqrt{\frac{EC_a}{GJ}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_u^2}} \quad (4.1)$$

Donde: E , es el módulo de elasticidad del acero; G , es el módulo de elasticidad al esfuerzo cortante; J , es la constante de torsión; F_y , es el esfuerzo de fluencia; Z , es el módulo de sección plástico; I_y , momento de inercia respecto al eje de simetría situado en el plano del alma; C_a , es la constante de alabeo de la sección; X_u , es un valor límite de aplicación definido por:

$$X_u = 4.293C \frac{ZF_y}{GJ} \sqrt{\frac{C_a}{I_y}} = 3.220X_r \quad (4.2)$$

X_r , es un valor límite de aplicación definido por:

$$X_r = \frac{4}{3}C \frac{ZF_y}{GJ} \sqrt{\frac{C_a}{I_y}} \quad (4.3)$$

C , es un valor constante que puede tomarse igual a:

$$C = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \quad \text{para tramos que se flexionan en curvatura simple} \quad (4.4)$$

$$C = 0.6 - 0.4 \frac{M_1}{M_2} \quad \text{para tramos que se flexionan en curvatura doble y } C \text{ no menor a } 0.4 \quad (4.5)$$

$$C=1 \quad \text{cuando el Momento flexionante es mayor que } M_2 \quad (4.6)$$

M_1 y M_2 son respectivamente, el menor y el mayor de los momentos en los extremos del tramo en estudio, en valor absoluto.

4.4.1 Miembros en los que el pandeo lateral no es crítico ($L < L_u$)

La resistencia de diseño a flexión (M_R) para elementos donde no existe pandeo lateral, se definen de acuerdo al tipo de clasificación de su sección transversal como:

1. Secciones tipo 1 o 2

$$M_R = F_R Z F_R = F_R M_p \leq F_R (1.5 M_y) \quad (4.7)$$

Donde: F_R , es el factor de resistencia (0.9); Z , es el módulo de sección plástico; $M_p = Z F_y$, es el momento plástico resistente nominal de la sección IR.

2. Para secciones tipo 3

$$M_R = F_R S F_y = F_R M_y \quad (4.8)$$

Donde: S , es el módulo de sección elástico; $M_y = S F_y$, es el momento nominal a la iniciación de la fluencia en la sección IR.

3. Para secciones tipo 4

Para este tipo de sección se consideran los siguientes casos:

Cuando el alma y patín comprimido son tipo 4, el M_R se determina con los criterios de perfiles de lámina delgada doblados en frío [12].

Cuando los patines cumplen los requisitos de las secciones 1, 2 y 3 y las almas son tipo 4, el M_R es:

$$M'_R = M_R \left[1 - \frac{a_r}{1200 + 300a_r} \left(\frac{h}{t} - 5.6 \sqrt{\frac{E S}{M_R}} \right) \right] \leq M_R \quad (4.9)$$

Donde: a_r , es el cociente de las áreas del alma y del patín comprimido ($a_r < 10$); h , peralte del alma; t , es el espesor del alma; S , es el módulo de la sección completa, respecto al patín comprimido; E , es el módulo de elasticidad; M_R , es la resistencia de diseño en flexión calculado con la ecuación 4.6 o 4.7; M'_R , es el momento resistente reducido por esbeltez del alma.

Cuando el alma cumple los requisitos de las secciones tipo 1,2 o 3, y los patines son tipo 4, el M_R es:

$$M_R = F_R S_e F_y \quad (4.10)$$

Donde: S_e , es el módulo de sección elástico efectivo del elemento; F_y , es el esfuerzo de fluencia; F_R , es el factor de resistencia (0.9).

4.4.2 Miembros en los que el pandeo lateral es crítico ($L > L_u$)

Vigas, cuyas secciones transversales están soportadas lateralmente a una separación mayor que L_u . La resistencia a flexión (M_R) de estos elementos se estima como:

- a) Secciones tipo 1 ó 2 con dos ejes de simetría, flexionadas alrededor del eje de mayor momento de inercia:

$$\text{Si } M_u > \frac{2}{3}M_P \Rightarrow M_R = 1.15F_R M_P \left(1 - \frac{0.28M_P}{M_u}\right) \leq F_R M_P \quad \text{para } L \leq L_r \quad (4.11)$$

$$\text{Si } M_u \leq \frac{2}{3}M_P \Rightarrow M_R = F_R M_u \quad \text{para } L > L_r \quad (4.12)$$

Donde: M_P , es el momento plástico de la sección; F_R , factor de resistencia (0.9); I_y , momento de inercia respecto al eje de simetría situado en el plano del alma; J , constante de torsión; C_a , constante de torsión por alabeo de la sección; C , es un valor constante que puede tomarse con la ecuación 4.4, 4.5 y 4.6; M_u , es el momento nominal de la sección cuando el pandeo lateral se inicia en el intervalo elástico, definido por:

$$M_u = \frac{\pi}{C L} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y C_a} = \frac{\pi E}{C L} \sqrt{I_y \left[\frac{J}{2.6} + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 C_a\right]} \quad (4.13)$$

L_r , es la longitud que separa los intervalos de aplicación de la ecuación 4.11 y 4.12 y se obtiene con la siguiente expresión:

$$L_r = \frac{\sqrt{2}\pi}{X_r} \sqrt{\frac{EC_a}{GJ}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_r^2}} \quad (4.14)$$

X_u y X_r , son límites de aplicación de la ecuación 4.1 y 4.14 definidos con:

$$X_u = 4.293C \frac{ZF_y}{GJ} \sqrt{\frac{C_a}{I_y}} = 3.220X_r \quad (4.15)$$

$$X_r = \frac{4}{3}C \frac{ZF_y}{GJ} \sqrt{\frac{C_a}{I_y}} \quad (4.16)$$

- b) Secciones tipo 3 o 4 con dos ejes de simetría, flexionadas alrededor del eje de mayor momento de inercia:

$$\text{Si } M_u > \frac{2}{3}M_y \Rightarrow M_R = 1.15F_R M_y \left(1 - \frac{0.28M_y}{M_u}\right) \quad (4.17)$$

$$\text{Si } M_u \leq \frac{2}{3}M_y \Rightarrow M_R = F_R M_u \quad (4.18)$$

Donde: M_u , es el momento nominal de la sección y se determina con la ecuación 2.13; $M_y = S F_y$, es el momento nominal correspondiente a la iniciación de la fluencia de la sección; S , es el módulo de sección; F_y , es el esfuerzo de fluencia; F_R , es el factor de resistencia (0.9).

4.5 Resistencia diseño a flexión de vigas IR compuestas

Para diseñar la capacidad a flexión de vigas compuestas, acero-concreto, se verifica el tipo de sección, compactas o no compactas y esbeltas. También, se toma en cuenta el tipo de construcción compuesta, parcial o completa. En nuestro caso se considera una unión completa entre el acero y el concreto, donde el patín de compresión está embebido en la losa de concreto, proporcionando estabilidad y restringiendo el pandeo lateral. La resistencia por flexión en vigas compuestas, acero-concreto se alcanza cuando el perfil de acero fluya y la losa de concreto sea aplastada, por lo que se utiliza una distribución plástica de esfuerzos, para determinar el momento nominal. La capacidad de momento resistente, M_{RC} , de una sección compuesta es:

$$M_{RC} = F_{RC} M_n \quad (4.19)$$

Donde: M_{RC} , momento resistente de una sección compuesta acero-concreto; F_{RC} , factor de resistencia de una sección compuesta acero-concreto igual a 0.85; M_n , momento nominal de la sección compuesta acero-concreto.

La resistencia nominal, M_n , por flexión se alcanzará cuando la sección transversal de acero fluya y el concreto sea aplastado en compresión, por lo que se considera una distribución plástica de esfuerzo y se calcula de acuerdo a la posición del eje neutro, es decir, cuando el eje neutro plástico está dentro de la losa de concreto o cuando éste se localiza en la sección de acero. De acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras Metálicas se debe verificar el tipo de caso que gobierna como sigue:

$$1. \text{ Si } T = A_s F_y < C = \beta h_c b_e F'_c$$

El acero está trabajando en su totalidad y el eje neutro, x , cae en la losa de concreto (Figura 4.4a).

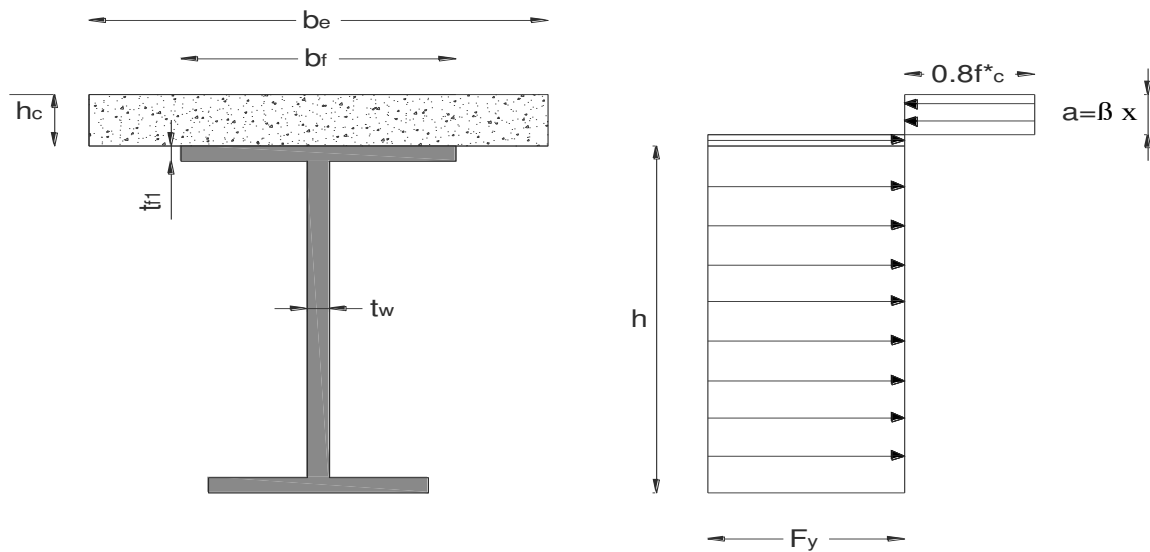
$$2. \text{ Si } T = A_s F_y > C = \beta h_c b_e F'_c$$

El espesor total de la losa de concreto esta en compresión, y una parte de la sección de acero esta en compresión y tensión. El eje neutro, x , se puede localizar en el patín superior (Figura 4.4b) y en el alma de la de la sección de acero (Figura 4.4c).

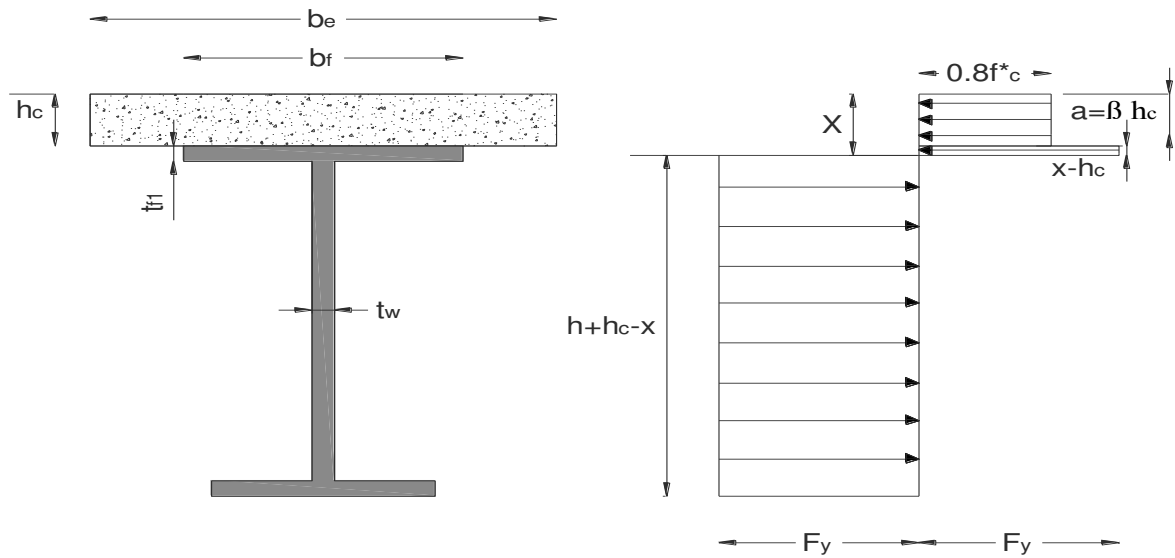
Donde: T_T , resistencia en tensión del acero y aplicada en el centroide de la zona en tensión;
 C , resistencia en compresión del concreto y aplicada en el centroide de la zona en tensión ;
 A_s , área de la sección transversal; F_y , esfuerzo de fluencia del acero; h_c , peralte de la losa de concreto; b_e , ancho efectivo de la losa de concreto; F''_{cc} , esfuerzo de compresión en el concreto con un valor de 0.85 ($f^*_c=0.8 f_c$); β , valor constante que reduce el espesor de la de concreto y se obtiene como:

$$\text{Si } f_c^* \leq 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \Rightarrow \beta_c = 0.85 \quad (4.20)$$

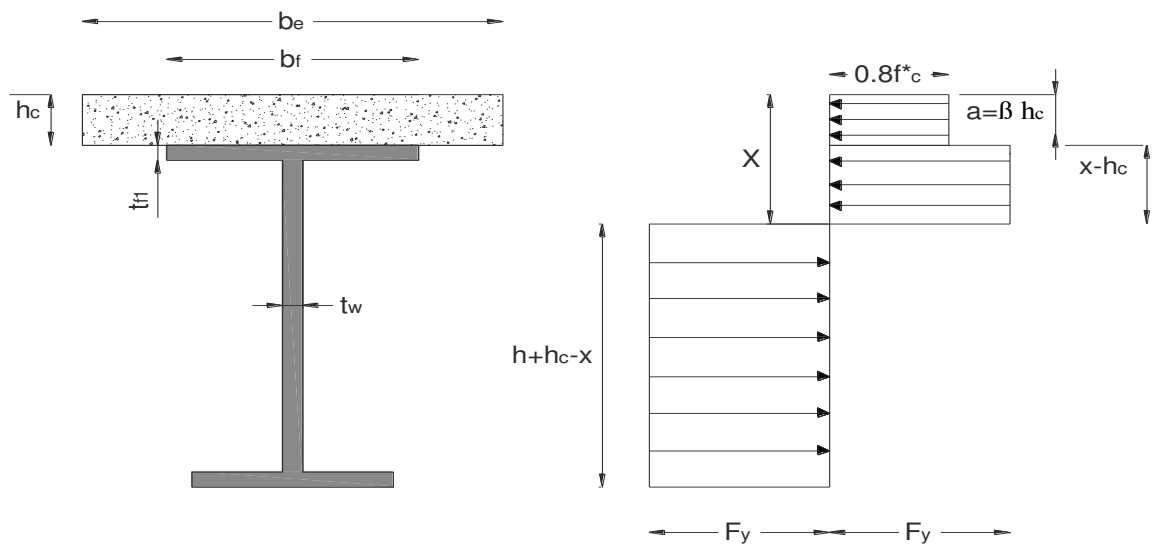
$$\text{Si } f_c^* \geq 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \Rightarrow \beta_c = \left(1.05 - \frac{f_c^*}{1400}\right) \geq 0.65 \quad (4.21)$$



a) Eje neutro en la losa de concreto



b) Eje neutro en el patín superior de acero



c) Eje neutro en el alma de acero

Figura 4.4 Diagrama de esfuerzos plásticos de una sección compuesta acero-concreto.

Cada caso se observa en la Figura 4.4, donde se tiene la capacidad por momento nominal al calcular el momento producido por cada fuerza de compresión por su respectivo brazo de palanca. Esto se logra al sumar los momentos de las resultantes con respecto a cualquier punto.

Es importante mencionar que la fuerza de tensión del concreto es ignorada y que se debe considerar un ancho efectivo de losa que contribuya a la resistencia del elemento. El ancho efectivo se calcula de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Estructuras Metálicas, para vigas centrales y se debe tomar el valor menor de las siguientes:

- a) Un octavo del claro de la viga, medido entre centros de los apoyos.
- b) La mitad de la distancia al eje de la viga adyacente.

4.6 Reglamentos para el diseño de elementos de acero reforzados con FRP

Las normas mexicanas rigen los límites y criterios para el diseño de estructuras metálicas y de otro tipo de materiales (mampostería, madera o concreto). A pesar de que existen códigos de diseño y construcción para estructuras de concreto reforzado con FRP (EN 1998-3:2005, ACI 440.2R-08, CNR-DT 200-2004), no existe norma alguna como tal relativa al uso de los materiales FRP con propósitos del refuerzo estructural de elementos de acero, pero si existen guías de diseño para el uso de los FRP. La usencia de una normativa propiamente definida, esta técnica de refuerzo se ha utilizado durante varios años en estructuras de puentes y edificios de acero en países del primer mundo. La falta de normativa en esta área de especialización para el diseño y construcción se debe a la falta de información y desarrollo de experimentos que permitan representar adecuadamente su comportamiento mecánico, ya que el comportamiento de las uniones entre el acero y el material de FRP es muy complejo debido a que se realiza mediante un adhesivo. Sin embargo existen guías de diseño y prácticas que solo permiten calcular la capacidad por flexión en vigas de acero reforzadas con CFRP sin considerar los modos de falla. Las guías de diseño y construcción existentes son CNR-DT 202/2005, TRB, UTCA Report Number 06217, NCHRP-IDEA, entre otros.

4.7 Resistencia de diseño a flexión de vigas IR de acero reforzadas con CFRP

La resistencia a flexión de una viga de acero reforzada con CFRP se determina por la capacidad a flexión de la sección por la ruptura de las láminas CFRP por tensión, que es el modo de falla deseable para este tipo de elementos. La resistencia a flexión de vigas de acero compactas reforzadas con CFRP queda definida con el momento último, ya que no se puede considerar la plastificación total en la sección IR. Sin embargo, se puede considerar la plastificación de la sección cuando la placa de CFRP presente su ruptura y la viga de acero la fluencia, provocando esfuerzos de tensión en todo el patín inferior.

En la Figura 4.5 se presenta la distribución de esfuerzos y deformaciones de una sección transversal IR reforzada con placas de CFRP en el patín inferior. En la figura h es la altura de la sección total sin refuerzo, x_s es el peralte del eje neutro, b_{f1} es el ancho del patín superior, b_{f2} es el ancho del patín inferior, b_{cfrp} es el ancho de la lámina de CFRP, t_{f1} es el espesor del patín superior, t_{f2} es el espesor del patín inferior, t_w es el espesor del alma, t_a es el espesor de la capa de

adhesivo, t_{cfrp} es el espesor de la lámina CFRP, $\varepsilon_{s,c}$ es la deformación del acero en la superficie del patín superior (cara de compresión), $\varepsilon_{s,t}$ es la deformación del acero en la superficie del patín inferior (cara de tensión), $\varepsilon_{s,i}$ es la deformación del acero a una profundidad h_i , ε_{cfrp} es la deformación en la superficie media de la lámina CFRP, σ_{cfrp} es el esfuerzo promedio axial de la lámina, $\sigma_{s,y}$ es el esfuerzo de fluencia del acero y $\sigma_{s,i}$ es el esfuerzo del acero a una profundidad h_i que se toma igual al esfuerzo de fluencia por simplicidad, ya que se considera un comportamiento elastoplástico de la sección.

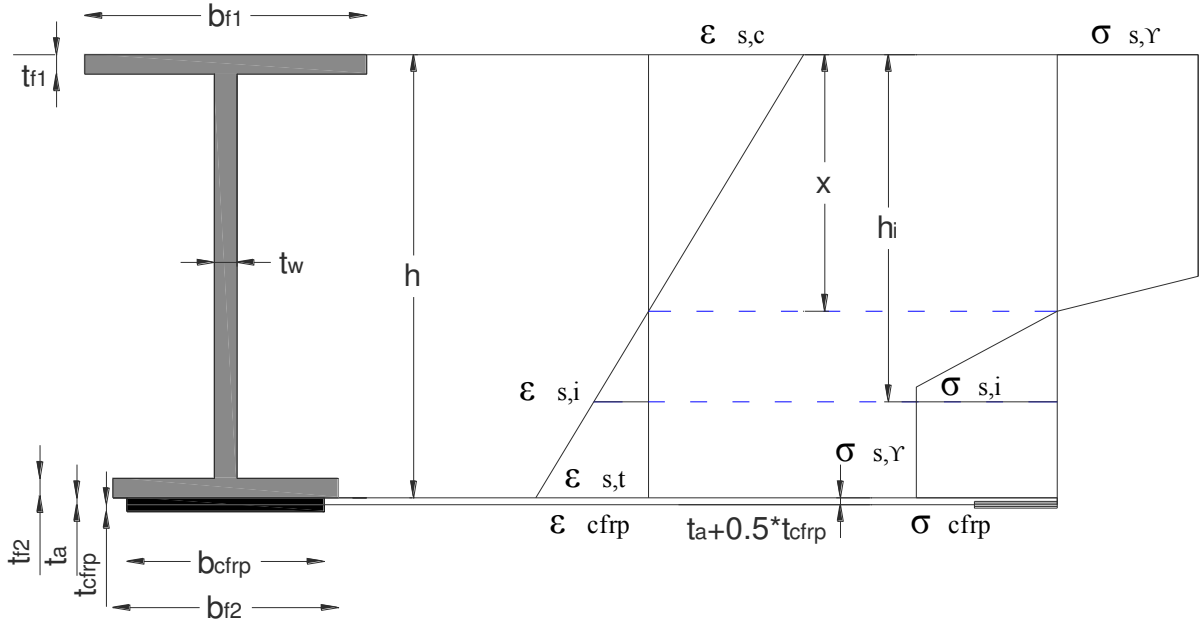


Figura 4.5 Distribución de esfuerzos y deformaciones de una sección de acero reforzada con CFRP.

De acuerdo con la Figura 4.5, la deformación en la superficie superior e inferior de la viga de acero ($\varepsilon_{s,t}$ y $\varepsilon_{s,c}$) pueden relacionarse con la deformación de la lámina CFRP, ε_{cfrp} :

$$\varepsilon_{s,c} = \varepsilon_{cfrp} \frac{-x}{h + t_a + \frac{t_{cfrp}}{2} - x} \quad (4.22)$$

$$\varepsilon_{s,t} = \varepsilon_{cfrp} \frac{h - x}{h + t_a + \frac{t_{cfrp}}{2} - x} \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_{s,i} = \varepsilon_{cfrp} \frac{h_i - x}{h + t_a + \frac{t_{cfrp}}{2} - x} \quad (4.24)$$

Donde, el eje neutro es encontrado por medio del equilibrio de fuerzas de compresión y tensión. El cálculo se hace similar a vigas compuestas sin refuerzo, pero con la adición de la fuerza de que se produce por las láminas de CFRP y se obtiene como:

$$T_{T_{\text{cfrp}}} = \sigma_{\text{cfrp}} b_{\text{cfrp}} t_{\text{cfrp}} \quad (4.25)$$

Donde: $T_{T_{\text{cfrp}}}$, es la fuerza de tensión producida por el refuerzo CFRP que depende del número de capas de refuerzo; b_{cfrp} , es el ancho de lámina CFRP; t_{cfrp} , es el espesor de lámina CFRP; σ_{cfrp} , es el esfuerzo de tensión de lámina CFRP a tensión que es dado por el fabricante o se puede obtener como:

$$\sigma_{\text{cfrp}} = E_{\text{cfrp}} \varepsilon_{\text{cfrpl,d}} \quad (4.26)$$

Donde: E_{cfrp} , es el módulo de elasticidad del CFRP; $\varepsilon_{\text{cfrpl,d}}$, es el valor de diseño del límite de deformación de la lámina CFRP.

La capacidad de momento de una viga de acero se determina como función de la deformación límite del refuerzo en las láminas CFRP, $\varepsilon_{\text{cfrpl,d}}$, y se obtiene sumando los momentos producidos por cada fuerza de tensión y compresión aplicadas en el centroide de cada área con el brazo de palanca respecto a un punto. Se debe considerar un factor de seguridad para la lámina de CFRP y adhesivo de acuerdo a la guía de diseño CNR-DT 202/2005. Para el acero y concreto se utilizan los factores de resistencia que se establecen en las NCTDF para Estructuras metálicas y de concreto, que 0.9 y 0.85 respectivamente.

Si las láminas de CFRP se rompen debido a la tensión, la viga tiene una falla a flexión, por lo que el refuerzo trabaja a tensión y proporciona resistencia a la viga. La deformación límite del refuerzo ($\varepsilon_{\text{cfrpl,d}}$) debe definirse en función de la deformación a la ruptura de las láminas de CFRP, la cual está definida por:

$$\varepsilon_{\text{cfrpl,d}} = \frac{\sigma_{\text{cfrp,rup}}}{\gamma_{\text{cfrp}} E_{\text{rup}}} \quad (4.27)$$

Donde: $\sigma_{\text{cfrp,rup}}$, es el valor característico de la resistencia a tensión del refuerzo CFRP; γ_{cfrp} , es el factor parcial de seguridad para el CFRP; E_{rup} , es el módulo de elasticidad a la ruptura.

Si las láminas no alcanzan la deformación de ruptura de CFRP, se tiene una falla frágil y el refuerzo pierde adherencia entre el acero, adhesivo y lámina CFRP, por lo que se recomienda aumentar las propiedades mecánicas del adhesivo de unión.

4.8 Resistencia de diseño a flexión de vigas IR compuestas reforzadas con CFRP

En vigas IR compactas y compuestas (acero-concreto), el momento último se estima en forma diferente a la vigas de acero; la presencia de la losa de piso obliga a considerar la fuerza de compresión en el concreto. En la Figura 4.6, se observa la sección compuesta con su distribución de deformaciones; donde, h es el peralte de la sección compuesta de acero-concreto, h_c es el peralte de la losa de concreto, x es el peralte del eje neutro, b_e es el ancho efectivo de la losa de concreto, b_{f1} es el ancho del patín superior, b_{f2} es el ancho del patín inferior, b_{cfrp} es el ancho de la lámina de CFRP, t_{f1} es el espesor del patín superior, t_{f2} es el espesor del patín inferior, t_w es el espesor del alma, t_a es el espesor de la capa de adhesivo, t_{cfrp} es el espesor de la lámina CFRP, $\epsilon_{s,t}$ es la deformación del acero en la superficie del patín inferior, ϵ_{cfrp} es la deformación en la superficie media de la lámina CFRP y $\epsilon_{c,c}$ es la deformación a compresión en la superficie superior de la losa de concreto.

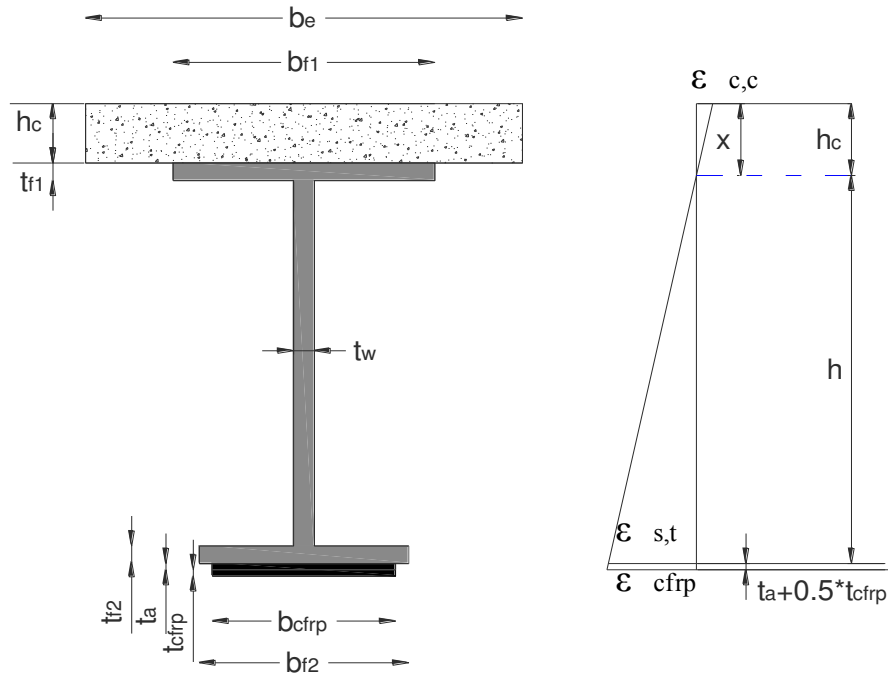


Figura 4.6 Sección compuesta, acero-concreto reforzada con CFRP y su Distribución de deformaciones

En una viga compuesta, la falla a flexión en el plano puede ocurrir de dos formas: por ruptura de las láminas de CFRP por tensión o por aplastamiento a compresión del concreto. Cuando la falla es por ruptura en las láminas, la contribución de esfuerzos en el área de compresión del concreto se debe estimar con base al bloque equivalente de esfuerzos comúnmente utilizado en elementos de

concreto, que depende del eje neutro que está localizado en la zona de concreto debido que se tiene una falla a flexión y el refuerzo CFRP proporciona resistencia. Si la falla es ocasionada por el aplastamiento del concreto, también se puede utilizar el bloque rectangular equivalente de esfuerzos, donde el eje neutro se encuentra en la sección de acero produciendo una falla frágil. Para determinar el tipo de falla, se calcula el eje neutro crítico que está en función de las deformaciones límites del concreto y del refuerzo compuesto como:

$$X_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{cfrp,l,d}} \left(h + h_c + t_a + \frac{t_{cfrp}}{2} \right) \quad (4.28)$$

Donde: $\varepsilon_{c,u}$, es la deformación última del concreto; $\varepsilon_{cfrp,l,d}$, es la deformación límite de la lámina CFRP. Si $x > x_b$ la falla ocurre por aplastamiento en el concreto y si $x < x_b$ la falla ocurre por ruptura de las láminas CFRP a tensión, por lo que el eje neutro puede localizarse en la losa de concreto o en la viga de acero.

4.8.1 Eje neutro en la losa de concreto

Cuando el eje neutro de una sección compuesta se localiza en la losa de concreto, los esfuerzos y deformaciones son como se muestran en la Figura 4.7.

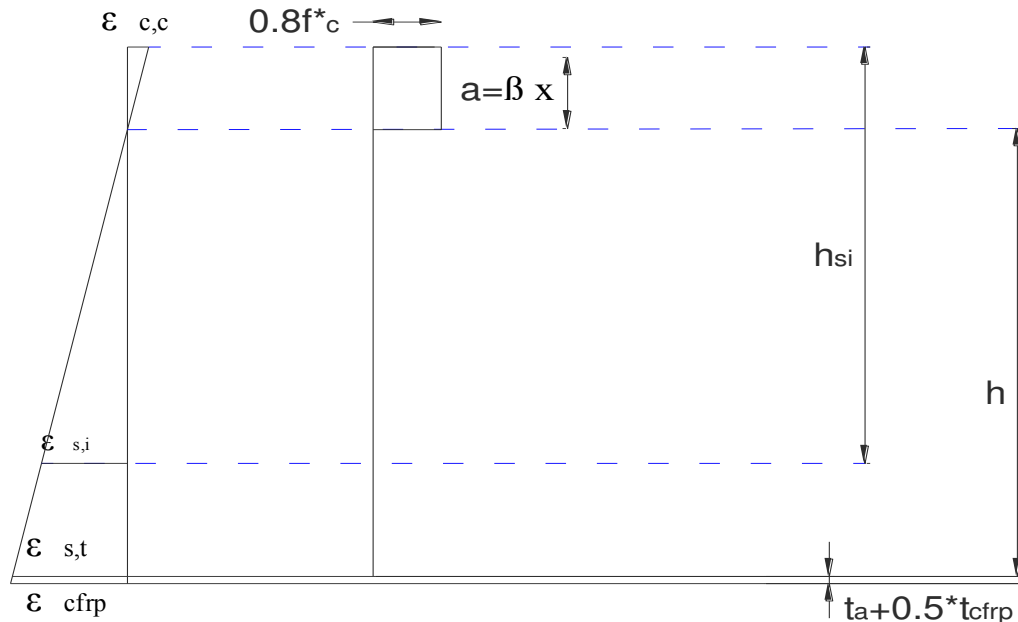


Figura 4.7 Esfuerzos y deformaciones de una sección compuesta, acero-concreto reforzada con cuando el eje neutro se encuentra en la losa de concreto.

La deformación en el CFRP (ε_{cfrp}) y la deformación del acero ($\varepsilon_{s,i}$) cuando $h_i > h_c$ se relacionan con la deformación a compresión en la fibra extrema del concreto ($\varepsilon_{c,c}$) y se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_{cfrp} = -\varepsilon_{c,c} \frac{h + t_a + \frac{t_{cfrp}}{2} - x}{x} \quad (4.29)$$

$$\varepsilon_{s,i} = -\varepsilon_{c,c} \frac{h_i - x}{x} \quad (4.30)$$

Donde: $\sigma_{s,i}$, es el esfuerzo del acero a una profundidad h_i que se toma igual al esfuerzo de fluencia; σ_{cfrp} , es el esfuerzo promedio axial de la lámina y definido con la ecuación 4.26.

El momento resistente de diseño de la viga se puede estimar de acuerdo al diagrama de esfuerzos correspondiente, donde se realiza la suma de fuerzas de tensión del acero y de la lámina CFRP, la fuerza de compresión del concreto con su brazo de palanca y su respectivo factor de resistencia.

4.8.2 Eje neutro en la viga de acero

Cuando el eje neutro de la sección compuesta se encuentra en la viga de acero (Figura 4.8), es decir, en el patín superior de la viga de acero; la losa de concreto se encuentra totalmente a compresión, por lo cual la deformación en la superficie inferior de la losa de concreto debe ser calculada ($\varepsilon_{c,b}$) y se relaciona con la deformación de compresión del concreto en la fibra extrema con la siguiente expresión 4.31.

$$\varepsilon_{c,b} = \varepsilon_{c,c} \frac{h_c}{x} \quad (4.31)$$

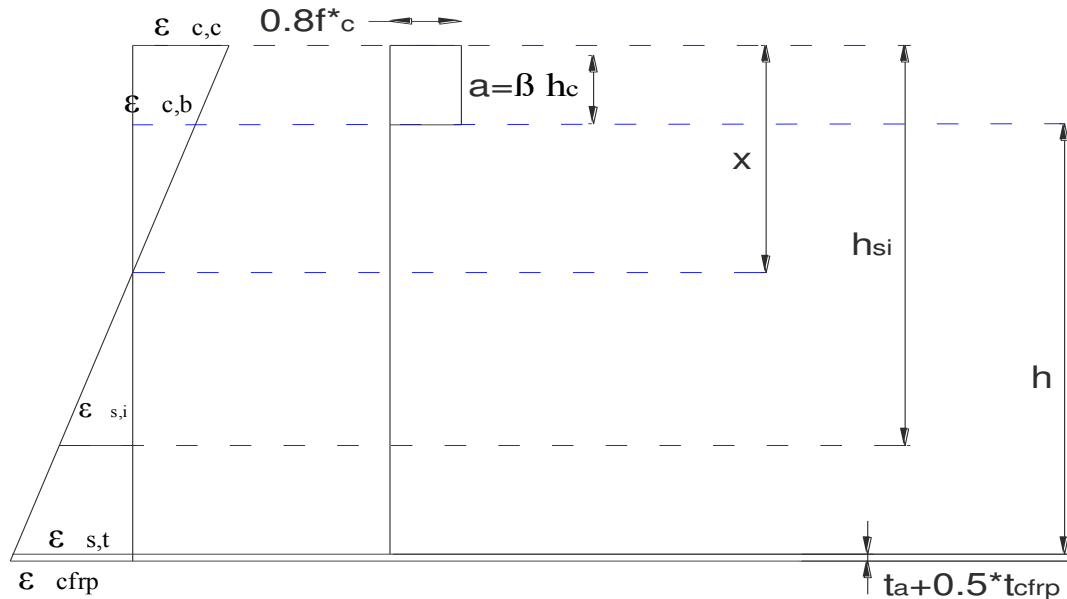


Figura 4.8 Esfuerzos y deformaciones de una sección compuesta, acero-concreto reforzada con CFRP cuando el eje neutro se encuentra en la viga de acero.

El momento resistente de una sección compuesta cuando el eje neutro se encuentra en la viga de acero se calcula con la ecuación de acuerdo a lo descrito en la sección 4.8.1 considerando el diagrama de esfuerzos correspondiente. También se realiza suma de fuerzas de compresión y tensión con su respectivo brazo de palanca.

4.9 Efectos de precarga

Para considerar el efecto de precarga en un elemento viga, el momento resistente se debe evaluar a través del esquema momento-curvatura, donde se observa el comportamiento del miembro mediante las deformaciones. Por lo que la deformación en el refuerzo CFRP debe modificarse de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\sigma_{\text{cfrp}} = \begin{cases} 0 & \text{si } \varepsilon_{\text{cfrp}} \leq \varepsilon_{\text{t,i}} \\ E_{\text{cfrp}}(\varepsilon_{\text{cfrp}} - \varepsilon_{\text{t,i}}) \leq E_{\text{cfrp}}\varepsilon_{\text{cfrp},d} & \text{si } \varepsilon_{\text{cfrp}} > \varepsilon_{\text{t,i}} \end{cases} \quad (4.32)$$

Donde: $\varepsilon_{\text{t,i}}$, es la deformación inicial del acero debido a la precarga en la superficie inferior del patín de tensión de la viga.

Para obtener la respuesta de momento-curvatura de una viga de acero reforzada con CFRP en condiciones de servicio, se realiza por iteración, donde se propone un valor para la deformación en la superficie superior de la sección. Después, se calcula el eje neutro con el equilibrio de fuerzas de compresión y tensión de acuerdo al tipo de sección (IR simple o compuesta acero-concreto). Para el valor propuesto de deformación de compresión ($\varepsilon_{\text{c,x}}$) en la superficie superior y con un eje neutro (x), se logra obtener la curvatura para la sección considerada, como:

$$\phi_x = \frac{\varepsilon_{\text{c,x}}}{x} \quad (4.33)$$

4.10 Predicción de falla

Para la predicción de los modos de falla, se realiza la revisión de pandeo local y pandeo lateral, para evitarlos y enfocarnos en el de desadherencia entre el sustrato de acero y el adhesivo, lámina CFRP. Esta falla se localiza en los extremos y en la zona intermedia del refuerzo compuesto. La falla de desadherencia en el extremo de la placa-CFRP, se debe a la concentración de esfuerzos, principalmente esfuerzos cortantes. La falla de desadherencia intermedia, se debe al inicio de daño local, como una grieta y donde la lámina CFRP es sometida a altos esfuerzos produciendo que la falla se propague hacia un extremo del laminado.

A continuación se habla de lo que se ha realizado por varios autores para evitar la falla por desadherencia en el extremo e intermedia, como en vigas de acero y compuestas acero-concreto.

4.10.1 Desadherencia final

Se han realizado varios estudios numéricos y analíticos para predecir la resistencia de la falla de desadherencia final en vigas de acero con CFRP, los cuales hicieron uso del modelo de zona cohesiva (CZ), que consiste en representar el comportamiento de unión en la interfase acero y CFRP. A continuación se describe dos modelos que incluyen el modelo de zona cohesiva:

a) El modelo de elemento finito

Propuesto por Fernando (2010), incluyó tres componentes: el modelo de unión-desplazamiento aplicado en vigas sometida a una carga puntual aplicada al centro del claro, el modelo de unión-separación aplicado en vigas sujetas a una carga distribuida a lo largo de la longitud y un modelo mixto que sirve para predecir la desadherencia final e intermedia para vigas sometidas a una carga puntual al centro del claro.

b) El modelo analítico

Propuesto por Lorenzis et al. (2013) bajo una carga puntual en el centro de la viga, donde la desadherencia final ocurre antes de la fluencia de la viga de acero, por lo que la contribución de la resistencia a flexión en vigas es muy pequeña, ya que la resistencia del CFRP no se utiliza totalmente.

Los estudios mencionados están limitados porque solo consideran una carga puntual al centro del claro y una carga distribuida, además todavía está en curso su análisis de desadherencia al final de la placa o lámina compuesta, debido a que es un mecanismo complejo y se presenta cuando la viga de acero no ha fluido, por lo que el refuerzo CFRP no influye en la resistencia a flexión. Esto hace al refuerzo compuesto ineficiente y costoso. Sin embargo, para mejorar este enfoque en aplicaciones prácticas se hace las siguientes recomendaciones:

1. Colocar el extremo de la lámina en una zona de momento bajo.
2. Colocar unas grapas de CFRP (sistema de anclaje) en la parte extrema de la placa-CFRP.
3. Usar un adhesivo con una gran energía de fractura en el extremo de la placa (Fitton y Broughton en el 2005).
4. Reducir los esfuerzos concentrados al final de la placa CFRP, colocando adhesivo en exceso en la parte extrema con una inclinación.
5. Disminuir el borde del laminado CFRP (Hart-Smith en 1981, Haghani y otros en el 2010).

Lo anterior puede disminuir o eliminar la desadherencia final, aunque algunos de estos métodos pueden ser combinados, por ejemplo, el método 4 y 5 que es sugerido por Schnersch (2007). Cuando se usa un sistema de anclaje (grapas de CFRP) para disminuir la desadherencia final del refuerzo, se puede calcular la fuerza de desprendimiento para que esta sea capaz de resistir los esfuerzos producidos por este efecto, mediante una solución analítica propuesta por Zhang y Teng en el 2010. Por lo que la fuerza total desprendimiento (P_n) para ser resistida por una grapa-CFRP en el extremo del refuerzo CFRP bajo la carga última es:

$$P_n = b_{\text{cfrp}} \int_0^{x|_{\sigma_n(x)=0}} \sigma_n(x) dx \quad (4.34)$$

Donde: $x|_{\sigma_n(x)=0}$, es la distancia del extremo de la lámina al primer punto donde el esfuerzo normal de la es cero; σ_n , es el esfuerzo normal de tensión.

3.10.2 Desadherencia intermedia

La desadherencia intermedia de una viga de acero o compuesta acero-concreto generalmente se inicia en un daño local, como una grieta (Kim y Garrett en el 2011, Kim y Kent en el 2012) o fluencia localizada (Sallam y otros en el 2006), originando que la lámina CFRP este muy esforzada y que la falla se propague hacia un extremo del laminado. La resistencia de desadherencia intermedia depende de la energía de fractura de cortante en la interfase obtenida a partir de pruebas de pruebas de cortante de juntas de unión. La deformación que se obtiene de la prueba de cortante, corresponde a la deformación de diseño CFRP de la desadherencia intermedia y se obtiene como:

$$\varepsilon_{\text{cfrp},I,d} = \frac{F_{1,d}}{\gamma_{\text{desadherencia}} b_{\text{cfrp}} E_{\text{cfrp}} t_{\text{cfrp}}} = \frac{1}{\gamma_{\text{desadherencia}}} \sqrt{\frac{2G_f}{E_{\text{cfrp}} t_{\text{cfrp}}}} \quad \text{para } L \geq L_e \quad (3.35)$$

Donde: $\lambda_{\text{desadherencia}}$, es el factor de seguridad parcial para la falla de desunión; b_{cfrp} , es el ancho de la lámina CFRP; E_{cfrp} , es el módulo de elasticidad del CFRP; t_{cfrp} , es el espesor de la lámina CFRP; G_f , es la energía de la fractura en la interfase (Fernando en el 2010) y se obtiene como:

$$G_f = 628 t_a^{0.5} R^2 \quad (4.36)$$

Donde: t_a , es el espesor del adhesivo en mm; R , es la energía de deformación de tensión del adhesivo, que es igual al área bajo la curva de esfuerzo-deformación de tensión uniaxial (en MPa).

La ecuación 4.35 refleja valores conservadores, debido a que la desadherencia intermedia puede ser localizada en múltiples zonas del sustrato de acero (Teng y otros en el 2006). La

capacidad del momento de diseño de una viga con placa-CFRP con de desadherencia intermedia puede ser calculada usando las ecuaciones correspondientes a la sección 4.8, remplazando $\varepsilon_{frpl,d}$ por $\varepsilon_{cfrp,d}$, además, la longitud de unión no debe ser menor que la longitud efectiva de unión.

La longitud efectiva , L_e , depende de las propiedades mecánicas y geométricas del adhesivo, fibra de carbono y de la sección de la viga, por lo que se considera los siguientes casos:

1. Para adhesivos lineales y utilizando la curva unión-desplazamiento bilineal (Fernando, 2010):

$$L_e = a_b + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2 \tan(\lambda_2 a_b)}{\lambda_1 - \lambda_2 \tan(\lambda_2 a_b)} \right) \quad (4.37)$$

$$a_b = \frac{1}{\lambda_2} \arcsen \left(0.97 \sqrt{\frac{\delta_f - \delta_1}{\delta_f}} \right) \quad (4.38)$$

$$\lambda_1^2 = \frac{2G_f}{\tau_{\max} \delta_1} \lambda^2 \quad (4.39)$$

$$\lambda_2^2 = \frac{2G_f}{(\delta_f - \delta_1) \tau_{\max}} \lambda^2 \quad (4.40)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_{\max}^2}{2G_f} \left(\frac{1}{E_{cfrp} t_{cfrp}} + \frac{b_{cfrp}}{E_s A_s} \right) \quad (4.41)$$

Donde: δ_1 , es el desplazamiento del esfuerzo máximo de cortante, ecuación 3.35; δ_f , es el desplazamiento máximo del modelo bilineal de unión-desplazamiento, ecuación 3.25 (Fernando en el 2010).

2. Para adhesivos no lineales y utilizando la curva unión-desplazamiento de forma trapezoidal (Fernando, 2010):

$$L_e = a_d + b_e + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{1+C}{1-C} \quad (4.42)$$

$$C = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 \delta_1} (\delta_f - \delta_2) \cot(\lambda_3 b_e) - \lambda_1 a_d \quad (4.43)$$

$$b_e = \frac{1}{\lambda_3} \arcsen \left[\frac{\lambda_3 \lambda}{0.97 \delta_1 \lambda_1^2} (\delta_f - \delta_2) \right] \quad (4.44)$$

$$a_d = \frac{1}{\lambda_1} \left(\sqrt{\left(2 \frac{\delta_2}{\delta_1} - 1 \right)} - 1 \right) \quad (4.45)$$

$$\lambda_3^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{(\delta_f - \delta_2)\tau_{\max}} \quad (4.46)$$

$$\lambda_1^2 = \frac{2G_f}{\tau_{\max}\delta_1} \lambda^2 \quad (4.47)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_{\max}^2}{2G_f} \left(\frac{1}{E_{\text{cfrp}} t_{\text{cfrp}}} + \frac{b_{\text{cfrp}}}{E_s A_s} \right) \quad (4.48)$$

Donde: δ_1 , es el desplazamiento en el extremo de la línea ascendente lineal, ecuación 3.35; δ_2 , es el desplazamiento al inicio de la línea descendente lineal, ecuación 3.35; δ_f , es el desplazamiento en el extremo de la línea descendente lineal, ecuación 3.35.

5

CAPÍTULO

Descripción del software desarrollado para la revisión de la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

En este capítulo se describe el uso del manejo del software desarrollado en Matlab para estimar la capacidad a flexión de vigas de acero y compuestas, acero-concreto, reforzadas con CFRP para incrementar su resistencia.

5.1 Manual de usuario

Para iniciar el programa de capacidad a flexión de un elemento viga de sección IR, reforzada con láminas de CFRP, el usuario debe ejecutar el programa *VigaCFRP* desde el software Matlab con la opción *guide* y buscar el archivo correspondiente.

Antes de correr el programa, se debe teclear la letra "a" o "b" en letra minúscula dependiendo del caso de viga que desee analizar:

1. Viga IR de acero: "a"
2. Viga IR compuesta, acero-concreto: "b"

Una vez seleccionado el tipo de viga, se deben ingresar las variables de arranques, tipo de cargas externas aplicadas al elemento, entre otras variables que se presentan en la ventana. A continuación se describe cada paso:

1. Geometría de la sección IR

El usuario debe ingresar los datos que describen la geometría de la sección IR de acuerdo a la ventana de apoyo del programa (Figura 5.1).

1. Geometría de la sección IR:

L(cm)=	400	h(cm)=	75.3
tf(cm)=	1.7	tw(cm)=	1.32
bf(cm)=	26.5	As(cm ²)=	187.8
Ix(cm ⁴)=	166076	Iy(cm ⁴)=	5328
Sx(cm ³)=	4408	Sy(cm ³)=	401
Zx(cm ³)=	5113	Zy(cm ³)=	633
J(cm ⁴)=	157		

Figura 5.1 Geometría de la sección transversal IR

Donde:

L= longitud de la viga

h= peralte de la viga IR

tf= espesor del patín

tw= espesor del alma

bf= ancho del patín

As= área de la sección IR

Ix= momento de inercia respecto al eje x

Iy= momento de inercia respecto al eje y

Sx= módulo de la sección elástica en x

Sy= módulo de la sección elástica en y

Zx= módulo de la sección plástica en x

Zy= módulo de la sección plástica en y

J= constante de torsión

2. Propiedades mecánicas de la sección

Las propiedades mecánicas dependen del material, en este caso del acero estructural, las cuales se deben ingresar de acuerdo a la información que presenta la Figura 5.2, es muy importante proveer la información en las unidades que se indica.

2. Propiedades mecánicas de la sección IR:			
Es(kg/cm ²)=	2000000	G(kg/cm ²)=	784000
Fy(kg/cm ²)=	2530	Dy cm/cm=	0.002
hc(cm)=	12	F'c(kg/cm ²)=	250
be(cm)=	70	Dc=	0.003
FSs=	1		

Figura 5.2 Propiedades mecánicas de la sección transversal IR

Donde:

E_s = módulo de elasticidad del acero

G = módulo de cortante del acero

F_y = esfuerzo de fluencia

D_y = deformación de fluencia del acero

h_c = espesor de la losa de concreto

F'_c = esfuerzo de compresión del concreto

b_e = ancho efectivo de la losa de concreto

D_c = deformación del concreto

FS_s = Factor de seguridad del acero

3. Cargas

En esta sección se definen las cargas externas a las que estará sometida la viga. El programa se puede generalizar especificando el momento de diseño; sin embargo, en este caso sólo se consideran dos tipos de cargas:

- Carga concentrada "CC", aplicada en el centro del claro de la viga, Figura 5.3a
- Carga distribuida "CD", aplicada en toda la longitud de la viga, Figura 5.3b

Teclear "CC" o "CD" dependiendo del tipo de carga que desee (Figura 5.4) y el valor de la

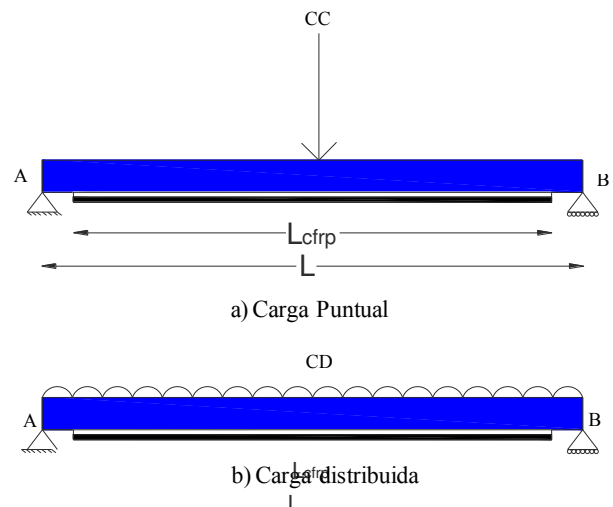


Figura 5.3 Cargas externas aplicadas en una viga de acero y compuesta, acero-concreto carga (P).

3. Cargas:			
Opción(CD/CC)=		CC: carga concentrada	
P(kg o kg/cm)=		CD: carga distribuida	

Figura 5.4 Cargas externas consideradas

4. Revisión del pandeo local y lateral de la sección IR

Para que una viga IR de acero estructural sea candidata a ser reforzada con CFRP, deben cumplirse los siguientes requisitos:

- Evitar el pandeo local de la sección, revisando las relaciones espesor y ancho del patín y del alma de la sección transversal, siendo únicamente candidatas a refuerzo mediante CFRP las secciones que cumplan con los requisitos del reglamento para clasificarlas como compactas, de tal forma que las propiedades geométricas de la sección sean adecuadas para presentar deformaciones importantes y alcanzar su máxima resistencia antes de presentar su colapso.
- No deben tener pandeo lateral, ya que el refuerzo con láminas CFRP sólo ayuda a la resistencia a flexión y no contribuye al efecto de pandeo lateral del elemento.

En la Figura 5.5, se presenta la descripción de la revisión de la sección transversal ante pandeo local y lateral. En el primer caso, se muestran los siguientes mensajes dependiendo del tipo de sección:

Tipo 1: son secciones compactas.

Tipo 2: son secciones compactas.

Tipo 3: son secciones no compactas y debe proponer otra sección.

Tipo 4: son secciones esbeltas y debe proponer otra sección.

4. Revisión del pandeo local y pandeo lateral de la sección IR:			
Tipo de Sección=	Tipo 1: Son secciones compactas		
Opción(SC/SA)=	SC	SA: sujeción aislada	SC: sujeción continua
Revisión de pandeo lateral=	No es necesario hacer la revisión		

Figura 5.5 Revisión de pandeo local y lateral de la sección IR

En la revisión de pandeo lateral se tienen dos opciones, de acuerdo con la Normas Técnicas Complementarias de Reglamento del D.F. (NTC del RDF), una correspondiente a la condición de viga con sujeción aislada (SA) y otra para una viga con sujeción continua (SC). Cuando el usuario teclea SA, la longitud entre apoyos debe ser suficiente para evitar este efecto, en caso contrario se muestra el mensaje de que *existe pandeo lateral y no es apta para reforzar con CFRP*. En la última opción se debe proponer otra longitud menor a la anterior o cambiar las propiedades geométricas

de la sección, ya que L_u depende de estas. Si se considera la opción SC, no hay posibilidad de pandeo lateral, debido a que el patín superior tiene soporte lateral continuo y se asume que el patín inferior se encuentra perfectamente restringido a desplazarse lateralmente en los puntos donde se encuentra sujeto a compresión. Esto debe corroborarse con especial cuidado en el caso de acciones cíclicas como es la ocurrencia de terremotos, ya que en este programa se asume que no se presentan problemas de este tipo, por lo que se muestra el mensaje: *no existe pandeo lateral*.

5.1.1 Vigas IR de acero reforzadas con CFRP

5. Momento resistente sin refuerzo y momento máximo actuante en la viga IR de acero

Antes de presentar el procedimiento para estimar la capacidad máxima a flexión con refuerzo CFRP, se hace una breve descripción del cálculo del momento resistente de una viga IR sin refuerzo, y su relación con el momento máximo actuante en la viga generado por la carga externa. De acuerdo con las NTC del RDF, una sección que cumple con los requisitos de sección compacta, esto es que esté soportada lateralmente adecuadamente para prevenir efectos de flexo-torsión, así como que la sección transversal tenga una relación ancho a espesor adecuada para que no se presente una falla en el intervalo elástico por efectos del pandeo local, es capaz de desarrollar una articulación plástica, quedando así definida su resistencia por el valor del momento plástico de la sección. La teoría del comportamiento estructural en que se basa el reglamento para la definición de las expresiones que nos permiten estimar la capacidad máxima a flexión del elemento nos dice que la sección transversal presentará un mecanismo de colapso formado por la presencia de articulaciones plásticas en los puntos donde se tienen las máximas demandas de momento, así como que los elementos que se encuentren conectados en estos puntos deben tener la capacidad de redistribuir los momentos a su alrededor. Debido a que en el proceso de diseño se deben satisfacer los estados límite de resistencia y de servicio, la resistencia a flexión en la zona plástica se limita a 1.5 veces del momento de fluencia de la sección transversal para evitar la presencia de deformaciones importantes, así como que el momento de diseño, momento máximo amplificado por el factor de carga, debe ser mayor o igual que el momento resistente estimado con las ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$M_R = F_R Z_x F_y \leq F_r (1.5 M_y) \quad (5.1)$$

$$M_{\max} \leq M_R \quad (5.2)$$

Donde: M_R , momento resistente a flexión; F_R , factor de resistencia a flexión (0.9); Z_x , módulo de sección plástica con respecto del eje en que se presenta la flexión; F_y , esfuerzo de fluencia; M_y , momento de iniciación de la fluencia; $M_{\max}$, momento máximo actuante.

Si no se satisface la ecuación 5.1, el programa imprime en pantalla el siguiente mensaje: *proponer otra sección*; en caso contrario, cuando se satisface la condición, el programa continua con el cálculo del momento resistente, M_R , imprimiéndose en pantalla el mensaje: *se acepta la sección ya que $M_R > M_{m\acute{a}x}$ y continúe*. En el siguiente paso el programa verifica la ecuación 5.2, relacionada con la relación entre la demanda y la resistencia, donde M_R debe ser mayor que el $M_{m\acute{a}x}$, en caso contrario el programa despliega en pantalla la advertencia: *no se acepta la sección ya que $M_R < M_{m\acute{a}x}$ y que debe proponer otra sección*. Sin embargo, se puede aceptar la sección con un 10% o 15% por debajo del momento actuante de la viga, ya que al reforzar al elemento incrementa la resistencia. La Figura 5.6 muestra una ventana donde se ilustran los pasos antes descritos.

5. Momento Resistente sin refuerzo y Momento máximo actuante en la viga IR:			
Capacidad de Momento flexionante sin refuerzo(kg-cm)=		1.16423e+007	
Mmáx(kg-cm)=		9.84124e+006	
Incremento (%)=	18.3011	Se acepta la sección ya que $M_R > M_{m\acute{a}x}$	
continúe			

Figura 5.6 Momento Resistente y momento máximo de la sección IR

6. Geometría del refuerzo (láminas-CFRP)

En esta ventana que presenta el programa se deben ingresar los datos que describen la geometría del refuerzo CFRP, de acuerdo como lo muestra la Figura 5.7. El valor de la deformación de diseño de la fibra de carbono está definido por el fabricante en las hojas técnicas del producto al igual que el espesor nominal de las fibras, los valores restantes que se deben ingresar al programa son función del ancho del patín o zona donde se desee reforzar y de la capacidad máxima que se requiere alcanzar con el proceso de rehabilitación o refuerzo.

6. Geometría de la lámina-CFRP:			
b _{cfrp} (cm)=	26.5	t _{cfrp} (cm)=	0.0166
Número de capas de CFRP=	1	D _{cfrp} =	0.018

Figura5.7 Geometría de la lámina –CFRP

Donde:

b_{cfrp}= ancho de la lámina CFRP

t_{cfrp}= espesor de la lámina CFRP

Número de capas de CFRP

D_{cfrp}= deformación de diseño de la lámina CFRP

7. Propiedades mecánicas de la lámina-CFRP

En el siguiente paso del programa, se deben ingresar las propiedades mecánicas de la lámina de refuerzo de acuerdo como se muestra en la Figura 5.8. Es importante mencionar que éstas propiedades se consideran por separado y no como un compuesto total (lámina y adhesivo), por lo que se debe tener cuidado en no confundir el valor que define estas propiedades sino teclear solamente los datos correspondientes a las fibras (CFRP) sin incluir el adhesivo. Estos valores también se obtienen de las especificaciones del fabricante.

7. Propiedades mecánicas de la lámina-CFRP:	
Ecfrp(kg/cm2)=	2300000
Fcfrp(kg/cm2)=	49000
FScfrp=	1.25

Figura 5.8 Propiedades mecánicas de la lámina-CFRP

Donde:

E_{cfrp} = módulo de elasticidad de la lámina CFRP

F_{cfrp} = esfuerzo de tensión de la lámina CFRP

FS_{cfrp} = factor de seguridad de la lámina CFRP

8. Propiedades mecánicas del adhesivo de unión

Como se mencionó en el párrafo anterior, para el análisis de la resistencia de las vigas de acero reforzadas con CFRP se consideran de manera independiente las propiedades de las fibras y del adhesivo, por lo tanto el programa muestra una pantalla donde se deben introducir las propiedades del adhesivo de unión de acuerdo con la Figura 5.9, valores igualmente definidos por el fabricante.

8. Propiedades mecánicas del adhesivo de unión:	
Ea(kg/cm2)=	20000
Fa(kg/cm2)=	520
ta(cm)=	0.0834
FSa=	1.25

Figura 5.9 Propiedades mecánicas del adhesivo de unión

Donde:

E_a = módulo de elasticidad del adhesivo

F_a = resistencia a tensión del adhesivo

t_a = espesor del adhesivo

FS_a = factor de seguridad del adhesivo

9. Resistencia a flexión de una viga de acero con CFRP

El último paso que realiza el programa es presentar un resumen de los resultados del análisis de la viga IR de acero estructural reforzada con CFRP con el formato que se muestra en la Figura 5.10,

donde se presenta el valor de la capacidad a flexión de la viga de acero reforzada con CFRP, así como el incremento en la resistencia a flexión que se alcanza al implementar las CFRP como material de refuerzo, así como presentan algunas recomendaciones.

9. Resistencia a flexión de una viga de acero IR con CFRP:

Capacidad de Momento flexionante con refuerzo(kq-cm)= 1.3198e+007

Incremento Resistencia(%)= 34.1094

Tipo de falla= Falla por flexión

La sección tiene un comportamiento elastoplástico

Recomendaciones:

no existe deshaderencia intermedia

y la sección tiene un comportamiento ideal

Longitud de anclaje (cm)= 33.4423

Longitud efectiva de unión (cm)= 66.8847

RUN

Figura 5.10 Resultados y recomendaciones de una viga de acero

Las recomendaciones que se dan en el programa son referentes al comportamiento de la viga de acero, que es lo que se espera respecto de la resistencia que se puede alcanzar al incrementar el refuerzo de CFRP, y los tipos de falla que se presenten en la viga reforzada. Con respecto al primer punto, se espera que la viga tenga un comportamiento elastoplástico proporcionando mayor resistencia a flexión, para que el material compuesto se encuentre trabajando en conjunto con el patín inferior, ya que la fibra de carbono solamente trabaja a tensión. Para tomar en cuenta el comportamiento de la sección, se consideró el diagrama de deformaciones en la sección transversal donde se presenta el momento flexionante máximo esperado. Si las deformaciones en la fibra del patín superior e inferior son superiores a la deformación de fluencia, el programa imprime en pantalla el siguiente aviso:

"la sección tiene un comportamiento elastoplástico"

Si la deformación superior del acero es mayor que la deformación de fluencia, y la deformación inferior del acero es menor que la deformación de fluencia se dice que:

"el refuerzo no está funcionando porque es mucho refuerzo de CFRP"

Si la deformación en la fibra superior e inferior no rebasan el valor de 0.002, la sección no tiene un comportamiento elastoplástico y se dice que:

"se debe modificar las propiedades del refuerzo"

Los modos de falla que se consideran en el proceso de análisis son: flexión, pandeo local y pandeo lateral, y por último la desadherencia intermedia. Con respecto al pandeo local y el pandeo lateral, desde el inicio del programa se verifica que estos dos fenómenos no se presenten, tomando como base lo establecido en las NTC del RDF para estructuras metálicas. La falla que se desea que se presente es la falla ocasionada por flexión, ya que las fibras de carbono trabajan a tensión y con esto se logran importantes incrementos de la resistencia. Si existe falla por desadherencia intermedia, debido a que las fibras pierden contacto con la superficie de acero, el tipo de falla corresponde a de una falla frágil. Este tipo de falla no se desea porque el refuerzo no contribuye a la resistencia a flexión, generándose un mecanismo de refuerzo costoso e inadecuado. Para evitar la falla por desadherencia y alcanzar una falla a flexión, el programa imprime en pantalla los mensajes siguientes:

- Si el tipo de falla es por flexión, la sección tiene un comportamiento ideal, lográndose que el refuerzo adherido al patín de tensión trabaje en conjunto, y el programa imprime el siguiente aviso en pantalla:

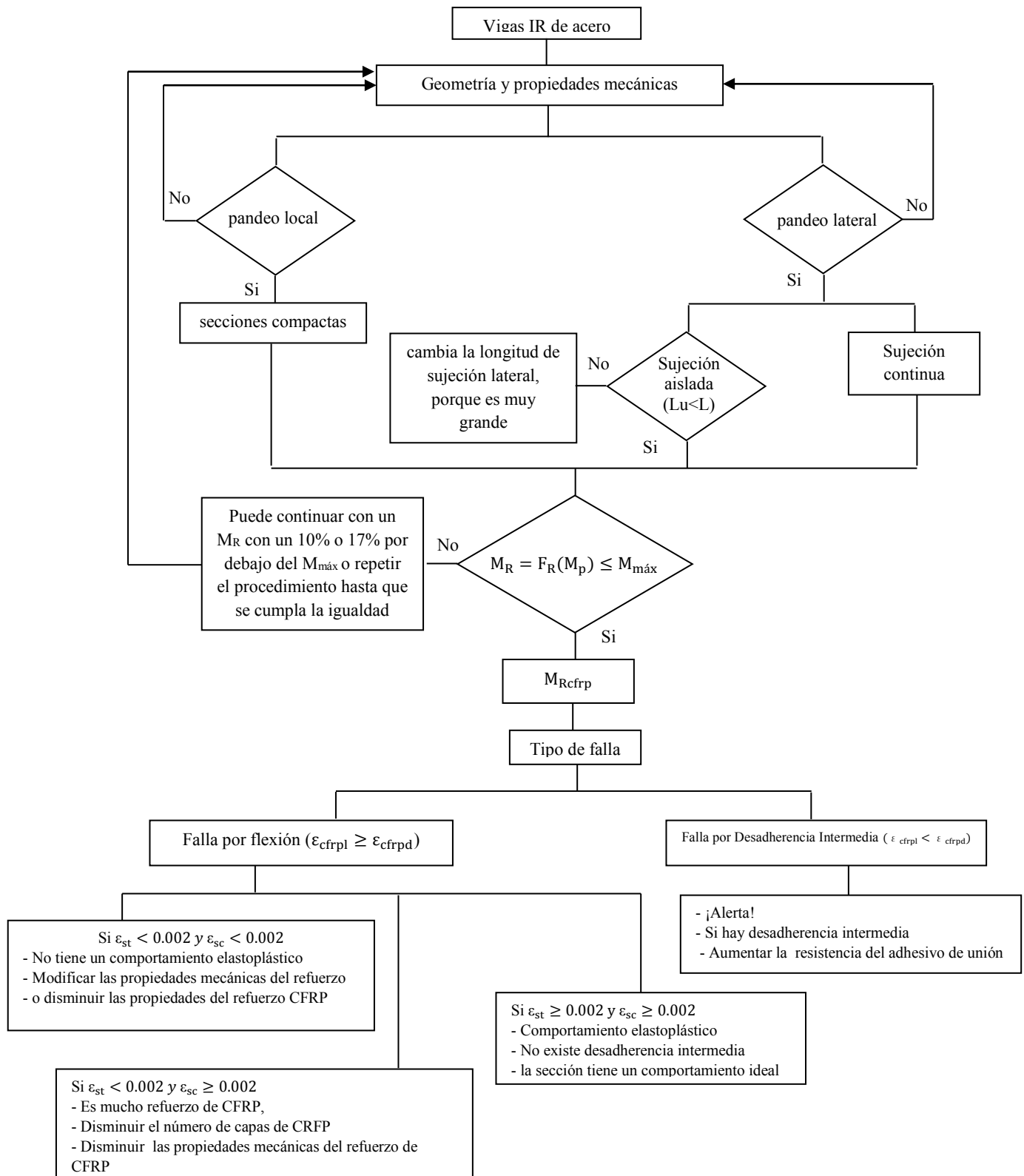
"Falla por flexión y comportamiento ideal de la sección"

- Si el tipo de falla es por desadherencia intermedia, el refuerzo no contribuye con la resistencia a flexión, debido a que el refuerzo falla antes de alcanzar su capacidad máxima. En este caso el programa muestran el siguiente mensaje:

"Falla por desadherencia intermedia, debe modificar y aumentar la resistencia a tensión del adhesivo de unión"

Es importante mencionar que la falla por desadherencia que se presenta al final no se toma en cuenta, debido a que es un mecanismo muy complejo para incluirse en el proceso de cálculo, además de que se necesita un estudio más detallado, es decir, un modelo analítico mediante un software o un análisis teórico que permita estimar la distribución de esfuerzos y deformaciones en cada etapa de desadherencia hasta llegar al colapso total. Para evitar la falla por desadherencia final, se recomienda utilizar durante el proceso constructivo un mecanismo de anclaje en los extremos del refuerzo ubicado muy cerca de los apoyos del elemento. En el programa se hace una recomendación de la longitud de anclaje y la longitud mínima que debe tener el refuerzo, conocida como longitud efectiva de unión. La longitud efectiva de unión es la longitud necesaria para que se desarrolle una buena unión entre los dos elementos, sustrato de acero y lámina de CFRP. A continuación se

presenta un diagrama de flujo de los pasos ejecutados para desarrollar el cálculo de la resistencia a flexión de la vigas IR de acero reforzadas con CFRP.



5.1.2 Vigas IR compuestas reforzadas con CFRP

5. Momento resistente sin refuerzo y momento máximo actuante en la viga IR compuesta, acero-concreto

Antes de presentar el procedimiento de la capacidad máxima a flexión con refuerzo CFRP, se realiza el cálculo del momento resistente sin refuerzo y el momento máximo actuante en la viga debido a la carga externa, como se describió en la sección anterior, para lo cual se deben cumplir las siguientes hipótesis:

$$M_{RC} \geq M_{máxc} \quad (5.3)$$

$$M_{RC} = M_n F_{RC} \quad (5.4)$$

Donde: M_{RC} , momento resistente a flexión de una viga compuesta; F_R , factor de resistencia a flexión de una viga compuesta (0.85); M_n , momento nominal de una viga compuesta; $M_{máx}$, momento máximo actuante. La expresión 5.3 y 5.4 se obtienen de acuerdo a la sección 3.5.

Si no se satisface la expresión 5.3, el programa imprime en pantalla el mensaje: *proponer otra sección*, en caso de que si se satisfaga, el programa estima el valor del M_{RC} e imprime en pantalla el mensaje: *se acepta la sección ya que $M_{RC} > M_{máx}$ y continúe*. El M_{RC} debe ser mayor que el $M_{máxc}$, de no cumplirse esta condición, el programa presenta una ventana con la advertencia: *no se acepta la sección ya que $M_{RC} < M_{máxc}$ y que debe proponer otra sección*. Sin embargo, el programa acepta la condición de que la sección transversal sea escasa en un 20% por debajo del momento de diseño de la viga, ya que al reforzar con CFRP incrementa su resistencia a flexión.

6. Geometría del refuerzo (láminas-CFRP)

Se ingresan los datos que describen la geometría del refuerzo CFRP, de acuerdo a lo que se presenta en la Figura 5.7. El valor de deformación de diseño de la fibra de carbono queda definido por el fabricante al igual que el espesor, los demás valores son función del ancho del patín o zona donde se aplicará el refuerzo y de la capacidad máxima que se requiera.

7. Propiedades mecánicas de la lámina-CFRP
8. Propiedades mecánicas del adhesivo de unión

Los pasos 7 y 8 se definen igual que en la sección 5.1.1.

9. Resistencia a flexión de una viga de acero con CFRP

En este último paso se presenta el resumen de los resultados del análisis (Figura 5.11), correspondientes a la capacidad a flexión de una viga de acero reforzada con CFRP, así como el incremento en la resistencia que se alcanza al implementar el refuerzo compuesto, así como algunas recomendaciones.

9. Resistencia a flexión de una viga de acero IR con CFRP:

Capacidad de Momento flexionante con refuerzo(kq-cm)= 1.74966e+007

Incremento Resistencia(%)= 38.409

Tipo de falla= Falla por compresión

se produce una falla frágil

Recomendaciones:

disminuir las propiedades mecánicas de la sección IR o CFRP

o disminuir el número de capas de CFRP

Longitud de anclaje (cm)= 33.4423

Longitud efectiva de unión (cm)= 66.8847

RUN

Figura 5.11 Resultados y recomendaciones de una viga compuesta, acero-concreto.

Las recomendaciones que se dan en el programa son función del comportamiento de una viga compuesta, acero-concreto, como que es lo que se espera al incrementar el refuerzo de CFRP y los tipos de falla que se presenten en la viga reforzada. Con respecto al primer punto, se espera que la viga presente una falla dúctil, para que el material compuesto se encuentre trabajando en conjunto con el patín inferior, ya que la fibra de carbono solamente trabaja a tensión, proporcionando mayor resistencia a flexión. Para tomar en cuenta el comportamiento de la sección se consideró el diagrama de deformaciones y del eje neutro balanceado, con lo cual se pueden estimar los modos de falla presentes por flexión, compresión y desadherencia intermedia.

- Si $X_b < X_c$, se produce una falla frágil, y programa imprime en pantalla los siguientes avisos dependiendo de la deformación del patín inferior del acero:

"Falla por compresión"

- Si no existe desadherencia intermedia, $\epsilon_{cfrpl} < \epsilon_{cfrpd}$

➤ Si $\epsilon_{st} < 0.002$ se dice que:

"se produce una falla frágil"

"Es mucho refuerzo de CFRP"

"Disminuir el número de capas de CFRP"

➤ Si $\epsilon_{st} \geq 0.002$ se dice que:

"se produce una falla frágil"

"Disminuir las propiedades mecánicas de la sección IR o CFRP"

"O disminuir el número de capas de CFRP"

➤ Si existe desadherencia intermedia, $\epsilon_{cfrpl} > \epsilon_{cfrpd}$

"¡Alerta!"

"Existe desadherencia intermedia"

"Aumentar las propiedades mecánicas del adhesivo de unión"

- Si $X_b > X_c$, se produce una falla frágil y se obtienen los siguientes avisos dependiendo de la deformación del patín inferior del acero:

"Falla por flexión"

➤ Si no existe desadherencia intermedia, $\epsilon_{cfrpl} < \epsilon_{cfrpd}$

➤ Si $\epsilon_{st} < 0.002$ se dice que:

"Es mucho refuerzo de CFRP"

"Disminuir el número de capas de CFRP"

"O disminuir las propiedades mecánicas del refuerzo CFRP"

➤ Si $\epsilon_{st} \geq 0.002$ se dice que:

"Comportamiento elastoplástico"

"No existe desadherencia intermedia"

"Y la sección tiene un comportamiento ideal"

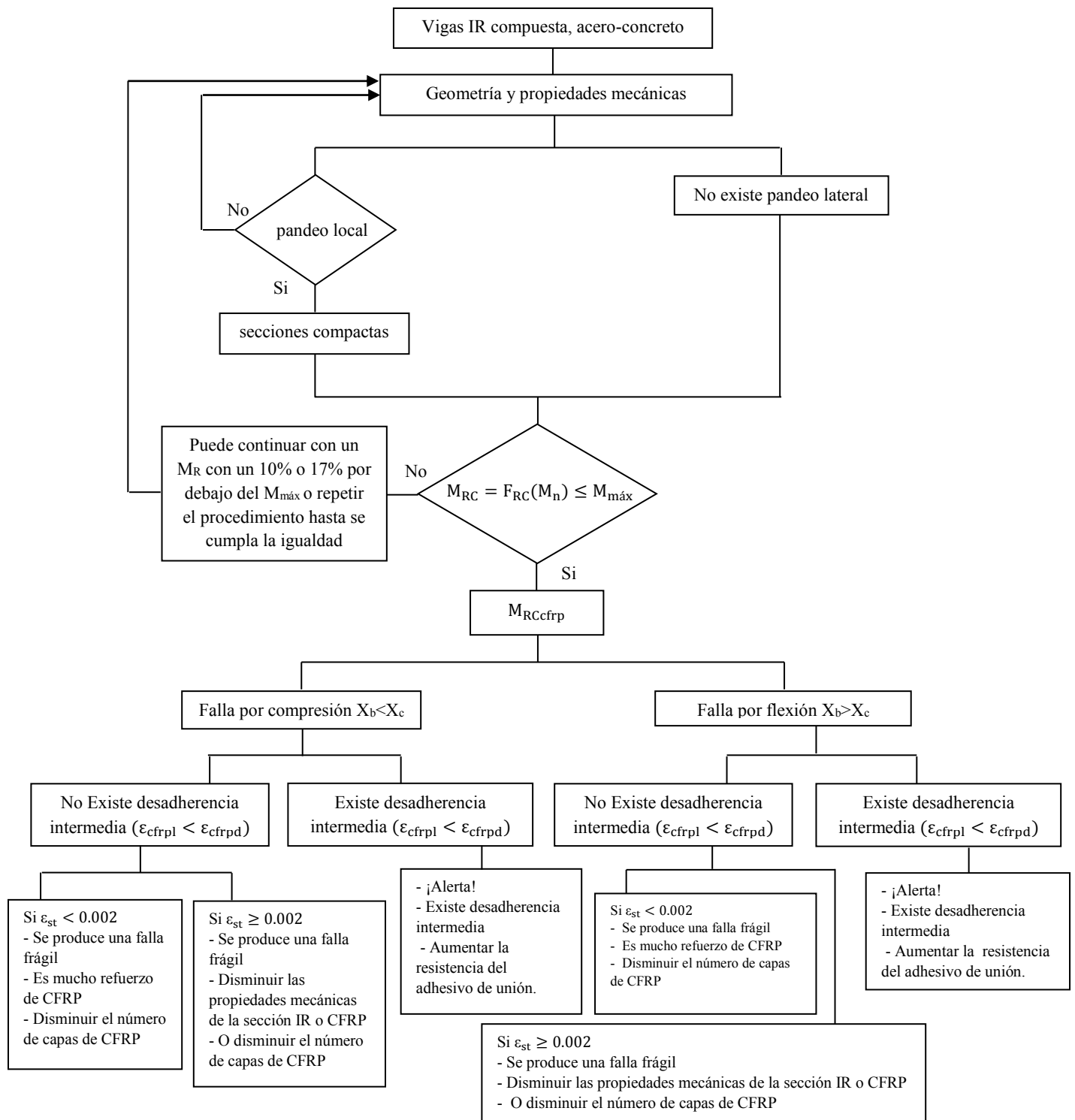
- Si existe desadherencia intermedia, $\epsilon_{\text{cfrpl}} > \epsilon_{\text{cfrpd}}$

"¡Alerta!"

"Existe desadherencia intermedia"

"Aumentar las propiedades mecánicas del adhesivo de unión"

A continuación se presenta el diagrama de flujo correspondiente al cálculo de la resistencia a flexión de una viga compuesta, acero-concreto, reforzada con láminas de CFRP:



6

C A P Í T U L O

Ejemplos de aplicación del software desarrollado

En este capítulo se describe los ejemplos de aplicación en vigas de acero y compuestas, acero-concreto, reforzadas con CFRP e implementando el programa desarrollado en este trabajo. En cada caso se consideran diferentes fibras de carbono, donde se obtiene un incremento en la resistencia a flexión. También, se realiza una descripción de la implementación del software desarrollado para determinar la capacidad a flexión de vigas IR y se comentan brevemente los resultados obtenidos.

6.1 Descripción de los casos de estudio

Los casos de estudio corresponden a viga de acero y compuestas reforzadas con láminas de carbono unidireccionales, colocadas en el patín inferior, unidas adhesivamente. En cada caso se varía el número de capas de refuerzo CFRP, las propiedades mecánicas del adhesivo y fibra de carbono, la longitud se varía sólo en las vigas compuestas. Las variables en ambos casos, son el esfuerzo a tensión y la deformación de fluencia del acero, el esfuerzo a compresión del concreto y deformación del concreto.

La selección del perfil estructural se hizo con base al manual del Instituto Mexicano de la Construcción en Acero (IMCA).

6.1.1 Vigas IR de acero

Los casos de vigas descritas a continuación corresponden a secciones compactas (tipo 1 o 2), donde se evitan los problemas debidos al pandeo lateral, esto es porque en estos casos el refuerzo de CFRP no contribuye en su resistencia. La geometría de las secciones transversales IR utilizadas corresponden al manual IMCA. También es importante señalar que se consideran vigas simplemente apoyadas, sometidas a carga puntual y distribuida.

Caso 1

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 6X9 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10 cm y un peralte 15 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 4000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 15 \text{ cm}$	$t_f = 0.55 \text{ cm}$	$t_w = 0.43 \text{ cm}$	$b_f = 10 \text{ cm}$
$Z_x = 102 \text{ cm}^3$	$Z_y = 28 \text{ cm}^3$	$S_x = 91 \text{ cm}^3$	$S_y = 18 \text{ cm}^3$
$I_x = 91 \text{ cm}^4$	$I_y = 91 \text{ cm}^4$	$A_t = 17.3 \text{ cm}^2$	$J = 1.7 \text{ cm}^4$

Caso 2

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 6X12 , con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte de 15.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 5300 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 15.3 \text{ cm}$	$t_f = 0.71 \text{ cm}$	$t_w = 0.58 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 136 \text{ cm}^3$	$Z_y = 38 \text{ cm}^3$	$S_x = 120 \text{ cm}^3$	$S_y = 25 \text{ cm}^3$
$I_x = 920 \text{ cm}^4$	$I_y = 124 \text{ cm}^4$	$A_t = 22.9 \text{ cm}^2$	$J = 3.7 \text{ cm}^4$

Caso 3

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 6X16 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 16 cm, es reforzada

con láminas de CFR colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 5000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 16 \text{ cm}$	$t_f = 0.52 \text{ cm}$	$t_w = 0.43 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 192 \text{ cm}^3$	$Z_y = 56 \text{ cm}^3$	$S_x = 167 \text{ cm}^3$	$S_y = 36 \text{ cm}^3$
$I_x = 1336 \text{ cm}^4$	$I_y = 184 \text{ cm}^4$	$A_t = 30.6 \text{ cm}^2$	$J = 9.2 \text{ cm}^4$

Caso 4

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 8X10 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10 cm y un peralte 20 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 5700 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 20 \text{ cm}$	$t_f = 0.52 \text{ cm}$	$t_w = 0.43 \text{ cm}$	$b_f = 10 \text{ cm}$
$Z_x = 145 \text{ cm}^3$	$Z_y = 27 \text{ cm}^3$	$S_x = 128 \text{ cm}^3$	$S_y = 17 \text{ cm}^3$
$I_x = 1282 \text{ cm}^4$	$I_y = 87 \text{ cm}^4$	$A_t = 19.1 \text{ cm}^2$	$J = 1.7 \text{ cm}^4$

Caso 5

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 8X13 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 20.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 7300 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 20.3 \text{ cm}$	$t_f = 0.65 \text{ cm}$	$t_w = 0.58 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 187 \text{ cm}^3$	$Z_y = 35 \text{ cm}^3$	$S_x = 162 \text{ cm}^3$	$S_y = 22 \text{ cm}^3$
$I_x = 1648 \text{ cm}^4$	$I_y = 114 \text{ cm}^4$	$A_t = 24.8 \text{ cm}^2$	$J = 3.7 \text{ cm}^4$

Caso 6

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 8X15 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 20.6 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 8700 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 20.6 \text{ cm}$	$t_f = 0.8 \text{ cm}$	$t_w = 0.62 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 223 \text{ cm}^3$	$Z_y = 44 \text{ cm}^3$	$S_x = 193 \text{ cm}^3$	$S_y = 28 \text{ cm}^3$
$I_x = 1998 \text{ cm}^4$	$I_y = 142 \text{ cm}^4$	$A_t = 28.6 \text{ cm}^2$	$J = 5.8 \text{ cm}^4$

Caso 7

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 8X18 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 13.3 cm y un peralte 20.7 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 7200 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 20.7 \text{ cm}$	$t_f = 0.84 \text{ cm}$	$t_w = 0.58 \text{ cm}$	$b_f = 13.3 \text{ cm}$
$Z_x = 279 \text{ cm}^3$	$Z_y = 76 \text{ cm}^3$	$S_x = 249 \text{ cm}^3$	$S_y = 50 \text{ cm}^3$
$I_x = 2576 \text{ cm}^4$	$I_y = 332 \text{ cm}^4$	$A_t = 33.9 \text{ cm}^2$	$J = 7.1 \text{ cm}^4$

Caso 8

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 8X21 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 13.4 cm y un peralte 21 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 8500 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 21 \text{ cm}$	$t_f = 1.02 \text{ cm}$	$t_w = 0.64 \text{ cm}$	$b_f = 13.4 \text{ cm}$
$Z_x = 334 \text{ cm}^3$	$Z_y = 93 \text{ cm}^3$	$S_x = 298 \text{ cm}^3$	$S_y = 61 \text{ cm}^3$
$I_x = 3134 \text{ cm}^4$	$I_y = 407 \text{ cm}^4$	$A_t = 39.7 \text{ cm}^2$	$J = 11.7 \text{ cm}^4$

Caso 9

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 10X12 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 100 cm, un acho de 10.1 cm y un peralte 25.1 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 16000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 25.1 \text{ cm}$	$t_f = 0.53 \text{ cm}$	$t_w = 0.48 \text{ cm}$	$b_f = 10.1 \text{ cm}$
$Z_x = 206 \text{ cm}^3$	$Z_y = 29 \text{ cm}^3$	$S_x = 179 \text{ cm}^3$	$S_y = 18 \text{ cm}^3$
$I_x = 2239 \text{ cm}^4$	$I_y = 91 \text{ cm}^4$	$A_t = 22.8 \text{ cm}^2$	$J = 2.5 \text{ cm}^4$

Caso 10

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 10X15 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 25.4 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 10000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 25.4 \text{ cm}$	$t_f = 0.69 \text{ cm}$	$t_w = 0.58 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 262 \text{ cm}^3$	$Z_y = 38 \text{ cm}^3$	$S_x = 226 \text{ cm}^3$	$S_y = 24 \text{ cm}^3$
$I_x = 2686 \text{ cm}^4$	$I_y = 120 \text{ cm}^4$	$A_t = 28.5 \text{ cm}^2$	$J = 4.2 \text{ cm}^4$

Caso 11

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 10X17 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 25.7 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 11800 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 25.7 \text{ cm}$	$t_f = 0.84 \text{ cm}$	$t_w = 0.61 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 306 \text{ cm}^3$	$Z_y = 46 \text{ cm}^3$	$S_x = 265 \text{ cm}^3$	$S_y = 29 \text{ cm}^3$
$I_x = 3409 \text{ cm}^4$	$I_y = 148 \text{ cm}^4$	$A_t = 32.2 \text{ cm}^2$	$J = 6.7 \text{ cm}^4$

Caso 12

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 10X19 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 26 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 13400 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 26 \text{ cm}$	$t_f = 1 \text{ cm}$	$t_w = 0.64 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 354 \text{ cm}^3$	$Z_y = 55 \text{ cm}^3$	$S_x = 308 \text{ cm}^3$	$S_y = 35 \text{ cm}^3$
$I_x = 4008 \text{ cm}^4$	$I_y = 176 \text{ cm}^4$	$A_t = 36.3 \text{ cm}^2$	$J = 9.6 \text{ cm}^4$

Caso 13

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 10X22 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 14.6 cm y un peralte 25.8 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 10900 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 25.8 \text{ cm}$	$t_f = 0.91 \text{ cm}$	$t_w = 0.61 \text{ cm}$	$b_f = 14.6 \text{ cm}$
$Z_x = 426 \text{ cm}^3$	$Z_y = 100 \text{ cm}^3$	$S_x = 380 \text{ cm}^3$	$S_y = 65 \text{ cm}^3$
$I_x = 4912 \text{ cm}^4$	$I_y = 475 \text{ cm}^4$	$A_t = 41.9 \text{ cm}^2$	$J = 10 \text{ cm}^4$

Caso 14

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 10X26 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 14.7 cm y un peralte 26.2 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 13000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 26.2 \text{ cm}$	$t_f = 1.12 \text{ cm}$	$t_w = 0.66 \text{ cm}$	$b_f = 14.7 \text{ cm}$
$Z_x = 513 \text{ cm}^3$	$Z_y = 123 \text{ cm}^3$	$S_x = 457 \text{ cm}^3$	$S_y = 80 \text{ cm}^3$
$I_x = 5992 \text{ cm}^4$	$I_y = 587 \text{ cm}^4$	$A_t = 49.1 \text{ cm}^2$	$J = 16.6 \text{ cm}^4$

Caso 15

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 10X30 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 14.8 cm y un peralte 26.6 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 15000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 20 \text{ cm}$	$t_f = 1.3 \text{ cm}$	$t_w = 0.76 \text{ cm}$	$b_f = 14.8 \text{ cm}$
$Z_x = 600 \text{ cm}^3$	$Z_y = 145 \text{ cm}^3$	$S_x = 531 \text{ cm}^3$	$S_y = 94 \text{ cm}^3$
$I_x = 7076 \text{ cm}^4$	$I_y = 695 \text{ cm}^4$	$A_t = 57 \text{ cm}^2$	$J = 25.8 \text{ cm}^4$

Caso 16

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X14 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 180 cm, un acho de 10.1 cm y un peralte 30.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 12000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 30.3 \text{ cm}$	$t_f = 0.57 \text{ cm}$	$t_w = 0.5 \text{ cm}$	$b_f = 10.1 \text{ cm}$
$Z_x = 285 \text{ cm}^3$	$Z_y = 31 \text{ cm}^3$	$S_x = 98 \text{ cm}^3$	$S_y = 20 \text{ cm}^3$
$I_x = 3688 \text{ cm}^4$	$I_y = 98 \text{ cm}^4$	$A_t = 26.8 \text{ cm}^2$	$J = 2.9 \text{ cm}^4$

Caso 17

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X16 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 100 cm, un acho de 10.1 cm y un peralte 30.5 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 14000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 30.5 \text{ cm}$	$t_f = 0.67 \text{ cm}$	$t_w = 0.56 \text{ cm}$	$b_f = 10.1 \text{ cm}$
$Z_x = 329 \text{ cm}^3$	$Z_y = 37 \text{ cm}^3$	$S_x = 280 \text{ cm}^3$	$S_y = 23 \text{ cm}^3$
$I_x = 4287 \text{ cm}^4$	$I_y = 117 \text{ cm}^4$	$A_t = 30.4 \text{ cm}^2$	$J = 4.2 \text{ cm}^4$

Caso 18

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X19 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 30.9 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 15500 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 30.9 \text{ cm}$	$t_f = 0.89 \text{ cm}$	$t_w = 0.6 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 405 \text{ cm}^3$	$Z_y = 49 \text{ cm}^3$	$S_x = 349 \text{ cm}^3$	$S_y = 31 \text{ cm}^3$
$I_x = 5411 \text{ cm}^4$	$I_y = 157 \text{ cm}^4$	$A_t = 35.9 \text{ cm}^2$	$J = 7.5 \text{ cm}^4$

Caso 19

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X22 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 200 cm, un acho de 10.2 cm y un peralte 31.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 18000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 31.3 \text{ cm}$	$t_f = 1.08 \text{ cm}$	$t_w = 0.66 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 480 \text{ cm}^3$	$Z_y = 60 \text{ cm}^3$	$S_x = 416 \text{ cm}^3$	$S_y = 38 \text{ cm}^3$
$I_x = 6493 \text{ cm}^4$	$I_y = 194 \text{ cm}^4$	$A_t = 41.8 \text{ cm}^2$	$J = 12 \text{ cm}^4$

Caso 20

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X26 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 16.5 cm y un peralte 31 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 15000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 31 \text{ cm}$	$t_f = 0.97 \text{ cm}$	$t_w = 0.58 \text{ cm}$	$b_f = 16.5 \text{ cm}$
$Z_x = 610 \text{ cm}^3$	$Z_y = 134 \text{ cm}^3$	$S_x = 547 \text{ cm}^3$	$S_y = 88 \text{ cm}^3$
$I_x = 8491 \text{ cm}^4$	$I_y = 720 \text{ cm}^4$	$A_t = 49.4 \text{ cm}^2$	$J = 12.5 \text{ cm}^4$

Caso 21

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X30 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 16.6 cm y un peralte 31.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 18000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 31.3 \text{ cm}$	$t_f = 1.12 \text{ cm}$	$t_w = 0.66 \text{ cm}$	$b_f = 16.6 \text{ cm}$
$Z_x = 706 \text{ cm}^3$	$Z_y = 157 \text{ cm}^3$	$S_x = 633 \text{ cm}^3$	$S_y = 102 \text{ cm}^3$
$I_x = 9906 \text{ cm}^4$	$I_y = 845 \text{ cm}^4$	$A_t = 56.7 \text{ cm}^2$	$J = 19.1 \text{ cm}^4$

Caso 22

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X35 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 16.7 cm y un peralte 31.8 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 21000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 31.8 \text{ cm}$	$t_f = 1.32 \text{ cm}$	$t_w = 0.76 \text{ cm}$	$b_f = 16.7 \text{ cm}$
$Z_x = 839 \text{ cm}^3$	$Z_y = 188 \text{ cm}^3$	$S_x = 747 \text{ cm}^3$	$S_y = 122 \text{ cm}^3$
$I_x = 11863 \text{ cm}^4$	$I_y = 1020 \text{ cm}^4$	$A_t = 66.5 \text{ cm}^2$	$J = 30.8 \text{ cm}^4$

Caso 23

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X40 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 20.3 cm y un peralte 30.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 17000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 30.3 \text{ cm}$	$t_f = 1.31 \text{ cm}$	$t_w = 0.75 \text{ cm}$	$b_f = 20.3 \text{ cm}$
$Z_x = 942 \text{ cm}^3$	$Z_y = 275 \text{ cm}^3$	$S_x = 850 \text{ cm}^3$	$S_y = 180 \text{ cm}^3$
$I_x = 12903 \text{ cm}^4$	$I_y = 1836 \text{ cm}^4$	$A_t = 76.1 \text{ cm}^2$	$J = 39.5 \text{ cm}^4$

Caso 24

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X45 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 20.4 cm y un peralte 30.6 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 19000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 30.6 \text{ cm}$	$t_f = 1.46 \text{ cm}$	$t_w = 0.85 \text{ cm}$	$b_f = 20.4 \text{ cm}$
$Z_x = 1060 \text{ cm}^3$	$Z_y = 311 \text{ cm}^3$	$S_x = 850 \text{ cm}^3$	$S_y = 203 \text{ cm}^3$
$I_x = 14568 \text{ cm}^4$	$I_y = 2081 \text{ cm}^4$	$A_t = 85.2 \text{ cm}^2$	$J = 54.5 \text{ cm}^4$

Caso 25

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 12X50 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 500 cm, un acho de 20.5 cm y un peralte 31 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 17000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 31 \text{ cm}$	$t_f = 1.63 \text{ cm}$	$t_w = 0.94 \text{ cm}$	$b_f = 20.5 \text{ cm}$
$Z_x = 1186 \text{ cm}^3$	$Z_y = 351 \text{ cm}^3$	$S_x = 1060 \text{ cm}^3$	$S_y = 228 \text{ cm}^3$
$I_x = 16400 \text{ cm}^4$	$I_y = 2343 \text{ cm}^4$	$A_t = 94.8 \text{ cm}^2$	$J = 74.1 \text{ cm}^4$

Caso 26

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 14X30 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 17.1 cm y un peralte 35.2 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 19000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 35.2 \text{ cm}$	$t_f = 0.98 \text{ cm}$	$t_w = 0.69 \text{ cm}$	$b_f = 17.1 \text{ cm}$
$Z_x = 775 \text{ cm}^3$	$Z_y = 147 \text{ cm}^3$	$S_x = 688 \text{ cm}^3$	$S_y = 95 \text{ cm}^3$
$I_x = 12112 \text{ cm}^4$	$I_y = 816 \text{ cm}^4$	$A_t = 57.1 \text{ cm}^2$	$J = 15.8 \text{ cm}^4$

Caso 27

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 14X34 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 17.1 cm y un peralte 35.5 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 22000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 35.5 \text{ cm}$	$t_f = 1.16 \text{ cm}$	$t_w = 0.72 \text{ cm}$	$b_f = 17.1 \text{ cm}$
$Z_x = 895 \text{ cm}^3$	$Z_y = 174 \text{ cm}^3$	$S_x = 796 \text{ cm}^3$	$S_y = 113 \text{ cm}^3$
$I_x = 14152 \text{ cm}^4$	$I_y = 970 \text{ cm}^4$	$A_t = 64.5 \text{ cm}^2$	$J = 23.7 \text{ cm}^4$

Caso 28

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 14X38 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 17.2 cm y un peralte 35.8 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 25000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 35.8 \text{ cm}$	$t_f = 1.31 \text{ cm}$	$t_w = 0.79 \text{ cm}$	$b_f = 17.2 \text{ cm}$
$Z_x = 1008 \text{ cm}^3$	$Z_y = 198 \text{ cm}^3$	$S_x = 796 \text{ cm}^3$	$S_y = 129 \text{ cm}^3$
$I_x = 16025 \text{ cm}^4$	$I_y = 1111 \text{ cm}^4$	$A_t = 72.3 \text{ cm}^2$	$J = 33.3 \text{ cm}^4$

Caso 29

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 14X43 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 20.3 cm y un peralte 34.7 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 21000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 34.7 \text{ cm}$	$t_f = 1.35 \text{ cm}$	$t_w = 0.78 \text{ cm}$	$b_f = 20.3 \text{ cm}$
$Z_x = 1141 \text{ cm}^3$	$Z_y = 283 \text{ cm}^3$	$S_x = 1027 \text{ cm}^3$	$S_y = 185 \text{ cm}^3$
$I_x = 17815 \text{ cm}^4$	$I_y = 1881 \text{ cm}^4$	$A_t = 81.3 \text{ cm}^2$	$J = 43.7 \text{ cm}^4$

Caso 30

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 14X48 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 20.4 cm y un peralte 35 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 23000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 35 \text{ cm}$	$t_f = 1.51 \text{ cm}$	$t_w = 0.86 \text{ cm}$	$b_f = 20.4 \text{ cm}$
$Z_x = 1285 \text{ cm}^3$	$Z_y = 321 \text{ cm}^3$	$S_x = 1152 \text{ cm}^3$	$S_y = 210 \text{ cm}^3$
$I_x = 20187 \text{ cm}^4$	$I_y = 2139 \text{ cm}^4$	$A_t = 91 \text{ cm}^2$	$J = 60.8 \text{ cm}^4$

Caso 31

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 14X53 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 500 cm, un acho de 20.5 cm y un peralte 35.4 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 21000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 35.4 \text{ cm}$	$t_f = 1.68 \text{ cm}$	$t_w = 0.94 \text{ cm}$	$b_f = 20.5 \text{ cm}$
$Z_x = 1427 \text{ cm}^3$	$Z_y = 361 \text{ cm}^3$	$S_x = 1275 \text{ cm}^3$	$S_y = 234 \text{ cm}^3$
$I_x = 22518 \text{ cm}^4$	$I_y = 2402 \text{ cm}^4$	$A_t = 100.7 \text{ cm}^2$	$J = 80.7 \text{ cm}^4$

Caso 32

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 16X36 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 17.7 cm y un peralte 40.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 25000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 40.3 \text{ cm}$	$t_f = 1.09 \text{ cm}$	$t_w = 0.75 \text{ cm}$	$b_f = 17.7 \text{ cm}$
$Z_x = 1049 \text{ cm}^3$	$Z_y = 117 \text{ cm}^3$	$S_x = 926 \text{ cm}^3$	$S_y = 115 \text{ cm}^3$
$I_x = 18647 \text{ cm}^4$	$I_y = 1020 \text{ cm}^4$	$A_t = 68.4 \text{ cm}^2$	$J = 22.5 \text{ cm}^4$

Caso 33

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 16X40 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 17.8 cm y un peralte 40.7 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 30000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 40.7 \text{ cm}$	$t_f = 1.28 \text{ cm}$	$t_w = 0.78 \text{ cm}$	$b_f = 17.8 \text{ cm}$
$Z_x = 1195 \text{ cm}^3$	$Z_y = 208 \text{ cm}^3$	$S_x = 1060 \text{ cm}^3$	$S_y = 135 \text{ cm}^3$
$I_x = 21561 \text{ cm}^4$	$I_y = 1203 \text{ cm}^4$	$A_t = 76.1 \text{ cm}^2$	$J = 32.9 \text{ cm}^4$

Caso 34

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 16X45 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 300 cm, un acho de 17.9 cm y un peralte 41 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 33000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 41 \text{ cm}$	$t_f = 1.44 \text{ cm}$	$t_w = 0.88 \text{ cm}$	$b_f = 17.9 \text{ cm}$
$Z_x = 1349 \text{ cm}^3$	$Z_y = 238 \text{ cm}^3$	$S_x = 1191 \text{ cm}^3$	$S_y = 153 \text{ cm}^3$
$I_x = 24391 \text{ cm}^4$	$I_y = 1365 \text{ cm}^4$	$A_t = 85.8 \text{ cm}^2$	$J = 46.2 \text{ cm}^4$

Caso 35

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 16X50 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 18 cm y un peralte 41.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 28000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 41.3 \text{ cm}$	$t_f = 1.6 \text{ cm}$	$t_w = 0.97 \text{ cm}$	$b_f = 18 \text{ cm}$
$Z_x = 1508 \text{ cm}^3$	$Z_y = 267 \text{ cm}^3$	$S_x = 1327 \text{ cm}^3$	$S_y = 172 \text{ cm}^3$
$I_x = 27430 \text{ cm}^4$	$I_y = 1548 \text{ cm}^4$	$A_t = 94.8 \text{ cm}^2$	$J = 63.3 \text{ cm}^4$

Caso 36

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 18X60 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 19.2 cm y un peralte 46.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 37000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 46.3 \text{ cm}$	$t_f = 1.77 \text{ cm}$	$t_w = 1.05 \text{ cm}$	$b_f = 19.2 \text{ cm}$
$Z_x = 2016 \text{ cm}^3$	$Z_y = 338 \text{ cm}^3$	$S_x = 1770 \text{ cm}^3$	$S_y = 218 \text{ cm}^3$
$I_x = 40957 \text{ cm}^4$	$I_y = 2085 \text{ cm}^4$	$A_t = 113.6 \text{ cm}^2$	$J = 90.3 \text{ cm}^4$

Caso 37

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 18X65 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 19.3 cm y un peralte 46.6 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 40000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 46.6 \text{ cm}$	$t_f = 1.91 \text{ cm}$	$t_w = 1.14 \text{ cm}$	$b_f = 19.3 \text{ cm}$
$Z_x = 2179 \text{ cm}^3$	$Z_y = 369 \text{ cm}^3$	$S_x = 1917 \text{ cm}^3$	$S_y = 236 \text{ cm}^3$
$I_x = 44537 \text{ cm}^4$	$I_y = 2281 \text{ cm}^4$	$A_t = 123.2 \text{ cm}^2$	$J = 114 \text{ cm}^4$

Caso 38

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 18X71 con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 400 cm, un acho de 19.4 cm y un peralte 46.9 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga distribuida en todo la longitud, con una magnitud de 44000 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 46.9 \text{ cm}$	$t_f = 2.06 \text{ cm}$	$t_w = 1.26 \text{ cm}$	$b_f = 19.4 \text{ cm}$
$Z_x = 2376 \text{ cm}^3$	$Z_y = 405 \text{ cm}^3$	$S_x = 2081 \text{ cm}^3$	$S_y = 259 \text{ cm}^3$
$I_x = 48699 \text{ cm}^4$	$I_y = 2510 \text{ cm}^4$	$A_t = 134.2 \text{ cm}^2$	$J = 145 \text{ cm}^4$

Caso 39

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 30X99, con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 500 cm, un acho de 26.5 cm y un peralte de 75.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 300 kg/cm.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 75.3 \text{ cm}$	$t_f = 1.7 \text{ cm}$	$t_w = 1.32 \text{ cm}$	$b_f = 26.5 \text{ cm}$
$Z_x = 5113 \text{ cm}^3$	$Z_y = 633 \text{ cm}^3$	$S_x = 4408 \text{ cm}^3$	$S_y = 401 \text{ cm}^3$
$I_x = 166076 \text{ cm}^4$	$I_y = 5328 \text{ cm}^4$	$A_t = 187.8 \text{ cm}^2$	$J = 157 \text{ cm}^4$

Caso 40

Una viga de acero simplemente apoyada, de sección IR 36X160, con sujeción lateral aislada en los puntos A y B, con una longitud de 600 cm, un acho de 26.5 cm y un peralte de 75.3 cm, es reforzada con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 300 kg/cm.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 91.5 \text{ cm}$	$t_f = 1.65 \text{ cm}$	$t_w = 1.32 \text{ cm}$	$b_f = 30.5 \text{ cm}$
$Z_x = 10225 \text{ cm}^3$	$Z_y = 1267 \text{ cm}^3$	$S_x = 8882 \text{ cm}^3$	$S_y = 805 \text{ cm}^3$
$I_x = 405824 \text{ cm}^4$	$I_y = 12279 \text{ cm}^4$	$A_t = 303.2$	$J = 516 \text{ cm}^4$

6.1.2 Vigas IR compuestas

A continuación se describen los casos de vigas estudiados en este apartado, cuyas secciones corresponden a la clasificación de secciones compactas, tipo 1 y 2, donde no existe pandeo lateral porque el patín superior está embebido en la losa de concreto, con un espesor constante en la losa de concreto de 12 cm, sometidas a una carga puntual y distribuida. La geometría de las secciones transversal de las vigas se obtiene del manual IMCA. Se consideran solamente dos casos ya que el proceso es repetitivo, y el objetivo de presentar estos casos solamente es ejemplificar el análisis y comportamiento de las vigas compuestas.

Caso 1

Una viga compuesta, acero-concreto, simplemente apoyada con el patín superior embebido en la losa de concreto. La losa tiene un espesor de 15 cm y un ancho de 250 cm. El perfil de acero es un IR 6X9. La longitud de la viga es 1000 cm y se refuerza con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La viga está sometida a una carga distribuida, con una magnitud de 6 kg/cm².

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 15 \text{ cm}$	$t_f = 0.55 \text{ cm}$	$t_w = 0.43 \text{ cm}$	$b_f = 10 \text{ cm}$
$Z_x = 102 \text{ cm}^3$	$Z_y = 28 \text{ cm}^3$	$S_x = 91 \text{ cm}^3$	$S_y = 18 \text{ cm}^3$
$I_x = 91 \text{ cm}^4$	$I_y = 91 \text{ cm}^4$	$A_t = 17.3 \text{ cm}^2$	$J = 1.7 \text{ cm}^4$

Caso 2

Una viga compuesta, acero-concreto, simplemente apoyada con el patín superior embebido en la losa de concreto. La losa tiene un espesor de 15 cm y un ancho de 400 cm. El perfil de acero es un IR 6X16. La longitud de la viga es 2000 cm y se refuerza con láminas de CFRP colocadas en el patín inferior de la viga. La está sometida a una carga concentrada al centro del claro, con una magnitud de 2300 kg.

La geometría de la sección transversal IR:

$h = 16 \text{ cm}$	$t_f = 1.03 \text{ cm}$	$t_w = 0.66 \text{ cm}$	$b_f = 10.2 \text{ cm}$
$Z_x = 192 \text{ cm}^3$	$Z_y = 56 \text{ cm}^3$	$S_x = 167 \text{ cm}^3$	$S_y = 36 \text{ cm}^3$
$I_x = 1336 \text{ cm}^4$	$I_y = 184 \text{ cm}^4$	$A_t = 30.6 \text{ cm}^2$	$J = 9.2 \text{ cm}^4$

6.2 Implementación del Software desarrollado

El software desarrollado es función del tipo de viga que desee revisar, es decir, de acero o compuesta. Para esto se necesita seleccionar el caso de acuerdo a las definiciones que se presentan en la Figura 6.1, donde el usuario debe teclear "a" si es una viga de acero y "b" si es una viga compuesta, la letra debe estar en minúscula.

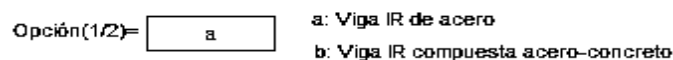


Figura 6.1 Casos establecidos de acuerdo al tipo de viga.

Después, se ingresan las propiedades geométricas de la sección IR 6X16 para una viga de acero respecto a la Figura 6.2. Las propiedades mecánicas y el tipo de carga se definen como se muestra en la Figura 6.3, donde se observa que los valores de la losa de concreto están desactivados. Esto es porque se ha seleccionado la opción 1, para vigas de acero. Si selecciona el segundo caso, b, se desactivan de forma instantánea y se puede ingresar los valores correspondientes.

1. Geometría de la sección IR:			
L(cm)=	300	h(cm)=	16
tf(cm)=	1.03	tw(cm)=	0.66
bf(cm)=	10.2	As(cm ²)=	30.6
Ix(cm ⁴)=	1336	Iy(cm ⁴)=	184
Sx(cm ³)=	167	Sy(cm ³)=	36
Zx(cm ³)=	192	Zy(cm ³)=	56
J(cm ⁴)=	9.2		

Figura 6.2 Propiedades geométricas de una viga IR de acero.

2. Propiedades mecánicas de la sección IR:			
Es(kg/cm ²)=	2000000	G(kg/cm ²)=	784000
Fy(kg/cm ²)=	2530	Dy cm/cm=	0.002
hc(cm)=	15	F'c(kg/cm ²)=	350
be(cm)=	400	Dc=	0.003
FSs=	1		

3. Cargas:	
Opción(CD/CC)=	CC
P(kg o kg/cm)=	5000

CC: carga concentrada
CD: carga distribuida

Figura 6.3 Propiedades mecánicas y condiciones de carga para una viga IR de acero.

Una vez que se han ingresado los datos antes descritos, el programa procede a realizar la revisión de pandeo local y pandeo lateral (Figura 6.4). En el caso de vigas de acero, se considera que ambos efectos deben ser revisados, esto es porque al estar presentes en la viga, el refuerzo con CFRP no contribuye en su resistencia, Figura 6.4a. Si la viga tiene pandeo local o lateral se envía un mensaje en la ventana de apoyo, que debe realizar cambios en la geometría de la sección o cambiar la longitud entre apoyos. En el caso de vigas compuestas, acero-concreto sólo se hace la revisión

por pandeo local, ya que no existe pandeo lateral y no es necesario su revisión por la presencia de la losa de concreto, solo se realiza la revisión de pandeo local, Figura 6.4b.

4. Revisión del pandeo local y pandeo lateral de la sección IR:

Tipo de Sección= Tipo 1:Son secciones compactas

Opción(SC/SA)= SA SA:sujeción aislada SC:sujeción continua

Revisión de pandeo lateral= No existe pandeo lateral

4. Revisión del pandeo local y pandeo lateral de la sección IR:

Tipo de Sección= Tipo 2:Son secciones compactas

Opción(SC/SA)= SC SA:sujeción aislada SC:sujeción continua

Revisión de pandeo lateral= No es necesario hacer la revisión

a) Sección IR de acero
b) Sección IR compuesta

Figura 6.4 Revisión del pandeo local y lateral para vigas de acero y compuestas, acero-concreto.

En la Figura 6.5 se muestra el cálculo del momento resistente sin refuerzo, donde se observa que en ambos casos no se acepta la sección debido a que el momento actuante es mayor al momento resistente. Sin embargo, se puede continuar, ya que al implementar el refuerzo con CFRP incrementa su resistencia.

5. Momento Resistente sin refuerzo y Momento máximo actuante en la viga IR:

Capacidad de Momento flexionante sin refuerzo(kg-cm)= 437184

Mmáx(kg-cm)= 528780

Incremento (%)= -17.3221 No se acepta la sección ya que $MR < Mmáx$

debe proponer otra sección

5. Momento Resistente sin refuerzo y Momento máximo actuante en la viga IR:

Capacidad de Momento flexionante sin refuerzo(kg-cm)= 803625

Mmáx(kg-cm)= 1.07374e+006

Incremento (%)= -25.1568 No se acepta la sección ya que $MR < Mmáx$

debe proponer otra sección

a) Sección IR de acero
b) Sección IR compuesta

Figura 6.5 Momento resistente no reforzado, para vigas de acero y compuestas, acero-concreto

Después, se ingresa la geometría, propiedades de la fibra de carbono y adhesivo de unión, ambos se obtienen del fabricante, Figura 6.6.

En la Figura 6.7, se observa el cálculo del momento resistente con fibra de carbono, donde se presenta una falla por flexión y sin desadherencia intermedia. Además, se estima el valor de la longitud de anclaje en dado caso que se necesario y la longitud mínima que se

6. Geometría de la lámina-CFRP:

bcfrp(cm)= 10.2 tcfrp(cm)= 0.0166

Numero de capas de CFRP= 1 Dcfrp= 0.018

7. Propiedades mecánicas de la lámina-CFRP:

Ecfrp(kg/cm2)= 2344000 Fcfrp(kg/cm2)= 49900

FScfrp= 1.25

8. Propiedades mecánicas del adhesivo de unión:

Ea(kg/cm2)= 20000 Fa(kg/cm2)= 520

ta(cm)= 0.0834 FSa= 1.25

Figura 6.6 Geometría, propiedades mecánicas de la fibra de carbono y del adhesivo de unión.

requiere para obtener un buen comportamiento y desarrollar la energía necesaria para evitar una desadherencia prematura.

9. Resistencia a flexión de una viga de acero IR con CFRP:

Capacidad de Momento flexionante con refuerzo(kg-cm)= 592316

Incremento Resistencia(%)= 12.0156

Tipo de falla= Falla por flexión

Comportamiento elastoplástico

Recomendaciones:

no existe desadherencia intermedia

y la sección tiene un comportamiento ideal

Longitud de anclaje (cm)= 33.6971

Longitud efectiva de unión (cm)= 67.3941

RUN

9. Resistencia a flexión de una viga de acero IR con CFRP:

Capacidad de Momento flexionante con refuerzo(kg-cm)= 1.10822e+006

Incremento Resistencia(%)= 3.21062

Tipo de falla= Falla por flexión

Comportamiento elastoplástico

Recomendaciones:

no existe desadherencia intermedia

y la sección tiene un comportamiento ideal

Longitud de anclaje (cm)= 33.6176

Longitud efectiva de unión (cm)= 67.2353

RUN

a) Sección IR de acero

b) Sección IR compuesta

Figura 6.7 Momento resistente reforzado con CFRP, para vigas de acero y compuestas, acero-concreto

6.3 Resultados

En esta sección se presentan y discuten los resultados para los casos descritos en la sección 6.1, correspondientes a vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP, bajo la acción de carga uniforme y puntual. La forma de presentar los resultados es mediante gráficas, donde se observa el incremento del momento resistente con CFRP dependiendo del número de capas. En todos los casos se consideró un acero estructural A36, un concreto no reforzado y con un espesor de losa de 15 cm en vigas compuestas. En la Tabla 6.1 a 6.3, se muestran las propiedades mecánicas del acero, concreto, fibra de carbono y del tipo de adhesivo, así como el espesor correspondiente a los dos últimos materiales. Es importante mencionar que los factores de resistencia se obtienen de las NTC del RDF para estructuras metálicas, los factores de seguridad son con base a la guía de diseño (CNR-DT 202/2005) y la fibra de carbono es de alta resistencia, unidireccionales, con un adhesivo de unión tipo epoxi, llamado Sikadur 301.

Tabla 6.1 Propiedades mecánicas del acero estructural y del concreto					
Material	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Resistencia a tensión (kg)	Resistencia a compresión (kg)	Deformación unitaria de diseño	Factor de resistencia
Acero A36	2000000	2530		0.002	0.9
Concreto	140000		350	0.003	0.85

Tabla 6.2 Propiedades mecánicas de las diferentes fibras de refuerzo				
Fibra	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Resistencia a tensión (kg)	Deformación unitaria de diseño	factor de seguridad
SikaWrap-301C	2344000	49900	0.018	1.25
SikaWrap-530C	2446000	40770	0.014	1.25
SikaWrap-601C	2344000	49900	0.018	1.25

Tabla 6.3 Espesor de la fibra de carbono y adhesivo		
Fibra de carbono	tcfrp (mm)	ta (mm)
SikaWrap-301C	0.166	0.834
SikaWrap-530C	0.293	1.007
SikaWrap-601C	0.337	0.963

A continuación se presenta un conjunto de gráficas para vigas de acero (Figura 6.1 a 6.40) y compuestas (Figura 41y 42) donde se muestran los resultados obtenidos. Las gráficas presentan en el eje de las ordenadas el valor del momento resistente de la viga reforzada con láminas de carbono, mientras que en el eje de las abscisas se presenta el número de capas de CFRP, para los perfiles IR descritos en la sección 6.1. En todos los casos se consideraron 5 capas de refuerzo.

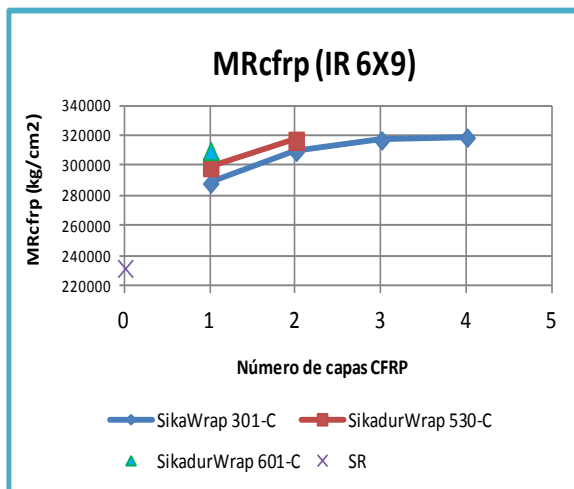


Figura 6.8 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 6x9

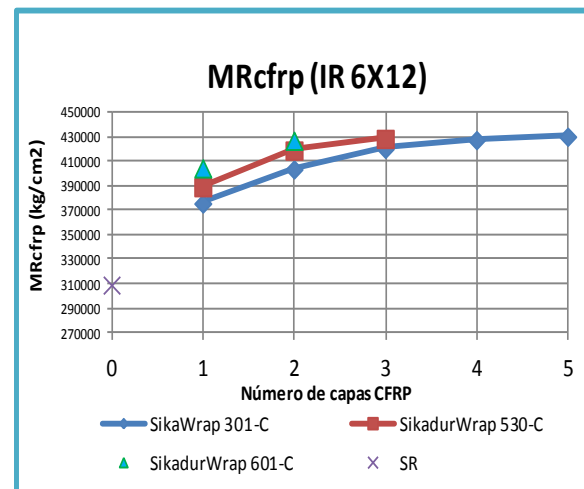


Figura 6.9 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 6x12

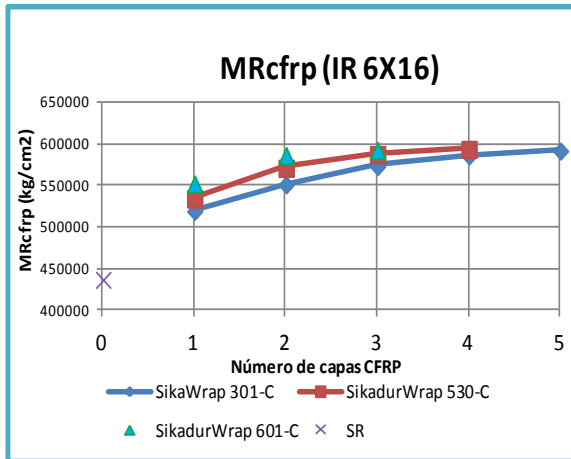


Figura 6.10 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 6x16

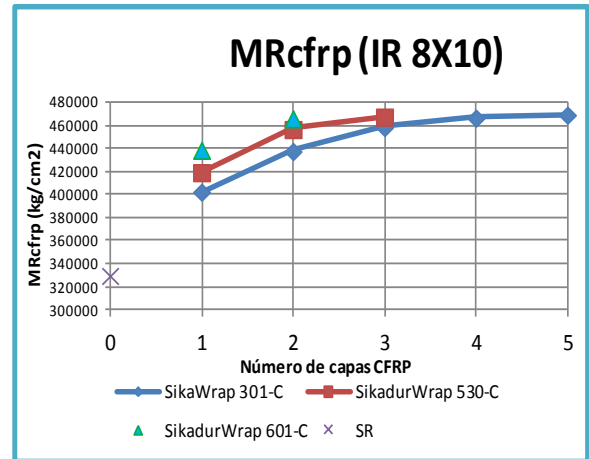


Figura 6.11 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x10

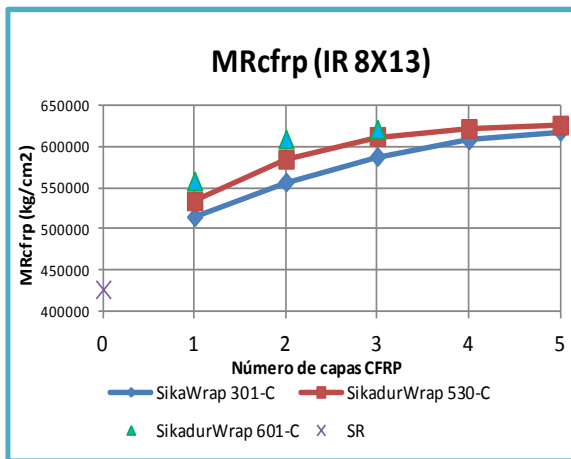


Figura 6.12 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x13

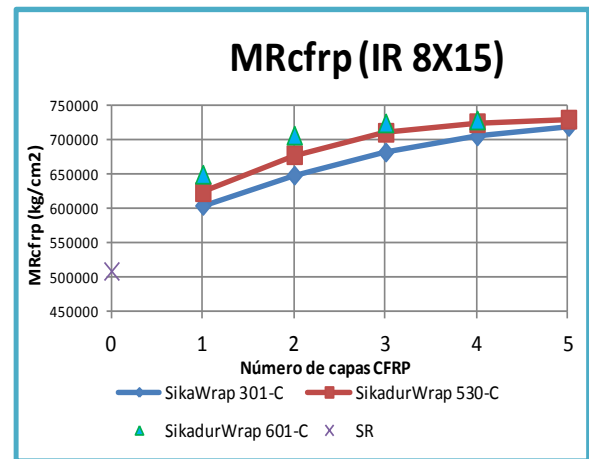


Figura 6.13 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x15

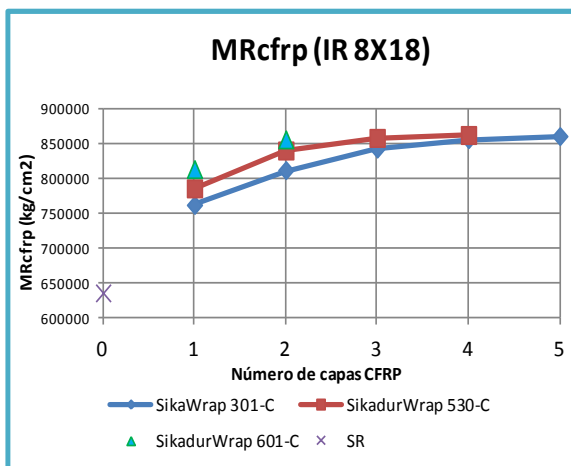


Figura 6.14 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x18

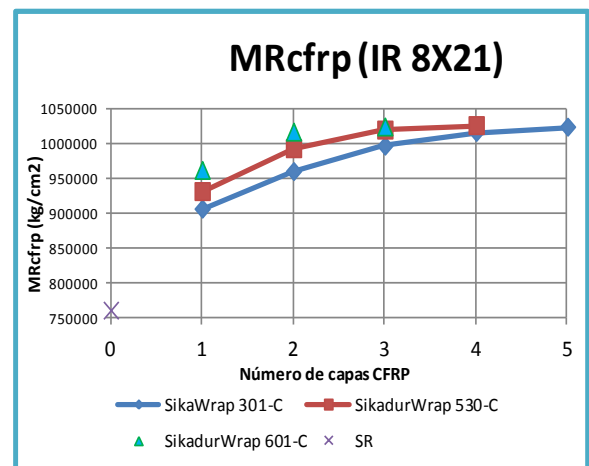


Figura 6.15 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 8x21

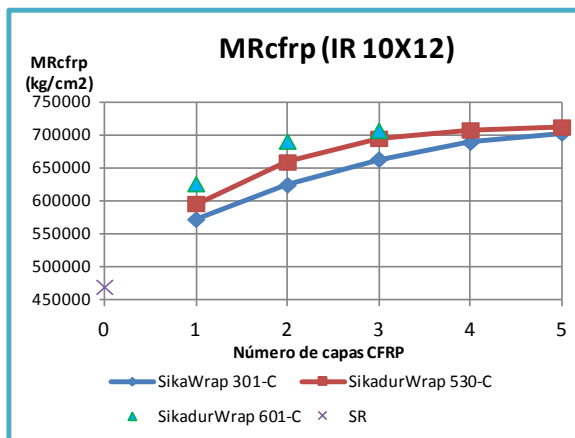


Figura 6.16 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x12

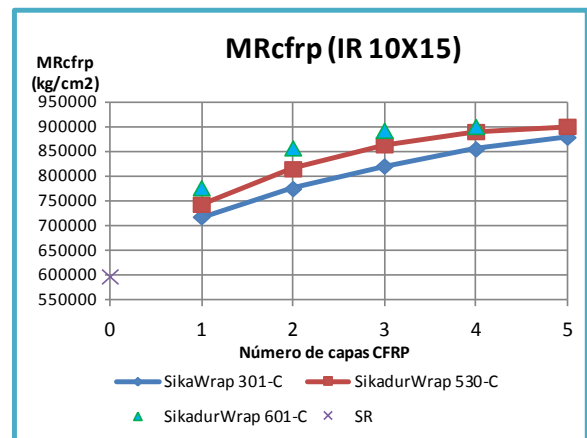


Figura 6.17 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x15

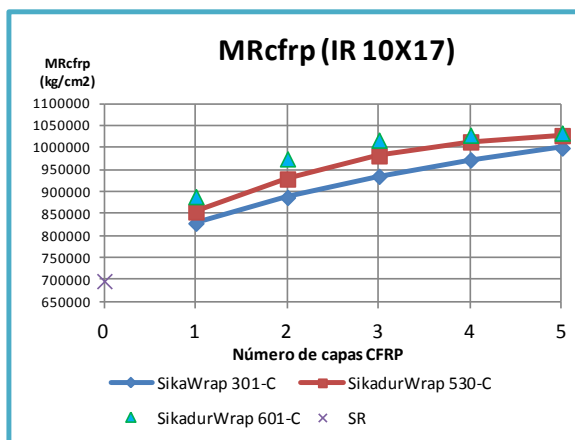


Figura 6.18 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x17

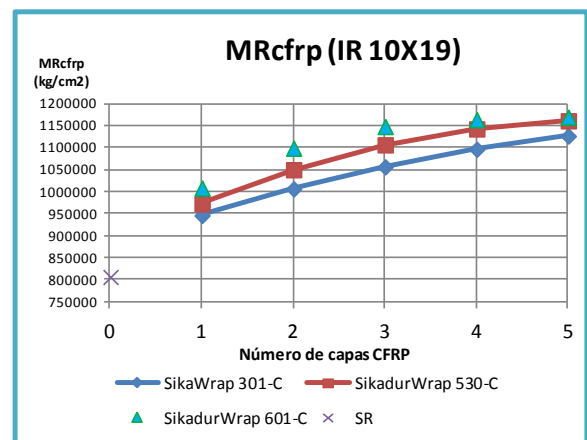


Figura 6.19 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x19

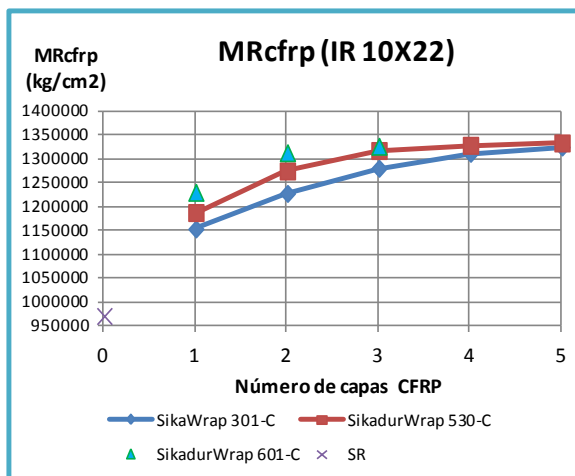


Figura 6.20 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x22

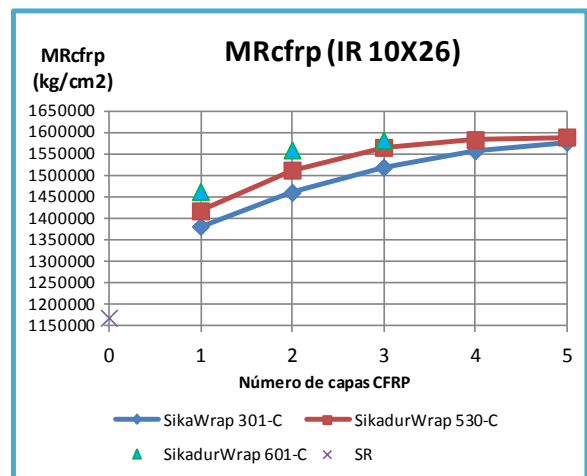


Figura 6.21 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x26

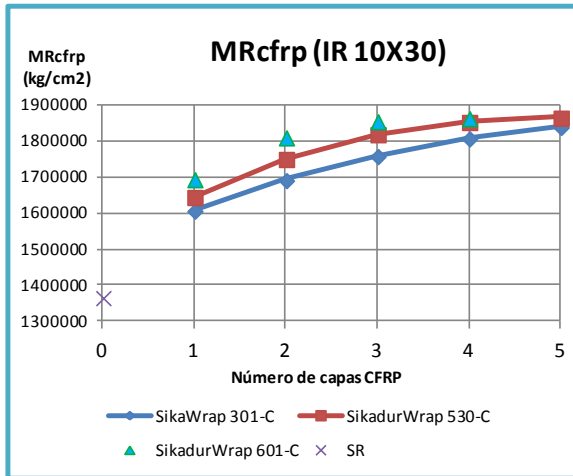


Figura 6.22 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 10x30

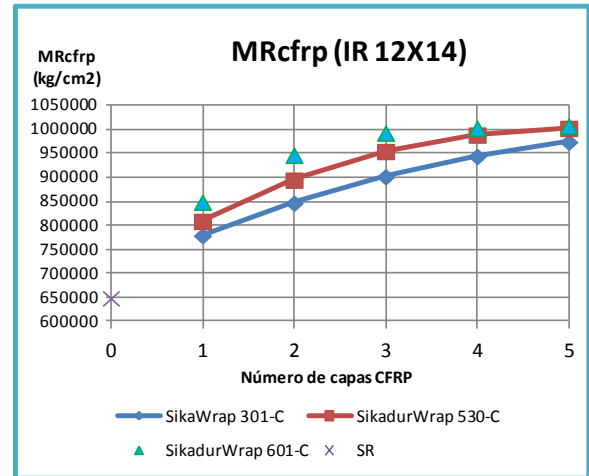


Figura 6.23 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x14

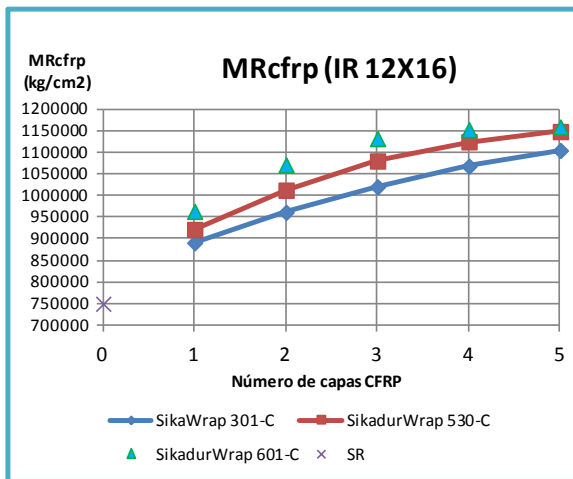


Figura 6.24 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x16

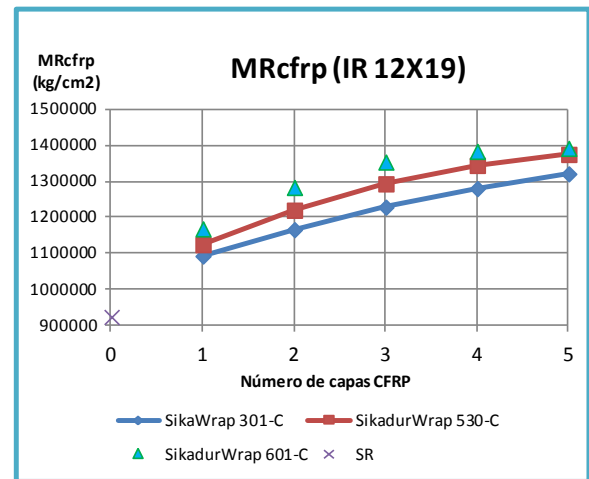


Figura 6.25 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x19

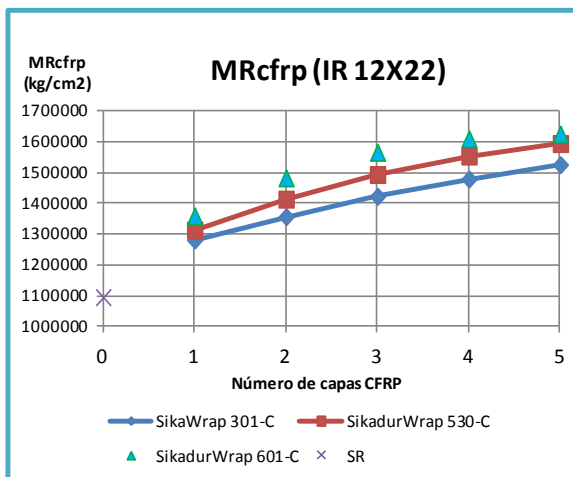


Figura 6.26 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x22

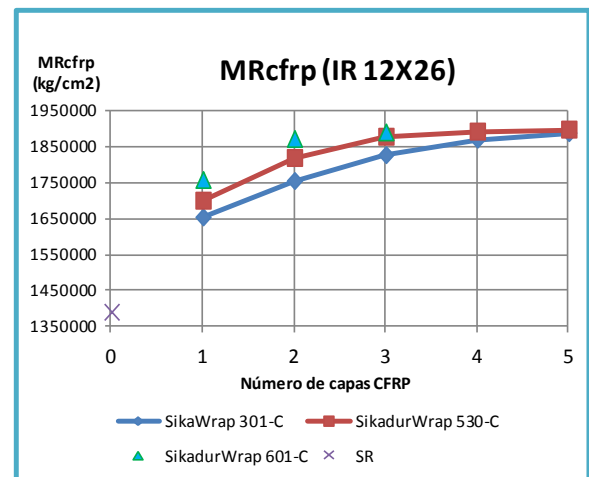


Figura 6.27 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x26

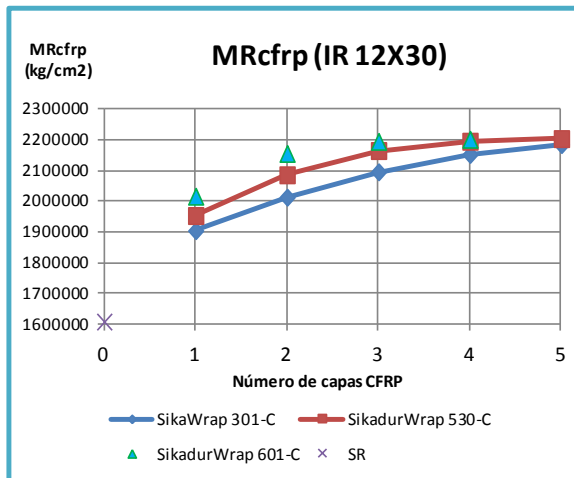


Figura 6.28 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x30

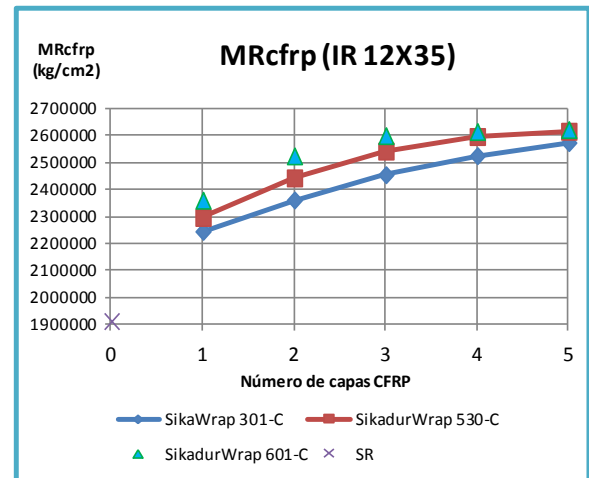


Figura 6.29 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x35

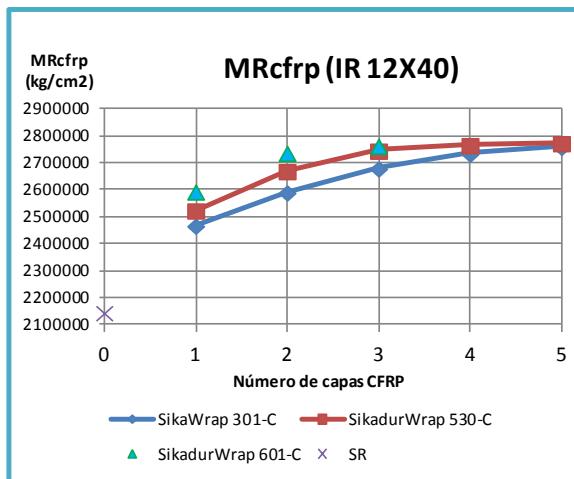


Figura 6.30 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x40

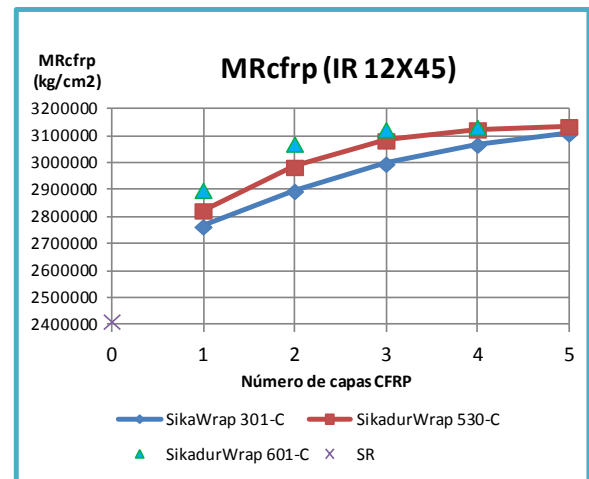


Figura 6.31 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x45

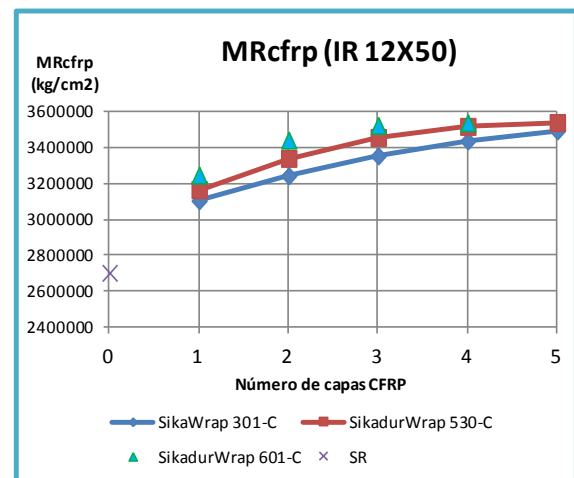


Figura 6.32 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x50

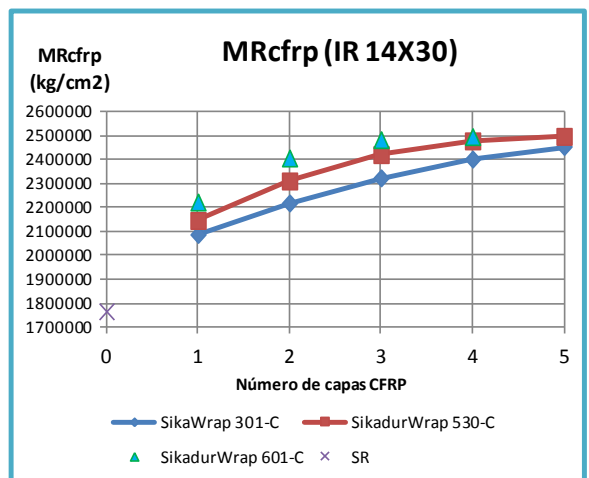


Figura 6.33 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x30

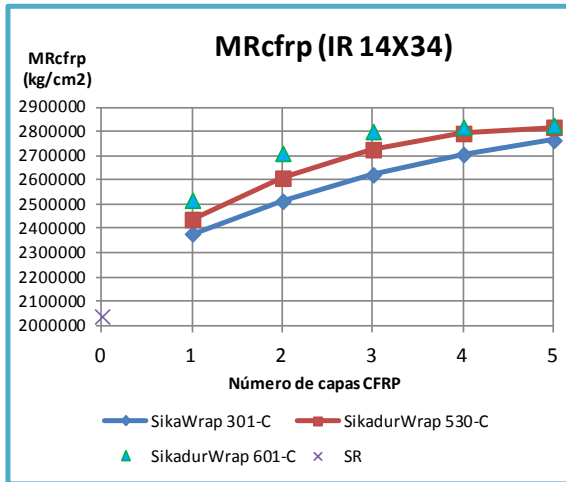


Figura 6.34 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x34

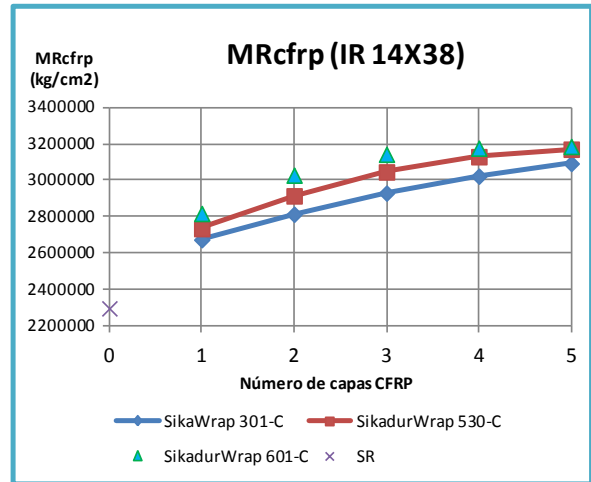


Figura 6.35 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x38

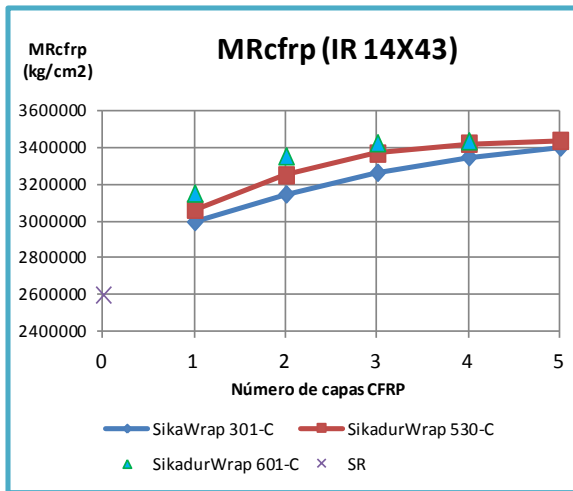


Figura 6.36 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x43

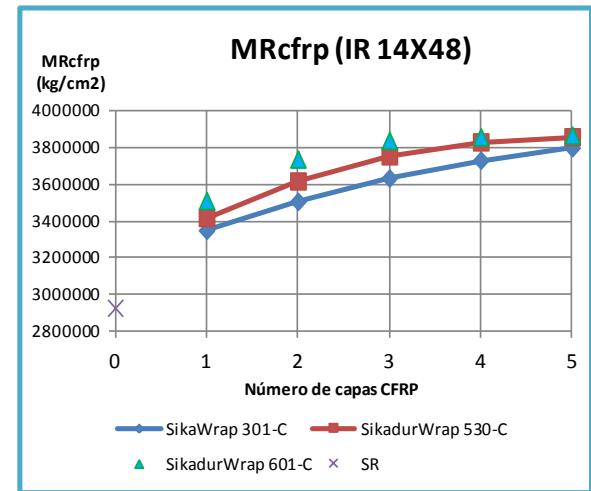


Figura 6.37 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 14x48

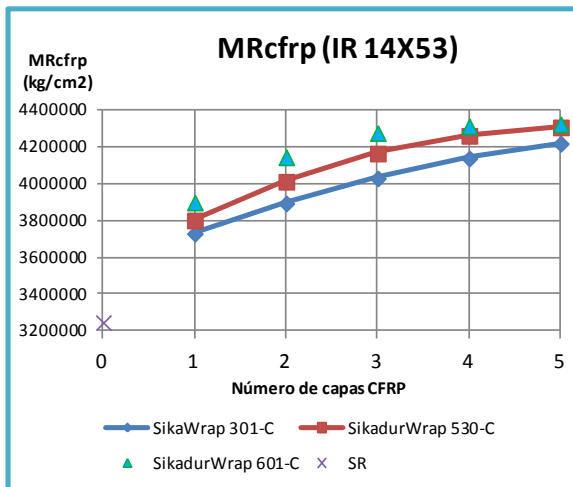


Figura 6.38 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 12x53

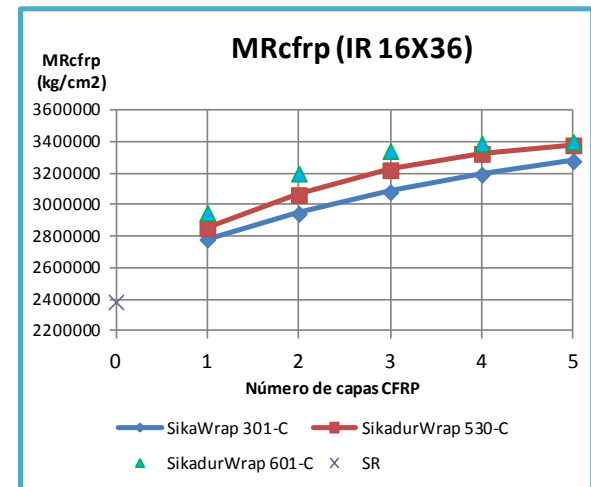


Figura 6.39 Curva MRcfrp vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16x36

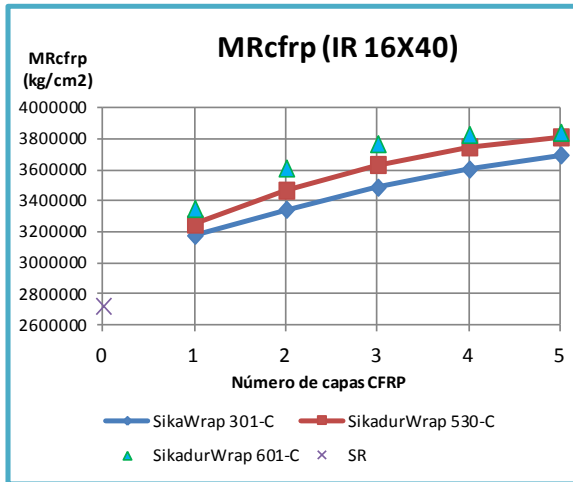


Figura 6.40 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16X40

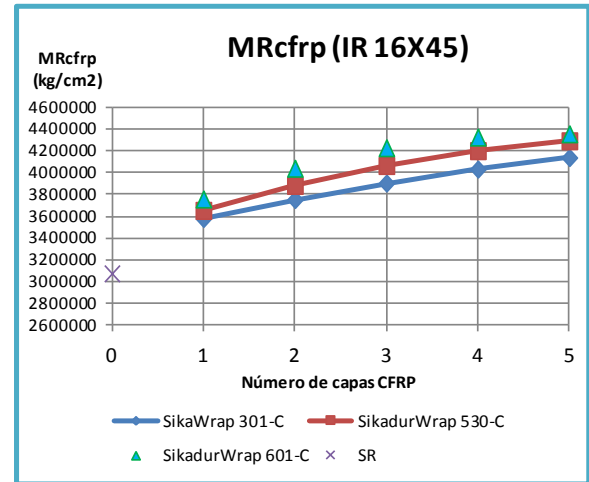


Figura 6.41 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16x45

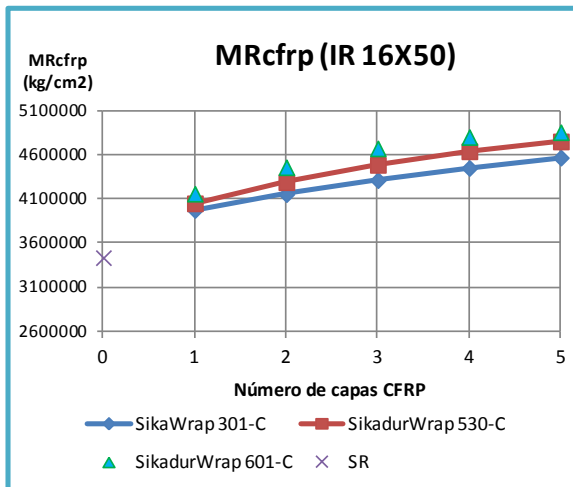


Figura 6.42 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 16X50

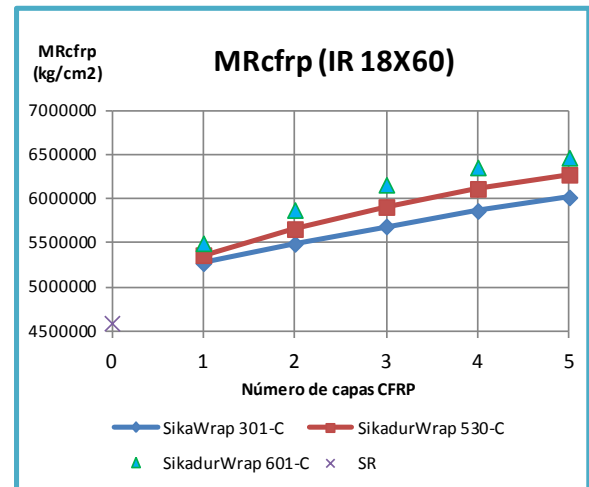


Figura 6.43 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 18X80

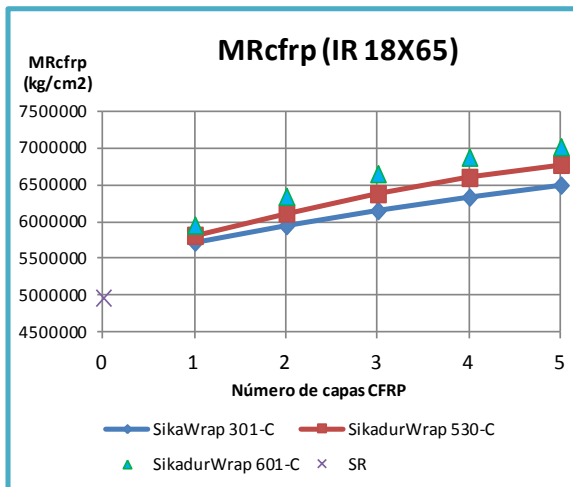


Figura 6.44 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 18X65

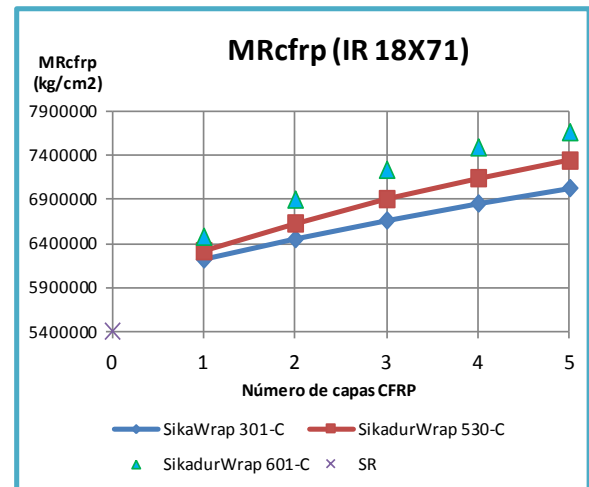


Figura 6.45 Curva MR_{cfrp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 18x71

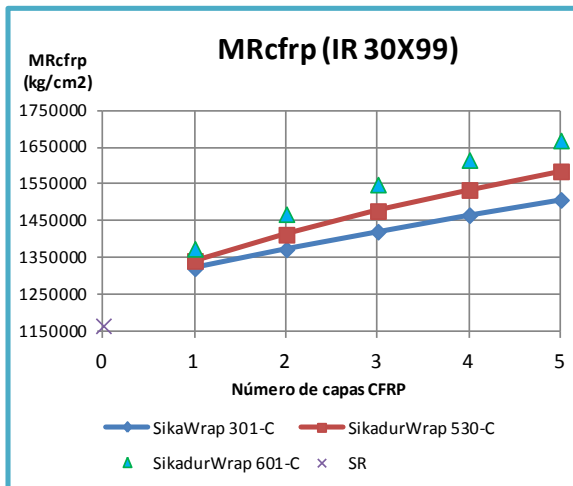


Figura 6.46 Curva MRC_{frp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 30X99

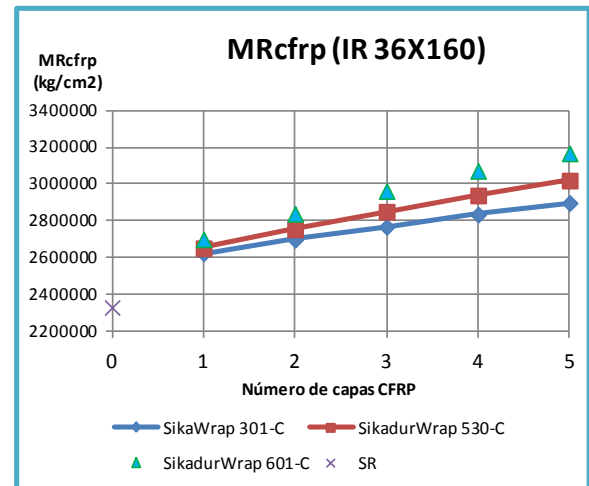


Figura 6.47 Curva MRC_{frp} vs número de capas de CFRP de una viga de acero con un perfil IR 36X160

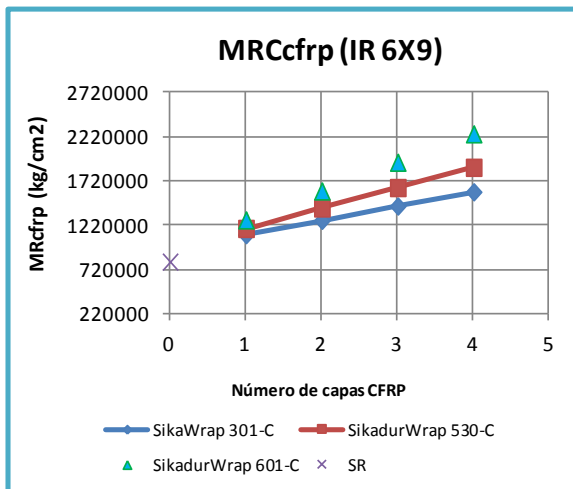


Figura 6.48 Curva MRC_{frp} vs número de capas de CFRP de una viga compuesta con un perfil IR 6X9

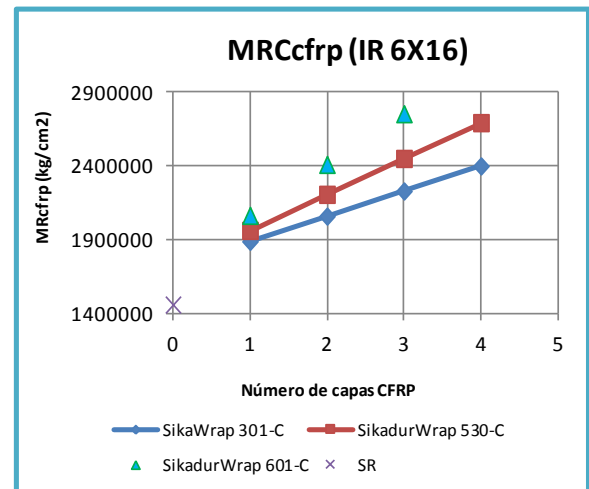


Figura 6.49 Curva MRC_{frp} vs número de capas de CFRP de una viga compuesta con un perfil IR 6x16

Los resultados que se grafican en las Figuras 6.8 a 6.47 muestran que al incrementar el espesor, número de capas y propiedades mecánicas se llega a un punto donde ya no es necesario añadir otra capa de CFRP, ya que no se obtienen beneficios en el incremento de la resistencia a flexión de la viga reforzada. En la mayoría de las vigas se llegó a implementar hasta 3 capas de refuerzo, incluyendo los tres tipos de fibra de carbono. Esto es porque sobrerreforzamos la sección de acero provocando que no se tenga tensión en el patín inferior y que el refuerzo no esté trabajando. También, es importante mencionar que se presentó una falla a flexión sin desadherencia intermedia, esto es porque el adhesivo epoxi seleccionado tiene una gran energía de fractura, en caso contrario esto nos obligaría a cambiar el adhesivo para evitar una falla frágil.

La finalidad de este trabajo es desarrollar un software que nos permita estimar la resistencia a flexión de vigas IR de acero reforzadas con CFRP, de tal forma que los resultados obtenidos del

análisis, nos permitan observar el incremento de resistencia a flexión con la primera y última capa de refuerzo, la influencia de la fibra al adherirla a la viga de acero, los modos de falla que se presentan, y la mínima longitud del refuerzo que se proporciona en el programa para garantizar la unión de los dos elementos (acero y refuerzo CFRP).

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es desarrollar un programa en Matlab para determinar la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con láminas de CFRP, que permita estudiar su comportamiento ante diversos escenarios de refuerzo. Como resultado de la implementación del programa para estimar la resistencia de un conjunto de vigas IR de acero reforzadas con CFRP se llega a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- La selección adecuada de la sección transversal de acero, cumpliendo con las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento del Distrito Federal para Construcciones Metálicas para evitar dos modos de falla: local y lateral, es crítica, ya que el refuerzo mediante CFRP no trabaja adecuadamente bajo otro tipo de sección.
- La selección del adhesivo de unión es de suma importancia, ya que si no se elige de la forma indicada se tiene desadherencia y no se llegaría a la falla objetivo, flexión.
- La falla por desadherencia localizada en los extremos de la fibra CFRP se evita utilizando algunas recomendaciones desarrolladas en la práctica, como colocar un sistema de anclaje en los extremos del refuerzo, tener un exceso de adhesivo en los extremos o en las juntas de traslape de la láminas CFRP, por lo cual se debe seleccionar un adhesivo con suficiente energía de fractura. Aunque este tipo de falla se puede modelar con un procedimiento más sofisticando monitoreando de inicio a fin el proceso de desadherencia en la parte extrema del refuerzo.
- El software desarrollado nos ayuda a predecir los modos de falla presentes en vigas de acero de sección IR. Este programa nos permite tener una selección del tipo de CFRP para llegar a una solución óptima del sistema refuerzo de elementos de acero o compuestos con materiales compuestos.
- El espesor del adhesivo utilizado fue 0.0834 cm, 0.1007 cm y 0.0963 cm, donde se observó que el espesor y la energía de fractura dependen de su buen comportamiento, es decir, entre mayor sea el espesor de adhesivo existe más probabilidad de que haya desadherencia entre los dos elementos (acero y CFRP); por otro lado, entre menor sea la energía de fractura y de tensión del adhesivo, hay riesgo de una falla prematura. Por lo antes mencionados se recomienda utilizar las especificaciones Sikadur establecidas en México, donde se reportan

las propiedades de la fibra a utilizar, al igual que las del adhesivo adecuado a implementar y algunas recomendaciones de uso.

- La longitud efectiva de unión depende tanto de las propiedades de la fibra de carbono como del adhesivo. Esta longitud es el valor mínimo requerido para obtener un desarrollo de unión entre los dos elementos y prevenir al usuario de que la longitud propuesta por él sea la adecuada.
- En el software se ha desarrollado de forma que al momento que el refuerzo no esté funcionando alerte al usuario, y cuando la viga esté demasiado sobrada con respecto de su resistencia, ya que uno de los objetivos principales del diseño estructural es brindar soluciones óptimas.

Referencias

- [1] **Abdullah H. Al-Saidy, F. W. Klaiber y T. J. Wipf.** Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 163-172.
- [2] **Abheetha Peiris Nisal.** Steel Beams Strengthened with Ultra High Modulus CFRP Laminates. Doctoral Dissertations, University of Kentucky, Doctor of Philosophy in the College of Engineering. 2011, Lexington, Kentucky.
- [3] **Águila Higuero Victoria.** Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid, Máster Universitario en ingeniería de las estructuras, Cimentaciones y Materiales. 2010, junio, Madrid.
- [4] **Ari de Paula Machado.** Fibras de Carbono, Dimensionamiento Práctico. Belo Horizonte, mayo, 200, pp. 372.
- [5] **Brent M. Phares, Terry J. Wipf, F.Wayne klaiber, Ahmad Abu-Hawash y Yoon-Si Lee.** Strengthening of Steel Girder Bridges Using FRP. *Transportation Research Symposium, Iowa State University*, 2003, 1-12.
- [6] **Castillo Manzano Carlos Alejandro.** Estudios analíticos y experimentales de ménsulas en extremos de vigas de concreto reforzado. *Tesis de maestría, Universidad Nacional autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería*. 2007, Diciembre, México.
- [7] **C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab y I. A. Ashcroft.** Damage Modelling of Adhesively Bonded Joints. *Springer Science+Business Media B. V.* Marzo 2006, 147-161.
- [8] **Chávez Ayvar Félix, Quintana Rodríguez Juan Antonio, Carrión Viramontes, et al.** Simulación Monte Carlo de las cargas vivas en el puente Barranca Honda para la obtención de las proyecciones estadísticas de esfuerzos y ciclos de cargas. *Instituto Mexicano del Transporte*. 2013, publicación técnica No. 387, Sanfandila, Querétaro.
- [9] **Colombi Pierluigi y Poggi Carlo.** Strengthening of Tensile Steel Members and Bolted Joints Using Adhesively Bonded CFRP Plates. *Construction and Building Materials*. 2006, 20, 22-33.
- [10] **Deng Jung y M.K. Lee Marcus.** Behaviour under Static Loading of Metallic Beams Reinforced with a Bonded CFRP Plate. *Composite Structures* 78, 2007, 232-242.
- [11] **D. Fernando, T. Yu y J. G. Teng.** Behavior of CFRP Laminates Bonded to a Steel Substrate Using a Ductile Adhesive. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 1-10.

- [12] **CNR-DT 202/2005.** Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. *National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction*, junio, 2007.
- [13] **Hollaway L. C. y Cadei J.** Progress in the Technique of Upgrading Metallic Structures with Advanced Polymer Composites. *Prog. Struct. Engng Mater.* 2002, 4, 131-148.
- [14] **J.G. Teng, T. Yu, D. Fernando.** Strengthening Steel Structures with Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Construction Steel Research* 78. 2012, 131-143.
- [15] **J. Burgoyne Chris, Guadagnini Maurizio, Manfredi Gaetano, et al.** FRP Reinforcement in RC Structures. *Technical Report Prepared by a Working Party of Task Group 9.3.* September 207, 1-151.
- [16] **Kent A. Harries, Lawrence C. Bank, Jian-Fei Chen, et al.** FRP International. *The official Newsletter of the International Institute for FRP in Construction.* Julio 2011, vol. 8, No. 3, 1-15.
- [17] **Miller Trent C., Chajes Michael J., Mertz Dennis R. y Hastings Jason N.** Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates. *Journal of Bridge Engineering.* 2001, 6, 514-522.
- [18] **Moy S.S.J. y Bloodworth A. G.** Strengthening a Steel Bridge with CFRP Composites. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings.* 2006, 160, No 2, 2006, 81-93.
- [19] **Narmashiri Kambiz, Ramli Sulong N. H. y Zamin Jumaat Mohd.** Flexural Strengthening of Steel I-Beams by Using CFRP Strips. *International Journal of the Physical Sciencies.* 2011, vol. 6(7), 1620-1627.
- [20] **NTCDFEM.** Normas Técnicas del Distrito Federal para Estructuras Metálicas. Órgano del Gobierno del Distrito Federal, octubre, 2004, Tomo I, No 103-BIS.
- [21] **Olmos B. A., Jara J.M. y Rojas R.** Estado del Arte Sobre Rehabilitación de Vigas de Acero Empleando Fibra de Carbono. *Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.* 2006, Ciencia Nicolaita No 45, 97-118.
- [22] **R. Mertz Dennis, W. Gillespie John, Jr, J. Chanjes Michael y A. Sabol Scott.** The Rehabilitation of Steel Bridge Girders Using Advanced Composite Materials. *Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs, Final Report for NCHRP-IDEA Project 51.* Febrero 2002, 1-25.
- [23] **Schnerch D., Dawood M., Rizcalla S., Sumner E. y Stanford K.** Bond Behavior of CFRP strengthened steel structures. *Advances in Structural Engineering.* 2006, vol. 9, No. 6, 805-816.

[24] Schnerch David, Stanford Kirk, A. Emmett y Rizkalla Sami. Strengthening Steel Structures and Bridge with High-Modulus Carbon Fiber-Reinforced Polymers (Resin Selection and Scaled Monopole Behavior). *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2004, No. 1892, 237-245.

[25] Schnerch David y Rizkalla Sami. Flexural Strengthening of Steel Bridges with High Modulus CFRP Strips. *Journal of Bridge Engineering*. 2008, 192-201.

[26] Zhao Xiao-Ling. FRP-Strengthened, Metallic Structures. CRC Press, Taylor y Francis Group, 2014, 1-280.

A

A P É N D I C E

Información y datos de los casos de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

***E**n este apartado se presentan los valores del momento actuante en la viga de acuerdo a la carga externa presente y al peso propio de la viga, el momento resistente sin refuerzo y con CFRP dependiendo del número de capas de material compuesto adherido en la superficie de acero con un adhesivo epoxi marca Sikadur 301. Los datos se presentan en una serie de tablas y con un porcentaje del incremento de la resistencia.*

También, se presenta el código desarrollado en Matlab para el cálculo de la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

Datos de momento resistente para vigas de acero reforzadas con CFRP

A continuación se presenta una serie de tablas (A.1 a A.40) para vigas de acero, donde se presentan los valores obtenidos del programa desarrollado de acuerdo a los perfiles seleccionados al Manual IMCA.

Tabla A.1 Momento resistente con CFRP (IR6X9)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	280950	232254	-17.3	232254	-17.3	232254	-17.3
1		288678	2.8	299674	6.7	310426	10.5
2		309795	10.3	317096	12.9		
3		317378	13.0				
4		319197	13.6				

Tabla A.2 Momento resistente con CFRP (IR6X12)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	372257	309672	-16.8	309672	-16.8	309672	-16.8
1		376202	1.1	389575	4.7	404929	8.8
2		404020	8.5	419417	12.7	427439	14.8
3		420784	13.0	428927	15.2		
4		427937	15.0				
5		430698	15.7				

Tabla A.3 Momento resistente con CFRP (IR6X16)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	528780	437184	-17.322138	437184	-17.322138	437184	-17.32
1		519725	-1.7124324	534579	1.0966754	552657	4.52
2		551598	4.3152162	571508	8.0804872	586892	10.99
3		573699	8.4948372	588077	11.213926	592967	12.14
4		586506	10.916827	594335	12.397405		
5		592316	12.015583				

Tabla A.4 Momento resistente con CFRP (IR8X10)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	400049	330165	-17.5	330165	-17.5	330165	-17.5
1		402786	0.7	419721	4.9	439101	9.8
2		438022	9.5	457126	14.3	466403	16.6
3		458847	14.7	467880	17.0		
4		466949	16.7				
5		469565	17.4				

Tabla A.5 Momento resistente con CFRP (IR8X13)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	512362	425799	-16.9	425799	-16.9	425799	-16.9
1		514034	0.3	533358	4.1	557620	8.8
2		556263	8.6	583927	14.0	608483	18.8
3		587323	14.6	611769	19.4	620517	21.1
4		607458	18.6	621504	21.3		
5		617937	20.6	625543	22.1		

Tabla A.6 Momento resistente con CFRP (IR8X15)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	610570	507771	-16.8	507771	-16.8	507771	-16.8
1		603406	-1.2	623400	2.1	649014	6.3
2		647585	6.1	677453	11.0	706079	15.6
3		681310	11.6	710133	16.3	723859	18.6
4		704748	15.4	724094	18.6	728125	19.3
5		718636	17.7	729343	19.5		

Tabla A.7 Momento resistente con CFRP (IR8X18)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	760188	635283	-16.4	635283	-16.4	635283	-16.4
1		761526	0.2	785275	3.3	812959	6.9
2		811425	6.7	839639	10.5	855617	12.6
3		842389	10.8	857706	12.8		
4		855960	12.6	861883	13.4		
5		860283	13.2				

Tabla A.8 Momento resistente con CFRP (IR8X21)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C						
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	897404	760518	-15.3	760518	-15.3	760518	-15.3
1		906179	1.0	931369	3.8	961781	7.2
2		960096	7.0	992937	10.6	1016800	13.3
3		996557	11.0	1019630	13.6	1024140	14.1
4		1016280	13.2	1026070	14.3		
5		1023790	14.1				

Tabla A.9 Momento resistente con CFRP (IR10X12)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	560313	469062	-16.3	469062	-16.3	469062	-16.3
1		571913	2.1	595675	6.3	625785	11.7
2		624159	11.4	658734	17.6	690438	23.2
3		663144	18.4	694659	24.0	706749	26.1
4		689053	23.0	707501	26.3		
5		702913	25.5	711876	27.0		

Tabla A.10 Momento resistente con CFRP (IR10X15)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	701565	596574	-15.0	596574	-15.0	596574	-15.0
1		717525	2.3	742799	5.9	776266	10.6
2		774458	10.4	814549	16.1	856917	22.1
3		820194	16.9	863280	23.1	892548	27.2
4		854818	21.8	889994	26.9	900355	28.3
5		878632	25.2	900590	28.4		

Tabla A.11 Momento resistente con CFRP (IR10X17)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	827768	696762	-15.8	696762	-15.8	696762	-15.8
1		828339	0.1	854173	3.2	888834	7.4
2		886963	7.2	928876	12.2	974648	17.7
3		934941	12.9	981674	18.6	1017263	22.9
4		972341	17.5	1013250	22.4	1028430	24.2
5		999381	20.7	1027520	24.1	1033340	24.8

Tabla A.12 Momento resistente con CFRP (IR10X19)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	939993	806058	-14.25	806058	-14.25	806058	-14.2
1		946089	0.65	972451	3.45	1008260	7.3
2		1006330	7.06	1049950	11.70	1098920	16.9
3		1056420	12.39	1106550	17.72	1148190	22.1
4		1096420	16.64	1142760	21.57	1163802	23.8
5		1126490	19.84	1161170	23.53	1169401	24.4

Tabla A.13 Momento resistente con CFRP (IR10X22)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1149680	970002	-15.63	970002	-15.63	970002	-15.63
1		1152353	0.23	1186697	3.22	1229077	6.91
2		1226803	6.71	1273839	10.80	1312134	14.13
3		1279456	11.29	1316662	14.52	1325677	15.31
4		1310765	14.01	1327632	15.48		
5		1324042	15.17	1332543	15.91		

Tabla A.14 Momento resistente con CFRP (IR10X26)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1371070	1168100	-14.80	1168100	-14.80	1168100	-14.80
1		1380980	0.72	1416920	3.34	1462330	6.66
2		1459890	6.48	1511780	10.26	1558710	13.69
3		1518370	10.74	1564830	14.13	1581490	15.35
4		1556700	13.54	1582780	15.44		
5		1576540	14.99	1588860	15.88		

Tabla A.15 Momento resistente con CFRP (IR10X30)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1582040	1366200	-13.64	1366200	-13.64	1366200	-13.64
1		1608190	1.65	1646170	4.05	1695860	7.19
2		1693200	7.03	1752100	10.75	1812280	14.55
3		1760210	11.26	1821060	15.11	1857220	17.39
4		1809380	14.37	1855160	17.26	1865710	17.93
5		1841290	16.39	1866960	18.01		

Tabla A.16 Momento resistente con CFRP (IR12X14)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	757192	648945	-14.30	648945	-14.30	648945	-14.30
1		779795	2.99	809767	6.94	849799	12.23
2		847685	11.95	895863	18.31	947841	25.18
3		902827	19.23	955713	26.22	994117	31.29
4		945288	24.84	990055	30.75	1004330	32.64
5		975290	28.80	1003970	32.59	1008950	33.25

Tabla A.17 Momento resistente con CFRP (IR12X16)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	883352	749133	-15.19	749133	-15.19	749133	-15.19
1		890619	0.82	921322	4.30	963348	9.06
2		961129	8.80	1012470	14.62	1071001	21.24
3		1020260	15.50	1080170	22.28	1132060	28.16
4		1068050	20.91	1124790	27.33	1152770	30.50
5		1104640	25.05	1148410	30.01	1158930	31.20

Tabla A.18 Momento resistente con CFRP (IR12X19)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1086970	922185	-15.16	922185	-15.16	922185	-15.16
1		1091770	0.44	1123450	3.36	1167440	7.40
2		1165120	7.19	1219210	12.17	1282580	18.00
3		1227640	12.94	1292630	18.92	1353280	24.50
4		1279360	17.70	1344000	23.65	1382950	27.23
5		1320380	21.47	1374560	26.46	1391470	28.01

Tabla A.19 Momento resistente con CFRP (IR12X22)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1262290	1092960	-13.41	1092960	-13.41	1092960	-13.41
1		1278630	1.29	1311040	3.86	1357020	7.50
2		1354610	7.31	1411510	11.82	1480610	17.30
3		1420740	12.55	1491670	18.17	1563710	23.88
4		1477050	17.01	1551710	22.93	1607790	27.37
5		1523610	20.70	1592260	26.14	1623350	28.60

Tabla A.20 Momento resistente con CFRP (IR12X26)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1633600	1388970	-14.97	1388970	-14.97	1388970	-14.97
1		1653190	1.20	1699840	4.05	1757610	7.59
2		1754590	7.41	1818840	11.34	1871860	14.58
3		1826690	11.82	1877980	14.96	1890110	15.70
4		1869895	14.46	1892330	15.84		
5		1887930	15.57	1897920	16.18		

Tabla A.21 Momento resistente con CFRP (IR12X30)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1897000	1607560	-15.26	1607560	-15.26	1607560	-15.26
1		1902890	0.31	1951920	2.90	2014750	6.21
2		2011450	6.03	2084270	9.87	2153640	13.53
3		2093930	10.38	2163040	14.02	2192940	15.60
4		2150540	13.37	2193340	15.62	2199620	15.95
5		2182480	15.05	2201830	16.07		

Tabla A.22 Momento resistente con CFRP (IR12X35)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2213210	1910400	-13.68	1910400	-13.68	1910400	-13.68
1		2243496	1.37	2295160	3.70	2359210	6.60
2		2360050	6.63	2441990	10.34	2523690	14.03
3		2453680	10.87	2541598	14.84	2598920	17.43
4		2524490	14.06	2595520	17.27	2614170	18.12
5		2572920	16.25	2615050	18.16	2621440	18.45

Tabla A.23 Momento resistente con CFRP (IR12X40)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2396710	2144930	-10.51	2144930	-10.51	2144930	-10.51
1		2467490	2.95	2524030	5.31	2594570	8.26
2		2590860	8.10	2670080	11.41	2737790	14.23
3		2679920	11.82	2745960	14.57	2764040	15.33
4		2735130	14.12	2766540	15.43		
5		2760050	15.16	2773810	15.73		

Tabla A.24 Momento resistente con CFRP (IR12X45)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2678710	2413620	-9.90	2413620	-9.90	2413620	-9.90
1		2765100	3.23	2824350	5.44	2900700	8.29
2		2896680	8.14	2985730	11.46	3072280	14.69
3		2997680	11.91	3084260	15.14	3125330	16.67
4		3068330	14.55	3125010	16.66	3134150	17.00
5		3109870	16.10	3136720	17.10		

Tabla A.25 Momento resistente con CFRP (IR12X50)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	3007530	2700520	-10.21	2700520	-10.21	2700520	-10.21
1		3101690	3.13	3163330	5.18	3244740	7.89
2		3240450	7.74	3337550	10.97	3439220	14.35
3		3351280	11.43	3454260	14.85	3521080	17.08
4		3434320	14.19	3515620	16.89	3536000	17.57
5		3490190	16.05	3537060	17.61		

Tabla A.26 Momento resistente con CFRP (IR14X30)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2002050	1764680	-11.86	1764680	-11.86	1764680	-11.86
1		2085660	4.18	2143950	7.09	2220930	10.93
2		2216940	10.73	2308680	15.32	2404700	20.11
3		2321730	15.97	2418840	20.82	2481340	23.94
4		2400140	19.88	2476180	23.68	2494020	24.57
5		2452650	22.51	2495020	24.62		

Tabla A.27 Momento resistente con CFRP (IR14X34)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2317970	2037920	-12.08	2037920	-12.08	2037920	-12.08
1		2378990	2.63	2438300	5.19	2517490	8.61
2		2513380	8.43	2608540	12.54	2711030	16.96
3		2622380	13.13	2726460	17.62	2801180	20.85
4		2706080	16.74	2793270	20.51	2819120	21.62
5		2764850	19.28	2818700	21.60	2826840	21.95

Tabla A.28 Momento resistente con CFRP (IR14X38)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2633930	2295220	-12.86	2295220	-12.86	2295220	-12.86
1		2673330	1.50	2734360	3.81	2817460	6.97
2		2813150	6.80	2914280	10.64	3028250	14.97
3		2929560	11.22	3045940	15.64	3143130	19.33
4		3022640	14.76	3130010	18.83	3176810	20.61
5		3092590	17.41	3170990	20.39	3186280	20.97

Tabla A.29 Momento resistente con CFRP (IR14X43)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2957850	2598060	-12.16	2598060	-12.16	2598060	-12.16
1		2995460	1.27	3062860	3.55	3150630	6.52
2		3146080	6.36	3249390	9.86	3353200	13.37
3		3263660	10.34	3367950	13.86	3424490	15.78
4		3348400	13.20	3422020	15.69	3434940	16.13
5		3401150	14.99	3437200	16.21		

Tabla A.30 Momento resistente con CFRP (IR14X48)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	3239980	2925950	-9.69	2925950	-9.69	2925950	-9.69
1		3347690	3.32	3417300	5.47	3509999	8.33
2		3505180	8.19	3616360	11.62	3735260	15.29
3		3632430	12.11	3753090	15.84	3837550	18.44
4		3729540	15.11	3829070	18.18	3857040	19.05
5		3796980	17.19	3857050	19.05	3866100	19.32

Tabla A.31 Momento resistente con CFRP (IR14X53)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	3709550	3249280	-12.41	3249280	-12.41	3249280	-12.41
1		3733540	0.65	3805350	2.58	3902870	5.21
2		3897810	5.08	4016310	8.27	4149100	11.85
3		4034120	8.75	4169660	12.40	4280910	15.40
4		4142570	11.67	4266260	15.01	4317790	16.40
5		4223440	13.85	4312040	16.24	4328670	16.69

Tabla A.32 Momento resistente con CFRP (IR16X36)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2633450	2388570	-9.30	2388570	-9.30	2388570	-9.30
1		2785320	5.77	2856290	8.46	2953690	12.16
2		2948700	11.97	3067630	16.49	3203800	21.66
3		3085950	17.18	3225100	22.47	3346670	27.08
4		3197130	21.40	3329210	26.42	3393590	28.86
5		3282430	24.64	3383400	28.48	3404670	29.29

Tabla A.33 Momento resistente con CFRP (IR16X40)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	3159400	2721020	-13.88	2721020	-13.88	2721020	-13.88
1		3175130	0.50	3247580	2.79	3347880	5.97
2		3342740	5.80	3465700	9.69	3608860	14.23
3		3484950	10.30	3631430	14.94	3765450	19.18
4		3601800	14.00	3745180	18.54	3825100	21.07
5		3693460	16.90	3809390	20.57	3838840	21.51

Tabla A.34 Momento resistente con CFRP (IR16X45)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	3475600	3071670	-11.62	3071670	-11.62	3071670	-11.62
1		3576660	2.91	3650940	5.04	3756280	8.08
2		3750890	7.92	3881070	11.67	4038980	16.21
3		3902350	12.28	4064220	16.94	4227990	21.65
4		4031080	15.98	4200660	20.86	4325750	24.46
5		4137180	19.03	4291430	23.47	4355850	25.33

Tabla A.35 Momento resistente con CFRP (IR16X50)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	3940820	3433720	-12.87	3433720	-12.87	3433720	-12.87
1		3973860	0.84	4049630	2.76	4159200	5.54
2		4153610	5.40	4289460	8.85	4459000	13.15
3		4312460	9.43	4486190	13.84	4672810	18.57
4		4450460	12.93	4640020	17.74	4801820	21.85
5		4567670	15.91	4751540	20.57	4856270	23.23

Tabla A.36 Momento resistente con CFRP (IR18X60)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	5204950	4590430	-11.81	4590430	-11.81	4590430	-11.81
1		5270570	1.26	5361600	3.01	5496750	5.61
2		5489930	5.48	5657540	8.70	5873650	12.85
3		5687320	9.27	5908160	13.51	6160090	18.35
4		5862770	12.64	6113590	17.46	6356670	22.13
5		6016350	15.59	6274180	20.54	6466940	24.25

Tabla A.37 Momento resistente con CFRP (IR18X65)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	5624950	4961580	-11.79	4961580	-11.79	4961580	-11.79
1		5717500	1.65	5809740	3.29	5949090	5.76
2		5942080	5.64	6114630	8.71	6341400	12.74
3		6146220	9.27	6377350	13.38	6649510	18.21
4		6329950	12.53	6598000	17.30	6873850	22.20
5		6493320	15.44	6776850	20.48	7016310	24.74

Tabla A.38 Momento resistente con CFRP (IR18X71)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	6189470	5410150	-12.59	5410150	-12.59	5410150	-12.59
1		6224220	0.56	6317510	2.07	6481030	4.71
2		6454390	4.28	6632100	7.15	6902770	11.52
3		6665880	7.70	6908130	11.61	7240700	16.98
4		6858710	10.81	7145710	15.45	7495160	21.10
5		7032920	13.63	7345010	18.67	7667520	23.88

Tabla A.39 Momento resistente con CFRP (IR30X99)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1318940	1164230	-11.73	1164230	-11.73	1164230	-11.73
1		1320800	0.14	1341050	1.68	1373950	4.17
2		1372360	4.05	1412300	7.08	1468250	11.32
3		1420590	7.71	1476660	11.96	1548830	17.43
4		1465490	11.11	1534160	16.32	1615690	22.50
5		1507070	14.26	1584810	20.16	1668890	26.53

Tabla A.40 Momento resistente con CFRP (IR36X160)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	2534980	2328230	-8.16	2328230	-8.16	2328230	-8.16
1		2623420	3.49	2650980	4.58	2699460	6.49
2		2697190	6.40	2754040	8.64	2838230	11.96
3		2767400	9.17	2849820	12.42	2962460	16.86
4		2834130	11.80	2938320	15.91	3072150	21.19
5		2897310	14.29	3019540	19.11	3167330	24.94

Datos de momento resistente para vigas compuestas con CFRP

A continuación se presenta una serie de tablas (A.41 y A.42) para vigas compuestas, se han considerado solo dos casos, ya que es proceso es repetitivo. Se presenta los valores obtenidos del programa desarrollado de acuerdo a los perfiles seleccionados al Manual IMCA:

Tabla A.41 Momento resistente con CFRP (IR6X9)			
No de	SikadurWrap 301-C	SikadurWrap 530-C	SikadurWrap 601-C

CFRP	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1073740	803625	-25.16	803625	-25.16	803625	-25.16
1		1108220	3.21	1178600	9.77	1275400	18.78
2		1270290	18.31	1410300	31.34	1602430	49.24
3		1431650	33.33	1640560	52.79	1926550	79.42
4		1592332	48.30	1869400	74.10	2247790	109.34

Tabla A.42 Momento resistente con CFRP (IR6X16)							
No de CFRP	SikadurWrap 301-C			SikadurWrap 530-C		SikadurWrap 601-C	
	Mact	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento	MRcfrp	Incremento
0	1778000	1459060	-17.94	1459060	-17.94	1459060	-17.94
1		1887800	6.18	1961920	10.34	2063970	16.08
2		2058590	15.78	2206360	24.09	2409500	35.52
3		2228930	25.36	2449870	37.79	2753150	54.85
4		2398820	34.92	2692460	51.43		

Código desarrollado en Matlab para calcular la resistencia a flexión de vigas de acero y compuestas reforzadas con CFRP

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 1. DATOS DE ENTRADA :
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
L=str2double(get(handles.edit1,'String')); % longitud de la viga de acero
h=str2double(get(handles.edit2,'String')); % peralte de la sección de acero
tf=str2double(get(handles.edit3,'String')); % espesor del patín
tw=str2double(get(handles.edit4,'String')); % espesor del alma
bf=str2double(get(handles.edit5,'String')); % ancho de la sección
As=str2double(get(handles.edit6,'String')); % área de la sección de acero
Ix=str2double(get(handles.edit7,'String')); % inercia en x de la sección
Iy=str2double(get(handles.edit8,'String')); % inercia en y de la sección
Sx=str2double(get(handles.edit9,'String')); % módulo de la sección elástico en x
Sy=str2double(get(handles.edit10,'String')); %
Zx=str2double(get(handles.edit11,'String')); % módulo de la sección plástica en x
Zy=str2double(get(handles.edit12,'String')); % peralte de la sección de acero
J=str2double(get(handles.edit31,'String')); % constante de torsión

Es=str2double(get(handles.edit13,'String')); % módulo de elasticidad
Gs=str2double(get(handles.edit14,'String')); % modulo de cortante
Fy=str2double(get(handles.edit15,'String')); % esfyuerzo de fluencia
Dy=str2double(get(handles.edit16,'String')); % deformación de fluencia
```

```

FSs=str2double(get(handles.edit17,'String')); % factor de seguridad

bcfrp=str2double(get(handles.edit20,'String')); % ancho del refuerzo CFRP
tcfrp=str2double(get(handles.edit21,'String')); % espesor de la lámina
capas=str2double(get(handles.edit38,'String')); % Número de capas de refuerzo

Ecfrp=str2double(get(handles.edit23,'String')); % módulo de elasticidad del refuerzo
Fcfrp=str2double(get(handles.edit24,'String')); % resistencia a tensión del refuerzo
FScfrp=str2double(get(handles.edit26,'String')); % factor de seguridad del refuerzo CFRP

Ea=str2double(get(handles.edit27,'String')); % módulo de elasticidad del adhesivo
Fa=str2double(get(handles.edit28,'String')); % resistencia de tensión del adhesivo
ta=str2double(get(handles.edit29,'String')); % espesor del adhesivo
FSa=str2double(get(handles.edit30,'String')); % factor de seguridad de desadherencia

hc=str2double(get(handles.edit47,'String')); % espesor de losa de concreto
Fc=str2double(get(handles.edit48,'String')); % esfuerzo de compresión del concreto
bec=str2double(get(handles.edit49,'String')); % ancho de la losa de concreto
Dc=str2double(get(handles.edit50,'String')); % Deformación unitaria del concreto

OP = get(handles.edit46,'String');
OP1=str2double(get(handles.edit51,'String')); % Deformación unitaria del concreto

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 2. CARGAS EXTERNAS :
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
P=str2double(get(handles.edit53,'String')); % Carga distribuida o concentrada
OPP = get(handles.edit52,'String');

Wviga=As*(0.007843);% considerando el peso propio de la viga
M1=(Wviga*L^2)/8; % momento a flexión debido al peso propio de la viga de acero

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% * 3. REVISIÓN DE PÁNDEO LOCAL :
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Rel_p=bf/(2*tf);% relación ancho espesor del patín
Rel_w=h/tw; % relación ancho espesor del alma

%Patines de sección I en flexión (expresiones de las NTCDF, tabla 2.1, página 215):
landa_p1=0.32*sqrt(Es/Fy);% sección tipo 1
landa_p2=0.38*sqrt(Es/Fy);% sección tipo 2
landa_p3=0.58*sqrt(Es/Fy);% sección tipo 3

% Almas en flexión (expresiones de las NTCDF, tabla 2.1, página 215)
landa_w1=2.45*sqrt(Es/Fy);% sección tipo 1
landa_w2=3.71*sqrt(Es/Fy);% sección tipo 2
landa_w3=5.60*sqrt(Es/Fy);% sección tipo 3

% 3.1 TIPO DE SECCIÓN:

```



```

%-----
if (Rel_p<=landa_p1 && Rel_w<=landa_w1);
    set(handles.edit18,'String','Tipo 1:Son secciones compactas');
elseif (Rel_p<=landa_p2 && Rel_w<=landa_w2);
    set(handles.edit18,'String','Tipo 2:Son secciones compactas');
    set (handles.edit32,'Enable','on'); %
elseif (Rel_p<=landa_p3 && Rel_w<=landa_w3);
    set(handles.edit18,'String','Tipo3:Son secciones no compactas y debe proponer otra sección');
    set(handles.edit32,'String','Existe pandeo lateral y no es apta para reforzar con CFRP');
else set(handles.edit18,'String','Tipo 4:Son secciones esbeltas y debe proponer otra sección');
    set(handles.edit32,'String','Existe pandeo lateral y no es apta para reforzar con CFRP');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ** 4. REVISIÓN DE PANDEO LATERAL:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
OP1 = get(handles.edit51,'String');

if OP1=='SA'; % sujeción aislada

C=0.6;
Ca=(h)^2*(Iy)/4; % constante de alabeo para secciones IR
Xr=(4/3)*C*(Zx*Fy/(Gs*J))*sqrt(Ca/Iy); % valor límite(NTCDF,pág.222, ec.3.28)
Xu=4.293*(3/4)*Xr;% (NTCDF,pág.222, ec.3.27)
Lu=(sqrt(2)*pi()/Xu)*(sqrt(Es*Ca/(Gs*J)))*(sqrt(1+sqrt(1+Xu^2)));%(NTCDF,pág.222, ec.3.25)

if (L<Lu) % cuando no existe pandeo lateral
    set(handles.edit32,'String','No existe pandeo lateral');
elseif (L>Lu) % cuando existe pandeo lateral
    set(handles.edit32,'String','Existe pandeo lateral y no es apta para reforzar con CFRP');
end

elseif OP1=='SC' % sujeción continua
    set(handles.edit32,'String','No es necesario hacer la revisión');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 5. CAPACIDAD A FLEXIÓN C/S REFUERZO DE CFRP:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% 5.1 LONGITUD EFECTIVA DE UNIÓN:
%-----

%modelo de unión-desplazamiento (comportameinto trapezoidal):
Tau_max=Fa; %Esfuerzo de cortante máximo del adhesivo
D1=ta/10;% Desplazamiento 1
D2=3*ta/4;% Desplazamiento 2
Df=ta; % Desplazamiento final

```

$Gf=0.5 \cdot \tau_{max} \cdot (Df+D2-D1)$; % es la energía de fractura en la interfase (área bajo la curva de unión-desplazamiento)

```
landa=(tau_max/sqrt(2*Gf))*sqrt((1/(Ecfrp*tcfrp))+(bcfrp/(Es*As)));
landa1=landa*sqrt(2*Gf/(tau_max*D1));
landa3=landa*sqrt(2*Gf/(tau_max*(Df-D2)));
ad=(1/landa1)*(sqrt((2*D2/D1)-1)-1);
be=(1/landa3)*asind((landa3*landa*(Df-D2))/(0.97*D1*landa1^2));
C=((landa3*(Df-D2))/(landa1*D1))*cotd(landa3*be)-landa1*ad;
Le=ad+be+(1/landa1)*log((1+C)/(1-C));
%set(handles.edit32,'String','No existe pandeo lateral');
Lcfrp=2*Le;%
La=Lcfrp/2;
set(handles.edit58,'String',La);
set(handles.edit59,'String',Lcfrp);
```

```
Dcfrp=str2double(get(handles.edit39,'String')); % Deformación última del refuerzo
Dcfrpu=Dcfrp/FScfrp
Dcfrp_d=(1/FSa)*sqrt(2*Gf/(Ecfrp*tcfrp)); % Deformación límite en la deshaderencia
intermedia(L>=Le)
```

```
if Dcfrpu<Dcfrp_d;
    Dcfrp_l=Dcfrpu; % deformación límite, para saber qué tipo de falla sucede primero (flexión o
    deshaderencia intermedia)
elseif Dcfrpu>Dcfrp_d;
    Dcfrp_l=Dcfrp_d;
end
```

```
%      5.2 EQUILIBRIO FUERZAS :
%-----
%      Secciones de acero IR:
%-----
```

```
if OP=='a';
```

```
set(handles.edit47,'Enable','off'); % deshabilitar hc (espesor del concreto)
set(handles.edit48,'Enable','off'); % deshabilitar Fc ( resistencia del concreto)
set(handles.edit49,'Enable','off'); % deshabilitar bec (ancho de la losa de concreto)
set(handles.edit50,'Enable','off'); % deshabilitar Dc (deformación del concreto)
```

```
% considerando el peso de la viga
```

```
if OPP=='CD'
    M2=(P*L^2)/8; %momento a flexión debido a la carga externa
    Mmax=(M1+M2)*1.4; % F.C=1.4 por cargas permanentes
    set(handles.edit54,'String',Mmax);
```

```
elseif OPP=='CC'
    M2=(P*L)/4;
    Mmax=(M1+M2)*1.4;
    set(handles.edit54,'String',Mmax);
```

```

end

% Momento resistente de una viga de acero sin refuerzo:

FR=0.9; % factor de resstencia
Mp=Zx*Fy;
My=Sx*Fy;
MR_O=FR*Mp;
if MR_O<=FR*(1.5*My);
MR=MR_O; % Momento resiste de la viga sin refuerzo
set(handles.edit40,'String',MR);
else
disp('proponer otra sección');
end

incremento=((MR-Mmax)/Mmax)*100;
set(handles.edit56,'String',incremento);

if Mmax<MR
set(handles.edit57,'String','Se acepta la sección ya que MR>Mmáx');
set(handles.edit55,'String','continúe');
elseif Mmax>MR
set(handles.edit57,'String','No se acepta la sección ya que MR<Mmáx')
set(handles.edit55,'String','debe proponer otra sección')
end

FT=0;
a_1=0; fa_1=-Inf;
b_1=h; fb_1=Inf;
while b_1 - a_1 > eps*b_1 %%%Método de la bisección

    xs=(a_1+b_1)/2; %eje neutro

    hcs=xs+(0.002/Dcfrp_1)*(h+capas*(ta+tcfrp)-0.5*tcfrp-xs);% altura de la zona de
compresión plástica, superior
    hci=xs+(-0.002/Dcfrp_1)*(h+capas*(ta+tcfrp)-0.5*tcfrp-xs); %inferi
    des=(xs-hcs); % altura de la zona elástica
    dei=(hci-xs);

    %asumiendo que el eje neutro no quedara en los patines
    F1=(Fy/FSs)*bf*tf;%compresión patin
    F2=(Fy/FSs)*tw*(hcs-tf); % compresión alma
    F3=(Fy/FSs)*tw*(des)/2; %compresión
    F4=(Fy/FSs)*tw*(dei)/2; % tensión
    F5=(Fy/FSs)*tw*(h-hci-tf);%tensión
    F6=(Fy/FSs)*tf*bf; %tensión patin

    for m=1:capas;
        hi =(h)+(m*(ta+tcfrp))-(0.5*tcfrp);
        Dsi = Dcfrp_1*((hi-xs)/(h+(capas*(ta+tcfrp))-(0.5*tcfrp)-xs));
    end
end

```

```

Fi(m)= Dsi*Ecfrp*bcfrp.*tcfrp;%tensión

x1=xs-tf/2;
x2=(des)+((hcs-tf)/2);
x3=2*des/3;
x4=dei/3;
x5=dei+(h-hci-tf)/2;
x6=h-xs-(tf/2);
xi(m)=h-xs+m*(tcfrp+ta)-0.5*tcfrp;
Fcfrp_t(m)=Fi(m).*xi(m);
MR_F=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5+F6*x6+sum(Fcfrp_t);
MR_F1=round(MR_F)
set(handles.edit43,'String', MR_F1)

end
FT=F1+F2+F3-F4-F5-F6-sum(Fi)
if FT==0;
break
elseif sign (FT)==sign(fa_1);
a_1=xs; fa_1=FT;
else
b_1=xs; fb_1=FT;
end
end

disp(xs);

IR1=(MR_F-Mmax)*100/Mmax; %Incremento con respecto al momento con láminas y el momento
actuante en la viga
set(handles.edit60,'String',IR1);

Dsc=-Dcfrp_1*((-xs)/(h+capas*(ta+tcfrp)-0.5*tcfrp-xs));% (-) deformación de compresión en la
parte superior del acero del patín
Dst=Dcfrp_1*((h-xs)/(h+capas*(ta+tcfrp)-0.5*tcfrp-xs));% (+) deformación de tensión en la parte
inferior del acero patin

if Dcfrpu<Dcfrp_d;
set(handles.edit41,'String','Falla por flexión');
if Dst<=0.002 && Dsc<=0.002;% pendiente
set(handles.edit45,'String','La sección no tiene un comportamiento elastoplástico');
set(handles.edit42,'String','modificar las propiedades mecánicas del refuerzo');
set(handles.edit62,'String','disminuir las propiedades del refuerzo CFRP');
elseif Dst<=0.002 && Dsc>0.002
set(handles.edit45,'String','Es mucho refuerzo de CFRP');
set(handles.edit42,'String','Disminuir el número de capas de CFRP');
set(handles.edit62,'String','o disminuir las propiedades mecánicas del refuerzo de CFRP');
elseif Dsc>0.002 && Dst>0.002
set(handles.edit45,'String','Comportamiento elastoplástico');
set(handles.edit42,'String','No existe desadherencia intermedia');
set(handles.edit62,'String','y la sección tiene un comportamiento ideal');

```

```

end

elseif Dcfrpu>Dcfrp_d;
    set(handles.edit41,'String','Falla por desadherencia intermedia');
    set(handles.edit45,'String','¡Alerta!');
    set(handles.edit42,'String','Si hay desadherencia intermedia');
    set(handles.edit62,'String','Aumentar la resistencia del adhesivo de unión');
end

%           Para secciones compuestas IR:
%-----

elseif OP=='b';

    set(handles.edit47,'Enable','on'); % habilitar hc (espesor del concreto)
    set(handles.edit48,'Enable','on'); % habilitar Fc ( resistencia del concreto)
    set(handles.edit49,'Enable','on'); % habilitar bec (ancho de la losa de concreto)
    set(handles.edit50,'Enable','on'); % deshabilitar Dc (deformación del concreto)

    % Momento máximo actuante en la viga de acero:
    if OPP=='CD'
        M2=(P*L^2)/8; %momento a flexión debido a la carga externa
        Mmaxc=(M1+M2)*1.4; % F.C=1.4 por cargas permanentes
        set(handles.edit54,'String',Mmaxc);

        elseif OPP=='CC'
            M2=(P*L)/4;
            Mmaxc=(M1+M2)*1.4;
            set(handles.edit54,'String',Mmaxc);
        end

    %Momento Resistente de una viga compuesta acero-concreto:
    %-----
    Fcc=0.85*(0.8*Fc); % calculos previos
    if Fcc<=280; % Para el calculo de la fuerza a compresión del concreto
        beta=0.85;
    elseif Fcc>280;
        beta=(1.05-((0.8*Fc)/1400));
        if beta<0.65
            beta=0.65;
        elseif beta>0.85;
            beta=0.85;
        end
    end

    FF=0;
    a1=0; fa1=-Inf;
    b1=h+hc; fb1=Inf;

```

```

while b1 - a1 > eps*b1; %%%Método de la bisección para encontrar el E.N. de la viga de acero
sin refuerzo CFRP

```

```

x=(a1+b1)/2; %eje neutro sin refuerzo CFRP
if x<=hc % cuando el E.N. cae el la losa de concreto
C1=Fcc*beta*x*bec;% fuerza de compresión del concreto
T1=bf*tf*Fy; % Fuerza de Tensión del patín superior
T2=tw*(h-2*tf)*Fy; % Fuerza de tensión del alma
T3=bf*tf*Fy; % Fuerza de Tensión del patín inferior
FF=C1-T1-T2-T3;

```

```

Y1=x*beta/2; % la altura de a, checar.....
Y2=(hc-x)+tf/2;
Y3=(hc-x)+tf+(h-2*tf)/2;
Y4=(hc-x)+(h-tf)+(tf/2);

```

```

MRC=(C1*Y1+T1*Y2+T2*Y3+T3*Y4)*0.85; % checar factor de resistencia
set(handles.edit40,'String',MRC);

```

```

elseif x<=(hc+tf); % cuando el E.N. cae en la sección de acero
C1=Fcc*beta*hc*bec;% fuerza de compresión del concreto
C2=bf*(x-hc)*Fy; % Fuerza de compresión del acero (patin superior)
T1=bf*(hc+tf-x)*Fy; % Fuerza de Tensión del patín superior
T2=tw*(h-2*tf)*Fy; % Fuerza de tensión del alma
T3=bf*tf*Fy; % Fuerza de Tensión del patín inferior
FF=C1+C2-T1-T2-T3;

```

```

Y1=(x-hc)+(hc/2); % checar la altura de la losa de concreto.....
Y2=(x-hc)/2;
Y3=(hc+tf-x)/2;
Y4=(hc+tf-x)+(h-2*tf)/2;
Y5=(hc+tf-x)+(h-tf)+tf/2;

```

```

MRC=C1*Y1+C2*Y2+T1*Y3+T2*Y4+T3*Y5;
set(handles.edit40,'String',MRC);

```

```

elseif x>(hc+tf)
C1=Fcc*beta*hc*bec;% fuerza de compresión del concreto
C2=bf*(tf)*Fy; % Fuerza de compresión del acero (patin superior)
C3=tw*(x-hc-tf)*Fy; % Fuerza de compresión del alma
T1=tw*(hc+h-x-tf); % Fuerza de tensión del alma
T2=bf*tf*Fy; % Fuerza de Tensión del patín inferior
FF=C1+C2+C3-T1-T2;

```

```

Y1=(hc/2)+(x-hc); % checar la altura de la losa de concreto.....
Y2=(hc)+(tf/2)+(x-hc-tf);
Y3=(x-tf-hc)/2;
Y4=(h+hc-x-tf)/2;
Y5=(h+hc-x-tf)+tf/2;

```

```

MRC=C1*Y1+C2*Y2+C3*Y3+T1*Y4+T2*Y5;

```

```

        set(handles.edit40,'String',MRC);
    end
    if FF==0
    break
    elseif sign (FF)==sign(fa1);
        a1=x; fa1=FF;
    else
        b1=x; fb1=FF;
    end ;
    end
disp(x)
if Mmaxc<MRC
    set(handles.edit57,'String','Se acepta la sección ya que  $MR > M_{\max}$ ');
    set(handles.edit55,'String','continúe');
elseif Mmaxc>MRC
    set(handles.edit57,'String','No se acepta la sección ya que  $MR < M_{\max}$ ');
    set(handles.edit55,'String','debe proponer otra sección')
end

incremento=((MRC-Mmaxc)/Mmaxc)*100;
set(handles.edit56,'String',incremento)

f=0;
FT_t=0;
Dcu=0.003;
Xb=(Dcu/(Dcu+Dcfrp_1))*(h+hc+capas*(ta+tcfrp)-0.5*tcfrp)
a=0; fa=-Inf;
b=(h+hc); fb=Inf;

while b - a > eps*b %%%Método de la bisección

xc=(a+b)/2; %eje neutro (inicio de iteración y proponiendo un valor
Dcc=xc*Dcfrp_1/(h+hc+capas*(ta+tcfrp)-0.5*tcfrp-xc);% deformacion a compresión del concreto
en la parte superior de la losa
hcs=xc+(0.002*xc/Dcc);
hci=xc+(-0.002*xc/Dcc); % distancia inferior que llega al punto de fleuncia

if xc<hc % cuando el eje neutro cae dentro de la losa de concreto
    F1=Fcc*beta*xc*bec% fuerza de compresión del concreto
    x1=(beta*xc/2);
    hi_2=hc;
    hi_3=hc+tf;
    D_2=Dcc*(hi_2-xc)/xc % deformación
    D_3=Dcc*(hi_3-xc)/xc
    Fy_2=Es*D_2;% esfuerzo
    Fy_3=Es*D_3;
    if D_2<0.002 && D_3<0.002;
        F2=(bf*Fy_2+bf*Fy_3)*tf/2; % tensión
        F3=(Fy_3*bf+Fy*tw)*(hci-hc-tf)/2; % tensión
        F4=Fy*(tw)*(h+hc-hci-tf); % tensión
    end
end

```

```

F5=Fy*tf*bf; % tensión
fc=F1;
ftt=F2+F3+F4+F5;
f=F1-F2-F3-F4-F5;

x2=(hc-xc)+(tf/3)*((bf*D_2+2*bf*D_3)/(bf*D_2+D_3*bf));
x3=(hc-xc)+tf+((hci-hc-tf)/3)*((2*0.002*tw+tf*D_3)/(0.002*tw+tf*D_3));% checar lo de
los trapecios para el cálculo del centroide
x4=(hc-xc)+(hci-hc)+((h+hc-hci-tf)/2);
x5=(hc-xc)+(hci-hc)+(h+hc-hci-tf)+tf/2;
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5;

elseif D_2>=0.002 && D_3>=0.002
F2=tw*bf*Fy; % tensión
F3=tw*(h-2*tf)*Fy; % tensión
F4=tw*bf*Fy; % tensión
F5=0;
fc=F1;
ftt=F2+F3+F4+F5;
f=F1-F2-F3-F4-F5;

x2=(hc-xc)+(tf/2);
x3=(hc-xc)+tf+(h-2*tf)/2;
x4=(hc-xc)+(h-0.5*tf);
x5=0;
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5;

elseif D_2<0.002 && D_3>=0.002

F2=(bf*Fy_2+bf*Fy)*tf/2 % tensión
F3=(Fy)*tw*(h-2*tf) %tensión
F4=Fy*tf*bf % tensión
F5=0;
fc=F1;
ftt=F2+F3+F4+F5;
f=F1-F2-F3-F4-F5;

x2=(hc-xc)+(tf/3)*((2*bf*0.002+bf*D_3)/(bf*0.002+bf*D_3));
x3=(hc-xc)+tf+(h-2*tf)/2;
x4=(hc-xc)+(h-0.5*tf);
x5=0;
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5;
end

elseif xc==hc;
%disp('eje neutro igual a la losa de concreto');
F1=Fcc*(beta*xc)*bec;
x1=beta*hc/2;
hi_2=hc+tf;
D_2=Dcc*(hi_2-xc)/xc;

```



```

Fy_2=Es*D_2;% esfuerzo
if D_2<0.002
    F2=(tf*bf)*(Fy_2)/2;% tensión
    F3=(Fy_2*bf+Fy*tw)*(hci-x-tf)/2;% tensión
    F4=Fy*tw*(h+hc-hci-tf); % tensión
    F5=Fy*bf*tf; % tensión
    fc=F1;
    ftt=F2+F3+F4+F5;
    f=F1-F2-F3-F4-F5;

    x2=(2*tf/3);
    x3=tf+((hci-hc-tf)/3)*((2*0.002*bf+D_2*tw)/(0.002*bf+D_2*tw));
    x4=tf+(h+hc-hci-tf)/2;
    x5=h-0.5*tf;
    Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5;

elseif D_2>=0.002
    F2=Fy*tf*bf/2; % tensión
    F3=Fy*(h-2*tf)*tw; % tensión
    F4=Fy*tf*bf; % tensión
    F5=0;
    fc=F1;
    ftt=F2+F3+F4+F5;
    f=F1-F2-F3-F4-F5;

    x2=(2*tf/3);
    x3=tf+(h-2*tf)/2;
    x4=h-0.5*tf;
    x5=0;
    Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5;
end

elseif xc>hc && xc<=(hc+tf)
% disp('eje neutro dentro del patín superior');
F1=Fcc*(hc)*bec;% comp
x1=(hc*beta/2)+(xc-hc);
hi_2=hc;
hi_3=hc+tf;
D_2=Dcc*(hi_2-xc)/xc;
D_3=Dcc*(hi_3-xc)/xc;
Fy_2=Es*D_2;
Fy_3=Es*D_3;
if D_2<0.002 && D_3<0.002
    F2=(x-hc)*(bf)*(Fy_2)/2; % comp
    F3=(Fy_2*bf+Fy_3*bf)*(hc+tf-xc)/2; % tensión
    F4=(Fy_3*bf+Fy*tw)*(hci-hc-tf)/2; % tensión
    F5=Fy*tw*(h+hc-hci-tf);% tensión
    F6=Fy*tf*bf;
    f=F1-F2-F3-F4-F5-F6;

```

```

x2=(xc-hc)/3;
x3=2*(hc+tf-xc)/3;
x4=(hc+tf-xc)+((hci-hc-tf)/3)*((2*0.002*tw+D_3*bf)/(0.002*tw+D_3*bf));
x5=(hci-xc)+(h+hc-hci-tf)/2;
x6=(hci-xc)+(h+hc-hci-0.5*tf);
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5+F6*x6;

elseif D_2>=0.002 && D_3>=0.002
F2=bf*(x-hc)*Fy; % compresión
F3=bf*(hc+tf-xc)*Fy; % tensión
F4=Fy*tw*(h-2*tf); % tensión
F5=Fy*tf*bf; % tensión
F6=0;
f=F1-F2-F3-F4-F5-F6;

x2=(xc-hc)/2;
x3=(hc+tf-xc)/2;
x4=(hc+tf-xc)+(h-2*tf)/2;
x5=(hc+tf-xc)+(h-tf)+0.5*tf;
x6=0;
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5+F6*x6;
end
elseif xc==(hc+tf);
% disp('eje igual al espesor de la losa + el espesor del patín')
F1=Fcc*(hc)*bec; % compresión
x1=tf+hc*beta/2;
hi_2=xc-hc;
hi_3=hc+h-tf;
D_2=Dcc*(hi_2-xc)/xc;
D_3=Dcc*(hi_3-xc)/xc;
Fy_2=Es*D_2;
Fy_3=Es*D_3;
if D_2<0.002 && D_3>=0.002
F2=Fy_2*bf*tf/2; % comp
F3=Fy*(hci-xc)*tw/2; % tensión
F4=Fy*(h+hc-xc-tf)*tw; % tensión
F5=tf*bf*Fy; % tensión
f=F1-F2-F3-F4-F5;

x2=2*tf/3;
x3=2*(hci-xc)/3;
x4=(hci-xc)+(hc+h-hci-tf)/2;
x5=(hci-xc)+(hc+h-hci-0.5*tf);
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5;

elseif D_2>=0.002 && D_3>=0.002
F2=Fy*bf*tf/2; % comp
F3=Fy*(h-2*tf)*tw/2; % tensión
F4=Fy*(bf*tf); % tensión
F5=0;

```

```

f=F1-F2-F3-F4-F5;

x2=(xc-hc)/2;
x3=(h-2*tf)/2;
x4=(h-tf-0.5*tf);
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4;
end

elseif xc>(hc+tf) ;
F1=Fcc*(beta*hc)*bec; % compresión
x1=(hc*beta/2)+(xc-hc);
hi_2=hc;
hi_3=hc+tf;
hi_4=hc+h-tf;
hi_5=hc+h;
D_2=-Dcc*(hi_2-xc)/xc;
D_3=-Dcc*(hi_3-xc)/xc;
D_4=Dcc*(hi_4-xc)/xc;
D_5=Dcc*(hi_5-xc)/xc;
Fy_2=Es*D_2;
Fy_3=Es*D_3;
Fy_4=Es*D_4;
Fy_5=Es*D_5;

if D_2<0.002 && D_4>=0.002
F2=(Fy_2*bf+Fy_3*bf)*tf/2; % com
F3=tw*(Fy_3)*(xc-hc-tf)/2; % comp
F4=tw*Fy*(hci-xc)/2; % tensión
F5=tw*(h+hc-hci-tf)*Fy; % tensión
F6= Fy*tf*bf; % tensión
f=F1+F2+F3-F4-F5-F6;

x2=(xc-hc-tf)+(tf/3)*((D_2*bf+2*D_3*bf)/(D_2*bf+D_3*bf));
x3=2*(xc-hc-tf)/3;
x4=2*(hci-xc)/3;
x5=(hci-xc)+(h+hc-hci-tf)/2;
x6=(hci-xc)+(h+hc-hc-0.5*tf);
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5+F6*x6;

elseif D_2>=0.002 && D_4>=0.002;

F2=(Fy/FSs)*bf*tf;%compresión patin
F3=(Fy/FSs)*tw*(hcs-hc-tf); % compresión alma
F4=(Fy/FSs)*tw*(xc-hcs)/2; %compresión
F5=(Fy/FSs)*tw*(hci-xc)/2; % tensión
F6=(Fy/FSs)*tw*(h+hc-hci-tf);%tensión
F7=(Fy/FSs)*tf*bf; %tensión patin
f=F1+F2+F3+F4-F5-F6-F7;

x2=(xc-hc-0.5*tf);

```

```

x3=(hcs-hc-tf)/2+(xc-hcs);
x4=2*(xc-hcs)/3;
x5=(hci-xc)/3;
x6=(h+hc-hci-tf)/2+(hci-xc);
x7=(h+hc-xc)-0.5*tf;
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5+F6*x6+F7*x7;

elseif D_2<0.002 && D_4<0.002
F2=(Fy_2*bf+Fy_3*bf)*tf/2; % com
F3=tw*(Fy_3)*(xc-hc-tf)/2; % comp
F4=tw*Fy_4*(hc+h-xc-tf)/2; % tensión
F5=(Fy_4*bf+Fy_5*bf)*tf/2; % tension
f=F1+F2+F3-F4-F5;

x2=(xc-hc-tf)+(tf/3)*((D_2*bf+2*D_3*bf)/(D_2*bf+D_3*bf));
x3=2*(xc-hc-tf)/3;
x4=2*(hc+h-xc-tf)/3;
x5=(hc+h-xc-tf)*((2*D_4*bf+D_5*bf)/(D_4*bf+D_5*bf))
Mrc1=F1*x1+F2*x2+F3*x3+F4*x4+F5*x5;

end
end
for m=1:capas;
hii=(h+hc)+(m*(ta+tcfrp))-(0.5*tcfrp);
%Dsii=Dcc*(hii-xc)/xc;
Dsii=Dcfrp_l*((hii-xc)/(h+hc+(capas*(ta+tcfrp))-(0.5*tcfrp)-xc));
Fii(m)=Dsii*Ecfrp*bcfrp.*tcfrp; %tensión
xi(m)=(h+hc)-xc+m*(tcfrp+ta)-0.5*tcfrp;
Fcfrp_t(m)=Fii(m).*xi(m);
MR_FC=Mrc1+sum(Fcfrp_t);

set(handles.edit43,'String',MR_FC)
end
FT_t=f-sum(Fii)

if FT_t==0;
break
elseif sign(FT_t)==sign(fa);
a=xc; fa=FT_t;
else
b=xc; fb=FT_t;
end
end
disp(xc)
Dst1=Dcfrp_l*((h+hc-xc)/(h+hc+capas*(ta+tcfrp)-0.5*tcfrp-xc));% (+) deformación de tensión en
la parte inferior del acero patin
for m=1:capas;
hii=(h+hc)+(m*(ta+tcfrp))-(0.5*tcfrp);
Dsii=Dcfrp_l*((hii-xc)/(h+hc+(capas*(ta+tcfrp))-(0.5*tcfrp)-xc));
Fii(m)=Dsii*Ecfrp*bcfrp.*tcfrp; %tensión

```

```

xi(m)=(h+hc)-xc+m*(tcfrp+ta)-0.5*tcfrp;
Fcfrp_t(m)=Fii(m).*xi(m);
fff=As*Fy+sum(Fcfrp_t) ;
end
ccc=bec*hc*beta*Fcc;
difg=fff-ccc;
inn=(ccc-fff)*100/fff;
if fff>ccc
set(handles.edit41,'String','La viga está muy sobrada') ;
set(handles.edit45,'String','Modificar la sección IR');
set(handles.edit42,'String','Disminuir las propiedades mecánicas de la sección IR');
set(handles.edit62,'String','o disminuir el número de capas de CFRP');
elseif fff<ccc
disp('continuar y EJ en la losa de concreto')
if xc>Xb;
set(handles.edit41,'String','Falla por compresión') ;
if Dcfrpu<Dcfrp_d;
if Dst1<0.002
set(handles.edit45,'String','se produce una falla frágil');
set(handles.edit42,'String','Es mucho refuerzo de CFRP');
set(handles.edit62,'String','Disminuir el número de capas de CFRP');
elseif Dst1>=0.002
set(handles.edit45,'String','Se produce una falla frágil');
set(handles.edit42,'String','Disminuir las propiedades mecánicas de la sección IR o CFRP');
set(handles.edit62,'String','Disminuir el número de capas de CFRP');
end
elseif Dcfrpu>Dcfrp_d;
set(handles.edit45,'String','¡Alerta!');
set(handles.edit42,'String','Existe desadherencia intermedia');
set(handles.edit62,'String','Aumentar las propiedades mecánicas del adhesivo de unión');
end
elseif xc<Xb
set(handles.edit41,'String','Falla por flexión')
if Dcfrpu<Dcfrp_d;
if Dst1<0.002
set(handles.edit45,'String','Es mucho refuerzo de CFRP');
set(handles.edit42,'String','Disminuir el número de capas de CFRP');
set(handles.edit62,'String','O disminuir las propiedades mecánicas del refuerzo CFRP');
elseif Dst1>=0.002
set(handles.edit45,'String','Comportamiento elastoplástico');
set(handles.edit42,'String','No existe desadherencia intermedia');
set(handles.edit62,'String','Y la sección tiene un comportamiento ideal');
end
elseif Dcfrpu>Dcfrp_d;
set(handles.edit45,'String','¡Alerta!');
set(handles.edit42,'String','Existe desadherencia intermedia');
set(handles.edit62,'String','Aumentar las propiedades mecánicas del adhesivo de unión');
end
end
end
end

```

```
IR11=(MR_FC-Mmaxc)*100/Mmaxc; %Incremento con respecto al momento con láminas y el  
momento actuante en la viga  
set(handles.edit60,'String',IR11)  
end
```