



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

TEMA: “REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS CON FRP  
(FIBER REINFORCED POLYMERS), APLICACIÓN AL CASO DE  
REFUERZO A FLEXION DE VIGAS METALICAS”.

AUTOR: JOSÉ ÁNGEL DUEÑAS HERNÁNDEZ

DIRECTOR: ING. ROBERTO AGUIAR F., PHD.

CODIRECTOR: ING. PABLO CAIZA S., PHD.

SANGOLQUÍ

2015

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto titulado “Reforzamiento de estructuras con FRP (Fiber Reinforced Polymers). Aplicación al caso de refuerzo a flexión de vigas metálica”, fue desarrollado en su totalidad por el Sr. JOSÉ ÁNGEL DUEÑAS HERNÁNDEZ, bajo nuestra dirección.

Sangolquí, 2015

---

ING. ROBERTO AGUIAR F, PHD.

DIRECTOR

---

ING. PABLO CAIZA S, PHD.

CODIRECTOR

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Declaro que:

El presente proyecto titulado “Reforzamiento de estructuras con FRP (Fiber Reinforced Polymers). Aplicación al caso de refuerzo a flexión de vigas metálicas”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 2015

---

José Ángel Dueñas Hernández

## AUTORIZACIÓN

Yo, José Ángel Dueñas Hernández, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo “Reforzamiento de estructuras con FRP (Fiber Reinforced Polymers). aplicación al caso de refuerzo a flexión de vigas metálicas”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 2015

---

José Ángel Dueñas Hernández

## DEDICATORIA

A mi amada esposa; sin su apoyo incondicional, simplemente, nada de esto hubiese sido posible, a mis hijos María Emilia y José Ángel, para que vean en mí el mejor ejemplo a seguir durante sus vidas, a mi adorada madre, la mujer más sabia e inteligente que Dios puso en mi camino y que llena de inspiración mi vida.

Y de una manera muy especial dedico este trabajo a la memoria de mi querida "Mami Bitá", quién me cuidó y fue una luchadora incansable, siempre brindándome su apoyo.

Los quiero mucho.

JOSÉ ÁNGEL DUEÑAS HERNÁNDEZ

## AGRADECIMIENTO

Primordialmente me gustaría agradecerle a Dios y a mi familia, gracias a mi esposa por estar siempre a mi lado, a mis hijos por darme la fuerza necesaria para siempre ser mejor, a mi mamá por apoyarme siempre y guiarme de la mejor manera y a mi hermano por siempre aconsejarme y buscar mi bienestar.

A mi director de tesis, Ing. Roberto Aguiar Falconí, Phd. por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado inspirarme y de esta manera poder terminar mis estudios con éxito. De igual manera agradecer al Ing. Pablo Caiza Sánchez, Phd. por su participación como Codirector, lo cual ha enriquecido mucho este proyecto.

También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación, en especial a mis profesores Ing. Jorge Zuñiga e Ing. Ricardo Duran por sus consejos, su enseñanza y más que todo por su amistad.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias.

Para ellos: Muchas gracias y Dios los colme de bendiciones.

JOSÉ ÁNGEL DUEÑAS HERNÁNDEZ

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1. Reforzamiento de estructuras metálicas con F.R.P. ....	1
1.1.1. ¿Por qué la necesidad de reforzar las estructuras?.....	3
1.1.2. Métodos empleados para reforzar estructuras.....	4
1.2. Antecedentes .....	8
1.3. Justificación .....	10
1.4. Objetivos.....	11
1.4.1. Objetivo general del proyecto.....	11
1.4.2. Objetivos específicos .....	11
1.5. Descripción del tema de estudio .....	11

## CAPÍTULO II

<b>2. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL COMPUESTO, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....</b>	<b>13</b>
2.1. Introducción .....	13
2.2. Fibras aramida .....	18
2.3. Fibras de vidrio.....	18
2.4. Fibras de Carbono Tejidas .....	20
2.5. Platinas de carbono .....	22
2.6. Ventajas y desventajas del material compuesto (F.R.P.).....	24
2.6.1. Ventajas.....	25
2.6.2. Desventajas .....	25

## CAPÍTULO III

<b>3. FLEXIÓN .....</b>	<b>28</b>
3.1. Introducción .....	28
3.2. Definición. ....	28
3.3. Empleo de elementos sometidos a flexión.....	29
3.4. Secciones transversales ventajosas. ....	33
3.5. Diseño de vigas empleando la teoría elástica simple.....	34
3.6. Diseño de vigas empleando la teoría plástica simple.....	34
3.7. Comportamientos básicos de miembros en flexión.....	37
3.8. Clasificación de las secciones. ....	38
3.9. Modos de falla de miembros a flexión.....	42
3.9.1 Fluencia o plastificación.....	42
3.9.2. Pandeo local de los patines o del alma.....	43



3.9.3. Pandeo lateral .....	44
3.9.4. Pandeo lateral por flexo-torsión. ....	46

#### **CAPÍTULO IV**

<b>4. DISEÑO ESTRUCTURAL DE MIEMBROS EN FLEXIÓN DE ACUERDO CON LAS ESPECIFICACIONES AISC-2010.....</b>	<b>50</b>
4.1. Estado límite de pandeo lateral por flexo-torsión. ....	51
4.2. Extracto de las ecuaciones de las Especificaciones AISC-2010 para el diseño de vigas o miembros en flexión (Capítulo F: Diseño de miembros en flexión vigas) .....	51
4.3. Resistencia nominal, Mn. ....	52
4.4. Propiedades mecánicas a flexión de una viga metálica sin reforzar.....	59
4.5. Propiedades mecánicas a flexión de una viga metálica reforzada con F.R.P. ....	63

#### **CAPÍTULO V**

<b>5. ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS METÁLICAS REFORZADAS Y SIN REFORZAR.....</b>	<b>68</b>
5.1. Introducción. ....	68
5.2. Preparación de las muestras.....	68
5.3. Equipos y materiales.....	73
5.4. Procedimiento del ensayo a flexión.....	74
5.5. Resultados del ensayo.....	75
5.5.1. Diagramas Esfuerzo – Deformación. ....	76
5.5.2. Propiedades mecánicas.....	85
5.6. Estudios similares .....	88

**CAPÍTULO VI**

<b>6. COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
6.1. Comentarios.....	91
6.2. Conclusiones.....	92
6.3. Recomendaciones. ....	94
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>97</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Refuerzos empleados tradicionalmente.....	7
Figura 2. Refuerzo en el alma.....	7
Figura 3. Fibras Aramida .....	18
Figura 4. Fibra de vidrio .....	19
Figura 5. Colocación de tejidos F.R.P.....	21
Figura 6. Tejido FRP y resina SikaDur 301 .....	22
Figura 7. Platinas FRP y resina SikaDur 330.....	23
Figura 8. Curvas Esfuerzo Deformación de platinas de carbono.....	24
Figura 9. Solicitaciones de una viga típica con carga uniformemente repartida: flexión y cortante. ....	28
Figura 10. Definición de miembros en flexión. ....	29
Figura 11. Vigas de gran claro. ....	31
Figura 12. Vigas laminadas. ....	31
Figura 13. Vigas de un edificio alto para departamentos. ....	32
Figura 14. Vigas de un sistema de piso de un mezanine.....	32
Figura 15. Secciones transversales típicas de miembros en flexión.....	33
Figura 16. Gráfica carga-deflexión de una viga libremente apoyada sujeta a una carga concentrada en la sección media.....	35
Figura 17. Mecanismo de colapso de un tramo interior de una viga continua. .	35
Figura 18. Secciones críticas donde se forman las articulaciones plásticas. ....	36
Figura 19. Redistribución de momentos flexionantes en una viga continua .....	36
Figura 20. Clasificación de las secciones de acero. ....	38
Figura 21. Curva de momento plástico versus relación ancho/grueso de patines. .....	40
Figura 22. Formas de rigidizar perfiles tipo IR para evitar inestabilidad local. ..	44
Figura 23. Curva Momento-Rotación que ilustra el efecto del pandeo lateral...	45
Figura 24. Pandeo lateral de vigas. ....	46

Figura 25. Modos de pandeo en vigas sometidas a flexión pura bajo la acción de pares iguales en magnitud y de sentidos contrarios, aplicados en sus extremos .....	48
Figura 26. Diversas formas de pandeo de miembros en flexión. ....	49
Figura 27. Curva de momento resistente nominal - longitud no soportada lateralmente. ....	53
Figura 28. Diagramas de momento flexionante para el cálculo .....	55
Figura 29. Curva de momento resistente nominal versus longitud no soportada lateralmente. ....	57
Figura 30. Sección transversal en mm de la viga a emplear. ....	59
Figura 31. Comportamiento plástico de la sección sin reforzar. ....	61
Figura 32. Sección transversal en mm de la viga a emplear reforzada con F.R.P. ....	63
Figura 33. Comportamiento plástico de la sección reforzada .....	65
Figura 34. Vigas IPE 100 L = 1000 mm .....	69
Figura 35. Oxido presente en las vigas debido al almacenamiento .....	69
Figura 36. Limpieza de la cara que se reforzara con FRP .....	70
Figura 37. Superficie libre de impurezas y lista para ser reforzada .....	70
Figura 38. Tejido unidireccional de FRP (55mmx1000mm) .....	71
Figura 39. Resina epoxica de alta adherencia. ....	71
Figura 40. Resina epoxica de alta resistencia. ....	72
Figura 41. Material de refuerzo saturado con la resina de alta resistencia .....	72
Figura 42. Refuerzo de la cara que soportara tracción en el ensayo de flexión. ....	73
Figura 43. Vigas listas para ser ensayadas. ....	73
Figura 44. Luz de ensayo de flexión estática .....	74
Figura 45. Medición de la deflexión del plano neutral en el centro de la probeta (Medidas en milímetros).....	75
Figura 46. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 1 con refuerzo.....	76
Figura 47. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 2 con refuerzo.....	77
Figura 48. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 3 con refuerzo.....	78

Figura 49. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 4 con refuerzo.....	79
Figura 50. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 5 con refuerzo.....	80
Figura 51. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 6 con refuerzo.....	81
Figura 52. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 7 sin refuerzo.....	82
Figura 53. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 8 sin refuerzo.....	83
Figura 54. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 9 sin refuerzo.....	84
Figura 55. Propiedades mecánicas probetas 1, 2 y 3 con refuerzo .....	85
Figura 56. Propiedades mecánicas probetas 4, 5 y 6 con refuerzo .....	86
Figura 57. Propiedades mecánicas probetas 6, 7 y 8 sin refuerzo .....	87
Figura 58. Vigas ensayadas en la universidad de Arizona .....	88
Figura 59. Grafica carga deflexión .....	89
Figura 60. Vigas ensayadas por SIKA .....	89
Figura 61. Grafica carga deflexión .....	90
Figura 62. Desprendimiento del FRP, falla de la resina epoxica.....	93
Figura 63. Falla por pandeo local patín superior.....	94

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Valores típicos de los módulos de elasticidad de un laminado unidireccional .....	15
Tabla 2. Valores típicos de las propiedades de las fibras .....	15
Tabla 3. Factor de reducción ambiental debido a varias condiciones de exposición .....	17
Tabla 4. Valores máximos admisibles de las relaciones ancho/espesor para perfiles IR.....	41
Tabla 5. Valores del coeficiente de flexión $C_b$ para vigas libremente apoyadas con varias condiciones de cargas .....	56

## RESUMEN

El presente proyecto de tesis se muestra como una alternativa de refuerzo de vigas metálicas, para que los profesionales, en función de las solicitaciones a las que están sometidos estos elementos estructurales, puedan utilizar como una opción viable las láminas o tejidos de FRP, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del elemento reforzado. Este documento comprende detalladamente los procedimientos que se deben seguir para diseñar un refuerzo estructural con FRP ante esfuerzos de flexión en vigas metálicas; estableciendo también las ventajas y desventajas de los materiales compuestos frente a los métodos tradicionales de reforzamiento. Finalmente, en base a los parámetros de diseño presentados, se realizó el reforzamiento de vigas metálicas tipo IPE100, las cuales fueron ensayadas en el laboratorio de la Universidad católica del Ecuador, dando resultado importantes conclusiones acerca del uso del materiales compuestos en el campo de reforzamiento de estructuras.

### PALABRAS CLAVE

- Refuerzo estructural
- Fibra de carbono
- Flexión
- Vigas metálicas

## **ABSTRACT**

These thesis projects is shown as an alternative, for professionals to reinforcing steel beams, depending on the stresses to these structural elements are subjected, is recommend the use of FRP tissue in order to improve the mechanical properties of the reinforced element. This document includes detailed procedures to be followed to design a structural FRP reinforcement before bending stresses in steel beams; also establishing the advantages and disadvantages of composites over traditional methods of reinforcement. Finally, based on the design parameters presented, reinforcing steel beams was performed type IPE100, which were tested in the laboratory of the Catholic University, paying off important conclusions regarding use of composite materials in the field strengthening structures.

## **KEYWORDS**

- Structural reinforcement
- Fiber reinforced polymers
- Flexion
- Steel beams



## CAPÍTULO I

### 1. GENERALIDADES

#### 1.1. Reforzamiento de estructuras metálicas con F.R.P.

El diseño de estructuras metálicas se realiza basándose en los criterios referentes a los estados de falla y de servicio. Según el criterio de estados límite de falla, los elementos estructurales deben analizarse de manera que la capacidad resistente de cálculo de toda sección, en relación a todos los momentos o fuerzas internas que actúen sobre la misma (fuerza cortante, momento de torsión, momento flexionante, fuerza axial) o efecto conjunto de dos o más de ellas, sea mayor o igual que los valores de cálculo del momento o fuerza interna. Los diseños deben incluir el coeficiente de minoración  $F_R$  adecuado. Los momentos y fuerzas internas se obtiene, generalmente, multiplicando por el coeficiente de carga  $F_C$  adecuado los valores obtenidos bajo acciones nominales para momentos y fuerzas internas. Esto garantiza que la estructura complete su vida útil dentro de condiciones aceptables de servicio y resistencia; sin embargo una obra civil concebida para un uso predeterminado puede sufrir cambios durante la concepción, ejecución o en su vida útil, que afectan negativamente la capacidad resistente que se espera de la misma y pueden generar la falla de la misma. De acuerdo con esto, muchas veces es necesario realizar reparaciones en las estructura metálicas con la introducción de refuerzos en algunos elementos estructurales o en todo su conjunto para aumentar la capacidad de resistente las cargas aplicadas que no fueron consideradas y así recuperar su funcionalidad.

En estas circunstancias, es importante revisar varios términos que usualmente son ambiguos en nuestro medio, como son; reforzamiento, reparación y restauración, entre los cuales existen diferencias.

Expresado de una manera más simple:

Reforzamiento: son las acciones necesarias para aumentar la capacidad resistente de un elemento estructural o estructura completa.

Reparación: son los trabajos necesarios para rehabilitar la resistencia de una estructura dañada.

Restauración: son las acciones necesarias para conseguir que una edificación antigua se encuentre en condiciones óptimas y se la pueda volver a utilizar.

Para regularizar estos términos, a finales de los 90 el "Subcomité 440F" generaliza la clasificación del refuerzo e implementa tres campos principales de ejecución, a pesar de que estas definiciones están incluidas dentro del manual de diseño para estructuras de hormigón también pueden ser adoptados para el caso de estructuras de acero. (ACI, 1999)

a) **Rehabilitación**: Relacionada a las situaciones de recobro de la capacidad resistente de la estructura en sitios donde se encuentra reducida su seguridad, debido a la continua disminución de capacidad de sus elementos.

b) **Refuerzo**: Atribuido al refuerzo estructural de elementos para la corrección de anomalías originadas por deficiencias de proyecto y de la capacidad portante por un aumento en las acciones de diseño, o por un cambio de uso.

c) **Refuerzo Sísmico**: Representa aquellas situaciones de aumento en la resistencia de un elemento estructural o una estructura, cuya pérdida está directamente relacionada con acciones sísmicas, se consigue por incremento de la ductilidad y de la resistencia a corte de los elementos estructurales, esto permite la disipación de la energía y mejora a capacidad de deformación de los elementos. En cualquiera de los casos descritos, los procedimientos se orientan a aumentar la resistencia a flexión, cortante, tracción, compresión o aumentar la ductilidad del elemento estructural según sea necesario, es decir para que resista cualquier esfuerzo simple o combinado al que se le someta al elemento, elementos, o estructura.

### 1.1.1. ¿Por qué la necesidad de reforzar las estructuras?

En obras de civil pueden existir varias causas que afectan el comportamiento de la estructura y que llevan a diseñar e implementar un refuerzo.

Entre los principales y que comúnmente se suscitan podemos mencionar los siguientes:

- a) Cambio de uso en la edificación.- Esta acción supone soportar cargas superiores a las previstas en el diseño original o, que la distribución de las mismas sea totalmente distinta a las consideradas inicialmente. Por ejemplo si se tiene inicialmente ambientes destinados a oficinas, y se cambia por almacenes o bodegas los cuales tienen la carga de servicio mayor.
- b) Asentamientos diferenciales.- Este fenómeno produce fallas en la cimentación por problemas de suelos no considerados en el correspondiente estudio y diseño.
- c) Errores en la fase de proyecto o diseño.- Que comprometen la resistencia y durabilidad de la estructura.
- d) Errores que se producen durante la fase de ejecución o construcción.- Provocados por la falta de personal calificado en construcción o por falta de fiscalización.
- e) Problemas debidos al deterioro y degradación de la materia prima de construcción.- Pueden tener dos causas; el paso del tiempo o la exposición a agentes químicos ambientales como por ejemplo la oxidación, fenómeno que produce corrosión del refuerzo que se encuentra expuesto por alguna situación.
- f) Modificación y eliminación parcial o total de ciertos elementos estructurales.-

- g) Ejemplo: el caso de nuevas aberturas en losas de entrepiso, por necesidad de una grada de último momento o un ducto de basura o una conexión de entrepisos, entre otras.
- h) Daños producidos por causas accidentales.- Explosión, fuego, impacto, etc. que disminuyen o anulan la capacidad resistente de la estructura en su totalidad, parte de ella, o en algunos elementos.
- i) Modificación de criterios ante la respuesta sísmica.
- j) Modificación de las normativas de construcción, códigos y reglamentos de diseño.

Todos estos factores conducen a evaluar una estructura y la forma técnica más adecuada de intervenirla. Las acciones necesarias para realizar el refuerzo mediante la utilización de diferentes materiales y métodos hacen de la misma, una estructura segura y confiable.

### **1.1.2. Métodos empleados para reforzar estructuras**

En el refuerzo de estructuras de cualquier tipo. el sistema convencional de encolado de chapa metálica mediante adhesivo estructural, es ampliamente utilizado y quizás el de mayor eficacia, en especial en zonas de estructuras traccionadas por esfuerzos de flexión.

En el refuerzo mediante láminas de acero, pese a la eficacia del método, los materiales metálicos presentan algunos inconvenientes significativos que se deben considerar:

- Las planchas metálicas constituyen elementos pesados lo cual dificulta su manejo, transporte y montaje in situ.
- Además, su longitud máxima de 6 a 8 metros genera otro problema puesto que se deben hacer juntas o traslapes.
- Debido a su elevada densidad, requieren de elementos importantes para su apuntalamiento, los mismos que se emplean durante largos

períodos de tiempo, lo que puede provocar inconvenientes y riesgos debido a que se ejecutan en obras de edificios en funcionamiento.

- El riesgo de corrosión en la superficie de contacto entre el acero y el adhesivo también se debe considerar, pues este fenómeno afecta la adherencia entre el hormigón y la chapa metálica.

Para resolver las deficiencias mencionadas en la utilización de chapas metálicas, y frente al creciente y elevado número de estructuras que requieren ser reforzadas se concluye que los materiales tradicionales pueden resultar inadecuados en determinadas situaciones, por lo que se debe buscar alguna solución que sea más eficiente, eficaz y económica; por esta razón, es importante considerar entre otras alternativas, los materiales compuestos.

Desde la segunda mitad del siglo pasado, los materiales compuestos se han implementado en la industria de la construcción, superando significativamente en importancia a los metales, pero no han tenido un crecimiento lineal y continuo ya que en el período transcurrido durante la segunda guerra mundial, fue la industria metalúrgica la que se desarrolló ampliamente por razones que son de dominio público, sin embargo al finalizar la segunda guerra mundial los nuevos materiales poliméricos y cerámicos fueron desplazando a los metálicos y se comienza a investigar la posibilidad de refuerzo estructural con materiales compuestos. (Juvandes, 2010)

Avances recientes en el campo de los materiales poliméricos reforzados con fibras, han generado el desarrollo de materiales innovadores con un potencial muy alto para el refuerzo de miembros estructurales en zonas donde los materiales habitualmente empleados han fallado.

Entre los principales materiales compuestos reforzados con fibras tenemos al Glass Fiber Reinforced Cement (GRC) o cemento reforzado con fibra de vidrio que está compuesto por una matriz de mortero de cemento y fibras cortas de vidrio, el (AFRP) que son polímeros reforzados con fibras de aramida de origen

orgánico y el Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) o polímero reforzado con fibra de carbono que es el material de refuerzo escogido para el presente estudio de investigación.

Se debe precisar que el GRC se emplea como refuerzo del hormigón al ser incorporado en la mezcla, mientras que el AFRP y el CFRP se emplean como refuerzo de estructuras de hormigón mediante armadura interna para el caso del AFRP y externa para el caso del CFRP.

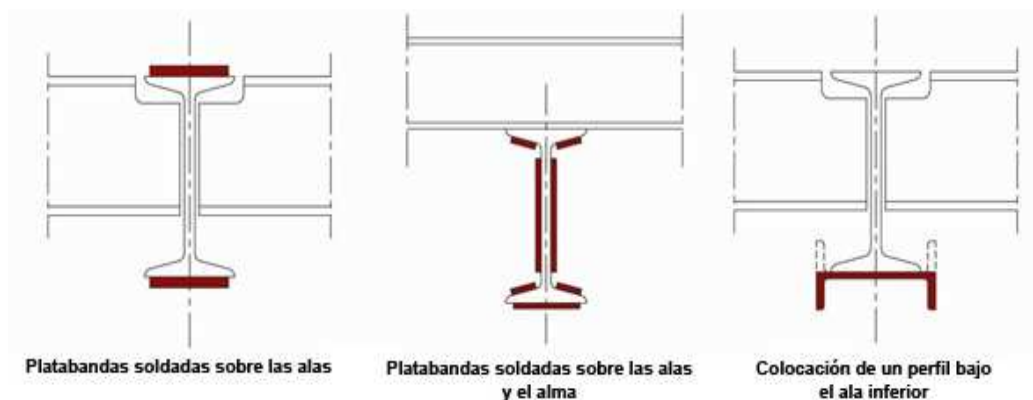
De la misma manera que existen diversos materiales que pueden ser utilizados en el refuerzo, existen también varias técnicas para incrementar la capacidad resistente de una estructura en general.

Dentro de las soluciones por medio de elementos metálicos externos se encuentran las siguientes:

- Refuerzo de perfiles metálicos existentes mediante perfiles soldados o platabandas soldadas.- Para la elaboración, del refuerzo en el elemento de acero se añade perfiles metálicos y/o platabandas que se unen a la viga a reforzar por medio de pernos de anclaje, soldadura o métodos de encolado. Estos refuerzos generalmente son colocados en la cara exterior del patín inferior, u ocasionalmente en el alma de los perfiles. Cuando es accesible, el ala superior también puede reforzarse.

Generalmente, la falta de rigidez es compensada aumentando platabandas en las alas para de esta manera incrementar la inercia. La falta de resistencia al esfuerzo de corte se rectifica aumentando el espesor del alma en zonas donde se presente esfuerzos de corte mediante refuerzos, como los apoyos. Al incrementar elementos metálicos se debe considerar la similitud metalúrgica entre materiales, especialmente si se desea soldar. Estos métodos de reforzamiento por acoplamiento de platabandas metálicas generalmente se

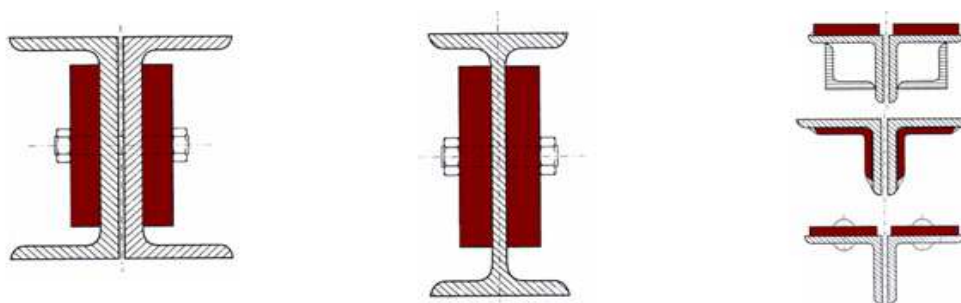
emplean para el refuerzo de estructuras metálicas. (Construcción de estructuras metálicas, s.f)



**Figura 1. Refuerzos empleados tradicionalmente.**

**Fuente: CONSTRUCTURALIA, técnica de refuerzos de viga**

- Incrementó de la sección del alma y del espesor de las alas de perfiles metálicos mediante platabandas soldadas. Inclusión de ángulos biselados de recubrimiento.- En primer lugar se procede a la limpieza de los elementos estructurales mediante cepillado, a continuación se controlan los elementos de unión (remaches o pernos de anclaje) y por último se incorporan los elementos de refuerzo, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2. Refuerzo en el alma**

**Fuente: CONSTRUCTURALIA, técnica de refuerzos de viga**

Además se suman otras técnicas y buenas prácticas como:

- Aumentar las secciones de los elementos estructurales.
- Incrementar la rigidez de la estructura mediante la inclusión de muros de corte, diagonales de acero, etc.
- Inclusión de estructuras metálicas para reducir luces.
- Incorporación de armadura externa adherida al acero mediante el uso de un adhesivo epóxico.

Cualquiera sea el material o método que se utilice es importante lograr un balance entre el costo, funcionamiento, estética, espacio, dificultad, comodidad, serviciabilidad y seguridad.

En el presente trabajo, la técnica que se utiliza, es la última en mención, ya que se ocupa la fibra de carbono FRP, material que va adherido al metal mediante una formulación epoxica.

## **1.2. Antecedentes**

Como ya se mencionó, los materiales compuestos se consideran después de la segunda guerra mundial y, a partir de 1940, dichos materiales compuestos desempeñan funciones importantes en el campo de la ingeniería militar, aeroespacial, náutica, ferroviaria y automovilística, y por su excelente comportamiento, adicionalmente se implementan en otros campos como la construcción civil en tres frentes principales de investigación: Japón se enfoca en la prefabricación, en pretensado y en refuerzo contra sismo; en América del Norte se trabaja en la durabilidad de las construcciones y, en Europa, se encaminan los estudios a la rehabilitación de la infraestructura y de edificaciones patrimoniales.

Los primeros ensayos de estructuras reforzadas con FRP adheridas exteriormente, se llevaron a cabo en 1984 en centros de investigación como el "Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research" en Suiza, "Federal Institute for Material Testing" y el "Institute for Building Materials, Concrete Construction and Fire Protection" en Alemania.



Posteriormente se realizaron investigaciones en centros como el “Massachusetts Institute of Technology” en los Estados Unidos y algunos otros en Canada y Japón.

La primera vez que se empleó FRP como sistema de refuerzo ocurrió en Europa, este se utilizó para reforzar el puente Kattenbush (Alemania) entre 1986 y 1987, y luego desde 1991 casi 250 estructuras fueron reforzadas en Suiza incluyendo el puente “Ibach Bridge”. En Alemania y Suiza la publicación de los dos primeros documentos de construcción y recomendaciones de sistemas CFRP, aumentó la confianza a nivel de producción, proyecto y aplicación.

Es por eso que su uso se extendió a la rehabilitación de edificios de carácter histórico en Grecia y el refuerzo contra sismo de muros en Italia. (Meier, 1991)

Los sistemas FRP se desarrollan a finales de los años 80 en Japón y se aplican por primera vez en 1992 en el proceso de refuerzo y confinamiento de elementos en un puente en Tokio; luego se utilizan como refuerzo a sismo, flexión y corte para pilares, paredes, vigas de edificios y puentes de hormigón armado y pretensado. Un claro ejemplo de su utilización en Japón es la reconstrucción de la ciudad de Kobe después de su devastación debida a un sismo en enero de 1995.

La necesidad de rehabilitar estructuras en la mayoría de países es uno de los factores que favorece el desarrollo de esta línea de investigación en la última década, por mencionar un ejemplo, en Estados Unidos será necesario sustituir entre 250.000 y 578.000 tableros de puentes deteriorados, por esto es posible encontrar una variedad de productos basados en materiales compuestos FRP, entre los más relevantes se tiene los tejidos unidireccionales CFK y CARBODUR , tendones ARAPREE, las varillas tipo SPIFLEX, los tendones JONC J. T. y el tejido TFC. (Weaver, 2010)

Sin embargo, en el Ecuador, luego de 20 años del nacimiento de esta técnica de refuerzo, comienza su desarrollo y toma fuerza, tanto que, en términos generales se puede decir que en la construcción civil los sistemas de refuerzo basados en materiales compuestos FRP del tipo laminado y tejido flexible son los más estudiados y utilizados en nuestro medio, para el caso de reforzamiento exterior de estructuras. (Rendón, 2012)

### **1.3. Justificación**

Una de los aspectos fundamentales que enmarca la Ingeniería Civil es buscar los mecanismos necesarios para que las estructuras durante su vida útil sean perfectamente funcionales, y puesto que las obras de acero estructural están proyectadas a largo plazo, se puede presumir que los requerimientos y consideraciones iniciales de diseño se afectan por diversos factores como utilización, seguridad, factores ambientales, modificación de criterios ante respuesta sísmica, problemas de explosión, fuego, impacto, etc., factores que reducen o acaban con la vida útil de las estructuras. Se debe mencionar también que no solo por agentes ajenos a las condiciones sobre las que se estableció el proyecto o fenómenos naturales se altera la vida útil de la misma, sino también por fallas en el diseño o construcción; todo lo mencionado, hace que sea necesario un refuerzo en la estructura, para lo cual se debe analizar la alternativa más viable.

Por el aumento en la necesidad de reforzar y rehabilitar las estructuras en lugar de dejarlas abandonadas o incluso demolerlas, los ingenieros han estado en busca de nuevas tecnologías, métodos y materiales que sean una alternativa eficiente y sobre todo económica; en la última década el interés se centra en encontrar materiales que se acoplen a los proyectos de ingeniería actuales donde se busca tener elementos resistentes, durables, poco deformables, capaces de absorber y disipar energía, resistentes a la corrosión, etc., características que evitan la rotura frágil de las estructuras.

Una de las respuestas que mejor se acopla a las necesidades antes expuestas y que además tiene una excelente relación costo-beneficio, entre otras bondades que se explican en el desarrollo del proyecto, es el Polímero Reforzado con Fibra de Carbono de alta resistencia denominado CFRP, por sus siglas en inglés Carbon Fiber Reinforced Polymers, el cual actualmente está reemplazando a los sistemas de refuerzo convencional con chapa metálica debido a sus mejores prestaciones en muchos aspectos.

El Ecuador también debe estar dentro de los procesos de cambio, razón por la cual se hace necesario contar con diseños para sistemas de refuerzo de estructuras metálicas con FRP y aplicaciones reales que muestren los procedimientos, bondades, ventajas y desventajas que eventualmente se pueden presentar en dichos procesos.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general del proyecto**

Presentar al FRP como una opción innovadora, eficaz y fácil para el reforzamiento de estructuras y determinar experimentalmente el incremento de la resistencia a flexión en el caso de vigas metálicas.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Dar a conocer las características e importancia del FRP dentro del refuerzo de estructuras.
- Mostrar las ventajas y desventajas de esta tecnología, y realizar comparaciones con los métodos clásicos de reforzamiento.
- Entregar una guía de diseño de refuerzo para vigas metálicas con FRP que contenga las ecuaciones y procedimientos a seguir ante diferentes tipos de solicitaciones.

#### **1.5. Descripción del tema de estudio**

El desarrollo de este estudio muestra las ventajas que tiene el uso del FRP en comparación con los sistemas clásicos de reforzamiento estructural.

Esta tesis entrega una guía para el diseño de refuerzos de estructuras metálicas con fibras de carbono FRP, principalmente vigas, con este fin se abordan los temas necesarios y suficientes para describir el proceso para reforzar elementos estructurales como son: flexión.

Este tema se trata en un capítulo completo, el mismo que contiene toda la base teórica, hipótesis básicas, recomendaciones especiales de diseño, procedimientos de cálculo del refuerzo y un ejemplo práctico que muestra cómo se realiza el reforzamiento.

Para sintetizar el proceso, se elabora el refuerzo de una viga simplemente apoyada, en ella se considera la incidencia de una carga aplicada en el centro de la luz con relación a los apoyos y se describe el comportamiento del FRP frente a dichas solicitaciones. Para lograr este objetivo, se ensayaron a flexión vigas IPE100 elaboradas por la empresa IPAC.

## **CAPÍTULO II**

### **2. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL COMPUESTO, VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

#### **2.1. Introducción**

Los materiales de las estructuras tradicionales son pesados y requieren una cantidad considerable de trabajo para su mantenimiento y utilización.

Nuevos materiales estructurales; fuertes, ligeros y más resistentes a la corrosión, impactos y ataques químicos se utilizan y son buenos sustitutos del acero.

Un material compuesto tiene el potencial de satisfacer estos requerimientos, se lo define como la unión de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente, en donde la mezcla se hace de tal forma, que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas, obteniendo como resultado un nuevo material con propiedades superiores y posiblemente únicas en comparación con los componentes originales por separado. (Ceroni & Prota, 2001)

Están formados por un elemento fibroso que aporta rigidez y resistencia, conjuntamente con una matriz flexible poco resistente con la función principal de transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras.

Para recuperar la capacidad resistente de una estructura o para incrementarla, existen varias técnicas como ya se mencionó en el capítulo anterior del presente trabajo, entre las cuales el uso de chapa metálica es uno de los más utilizados, aunque presenta algunos inconvenientes significativos que se pueden resumir en tres puntos principales.

Dificultad de montaje “in situ” del sistema.- Debido al elevado peso de las chapas metálicas y a la accesibilidad limitada que se presenta en algunos casos.

Riesgo de corrosión en la superficie del acero en contacto con el adhesivo.

Necesidad de crear juntas en las chapas debido a la limitación para su transporte.

La industria de la construcción e ingeniería empieza a conocer las bondades y ventajas de nuevos materiales estructurales de naturaleza sintética, provenientes de procesos químicos sofisticados; hoy en día conocidos como materiales compuestos. Dichos materiales en un principio sólo eran usados como materiales arquitectónicos o decorativos, para pasar después a tener aplicaciones estructurales en construcción, en aeronáutica y posteriormente aplicaciones de reparación tanto estructural como estético.

Este apartado da una breve descripción de las fibras más utilizadas como material de refuerzo con la finalidad de valorar las bondades y limitaciones de las mismas.

Se tiene tres tipos de fibras sintéticas que se utilizan para reforzar estructuras adhiriéndolas exteriormente; fibras de vidrio, fibras de carbono y fibras Aramida.

Existe otro tipo que es la fibra metálica, pero su aplicación está más enfocada al refuerzo del hormigón como parte del mismo en forma homogénea, por lo que se encuentra fuera del tema de estudio.

En las siguientes tablas se indican algunas de las propiedades básicas de las fibras; se aclara que tanto la rigidez como la resistencia a compresión son muy difíciles de estimar, ya que los ensayos experimentales son complicados.

El módulo de elasticidad para materiales compuestos laminados unidireccionalmente se resume en la Tabla 1.; aunque más adelante se detalla

las propiedades para las fibras de carbono disponibles en el mercado para reforzamiento.

**Tabla 1**

**Valores típicos de los módulos de elasticidad de un laminado unidireccional**

<b>Material</b>	<b>Longitudinal GPa</b>	<b>Transversal GPa</b>	<b>Cortante GPa</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
Carbono/Epoxico	181,00	10,30	7,17	0,30
Vidrio/Poliéster	54,10	14,05	5,44	0,25
Aramida/Epoxico	75,86	5,45	2,28	0,34

Fuente: ETL 1110-2-548, 1997

Como se puede observar el coeficiente de Poisson para un material compuesto es similar a la mayoría de los metales, entre 0.25 y 0.35; sin embargo varía significativamente en relación a la orientación de las fibras al igual que casi todas las propiedades de estos materiales.

**Tabla 2**

### Valores típicos de las propiedades de las fibras

Tipo de fibra	E a tracción, Gpa	Resistencia a tracción, Mpa	Deformación axial a rotura, %	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Carbono (módulo bajo)	170	1380	0,9	1,9
Carbono (módulo alto)	380	1720	0,4	2
Carbono (módulo muy alto)	760	2210	0,3	2,15
Vidrio (E-lass)	81	3450	4,88	2,6
Vidrio (S-glass)	89	4590	5,7	2,48
Aramida (alta tenacidad)	83	3620	4	1,44
Aramida (módulo alto)	131	3620-4140	2,8	1,44
Aramida (módulo muy alto)	186	3450	2	1,47

Fuente: Engineered Materials Handbook, Engineers Guide to Composite Materials

No se puede sacar una conclusión a partir de los datos de la tabla anterior sobre cual tipo de fibra es estructuralmente más eficiente, debido a que esto depende de las condiciones de entorno, del tipo de elemento a reforzar y del nivel de esfuerzos presentes en la estructura.



La larga exposición a varios tipos de ambientes afecta las propiedades del FRP, por lo que en las ecuaciones de diseño se reduce el esfuerzo y deformación últimos mediante el factor de exposición ambiental CE mostrado en la siguiente tabla según el tipo de fibra empleado en el refuerzo.

**Tabla 3**

**Factor de reducción ambiental debido a varias condiciones de exposición**

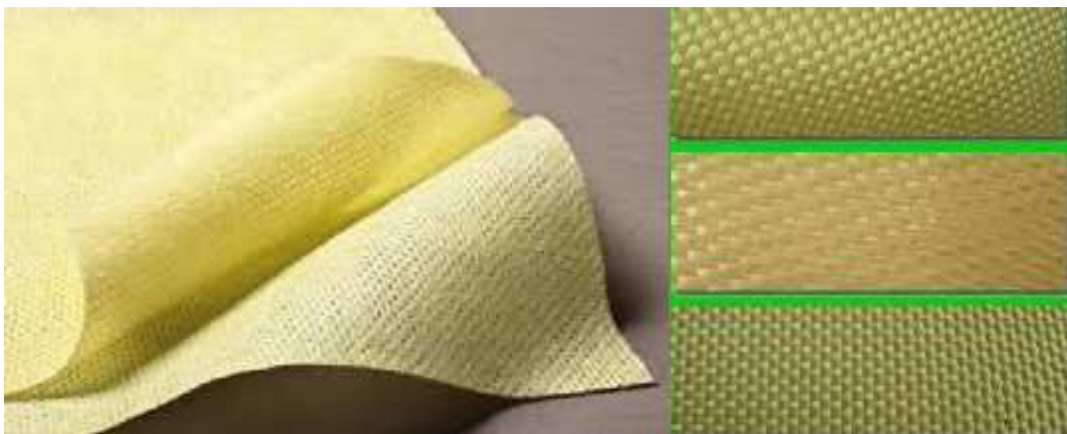
Condiciones de Exposición	Tipo de Fibra	Factor de reducción ambiental CE
Interior	Carbono	0,95
	Vidrio	0,75
	Aramida	0,85
Exterior (puentes, pilas y parqueaderos abiertos)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente agresivo (humedad, salinidad y alcalinidad)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,50
	Aramida	0,70

Fuente: ACI 440 2R

Los factores ambientales dados, son estimaciones conservativas basadas en la durabilidad relativa de cada fibra, y cuanto más investigaciones se desarrollen y se disponga de más información, estos valores serán más exactos.

## 2.2. Fibras aramida

Las fibras de aramida son fibras de origen orgánico y sintético que tienen alta resistencia y módulo de elasticidad debido a una perfecta alineación de los polímeros; de la misma manera que otras fibras como las de vidrio o FRP, el diagrama tensión vs. deformación hasta la rotura es casi lineal.



**Figura 3. Fibras Aramida**

**Fuente: María Galván Arana**

El Kevlar como se conoce comercialmente a las fibras aramidadas viene en de dos presentaciones Kevlar-29 y Kevlar -49. El primer tipo tiene una baja densidad, pero una resistencia alta, además, cuenta con un módulo de elasticidad medio, esta diseñado para emplearse como protección cables, balística y cuerdas . El segundo tipo tiene una densidad baja, resistencia muy alta y un alto módulo de elasticidad.

Las propiedades del de este hacen a estos tejidos útiles para refuerzos aeroespaciales, en marina, automotrices y otras aplicaciones industriales además del refuerzo de estructuras metálicas.

## 2.3. Fibras de vidrio

Este tipo de fibra conocida como GRP por sus siglas en inglés (Glass Reinforced Polymers) tiene la propiedad de ser un material fibroso obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos que pasar a un estado sólido posee la flexibilidad necesaria para ser empleado como fibra.

Este tipo de fibra es muy liviana, posee una gran resistente al desgaste y a la corrosión, buen aislante térmico, acústico y eléctrico, además su bajo costo hace que sea la fibra más utilizada; por otra parte sus desventajas son la dificultad de reciclaje, mal comportamiento al fuego y principalmente la ausencia de códigos de diseño para su uso, debido a que las propiedades mecánicas de este material dependen directamente del proceso de fabricación y el tipo de ligante empleado.



**Figura 4. Fibra de vidrio**

**Fuente: catalogo en línea emaze**

En la fabricación de este tipo de fibras se emplean dos tipos de materiales:

- Vidrios eléctricos (E)
- Vidrios de alta resistencia (S)

Los vidrios tipo S poseen una alta relación resistencia/peso y tienen un costo mayor que los vidrios tipo E pero son más económicos que el FRP. El principal modo de empleo de los vidrios es en aplicaciones aeroespaciales, militares y en construcción.

El GRP, es otra excelente forma de reforzar estructuras a un costo mucho más bajo que las platinas de carbono, y tiene una mayor deformación a la rotura que es 0.021; pero su resistencia a la tensión , 15200 kg/cm<sup>2</sup>, y de igual manera menor módulo de elasticidad, 724000 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que es menos frágil que la fibra de carbono.

#### **2.4. Fibras de Carbono Tejidas**

El FRP es un material compuesto no metálico de tipo polimérico, integrado por una matriz de resina epóxica en combinación con fibras de carbono cuya principal componente es el poliacrilonitrilo.

El elemento fibroso contribuye en el aumento de resistencia y rigidez mientras que la resina es flexible y poco resistente, que sirve para transferir los esfuerzos de unas fibras a otras, y entre ellas y la superficie lindante, además de cuidar a las fibras de daños mecánicos y ambientales.

Las características mecánicas del FRP no se afectan ante la humedad, disolventes, agentes atmosféricos, ácidos o bases, etc. permitiendo un contacto directo con el elemento reforzado durante largos períodos de tiempo.

Dentro de los polímeros reforzados con FRP se tiene de dos tipos: las platinas preformadas y los tejidos unidireccionales; ambos sistemas son de tipo pasivo (no pretensado) y son distribuidos en el Ecuador por las empresas SIKA y ADMIX.

Los tejidos de fibras de carbono unidireccionales son saturados en obra con un sistema epóxico y es colocado en capas para conformar el sistema compuesto reforzado con fibras FRP. La ventaja del tejido unidireccional con respecto a las platinas e carbono, es que se coloca envolviendo elementos de forma irregular, lo cual no se puede hacer con las platinas ya que son rígidas y no se doblan.



**Figura 5. Colocación de tejidos F.R.P.**

**Fuente: respaldo fotográfico sika s.a.**

Los tejidos de FRP son materiales en los cuales aún no se ha colocado la matriz de resina epoxica. Tienen entre el 95% de las fibras en dirección longitudinal y entre aproximadamente el 5% en la dirección transversal, para efectuar el cosido e impedir el deshilachado de los longitudinales. Los tejidos son de un espesor entre 0.3 y 1 mm, con un gramaje de 200 a 800 g/m<sup>2</sup> con anchos entre 30 y 60 cm, en rollos de 40 a 100 m de longitud.

En base a la dirección del tejido, el paño de carbono puede ser más fuerte en una dirección específica o igual de fuerte en cualquier dirección, no obstante las fibras brindan su mayor capacidad cuando el sentido del tejido está orientado en la dirección de las tensiones.

Por su forma de tejido en forma de malla, una pequeña pieza puede soportar el impacto de varias toneladas de carga y deformarse mínimamente, ya que las fuerzas se distribuyen y son amortiguadas por las fibras.

Las fibras de carbono tienen una ductilidad muy baja (<1%) mientras que la fibra de vidrio se considera más dúctil, está en el orden del 4% al 6%, pero ninguna

de las dos se compara al acero estructural que tiene un mínimo de ductilidad del 20%. (Michelle, 1995)

Para adherir los tejidos de fibra de carbono a los perfiles metálicos se utiliza resinas epoxicas fluidas; esa fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas, mojarlas y formar el material compuesto.



**Figura 6. Tejido FRP y resina SikaDur 301**

**Fuente: respaldo fotográfico sika s.a.**

## **2.5. Platinas de carbono**

Las platinas de carbono son una mezcla entre fibras de carbono y resina epóxica que tienen en dirección de las fibra una gran resistencia y rigidez muy alta, así como un comportamiento excepcional a la fatiga, mejor que la del acero y su densidad es muy baja. Las fibras están colocadas en dirección longitudinal correspondiendo a la dirección de la sollicitación.

Cada platina tiene un espesor entre 1.2 y 1.4 mm y un ancho entre 50 y 100 mm. Se presenta en rollos de longitud entre 100 y 500 m que luego se corta en obra a las dimensiones deseadas.



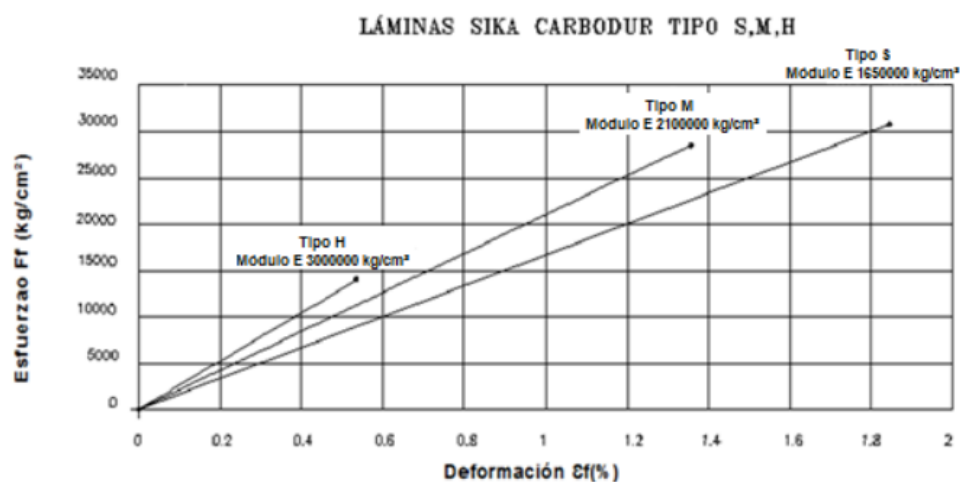
**Figura 7. Platinas FRP y resina SikaDur 330**

**Fuente: respaldo fotográfico sika s.a.**

Los productos de FRP son anisótrpos y prácticamente su composición determina la capacidad resistente del sistema. No presentan rama plástica en el diagrama esfuerzo-deformación, por lo que se consideran materiales perfectamente elásticos hasta la rotura. (ACI 440R – 96,1996).

Existen tres tipos de platinas en el mercado local, que se diferencian por su módulo de elasticidad, estas son: el tipo H con un módulo  $E_f = 3000000 \text{ kg/cm}^2$ ; el tipo M con un  $E_f = 2100000 \text{ kg/cm}^2$ ; y el tipo S con un  $E_f = 1650000 \text{ kg/cm}^2$ . La resistencia a tracción son  $13000 \text{ kg/cm}^2$  para el tipo H;  $24000 \text{ kg/cm}^2$  para el tipo M, y  $28000 \text{ kg/cm}^2$  para el tipo S. Las platinas Tipo S y tipo M se utilizan para el reforzamiento de elementos de hormigón mientras que la platina tipo H se emplea en el reforzamiento de elementos de madera.

En la siguiente figura están presentados los diagramas esfuerzo-deformación de los tres tipos de platinas SIKa CarboDur.



**Figura 8. Curvas Esfuerzo Deformación de platinas de carbono**  
**Fuente: respaldo fotográfico sika s.a.**

## 2.6. Ventajas y desventajas del material compuesto (F.R.P.)

La aplicación de materiales compuestos en la última década se observa con mayor frecuencia en reparaciones estructurales de puentes, edificios y construcciones antiguas, ya que tiempo atrás, su aplicación era prácticamente inexistente. Las ventajas de estos materiales son cada vez más evidentes al empezar a aplicarlos en diversas construcciones sometidas a las acciones de ambientes agresivos, plataformas marinas, depósitos, anclajes al terreno, construcciones no conductivas y no magnéticas, refuerzos de estructuras, armaduras pasivas, armaduras activas, cables, recubrimiento de túneles y pasarelas.

Pero también tienen desventajas frente a los materiales tradicionales por lo que en ocasiones no son una opción viable para realizar un refuerzo y se debe limitar su uso a ciertos casos.



### **2.6.1. Ventajas.**

- Los materiales compuestos tienen densidades que varían entre 1.5 y 2.5 g/cm<sup>3</sup> en contraste con la densidad del acero que es de 7.85 g/cm<sup>3</sup>, la baja densidad hace que los FRP sean materiales livianos y que al momento de utilizarlos como refuerzo no incrementen el peso de la estructura.
- El FRP tiene una respuesta excelente a la fatiga al ser sometido a cargas cíclicas que en materiales metálicos disminuyen la resistencia con mayor rapidez.
- Una ventaja muy importante de la fibra de carbono es que incrementa notablemente la resistencia de la estructura pero muy poco la rigidez.
- Es resistente a condiciones ambientales agresivas, ataques químicos y la corrosión no es un factor que afecte su comportamiento como en los materiales metálicos.
- Se coloca muy rápidamente sin necesitar demasiado espacio para almacenar, por tanto la obra queda mucho más despejada y se puede continuar con las actividades dentro de la estructura aunque con cierta incomodidad.
- Debido al bajo espesor no se nota que un elemento tiene el refuerzo, además se los puede perder con un acabado final como un recubrimiento con mortero o simplemente pintura.
- Por su bajo peso y flexibilidad son de fácil manejo, transporte e instalación; por lo que no necesita de mano de obra especializada.
- Se elimina los empalmes que eran necesarios con las chapas de acero, porque los materiales compuestos no tienen restringida su longitud pudiendo cortar donde se considere más conveniente directamente en la obra.

### **2.6.2. Desventajas**

- Una de las desventajas más importantes del FRP es el alto costo de la materia prima, pero de alguna manera esto se compensa con el bajo costo de equipamiento y mano de obra necesarios en el proceso de preparación, ensamblado y colocación del FRP en los elementos de hormigón a reforzar.
- El reforzamiento con Platinas de Carbono cuesta aproximadamente entre 165 USD y 215 USD el metro lineal, ya puesto en obra (Precio a Enero de 2014).
- El FRP es una excelente opción para el reforzamiento de estructuras, pero no es la respuesta a todos los problemas que se presentan, su uso se encuentra limitado a refuerzos pequeños o dicho de otra forma para “cirugías menores”.
- Por tratarse de un sistema que va adherido externamente al hormigón mediante una formulación epóxica, se requiere un mayor cuidado en la preparación de la superficie de contacto ya que una incorrecta colocación conlleva a serias fallas estructurales por concentración de esfuerzos o por delaminación de las platinas.
- Desde el punto de vista de su instalación, otra desventaja es que las platinas de FRP, bajo ninguna razón y por ningún medio deben ser dobladas, esto limita un poco su instalación en lugares con muchos quiebres y cambios de dirección, pero se puede solucionar utilizando tejidos de fibra de carbono los cuales si son moldeables.
- Uno de los modos de falla que se considera es el desprendimiento del material, cuando existen esfuerzos de flexión y cortante, esto es un problema porque una vez que empieza la delaminación los elementos fallan ante un bajo nivel de solicitaciones y la estructura se vuelve más débil que al inicio.
- La fibra de carbono tiene una deformación a rotura muy baja por lo que no es recomendable que se use en aplicaciones donde se requiere mayor

ductilidad, como por ejemplo un refuerzo sísmico, sin analizar detenidamente el comportamiento frente a tales solicitaciones.

- Otra gran desventaja y una de las mayores debilidades del FRP es su alta susceptibilidad al fuego, ya que a una temperatura superior a los 80°C el material comienza a despegarse del acero. Actualmente este es uno de los temas que atrae la atención de los investigadores que trabajan en mejoras del material y nuevos códigos de diseño y especificaciones de instalación.
- Los materiales compuestos y entre ellos la platina y fibra de carbono, según muchos profesionales de la Ingeniería Civil, no alcanzan una madurez total en su estudio, por lo que no confían en los procedimientos de cálculo los cuales se basan en suposiciones simplificadas, y existen vacíos en la parte experimental por lo que aún se tiene dudas sobre su comportamiento; a esto se suma la dificultad de conseguir códigos y normativas que estandaricen su uso para la construcción en nuestro medio.

## CAPÍTULO III

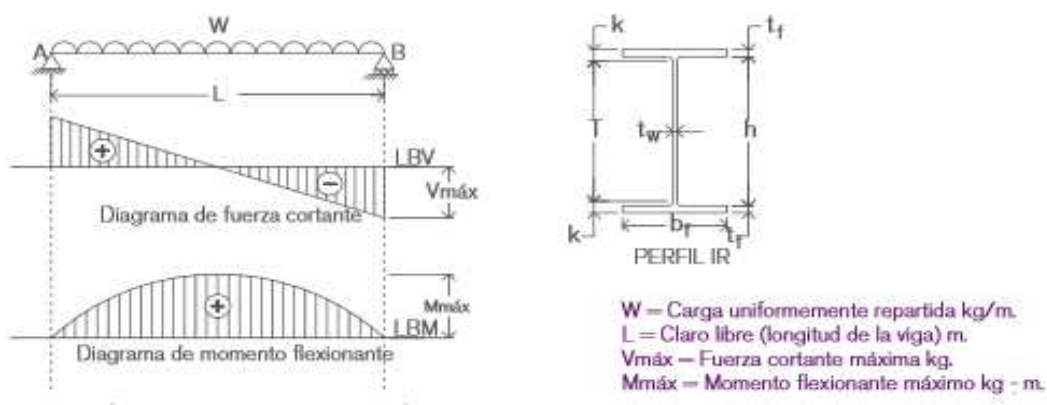
### 3. FLEXIÓN

#### 3.1. Introducción

En esta tesis se presentan los conceptos fundamentales del diseño de miembros en flexión o vigas: Se definen este tipo de elementos estructurales, se ilustran sus principales usos en estructuras de acero; se describe su comportamiento básico, se clasifican las secciones de acuerdo con sus relaciones ancho/espesor y según las Especificaciones AISC-2010; se indican sus modos de falla y los requisitos de diseño conforme a las especificaciones.

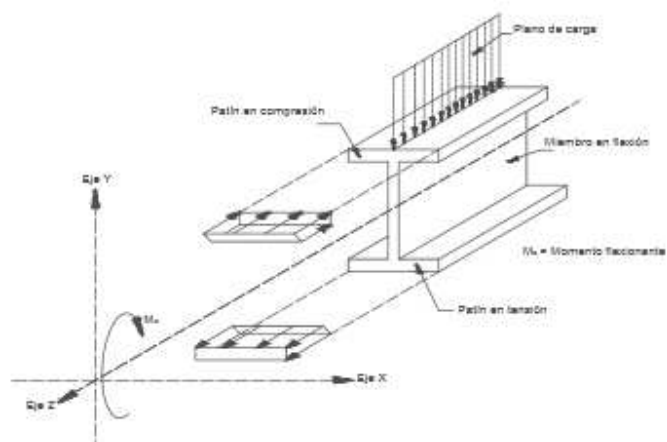
#### 3.2. Definición.

Los elementos sometidos a flexión son miembros estructurales de sección deformable, distribuido habitualmente en posición horizontal y que resisten cargas perpendiculares al eje neutro (en cualquiera de sus dos direcciones) y generan principalmente solicitaciones de cortante y flexión. (Álvarez & Chazaro, 2012;2)



**Figura 9. Solicitaciones de una viga típica con carga uniformemente repartida: flexión y cortante.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**



**Figura 10. Definición de miembros en flexión.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

Las vigas son miembros de suma importancia en las estructuras, debido a que resisten sistemas de losas simples o compuestos (acero-concreto) para crear espacios útiles del edificio, en las que se desenvuelven las actividades propias para las que fue diseñada y ejecutada la obra civil.

### **3.3. Empleo de elementos sometidos a flexión.**

La flexión es una de los efectos internos más comunes en todo tipo de estructuras. Frecuentemente aparece en las vigas de entrepiso, pero también en las vigas y largueros de pared y de los sistemas de cubierta de edificaciones con fines industriales.

Las secciones más recomendadas para soportar el efecto de flexión son las secciones laminadas tipo "I". Para vigas sometidas a flexión generada por fuerzas moderadas se emplean perfiles laminados, mientras que para efectos de momentos de gran magnitud se opta por miembros armados, los cuales constan de tres láminas de acero estructural soldadas.

En el caso de flexión simple cuando las vigas están sometidas a cargas distribuidas uniformemente, estas se aplican en el plano del alma del elemento,





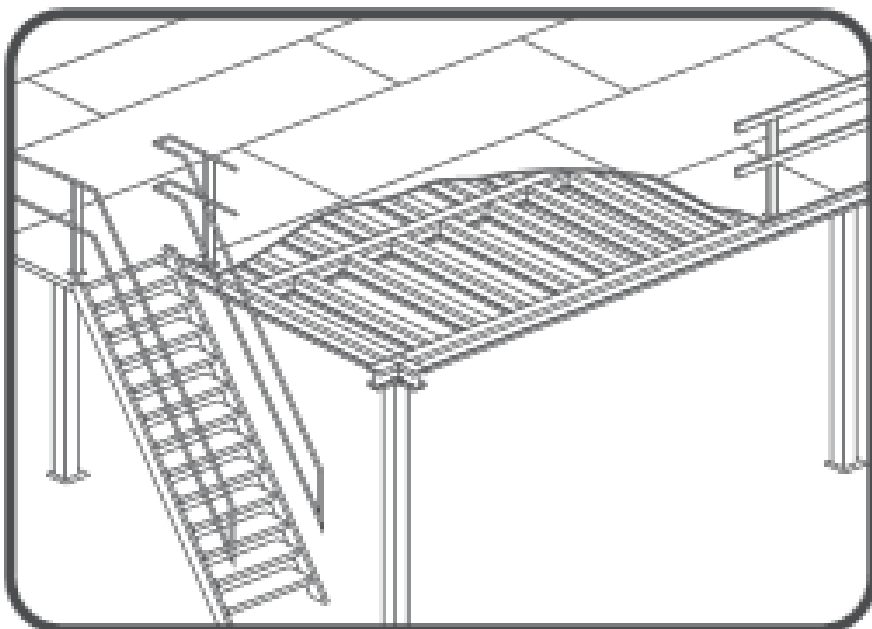
**Figura 11. Vigas de gran claro.**  
**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**



**Figura 12. Vigas laminadas.**  
**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**



**Figura 13. Vigas de un edificio alto para departamentos.  
Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**



**Figura 14. Vigas de un sistema de piso de un mezanine.  
Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

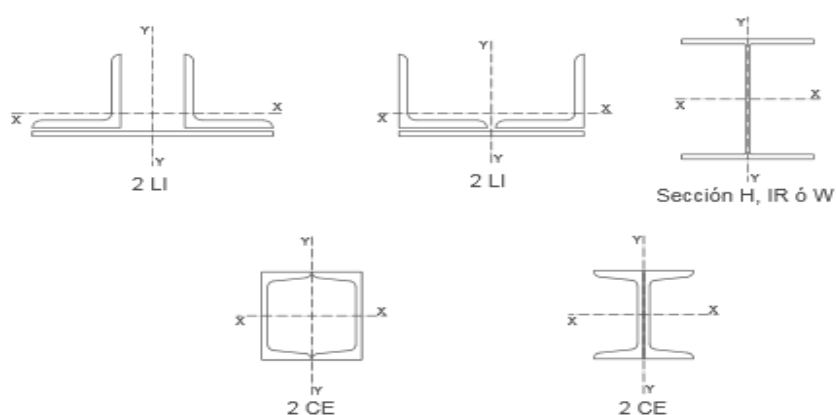


### 3.4. Secciones transversales ventajosas.

Como el eje de flexibilidad de los elementos es siempre el de mayor inercia, se requieren secciones transversales de mayor altura que el de las manejadas para columnas flexo-comprimidas. Las vigas están tienen normalmente solicitaciones de flexión uniaxial y cuando se utilizan perfiles I rectangulares (IR) se aplican cargas en el plano de simetría que afecta eje con menor momento de inercia.

En la Figura 15. se presentan secciones transversales de uso frecuente en vigas, siendo los perfiles IR laminados los más empleados, ya que soportan mayores momentos flexionante.

Los perfiles armadas cuya sección transversal no es I se emplean en vigas que resisten cargas de gran magnitud que generan momentos extremadamente elevados y que pueden generar pandeo lateral por flexo-torsión. Las armaduras se emplean habitualmente cuando la estructura necesita canalizar a través de alma las instalaciones eléctricas, hidrosanitarias o de acondicionamiento de aire, o para solicitaciones ligeras y temperaturas extremas (calor), como las cubiertas de naves industriales. (Álvarez & Chazaro, 2012;4)



**Figura 15. Secciones transversales típicas de miembros en flexión.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

### **3.5. Diseño de vigas empleando la teoría elástica simple.**

Hace más de un siglo se ha empleado alrededor de todo el mundo el método elástico simple para el diseño estructural de obras civiles elaboradas en acero. Con el fin de visualizar las diferencias entre los métodos de diseño elástico y plástico, se considera un modelo matemático que se basa en el empotramiento perfecto de una viga, la cual será sometida a una carga distribuida uniformemente. El fundamento básico del diseño elástico es la distribución lineal de esfuerzos y deformaciones.

Los esfuerzos máximos de flexión en las fibras extremas de la viga, ocasionados al soportar la carga actuante, no deben exceder los esfuerzos admisibles estipulados en las Especificaciones del AISC-2010.

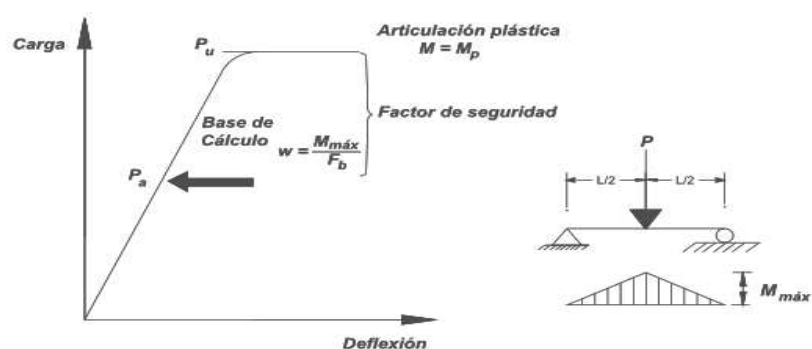
Así, nos aseguramos que la viga tenga una reserva de capacidad para soportar los efectos de flexión y su comportamiento siempre sea elástico lineal, los momentos máximos negativos (flexionantes) aparecen en los empotramientos y en el centro de la sección de la viga se presenta el máximo momento por flexión (momento positivo), cuyo valor es equivalente al 50% de los momentos generados en los apoyos (momento negativo).

Lo antes expuesto indica que la viga aún puede soportar carga; sin embargo, el diseño elástico no previene la formación de rotulas plásticas en los apoyos y en el centro de la luz, ya que estos efectos son contemplados en el diseño plástico. (Álvarez & Chazaro, 2012;5)

### **3.6. Diseño de vigas empleando la teoría plástica simple.**

El fundamento para calcular la resistencia máxima plástica de una viga es la capacidad de carga del acero en el intervalo plástico. El acero estructural tiene la propiedad de deformarse plásticamente después de alcanzar el punto de fluencia.

Entonces, cuando determinados elementos de una estructura llegan al esfuerzo de fluencia, estos permanecen al mismo nivel de esfuerzo bajo deformación creciente, mientras que otras secciones sometidas a menores sollicitaciones se deforman elásticamente, hasta llegar de igual manera a la plastificación o fluencia.



**Figura 16. Gráfica carga-deflexión de una viga libremente apoyada sujeta a una carga concentrada en la sección media.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

Finalmente, el análisis se facilita notablemente cuando todas las secciones transversales críticas de la viga alcanzan límite de fluencia, debido a que solamente se necesita considerar la plastificación. (Álvarez & Chazaro, 2012;6)



**Figura 17. Mecanismo de colapso de un tramo interior de una viga continua.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

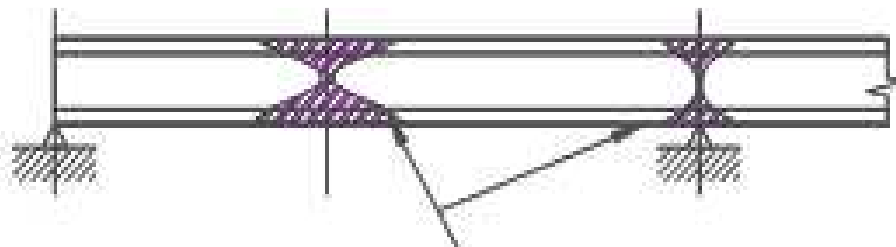
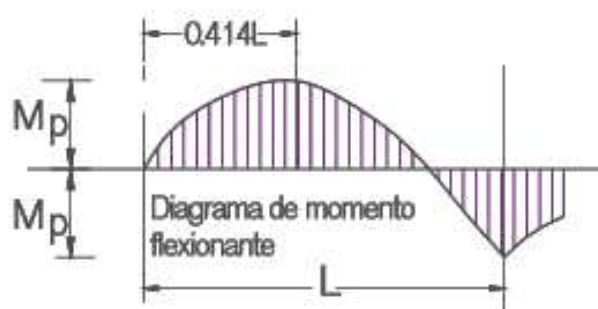


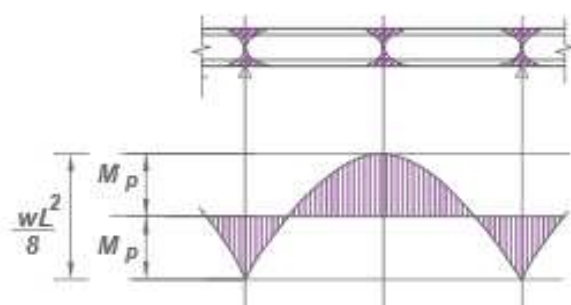
Figura 18. Secciones críticas donde se forman las articulaciones plásticas.

Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012



Redistribución de momentos flexionantes

Diagrama de momentos correspondiente a la condición de colapso en el tramo extremo de una viga continua



Secciones críticas donde se forman las articulaciones plásticas

Figura 19. Redistribución de momentos flexionantes en una viga continua

Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012

### **3.7. Comportamientos básicos de miembros en flexión.**

En el siglo XV Leonardo da Vinci efectuó las primeras investigaciones sobre el comportamiento de vigas o elementos sometidos a flexión. A inicios del siglo XVII, Galileo analizó una viga en voladizo con el propósito de determinar los esfuerzos producidos por cargas verticales aplicadas en el elemento. Pero no fue hasta el siglo XIX que aparecieron las ecuaciones para flexión simple, las cuales fueron formuladas por Navier. A pesar de realizar a lo largo del tiempo numerosas investigaciones las que llevaron a la formulación de muchas teorías más complicadas sobre el pandeo lateral y pandeo lateral por flexo-torsión, su teoría la hipótesis de Navier está aún vigente para el diseño de vigas y miembros sometidos a flexión.

Por otra parte, el estudio de la torsión en barras tuvo sus inicios en el siglo XVIII por Thomas Young y Charles Augustin de Coulomb. El primer análisis riguroso de esta torsión, implicando el alabeo y la flexión, lo propuso por Saint-Venant en el año 1853. En 1903 Ludwig Prandtl implementó la analogía de la membrana, por último en 1905, Stephen Timoshenko exhibió los resultados de sus investigaciones sobre el fenómeno de torsión no uniforme en las vigas de sección "I", tomando en consideración la resistencia al desplazamiento lateral de los patines. Se planteó el debate sobre la torsión de secciones abiertas de paredes delgadas, y el resultado de la deformación del alma en la torsión de las vigas de sección transversal "I".

La capacidad de resistir el pandeo lateral de elementos sometidos a flexión está estrechamente relacionado con la resistencia a la torsión. Ludwig Prandtl y G. Mitchell en 1899 publicaron a la vez un estudio teórico sobre la estabilidad lateral, seguido de Stephen Timoshenko, H. Wagner, entre otros. (Álvarez & Chazaro, 2012;7)

### 3.8. Clasificación de las secciones.

Existen cuatro tipos de secciones estructurales en función de la relación ancho/grueso máxima de los elementos planos sometidos a compresión axial, compresión producida por flexión, flexión o flexo-compresión.

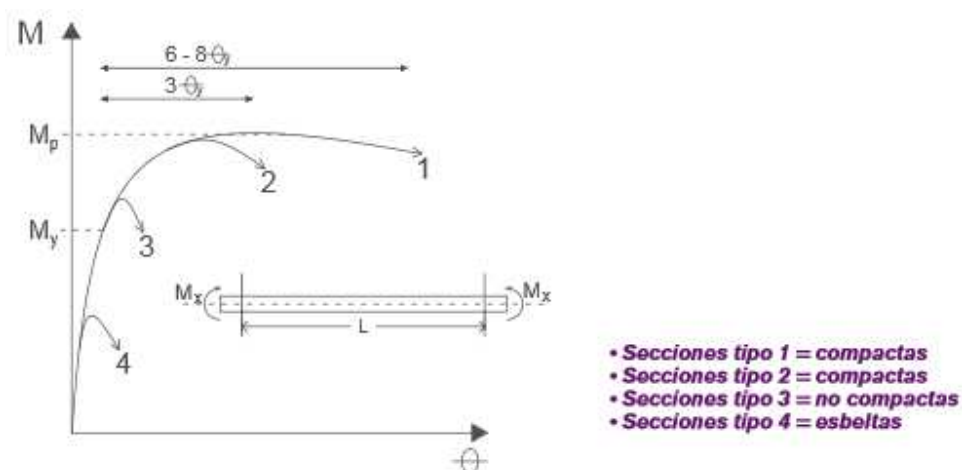


Figura 20. Clasificación de las secciones de acero.

Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012

**Las secciones para diseño plástico y para diseño sísmico (tipo 1)** pueden soportar el momento plástico en vigas, y en barras flexo-comprimidas pueden alcanzar el momento plástico mínimo por compresión, y soportarlo cuando se producen rotaciones inelásticas que se necesitan para la redistribución de momentos, y para alcanzar la ductilidad adoptada en la etapa de diseño de la estructura construidas bajo sollicitaciones sísmicas.

**Las secciones compactas y para diseño sísmico (tipo 2)** pueden soportar el momento plástico tal como las secciones tipo 1, pero tienen la propiedad de rotación inelástica restringida, pero pueden ser utilizadas en estructuras diseñadas por el método plásticamente, bajo cargas eminentemente estáticas, y en zonas sísmicas, con coeficientes sísmico reducidos.

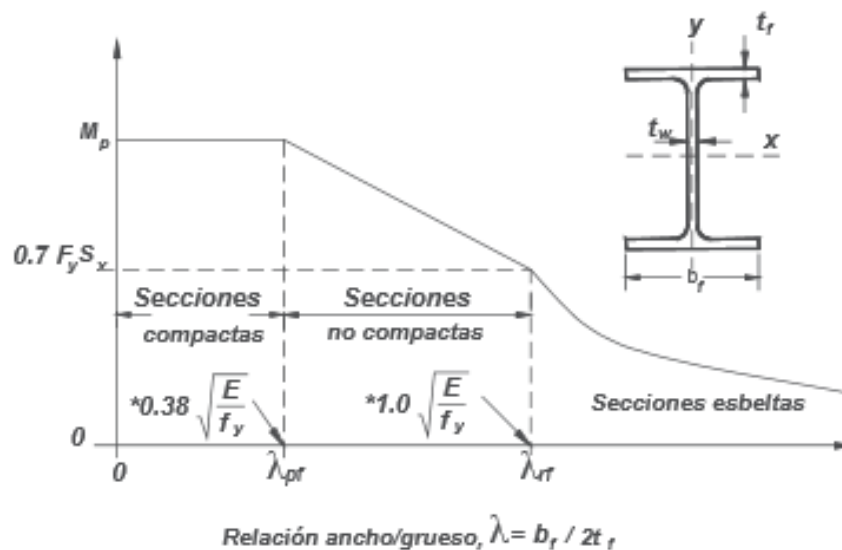
**Las secciones no compactas (tipo 3)** pueden alcanzar el momento máximo elástico (inicio del flujo plástico) en vigas, pero tienen restringida la rotación inelástica. Estas secciones llegan al colapso debido a que uno de sus elementos sufre pandeo inelástico. Pueden ser empleadas cuando el método de diseño es el elástico y las cargas son fundamentalmente estáticas.

**Las secciones esbeltas (tipo 4)** llegan a su resistencia última cuando uno de sus elementos presenta pandeo local elástico. Estas secciones no pueden soportar el momento plástico y tienen total restricción en la capacidad de rotar inelástica después del pandeo.

La relación ancho/espesor de las secciones tipo 1 y 2 no deben sobrepasar los límites definidos por  $\lambda_p$  y  $\lambda_r$ , respectivamente, lo que certifica que las secciones de los dos primeros tipos podrán alcanzar la resistencia última sin que muestren deformaciones precoces por pandeo local.

Cuando por lo menos un elemento excede los límites correspondientes a los dos primeros tipos, el elemento es tipo 3.

De igual manera para que la sección sea tipo 4 al menos uno de los elementos debe exceder los límites del tipo 3. (Álvarez & Chazaro, 2012;8)



**Figura 21. Curva de momento plástico versus relación ancho/groeso de patines.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

Como se puede evidenciar en la figura 3.13 algunos de los elementos planos de la sección no son compactos o esbeltos.

$$\lambda_{pf} \leq \frac{b_f}{2 * t_f} \leq \lambda_{rf}$$

Para este caso, los coeficientes de reducción de resistencia y coeficientes de seguridad son:

$$\phi = 0.90$$

$$\Omega = 1.67$$

Como se puede observar estos coeficientes se mantienen, pero debe tener presente, además de los estados de plastificación y pandeo lateral por flexo-



torsión ya indicados, el estado límite de pandeo local de los miembros que forman la sección.

Las secciones que se enmarcan dentro de los dos primeros tipos, son aquellas que sus elementos planos satisfacen la relación ancho/espesor propias de ese tipo. (Álvarez & Chazaro, 2012;9)

**Tabla 4**

**Valores máximos admisibles de las relaciones ancho/espesor para perfiles IR**

SECCIÓN	VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES $b_f/2t_f$	ASTM A36 2,530	$f_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	ASTM A992 3,515
Compacta	$0.38 \sqrt{\frac{E}{f_s}}$	10.8		9.2
No compacta	$1.0 \sqrt{\frac{E}{f_s}}$	28.4		24.0
Esbelta	$1.0 \sqrt{\frac{E}{f_s}}$	>28.4		> 24.0

Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012

La figura 21 muestra el efecto de esbeltez en los elementos de la sección para el caso específico de los patines de perfiles I rectangulares o W, en concordancia con la Tabla 4. Se evidencia la existencia de tres rangos, el primero cuando el momento crítico por pandeo local sobre pasa el momento de plastificación, el pandeo local elástico se presenta cuando los niveles de esfuerzos en la sección están por debajo del esfuerzo de fluencia y el ultimo

rango en que el pandeo local se evidencia es cuando se plastifica parcialmente la sección.

Para el rango intermedio definido por la relación ancho/grueso, la norma AISC define un comportamiento lineal al pasar del momento plástico al momento de primera fluencia.

Al no ser compacta el alma del perfil I , se debe modificar las ecuaciones para el cálculo del momento crítico de pandeo lateral debido al efecto de flexo-torsión elástico e inelástico para analizar el pandeo inelástico del alma. Octavio

### **3.9. Modos de falla de miembros a flexión.**

Los principales modos de falla de elementos sometidos a flexión son cuatro.

- Plastificación o fluencia.
- Pandeo local de los patines o del alma.
- Pandeo lateral.
- Pandeo lateral por flexo-torsión.

El modo en que colapse o falle un elemento sometido a flexión dependerá de su clasificación. Seguidamente se detallan estos modos de falla.

#### **3.9.1 Fluencia o plastificación.**

Este modo de falla define para la sección transversal sometida a flexión un estado de limite. Los aceros dúctiles se caracterizan por comportarse plásticamente al llegar a la fluencia, esto antes de llegar al rango de endurecimiento inducido por las deformaciones.

Los principales fenómenos que se presentan en elementos estructurales y evitan este comportamiento son la inestabilidad, fatiga o fractura frágil.

### **3.9.2. Pandeo local de los patines o del alma.**

El fenómeno de inestabilidad produce este modo de falla, este efecto se produce en el estado elástico o inelástico que aqueja los elementos que integran la sección transversal del elemento estructural ya sea viga o columna sometidos a compresión en sus planos. Produce deformaciones significativas que toman forma de arrugas.

A medida que el elemento presenta deformaciones que sobre pasan el rango elástico, podría presentarse casualmente pandeo local del alma o de los patines.

Este modo de falla aqueja tanto a columnas como a vigas. Dependiendo de la relación de esbeltez de los miembros que forman la sección transversal, es posible que los elementos que están sometidos a compresión por causa de la flexión colapsen por inestabilidad local, provocando que todo el miembro llegue a la falla.

Debido a la falta de capacidad del elemento para conservar la forma de su sección transversal, la resistencia a flexión se aminora; la sección no será capaz de soportar momentos plásticos debido al pandeo local de del alma y de los patines, lo cual no permitirá que se generen articulaciones plásticas en alguna otra sección.

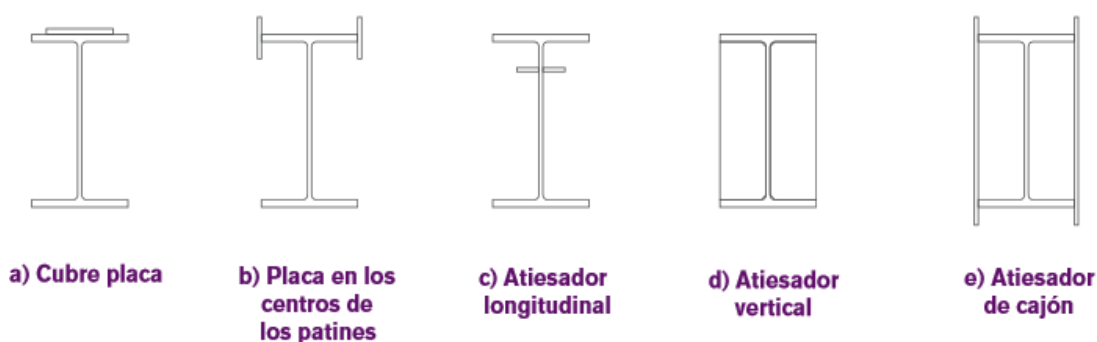
Por tanto, para lograr la rotación adecuada bajo momento plástico (capacidad de deformación), para evitar el un prematuro pandeo local los elementos sometidos a compresión deben tener una relación ancho/grueso suficiente.

De la misma forma, para prevenir que el alma sufra pandeo local, las normas de diseño determina para el alma relaciones peralte/grueso que deben emplearse para elementos empleados como vigas.

Hay que recalcar que en su mayoría los perfiles estructurales laminados que se comercializan cumple los requerimiento para secciones compactas.

Las perfiles armados que no cumplan con estas relaciones ancho grueso de patines pueden rigidizarse en la sección donde se presenten las rotulas plásticas.

En la figura 22 se muestran algunas opciones para lograr lo rigidez mencionada en el párrafo anterior. (Álvarez & Chazaro, 2012;10)



**Figura 22. Formas de rigidizar perfiles tipo IR para evitar inestabilidad local.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

### 3.9.3. Pandeo lateral

El efecto del pandeo lateral es muy parecido al efecto producido por el pandeo local. En muchos ensayos de laboratorio de perfiles IR se presentan al mismo tiempo.

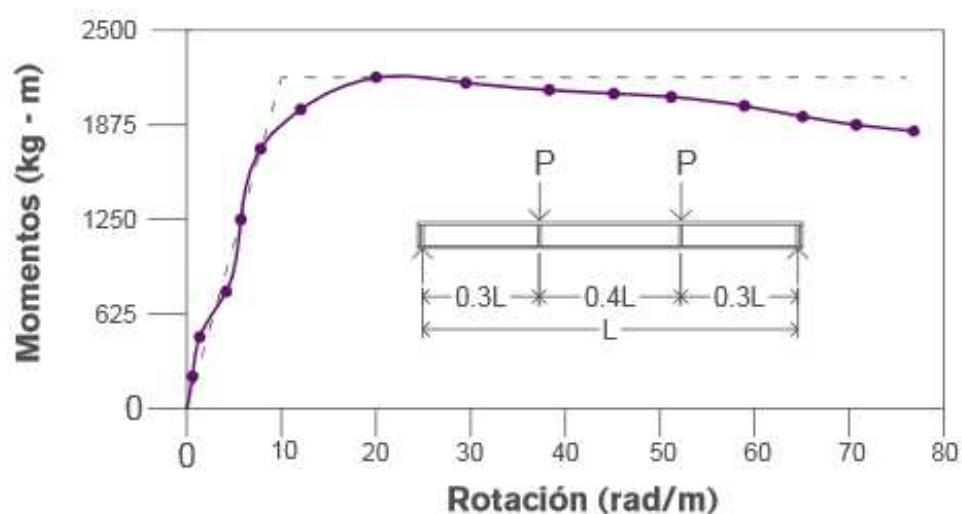
También se puede tener en consideración que el pandeo lateral está restringido cuando el sistema de piso formado por acero-concreto, esta constituido por placas de acero acanaladas ancladas al patín de la viga sometido a compresión, lo mismo ocurre en sistemas de cubiertas.

El pandeo lateral no se presenta, en vigas que tengan forma circular o cuadrada, independiente de la luz libre, o cuando eje de menor momento de

inercia está sometido a flexión; en estos casos las vigas son estables analizadas en función del pandeo.

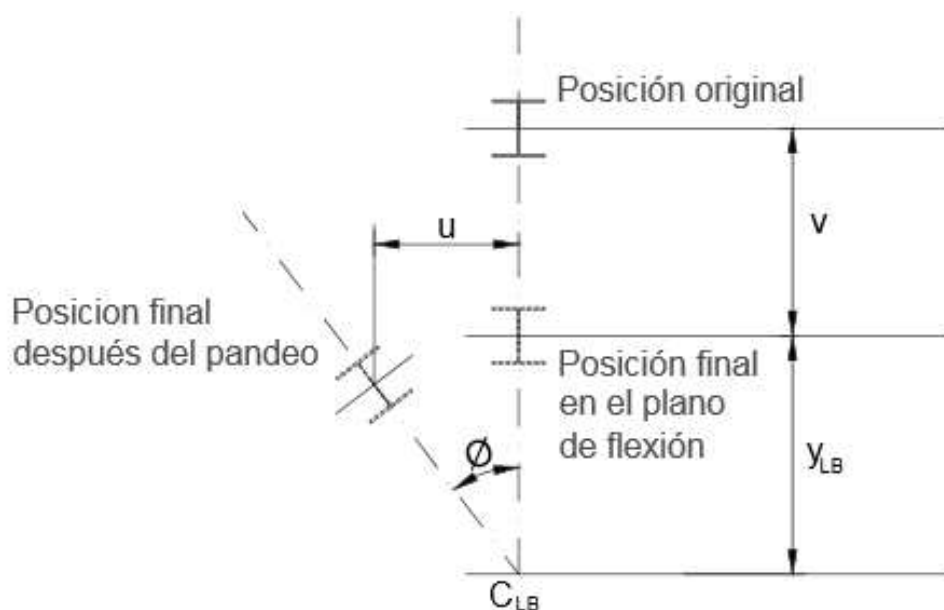
El problema radica en establecer la resistencia al pandeo lateral de una sección sometida a flexión en torno al eje de mayor resistencia, y adicional se debe calcular el giro requerida en la rótula plástica generada para que toda la estructura soporte la carga última.

La figura 23. ilustra la relación momento curvatura no deseada; el momento presenta un comportamiento constante durante giros grandes. Esta grafica se determinó después de ensayar un perfil IR, apoyado a los extremos, con cargas concentradas aplicadas simétricamente en relación a los apoyos y con una longitud lo suficientemente grande para que se presente prematuramente el efecto de pandeo lateral. (Álvarez & Chazaro, 2012;11)



**Figura 23. Curva Momento-Rotación que ilustra el efecto del pandeo lateral.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**



**Figura 24. Pandeo lateral de vigas.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

#### **3.9.4. Pandeo lateral por flexo-torsión.**

El cuarto modo de falla por flexión a ser analizado es el pandeo lateral producido por flexo-torsión. Este modo de pandeo de un elemento sometido a flexión que envuelve deflexión lateral y torsión.

La explosión de esta falla, se obtiene de analizar una viga simplemente apoyada con longitud  $L$  sometida a un momento flector uniforme  $M$ , adicional los patines tienen la restricción de desplazarse lateralmente únicamente en los apoyos.

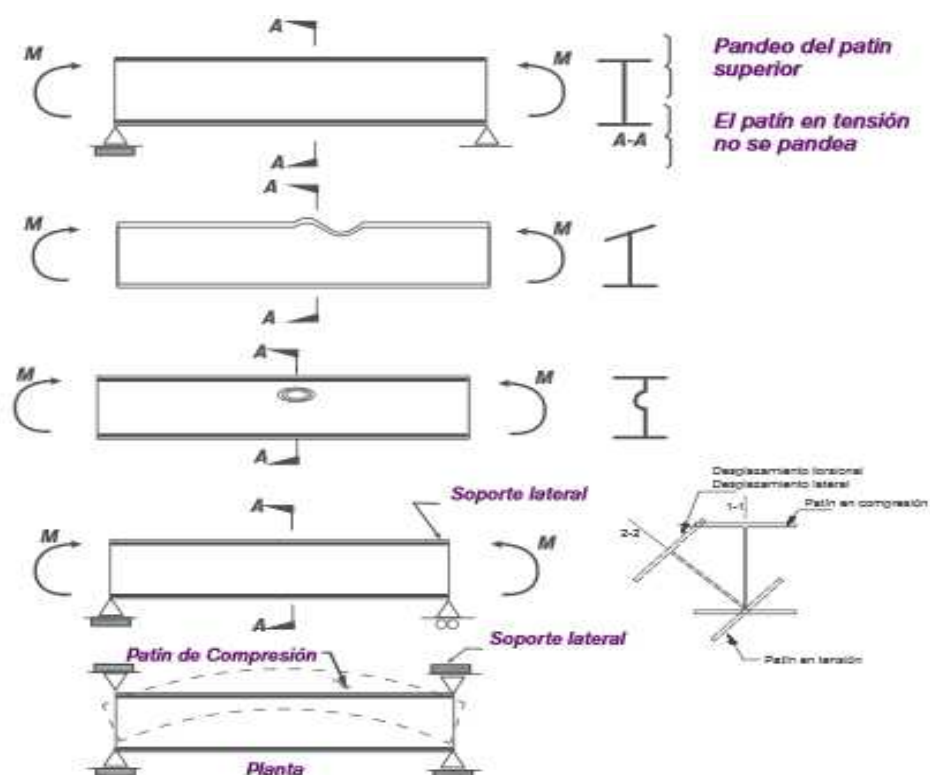
Bajo las condiciones mencionadas, se puede concluir que la sección comprimida se encuentra en compresión. A medida que se incrementa el momento flector, el miembro sufre un incremento de compresión, hasta llegar a la carga que produce pandeo. Si tomamos en cuenta que la luz de pandeo es igual para los ejes 1-1 y 2-2 (fig. 24), el patín en compresión deberá pandear sobre el eje 1-1, debido a que tiene el menor momento de inercia. Se debe tener

en cuenta que la parte en tracción de la sección limita el movimiento y, por lo cual, el patín en compresión pandea sobre el eje 2-2. Esto es provocado de igual manera por el efecto de la parte sometida a tracción, el patín sometido a tracción no solo pandea, sino que además, la sección rota y se desplaza. Este conjunto de efectos es a lo que llamamos pandeo lateral por flexo-torsión. (Álvarez & Chazaro, 2012;12)

Al emplear perfiles armados de gran peralte en vigas, lo más probable es que la falla se suscite por inestabilidad antes de que el elemento emplee su capacidad de resistir la flexión. La inestabilidad acoge la forma de pandeo lateral más torsión. Esta falla puede presentarse en vigas o trabes que no poseen de un soporte lateral acorde a las necesidades, cuando la rigidez lateral es demasiado pequeña con relación a su rigidez a flexión.

En definitiva, en elementos sometidos a compresión como vigas que cuentan con una luz grande y poco espesor, el esfuerzo que corresponde que genera la falla, es mucho menor que el que se necesita para fatigar la resistencia del material. Esto quiere decir que en este caso, la falla se ha genera por inestabilidad del elemento.

Es posible concluir que la resistencia al pandeo lateral por flexo-torsión de un miembro sometido a compresión depende de la clase y espaciamiento de los soportes laterales del patín sometido a compresión de la sección. (Álvarez & Chazaro, 2012;13)



**Figura 25. Modos de pandeo en vigas sometidas a flexión pura bajo la acción de pares iguales en magnitud y de sentidos contrarios, aplicados en sus extremos.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

La Figura 26 ilustra las deformaciones por inestabilidad enumeradas anteriormente. Aunque pueda asumirse que las secciones de tipo 1 y 2 mantengan su sección transversal inicial y aplacen alguna tipo de pandeo aun siendo sometidas a grandes deformaciones plásticas, en el caso de secciones esbeltas antes de alcanzar el momento plástico podrían presentarse no solamente pandeo local de alma y patines, sino también pandeo por flexo-torsión o pandeo lateral. (Álvarez & Chazaro, 2012;13)



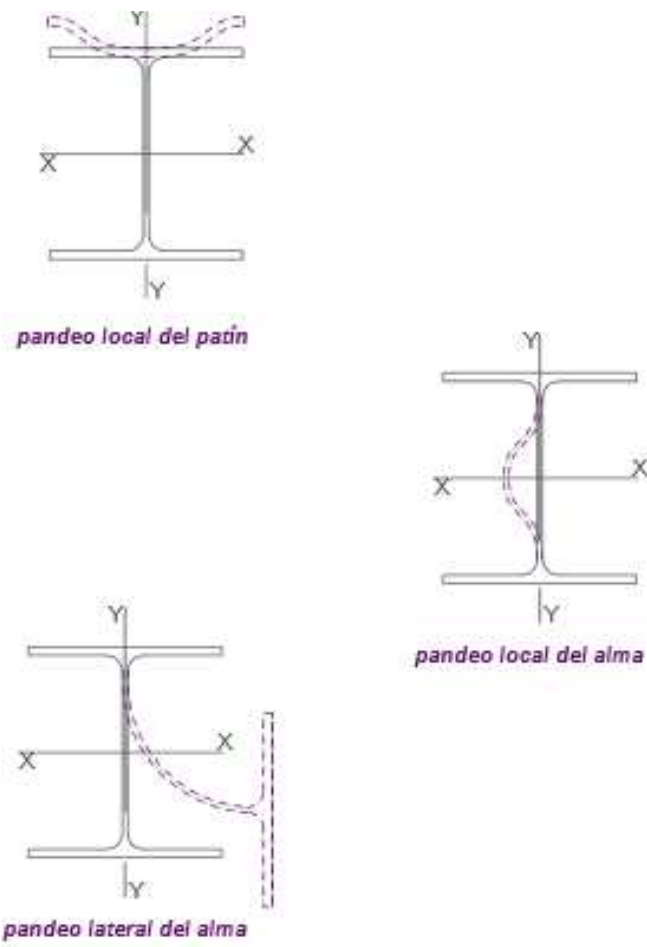


Figura 26. Diversas formas de pandeo de miembros en flexión.

Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012

## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO ESTRUCTURAL DE MIEMBROS EN FLEXIÓN DE ACUERDO CON LAS ESPECIFICACIONES AISC-2010

Al diseñar miembros sometidos a flexión según el código AISC-2010 comprende el análisis varios estados límite tales como:

- Fluencia
- Pandeo local de los patines
- Pandeo local del alma
- Pandeo lateral por flexo-torsión

El estado límite de plastificación o límite de fluencia ( $f_y$ ) predomina en el diseño de vigas compactas, las cuales tienen los patines en compresión soportados lateralmente para no permitir el pandeo lateral por flexo-torsión. El momento de plastificación corresponde a la resistencia nominal del elemento, la cual se calcula con la siguiente expresión:

$$M_n = M_p = F_y * Z_x$$

$$\phi_b = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

$$\Omega_b = 1.67 \text{ (ASD)}$$

En las especificaciones anteriores al código AISC publicado en 2010, para el diseño basado en cargas admisibles (Allowable Stress Design, ASD), el factor de forma de los módulos plástico y elástico de la sección,  $Z_x/S_x$  se empleaba de una manera conservadora, este valor era igual a 1.1, lo cual que era optimo para secciones compactas con esfuerzo admisible para flexión  $F_b$  igual a  $0.66F_y$ .

Esto demuestra que el código AISC-ASD 2010 coincide con los anteriores en relación con la revisión del estado límite de fluencia o estado de plastificación.

El nuevo código AISC-2010 permite al calculista estructural aprovechar al máximo la relación de módulos que da como resultado resistencias hasta del 20% mayores.

Para caso del método de diseño LRFD, los códigos para el diseño de 1999 y 2010 para establecer el estado límite de fluencia son exactamente iguales.

#### **4.1. Estado límite de pandeo lateral por flexo-torsión.**

Presente en miembros en los cuales la longitud del patín en compresión que no está soportada lateralmente logra valores muy altos. La fórmula que facilita la determinación de la capacidad nominal de un elemento flexionado con soportes laterales enmarcado dentro de las longitudes  $L_p$  y  $L_r$  es una recta.

Para elementos con soportes laterales con longitudes que superen el límite determinado por  $L_r$  se emplea la fórmula para pandeo elástico.

La norma AISC-2010 define la resistencia de un elemento no soportado lateralmente basado en tres fórmulas, las cuales poseen sus propios límites de uso. La norma AISC-ASD 1989 mencionaba cinco formulas, las que debían en primeramente ser analizadas para luego seleccionar el mayor valor obtenido.

En las normas anteriores, las vigas armadas elaboradas con tres placas soldadas se tenían capítulos especiales para su análisis.

En la norma AISC 2010 las especificaciones de elementos flexionados están descritas en una sola sección (capítulo F), solo con excepción, existe una sección destinada únicamente a determinar la relaciones ancho-grueso de los miembros que forman la sección transversal del elemento. (Álvarez & Chazaro, 2012;17)

#### **4.2. Extracto de las ecuaciones de las Especificaciones AISC-2010 para el diseño de vigas o miembros en flexión (Capítulo F: Diseño de miembros en flexión vigas)**

Este estudio puede ser aplicado a vigas laminadas, vigas armadas de sección transversal "I" o de tipo cajón, con dos ejes de simetría, sometidas a cargas en uno de sus planos de simetría, y adicionalmente a canales.

También puede ser aplicado en barras de sección llena, tubular, rectangular o cuadrada, estas últimas de estar sometidas a flexión sobre el eje de menor momento de inercia, y a barras circulares huecas.

Requerimientos de resistencia:

$$M_u \leq \phi_b * M_n \text{ (LRFD)}$$

$$M_u \leq \frac{M_n}{\Omega_b} \text{ (ASD)}$$

Coefficientes de minoración de resistencia a flexión y factores de seguridad para elementos flexionados.

$$\phi_b = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

$$\Omega_b = 1.67 \text{ (ASD)}$$

La capacidad de diseño a flexión obedece a las luces  $L_b$ ,  $L_p$  y  $L_r$ , de la sección transversal del elemento y del sentido de aplicación de la carga. (Álvarez & Chazaro, 2012;19)

### 4.3. Resistencia nominal, $M_n$ .

La resistencia nominal ( $M_n$ ) es el menor valor de los siguientes estados límite:

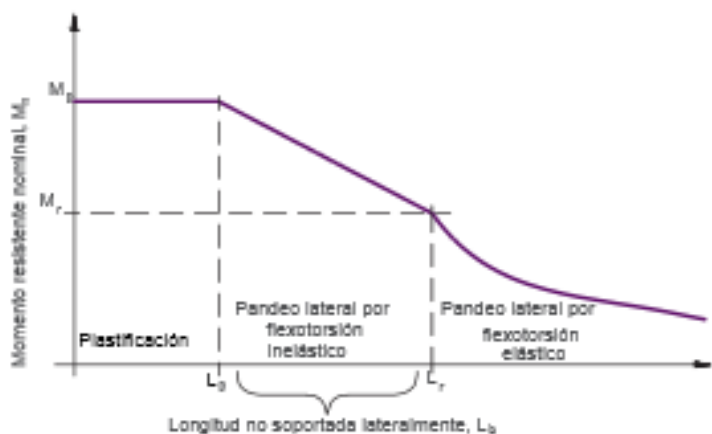
- Plastificación o fluencia
- Basado en el pandeo local de los patines
- Basado en el pandeo lateral por flexo-torsión

### 1) $L_p \geq L_b$

Inicialmente se tiene en consideración la resistencia nominal del elemento compacto. El coeficiente de minoración de resistencia  $\phi_b$  es 0.90 y el coeficiente de seguridad  $\Omega_b$  es 1.67. Los modos de falla o estados límite que se considerara son plastificación o fluencia de la sección. Para perfiles tipo "I" y canales, el momento plástico de la sección es la capacidad de plastificación, determinado como el límite de fluencia ( $F_y$ ) que multiplica al módulo plástico de la sección  $Z_x$  respecto al eje al que es aplicada la flexión.

$$M_n = F_y * Z_x$$

Cuando la flexión se presenta alrededor del eje de menor momento de inercia, el estado límite por pandeo lateral por flexo-torsión no se puede aplicar. Por tanto, el único estado límite posible es la fluencia o plastificación.



**Figura 27. Curva de momento resistente nominal - longitud no soportada lateralmente.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

La norma AISC-2010 determina tres áreas para el cálculo de la resistencia nominal a flexión, cuando no existen consideraciones para pandeo local. El área

uno pertenece a secciones de vigas que poseen longitudes entre soportes laterales menores o iguales al límite  $L_p$  la cual posee una resistencia dada completa plastificación de la sección. El área dos equivale a miembros flexionados que poseen soportes laterales separados con distancias iguales o mayores al límite  $L_r$ , con una capacidad dada por el pandeo lateral por flexo-torsión elástico. La última área pertenece a distancia entre soportes laterales intermedios, en los que predomina el pandeo lateral por flexo-torsión inelástico para la determinación de la resistencia nominal. (Álvarez & Chazaro, 2012;20)

Para distancias  $L_b$  que están entre  $L_p$  y  $L_r$  la resistencia se da mediante una transición lineal entre los momentos  $M_p$  y  $M_r$  considerando esfuerzos residuales para el momento de primera fluencia. El nuevo código presenta un cambio en el cálculo del momento  $M_r$  el cual es igual a  $0.7 M_y$  (70% del momento de fluencia) es decir, adopta una magnitud máxima de esfuerzos residuales equivalente al 30% del esfuerzo de fluencia. Octavio Alvarez Valadez y Carlos Cházaro Rosario, 2012 pag.21

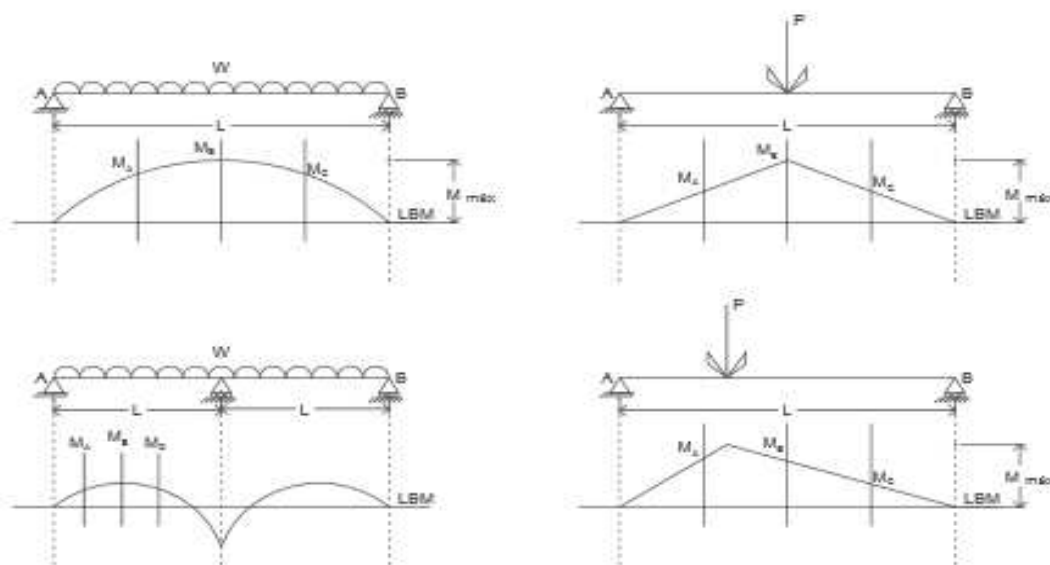
## 2) $L_r \geq L_b > L_p$

Para perfiles tipo I con patines no compactos, la transición lineal entre los momentos  $M_p$  y  $M_r$  rige la determinación de la resistencia nominal a flexión. Si el eje de simetría coincide con el eje en el que están aplicadas las cargas, se debe cambiar los momentos de fluencia y momentos plásticos mediante el factor  $R_{pc}$  que comprende el efecto del pandeo inelástico del alma generado por pandeo del patín.

$$M_n = C_b \left[ M_p - \left( M_p - 0.7 * f_y * S_{xx} * \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right) \right] \leq M_p$$

El coeficiente de cambio por pandeo lateral torsional o factor de flexión,  $C_b$  se determina de la siguiente manera.

$$C_b = \frac{12.5 * M_{m\acute{a}x}}{2.5 * M_{m\acute{a}x} + 3 * M_A + 4 * M_B + 3 * M_C} * R_m \leq 3.00$$



**Figura 28. Diagramas de momento flexionante para el cálculo del factor de modificación para el pandeo lateral - torsional.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**






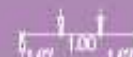






Momento máximo, valor numérico sin tener en cuenta el signo del momento de flexión mayor en la el elemento, en T-m. Los momentos  $M_C$ ,  $M_B$  y  $M_A$ , son los valores numéricos sin tener en cuenta el signo de los momentos flexionantes en el tramo  $L/2-B$ , en el centro y el del tramo  $A-L/2$  elemento expresado en T-m.

$R_m$ , es un valor adimensional que es dependiente de la forma de la sección transversal  $R_m$  es igual a 1.0 para miembros con dos ejes de simetría y para miembros con un eje de simetría que se flexionan en curvatura doble.

El objetivo del factor  $C_b$  es incluir de una manera muy aproximada la influencia de la ley de variación del momento flexionante en las formulas del capítulo F del código AISC-2010, sobre la capacidad resistente al pandeo lateral por flexo-torsión de la viga. (Álvarez & Chazaro, 2012;21)

Tabla 5

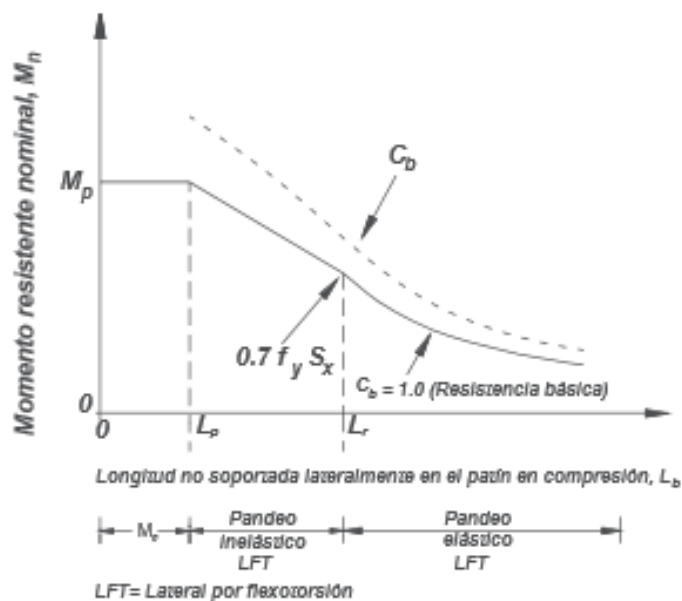
Valores del coeficiente de flexión  $C_b$  para vigas libremente apoyadas con varias condiciones de cargas

CARGA	SOPORTE LATERAL A LO LARGO DEL CLARO DE LA VIGA	COEFICIENTE $C_b$
	Neguno	
	En los puntos de aplicación de las cargas concentradas	
	Neguno	
	En los puntos de aplicación de las cargas concentradas	
	Neguno	
	En los puntos de aplicación de las cargas concentradas	
	Neguno	
	En la sección media (centro del claro)	

Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012

3)  $L_b > L_r$





### Pandeo por flexo-torsión

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p$$

**Figura 29. Curva de momento resistente nominal versus longitud no soportada lateralmente.**

**Fuente: Álvarez & Chazaro, 2012**

Debemos tomar en consideración que el diagrama de momentos del elemento no sea uniforme, el código AISC emplea un factor de flexión  $C_b$ , que está sujeto a valores obtenidos del diagrama de momentos. Este factor incrementa la resistencia nominal a flexión determinada para comportamientos uniformes de la gráfica de momento.

$$F_{cr} = \frac{C_b * \pi^2 * E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} * \sqrt{1 + 0.078 * \frac{J_c}{S_x * h_o} * \left(\frac{L_b}{r_T}\right)^2}$$

Los límites  $L_p$  y  $L_r$  se determinan con las siguientes formulas:

$$L_p = 1.76 * r_{yy} * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Siempre que la sección tenga miembros no compactos, la fórmula del momento crítico varia, por lo que las fórmulas de cálculo de  $L_p$  y  $L_r$  también cambian. Para esto, el radio de giro de la superficie formada por el patín a compresión más la tercera parte del alma sometida a compresión es  $r_t$  y  $a_w$  es el factor de la superficie de alma a compresión entre la superficie de los elementos del patín a compresión.

$$L_r = 1.95 * r_{ts} * \frac{E}{0.7 * F_y} * \sqrt{\frac{J_c}{S_x * h_o} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x * h_o}\right)^2 + 6.76 * \left(\frac{0.7 * F_y}{E}\right)^2}}$$

Para perfiles I el valor de  $c$  es igual a cero pero para canales el valor de  $c$  se determina con la siguiente formula:

$$c = \frac{h_o}{2} * \sqrt{\frac{I_y}{c_w}}$$

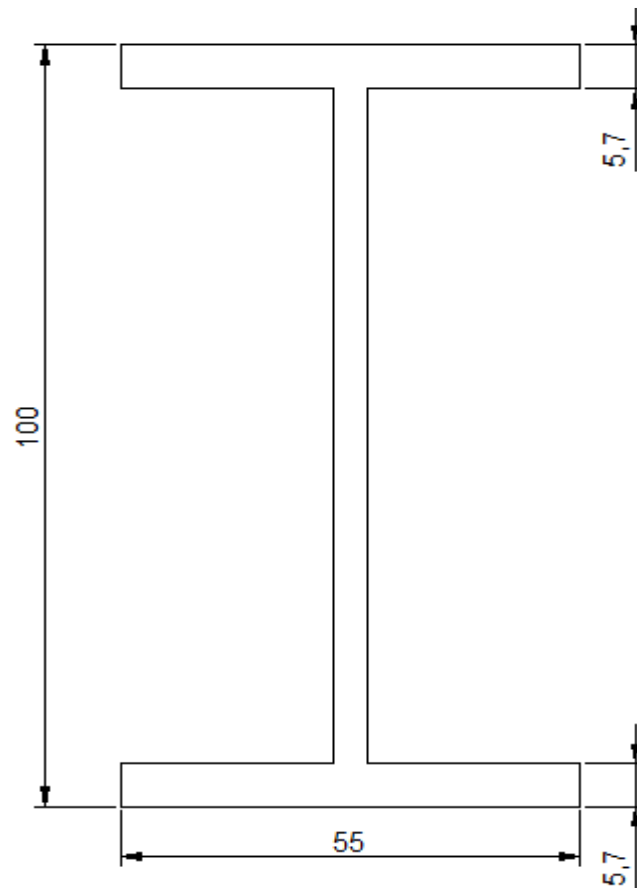
$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y * c_w}}{S_x}$$

$r_t$  puede entenderse como el radio de giro de la superficie formada por el patín a compresión más la sexta parte de la altura del alma.

La resistencia al pandeo lateral por flexo-torsión depende de la distancia entre soportes laterales. Para longitudes no soportadas lateralmente,  $L_b$  menores que  $L_p$  el estado límite de flujo plástico (plastificación) rige el diseño de la viga.

La última edición del código AISC-2010 contiene formulas únicas para la determinación de la resistencia nominal, las se multiplican por el coeficiente de minoración de resistencia o divididas por el coeficiente de seguridad dependiendo del método de diseño LRFD o esfuerzos permisibles (ASD). (Álvarez & Chazaro, 2012;23)

#### 4.4. Propiedades mecánicas a flexión de una viga metálica sin reforzar.



**Figura 30. Sección transversal en mm de la viga a emplear.**

$$A_1 = A_2 = 55.00\text{mm} * 5.70\text{mm} = 313.50\text{mm}^2$$

$$A_3 = (100.00 - 5.70 - 5.70)\text{mm} * 4.10\text{mm} = 363.26\text{mm}^2$$

$$A_T = 313.50\text{mm}^2 + 313.50\text{mm}^2 + 363.26\text{mm}^2 = 990.26\text{mm}^2$$

$$y = \frac{A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3}{A_T}$$

$$y = \frac{313.50\text{mm}^2 * 2.85\text{mm} + 313.50\text{mm}^2 * 97.15\text{mm} + 363.26\text{mm}^2 * 50.00\text{mm}}{2428\text{mm}^2}$$

$$y = 50.00\text{mm}$$

$$I = A_1 * y_1^2 + I_1 + A_2 * y_2^2 + I_2 + A_3 * y_3^2 + I_3$$

$$I_1 = \frac{b_1 * h_1^3}{12} = \frac{55.00 * 5.70^3}{12} = 848.80\text{mm}^4$$

$$I_2 = \frac{b_2 * h_2^3}{12} = \frac{55.00 * 5.70^3}{12} = 848.80\text{mm}^4$$

$$I_3 = \frac{b_3 * h_3^3}{12} = \frac{4.10 * 88.60^3}{12} = 237631.37\text{mm}^4$$

$$A_1 * y_1^2 = 2546.40\text{mm}^4$$

$$A_2 * y_2^2 = 2958851.40\text{mm}^4$$

$$A_3 * y_3^2 = 908150.00\text{mm}^4$$

$$I = 3869697.81 \text{ mm}^4$$

$$c = H - y$$

$$c = 100.00\text{mm} - 50.00\text{mm} = 50.00\text{mm}$$

$$S = \frac{I}{c}$$

$$S = \frac{3869697.81 \text{ mm}^4}{50.00 \text{ mm}}$$

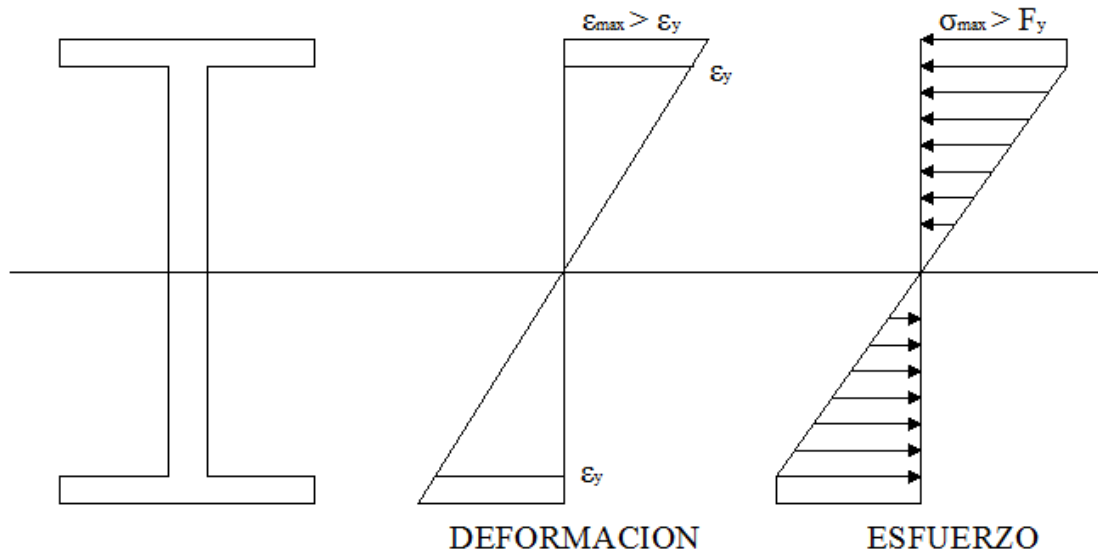
$$S = 77393.96\text{mm}^3 = 0.000077394\text{m}^3$$

$$M_y = F_y * S$$

$$F_y = 35000 \frac{T}{m^2}$$

$$M_y = 35000 \frac{T}{m^2} * 0.000077 m^3$$

$$M_y = 2.71 T * m$$



**Figura 31. Comportamiento plástico de la sección sin reforzar.**

$$q_y = \iint \phi_y * d_x$$

$$q_y = \int_0^{h/2} \phi_y * x * d_x + \int_{h/2}^h \phi_y * x * d_x$$

$$q_y = 2 * \phi_y * \int_0^{h/2} \frac{x^2}{2}$$

$$q_y = \phi_y * \left[ \frac{h^2}{4} \right]$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{y}$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E}$$

$$\varepsilon_y = \frac{35000}{2100000}$$

$$\varepsilon_y = 0.0167$$

$$\phi_y = \frac{0.0167}{0.10}$$

$$\phi_y = 0.167$$

$$q_y = 0.167 * \left[ \frac{(0.10)^2}{4} \right]$$

$$q_y = 0.0004175 \text{ m}$$

$$F_y = f_y * A_T$$

$$Z = A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3$$

$$Z = 49513.00 \text{ mm}^3 = 0.000050 \text{ m}^3$$

$$M_n = M_p = F_y * Z = 35000 \frac{T}{\text{m}^2} * 0.000050 \text{ m}^3$$

$$M_n = M_p = 1.73 \sim 2.00 \text{ T} - \text{m}$$

Factor de forma

$$\frac{M_p}{M_y} \text{ o } \frac{Z}{S} = 0.64$$

Determinación de la carga máxima que va a soportar la viga

$$M_n = \frac{P_n * L}{4}$$

$$L = 1.00 \text{ m}$$

$$P_n = \frac{M_n * 4}{L}$$

$$P_n = \frac{2.00 \text{ T} \cdot \text{m} * 4}{1.00 \text{ m}}$$

$$P_n = 8.00 \text{ T}$$

#### 4.5. Propiedades mecánicas a flexión de una viga metálica reforzada con F.R.P.

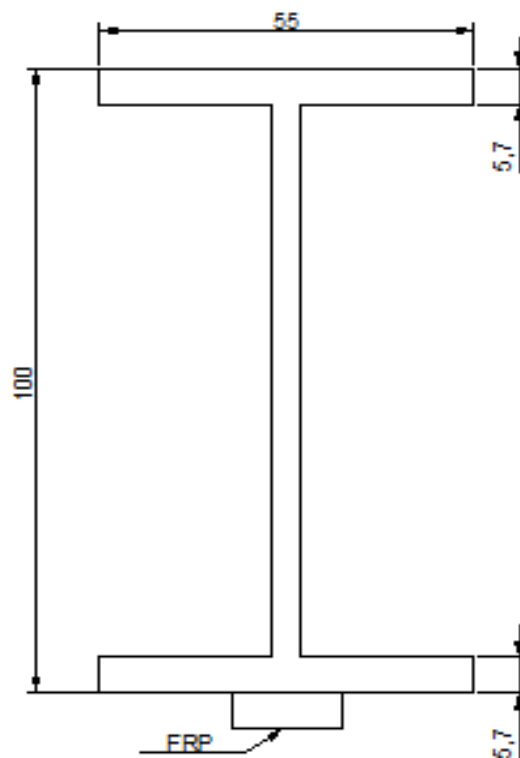


Figura 32. Sección transversal en mm de la viga a emplear reforzada con F.R.P.

$$A_1 = A_2 = 55.00\text{mm} * 5.70\text{mm} = 313.50\text{mm}^2$$

$$A_3 = (100.00 - 5.70 - 5.70)\text{mm} * 4.10\text{mm} = 363.26\text{mm}^2$$

$$A_T = 313.50\text{mm}^2 + 313.50\text{mm}^2 + 363.26\text{mm}^2 = 990.26\text{mm}^2$$

$$y = \frac{A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3}{A_T}$$

$$y = \frac{313.50\text{mm}^2 * 2.85\text{mm} + 313.50\text{mm}^2 * 97.15\text{mm} + 363.26\text{mm}^2 * 50.00\text{mm}}{2428\text{mm}^2}$$

$$y = 50.00\text{mm}$$

$$I = A_1 * y_1^2 + I_1 + A_2 * y_2^2 + I_2 + A_3 * y_3^2 + I_3$$

$$I_1 = \frac{b_1 * h_1^3}{12} = \frac{55.00 * 5.70^3}{12} = 848.80\text{mm}^4$$

$$I_2 = \frac{b_2 * h_2^3}{12} = \frac{55.00 * 5.70^3}{12} = 848.80\text{mm}^4$$

$$I_3 = \frac{b_3 * h_3^3}{12} = \frac{4.10 * 88.60^3}{12} = 237631.37\text{mm}^4$$

$$A_1 * y_1^2 = 2546.40\text{mm}^4$$

$$A_2 * y_2^2 = 2958851.40\text{mm}^4$$

$$A_3 * y_3^2 = 908150.00\text{mm}^4$$

$$I = 3869697.81 \text{ mm}^4$$

$$c = H - y$$

$$c = 100.00\text{mm} - 50.00\text{mm} = 50.00\text{mm}$$

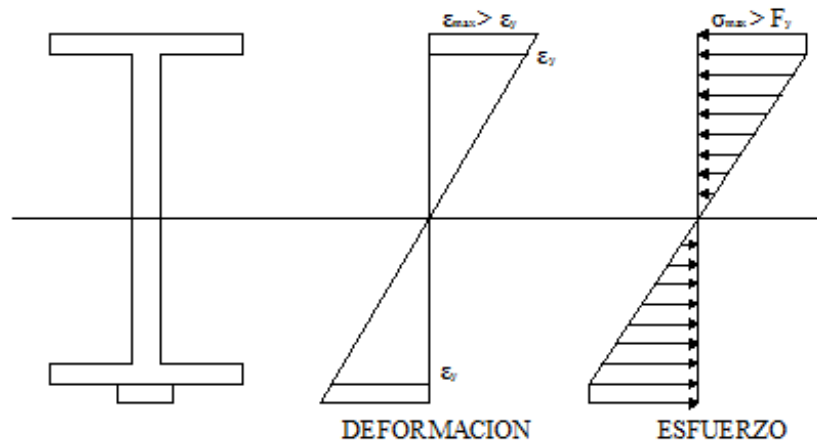
$$S = \frac{I}{c}$$



$$S = \frac{3869697.81 \text{ mm}^4}{50.00 \text{ mm}}$$

$$S = 77393.96 \text{ mm}^3 = 0.000077394 \text{ m}^3$$

$$M_y = F_y * S$$



**Figura 33. Comportamiento plástico de la sección reforzada**

$$q_y = \iint \phi_y * d_x$$

$$q_y = \int_0^{h/2} \phi_y * x * d_x + \int_{h/2}^h \phi_y * x * d_x$$

$$q_y = 2 * \phi_y * \int_0^{h/2} \frac{x^2}{2}$$

$$q_y = \phi_y * \left[ \frac{h^2}{4} \right]$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{y}$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E}$$

$$\varepsilon_y = \frac{35000}{2100000}$$

$$\varepsilon_y = 0.0167$$

$$\phi_y = \frac{0.0167}{0.10}$$

$$\phi_y = 0.167$$

$$q_y = 0.167 * \left[ \frac{(0.10)^2}{4} \right]$$

$$q_y = 0.0004175 \text{ m}$$

$$F_{yacero} = 35000 \frac{T}{m^2}$$

$$F_{yFRP} = 47900 \frac{T}{m^2}$$

$$n = \frac{35000}{47900} = 1.37$$

$$F_{ycombinado} = 3500.00 * 1.37 \frac{T}{m^2}$$

$$F_{ycombinado} = 47900.00 \frac{T}{m^2}$$

$$M_y = F_{ycombinado} * S$$

$$M_y = 47900.00 \frac{T}{m^2} * 0.00037 m^3$$

$$M_y = 3.71 T - m$$

$$Z = A_1 * y_1 + A_2 * y_2 + A_3 * y_3 + A_4 * y_4$$

$$Z = 49683.14 \text{mm}^3 = 0.00005 \text{m}^3$$

$$M_n = M_p = F_y * Z = 38663.05 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} * 0.00025 \text{m}^3$$

$$M_n = M_p = 2.37 \text{T} - \text{m}$$

Factor de forma

$$\frac{M_p}{M_y} \text{ o } \frac{Z}{S} = 0.64$$

Determinación de la carga máxima que va a soportar la viga

$$M_n = \frac{P_n * L}{4}$$

$$L = 1.00 \text{ m}$$

$$P_n = \frac{M_n * 4}{L}$$

$$P_n = \frac{2.37 \text{T} - \text{m} * 4}{1.00 \text{ m}}$$

$$P_n = 9.48 \text{ T}$$

## **CAPÍTULO V**

### **5. ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS METÁLICAS REFORZADAS Y SIN REFORZAR.**

#### **5.1. Introducción.**

El conocimiento de las propiedades de los materiales utilizados en Ingeniería es un aspecto fundamental para el diseñador en su propósito de desarrollar las mejores soluciones a las diversas situaciones que se presentan en su cotidiano que hacer.

La realización correcta de ensayos en los materiales, nos permite conocer su comportamiento ante diferentes circunstancias, al igual que la determinación de sus propiedades fundamentales.

En este estudio analizaremos el comportamiento del acero al ser sometido a un esfuerzo de flexión pura.

El ensayo se realizó en los laboratorios de la Universidad Central del Ecuador, el mismo que cuenta con una Máquina Universal de Ensayos y la operación Consiste en someter a deformación plástica una probeta de características específicas por medio de un doblamiento hecho sin invertir el sentido de flexión al ejecutarlo.

#### **5.2. Preparación de las muestras.**

1. Las viga a emplearse son IPE 100 de la empresa IPAC, este distribuidor se encargó de cortar este elemento en secciones de 1m.



**Figura 34. Vigas IPE 100 L = 1000 mm**

2. Debido al almacenamiento de las vigas estas presentaban una película de óxido, la cual debe ser removida con la finalidad que la cara a ser reforzada no debe presentar ningún tipo de impureza, esto mejora la adherencia del FRP al miembro que será reforzado.



**Figura 35. Oxido presente en las vigas debido al almacenamiento**

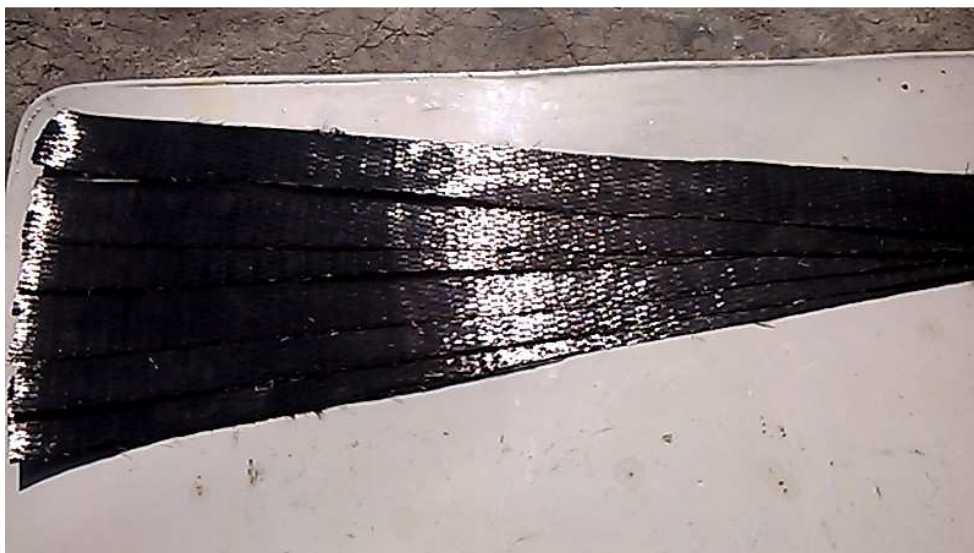


**Figura 36. Limpieza de la cara que se reforzara con FRP**



**Figura 37. Superficie libre de impurezas y lista para ser reforzada**

3. Se cortaron tiras de 55 mm de ancho por 1000 mm de largo del tejido de FRP.



**Figura 38. Tejido unidireccional de FRP (55mmx1000mm)**

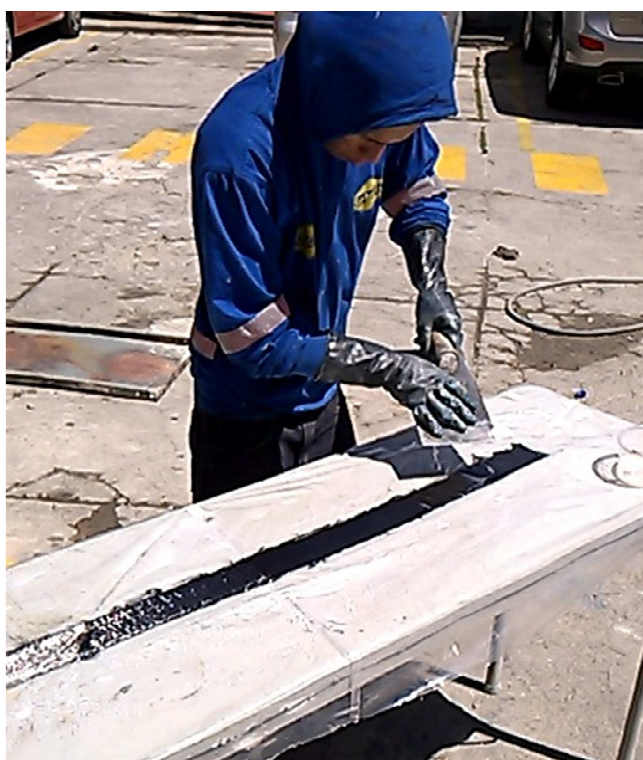
4. Para mejorar la adherencia del tejido unidireccional (FRP) a la viga, primero se satura completamente el material de refuerzo sobre una superficie libre impurezas.



**Figura 39. Resina epoxica de alta adherencia.**



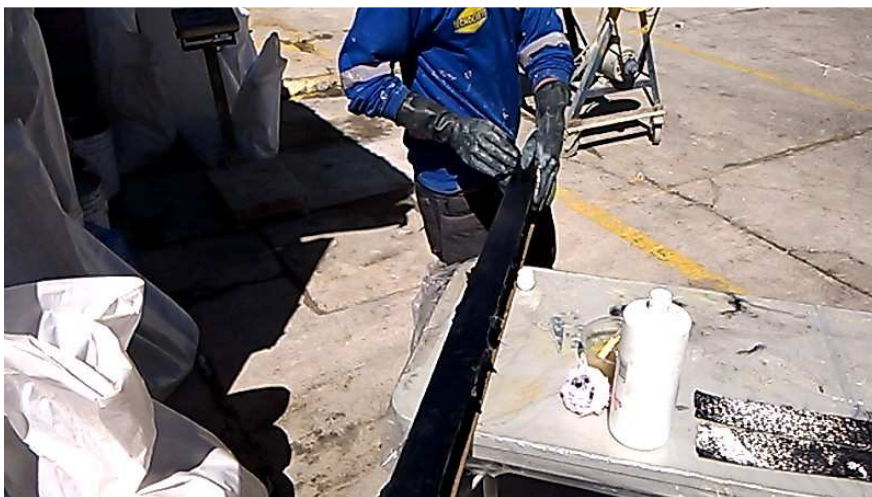
**Figura 40. Resina epoxica de alta resistencia.**



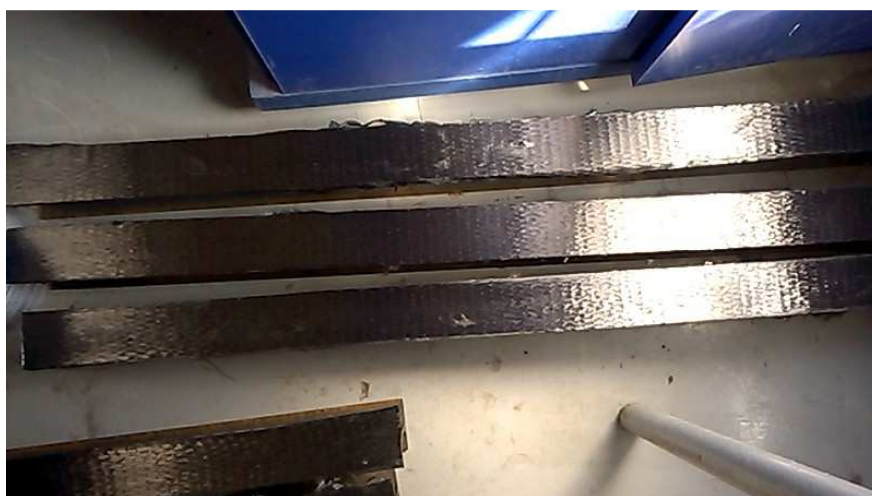
**Figura 41. Material de refuerzo saturado con la resina de alta resistencia**



5. Por último se coloca las tiras de FRP sobre la cara que será sometida a flexión en el ensayo.



**Figura 42. Refuerzo de la cara que soportara tracción en el ensayo de flexión.**



**Figura 43. Vigas listas para ser ensayadas.**

### **5.3. Equipos y materiales.**

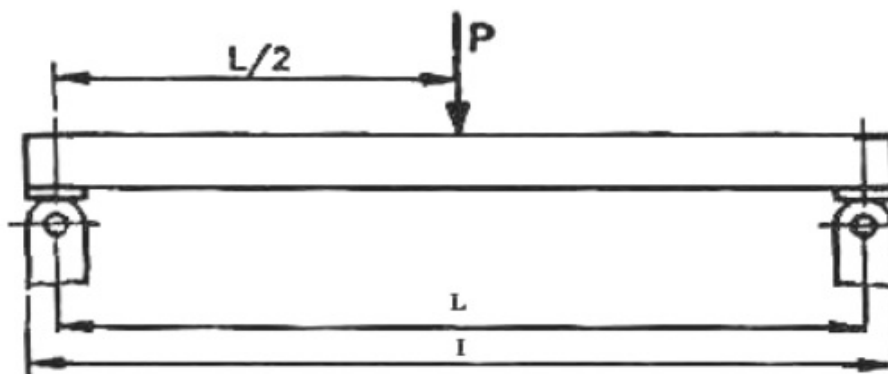
- Equipo para ensayo a flexión, con elemento de regulación de velocidad de ensayo.

- En caso de ser necesario un extensómetro.
- CARBOWRAP-600 tejido de fibra de carbono unidireccional.
- EPOFIX-300 adhesivo de alta adherencia.
- Resina de alta resistencia (La formulación de esta resina esta sujeta a propiedad intelectual).
- Vigas metálicas tipo IPE-100 de longitud un metro

#### 5.4. Procedimiento del ensayo a flexión.

El ensayo se basa en aplicar una carga y velocidad constante, en el centro de la luz de la viga IPE-100, se debe medir las deformaciones generadas al cargar el elemento hasta llegar a la falla del mismo.

- Determinación de las dimensiones de la viga a ensayar.
- Emplear una longitud  $L$ , para el ensayo igual 1000 [mm] y aplicar la carga en el centro de la luz como se muestra en la Figura 5.11.

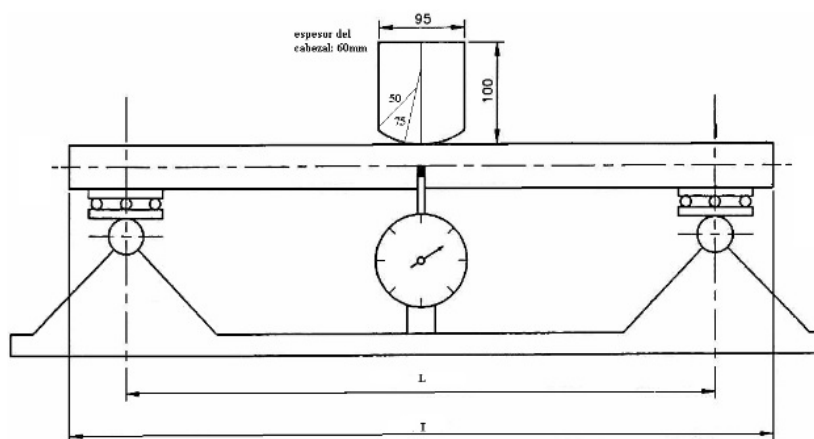


**Figura 44. Luz de ensayo de flexión estática**

**Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María, 2001.**

colocar el elemento de manera que los extremos tengan la capacidad de seguir sin ningún tipo de restricción las deflexiones producidas únicamente por la carga puntual.

- utilizar como elemento de carga un cabezal metálico, con tamaño y forma tal como se indica en la Figura 5.12.



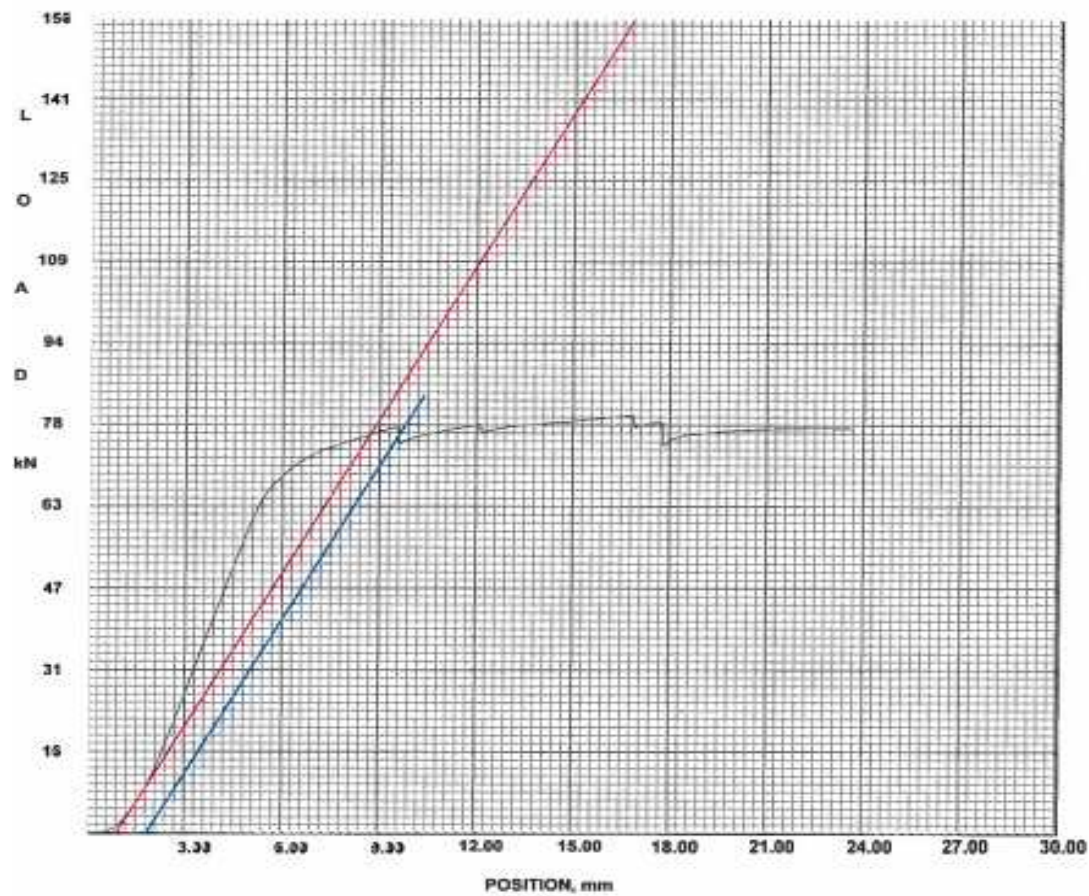
**Figura 45. Medición de la deflexión del plano neutral en el centro de la probeta (Medidas en milímetros).**

**Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María, 2001.**

- Colocar el elemento de ensayo en los apoyos de tal manera que la carga sea aplicada en el plano tangencial al eje neutro.
- Aplicar la carga en forma uniforme con una velocidad de ensayo de 10 [mm/min], no variando más allá de un 25%.
- Medir la deflexión  $Y$ , producida en la mitad de la luz, para cargas progresivas, con intervalos de carga convenientemente elegidos, de modo que las lecturas que así se obtengan permitan efectuar la determinación del límite de proporcionalidad,  $P_{lp}$ , en gráfico carga-deformación.
- Medir las deflexiones con una precisión de 0,01[mm].
- Anotar la carga máxima, obtenida durante el ensayo de la probeta. (Universidad técnica Federico santa maría, 2001).

## 5.5. Resultados del ensayo.

### 5.5.1. Diagramas Esfuerzo – Deformación.



Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

#### FLEXION DE VIGAS

Cliente JOSE DUEÑAS  
ID Muestra 1C/R  
Fecha del Ensayo 05/24/2015

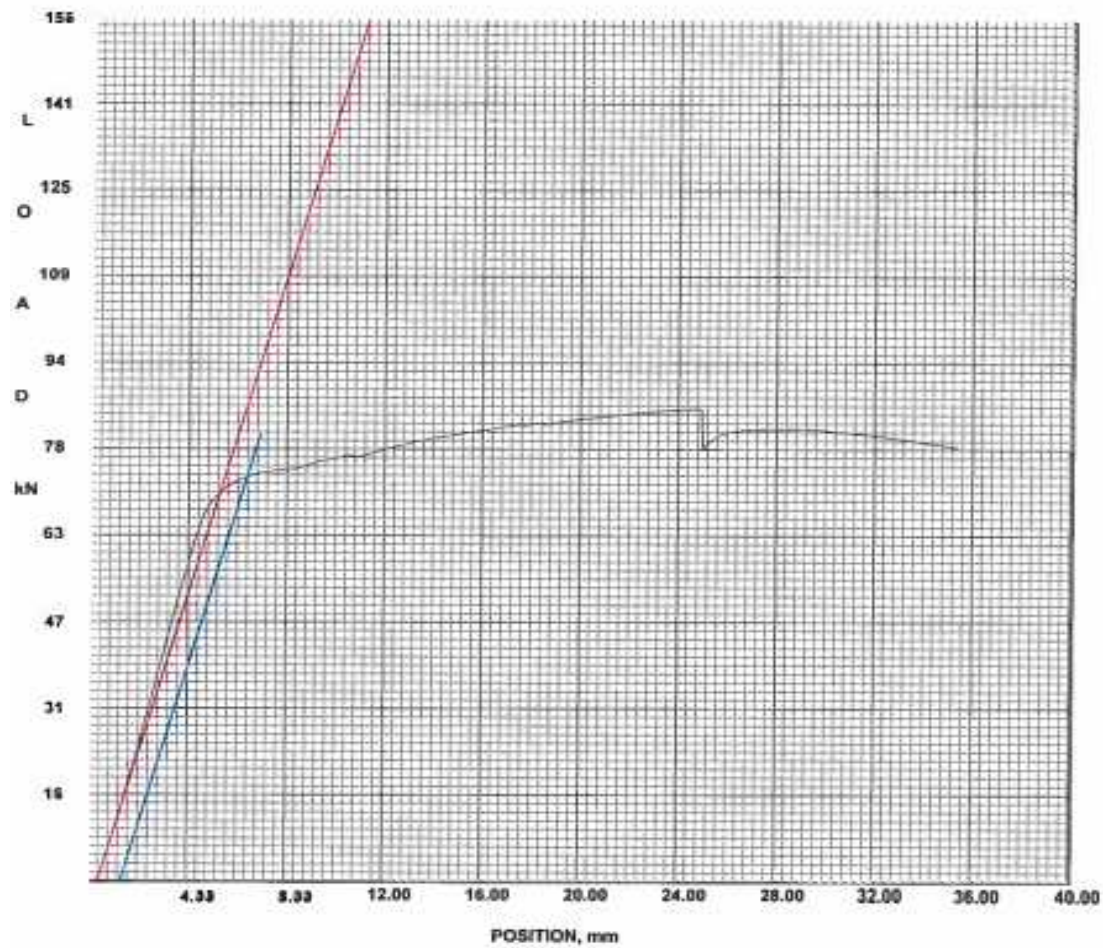
Operador FC  
Orden de Trabajo # 27740

Ancho, mm: 4.1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 80000  
ID Muestra: 1C/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 1C/R



Jul 1, 2015 11:51:18 AM  
SN: 205486 V7.02.11

Figura 46. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 1 con refuerzo



Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

### FLEXION DE VIGAS

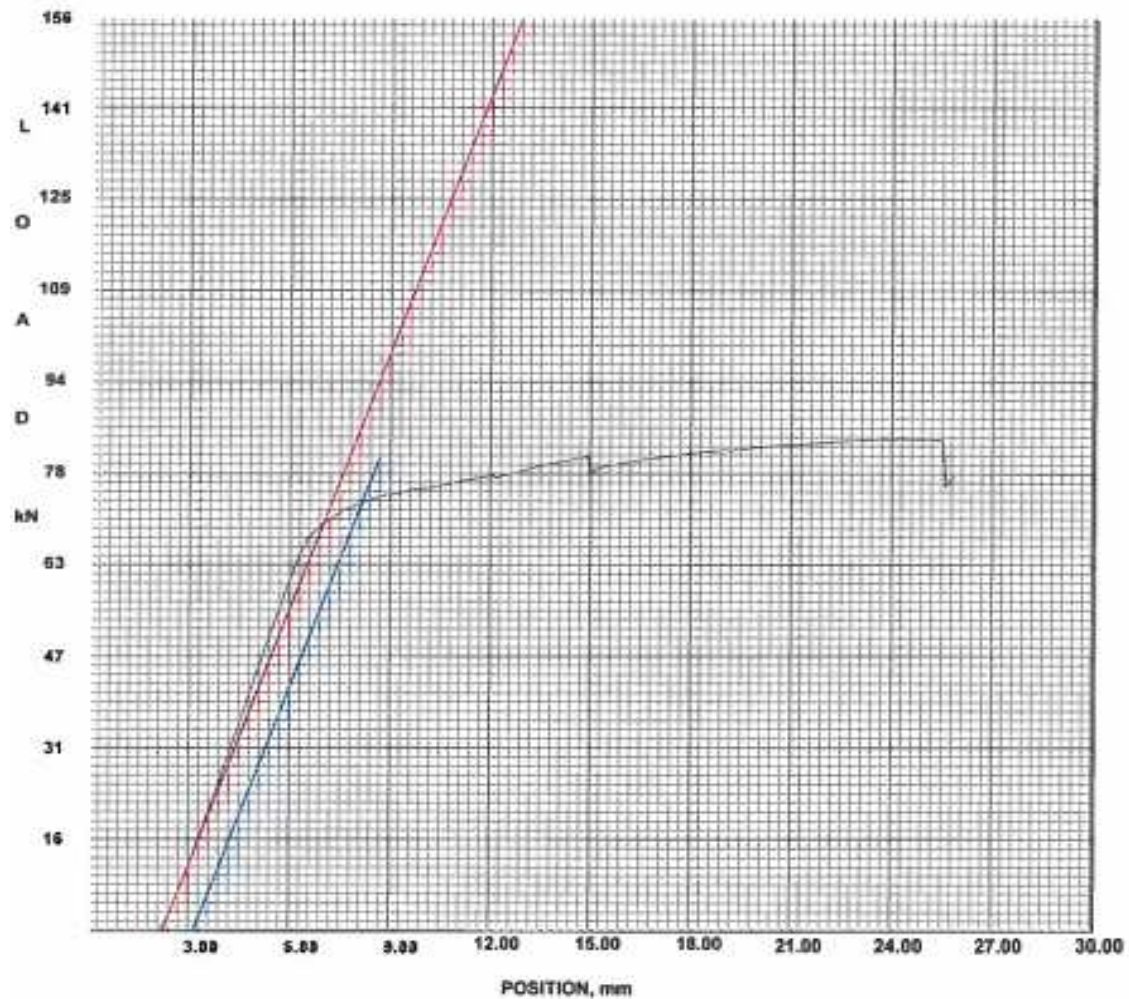
Cliente JOSE DUEÑAS  
ID Muestra 2C/R  
Fecha del Ensayo 06/24/2015

Operador FC  
Orden de Trabajo # 27740

Ancho, mm: 41  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 85400  
ID Muestra: 2C/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 2C/R

Jul 1 2015 11:52:56 AM  
SN 206495 V7.02.11

Figura 47. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 2 con refuerzo



Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

**FLEXION DE VIGAS**

Cliente JOSE DUEÑAS  
ID Muestra 3C/R  
Fecha del Ensayo 06/24/2015

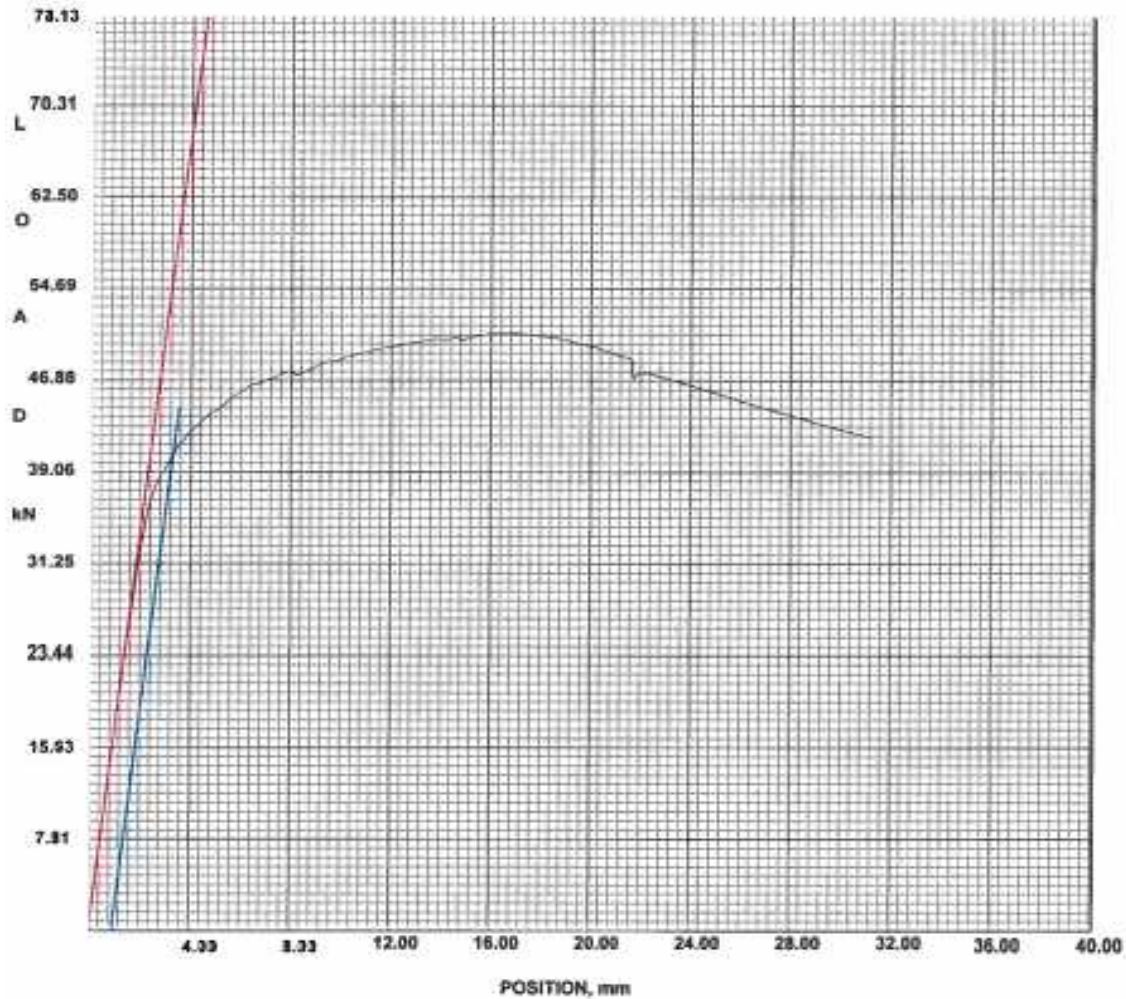
Operador FC  
Orden de Trabajo # 27740

Ancho, mm: 4.1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 84100  
ID Muestra: 3C/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 3C/R



Jul 1 2015 11:53:29 AM  
SN: 209486 V7.02.11

Figura 48. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 3 con refuerzo



Pontificia Universidad  
Católica del Ecuador

### FLEXION DE VIGAS

Cliente JOSE DUEÑA  
ID Muestra 4C/R  
Fecha del Ensayo 05/24/2015

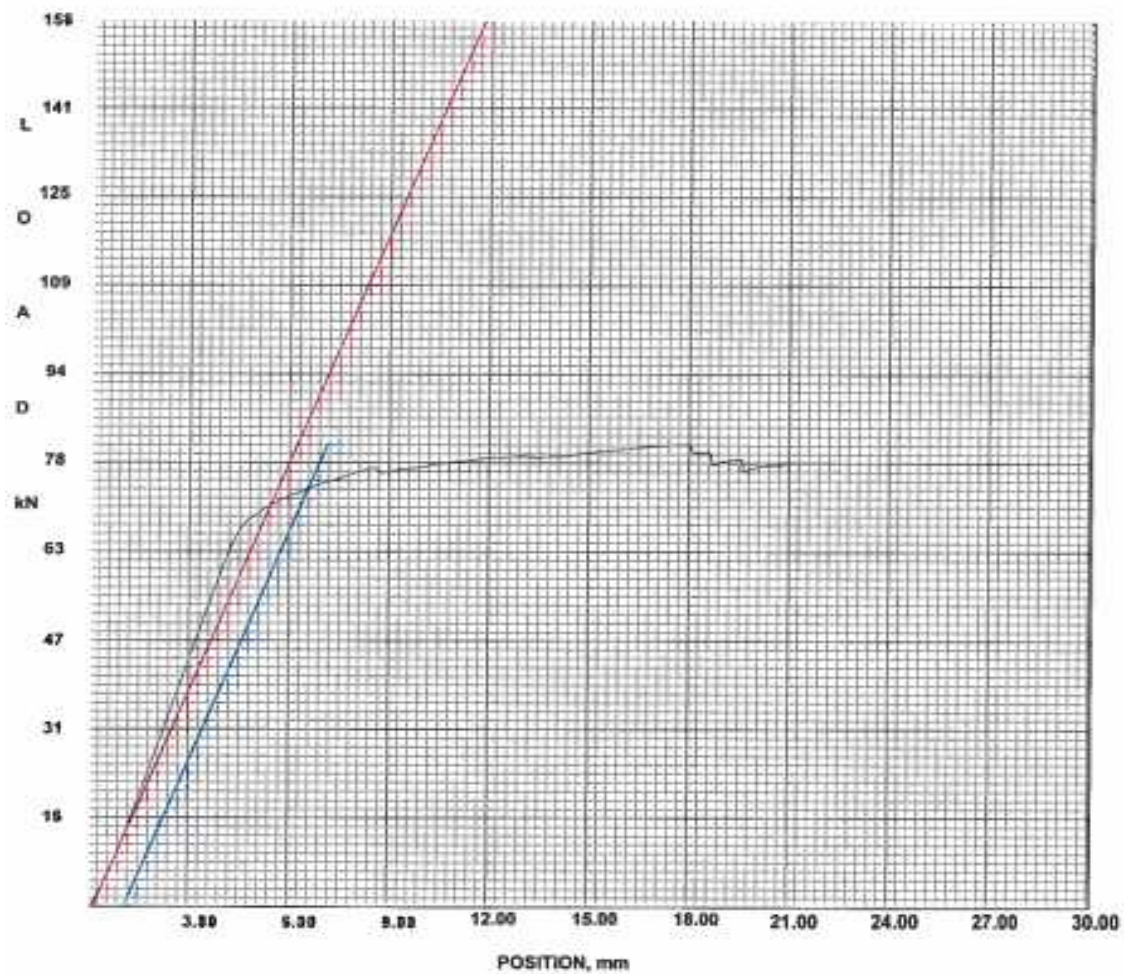
Operador fc  
Orden de Trabajo # 27740

Ancho, mm: 4.1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Última, N: 51000  
ID Muestra: 4C/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 4C/R



Jul 1 2015 11:59:29 AM  
SN 298486 V7.62.11

Figura 49. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 4 con refuerzo



Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

**FLEXION DE VIGAS**

Ciente JOSE DUEÑAS  
ID Muestra 5C/R  
Fecha del Ensayo 06/24/2015

Operador FC  
Orden de Trabajo # 27740

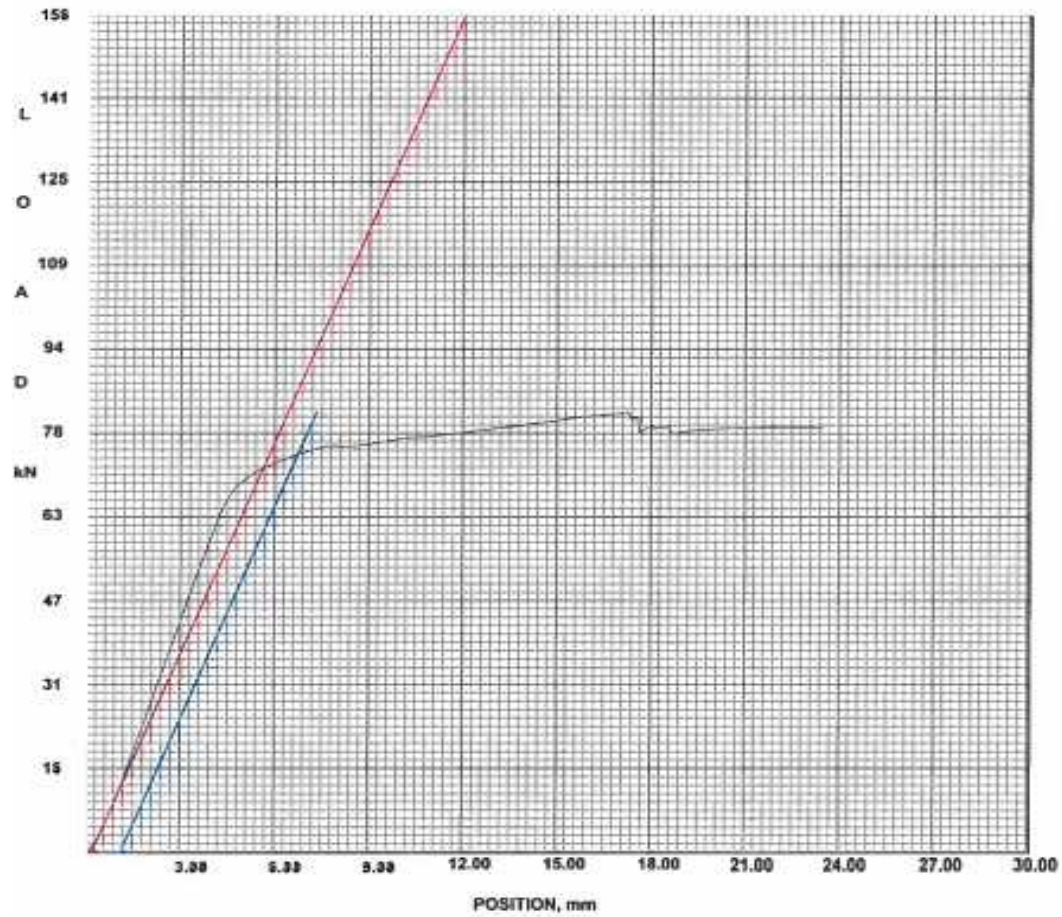
Ancho, mm: 4.1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 81400  
ID Muestra: 5C/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 5C/R



Jul 1, 2015 11:53:47 AM  
SN 206486 V7 92 11

Figura 50. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 5 con refuerzo





Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

### FLEXION DE VIGAS

Cliente JOSE DUEÑAS  
ID Muestra 6C/R  
Fecha del Ensayo 06/24/2015

Operador FC  
Orden de Trabajo # 27740

Ancho, mm: 4.1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 81900  
ID Muestra: 6C/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 6C/R



Jul 1 2015 11:53:57 AM  
SN: 20648E - V7.02.11

Figura 51. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 6 con refuerzo

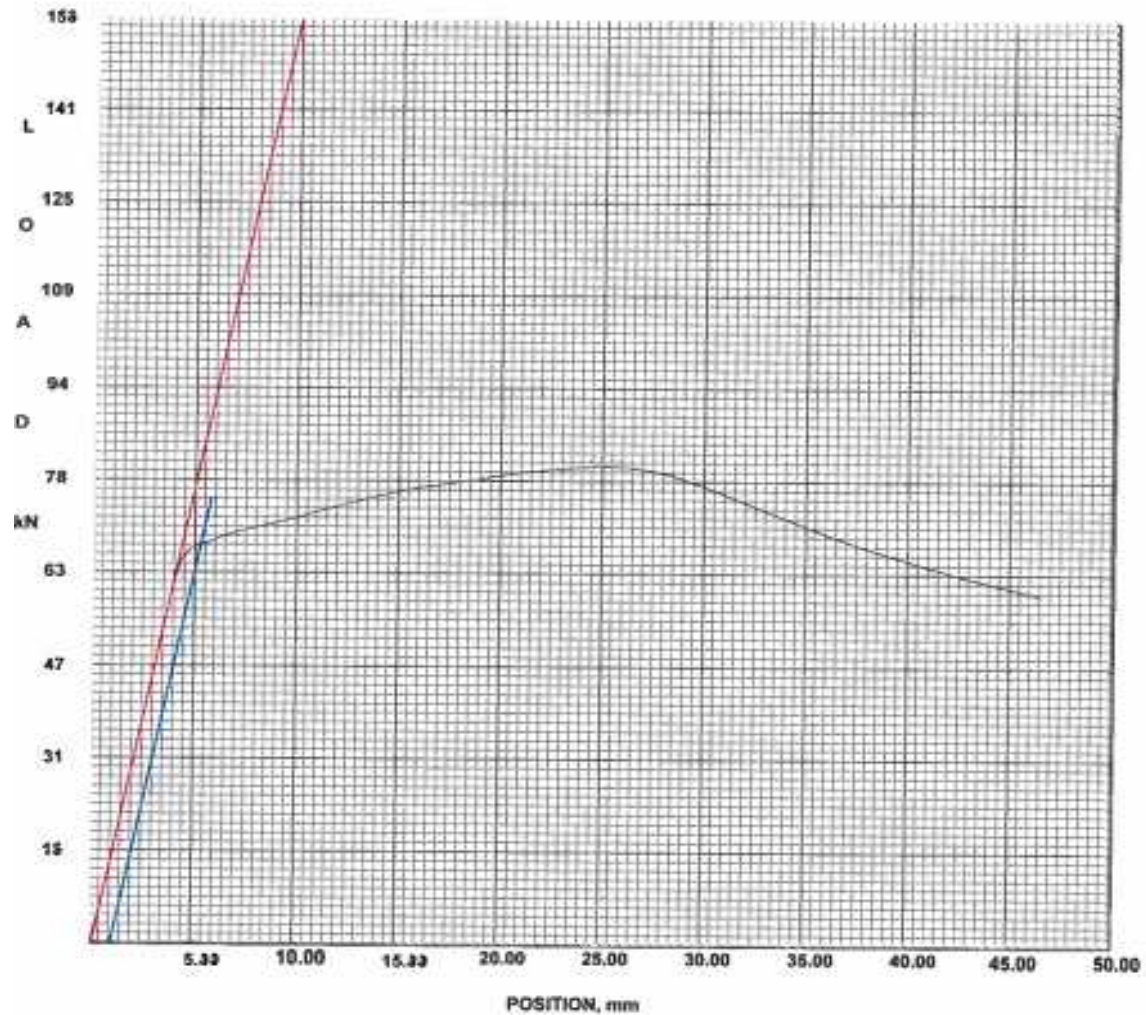
Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

**FLEXION DE VIGAS**

Cliente  
ID Muestra 7 S/R  
Fecha del Ensayo 06/24/2015

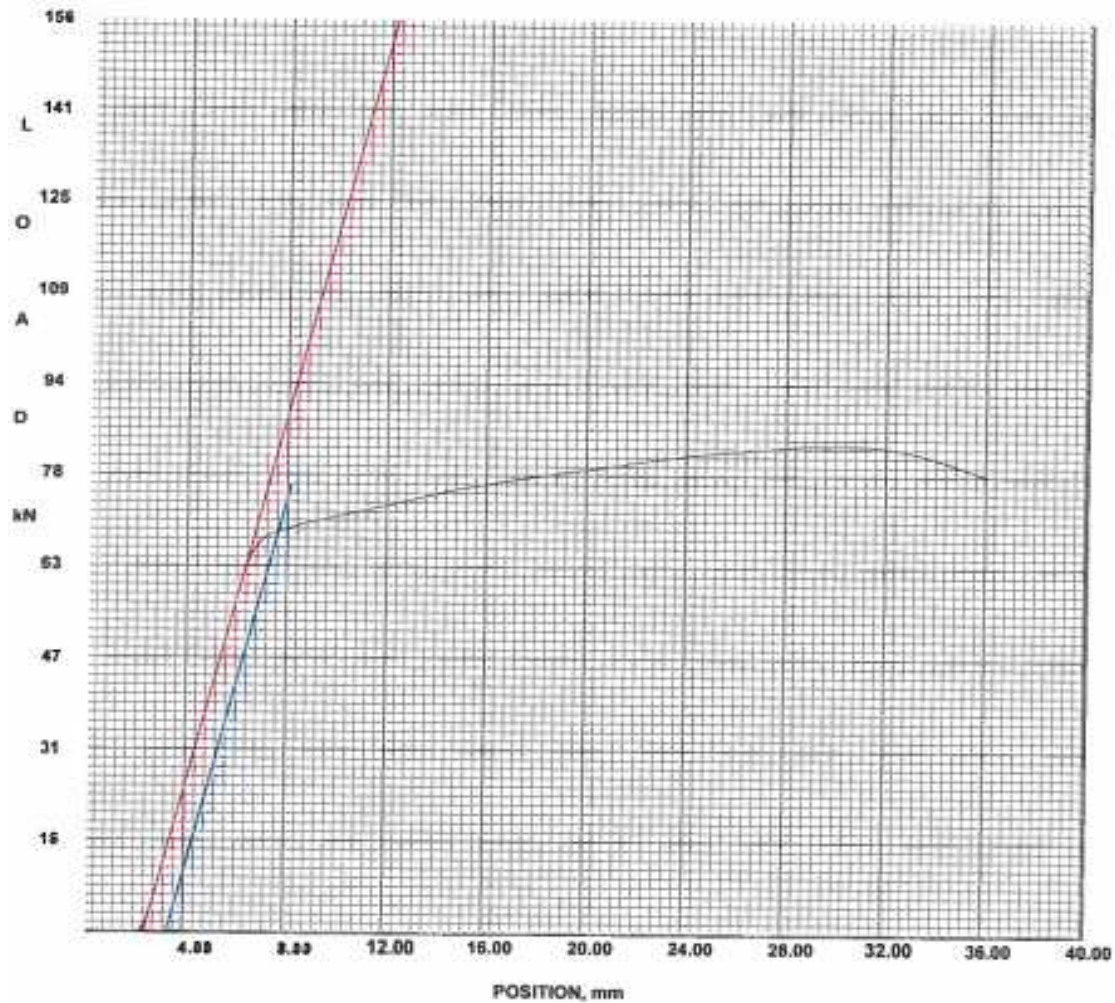
Operador  
Orden de Trabajo #

Ancho, mm: 4,1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 80600  
ID Muestra: 7 S/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 7S/R



Jun 24, 2015 12:02:01 PM  
SN: 206488 VT 02.11

Figura 52. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 7 sin refuerzo



Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

### FLEXION DE VIGAS

Cliente JOSE DUEÑA  
ID Muestra 8S/R  
Fecha del Ensayo 06/24/2015

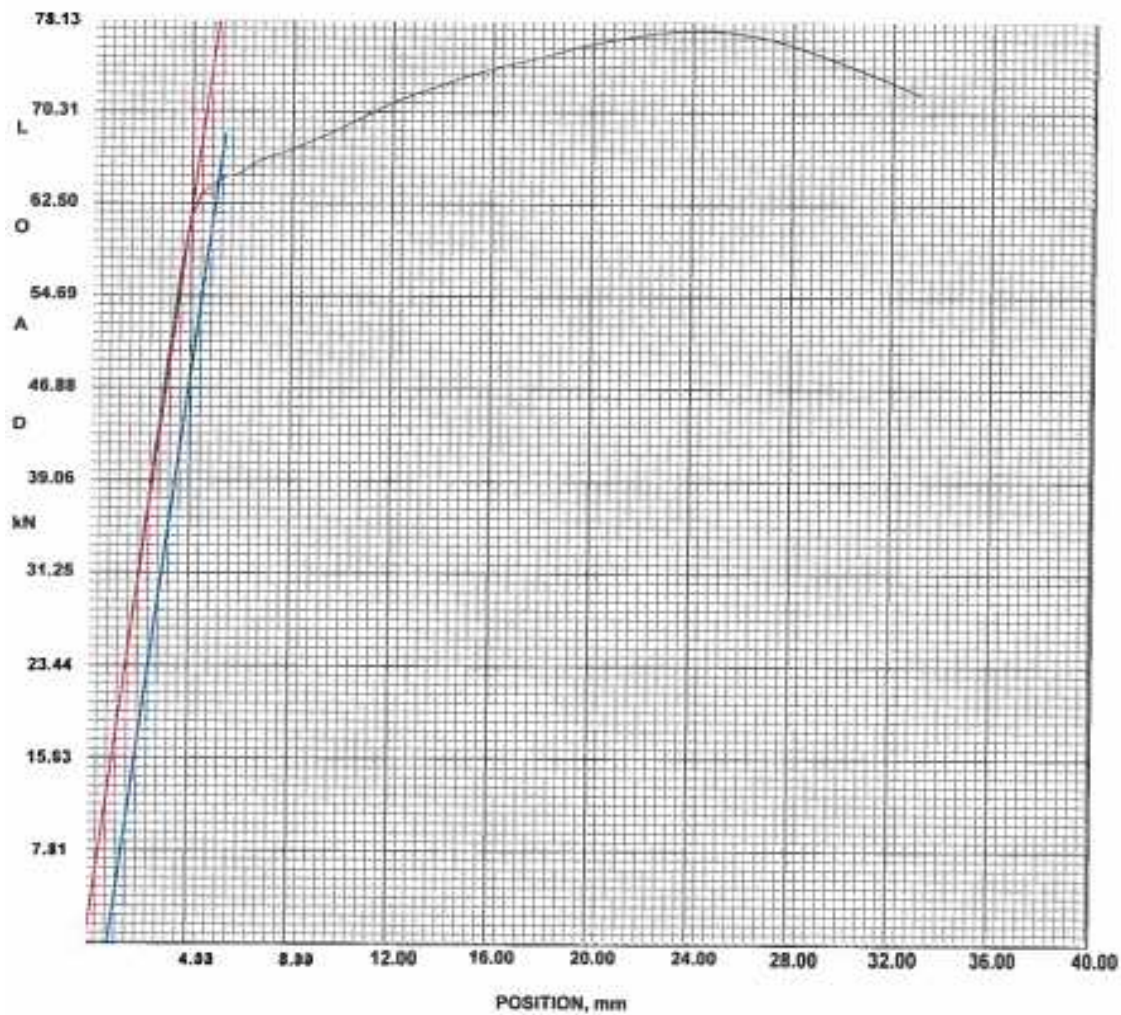
Operador fc  
Orden de Trabajo # 27740

Ancho, mm: 4.1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 83400  
ID Muestra: 8S/R  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 8S/R



Jun 24, 2015 2:08:23 PM  
SN 205485 V7 02.11

Figura 53. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 8 sin refuerzo



Pontificia Universidad  
Catolica del Ecuador

**FLEXION DE VIGAS**

Cliente JOSE DUEÑA  
ID Muestra 9S/R  
Fecha del Ensayo 06/24/2015

Operador fc  
Orden de Trabajo # 27740

Ancho, mm: 4.1  
Largo, mm: 900  
Espesor, mm: 100  
Carga Ultima, N: 77300  
ID Muestra: 9S/F  
Resistencia esperada:  
Muestra #: 9S/F



Jun 24, 2015 2:16:42 PM  
SN 306488 V7.02.51

Figura 54. Diagrama esfuerzo vs. Deformación probeta 9 sin refuerzo

5.5.2. Propiedades mecánicas.



**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**  
**LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**  
**ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**INFORME DE ENSAYO**  
**FLEXIÓN EN VIGAS METÁLICAS DE SECCIÓN J**  
**CARGA EN EL PUNTO MEDIO**

Venezuela y Av. 12 de Octubre  
 Telf: (01) 299 1231 - Fax: (01) 299 1254  
 Cel: 09470 49430  
 Quito-Ecuador  
 LEAF-PUCE@puce.edu.ec  
 www.puce.edu.ec

PROYECTO:	Tercer Edificio de Ciencias	SOLICITA: José Ferrera
LÓCAL (edificio):	Cole	FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 20/06/2016
MUESTRO:	Torneos en caliente	FECHA DE RECEPCIÓN DE INFORMACIÓN: 20/06/2016
RESUMEN:	0714	
PCAL:	1 (1)	
FABRICA:	FINC	
MATERIAL BASE:	AUTOMATI - Grupo 50	
DESIGNACIÓN:	PE 100	

Probeta #	1	2	3
Identificación de la probeta	1.01	2.01	3.01
Descripción	Viga con Perforaciones 100% y Refuerzo de Alta Adherencia		
Fecha de ensayo	20/06/2016	20/06/2016	20/06/2016
Longitud proba	1000	1000	1000
Ancho de ala (h mm)	95	95	95
Altura del alma (h mm)	4.50	4.50	4.50
Distancia de ala a la fibra	5.75	5.75	5.75
Ala (t mm)	100	100	100
Alma (t mm)	1.00	1.00	1.00
Área de la sección proba	10.30	10.30	10.30
Peso (kgm)	7.92	7.92	7.92
Área (cm <sup>2</sup> )	171.00	171.00	171.00
Distancia entre apoyos (mm)	900	900	900
Carga máxima (N)	8000	8000	8000
Momento máximo (N·m)	4000	4000	4000
Módulo de Elasticidad (N/m <sup>2</sup> )	144000	144000	144000
Módulo de rotura (N/m <sup>2</sup> )	20.2	20.0	27.6





Esquema de la Sección I de la Viga

**RESEÑA:** Visualización de ensayo: 10 minutos

**NOTA:** Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.



Ing. María Inés Celis  
Responsable de Área



Ing. Guillermo Riquelme FSC  
Director LAC

Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad...



Figura 55. Propiedades mecánicas probetas 1, 2 y 3 con refuerzo



**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**  
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Viancana y Av. 12 de Octubre  
Tel.: (00) 224 1328 - Fax: (00) 224 1624  
Cul.: (00) 224 49430  
Quito-Ecuador  
LMC-PLUTIA@puce.edu.ec  
www.puce.edu.ec

**ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**INFORME DE ENSAYO**  
**FLEXIÓN EN VIGAS METÁLICAS DE SECCIÓN J**  
**CARGA EN EL PUNTO MEDIO**

**PROYECTO:** Tests - Patrocinados de Estructuras  
**LOCALIZACIÓN:** Quito  
**MUESTRA:** Trazado de pruebas  
**RECIPROCA:** 37768  
**FECHA:** 1 de 3  
**FECHA:** 2015  
**MATERIAL BASE:** APTA APT2 - Grupo III  
**DESIGNACIÓN:** PE 408  
**SOLICITA:** José Benito  
**FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:** 20150603  
**FECHA DE IMPRESIÓN:** 20150701

Prueba #	4	5	6
Identificación de la prueba	4 CB	5 CB	6 CB
Descripción	Viga con Refuerzo con FRP y hormigón interior y exterior		
Fecha de ensayo	20/10/2015	20/10/2015	20/10/2015
Longitud (mm)	3000	3000	3000
Ancho del ala - a (mm)	40	40	40
Ancho del alma - a <sub>1</sub> (mm)	40	40	40
Alto de la viga - H (mm)	270	270	270
Alto de la viga - H <sub>1</sub> (mm)	270	270	270
Alto - H (mm)	270	270	270
Peso - P (kg)	7.00	7.00	7.00
Área de la sección (cm <sup>2</sup> )	10.00	10.00	10.00
Peso específico	7.85	7.85	7.85
Sección (cm <sup>2</sup> )	11.00	11.00	11.00
Distancia entre pernos (mm)	300	300	300
Carga máxima (N)	9.000	9.000	9.000
Área de refuerzo (cm <sup>2</sup> )	1.445	1.445	1.445
Módulo de elasticidad (NPa)	197.8	197.8	197.8



Equipo de Ensayo



**CONSIDERACIONES:**

Velocidad de ensayo: 10 mm/min

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. María Inés Córdova  
Responsable de Área

Ing. Guillermo Pareda de la Cruz  
Director LMC

Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad...



Figura 56. Propiedades mecánicas probetas 4, 5 y 6 con refuerzo



**Pontificia Universidad Católica del Ecuador**  
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Venezuela y Av. 13 de Octubre  
Tel: 593 299 1828 - Fax: 593 299 1624  
Caj. 09079-0900  
Quito-Ecuador  
LMC-PUCCE [www.pucce.edu.ec](http://www.pucce.edu.ec)

**ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**INFORME DE ENSAYO**  
**FLEXIÓN EN VIGAS METÁLICAS DE SECCIÓN I**  
**CARGA EN EL PUNTO MEDIO**

**TÍTULO:** Tesis - Reforzamiento de Estructuras  
**LOCALIZACIÓN:** Quito  
**FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:** 20/06/2010  
**FECHA DE IMPRESIÓN:** 20/06/2010

**MUESTRA:** Taberlinas aciliforme  
**ESPECIÓN:** 2718  
**FORMA:** ( de 3 )  
**MATERIA:** IPAC  
**MATERIAL BASE:** ASTM A512 - Grupo 30  
**DESIGNACIÓN:** #1-30

Propiedad	1	2	3
Identificación de la probeta	1-30a	1-30b	1-30c
Descripción	Viga de Reforzamiento FRR		
Peso de ensayo	20450.30	20390.20	20320.20
Longitud (mm)	600	600	600
Ancho nominal - 4 mm	60	55	50
Ancho nominal - 6 mm	4.50	4.50	4.50
Espesor de las alas - 4 mm	5.50	5.70	5.70
Alas - 4 mm	60	50	50
Peso - 4 mm	7.00	5.60	5.00
Peso de la sección ensayada	19.50	18.50	15.20
Peso propio	7.50	7.50	7.50
Peso (mm)	111.00	111.00	111.00
Alargamiento (mm)	600	600	600
Carga máxima (N)	3300	3300	3300
Alargamiento máximo (mm)	10.00	10.00	10.00
Módulo de elasticidad (MPa)	205.1	204.2	204.2



Probeta de Ensayo de Reforzamiento FRR

**OBSERVACIONES:**

Veracidad de ensayo: 10 pruebas.

**NOTA:** Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

*[Signature]*  
Ing. Roberto Lasso  
Responsable de Área

*[Signature]*  
Ing. Guillermo Pareda de la Cruz  
Centro LMC

Solidarios en la construcción, excelencia en la calidad...



Figura 57. Propiedades mecánicas probetas 6, 7 y 8 sin refuerzo

### 5.6. Estudios similares

Una gran cantidad de vigas compuestas de acero fueron probadas en la Universidad de Arizona. Las vigas fueron construidas usando secciones W14x30 y claros libres de 16 pies (4.8 m)

Para simular daño por corrosión, el área del patín de tensión de la viga fue reducida en un 25%. El comportamiento carga-deformación se muestra en la gráfica de abajo. La curva de color rojo ilustra el comportamiento de la viga con patín de tensión recortado. Posteriormente dicho patín fue reforzado con tres franjas de placas de fibra de carbono QuakeWrap™ DU50C. El comportamiento de la viga reforzada se muestra con la curva de color verde. La curva punteada muestra el comportamiento de un modelo analítico generado por los directores de QuakeWrap, Inc.



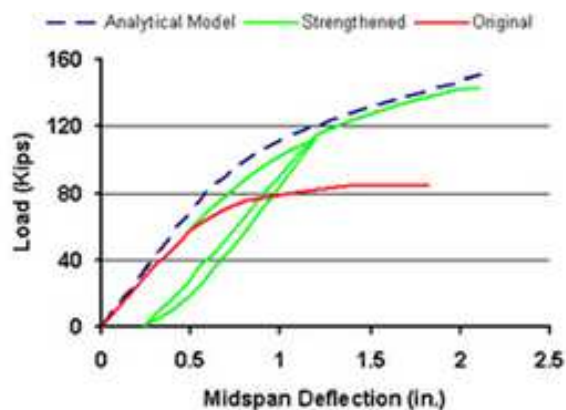
**Figura 58. Vigas ensayadas en la universidad de Arizona**

**Fuente: Quakewrap, 2004.**

Como puede ser observado en la gráfica que se mostrara a continuación, la resistencia de la viga fue significativamente incrementada.



También lograron una mejora significativa en el comportamiento a la fatiga de la viga; las vigas reforzadas tuvieron incrementos del 250% al 350% en el número de ciclos de carga antes de presentar fallas por fatiga cuando fueron comparadas con vigas no reforzadas. (Quakewrap, 2004).



**Figura 59. Grafica carga deflexión**

**Fuente: Quakewrap, 2004.**

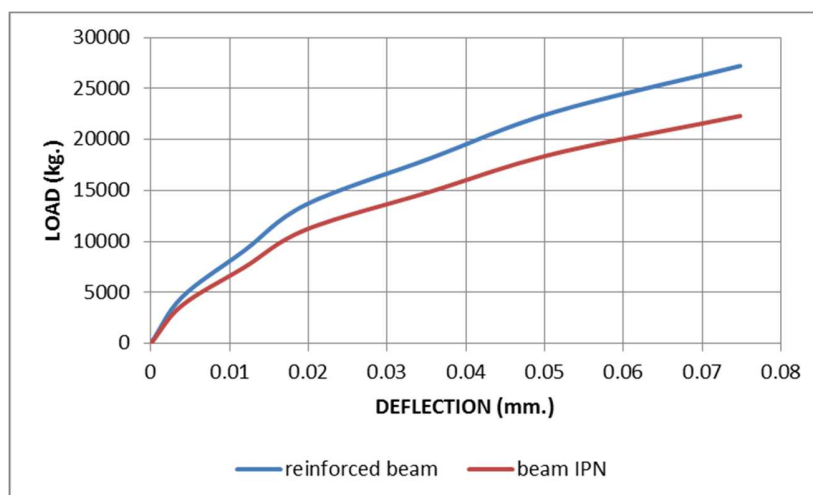
La empresa SIKA también realizó pruebas de laboratorio a vigas reforzadas con materiales compuestos, las muestras fueron construidas usando secciones IPN240 y luces libres de 4.00 m.



**Figura 60. Vigas ensayadas por SIKA**

**Fuente: centro de investigaciones SIKA SA**

Con la finalidad de mejorar la redistribución de esfuerzos en la cara de contacto se adiciono una lámina de fibra de vidrio SIKA refuerzo tejido de 0,03mm, con una resina epoxica SIKAguard-63N, posterior a esto se unieron dos pletinas de SIKAcarbodur con unas dimensiones de 50mm x 4000mm. El grafico que se presenta ilustra los resultados obtenidos por la empresa SIKA en sus laboratorios.



**Figura 61. Grafica carga deflexión**

**Fuente: centro de investigaciones SIKA SA**

## CAPÍTULO VI

### 6. COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Comentarios.

1. El FRP tiene sus inicios en suiza empleado para reforzamiento estructural que tiene en promedio 70% de fibra y un 30% de polímero, cuya característica principal es su comportamiento lineal hasta la rotura, y el esfuerzo generado es casi diez veces mayor al del acero, lo que hace que este material aumente la capacidad resistente de los elementos estructurales.
2. Los materiales compuestos han evolucionado muy rápida en los últimos años, al contrario de los métodos y ecuaciones para diseño, el análisis matemático presenta avances más lentos que el de los materiales empleados para los refuerzos, ya que hasta la actualidad se opta ser por realizar adaptaciones de métodos tradicionales de análisis para estructuras en los que se adoptan factores de seguridad adicionales que solventan parcialmente las vacilaciones en el cálculo.
3. El uso de fibra de carbono para el reforzamiento estructural en tiene una corta historia en el ámbito nacional, por lo que es de suma importancia pruebas de laboratorio adicionales para corroborar las recomendaciones y propiedades mecánicas de los fabricantes. Por tanto, el uso de fibra de carbono en rehabilitación debe ser llevado a cabo con precaución y con el análisis competente de un ingeniero que comprenda el comportamiento del refuerzo.
4. Es primordial tener en cuenta que el mantenimiento de las obras de infraestructura es más frecuente . Tanto así que en muchos casos, el costo ya no es uno de los puntos más importantes tomados en cuenta por los especialistas, debido a que se ha establecido que lo que debe imperar es la eficacia, estética y durabilidad del refuerzo. Es de suma

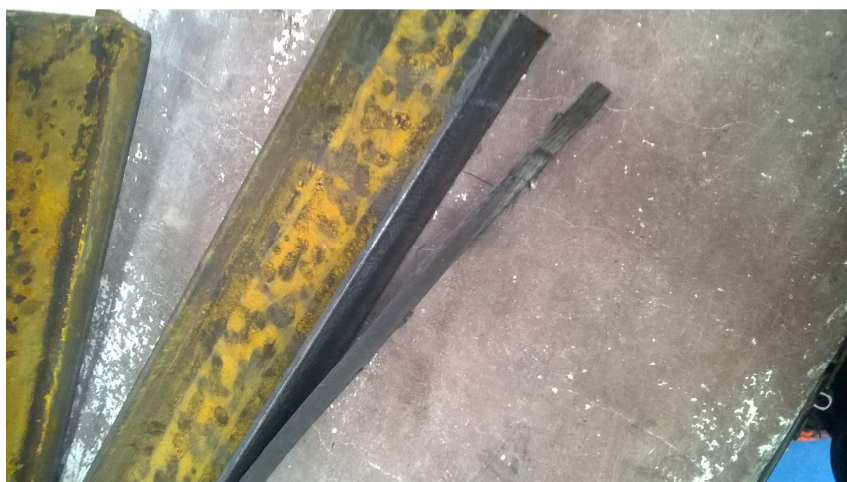
importancia reducir las dificultades que causa el reforzamiento de una obra civil, que se encuentran en funcionamiento. La restauración, refuerzo o rehabilitación de estructuras están directamente relacionados con los nuevos materiales compuestos. La resistencia, ligereza y el comportamiento de los mismos ante los agentes climáticos y la corrosión hacen de estos una excelente alternativa para su utilización en este tipo de proyectos.

5. Esta nueva tecnología empleada para reforzar elementos estructurales, es evidente el alto costo de los materiales en comparación con las técnicas tradicionales de reforzamiento, se debe principalmente al desconocimiento de la técnica en general, lo que contribuye a que exista cierto recelo por parte de los especialistas a implementar esta tecnología innovadora, sin embargo el costo se ha reducido en los últimos años con motivo de la utilización masiva de productos compuestos de fibras de carbono.

## **6.2. Conclusiones.**

1. Al momento de emplear materiales compuestos como refuerzos estructurales, algunos puntos primordiales a tener en cuenta son el tipo de material a utilizar, las solicitaciones de trabajo, condiciones ambientales, entre otros aspectos, por lo que es muy complejo y errado la extrapolación de los criterios de diseño y de los coeficientes de seguridad para los diferentes materiales compuestos, se requiere un estudio particular para cada material y aplicación del mismo
2. A pesar de emplear una resina epoxica de alta adherencia, el esfuerzo de fluencia de las vigas IPE 100 ensayadas supera el de la resina empleada, por lo tanto el FRP se desprendió lo cual no permitió que el refuerzo aporte mucho en el incremento de la resistencia a la flexión.

3. Se puede obtener un comportamiento dúctil del miembro reforzado si se aplica correctamente el refuerzo, a pesar del comportamiento completamente elástico y lineal de los materiales compuestos.
4. Incremento de la resistencia de la viga apenas se incrementó en un 3%, estos resultados indican que no es de mucha utilidad realizar refuerzos con FRP en vigas I, este tipo de refuerzo podría ser útil en elementos con menor capacidad de carga como pueden ser v
5. El extremo del refuerzo FRP debe estar lo más próximo al apoyo de la viga, en general, la longitud de adhesión debe ser lo más grande posible para hacer un mejor uso de la resistencia de las fibras para que no se produzca el fenómeno de delaminación.



**Figura 62. Desprendimiento del FRP, falla de la resina epoxica**

6. Se utilizó una resina de saturación de alta resistencia lo cual género que los tejidos unidireccionales de refuerzo ayuden a resistir de mejor manera los esfuerzos de flexión.
7. Las vigas fallaron por inestabilidad, se presentó pandeo local de la aleta o patín superior.



**Figura 63. Falla por pandeo local patín superior**

8. La clase de fibra y espesor del mismo dependen del para el cual estará destinado el refuerzo que necesite el elemento. Pero en definitiva, se llega a la conclusión que a mayor rigidez del FRP, se necesita menor espesor del refuerzo, es decir que el espesor es inversamente proporcional a la rigidez del material de refuerzo.
9. El campo donde se puede aplicar el sistema de refuerzo mediante materiales compuestos es muy amplio, se puede explotar sus altas prestaciones, maniobrabilidad y rapidez de la ejecución no sólo donde las solicitaciones de conformen un punto importante, sino, también, donde pueda establecer un beneficio económico.

### **6.3. Recomendaciones.**

1. Las secciones reforzadas con FRP tienen capacidades de rotación y curvatura mucho más reducidas que aquellas que no están reforzadas, por tanto se debe tener extremo cuidado al utilizar estas técnicas para mejorar la capacidad de estructuras que soportan solicitaciones sísmicas, se deberá inspeccionar primero el comportamiento de las vigas a reforzar y el efecto de la inversión de

las cargas sísmicas sobre el refuerzo de FRP, antes de aplicarlo en zonas de rotulas plásticas.

2. Con la finalidad de conseguir una respuesta seccional dúctil, así como incrementar resistencia, se debe diseñar el refuerzo de modo que la falla de la lámina del refuerzo compuesto se produzca la plastificación del acero estructural.
3. El uso del refuerzo FRP adherido externamente para el reforzamiento reducirá la ductilidad de la viga original. En algunos casos, la pérdida de ductilidad es muy baja. No obstante, en fracciones que experimentan una merma representativa en la ductilidad, se debe prestar exclusiva atención. Para mantener un nivel suficiente de ductilidad, se debe verificar el nivel de deformación del acero bajo las solicitaciones externas. La ductilidad adecuada se alcanza si la deformación del acero en el punto de falla del FRP por delaminación o desprendimiento, es como mínimo 0.0035 (1.7 veces la deformación a fluencia en el acero). Con esto se logra una falla dúctil antecedida por prolongadas deflexiones que proveen una premisa visible de distensión para prevenir a los ocupantes de la estructura.
4. Es importante seleccionar adecuadamente el adhesivo epóxico, debido a que si el adhesivo tiene un alto módulo de elasticidad y una baja deformabilidad, la falla dominante es el despegue, y produce un significativo decremento en la resistencia del elemento. Por lo cual, lo más factible es usar resinas de bajo módulo de elasticidad y alta deformabilidad. Si se elige el adhesivo apropiado se incrementa la posibilidad que la pieza llegue a su total resistencia sin que se produzca delaminación prematura.
5. Cuando la importancia del proyecto amerite, es de extrema importancia realizar ensayos de arranque (Pull Off de adherencia) en probetas con tejido FRP, para verificar la resistencia a la adherencia. El valor mínimo debe ser aproximada mente 15 kg/cm<sup>2</sup>. Si no se

cumple este requerimiento no se recomienda el uso de este sistema de refuerzo.

6. La cara de la viga metálica que va a recibir el material compuesto debe estar sana, libre de óxido, seca, contaminación de grasa, aceite, polvo u otras materias extrañas; que puedan causar vacíos bajo el tejido instalado o por apreciación del especialista puedan dañar las fibras. Superficies no uniformes que van a recibir el material compuesto deben ser alisadas con un amoladora. Se recomienda usar guantes y máscara para el manejo de la lámina.
7. Una consideración fundamental es determinar los mínimos de reforzamiento razonables. Estos límites son establecidos para proteger contra el colapso de la estructura, en caso de que ocurra una falla de adherencia u otra falla del sistema FRP por fuego, vandalismo u otras razones. En la eventualidad de que el sistema FRP falle, se recomienda que los demás elementos de la estructura que se encuentran sin reforzar tenga suficiente capacidad para resistir un nivel razonable de carga sin colapsar después de la redistribución de cargas.
8. Si se necesita realizar reparaciones locales en el área de pega de la lámina como: recuperación de secciones, perfilado o nivelación de la superficie del acero con epoxicos especializados, se debe esperar mínimo entre 2 a 7 días antes de instalar los tejidos de FRP.



## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, V. O., & Cházaro, R. C. (2012). Miembros en flexión: traveses y vigas, p. 2
- American Concrete Institute 440 2R. (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- American Concrete Institute 440F. (1999). Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars.
- American Concrete Institute 440R – 96. (1996). Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.
- Ceroni, F., & Prota, A. (2001). Composites in Constructions Congress. Portugal.
- Juvandes. (2010). Estado del conocimiento. (4ª edición), 2. p.19.
- Meier, U. (1991). Bridge Repair with High Performance Composite Materials. (Vol. 4).
- Michelle M. G. (1995). Engineered Materials Handbook, Engineers Guide to Composite Materials.
- Quakewrap. (2004). vigas metálicas reforzadas con fibra de carbono.
- Rendón, J. (2012). Conferencia Reforzamiento Estructural con FRP. Quito, Ecuador.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1997). ETL 1110-2-548 Engineering and design composite materials for civil engineering structures

Weaver. (2010). Estado del conocimiento. (4ª edición), 2. p.19.

### **WEBGRAFIA**

Álvarez, V. O., & Cházaro, R. C. (2012). Miembros en flexión: trabes y vigas, p.

2. Obtenido de [Http://es.scribd.com/doc/270308044/Miembros-en-Flexion](http://es.scribd.com/doc/270308044/Miembros-en-Flexion)

Catalogo sika. (s.f). <http://ecu.sika.com/>

Universidad técnica Federico Santa María. (2001). Determinación de las propiedades mecánicas: ensayo de flexión estática. Obtenido de

<http://www.ramos.utfsm.cl/doc/412/sc/6flexion.pdf>