

**EVALUACIÓN DEL PANDEO LATERAL DE PERFILES TIPO C DE ACERO ARMADOS EN I
CON ADICIÓN DE MORTERO Y CON RIOSTRAS TRANSVERSALES INTERIORES**

**ABIMAEI EDUARDO PADILLA GOMEZ
HERIBERTO RAMIREZ CARREÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2006**

**EVALUACIÓN DEL PANDEO LATERAL DE PERFILES TIPO C DE ACERO ARMADOS EN I
CON ADICIÓN DE MORTERO Y CON RIOSTRAS TRANSVERSALES INTERIORES**

**ABIMAEI EDUARDO PADILLA GOMEZ
HERIBERTO RAMIREZ CARREÑO**

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil

**Director
DALTON MORENO GIRARDOT
Ingeniero Civil, M Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2006**

*A Dios le dedico el que hasta ahora
ha sido mi mayor sueño y triunfo,
la culminación de mi Carrera como Ingeniero Civil.*

*A la mujer que ha dado la vida por mi, la que ha
sido mi mayor ejemplo y que con todo su amor y esfuerzo
logró hacer de mí una mejor persona, mi Madre
Doris*

*A las personas que han sido mi inspiración, las que estuvieron a mi lado en las buenas y malas,
las que siempre tuve presente en mi corazón para conservar las ganas de salir adelante:
mis hermanas Yully y Luisa, a mi Abuelo Luís y mi tío Jorge los quiero mucho*

*A mis amigos que siempre están conmigo en las buenas y malas dándome apoyo
Tavo(Pilón), Omar(Hobbit), Javier(Malandro), y todos aquellos que no
menciono pero que llevo en mi corazón*

*Y en especial a la mujer que me acompañó con todo
su amor en mi paso por la universidad N.D.*

A todos Muchas Gracias

Abimael (Pepe)

AGRADECIMIENTOS

El grupo autor del siguiente trabajo quiere hacer un reconocimiento en esta página a aquellas personas que de alguna forma colocaron su granito de arena como colaboración y experiencia para poder culminar con éxito este propósito.

Director del proyecto, Ing. Dalton Moreno M Sc.

Ing. Wilson Reyes, Coordinador Comercial ACESCO S.A.

Jairo Hernández, Asesor en el Laboratorio de Hormigón

Javier Rincón, Asesor en el Laboratorio de Resistencia de Materiales

Miguel Agudelo, Asesor en el Laboratorio de Resistencia de Materiales

Julio Pérez, Asesor en los trabajos de soldadura

Ing. Víctor Barrera

Ing. Adriana Serrano

A todos Muchas Gracias

TABLA DE CONTENIDO

<u>INTRODUCCION</u>	<u>1</u>
<u>1. MARCO TEORICO</u>	<u>3</u>
1.1 FLEXION SIMPLE	3
1.1.1 DESCRIPCIÓN	3
1.1.2 DIAGRAMA DE ESFUERZOS	3
1.1.3 PANDEO LATERAL DE VIGAS	5
1.2 MATERIALES	9
1.2.1 ACERO GRADO 40	9
	9
1.2.2 SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO	10
1.2.3 MORTERO DE PEGA	12
<u>2. ELABORACIÓN DE VIGAS EN I</u>	<u>17</u>
2.1 GENERALIDADES	17
2.2 SISTEMAS DE ARRIOSTRAMIENTO	19
2.2.1 CAPA DE MORTERO EN CORDÓN DE COMPRESIÓN	19
2.2.2 RIOSTRAS INTERNAS EN FORMA DE V	19
<u>3. ENSAYOS A FLEXIÓN DE LOS ELEMENTOS</u>	<u>21</u>
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	21
3.1.1 SISTEMA DE APOYOS	21
3.1.2 APLICACIÓN DE LAS CARGAS	21
<u>4. RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS</u>	<u>23</u>
4.1 COMPORTAMIENTO DE LAS VIGAS ARMADAS EN I	23
4.1.1 VIGAS SIN SISTEMA DE ARRIOSTRAMIENTO	23
4.1.2 VIGAS CON SISTEMA DE RIOSTRAS EN FORMA DE V	24
4.1.3 VIGAS CON APLICACIÓN DE MORTERO EN ZONA DE COMPRESIÓN	25

4.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS	26
4.2.1 VIGAS SIN RIOSTRAS VS. VIGAS CON RIOSTRAS EN V	26
4.2.2 VIGAS SIN RIOSTRAS VS. VIGAS CON MORTERO DE PEGA	28
4.2.3 VIGAS CON RIOSTRAS EN V VS. VIGAS CON MORTERO DE PEGA	29
4.2.4 VIGA EXPERIMENTAL VS. COMPORTAMIENTO TEÓRICO	32
<u>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>33</u>
5.1 CONCLUSIONES	33
5.2 RECOMENDACIONES	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Esfuerzos Sección Transversal. a) Esfuerzos de Flexión b) Curva Momento-Deflexión	3
Figura 2. Fuerzas de Tensión y Compresión de la sección	5
Figura 3. Pandeo de Viga Solicitada por Flexión. a) Vista Lateral; b) Vista Superior; c) Sección Transversal	6
Figura 4. Curva de Momento Nominal vs. Longitud no Soportada L_b	8
	9
Figura 5. Perímetro de Mortero y Nivel de Mortero	16

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Rollos de Acero Laminado en Frío	9
Fotografía 2. Soldador	12
Fotografía 3. Probetas de Mortero de Pega para ensayos de Compresión	13
Fotografía 4. Probetas	13
Fotografía 5. Ensayo de Desprendimiento del Mortero	14
Fotografía 6. Cordón de Soldadura	17
Fotografía 7. Puntos de Soldadura	17
Fotografía 8. Aplicación de la Soldadura	18
Fotografía 9. Vigas armadas en I	18
Fotografía 10. Capa de Mortero	19
Fotografía 11. Riostras Internas en V	20
Fotografía 12. Riostras Internas en V	20
Fotografía 13. Condiciones de Apoyos	21
Fotografía 14. Deformímetro y Discos de Hierro	22

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Curva Carga vs. Deformación Elemento 1	23
Gráfica 2. Curva Carga vs. Deformación Elemento 2	23
Gráfica 3. Curva Carga vs. Deformación Elemento 3	24
Gráfica 4. Curva Carga vs. Deformación Elemento 4	24
Gráfica 5. Curva Carga vs. Deformación Elemento 5	25
Gráfica 6. Curva Carga vs. Deformación Elemento 4	25
Gráfica 7. Curvas Vigas sin Riostras vs. Viga con Riostras en V.	26
Gráfica 8. Curvas en un mismo plano de las vigas sin riostras y las que poseen mortero de pega.	28
Gráfica 9. Vigas con Riostras en V y Mortero de Pega.	30
Gráfica 10. Curvas Carga vs. Deformación Viga Experimental y Viga Teórica.	32

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Máquinas de Laboratorio

ANEXO B. Ficha Técnica de Acero Laminado en Frío

ANEXO C. Perfiles PHR C 100x50-1.5 Calibre 16

ANEXO D. Ficha Técnica de Soldadura Según Fabricante

West Arco E6013 3/32"

ANEXO E. Ensayo de Resistencia del Mortero de Pega

ANEXO F. Ensayo de Tracción Para Varillas de Acero utilizadas en las Riostras

ANEXO G. Tablas de Resultados de ensayos

ANEXO H. Prueba de Fluencia Acero Grado 40

RESUMEN

TITULO

EVALUACIÓN DEL PANDEO LATERAL DE PERFILES TIPO C DE ACERO ARMADOS EN I CON ADICIÓN DE MORTERO Y CON RIOSTRAS TRANSVERSALES INTERIORES*

AUTORES

PADILLA GOMEZ, Abimael Eduardo

RAMIREZ CARREÑO, Heriberto**

PALABRAS CLAVES

Riostras en V, Mortero de Pega, Zona de Compresión, Pandeo Lateral, Torsión

DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de esta investigación es presentar una propuesta de un sistema de arriostramiento para vigas estructurales de acero que ayuden a mejorar su comportamiento mecánico frente a las cargas impuestas para contrarrestar el fenómeno de pandeo lateral-torsional y buscar mejores soluciones para aprovechar toda la capacidad de trabajo de dichos elementos.

La metodología utilizada para el estudio del fenómeno de pandeo lateral-torsional consistió en la elaboración de 6 vigas armadas en I con ayuda de Soldadura Eléctrica y con la utilización de perfiles tipo C de acero PHR C100x50-1.5 mm calibre 16, teniendo en cuenta su comportamiento mecánico a la flexión, y haciendo una propuesta de mejoramiento estructural utilizando Riostras Internas en Forma de V y Mortero de Pega. Para la realización de las pruebas se ensayaron 2 vigas sin arriostramiento alguno, 2 elementos con Riostras Internas en Forma de V y 2 con Mortero de Pega, haciendo una comparación simultánea de las curvas de Carga vs. Deformación entre los diferentes sistemas haciendo un resumen detallado en gráficas y tablas de lo sucedido en los ensayos.

Finalmente se concluye que la utilización de los sistemas de arriostramiento propuestos ayudan a un mejoramiento del comportamiento mecánico de las vigas utilizadas y que su implementación en obra podría ser una buena alternativa en la construcción de estructuras más eficientes y con mejores capacidades de carga, atendiendo a la solicitud de un estudio más profundo de dichos elementos con disponibilidad de laboratorios más adecuados para la realización de ensayos con mejores resultados.

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director. Dalton Moreno Girardot

SUMMARY

TITLE

EVALUATION OF THE LATERAL BUCKLING OF PROFILES TYPE C OF STEEL ARMED IN I WITH MORTAR ADDITION AND INNER CROSS-SECTIONAL STAYS *

AUTHORS

PADILLA GOMEZ, Abimael Eduardo

RAMIREZ CARREÑO, Heriberto**

KEY WORDS

Stays in V, Mortar of Beat, Zone of Compression, Lateral Buckling, Torsion

DESCRIPTION:

The primary target of this investigation is to present/display a proposal of a system of bracing for structural steel beams that help to improve their mechanical behavior front to the imposed loads to resist the phenomenon of lateral-torsional buckling and to look for better solutions to take advantage of all the ability to work of these elements.

The methodology used for the study of the phenomenon of lateral-torsional buckling consisted of the elaboration of 6 beams armed in I with the help of Electrical Weld and with the use of profiles type C of steel PHR C100x50-1.5 mm it calibrates 16, considering his mechanical behavior to the flexion, and making a proposal of structural improvement using Internal Stays in Form of V and Mortar of It beats. For the accomplishment of the tests 2 beams without bracing were tried some, 2 elements with Internal Stays in Form of V and 2 with Mortar of Beat, making a simultaneous comparison of the load curves versus Deformation between the different systems doing a summary detailed in graphs and tables of the happened thing in the tests.

Finally one concludes that the use of the proposed systems of bracing helps an improvement of the mechanical behavior of the used beams and that its work implementation could be a good alternative in the construction of more efficient structures and with better lifting capacities, taking care of the request of a deeper study of these elements with availability of suitable laboratories more for the accomplishment of tests with better results.

* Project of Degree

** Physics-Mechanics Engineering Faculty, Civil Engineering School, Director. Dalton Moreno Girardot

NOMENCLATURA

My: Esfuerzo de Fluencia

N: Newton ($1 \text{ Kg} \cdot \text{m/s}^2$)

Q: Primer momento de inercia

MPa: Mega Pascales ($1\text{E}6 \text{ N/m}^2$)

Psi: Libras por Pulgadas Cuadradas (Pound Square Inches)

τ_{prom} : Esfuerzo Cortante Promedio

Fy: Esfuerzo de Fluencia a tensión del Acero Grado 40

I: Momento de Inercia

V: Fuerza Cortante

Z: Módulo Plástico de la Sección

Mp: Momento Plástico

Lp: Límite de la longitud no arriostrada lateralmente para la total capacidad de giro de la articulación plástica caso de momento uniforme, mm

Mr: Momento Limite de Pandeo

Lr: Límite de la longitud no arriostrada lateralmente, para pandeo lateral-torsional inelástico, mm

Mcr: Resistencia Nominal a Flexión

J: Constante de Torsión de Saint Venant

Rx: Radio de Giro en X

Ry: Radio de Giro en Y

INTRODUCCION

Hoy en día los habitantes de este planeta nos encontramos frente a un mundo cambiante a un ritmo acelerado en todos sus aspectos, haciendo que cada vez mas se den diversos estilos de vida, diversos gustos en cada persona, generando así inquietudes en cuanto la forma solución de sus problemas en su diario vivir. Uno de estos aspectos tiene que ver con la manera de cómo cada persona ocupa cada uno de los reducidos espacios (como viviendas, oficinas, etc.) proporcionados por una sociedad que cada vez mas se encuentra imposibilitada y obligada debido al gran número de personas que se encuentran poblando unos lugares más que otros.

La construcción con acero a nivel mundial se convierte en una solución práctica tanto en la parte estructural como en la parte arquitectónica, por ser un material que se ajusta a las necesidades y exigencias de los actuales diseños que se requieren en los grandes proyectos, debido a sus valiosas propiedades mecánicas y a la facilidad de construcción en las obras.

Una de las soluciones más comunes que tiene un ingeniero estructural para desarrollar el diseño de una cubierta, es el uso de cerchas metálicas apoyadas sobre vigas con diversos tipos de perfiles de acero, siendo los perfiles en ángulos los más utilizados para este propósito. Pero dicho sistema estructural aplicado a grandes luces nos obliga a diseñar cerchas con alturas considerables siendo poco agradables desde el punto de vista arquitectónico, y haciendo costosa su implementación.

Es por eso que **ACESCO S.A. (Acerías de Colombia S.A.)**, como patrocinador de este proyecto y gran proveedor de aceros estructurales a nivel nacional, ofrece una amplia gamma de productos de alta calidad, diseñados para satisfacer las más exigentes necesidades de la arquitectura metálica moderna, desde perfiles en acero para estructuras, pasando por el Metaldeck (lámina de entrepiso) hasta las cubiertas metálicas, los productos **ACESCO S.A.** permiten a los arquitectos, ingenieros, diseñadores, calculistas, constructores y en general a todos los profesionales de la construcción desarrollar proyectos con los más altos estándares de calidad y diseño¹.

El interés desde un principio del siguiente trabajo fue hacer un estudio sobre el comportamiento de las vigas, especialmente vigas de sección transversal en cajón armadas con perfiles de acero **PHR C100x50-1.5 mm** calibre 16, para evaluar los efectos de pandeo lateral frente a solicitaciones de carga utilizando formas sencillas de arriostramiento diferentes al tradicional, como la utilización de **Mortero de Pega y Riostras Internas en forma de V** para asegurar la zona de compresión, con el fin de incrementar y promover su uso entre los constructores al tratar de mejorar el rendimiento

estructural utilizando la mayor capacidad plástica de los miembros estructurales, pero debido al comportamiento mecánico que presenta la sección al tener que utilizar una longitud superior a los 6 metros que tienen las vigas con las que se cuenta para el proyecto y debido a esto la utilización de cargas de más de 350 Kg. para poder llegar a una evaluación de pandeo lateral, y por el inconveniente de no contar con los equipos necesarios en los laboratorios para realizar la experiencia, se llegó a tomar la decisión de armar las vigas de sección en I, ya que es más viable desde el punto de vista práctico para hacer los ensayos y por la dificultad económica de adquirir perfiles con dimensiones más grandes.

¹Tomado de: <http://www.acesco.com>

1. MARCO TEORICO

1.1 FLEXION SIMPLE

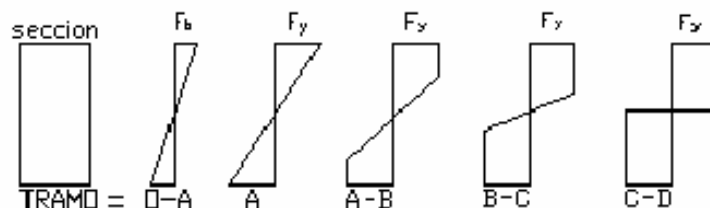
1.1.1 Descripción

Cuando la sección transversal de una viga presenta flexión en el plano paralelo a las cargas y esta no presenta ningún tipo de torcimiento, entonces se dice que hay flexión pura en dicha sección.

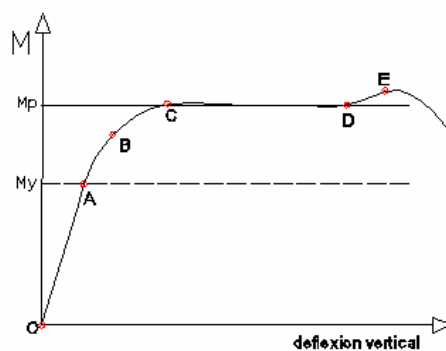
1.1.2 Diagrama de Esfuerzos

Para el estudio de los esfuerzos de flexión se considera una viga de sección rectangular, y los diagramas de dichos esfuerzos como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de Esfuerzos Sección Transversal. a) Esfuerzos de Flexión b) Curva Momento-Deflexión



(a)



(b)

En la figura 1 parte (a), se muestra el comportamiento de los esfuerzos en la sección transversal de la viga, donde se consideran cinco, que para efectos de estudio son los de mayor relevancia.

En el tramo O-A se puede notar que el esfuerzo que produce el momento aplicado es igual a f_b , y su comportamiento deflexión vs. Momento es lineal. En el punto A se alcanza el esfuerzo de fluencia en las fibras extremas, esfuerzo que es consecuencia de la aplicación del momento de fluencia M_y , la resistencia de la viga, después de sobrepasar este punto de fluencia se adjudica a las fibras mas cercanas al eje neutro, podemos observar que la resistencia ofrecida por la viga disminuye considerablemente después de pasar el punto de fluencia fenómeno que puede ser apreciado en la figura 2 (b) parte A-B y B-C, después de que la sección fluye en su totalidad figura 2 (a) parte C-D, el comportamiento de la curva se hace horizontal, indicando la ausencia de resistencia por parte del elemento a flexión, este fenómeno es conocido como plastificación de la sección; después de ocurrida la plastificación se da a lugar un efecto de endurecimiento por deformación, que consiste en un pequeño incremento de la resistencia de la viga por efectos de la deformación sufrida a lo largo de la plastificación Figura 2 (b) parte D-E.

En el punto E de la figura 2 (b) es donde se representa gráficamente los efectos del pandeo lateral en la viga, cabe mencionar que la deflexión continúa y la resistencia al momento decrece considerablemente, este es el punto inmediatamente anterior al inminente colapso de la viga.

Para hallar la formula de los esfuerzos, se utilizan las hipótesis de la teoría elástica usuales:

1. Las deformaciones se comportan linealmente frente a los momentos resistentes.
2. La sección transversal permanece plana antes y después de la aplicación de las cargas.

Cuando la viga esta sometida a un momento flexionante, se puede calcular el esfuerzo en cualquier punto utilizando la ecuación 1:

$$F_b = \frac{M \cdot c}{I} \quad \text{ó} \quad F_b = \frac{M}{S}$$

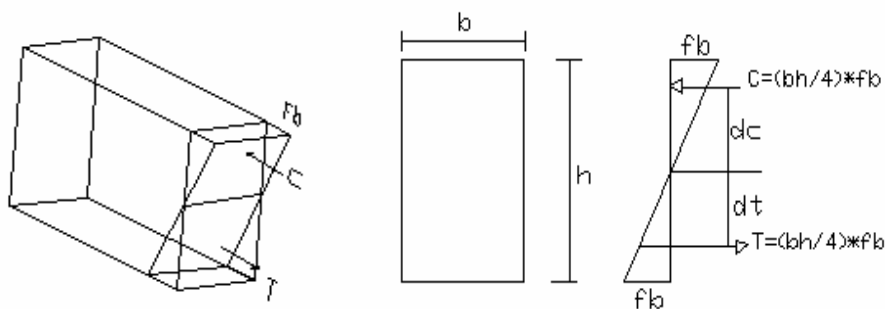
Estas ecuaciones solo son aplicables cuando los máximos esfuerzos de la viga trabajan dentro del rango elástico. Donde I es igual al momento de inercia de la sección con respecto al eje de la flexión, c es la distancia entre el centroide de la sección y la fibra mas alejada, y S es igual a I/c conocido como Modulo Elástico de la sección.

Para una sección rectangular figura 2 el momento resistente se puede hallar mediante la evaluación de las magnitudes de las resultantes de compresión y tensión. Como ya se dijo

anteriormente la variación de los esfuerzos es lineal y este aumenta a medida que aumenta la distancia desde el centroide hasta la fibra externa (y), por lo tanto, si no existe carga axial en el miembro, la resultante de compresión debe ser igual a la de tensión, y vale:

$$C = \frac{1}{2} \cdot F_b \cdot \frac{h}{2} \cdot b = \frac{b \cdot h}{4} \cdot F_b$$

Figura 2. Fuerzas de Tensión y Compresión de la sección



Entonces el momento resistente será:

$$M_r = C \cdot d_c + T \cdot d_t = 2 \cdot \frac{b \cdot h}{4} \cdot F_b \cdot \left(\frac{2h}{3 \cdot 2} \right) = \frac{bh^2}{6} \cdot F_b$$

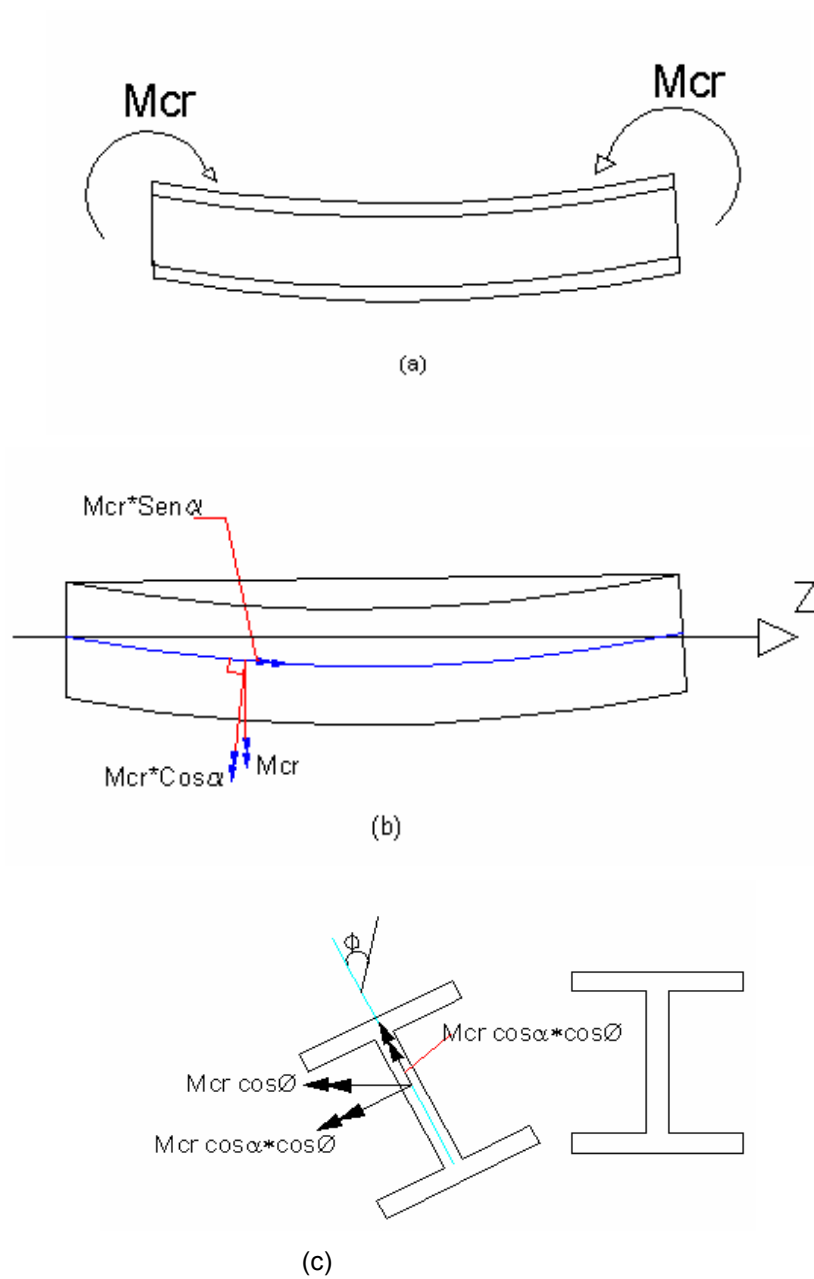
Donde el modulo elástico para la sección rectangular es igual a: $S = bh^2/6$, y a su vez el esfuerzo es igual a $F_b = M/S$.

1.1.3 Pandeo Lateral de Vigas

La sección transversal de las vigas tiene 2 regiones, la primera se encuentra solicitada por compresión y la segunda por tensión, donde en la primera región se puede considerar de comportamiento similar al de una columna con una carga axial aplicada. Para que el lado en compresión no falle por pandeo lateral, la región de tensión ayuda a restringir la viga por medio del alma de modo que esta permanezca recta. El ala comprimida de una viga flectada puede sufrir

pandeo en su propio plano bajo determinadas condiciones. Cuando ello ocurre, al estar el cordón comprimido unido al alma, provoca la torsión del alma originando el vuelco de la viga.

Figura 3. Pandeo de Viga Solicitada por Flexión. a) Vista Lateral; b) Vista Superior; c) Sección Transversal



Si una viga que es solicitada a cierto momento no se encuentra arriostrada lateralmente en toda su extensión, se puede presentar el fenómeno de pandeo lateral, el cual da únicamente cuando la inercia del eje paralelo a la carga es mayor en buena proporción al eje perpendicular al mismo como es apreciable en la figura 3 (b). La viga se flexionara primero con respecto al eje fuerte (el de mayor inercia), y cuando el valor de la carga produzca un momento igual o mayor al momento critico (M_{cr}), presentando pandeo lateral, desplazamiento que es paralelo al eje débil de la sección.

A medida que el desplazamiento o pandeo se incrementa, mayor es la solitud de las fibras a tensión de la viga, estas son las responsables de evitar que el pandeo lateral se incremente, por tal razón la viga además de sufrir desplazamiento lateral, también presenta una torcedura o torsión en la sección transversal como se ve en la figura 3 (c).

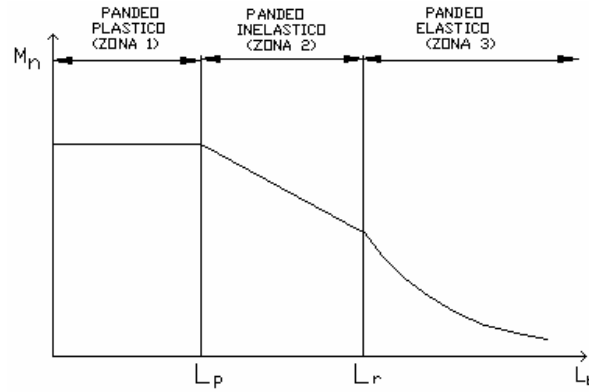
Para el estudio del comportamiento del pandeo lateral de las vigas se debe tener en cuenta el valor que tiene L_b , esta es la longitud no soportada lateralmente; esta longitud determina el rango o la zona en la cual se encuentra la viga.

Existen tres zonas en las cuales una viga se puede encontrar, como son:

- a. La zona plástica, que son vigas que poseen longitudes de arriostramiento lateral tendientes a cero, ósea se consideran soportadas continuamente.
- b. La zona inelástica, para las cuales las distancias entre los soportes laterales se consideran relativamente cortas.
- c. La zona elástica, donde las vigas están soportadas lateralmente a distancias cada vez mas largas y son consideradas esbeltas.

Para una explicación más amplia de los rangos o zonas, se elabora un gráfico para las vigas donde interactúan el momento nominal resistente de la viga con las diferentes longitudes de soporte lateral como se presenta a continuación²

Figura 4. Curva de Momento Nominal vs. Longitud no Soportada L_b



Como las vigas que se utilizarán para los ensayos poseen una longitud de 6 metros, se puede decir que estas se encuentran trabajando en la zona 3 del gráfico anterior.

² VALENCIA CLEMENT, Gabriel. Estructuras de Acero Diseño con Factores de Carga y Resistencia, Universidad Nacional Colombia, 1997

1.2 MATERIALES

1.2.1 Acero Grado 40

La compañía ACESCO produce acero laminado en frío de bajo carbono en calidades comerciales y embutición profunda, en rollos hasta de 20 toneladas o en láminas cortadas a la medida, en espesores desde 0,20 mm hasta 1.9 mm y ancho desde 800 mm hasta 1220 mm como se muestra en la fotografía 1.

Fotografía 1. Rollos de Acero Laminado en Frío



Las principales aplicaciones y usos son: fabricación de electrodomésticos, tubería soldada, tambores y recipientes de almacenamiento (utilizados en la industria de alimentos y petroquímica), láminas para galvanizar, autopartes, carrocerías, carpintería metálica, fabricación de elementos estructurales y maquinaria en general.

Este acero fabricado cumple con las especificaciones de las normas: ASTM A 366, ASTM A 568, JIS 3141 y NTC 7.³

³Tomado de: <http://www.acesco.com>

1.2.2 Soldadura por Arco Eléctrico

Es el es proceso en el que su energía se obtiene por medio del calor producido por un arco eléctrico que se forma en el espacio o entrehierro comprendido entre la pieza a soldar y una varilla que sirve como electrodo. Por lo general el electrodo también provee el material de aporte, el que con el arco eléctrico se funde, depositándose entre las piezas a unir. La temperatura que se genera en este proceso es superior a los 5500 °C.

La corriente que se emplea en este sistema puede ser continua o alterna, utilizándose en los mejores trabajos la del tipo continua, debido a que la energía es más constante, con lo que se puede generar un arco más estable. La corriente alterna permite efectuar operaciones de soldadura con el objeto de trabajo en posición horizontal y preferentemente en materiales ferrosos, mientras que la corriente continua no presenta esas limitaciones de posición y material.

El arco se enciende haciendo un corto-circuito entre el electrodo y la pieza que se va a soldar. De esta manera, en el punto de contacto el calentamiento Óhmico es tan intenso que se empieza a fundir el extremo del electrodo, se produce ionización térmica y se establece el arco.

1.2.2.1 Electroodos

Para la generación del arco existen los siguientes tipos de electrodos que son los más utilizados actualmente:

- a. Electrodo metálico: El propio electrodo sirve de metal de aporte al derretirse sobre los materiales a unir.
- b. Electrodo recubierto: Los electrodos metálicos con recubrimientos que mejoran las características de la soldadura son los más utilizados en la actualidad. Las funciones de los recubrimientos son las siguientes:
 - Proveen una atmósfera protectora
 - Proporcionan escoria de características adecuadas para proteger al metal fundido
 - Estabilizan el arco
 - Añaden elementos de aleación al metal de la soldadura
 - Desarrollan operaciones de enfriamiento metalúrgico
 - Reducen las salpicaduras del metal
 - Aumentan la eficiencia de deposición
 - Eliminan impurezas y óxidos
 - Influyen en la profundidad del arco

- Disminuyen la velocidad de enfriamiento de la soldadura

Algunos electrodos se pueden usar ya sea con corriente alterna o con corriente continua.⁴

La especificación AWS A5.1 la cual se refiere a los electrodos para soldadura de aceros al carbono, trabaja con la siguiente designación para electrodos revestidos:

E XXYY

Donde:

E: Indica electrodo para soldadura por arco, el cual por definición conduce la corriente por arco.

XX: Dos dígitos que designan la mínima resistencia a la tensión del metal depositado, en Ksi.

YY: Dos dígitos que designan las posiciones de soldadura en que puede trabajar el electrodo, el tipo de revestimiento y el tipo de corriente adecuado para el electrodo. El primer dígito indica la posición (1=todas, 2=plana y horizontal, 4 todas pero especialmente para vertical descendente), la combinación de los dos dígitos indica las otras características.

La especificación AWS A5.5 que trae los requisitos de los electrodos para soldadura de aceros de baja aleación utiliza la misma designación de la AWS A5.1 con excepción de los designadores opcionales. En su lugar, utiliza sufijos que constan de una letra o de una letra y un número, por ejemplo A1, B1, B2, C1, G, M, etc. los cuales indican la composición química.⁵

Los Electrodos utilizados para la soldadura de los perfiles tienen especificación AWS **E6013 3/32**. Ver Anexo C.

⁴Tomado de: <http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia/sica88.html>

⁵Tomado de: <http://www.westarco.com/>

1.2.2.2 Aparato de Arco Eléctrico

Los aparatos de arco eléctrico permiten la soldadura eléctrica, la mayoría se alimentan de una red eléctrica de 110 V y están equipados con un hilo de tres hebras y de una simple toma de tierra, dos hilos salen del puesto de soldadura; uno estará unido al electrodo, el otro a la pinza de masa, que estará unida, al mismo tiempo, a la pieza metálica a soldar. Así como se muestra en la figura en la fotografía 2.

Fotografía 2. Soldador



1.2.3 Mortero de Pega

Para la elaboración del mortero de pega 1:4 con una resistencia última de 2680 Psi (Ver Anexo D) se utilizaron los siguientes materiales:

- a. Cemento Tipo I
- b. Agregado Fino (Arena)
- c. Agua

Los materiales utilizados anteriormente cumplen con las Normas Técnicas Colombianas NTC.

Fotografía 3. Probetas de Mortero de Pega para ensayos de Compresión



1.2.3.1 La Fuerza de Adherencia del Mortero de Pega

Esta fuerza de adherencia proviene de la rugosidad natural de las corrugaciones poco espaciadas en la superficie de las varillas, ya que la superficie de los perfiles no revisten rugosidad alguna, nos permitimos obtener un valor de **coeficiente unitario de adherencia** para el concreto que posteriormente implementaremos como refuerzo en las vigas I para evitar su pandeo lateral⁶.

1.2.3.2 Ensayo de Desprendimiento del Mortero de Pega

Se diseñaron 2 probetas para hallar un valor promedio del coeficiente unitario de adherencia del concreto con el acero sin rugosidad.

Se tomaron tubos cuadrados de 3"X3", calibre 14, de 16 cm. de altura, como se aprecia en la fotografía 4.

Fotografía 4. Probetas



Para asegurarse que el desprendimiento se produjera entre la superficie interna del perfil y el concreto, se elaboro un dispositivo a manera de pistón, que se desplazaba en toda la extensión de la probeta como se observa en la foto anterior, de esta manera obtuvimos una forma sencilla de encontrar el coeficiente de adherencia del concreto.

En la maquina universal aplicamos carga axial a estas probetas, una a la vez, y se obtuvo un valor de carga para cual el concreto se desprendió de la superficie interna del perfil, cabe decir que este desprendimiento fue lento y que a medida que avanzaba el pistón con el concreto la carga disminuía, en la siguiente fotografía 5 se puede apreciar la secuencia de desprendimiento.

Fotografía 5. Ensayo de Desprendimiento del Mortero



⁶ NILSON, ARTHUR. Diseño de Estructuras de Concreto

En el laboratorio, después de probar la probeta en la maquina universal y obtener un valor de carga para la cual se desprende el concreto de la superficie del perfil probeta, podemos obtener el valor del coeficiente de la siguiente manera:

1. Obtenemos el valor del área interna recubierta de concreto en cada una de las probetas.
Entonces el perímetro interno del perfil de la probeta es de $7.22*4=28.88$ cm.
Para la probeta A el valor de área es de $28.88*14.5=418.76$ cm².
Para la probeta B el valor de área es de $28.88*15.2=438.97$ cm².
2. En el primer ensayo (probeta A) , el valor de carga fue de 200 Kg = 2000 N, y para el segundo ensayo (probeta B), el valor de carga fue de 250 Kg= 2500 N.
3. El esfuerzo en cada una de las probetas fue de:
 $r = \text{fuerza}/\text{área}$ $r_A = 200\text{Kg} / 418.76\text{cm}^2 = 0.4776 \text{ Kg/cm}^2 = 0.04776 \text{ MPa}$
 $r_B = 250\text{Kgs} / 438.97\text{cm}^2 = 0.5695 \text{ Kg/ cm}^2 = 0.05695 \text{ MPa}.$

Se promedian los valores de esfuerzo y se obtiene:

$$0.04776 + 0.05695 = 0.1047 / 2 = 0.05235 \text{ MPa}.$$

Entonces este esfuerzo promedio es el coeficiente unitario de adherencia, ahora vamos a averiguar, que fuerza necesitamos aplicar aproximadamente para desprender de forma completa y pareja el concreto de nuestra viga de prueba, entonces sacamos el área de la canaleta de la viga.

El perímetro de la sección sumergida en concreto es igual a:

$$(8.38*2) + (3.83*4) + 37 = 16.76 + 15.32 + 37 = 69.0\text{mm} = 6.908 \text{ cm}.$$

Como se tiene la longitud de la viga podemos calcular el área de contacto entre el concreto y el acero.

$$L = 600 \text{ cm. Perímetro sumergido} = 6,908 \text{ cm}.$$

$$\text{Área de contacto} = 600 \text{ cm.} * 6,908 \text{ cm.} = 4144,8 \text{ cm}^2 = 0,41448 \text{ m}^2.$$

Se procede a conocer el esfuerzo cortante promedio que se encuentra entre el mortero de pega y la viga de acero.

Como las 2 vigas con mortero ensayadas presentaron una falla por torsión a los 122,5 Kg entonces la fuerza seria igual a:

$$V = 122.5 \text{ Kg} * 10 = 1225 \text{ N} = 1.225 \text{ KN}$$

$$Q = A*y = 0.41448 * 0.5 = 0.2072 \text{ m}^3$$

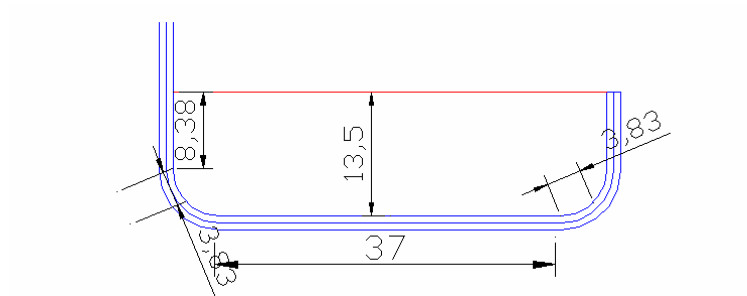
De Tablas del fabricante para un solo perfil I = $5.11822\text{E}-8 \text{ m}^4$

Utilizando la ecuación 4 se tiene el esfuerzo cortante promedio

$$\tau_{prom} = \frac{V \cdot Q}{I \cdot P} = (1.225 \cdot 0.2072) / (0.511822E-7 \cdot 6.908) = 0.0718 \text{ MPa}$$

Ver figura 5.

Figura 5. Perímetro de Mortero y Nivel de Mortero



2. ELABORACIÓN DE VIGAS EN I

2.1 GENERALIDADES

Para el armado de las 6 vigas en I requeridas para el desarrollo de los ensayos de flexión se dispuso de 12 vigas **PHR C100x50-1.5 mm.** calibre 16. Por recomendación del fabricante se armaron las vigas aplicando un cordón de soldadura **E6013 3/32** de 5 cm. de longitud cada 25 cm. Como se muestra en la fotografía 6.

Fotografía 6. Cordón de Soldadura



Para evitar el recalentamiento de los perfiles y el torcimiento de los mismos por efecto de la aplicación de la soldadura se colocaron puntos de soldadura cada 50 cm. en la parte superior e inferior con ayuda de una prensa y así garantizar un buen acople como se muestra en la fotografía 7.

Fotografía 7. Puntos de Soldadura



Para la aplicación de la soldadura se llevó un arco corto y una velocidad de avance adecuada al tipo de junta y al diámetro que se empleo del electrodo. Al soldar en filete horizontal se mantuvo el electrodo a un ángulo de elevación de 50 a 70° con relación a la platina inferior y una inclinación de 10 a 20° en la dirección de avance.

Entre mas delgada la platina y mayor corriente, se debe usar un ángulo de elevación mayor para evitar recalentamiento de la platina vertical como se muestra en la fotografía 8.

Fotografía 8. Aplicación de la Soldadura



Como resultado del trabajo de soldadura se obtuvo las vigas para las pruebas de pandeo lateral ver fotografía 9.

Fotografía 9. Vigas armadas en I



2.2 SISTEMAS DE ARRIOSTRAMIENTO

2.2.1 Capa de Mortero en Cordón de Compresión

Después de la elaboración del mortero de pega se aplicó una capa de 1,35 cm. de altura que corresponde al borde de la pestaña del canal de compresión en toda la longitud de 6 mt de la viga, pasados 28 días se procedió a realizar los ensayos con estas vigas. Ver fotografía 10.

Fotografía 10. Capa de Mortero



2.2.2 Riostras Internas en Forma de V

Para el desarrollo de las riostras internas se seleccionaron varilla de acero corrugado con diámetro de 6 mm. Ver fotografías 11 y 12, a las cuales se les hizo un ensayo de tracción para obtener el esfuerzo de fluencia nominal de 59.715 psi y un esfuerzo máximo de 83601 psi. Ver Anexo E. Dichas riostras se colocaron internamente en la viga a una longitud experimental de $L_p = 1.20$ mt obtenido de cálculos teóricos sobre el comportamiento mecánico de la sección PHR C 100x50-1.5 calibre 16. Ver Anexo C.

Fotografía 11. Riostras Internas en V



Fotografía 12. Riostras Internas en V



3. ENSAYOS A FLEXIÓN DE LOS ELEMENTOS

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

3.1.1 Sistema de Apoyos

Para la realización de los ensayos se implementó el sistema de vigas simplemente apoyadas en los extremos de las mismas, impidiendo el giro de la sección transversal haciendo uso de tornillos en uno de los extremos y colocando discos de peso en ambos lados de la viga como se muestra en la fotografía 13.

Fotografía 13. Condiciones de Apoyos



3.1.2 Aplicación de las Cargas

Las vigas ensayadas se cargaron en el centro de luz igual a 3 metros, se midieron deformaciones verticales en milímetros (mm.) en este punto con 1 deformímetro de 0.01 mm. de precisión y se utilizaron discos de hierro (ver Tabla 1) previamente pesados en Kilogramos (Kg.), (ver Fotografía 14).

Tabla 1. Discos de Hierro

Denominación	20 Kg.	10 Kg.	5 Kg.	2.5 Kg.
Cantidad	5	1	2	2

Cabe anotar que la aplicación de la carga no fue continua debido a la falta de maquinas de laboratorio adecuadas para los ensayos por tal razón se utilizaron discos de hierro.

Fotografía 14. Deformímetro y Discos de Hierro



Para los diferentes ensayos a flexión se tomaron las 6 vigas divididas en 3 grupos así:

- a. 2 Elementos sin sistema de arriostramiento.
- b. 2 Elementos con sistema de riostras internas en V.
- c. 2 Elementos con aplicación de capa de mortero de pega en la Zona de Compresión.

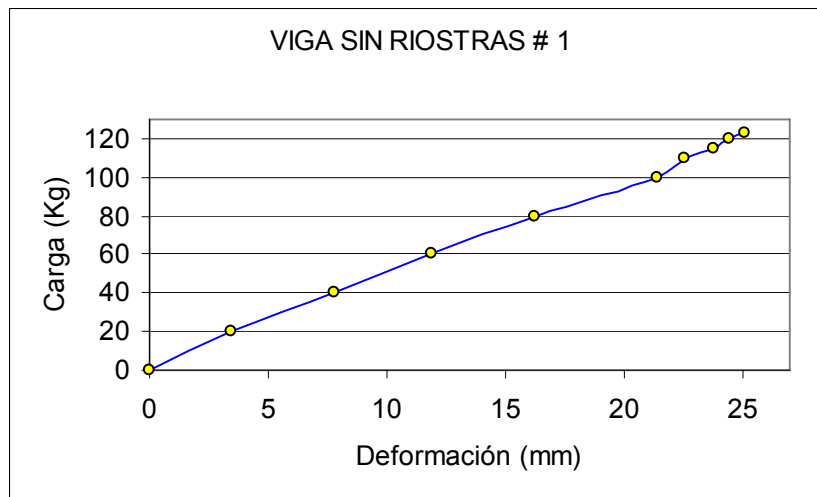
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE DATOS

4.1 Comportamiento de las Vigas Armadas en I

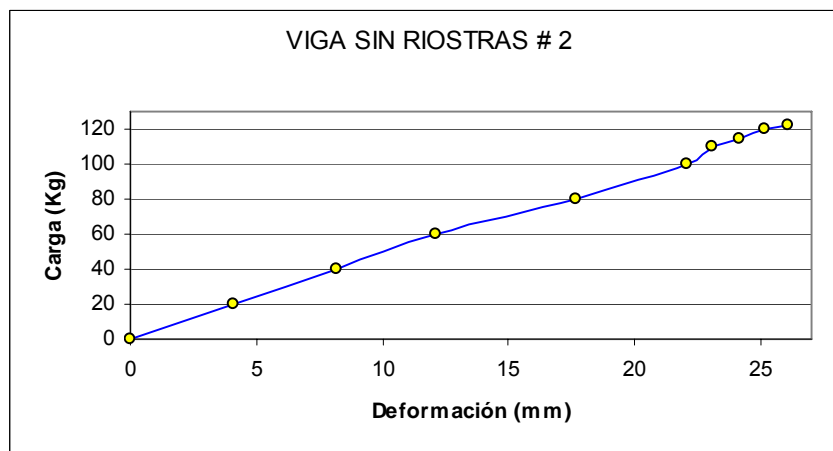
Para los 3 tipos de ensayo se tomaron datos de carga y deformación para observar el comportamiento de las vigas frente a la sollicitación y se construyeron las gráficas de Carga (Kg) vs. Deformación (mm) con sus respectivos datos. Ver Anexo F.

4.1.1 Vigas Sin Sistema de Arriostamiento

Gráfica 1. Curva Carga vs. Deformación Elemento 1



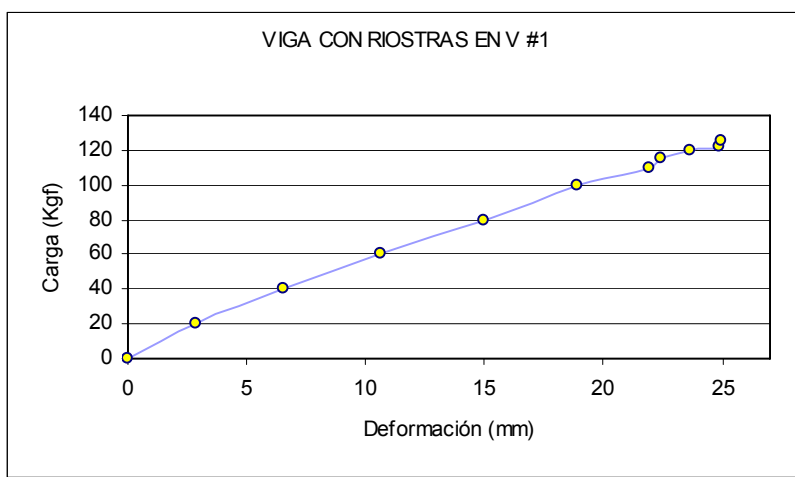
Gráfica 2. Curva Carga vs. Deformación Elemento 2



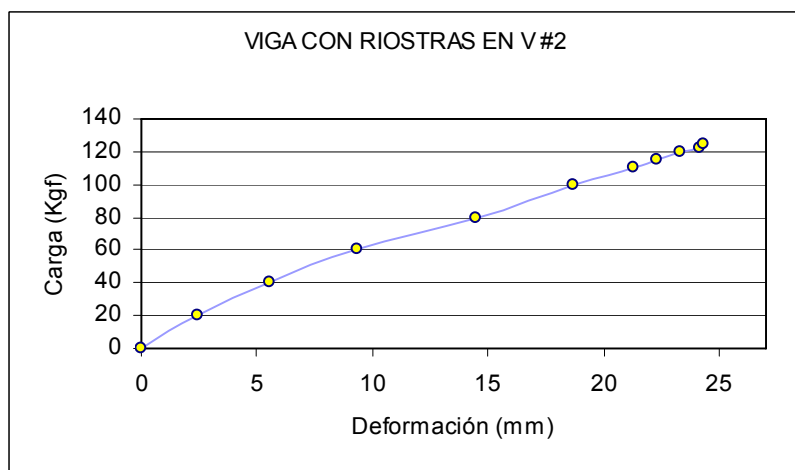
Nota: La estabilidad en ambas vigas se mantuvo hasta la carga de 100 Kg. donde no se presento torsión de la sección transversal.

4.1.2 Vigas Con Sistema de Riostras en Forma de V

Gráfica 3. Curva Carga vs. Deformación Elemento 3



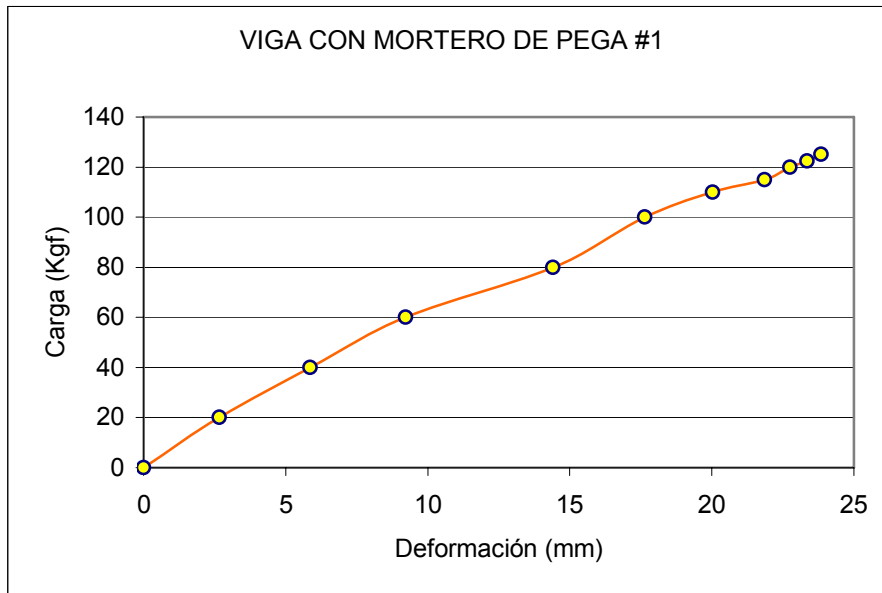
Gráfica 4. Curva Carga vs. Deformación Elemento 4



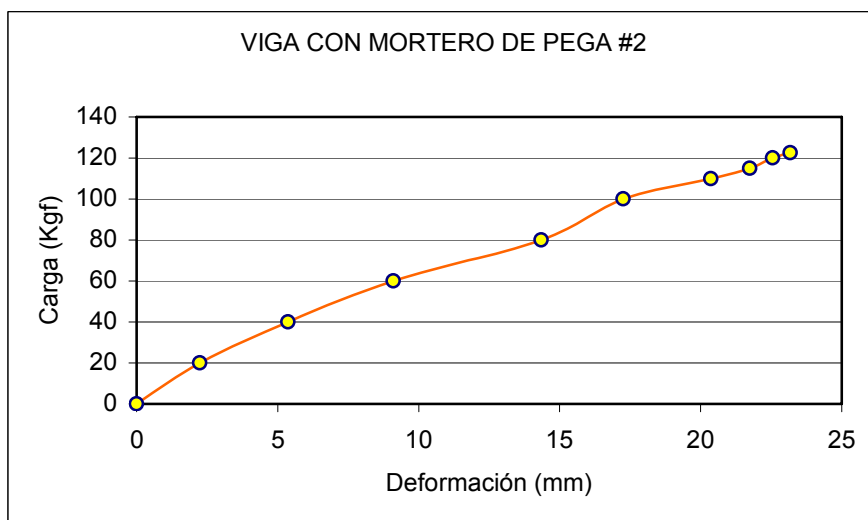
Nota: La estabilidad en ambas vigas se mantuvo hasta la carga de 120 Kg. donde no se presento torsión de la sección transversal.

4.1.3 Vigas con Aplicación de Mortero en Zona de Compresión

Gráfica 5. Curva Carga vs. Deformación Elemento 5



Gráfica 6. Curva Carga vs. Deformación Elemento 4



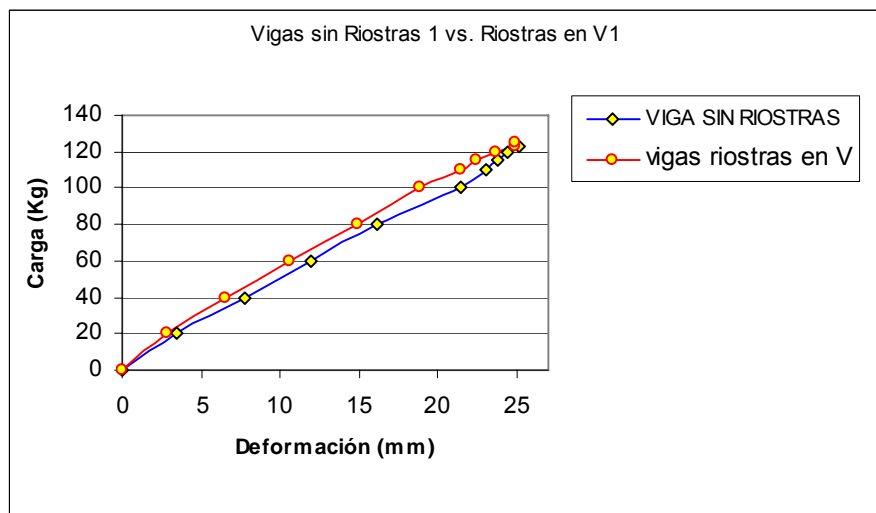
Nota: La estabilidad en ambas vigas se mantuvo hasta la carga de 122.5 Kg. donde no se presento torsión de la sección transversal.

4.2 Comparación de Resultados

4.2.1 Vigas sin Riostras vs. Vigas con Riostras en V

Dado el parecido entre los resultados de los datos obtenidos en el ensayo 1 con respecto con el ensayo 2, confrontaremos los ensayos 1, para cada uno de los análisis que se deben hacer.

Grafica 7. Curvas Vigas sin Riostras vs. Viga con Riostras en V.



Como primer punto importante de comparación tomaremos la carga a la cual se pudo apreciar la inestabilidad, cabe aclarar que esta es producto de un torcimiento de la viga en el centro de luz, donde fue aplicada la carga.

Para la curva sin riostras 1 la carga de 100 Kg, produce dicha inestabilidad, caso contrario sucedió para las vigas con riostras en V ya que esta carga no fue suficiente para hacerla inestable y necesitó una carga de 120 Kg para lograr la falla, esto da como resultado un punto de comparación un aumento de capacidad para soportar carga sin presentar torsión, siendo este incremento igual a 20 Kg en porcentaje representa un 20 % en el incremento de carga.

Antes de que las vigas presentaran torsión, se puede apreciar que frente a una misma carga la viga con arriostramiento en V, ofrece una deflexión mucho menor justo antes del punto de carga de 120 Kg en donde se empiezan a notar los efectos de la torsión en la viga arriostrada.

A continuación se muestran las diferencias en los valores de las deflexiones en las dos vigas, frente a las mismas cargas:

Tabla 2 Viga sin Riostras vs. Sistema de Riostras en V

Carga (Kg.)	Def. Sin Riostras (mm)	Def. Riostras en V (mm)	Diferencia Def. (mm)	Disminución de la Deflexión (%)
0	0,0	0,0	0,0	0,00
20	3,5	2,8	0,6	18,16
40	7,8	6,5	1,3	16,54
60	11,9	10,7	1,3	10,73
80	16,2	15,0	1,2	7,65
100	21,4	18,9	2,5	11,85
110	23,0	21,5	1,5	6,52
115	23,8	22,4	1,4	6,00
120	24,4	23,6	0,8	3,28
122,5	25,1	24,9	0,2	0,88

Analizando los datos de la tabla anterior antes de la inestabilidad de la viga sin arriostramiento (carga de 100 Kg.), en promedio la deflexión disminuye 1.39 mm.

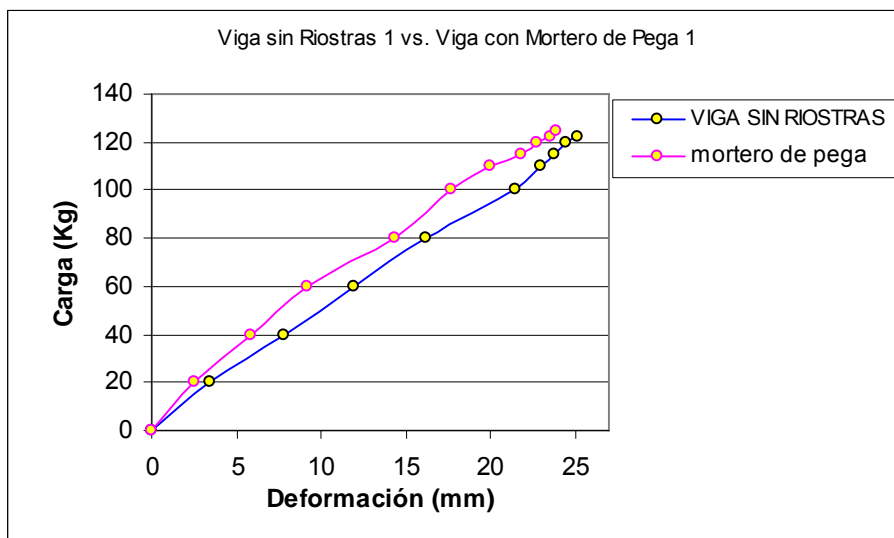
En la grafica 7, están las dos curvas que representan, los comportamientos de la viga sin riostras y la que posee riostras en V, el aumento de la pendiente de la grafica con trazos rojo, con respecto a la grafica azul, indica una clara disminución de la deformación frente a una misma solicitud de carga, siendo esta disminución de hasta el 18%.

A medida que la carga se acerca al valor que produce la inestabilidad en la viga sin riostras se puede apreciar que la diferencia de deformaciones va disminuyendo, pero en el punto de inestabilidad de dicha viga es natural que esta diferencia se pronuncie aun mas, ya que esta empieza a manifestar una deformación excesiva, debido a que la viga con riostras aun no a llegado a su carga de inestabilidad, esta sigue reaccionando ante las cargas siguiendo una línea de tendencia recta, hasta que se presenta la falla por torsión en la carga de 120 Kg.

4.2.2 Vigas sin Riostras vs. Vigas con Mortero de Pega

Para este caso la carga de inestabilidad de la viga con mortero de pega tiene un aumento considerable con respecto a la viga sin riostras llegando hasta los 122.5 Kg. Lo que nos representa un aumento en la resistencia a la flexión del 22.5%.

Grafica 8. Curvas en un mismo plano de las vigas sin riostras y las que poseen mortero de pega.



En esta grafica la pendiente sigue siendo la característica que nos indica un incremento en la resistencia de la viga con mortero de pega, pero ya que este aumento de la pendiente es mayor, entonces podemos afirmar en base a esta observación que este sistema permite que la viga resista más que la que no tiene arriostamiento alguno.

Tabla 3 Diferencia de Deformaciones Sistema Riostras en V y Mortero de Pega

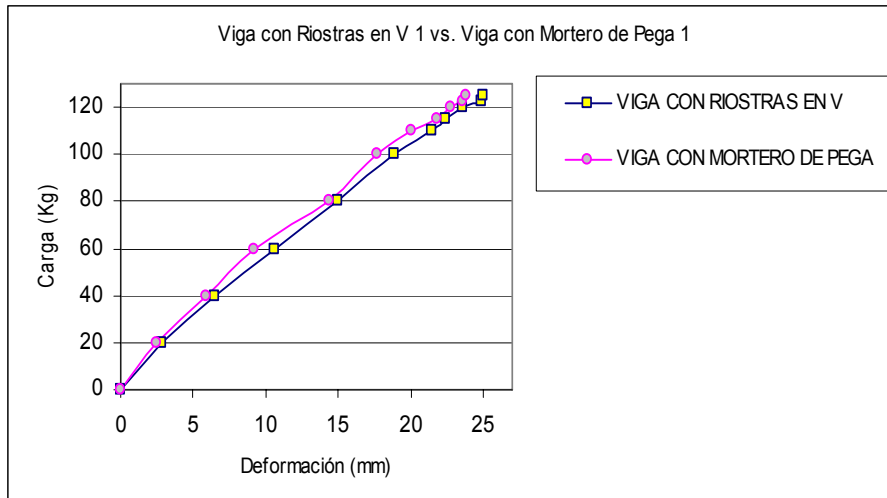
Carga	Def. Sin Riostras	Def. Mortero de pega	Diferencia Def.	Disminución de la deflexión
(Kg)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)
0	0,0	0,00	0,00	0,00
20	3,5	2,50	0,97	27,95
40	7,8	5,86	1,94	24,87
60	11,9	9,22	2,71	22,72
80	16,2	14,40	1,81	11,17
100	21,4	17,64	3,79	17,69
110	23,0	20,04	2,96	12,87
115	23,8	21,85	1,98	8,31
120	24,4	22,75	1,67	6,84
122,5	25,1	23,60	1,52	6,05

En este caso, lo mismo que en el anterior, la diferencia de carga que puede soportar las vigas antes del torcimiento de las mismas, se hace evidente en los porcentajes de disminución de la deflexión, ya que en la carga de 100 Kg la viga sin arriostramiento presenta los efectos de la torsión, el porcentaje de disminución de la deflexión aumento, lo que quiere decir que la viga sin arriostramiento cedió, mientras que la que tiene el mortero de pega sigue soportando la carga sin presentar la falla por torsión; retomando el cuadro de el análisis anterior, para la misma carga de 100 Kg., se produce una disminución del 11.85 %, mientras que en el cuadro que representa la diferencia entre los desempeños de la viga no arriostrada vs. la de mortero de pega muestra para este valor de carga una disminución del 17.69%, esto nos indica un mejoramiento en la resistencia de la viga con mortero de pega, aun mejor que la que tiene riostras en V.

4.2.3 Vigas con Riostras en V vs. Vigas con Mortero de Pega

A continuación se hará la comparación entre las dos hipótesis planteadas para incrementar la rigidez de las vigas I, utilizando como herramientas un grafico donde se dibujaran las curvas de carga vs. Deformación y una tabla donde se puede apreciar claramente las diferencias entre los efectos causados por las cargas en las vigas ensayadas.

Grafica 9. Vigas con Riostras en V y Mortero de Pega.



Aunque ambos sistemas de arriostramientos propuestos, Riostras en V y Mortero de Pega, han superado la carga de falla con respecto a las vigas que no poseen dichos refuerzos, el interés es saber cual de estas dos propuestas proporciona una mejoría en cuanto la resistencia de las vigas; ya las cargas que fueron aplicadas son iguales para los dos casos.

Se evidencia que la línea que representa el comportamiento de la viga con mortero de pega posee una mayor pendiente, se puede decir que tiene mayor resistencia que la que tiene riostras en V.

Tabla 4 Riostras en V vs. Mortero de Pega

Carga (Kg.)	Def. Riostras en V (mm)	Def. Mortero de pega (mm)	Diferencia Def. (mm)	Disminución de la deflexión (%)
0	0,0	0,00	0,00	0,00
20	2,8	2,50	0,34	11,97
40	6,5	5,86	0,65	9,98
60	10,7	9,22	1,00	9,39
80	15,0	14,40	0,57	3,81
100	18,9	17,64	1,25	6,62
110	21,5	20,04	1,46	6,79
115	22,4	21,85	0,55	2,46
120	23,6	22,75	0,87	3,68
122,5	24,9	23,60	1,30	5,22

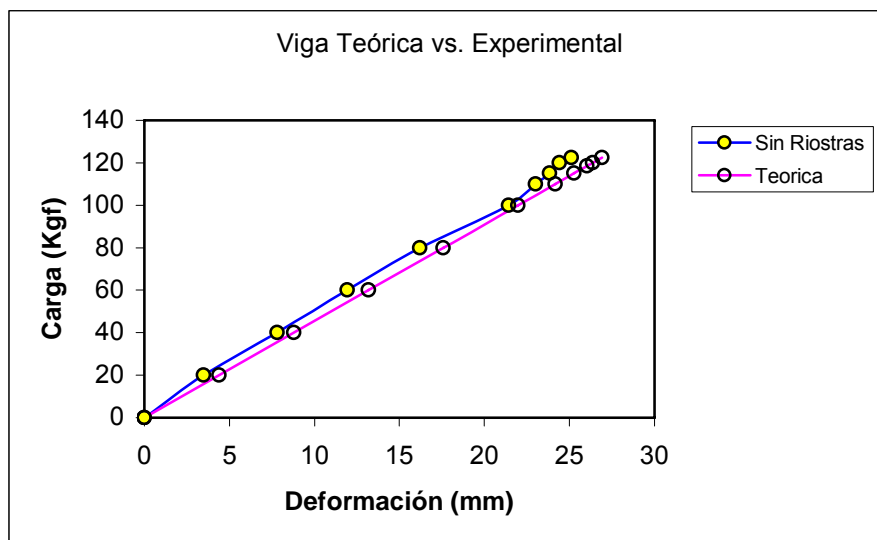
La columna que tiene los valores de la diferencia de deformaciones es resultado de la resta entre las deformaciones sufridas por las vigas con riostras en V menos la de mortero de pega, siendo así estos valores todos mayores que 0, esto indica que los valores de deformación para la viga con mortero de pega fueron menores que los de riostras en V, por consiguiente las vigas con mortero de pega soportaron con mayor efectividad las diferentes solicitaciones de carga, y su capacidad para soportar carga antes de torcerse también es mayor, ya que las vigas con riostras V soportaron una carga de 120 Kg para producir torsión, mientras que para las de mortero de pega esta carga obtuvo un valor superior e igual a 122.5 Kg, teniendo así una diferencia de 7.5 Kg que representa un aumento del 6.5%.

Para un requerimiento de carga relativamente bajo las diferencias de las deflexiones son las mayores, mejorando así la resistencia de la viga con mortero de pega hasta en un 12% con respecto a la viga con riostras en V.

4.2.4 Viga Experimental vs. Comportamiento teórico

Se analizó de igual manera las diferencias que existen entre la curva teórica, que es establecida a partir de las formulas que encontramos en los textos guías, contra la curva que se graficó con los resultados de la experiencia, con la aplicación de las diferentes cargas, esta se presentara en un plano que contiene las dos curvas y así se podrán apreciar las discordancias entre estas.

Grafica 10. Curvas Carga vs. Deformación Viga Experimental y Viga Teórica.



Es claro que las dos curvas tienen una tendencia definida, y aunque discrepan una de la otra estas son similares, se hace evidente que la viga experimental ofrece una mayor resistencia que la teórica, ya que como se había afirmado con anterioridad, la curva que presenta la mayor pendiente, es la que se refleja menos a la misma solicitud de carga. En el punto de la curva que representa la deflexión a una solicitud de 100 Kg. de carga, es claro que la curva empieza a sufrir un cambio en la distancia entre los subsecuentes puntos, esta concentración se debe a que se tomaron pesos con diferencia cada vez más pequeñas, para poder apreciar el fenómeno.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

CONCLUSION GENERAL

Como se aprecia en los cálculos presentados en el Anexo C, la viga teórica tendría una falla al aplicar una carga de 118,4 Kg. (1184 N) lo que en la realidad no sucedió con las vigas sin riostras pero en cuanto a los sistemas de arriostamiento propuestos se observa que hay una mejoría ya que se presentó un aumento del 20% y 22.5% en los sistemas de Riostras en V y Mortero de Pega respectivamente con respecto a las vigas sin riostras.

SISTEMA DE RIOSTRAS EN V

Luego de realizados los ensayos con las vigas armadas con este sistema de arriostamiento para el ala de compresión, se pudo observar una mejoría en el comportamiento estructural de la sección con respecto a la resistencia de la viga frente a las solicitaciones dando un poco mas de rigidez para resistir la torsión, como se predijo con los cálculos realizados en el Anexo C la viga sin riostras falla por torsión a una carga de 100 Kg. y la vigas con riostras en V falla por torsión a una carga de 120 Kg. lo que quiere decir que el sistema tuvo una mejoría del 20% pero con respecto a las deformaciones para una misma carga de 100 Kg. en ambos sistemas se tuvo una mejoría del 11.8%.

Se aprecia que el sistema de Arriostamiento en V propuesto, proporciona una disminución a las deformaciones por carga entre un 11% para una misma carga de 100 Kg. con respecto a la viga sin arriostamiento.

Una de las principales ventajas de este sistema es su fácil implementación en una obra por lo sencillo de su construcción, además el aumento del peso de la viga es despreciable.

SISTEMA DE MORTERO DE PEGA

Este sistema probó ser el más efectivo para la disminución de las deflexiones por carga por ser el que más resistió antes de presentar una falla por torsión, además en toda la extensión de la curva siempre estuvo presente dicha disminución. Para una carga de 100 Kg. se tuvo una mejoría del 17.7% en cuanto a las deformaciones y por otro lado el sistema mostró tener un incremento en la resistencia de la aplicación de las cargas del 22.5% con respecto a las vigas sin riostras.

El incremento en el peso de las vigas por consecuencia de la aplicación del mortero representa la mayor desventaja del sistema, además que su construcción es muy poco viable dentro de una obra en cuanto a la espera del fraguado del mortero ya que este es implementado en la zona superior que está en compresión del perfil armado.

PANDEO LATERAL

El objetivo principal de este trabajo de grado era analizar el fenómeno de pandeo lateral frente a las solicitaciones de carga, y proveer un sistema para mejorar el comportamiento de las vigas armadas, pero para el tipo de vigas que utilizamos en los ensayos, la torsión fue el factor preponderante de falla, siendo este fenómeno el que primero se presentó, haciéndose evidente a unos valores de carga relativamente bajos, por tal motivo el pandeo lateral quedó relegado frente a esta manifestación temprana de la torsión en los diferentes ensayos.

5.2 RECOMENDACIONES

SISTEMA DE RIOSTRAS EN V

Para el sistema de Vigas con Riostras en V es posible que el comportamiento a la torsión mejore utilizando un espaciamiento de las varillas no en $L_p=1.2\text{m}$ como se propuso sino con una distancia un poco menor como por ejemplo $L = 0.6\text{ m}$ para poder cubrir una mayor región del ala de compresión.

SISTEMA DE MORTERO DE PEGA

En cuanto al sistema de Mortero de Pega como ya se manifestó, la mayor desventaja es el aumento considerable peso de la viga al estar toda el ala de compresión cubierta de mortero, lo que podría mejorarse utilizando una longitud de mortero de pega de $L/3 = 2\text{ mt}$ desde el centro de luz para que el peso sea menor.

Para las vigas con mortero de pega es posible que el comportamiento sea favorable al adicionar un enmallado adherido a la zona de compresión para que haya un mejor agarre del mortero con la viga en la misma longitud propuesta anteriormente de $L/3 = 2\text{ mt}$ desde el centro de luz.

Con las mejoras anteriormente expuestas se podría mejorar el comportamiento de las vigas y también se haría un ahorro del mortero utilizado gastando menos materiales como cemento y arena haciendo más barata su implementación.

BIBLIOGRAFIA

VALENCIA CLEMENT, Gabriel. Estructuras de Acero Diseño con Factores de Carga y Resistencia, Universidad Nacional Colombia, 1997

NIILSON, ARTHUR. Diseño de Estructuras de Concreto

MacCormac, Jack. Diseño de Estructuras de Acero Método LRFD

ANEXO A. Máquinas de Laboratorio

Fotografía A1. Maquina Universal de Ensayos marca TREBEL capacidad 40 Toneladas.



Fotografía A2. Maquina para Tracción marca INSTRON modelo 1130 capacidad 1 Tonelada.



Fotografía A3. Maquina para Universal para Ensayos a Compresión de Concreto marca AMSLER 40 Toneladas.



ANEXO B. Ficha Técnica de Acero Laminado en Frío

Tabla B1. Propiedades Mecánicas

PROPIEDADES MECÁNICAS					
Elongación %	Dureza HRB	Composición química			
		%C máx.	%Mn máx.	%P máx.	%S máx.
25 min.	60 máx.	0.07	0.30	0.030	0.035

Tabla B2. Tolerancias de Espesor

TOLERANCIAS ESPESOR				
Ancho especificado hasta (mm)	Tolerancia superior e inferior (+/-) Espesor nominal (mm)			
	Hasta 0.40	Más de 0.40 a 1.0	Más de 1.0 a 1.2	Más de 1.2 a 2.5
1220	0.050	0.075	0.100	0.125

Tabla B3. Longitudes

LONGITUD		
Longitud Especificada (mm)		Tolerancias sobre la longitud especificada (no hay tolerancia inferior)
Sobre	Hasta	mm
300	1500	6
3000	6000	35

Tabla B4. Anchos

ANCHO		
Ancho Especificado (mm)		Tolerancias sobre el ancho especificado (no hay tolerancia inferior)
Sobre	Hasta	mm
600	1200	5
1200	1500	6
1500	3000	20

Tabla B5. Planitudes

PLANITUD				
Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Tolerancia planitud, mm punto de fluencia mínimo (MPa)	
			menos de 310 Mpa	de 310 Mpa a 345 MPa
De 0.35 a 0.8	Hasta 900	Hasta 3000	8	10
	Más ancho	Más largo	10	15
Más de 0.8	Hasta 1200	Hasta 3000	5	5
	Más ancho	Más largo	8	10

Tabla B6. Espesores

ESPESORES ESTANDAR			
Espesor (mm)	Ancho Acero laminado en frío		
	914	1000	1220
1.90		X	X
1.50		X	X
1.20	X	X	X
1.15	X	X	X
1.10	X	X	X
1.00	X	X	X
0.90	X	X	X
0.85	X	X	X
0.75	X	X	X
0.70	X	X	X
0.60	X	X	X
0.45	X	X	X

Tomado de: <http://www.acesco.com>

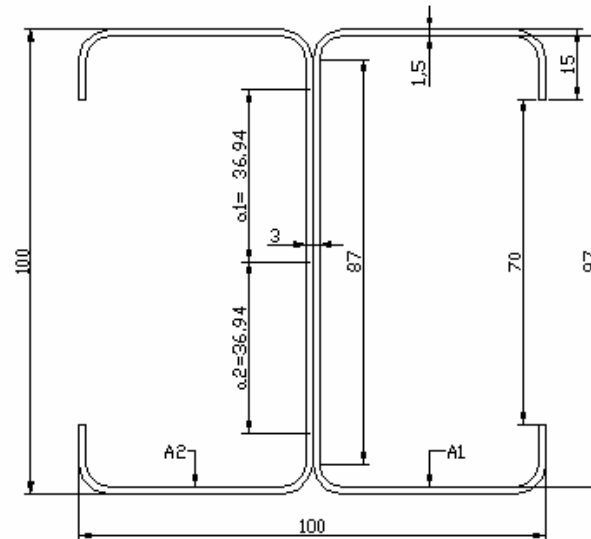
ANEXO C. Perfiles PHR C 100x50-1.5 Calibre 16

➤ **Propiedades y Comportamiento Mecánico:** Las Propiedades mecánicas del perfil están basadas en las especificaciones técnicas dadas por el fabricante ACESCO S.A. y el comportamiento de la sección armada está calculado según las ecuaciones presentadas en la NSR-98 Título F- Estructuras Metálicas teniendo en cuenta la forma de la sección transversal en I.

Sección Armada en I

A (mm)	B (mm)	C (mm)	A' (mm)	B' (mm)	e (mm)	A_G (mm ²)	A_M (mm ²)	bf	tf	tw	dw	Momento de Inercia		Modulo Sección		Radio de Giro (mm)		
												I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	S_x (mm ³)	S_y (mm ³)	R_x	R_y	R_o
100	100	15	98,5	98,5	1,5	642,38	9702,25	100	1,5	3	97	1023644	409406	20473	8188	39,92	25,25	47,23

Figura C1 Sección Armada en I



- Constante de Torsión J de Saint Venant

$$J = \frac{1}{3} \cdot (2b_f t_f^3 + d_w t_w^3) = 1098 \text{ mm}^4$$

- Cálculo de la Curva Mn vs. Lb para la Sección Armada

Figura	b	h	A (mm ²)	y _c (mm)	A*y _c	D (mm)	Ad ²	Io (mm ⁴)
1	3	48,5	145,5	24,25	3528,38	25,75	96475,59	28521,03
2	100	1,5	150	49,25	7387,50	0,75	84,38	28,13
			295,5		10915,88		96559,97	28549,16

$$a_1 = a_2 = A \cdot y_o / A = 36.94 \text{ mm}$$

- Cálculo de Z (módulo plástico de la sección)

$$Z = \frac{A_s}{2} \cdot (a_1 + a_2) \quad Z = 23729.75 \text{ mm}^3$$

- Cálculo de Momento Plástico (Mp)

$$M_p = F_y \cdot Z$$

La Fluencia del Acero Grado 40 se tiene del Anexo

$$F_y = 2500 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_y = 250 \text{ MPa}$$

$$F_{yf} = F_{yw} 250 \text{ N/mm}^2 = 250 \text{ MPa} \text{ (Fluencia de la Aleta y del Alma)}$$

$$F_r = 70 \text{ N/mm}^2 \text{ (Esfuerzo Residual en compresión de la Aleta)}$$

$$M_p = 5932436,36 \text{ N*mm}$$

$$\text{Carga de Plastificación } P_p = 3955 \text{ N} = 395,5 \text{ Kg}$$

- Cálculo de Lp (Límite de la longitud no arriostrada lateralmente para la total capacidad de giro de la articulación plástica caso de momento uniforme (**Cb=1.0**), mm)

$$L_p = \frac{790 \cdot r_y}{\sqrt{F_{yf}}} \quad (\text{MPa} / \text{mm}) \quad \text{NSR} - 98 \quad (F.2 - 29) \quad L_p = 1261.3 \text{ mm}$$

- Cálculo de Mr (Momento Limite de Pandeo)

$$M_r = F_L \cdot S_x \quad (MPa / mm^3) \quad NSR-98 \quad (F.2-32)$$

FL = Menor esfuerzo entre (Fyf - Fr) y Fyw

FL = 180 N/mm²

Mr = 3685140 N*mm

- Cálculo de Lr (límite de la longitud no arriostrada lateralmente, para pandeo lateral-torsional inelástico, mm)

$$L_r = \frac{X_1 \cdot r_y}{F_L} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 \cdot F_L^2}} \quad (MPa / mm) \quad NSR-98 \quad (F.2-31)$$

$$X_1 = \left(\frac{\pi}{S_x} \right) \cdot \sqrt{EGJA / 2} \quad NSR-98 \quad (F.2-33)$$

$$X_2 = \left[4 \cdot \left(\frac{C_w}{I_y} \right) \right] \left(\frac{S_x}{GJ} \right)^2 \quad NSR-98 \quad (F.2-34) \quad C_w = \frac{I_y \cdot h^2}{4}$$

E = módulo elástico del acero = 200000 N/mm²

X1 = 11308,65

G = módulo cortante elástico del acero = 77000 N/mm²

X2 = 0,0005864

Cw = constante de alabeo = 1023515000 mm⁶

Lr = 3710,10 mm

- Cálculo de Mcr (Resistencia Nominal a Flexión N-mm)

$$M_{cr} = C_b \left(\frac{\pi}{L_b} \right) \sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J + \left(\frac{\pi E}{L_b} \right)^2 \cdot I_y \cdot C_w} \quad NSR-98 \quad (F.2-37)$$

Cb = Coeficiente de modificación para diagramas de momento no uniforme según la ecuación (F.2-28) de la NSR-98, pero para todos los casos se puede suponer un valor conservador igual a 1.

Lb = Distancia entre puntos arriostrados contra el desplazamiento lateral de la aleta en compresión, o distancia entre puntos de arriostramiento para impedir la torsión de la sección. = 6000 mm.

El primer término dentro del radical la ecuación F.2-37 de la NSR-98 indica el comportamiento de la viga a torsión y el segundo término se refiere al pandeo lateral.

$$E \cdot I_y \cdot G \cdot J = 6,92E+18 \quad \left(\frac{\pi E}{L_b} \right)^2 \cdot I_y \cdot C_w = 4,60E+18$$

Se puede apreciar que el primer término de la ecuación es mayor que el segundo por lo que antes de que se presente pandeo lateral, se presentará una torsión de la sección transversal.

$M_{cr} = 1776994,35 \text{ N}\cdot\text{mm}$

- Carga Crítica

$M_{cr} = \frac{P_{cr} \cdot L_b}{4}$ Despejando de la ecuación anterior se tiene

$P_{cr} = 1184,66 \text{ N} = 118,47 \text{ Kg}$

- Deflexión Máxima

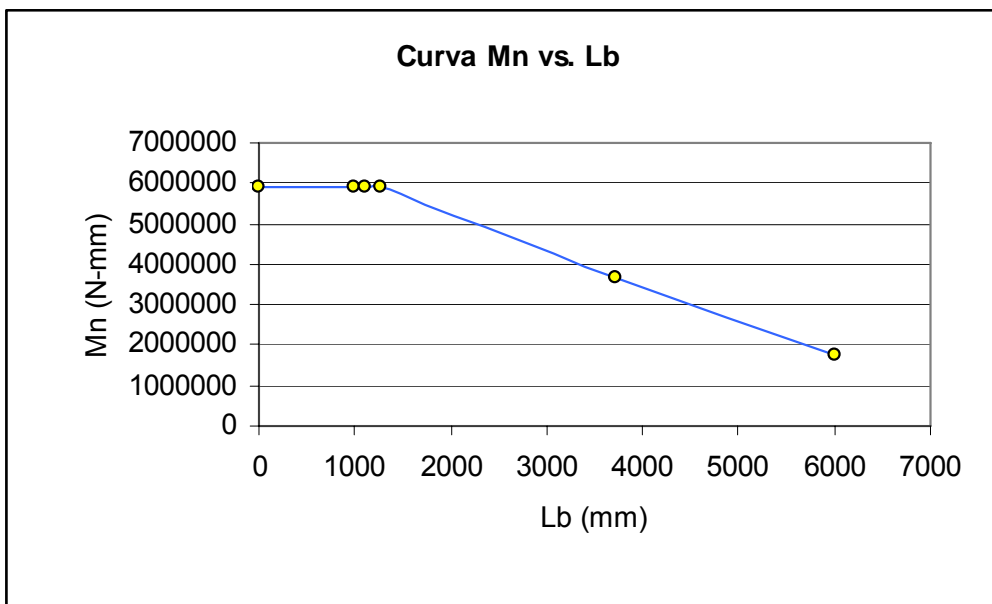
$\delta_{\max} = \frac{P_{cr} \cdot L^3}{48 EI} = 26,04 \text{ mm} > L/360 = 6000/360 = 16.67 \text{ mm}$

- Pandeo Local

Elemento	λ	λ_p	λ_r	
Patín	66,67	10,75	27,58	$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ Hay Pandeo en el Patín
Alma	33,33	107,52	161,28	$\lambda < \lambda_p < \lambda_r$ No hay Pandeo en el Alma

Patín $\lambda = b / t$	$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{F_{yf}}}$	$\lambda_r = \frac{370}{\sqrt{F_L}}$
Alma $\lambda = h / t_w$	$\lambda_p = \frac{1700}{\sqrt{F_w}}$	$\lambda_r = \frac{2550}{\sqrt{F_w}}$

Gráfica C1 Curva Mn vs. Lb



ANEXO D. Ficha Técnica de Soldadura Según Fabricante
West Arco E6013 3/32"

SW 613



ELECTRODOS PARA SOLDAR ACEROS AL CARBONO

IDENTIFICACIÓN: WEST ARCO E6013

CLASIFICACIÓN: AWS E6013

ESPECIFICACIÓN: AWS A.5.1, ICONTEC 2191, ASME SF A.5.1

APROBADO: ABS (Grado 1)

CARACTERÍSTICAS SOBRESALIENTES

El revestimiento es a base de rutilo y potasio, lo cual le da muy buena estabilidad, inclusive al trabajar con corriente alterna en equipos de bajo voltaje de circuito abierto.

APLICACIONES TÍPICAS

Carrocerías, muebles metálicos, ductos de aire acondicionado, rejas, ventanas y ornamentación en general. Puede usarse en tanques y estructuras teniendo en cuenta las limitaciones establecidas en los códigos de construcción aplicables.

RECOMENDACIONES PARA SU APLICACIÓN

Se utiliza en corriente alterna o continua, polaridad negativa (-) o positiva (+). Lleve el arco corto y una velocidad de avance adecuada el tipo de junta y al diámetro que emplee. Al soldar en filete horizontal mantenga el electrodo con un ángulo de elevación de 50° a 70° con relación a la platina inferior y una inclinación de 10 a 20° en la dirección de avance. Entre mas delgada la platina y mayor corriente, se debe usar un ángulo de elevación mayor para evitar recalentamiento de la platina vertical.

Tabla D1

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS DEL METAL DEPOSITADO

Resistencia a la tracción:	42 - 52 Kg/mm ² (60-74 Ksi)
Límite de fluencia:	34 - 45 Kg/mm ² (48-65 Ksi)
Elongación:	22 - 29%
Reducción del área:	40 - 60 %
Resistencia al impacto Charpy en V a -20° C:	50-110 joules.

Nota: Ensayos realizados según AWS A.5.1

Tabla D2

DIMENSIÓN	AMPERAJES RECOMENDADOS
2.4 X 300 mm (3/32")	50 - 90 A
2.4 X 350 mm (3/32")	50 - 90 A
3.2 X 350 mm (1/8")	80 - 120 A
4.0 X 350 mm (5/32")	110 - 160 A
4.8 X 450 mm (3/16")	130 - 210 A
6.4 X 450 mm (1/4")	200 - 300 A

Tomado de: <http://www.westarco.com/>

ANEXO E. Ensayo de Resistencia del Mortero de Pega

Se elaboró un mortero de pega con composición 1:4, es decir por cada balde de Cemento se agregaron 4 baldes de Arena. Los materiales utilizados para la preparación del mortero de pega cumplen con las siguientes Normas Técnicas Colombianas NTC:

- Cemento Pórtland Gris Tipo I:
 1. Peso específico 3.03 NTC 221
 2. Consistencia Normal 26% NTC 110
 3. Tiempos de Fraguado, Inicial 2 horas NTC 109 y Final 3 horas y 50 minutos NTC 118
- Agregado Fino (Arena):
 1. Modulo de Finura NTC 77
 2. Masa Unitaria NTC 92
 3. Peso Especifico y Adsorción NTC 237

Después de 28 días, edad a la que el mortero de pega obtiene su resistencia, se procedió a ensayar 2 cilindros a compresión obteniendo los siguientes datos:

Tabla E1 Datos del Laboratorio

Fecha de Fundición			Fecha de Ruptura			Edad de Muestra	Área Cilindro	Resistencia Ultima Kg.	Esfuerzo Kg./cm ²	Esfuerzo MPa	Esfuerzo Psi
Día	Mes	Año	Día	Mes	Año	Días	181,5	33000	181,82	18,18	2597,40
12	7	6	9	8	6	28	181,5	35000	192,84	19,28	2754,82

Se sacó un promedio del esfuerzo ultimo de aproximadamente 18.73 MPa (2680 Psi) con una desviación estándar de 0.78

Fotografía E1. Preparación de Cilindros



Fotografía E2. Ensayo a Compresión de Los Cilindros



Luego de la elaboración de las probetas para el ensayo de desprendimiento del mortero se procedió hacer la prueba en la maquina universal marca TREBEL y se obtuvo 2 datos de carga al desprendimiento del mortero de:

Probeta	Carga Kg.	Carga N.
# 1	250	2500
#2	210	2100

Con un promedio de 2300 N. y una desviación estándar de 282.8

Fotografía E3. Ensayo de desprendimiento de Probetas



ANEXO F. Ensayo de Tracción Para Varillas de Acero utilizadas en las Riostras

Para la elaboración de las riostras en forma de V se utilizaron varillas de acero corrugado de 6 mm de diámetro y de 10.3 cm. A estas varillas se les realizó un ensayo de tracción para hallar el esfuerzo de fluencia nominal de la siguiente manera:

Se ensayó una varilla de 50 cm. de longitud en la maquina universal marca TREBEL y se obtuvo una Carga de Fluencia $P_y = 1300 \text{ Kg} = 13000 \text{ N}$ y una Carga Máxima $P_{\max} = 1820 = 18200 \text{ Kg}$ ver fotografía E1

Fotografía F1 Ensayo de Tracción



Para hallar el área equivalente de la varilla a ensayar se utilizó la formula $A_{eq} = 1.274 \cdot \left(\frac{\text{masa}}{\text{Long}} \right)$, y se utilizó una varilla de 110.5 mm de longitud y 27.02 gr. de peso

$$A_{eq} = 0.311 \text{ cm}^2$$

El esfuerzo de fluencia $\sigma_y = \frac{P_y}{A_{eq}} = 1300/0.311 = 4180 \text{ Kg/ cm}^2 = 418 \text{ MPa}$ (dividiendo este

esfuerzo por 0.07 se tiene $\bar{\sigma}_y = 59715 \text{ Psi}$), de la misma manera se obtiene el esfuerzo máximo $\sigma_{\max} = 1820/0.311 = 5852 \text{ Kg/ cm}^2 = 585.2 \text{ MPa}$ (83600 Psi)

ANEXO G. Tablas de Resultados de ensayos

- Datos de Carga vs. Deformación

Vigas Sin Sistema de Arriostamiento

VIGA 1	
Carga P (Kg)	Deformación (mm)
0	0,00
20	3,47
40	7,80
60	11,93
80	16,21
100	21,43
110	22,59
115	23,83
120	24,42
122,5	25,12

VIGA 2	
Carga P (Kg)	Deformación (mm)
0,0	0,00
20,0	4,08
40,0	8,17
60,0	12,13
80,0	17,64
100,0	22,04
110,0	23,05
115,0	24,15
120,0	25,11
122,5	26,06

Nota: La estabilidad en ambas vigas se mantuvo hasta la carga de 100 Kg. donde no se presento torsión de la sección transversal.

Vigas con Riostras en V

VIGA 3	
Carga P (Kg)	Deformación (mm)
0	0,00
20	2,84
40	6,51
60	10,65
80	14,97
100	18,89
110	21,95
115	22,40
120	23,62
122,5	24,90
125	24,96

VIGA 4	
Carga P (Kg)	Deformación (mm)
0,00	0,00
20,00	2,40
40,00	5,57
60,00	9,30
80,00	14,50
100,00	18,64
110,00	21,30
115,00	22,27
120,00	23,30
122,50	24,10
125,00	24,30

Nota: La estabilidad en ambas vigas se mantuvo hasta la carga de 120 Kg. donde no se presento torsión de la sección transversal.

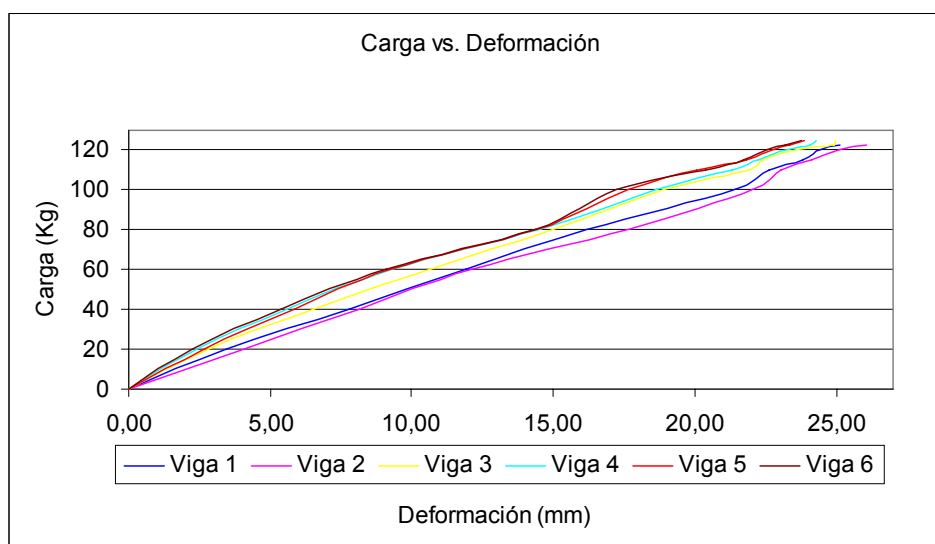
- Vigas con Mortero de Pega

VIGA 5	
Carga P (Kg.)	Deformación (mm)
0	0,00
20	2,80
40	5,86
60	9,22
80	14,40
100	17,64
110	20,04
115	21,85
120	22,75
122,5	23,35
125	23,85

VIGA 6	
Carga P (Kg.)	Deformación (mm)
0	0,00
20	2,42
40	5,37
60	9,10
80	14,35
100	17,25
110	20,37
115	21,74
120	22,55
122,5	23,18
125	23,77

Nota: La estabilidad en ambas vigas se mantuvo hasta la carga de 122.5 Kg. donde no se presento torsión de la sección transversal.

Gráfica G1. Carga vs. Deformación de Todas las Vigas



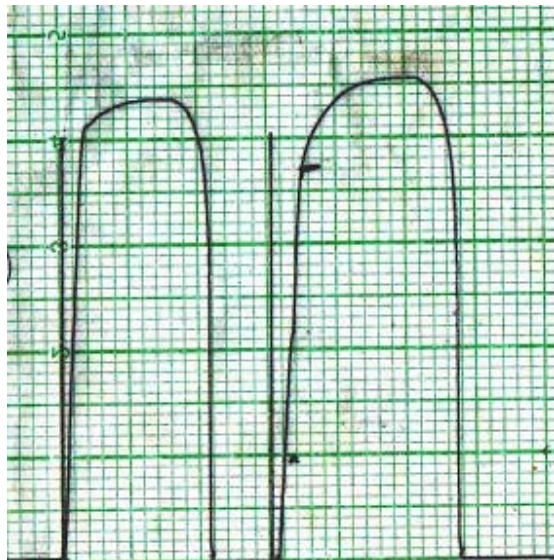
ANEXO H. Prueba de Fluencia Acero Grado 40

Para hallar el esfuerzo de fluencia nominal del acero grado 40 se, elaboraron 2 probetas con una longitud efectiva de 60 mm, un ancho de 9.6 mm, espesor de 1.5 mm y área de 0.144 cm^2 , se procedió a realizar el ensayo de tracción en la maquina INSTRON como se muestra en la fotografía E1

Fotografía H1 Ensayo de Tracción para Acero Grado 40



Fotografía H2. Gráfica Carga (Kg) vs. Deformación (mm)



Muestra # 1	
Carga (Kg)	Deformación (mm)
0	0
100	0,25
200	0,5
300	0,75
350	1

Muestra # 2	
Carga (Kg)	Deformación (mm)
0	0
100	0,4
200	0,75
300	1
370	1,25

Muestra # 1	
Esf σ (Kg/cm ²)	Def Unit (mm/mm)
0	0,0000
694,44	0,0042
1388,89	0,0083
2083,33	0,0125
2430,56	0,0167

Muestra # 2	
Esf σ (Kg/cm ²)	Def Unit (mm/mm)
0	0,0000
694,44	0,0067
1388,89	0,0125
2083,33	0,0167
2569,44	0,0208

Carga de Fluencia en la muestra #1 350 Kg y 370 Kg en la muestra #2, con una carga promedio de 360 Kg = 3600 N y una desviación estándar de 14.1, lo que arroja como resultado un esfuerzo de fluencia de $2500 \text{ Kg/cm}^2 = 250 \text{ MPa}$ (35.714,3 Psi)