TESIS
IC2001
B3
V.1

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE UNIONES VIGA-COLUMNA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS APORTICADAS DE PERFILES DE ALMA ABIERTA (DOBLE T)

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: EXCELENTE

JURADO EXAMINADOR

FIRMA:	FIRMA:	FIRMA:
NOMBRE: MARIO PAPARONI	NOMBRE: LUIS NUÑEZ	NOMBRE: FRANCISCO MORERA

REALIZADO POR	BATTISTONI REY, MÓNICA IUCULANO PULIDO, SARA R.
PROFESOR GUÍA	ING. MARIO PAPARONI MICALE
FECHA	JUNIO 2001

SE RECOMIENDA SU DIFUSIÓN EN CONGRESOS DE INGENIERÍA.

Universidad Católica
BIBLIOTECA
Caracas

AGRADECIMIENTOS

El más sincero agradecimiento a nuestros padres, familiares y amigos, por la confianza y el apoyo en todo momento durante la carrera.

A nuestro tutor Ing. Mario Paparoni M., por el apoyo, dedicación y valiosa colaboración en este Trabajo Especial de Grado.

Al Ing. José Manuel Velásquez y al Ing. Arnaldo Gutiérrez, por su indispensable ayuda al aportar sus conocimientos para la realización de este Trabajo de Grado.

A las empresas SIDETUR y PROPERCA, cuya donación de los perfiles estructurales hicieron posible la realización de las probetas, como parte esencial de este trabajo de investigación. Al Ing. Miguel Ángel Álvarez, Jefe de Productos Estructurales de la empresa SIDETUR, y al Ing. Martín Del Junco Gerente de Ventas y Mercadeo de la empresa PROPERCA, quienes realizaron los trámites necesarios para llevar a cabo la donación del material.

Al Ing. Francisco Morera, Coordinador del Laboratorio de Materiales de la Universidad Católica Andrés Bello, por su valiosa y desinteresada colaboración al permitirnos el uso de las instalaciones para la elaboración y los ensayos de las muestras.

Igualmente, agradecemos sinceramente al personal técnico del laboratorio, especialmente al Sr. José A. Manrique y al Sr. Jesús Báez, porque a pesar de sus ocupaciones nos dedicaron tiempo extra y esfuerzo a la realización de esta investigación.

Al Centro de Ingeniería Mecánica del Instituto de Ingeniería, en especial al Ing. Antonio País, por su orientación en el manejo del programa basado en elementos finitos, que permitió realizar la simulación de los modelos estructurales.

Al Ing. Carlos Correia del Instituto de Materiales, por realizar y analizar los ensayos relacionados con la soldadura. Las fotomacrografías y las fotomicrografías presentadas en este proyecto son cortesía del Centro de Tecnología de Materiales del Centro de Ingeniería.

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS iii
RESUMEN vii
SÍMBOLOS viii
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO 3
1.1 ACERO ESTRUCTURAL 6
1.1.1 CLASIFICACIÓN 6
1.1.2 MICROESTRUTURA 9
TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO 10
1.2 PROPIEDADES DE LOS PERFILES 11
1.2.1 PERFILES PROPERCA 12
CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES PROPERCA 14
1.2.2 PERFILES SIDETUR 18
1.2.2.1 PROCESO DE LAMINACIÓN 18
1.2.2.2 CLASIFICACIÓN 20
1.3 MOMENTO Y DEFLEXIÓN 20
1.4 ESFUERZO Y DEFORMACIÓN 24
1.5 SOLDADURA 25
1.5.1 PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS POR SOLDAR 28
1.5.2 ELECTRODOS REVESTIDOS 30
1.5.3 EFECTOS DE LA SOLDADURA 31
1.6 RIGIDIZADORES DE COLUMNAS 32
CONEXIONES CONTINUAS ENTRE VIGA–COLUMNA 34
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 35
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA 35
2.1.1 GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS 36
2.1.2 PREPARACIÓN PRELIMINAR 38
2.1.3 UNIONES 39

2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 40
2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE 40
2.2.2 SISTEMA DE MEDICIÓN 41
2.2.3 VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO 42
2.3 CÁLCULOS 43
2.3.1 UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA PRO/ENGINEER – PRO/MECÁNICA (VERSIÓN 20) 43
2.3.2 CÁLCULOS DE SOLDADURA 50
2.3.3 REVISIÓN DE PANDEO LOCAL 52
2.3.3.1 FLEXIÓN LOCAL DE LAS ALAS 52
2.3.3.2 CÁLCULOS DE RIGIDIZADORES 53
2.3.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN 54
2.3.4.1 PANDEO FLEXIONAL 54
2.3.4.2 PANDEO TORSIONAL 57
2.3.4.3 RESULTADOS 59
2.3.5 CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS COMPARATIVOS ...60
CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS 61
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LA TÉCNICA EXPERIMENTAL 82
4.1. EFECTO EXCENTRICIDA DE LA CARGA APLICADA 82
4.2. RELACIÓN DE INERCIAS DE PERFILES 82
4.3. VALOR DE LA AMPLIFICACIÓN 84
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA METALOGRAFÍA 85
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 91
BIBLIOGRAFÍA 94

ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS

CAPÍTULO I

TABLAS:

TABLA 1.1. Características metalúrgicas 13
TABLA 1.2. Análisis químico de colada 14
TABLA 1.3. Propiedades mecánicas 14
TABLA 1.4. Propiedades químicas del Acero 19
TABLA 1.5. Propiedades mecánicas 19

FIGURAS:

FIGURA 1.1. Esquema de la electrosoldadura por alta frecuencia 13
FIGURA 1.2. Detalle de la zona de unión alma–ala 13
FIGURA 1.3. Notación para las secciones de perfiles electrosoldados 15
FIGURA 1.4. Ensayo de arrancamiento de alma y ala 17
FIGURA 1.5. Ensayo de tracción en probetas tipo T 17
FIGURA 1.6. Notación para las secciones de perfiles I laminados en caliente 20
FIGURA 1.7. Esquema de la probeta 21
FIGURA 1.8. Diagrama de momento 21
FIGURA 1.9. Deflexión de viga en voladizo 21
FIGURA 1.10. Deflexión de la probeta de 1° orden 22
FIGURA 1.11. Deflexión amplificada de la columna 22
FIGURA 1.12. Curva Esfuerzo–Deformación 24
FIGURA 1.13. Proceso de soldadura por Arco Metálico Protegido (SAMP) 27
FIGURA 1.14. Esquema de la soldadura de filete 28
FIGURA 1.15. Junta con bisel sencillo para soldar uno ó ambos lados 29
FIGURA 1.16. Juntas a tope para soldar ambos lados 29
FIGURA 1.17. Representación de una unión por soldadura 32
FIGURA 1.18. Conexión Precalificada. doble plancha en el alma 33
FIGURA 1.19. Notación de la plancha de continuidad 33
FIGURA 1.20. Distorsión del ala de la columna 33
FIGURA 1.21. Viga aporticada en el alma de la columna 34

CAPÍTULO II

TABLAS:

TABLA 2.1. Clasificación de las probetas en grupos 36
TABLA 2.2. Dimensiones de la probeta 37

TABLA 2.3. Resultados teóricos 50
TABLA 2.4. Cálculos de la fuerza resultante sobre el cordón de soldadura 51
TABLA 2.5. Cálculos resistencia teórica 52
TABLA 2.6. Dimensiones de rigidizadores 53
TABLA 2.7. Relaciones ancho–espesor para elementos comprimidos no rigidizados 54
TABLA 2.8. Relaciones ancho–espesor para elementos comprimidos rigidizados 55
TABLA 2.9. Cálculos de las relaciones ancho–espesor para elementos comprimidos no rigidizados correspondientes a las alas del perfil 55
TABLA 2.10. Cálculos de las relaciones ancho–espesor para elementos comprimidos no rigidizados correspondientes al alma del perfil 55
TABLA 2.11. Cálculos de las relaciones ancho–espesor para elementos comprimidos rigidizados correspondientes al Alma del perfil 56
TABLA 2.12. Cálculo de λc (Pandeo Flexional) 56
TABLA 2.13. Verificación de condición λc 57
TABLA 2.14. Cálculo de λe (Pandeo Torsional) 58
TABLA 2.15. Verificación de condición de λe 58
TABLA 2.16. Cálculo de la resistencia teórica minorada (Pandeo Flexional) 59
TABLA 2.17. Cálculo de la resistencia teórica minorada (Pandeo Torsional) 59

FIGURAS:

FIGURA 2.1 Miembros de la probeta 35
FIGURA 2.2 Representación del pórtico 36
FIGURA 2.3. Dimensiones de la probeta 37
FIGURA 2.4. Almacenamiento de electrodos en el horno 38
FIGURA 2.5. Elaboración de probetas 39
FIGURA 2.6. Detalle del montaje 41
FIGURA 2.7. Sistema de medición. Flexímetro y cinta métrica 42
FIGURA 2.8. Pro/Mechanica: Curva Esfuerzo–Deformación 43
FIGURA 2.9. Elemento tipo concha mallada con restricciones y carga aplicada 45
FIGURA 2.10. Diagrama de esfuerzo Von Mises (modelo con superficies).....46
FIGURA 2.11. Diagrama de esfuerzo (modelo lineal).....47
FIGURA 2.12. Deflexión (modelo con superficies) 48
FIGURA 2.13. Deflexión (modelo lineal) 49
FIGURA 2.14. Diagrama de fuerzas sobre el cordón de soldadura 50

CAPÍTULO III

TABLAS:

TABLA 3.1. Resultados obtenidos de la probeta IPN 80–IPN 80 62
TABLA 3.2. Resultados obtenidos de la probeta IPN 100–IPN 100 63
TABLA 3.3. Resultados obtenidos de la probeta IPN 120–IPN 120 64
TABLA 3.4. Resultados obtenidos de la probeta IPN 140–IPN 140 65
TABLA 3.5. Resultados obtenidos de la probeta CP 140–VP 140 66
TABLA 3.6. Resultados obtenidos de la probeta CP 140–IPN 100 67
TABLA 3.7. Amplificación de la rotación ($\theta_{máx}$) 68
TABLA 3.8. Amplificación de la deflexión ($y_{máx}$) 68

FIGURAS:

FIGURA 3.1. Algunas fallas presentes en las probetas IPN 80–IPN 80 y en las probetas IPN 100–IPN 100 71
FIGURA 3.2. Fallas presentes en las probetas IPN 120–IPN 120 no rigidizadas.....72
FIGURA 3.3. Fallas presentes en las probetas IPN 140–IPN 140 73
FIGURA 3.4. Deformación de la probeta CP 140–VP 140 74
FIGURA 3.5. Desgarramiento longitudinal de la soldadura probeta CP 140–IPN 100 75
FIGURA 3.6. Vista de la probeta CP 140–IPN 100 deformada 75

GRÁFICOS:

GRÁFICO 3.1. Esfuerzo–Deformación IPN 80–IPN 80 76
GRÁFICO 3.2. Esfuerzo–Deformación IPN 100–IPN 100 77
GRÁFICO 3.3. Esfuerzo–Deformación IPN 120–IPN 120 78
GRÁFICO 3.4. Esfuerzo–Deformación IPN 140–IPN 140 79
GRÁFICO 3.5. Esfuerzo–Deformación CP 140–VP 140.....80
GRÁFICO 3.6. Esfuerzo–Deformación CP 140–IPN 100 81

CAPÍTULO IV

FIGURAS:

FIGURA 4.1. Representación de la excentricidad de la carga 82
FIGURA 4.2. Relación de inercias 83
FIGURA 4.3. Curvas teóricas de Esfuerzo-Deformación probeta IPN100-IPN100 ..84

CAPÍTULO V

FIGURAS:

FIGURA 5.1. Fotomacrografía correspondiente a la Zona de Fusión, Aleación y Zona Afectada por el Calor 86
FIGURA 5.2. Fotomacrografía correspondiente a la socavación del metal 87
FIGURA 5.3. Fotomacrografía correspondientes a la falta de Fusión y a la socavación 87
FIGURA 5.4. Fotomicrografía correspondiente al Metal Base 88
FIGURA 5.5. Fotomicrografía correspondiente a la interfase líquido-sólido 89
FIGURA 5.6. Fotomicrografía correspondiente a la Zona de Fusión y a la Zona Afectada por el Calor 89
FIGURA 5.7. Fotomicrografía correspondiente a las 4 zonas afectadas por realizar la unión soldada 90
FIGURA 5.8. Fotomicrografía correspondiente a la Zona de Fusión 90

RESUMEN

El objetivo del presente Trabajo de Grado consiste en el estudio de uniones de diferentes combinaciones de perfiles de alma abierta usadas como viga–columna, soldadas en estructuras metálicas aporticadas, y está enfocado principalmente como una solución técnica y social en la rama de la construcción.

El estudio es producto de una serie de ensayos a flexión (por compresión aplicada por la máquina de ensayo) sobre dos vigas en voladizo, soldadas a una columna que constituye la probeta a ensayar. Las probetas se construyen al combinar los perfiles IPN 80, IPN 100, IPN 120, IPN 140, CP 140 y VP 140, cortesía de las empresas productoras de perfiles SIDETUR y PROPERCA. Igualmente, se utilizaron conexiones como junta a tope, junta con bisel a 45°.En ciertos casos, las columnas de algunas probetas se rigidizaron mediante planchas de continuidad y conexiones continuas viga-columna.

Se evaluó el comportamiento de las juntas soldadas en filete, a través de la comparación de los resultados teóricos con experimentales, sin obtener los resultados esperados. Se ejecutaron 18 ensayos a flexión, evaluando en total 36 uniones soldadas.

El desarrollo de estos ensayos surge al establecer un procedimiento rápido, sencillo y económico que permitiera evaluar cualquier estructura aporticada con uniones soldadas.

Finalmente, se hizo una comparación a nivel de eficiencia con los resultados obtenidos en el Trabajo de Grado titulado "Evaluación de Uniones Viga–Columna Soldadas en Estructuras Tubulares Metálicas Aporticadas" Fernández I, Castañeda, J.

SÍMBOLOS

Fy : Tensión de cedencia del Acero [F/L^2]

Fu : Tensión última [F/L^2]

δ : Deformación [L]

P : Carga vertical [F]

Lc : Luz libre de la columna [L]

Lv : Luz libre de la viga [L]

E : Módulo de la elasticidad [F/L^2]

I : Inercia [L^4]

M : Momento [F L]

S_{xx} : Módulo de sección [L^3]

w : Pierna de la soldadura [L]

L : Longitud de la soldadura [L]

R : Separación entre los bordes a soldar [L]

e : Espesor a soldar [L]

T : Tracción [F]

C : Compresión [F]

h_p : Altura de la plancha de continuidad [L]

b_p : Anchura de la plancha de continuidad [L]

t_p : Espesor de la plancha de continuidad [L]

H : Longitud total de la columna [L]

Hc : Longitud de la columna, comprendida entre centro y centro de cada viga [L]

H_A : Altura del agujero superior [L]

y : Distancia desde el extremo de la columna hasta el centro de la viga [L]

σ' : Tensión de Von Mises [F/L^2]

σ_x : Tensión normal en el eje X [F/L^2]

τ_{xy} : Tensión cortante [F/L^2]

ε : Deformación unitaria [L/L]

Fv_x : Fuerza sobre el cordón de soldadura (componente horizontal) [F]

Fv_y : Fuerza sobre el cordón de soldadura (componente vertical) [F]

F_R : Fuerza resultante sobre el cordón de soldadura [F]

V : Fuerza cortante [F]

L_H : Longitud horizontal del cordón de soldadura [L]

R_t : Resistencia teórica [F]

ϕ : Factor de minoración [.]

P_u : Carga última aplicada [F]

T_u : Tracción última aplicada [F]

Nt : Resistencia a compresión [F]

ϕ_c : Factor de minoración de compresión [.]

A : Área [L^2]

F_{cr} : Fuerza crítica [F]

b : Anchura [L]

t : Espesor [L]

E_T : Módulo Tangente [F/L^2]

m_o : Pendiente del tramo inicial de la curva experimental [F/L]

m_T : Pendiente de la curva teórica [F/L]

$P_{100\%}$: Punto referencial sobre la curva experimental [.]

$m_{100\%}$: Pendiente entre el punto referencial y el origen [F/L]

K : Factor Plástico [.]

[.] : Adimensional

[F] : Fuerza

[L] : Longitud

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de hierro y carbono "Aceros y Fundiciones" son las más importantes en la técnica moderna. Por su volumen, la producción de fundición y de acero supera, en mucho más de diez veces la producción de todos los demás metales juntos.

El Acero es uno de los materiales más empleado en la construcción, su calidad y posibles aplicaciones se determinan conociendo sus características. Éstas se ponen en manifiesto por medio de ensayos apropiados. El estado actual de las técnicas de estas pruebas está en proceso para alcanzar un buen diseño en las estructuras metálicas.

El Acero se puede obtener en una gran variedad de formas y tamaños, como varillas, tubos, rieles del ferrocarril o perfiles en H o en doble T. Estas formas se obtienen en las instalaciones siderúrgicas, a través del laminado de los lingotes calientes o modelándolos de algún otro modo. El acabado del acero mejora también su calidad al refinar la estructura cristalina y aumentar su resistencia.

Otro aspecto importante del análisis y diseño de estructuras se relaciona con las deformaciones que causan las cargas aplicadas a las estructuras. Obviamente, son necesarios instrumentos de medición de deformación que permiten determinar el módulo elástico que relaciona las tensiones con las deformaciones. Por lo tanto, es posible evitar deformaciones tan grandes que impiden que la estructura cumpla el propósito, y su vez, el análisis de deformaciones contribuye en el cálculo de los esfuerzos.

Los estudios más recientes se enfocan hacia la evaluación de propiedades inelásticas de los materiales y obtención de la resistencia última de un miembro estructural.

Este conjunto de modelos representativos de las prácticas usuales del mercado se ensaya mediante procedimientos experimentales adaptados de experiencias anteriores que se demostraron satisfactoriamente. En este trabajo utilizaremos una variante de los mismos, determinada por la necesidad de manejar muestras más voluminosas, pesadas y cargas mayores.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

MARCO TEÓRICO

El hierro (Fe) es un material metálico blando, dúctil y tiene una resistencia relativamente baja. En su condición de metal puro, tiene pocas aplicaciones, además de ser muy costoso su producción, pues se encuentra en la naturaleza en forma de óxido de hierro, con gran cantidad de impurezas, lo que es difícil quitar totalmente. Además se encontró que esas impurezas le dieron al hierro características diferentes de resistencia y ductilidad, que lo hacían apto para las diferentes necesidades de la industria.

El Acero es un producto férrico capaz de ser deformado plásticamente, cuyo contenido de carbono oscila entre el 0.008 y el 2%, contenido éste que lo diferencia del mineral de hierro, pudiendo contener otros elementos de aleación, así como impurezas inherentes al proceso de fabricación. El Acero estructural es un material dúctil, homogéneo e isotrópico de calidad confiable y constante que soporta tensiones elevadas.

Para ser empleados industrialmente, los metales deben cumplir con una serie de propiedades que permitan soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos. Las propiedades mecánicas del Acero se determinan con bastante facilidad. Las propiedades mecánicas están fuertemente influenciadas por el proceso de laminación, rata de enfriamiento y posterior tratamiento térmico, temperatura de servicio, espesor a soldar, deformación en frío, etc.

Para determinar la calidad del Acero y su aplicación en ciertos diseños específicos, es conveniente analizar la influencia de sus propiedades:

1. Resistencia:

   La resistencia a solicitaciones estáticas de los miembros estructurales de Acero depende principalmente de la forma del diagrama Tensión vs. Deformación y de los puntos o tensiones de fluencia, Fy, y de la resistencia ultima a la tracción, F_u. La tensión de fluencia determinada en un ensayo estático de tracción uniaxial se acepta también como el valor correspondiente de compresión uniaxial. Sin embargo, en el caso general de las tensiones en un punto de un miembro de pared delgada, como lo son los perfiles metálicos en general, la fluencia depende de alguna combinación particular de ellas.

2. Ductilidad

   En el caso particular del Acero es un índice de la deformabilidad inelástica, cuantificada por el porcentaje de alargamiento o de reducción del área.

3. Soldabilidad

   La soldabilidad se define como la facilidad con la cual se obtienen las características de ejecución y funcionamiento de una unión bajo determinadas condiciones de soldadura. En el caso del Acero estructural, la soldabilidad está relacionada con las aleaciones y el contenido de carbono.

   Una conveniente aproximación para determinar el grado de soldabilidad del Acero es la fórmula de equivalencia del carbono (CE), la cual expresa la influencia relativa de los elementos químicos respectos del carbono en la soldabilidad.

4. Tensiones Residuales

   Las tensiones internas de tracción y compresión no provenientes de cargas excéntricas reciben el nombre de tensiones residuales y su magnitud y distribución dependen de ciertos factores, siendo los más importantes la geometría de la sección transversal, los procesos de laminación o soldadura, las condiciones de enfriamiento y el posterior tratamiento térmico, y en menor grado, de la tensión de fluencia. El efecto neto de las tensiones residuales es el de alterar el diagrama de tensión vs. deformación de los miembros reales con respecto al obtenido en probetas del material; este hecho es de particular importancia en los miembros solicitados por compresión axial.

5. Efecto de la Temperatura

   El comportamiento del Acero es muy sensible a los cambios extremos con respecto a la temperatura ambiente normal, en especial en casos de incendios.

6. Corrosión

   En la práctica, se distingue el óxido de laminación que se produce por el efecto del agua en el metal al rojo durante la laminación del óxido atmosférico que se inicia a medida que se desprende la costra de laminación. La intensidad de la corrosión depende de las condiciones ambientales.

7. Desgarramiento Laminar

   La dirección de laminación de los perfiles tiene pequeñas consecuencias en muchas aplicaciones, pero es importante en el diseño y fabricación de estructuras con miembros masivos con uniones
   muy solicitadas.

1.1 ACERO ESTRUCTURAL

1.1.1 CLASIFICACIÓN

Los Aceros se clasifican según su estado sólido, en Soldados y Forjados; según su estado liquido en Fusión y Homogéneos. También se clasifican según su composición química en Ordinarios, al Carbono y Especiales o Aleados.

Los Aceros que utilizan el carbono como elemento principal en la aleación se llaman Aceros estructurales al carbono. Los Aceros al carbono más nuevos, mejorados, constituyen aún la mayor parte del tonelaje principal, más del 90% de todos los Aceros son al carbono. Entre los productos fabricados con Aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de Acero, cascos de buques, y así como horquillas o pasadores para el cabello. En resumen, se puede decir que existen un gran número de composiciones y propiedades diferentes de los Aceros al carbono.

El carbono, es el material que más afecta las propiedades del Acero por lo tanto, los efectos más importantes que se producen son los siguientes:

- En el Acero al carbono la ductilidad disminuye rápidamente cuando aumenta el contenido de carbono.
- Los tratamientos térmicos son más efectivos en los Aceros aleados que en los Aceros al carbono.
- Los tratamientos térmicos en los Aceros al carbono son óptimos sólo en espesores pequeños.
- Las propiedades físicas de los Aceros al carbono disminuyen marcadamente con el aumento en temperatura.
- Los Aceros al carbono son muy susceptibles al ataque químico del medio ambiente especialmente a temperaturas elevadas.

Teniendo en cuenta estas influencias del carbono sobre el Acero, se presenta la siguiente clasificación del Acero:

1. Aceros de bajo contenido de carbono:
   Son los que contienen hasta 0.15% de carbono, se utilizan en trabajos que no exijan soportar grandes cargas, pueden ser de menor resistencia mecánica. La maleabilidad es una de las propiedades de este Acero.

2. Aceros dulces:
   Son los que contienen entre 0.15 y 0.29% de carbono.

3. Aceros de contenido medio de carbono:
   Contienen entre 0.30 y 0.59% de carbono. Este tipo de Acero presenta una maleabilidad y resistencia menor que los anteriores.

4. Aceros de alto contenido de carbono:
   Estos contiene, entre 0.60 y 1.70% de carbono. Este tipo de Acero posee una gran resistencia mecánica.

Los Aceros al carbono simple representan el tipo de Acero más utilizado en la industria de la construcción. Con este tipo de Acero se fabrican piezas fundidas o coladas, piezas forjadas, productos tubulares, planchas, láminas, flejes, alambres, perfiles estructurales y productos ferroviarios (rieles, ruedas y ejes). Las propiedades de este tipo de Acero se rigen por su contenido en carbono y su microestructura.

Según su composición química, los Aceros aleados se clasifican en:

1. Aceros de baja aleación:
   Las propiedades de este tipo de Acero pueden sufrir grandes variaciones simplemente añadiendo pequeñas cantidades de elementos de aleación. Los

Aceros de baja aleación son más económicos que los Aceros aleados convencionales, ya que tienen cantidades menores de los elementos costosos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del Acero al carbono.

En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de Aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

2. Aceros de alta aleación:
   En este grupo de Aceros altamente aleados, se encuentran los Aceros resistentes a la oxidación, al calor y a la corrosión; se les conoce como Aceros Inoxidables. Algunos son muy duros, otros muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos períodos a temperaturas extremas. Este tipo de Acero se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de Petróleo o plantas químicas.

El tratamiento térmico de los Aceros puede utilizarse como otro medio de clasificación. Los antiguos Aceros estructurales al carbono y los Aceros de alta resistencia y bajo contenido de aleación no tiene tratamiento térmico especifico, pero sus propiedades se controlan por el proceso de laminación en caliente.

Las designaciones de las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Material) suelen utilizarse para clasificar los Aceros Estructurales. Estas especificaciones cubren variables de producción tales como procesos, contenido químico y tratamiento térmico, así como requisitos en sus propiedades de dureza y tensión.

Se pueden establecer otro sistema de clasificación de los Aceros según su límite de fluencia en los siguientes 5 grupos generales: 36 ksi, 42 a 65 ksi, 50 a 80 ksi, 90 a

100 ksi y 200 a 300 ksi. El **36 ksi** es el Acero al carbono para usos estructurales comunes, como en la construcción de puentes y edificios metálicos con uniones remachadas, atornilladas y soldadas; y para otras aplicaciones estructurales de carácter general.

1.1.2 MICROESTRUCTURA

Las propiedades físicas de los Aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de la cantidad de carbono y su distribución en el hierro. Antes del tratamiento térmico, la mayor parte de los Aceros son una mezcla de tres sustancias, ferritas, perlita y cementita.

La ferrita o hierro alfa es el hierro con estructura cristalina centrada en el centro, que se presenta a temperatura ambiente. La ferrita tiene baja solubilidad del carbono, es blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución. El hierro gamma, es una forma cristalina cúbica, centrada en el cuerpo, que es estable entre 1670 °F y 2550 °F (estas temperaturas son cuando hay 100% carbono). La estructura cúbica centrada en la cara tiene intersticios más grandes que la ferrita, por tanto, puede tener más carbono en la estructura. La solubilidad máxima es del 2% de carbono por peso. El hierro delta es la forma cúbica, centrada en el cuerpo, es estable a más de 2550 °F.

La cementita es un compuesto de hierro con el 7% de carbono aproximadamente, es de gran dureza y muy quebradiza. La perlita es una profunda mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica y una estructura característica y sus propiedades físicas son intermedias entre las de sus dos componentes. La resistencia y la dureza de un Acero que no ha sido tratado térmicamente dependen de las proporciones de estos tres componentes. Cuanto mayor es el contenido en carbono de un Acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: cuando el Acero tiene

un 0.8% de carbono está por completo compuesto de perlita y para cantidades mayores al 0.8%, es una mezcla de perlita y cementita.

La fase gamma del hierro ocurre cuando se eleva la temperatura del Acero, de manera tal que la ferrita y la perlita se transforman en una forma alotrópica de aleación de hierro y carbono conocida como austentita. La austentita tiene la propiedad de disolver todo el carbono libre presente en el metal.

Si el Acero se enfría despacio, la austentita vuelve a convertirse en ferrita y perlita, pero si el enfriamiento es repentino la austentita se convierte en martensita, una modificación alotrópica de gran dureza similar a la ferrita pero con carbono en solución sólida. El enfriamiento rápido de la austentita para formar la martensita es un paso importante en el tratamiento térmico de los Aceros. El revenido posterior a temperaturas un poco más elevadas produce Aceros de buena tenacidad y alta resistencia para usos en la construcción.

Los perfiles estructurales se suelen someter a un proceso de laminación a baja temperatura, el cual produce un tamaño uniforme de grano pequeño. Al enfriar, el producto final es una estructura de ferrita fina y perlita (un conjunto laminar de ferrita y carburo de hierro).

TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO

El proceso básico para endurecer el Acero mediante tratamiento térmico consiste en calentar el metal hasta una temperatura a la que se forma austentita, generalmente entre los 750 °C y 850 °C, y después enfriarlo con rapidez sumergiéndolo en agua o aceite (templado). Estos tratamientos de endurecimiento, que forman martensita, crean grandes tensiones internas en el metal, que se eliminan mediante el revenido o el recocido, el cual consiste en volver a calentar el Acero hasta una temperatura

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

menor que la del templado. El revenido reduce la dureza y la resistencia, y aumenta la ductilidad y la tenacidad.

El objetivo fundamental del proceso de tratamiento térmico es controlar la cantidad, tamaño, forma y distribución de las partículas de cementita contenidas en la ferrita, que a su vez determinan las propiedades físicas del Acero.

1.2 PROPIEDADES DE LOS PERFILES

Los perfiles como miembros estructurales se designan según la forma de su sección y sus dimensiones. Estos están constituidos por dos grandes grupos que se complementan mutuamente y que definen el mercado o campo de aplicación de las distintas series de productos. Estos dos grupos son perfiles normalizados y perfiles no normalizados.

Los perfiles normalizados son básicamente los nacionales y extranjeros más tradicionales, laminados en caliente a partir de barras rectas. Los no normalizados son los formados a partir del material plano, cuyas formas y dimensiones dependen del proceso de fabricación como son los perfiles soldados, de más reciente empleo.

Dentro de los tipos de perfiles metálicos se tiene:

- Perfil I (doble T):

  Este término se utiliza para denominar a los perfiles cuya sección está definida por una altura mayor que la anchura de las alas.

- Perfil H:

  Corresponde a una serie de perfiles, con sección doble T de alas anchas, tienen una altura igual a la anchura de las alas, y los bordes llevan aristas interior y exterior.

Entre las empresas productoras de perfiles en Venezuela, está SIDETUR y PROPERCA, ambas empresas han sido reconocidas con la certificación internacional ISO 9002. A continuación se describirán los productos fabricados por estas empresas del sector siderúrgico privado venezolano.

1.2.1 PERFILES PROPERCA

PROPERCA es una moderna planta venezolana que fabrica perfiles estructurales de Acero mediante el proceso continuo y automático de alta productividad de la electrosoldadura por alta frecuencia.

La materia prima para la fabricación de estos perfiles estructurales corresponde a bandas de Acero estructural laminadas en caliente.

La electrosoldadura es la unión que resulta al soldar dos flejes de Acero mediante el proceso de resistencia eléctrica de alta frecuencia sin aporte de material.

Las características de la electrosoldadura de alta frecuencia son las siguientes:

- Corriente de alta frecuencia de 40000 Hertz.
- La corriente fluye superficialmente a una profundidad de 0.8 mm.
- No existe alargamiento de los granos, lo que es común en soldaduras por fusión.

La unión de las alas y el alma (tres flejes) que da origen al perfil PROPERCA se logra mediante la presión de dos rodillos de forja. Los bordes del fleje que constituyen el alma son deformados en frío, antes de ingresarlos a la zona de la electrosoldadura, logrando que el espesor nominal del alma sea menor que el ancho de la zona soldada.

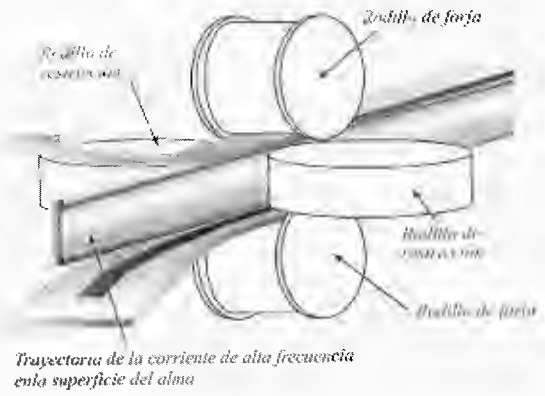


FIGURA 1.1. Esquema de la electrosoldadura por alta frecuencia

(a) Previo a la electrosoldadura (b) Después de la electrosoldadura

FIGURA 1.2. Detalla de la zona de unión alma-ala

Las bandas de Acero utilizadas en la fabricación de los perfiles PROPERCA cumplen con las siguientes características metalúrgicas y mecánicas, conforme a las normas COVENIN 2896 y 2897.

Tamaño de grano	8.0 - 10.0
Forma del grano	Equiaxial
Microestructura	Ferrítica
Nivel de inclusión no metálicas	Máximo 3

TABLA 1.1. Características metalúrgicas

Elementos (%)			
C	Mn	P	S
0.14 máx	1.10 máx	0.025 máx	0.025 máx

TABLA 1.2. Análisis químico de colada

Grado Norma Covenin	Grado Equivalente Norma ASTM	Punto Cedente Fy (min)	Punto Ruptura Fu (min)
AE - 25	A – 36	2530 kgf/cm^2	3730 kgf/cm^2

TABLA 1.3. Propiedades mecánicas

CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES PROPERCA

Se pueden obtener perfiles electrosoldados de varias formas, tamaños y longitudes, sin embargo, por razones operativas y comerciales se dispone de dos series estandarizadas, serie estándar y serie petrolera. En la construcción de obras civiles y metalmecánicas se utilizan los perfiles de serie estándar, debido a su óptima relación de mayor resistencia con más peso.

Los perfiles de Acero estructurales electrosoldados por alta frecuencia se clasifican según la forma de la sección transversal, entre los cuales se pueden mencionar:

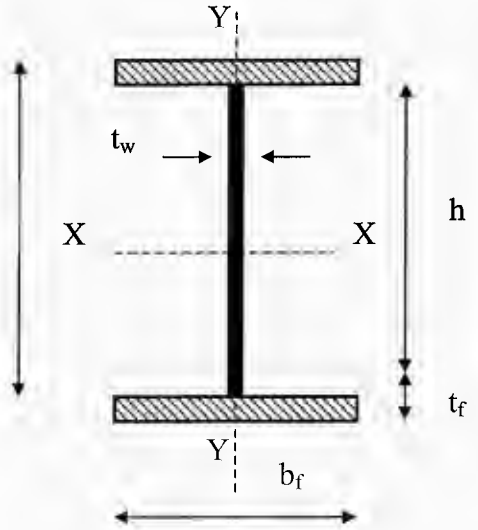
- Perfiles VP: perfiles cuya sección transversal forma una "I", se utilizan preferiblemente para trabajar como vigas.

- Perfiles CP: perfiles cuya sección transversal es una "H" simétrica de altura constante, preferiblemente son usados como columnas.

Los perfiles de Acero estructural electrosoldados por alta frecuencia, se designan de la siguiente forma:

VP				VP ó CP:	Forma de la Sección Transversal
					VP: Viga PROPERCA
CP	d	x	p		CP: Columna PROPERCA
				d:	Altura Total (mm)
				p:	Masa Teórica por metro lineal (kgf /m)

Las dimensiones para cada sección de los perfiles electrosoldados se esquematizan de la siguiente forma:



NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
bf	Anchura del ala
d	Altura del perfil
h	Altura del alma
tf	Espesor del ala
tw	Espesor del alma
X	Eje de mayor momento de inercia
Y	Eje de menor momento de inercia

FIGURA 1.3. Notación para las secciones de perfiles electrosoldados

Se determina la calidad de los perfiles electrosoldados por alta frecuencia durante todo el proceso de fabricación del producto a ser comercializados, al realizar diferentes ensayos para cumplir con los requerimientos indicados en la Norma Venezolana COVENIN.

Los ensayos mas utilizados para analizar una muestra tomada directamente de la banda estructural laminada en caliente (materia prima) son los siguientes:

- Ensayo de la Dureza Rockwell

  Se mide la dureza, determinando la profundidad a que entra en la pieza un penetrador. El número de la dureza está relacionado con la profundidad de la impresión y es tanto mayor cuanto más duro el material.

- Ensayo a Tracción

  Uno de los ensayos más reveladores para juzgar la calidad de los Aceros es el ensayo a tracción, el cual permite conocer la resistencia, el límite de elasticidad, el alargamiento, etc. El método consiste en someter a tracción la muestra del material que se quiere ensayar en una máquina hidráulica, que entre sus partes fundamentales conste un aparato registrador que marca un gráfico de la curva del ensayo.

- Metalografía

  A través de esta ciencia se puede conocer características metalúrgicas del Acero, entre las cuales se mencionan tamaño y forma del grano, microestructura y nivel de inclusión no metálicas.

Por otro lado, una cantidad de perfiles de un lote, seleccionados al azar, se somete a ensayos de resistencia y ensayos destructivos, para garantizar la seguridad y calidad de los perfiles. Entre estos ensayos se tienen:

- Ensayo de Arrancamiento de Alma y Alas:

  Este método de ensayo consiste en verificar la calidad de la Electrosoldadura de los perfiles de Acero estructural electrosoldados por alta frecuencia.

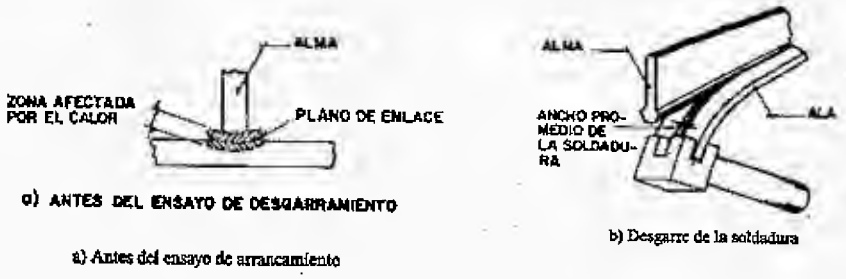


FIGURA 1.4. Ensayo de arrancamiento de alma y alas

- Ensayo de Tracción en Probetas Tipo T

  La muestra a ensayar consiste en una probeta de tracción de tipo T. Los perfiles ensayados no deben fallar por rotura en el plano de la soldadura, la rotura debe ocurrir en el alma o en las alas.

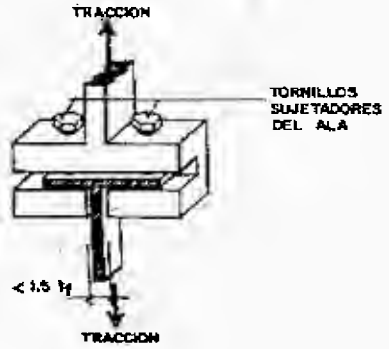


FIGURA 1.5. Ensayo de tracción en probeta tipo T

1.2.2 PERFILES SIDETUR

SIDETUR es una empresa que elabora y comercializa productos siderúrgicos. La familia de productos elaborados por esta empresa comprende cabillas, barras de herrería industrial, pletinas, ángulos, vigas, Aceros especiales, mallas y cerchas electrosoldadas, utilizando como materia prima un Acero de buena calidad para los sectores de la construcción metalmecánicos.

Entre los principales insumos utilizados para la fabricación del Acero están las briquetas (75%) y la chatarra metálicas (25%). La briqueta es un mineral de hierro prerreducido de alto nivel de metalización (98% de hierro puro) y bajo en residuales (2% de impurezas y óxidos).

Como materia prima para plantas laminadoras de productos largos se tienen las palanquillas, productos semi-elaborados cuyas dimensiones están estandarizadas según el producto a fabricar.

1.2.2.1 PROCESO DE LAMINACIÓN

Para producir los perfiles I, es necesario someter las palanquillas a un proceso de deformación plástica denominado laminación en caliente. La deformación plástica permite que se mantengan las modificaciones que sufren las palanquillas al pasar entre rodillos laminadores de separación variable. Para la laminación en caliente la palanquilla es calentada previamente a ciertas temperaturas que permiten la deformación del material y la restauración cristalina interna del Acero a su estado normal durante la operación.

Este proceso de laminación consta de las siguientes fases: Precalentamiento, Desbaste, Laminado, Enfriamiento, Empaque y Amarre.

Para la laminación de vigas es necesario tener en cuenta cuánto se requiere deformar el ala en el espesor y cuánto se reduce en la altura. El tren laminador está conformado por dos zonas: semicanal abierto y semicanal cerrado. En el semicanal abierto los cilindros trabajan a diferentes velocidades reduciendo el espesor de las alas, lo cual crea un ensanchamiento que se desarrolla perpendicularmente a la presión ejercida. En la zona cerrada, los cilindros trabajan a la misma velocidad, en esta zona tiene lugar principalmente la reducción de la altura del ala.

La composición química del Acero es importante para obtener las características adecuadas en el proceso de laminación de uso del producto final. Las palanquillas utilizadas en la laminación de perfiles "I" satisface las exigencias de la norma COVENIN 1293-85.

Elementos (%)		
C	Mn	S
0.2	0.7	0.20

TABLA 1.4. Propiedades químicas del Acero

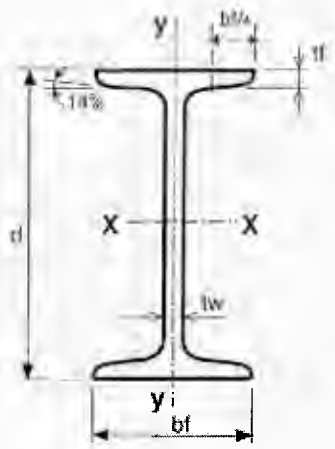
Las propiedades mecánicas de los perfiles "I", obtenidas al ensayar probetas provenientes del producto comercial, sirven para tomar en cuenta las posibles influencias que el proceso de laminación de las palanquillas y el de conformación de las vigas pudiera tener sobre el producto final.

Grado Norma Covenin	Grado Equivalente Norma ASTM	Punto Cedente Fy (min)	Punto Ruptura Fu (min)
AE - 25	A – 36	2500 kgf/cm^2	3700 kgf/cm^2

TABLA 1.5. Propiedades mecánicas

1.2.2.2 CLASIFICACIÓN

La designación de los perfiles laminados en caliente, a partir de barras rectas, se compone de las formas que éstos tienen y de sus dimensiones características (altura) y del peso por metro lineal calculado a partir de la sección transversal. Entre las vigas SIDETUR laminadas en caliente se tienen: IPN y UPN. Las Vigas de sección "I" (IPN) se caracterizan por tener una altura mayor que la anchura de las alas.



NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
bf	Anchura del ala
d	Altura del perfil
h	Altura del alma
tf	Espesor del ala
tw	Espesor del alma
X	Eje de mayor momento de inercia
Y	Eje de menor momento de inercia

FIGURA 1.6. Notación para las secciones de perfiles I laminados en caliente

1.3 MOMENTO Y DEFLEXIÓN

Los miembros que se comportan como vigas, están empotradas en los extremos B y C de la columna de la probeta, y la fuerza P se aplica en los extremos A y B de las dos vigas en volado, como se muestra en la siguiente figura:

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

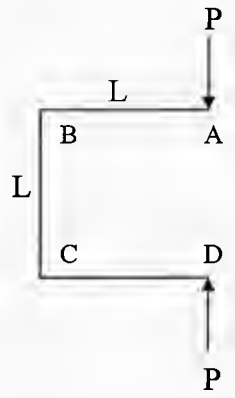


FIGURA 1.7. Esquema de la probeta

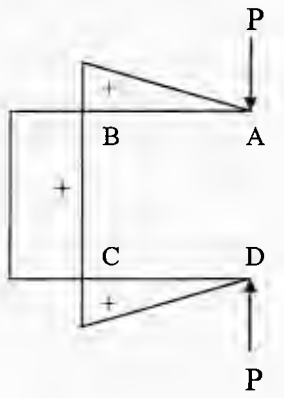
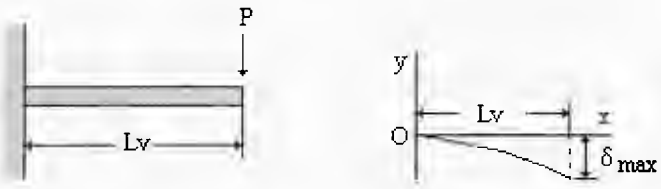


FIGURA 1.8. Diagrama de momentos

La deformación teórica de las probetas se realiza considerando tres modelos:

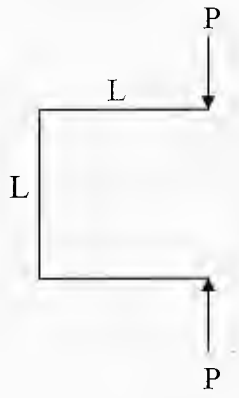
1. Modelo viga en voladizo:



$$\delta_{máx} = \frac{-P L_v^3}{3 E I}$$

FIGURA 1.9. Deflexión de viga en voladizo

2. Modelo estático con efectos de 1° orden:



$$\delta = \frac{2\,P\,L_v^{\,3}}{3\,E\,I} + \frac{P\,L_v^{\,2}\,L_c}{2\,E\,I}$$

$$\theta_{máx} = \frac{Ma\,L_c}{2\,E\,I}$$

FIGURA 1.10. Deflexión de la probeta con efectos de 1° orden

3. Modelo estático con efectos de 2° orden:

Deflexión de la columna:

$$y_{máx} = \frac{M\,L_c^{\,2}}{8\,E\,I} \times \frac{1}{(mL)^2}\,(1 - \cos mL)\,((1 / \operatorname{sen} mL) - 1)$$

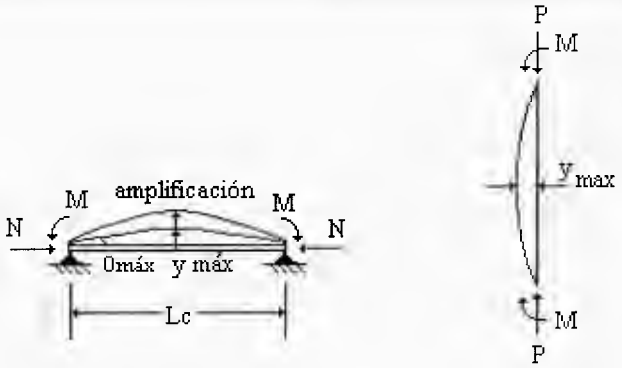


FIGURA 1.11. Deflexión amplificada de la columna

El valor de la deflexión total de las probetas, considerando el efecto de amplificación que produce la carga axial, se señala a continuación:

$$\theta_{máx} = \frac{Ma\, L_c}{E\, I} \times \frac{1}{mL} \left(\frac{1 - \cos mL}{\operatorname{sen} mL} \right)$$

Donde $m = \sqrt{(N / EI)}$

$$\delta_{máx} = L_v \operatorname{Tan}(\theta_{máx}) + \frac{P\, L_v^{\,3}}{3\, E\, I}$$

El momento, considerando la carga teórica en el límite elástico, es igual a la siguiente ecuación:

$$M = Fy\, S_{xx}$$

Expresando el valor de la fuerza P como:

$$P = Fy\, S_{xx} / L$$

Los valores de Fy y S_{xx} se tomaron de los catálogos para los distintos tipos de perfiles: SIDETUR y PROPERCA.

Suponiendo que la estructura diseñada se comporta de manera elástica, se podrá obtener las Curvas de Esfuerzo–Deformación a partir de las ecuaciones descritas anteriormente.

1.4 ESFUERZO Y DEFORMACIÓN

Basándose en la propiedad del Acero que la resistencia a la fluencia es la misma a la tensión y a la compresión, se tiene:

La fuerza y su correspondiente tensión o deformación son directamente proporcionales hasta un punto llamado límite de proporcionalidad, debajo del.cual al cesar el esfuerzo, la deformación correspondiente desaparece y el cuerpo retorna a su posición original. Pasado este período, la deformación aumenta más rápidamente que la fuerza que la produce, y si está cesa en su acción, el cuerpo recobra parcialmente sus dimensiones originales, debido a que ha sufrido una distorsión permanente o deformación plástica. El punto en que se rebasa el límite de elasticidad se llama límite de fluencia o punto de relajación. El punto de fluencia es donde se produce un alargamiento sin un considerable aumento de carga. A partir de este punto, si se aplica una carga adicional se alcanza un valor máximo de esfuerzo, que representa la máxima ordenada de la curva, después del cual comienza (en la muestra) la "estricción", donde el esfuerzo decrece con una deformación unitaria creciente y ocurre la ruptura.

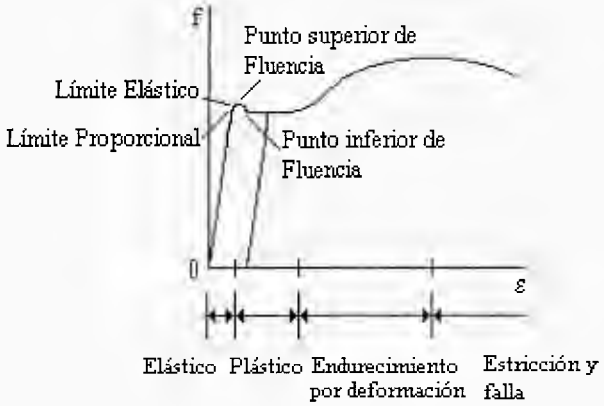


FIGURA 1.12. Curva Esfuerzo-Deformación

Si se alcanza el punto de fluencia y se retira la carga, el esfuerzo y la deformación decrecen linealmente a lo largo de una línea paralela a la recta de la curva de carga. Si después de cargada y descargada se carga de nuevo la probeta, la nueva curva de carga seguirá aproximadamente la curva de descarga anterior, hasta casi llegar al punto máximo de carga inicial, luego la trayectoria de la curva doblará a la derecha y se conectará con la parte curva del diagrama de esfuerzo–deformación original. La parte recta de la nueva curva de carga es más larga que la posición inicial, por lo que el límite de proporcionalidad y el límite elástico han crecido como resultado del endurecimiento por deformación que ocurrió durante la carga inicial de la probeta.

1.5 SOLDADURA

Las conexiones de los miembros estructurales de Acero son de suma importancia. Una conexión inadecuada puede ser la parte más débil de una estructura, este a sido la causa de numerosas fallas. Las estructuras modernas de Acero se conectan por soldadura o se atornillan, o por una combinación de ambos tipos de sujetadores.

Gracias al desarrollo de nuevas técnicas durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y barcos.

La soldadura tiene varias ventajas sobre el atornillado. Una conexión soldada es, a menudo más simple en concepto y requiere pocos agujeros correspondientes a los de tornillo de montaje para la operación de soldado; es decir, la preparación de las piezas por unir es más sencilla y más económica, lográndose una disminución en el tiempo de ejecución de la obra. Además, la soldadura proporciona mayor rigidez a la estructura en comparación a las uniones apernadas o remachadas, debido a que éstas últimas sufren deformaciones en sus uniones. También la construcción soldada es más liviana, porque se omite el peso del solape y pernos. Con respecto al personal,

deben ser soldadores debidamente calificados para lograr una conexión soldada de calidad.

Soldadura, en ingeniería es el procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin al aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

La mayor parte de procesos de soldadura se pueden separar en dos categorías: soldadura por presión, que se realiza sin la aportación de otro material mediante la aplicación de la presión suficiente y normalmente ayudada con calor, y soldadura por fusión, realizada mediante la aplicación de calor a las superficies, que se funden en la zona de contacto, con o sin aportación de otro metal.

Entre los diferentes procesos de soldar se pueden encontrar: por Forja, Rayo láser, Oxiacetilenica, Térmica, por Fricción, Resistencia y Arco Eléctrico.

En los procesos de soldadura por Arco Eléctrico, la unión de dos o más materiales metálicos es producida por el calentamiento generado con un Arco Eléctrico, obtenido entre el trabajo y uno ó varios electrodos. Uno de los más importantes procesos de soldadura que utiliza como fuente de energía el Arco Eléctrico es la soldadura con electrodo manual revestido.

Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo manual revestido, es el proceso para soldar por fusión, donde la unión es producida por un Arco Eléctrico obtenido entre un electrodo metálico recubierto y el material de trabajo. El material de aporte es suministrado por el electrodo y para efecto de lograr la unión, no se utiliza presión. La protección del metal fundido es obtenida por la descomposición del revestimiento.

El revestimiento contiene compuestos químicos que aportan al proceso de soldar unas características que ayudan a la buena calidad de la soldadura: atmósfera protectora, estabilidad y penetración del arco, prevención contra oxidación, control de la tasa de enfriamiento de la soldadura, adición de elementos aleantes y remoción de impurezas del metal fundido que aparece cuando la soldadura se enfría, formando una capa llamada "escoria" que debe ser removida antes de hacer otra pasada con el electrodo.

FIGURA 1.13. Proceso de soldadura por Arco Metálico Protegido (SAMP)

En el proceso de soldadura por Arco Eléctrico con electrodo manual revestido, la soldadura se puede aplicar en las posiciones siguientes: Plana, Vertical, Horizontal y Sobrecabeza. La ejecución de cordones en posición plana es más fácil y económica; por lo tanto, se debe utilizar en cuanto sea posible. Esta posición es aquélla en que el trabajo está debajo de la mano y el metal se deposita sobre un plano horizontal.

La clasificación de la soldadura de acuerdo a la geometría del cordón se simplifica en dos tipos principales: filete y ranura. Entre éstas las de filete son las más comunes, que se define como aquéllas que se colocan en una esquina formada por dos partes en contacto. Las soldaduras de filete se usan en juntas T. El diseño y análisis de este tipo de soldadura se basa en la suposición de que la sección transversal de la soldadura es

un triángulo rectángulo a 45°. Cualquier material agregado fuera de la hipotenusa del triángulo como refuerzo es despreciado.

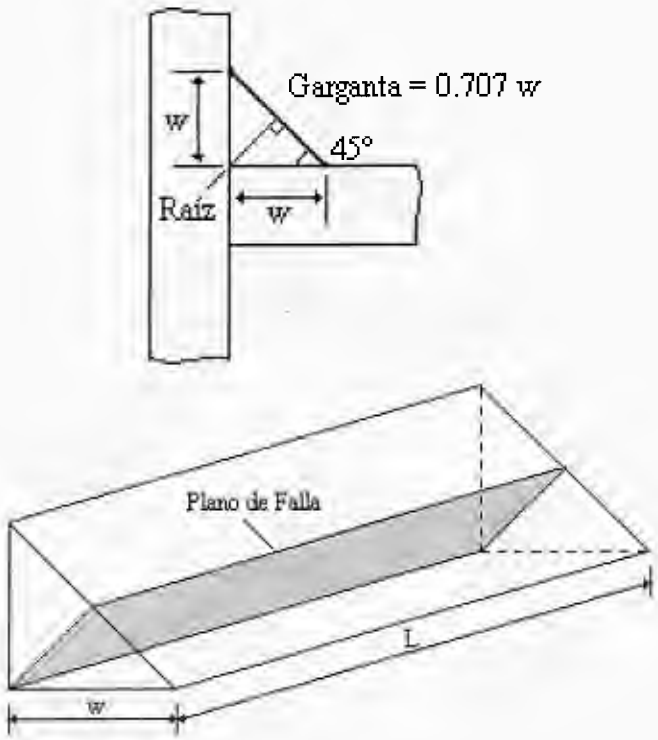


FIGURA 1.14. Esquema de la soldadura de filete

1.5.1 PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS POR SOLDAR

Cuando se trabaja el proceso por arco con electrodo manual revestido, hay necesidad de preparar el material en forma tal que se garantice el logro de unión soldada de óptima calidad. La preparación de las piezas por soldar debe seguir los siguientes pasos: Selección de la forma de unión y Diseño de la junta.

Selección de la Forma de Unión:

- A Tope
- En Angulo
- De Solape
- Por el Borde
- En T

Diseño de la junta:

El punto en donde se ha de lograr la unión se denomina junta que cuando ocurre este punto se llama ensamble o junta Soldada.

Tipos de junta:

- A tope: preparar un bisel o chaflán en el cual se depositará la soldadura.
- En filete: soldadura de área seccional triangular entre dos superficies que están a 90°. Se utiliza en uniones de solape, en ángulo o en T.
- Combinación de las dos anteriores.

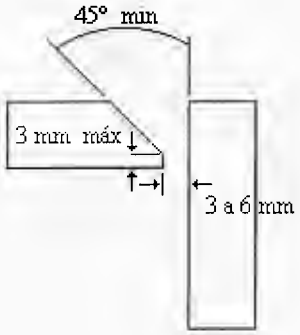
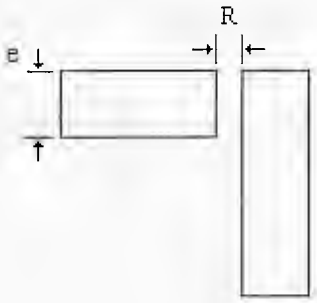


FIGURA 1.15. Juntas con bisel sencillo para soldar uno ó ambos lados



e	R
3 mm máx	0
3 a 6 mm	e/2 máx

FIGURA 1.16. Juntas a tope para soldar ambos lados

La resistencia de las uniones soldadas cuando sometidas a ciertos tipos de carga (tracción, compresión, torsión, etc) es establecida por el tipo de junta que se utiliza y por el diseño de la misma. La seguridad y la vida útil de una estructura soldada dependen de la eficiencia de la junta. Un diseño correcto de la junta ayuda a controlar la distorsión, reduce la posibilidad de agrietamiento, facilita el trabajo del operario y produce soldaduras sanas a un bajo costo.

1.5.2 ELECTRODOS REVESTIDOS

Una misión fundamental del revestimiento es evitar que el metal fundido entre en contacto con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno del aire, ya sea por la formación de un gas protector alrededor del camino que han de seguir las gotas del metal fundido y después, mediante la formación de una abundante escoria que flota por encima del baño de fusión. Al soldar los Aceros se debe minimizar la captación de hidrógeno por el metal de soldadura y la zona afectada por el calor, debido a que este elemento químico tiende a hacer quebradizo el Acero y ocasionar grietas bajo el cordón de soldadura depositada.

Como el tipo de revestimiento tiene gran influencia sobre las diferentes propiedades del electrodo y él es el que determina una buena cantidad de sus propiedades, éste se usa para clasificar los electrodos según el material preponderante en el revestimiento, además en esas clasificaciones se incluyen datos sobre las características de resistencia del metal depositado. La AWS clasifica los electrodos en varios tipos, dependiendo de la clase de revestimiento, entre los cuales se tienen los electrodos revestidos con bajo hidrógeno.

Electrodos de bajo hidrógeno: su revestimiento trata de eliminar totalmente cualquier sustancia que durante la operación del electrodo genere hidrógeno. Estos electrodos son aplicables en la soldadura de Aceros de bajo y medio carbono, Aceros de baja aleación y Aceros difíciles de soldar. Los electrodos de bajo hidrógeno deben

almacenarse en lugares secos, y para evitar que absorban humedad colocarlos en hornos entre 40–150 °C. Para trabajos de alta responsabilidad es necesario secarlos a 350 °C durante una hora previa al trabajo.

La resistencia de un filete de soldadura está en función del tipo de electrodo. La resistencia del electrodo se define como resistencia última en tensión, con resistencias de 60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120 kips por pulgada cuadrada disponible para el proceso de soldadura por arco metálico protegido. La notación estándar que utiliza la American Welding Society (AWS D5.1) para especificar un electrodo es la letra E, seguida por dos o tres dígitos que indican la resistencia por tensión y por dos dígitos que especifican el tipo de recubrimiento (como la resistencia es la propiedad de interés principal para el ingeniero, generalmente estos dos últimos dígitos son representados por XX).

Se puede emplear electrodo E70XX con Aceros que tengan un esfuerzo de fluencia menor que 60 kips.

1.5.3 EFECTOS DE LA SOLDADURA

Generalmente, la cantidad de metal fundido y la que recibe el calor producido por el arco son pequeñas en comparación con la cantidad de metal base y por esa razón ese calor es arrastrado rápidamente por el metal base frío, enfriando rápidamente el cordón. Esos cambios tan rápidos y bruscos en temperatura hacen que la estructura del metal sufra cambios térmicos, contracciones y dilataciones que pueden afectar seriamente sus propiedades y transformaciones de fase en su microestructura.

Por este motivo, si se está aplicando un cordón de soldadura y se pudiera medir la temperatura en diferentes sitios se podría ver que en el centro del cordón la temperatura aumenta en pocos segundos hasta la temperatura de fusión del Acero,

creando una zona donde la junta estará constituida por una mezcla homogénea de metal de aporte y metal base, la cual se conoce como Zona de Fusión.

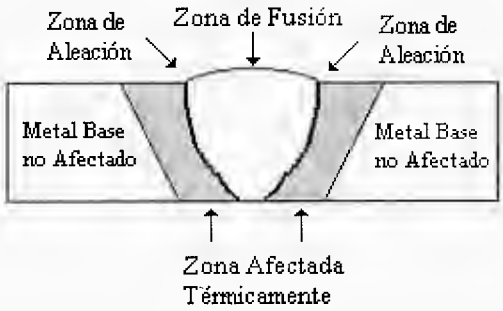


FIGURA 1.17. Representación de una unión por soldadura

A medida que se aleja del eje del cordón se observa que la temperatura máxima alcanzada es inferior a la de fusión, hasta llegar a un sitio en que el metal base no experimenta ningún cambio en temperatura. Aunque no se funda parte del material base sí está expuesto a altas temperaturas. En esta zona el Acero puede llegar a recristalizarse en forma de austentita y puede haber también modificaciones en la estructura del grano (crecimiento del tamaño del grano). Esta zona es la llamada Zona Afectada Térmicamente.

1.6 RIGIDIZADORES DE COLUMNAS

La mayor parte del momento transmitido de la viga a la columna en una conexión rígida toma la forma de un par que consiste en la fuerza de tensión y compresión en las alas de la viga. La aplicación de estas fuerzas concentradas puede requerir el refuerzo de la columna. Por momento negativo, esas fuerzas están dirigidas como se muestra en la Figura 1.18, con el ala superior de la viga transmitiendo una fuerza de tensión a la columna y el ala inferior transmitiendo una fuerza de compresión.

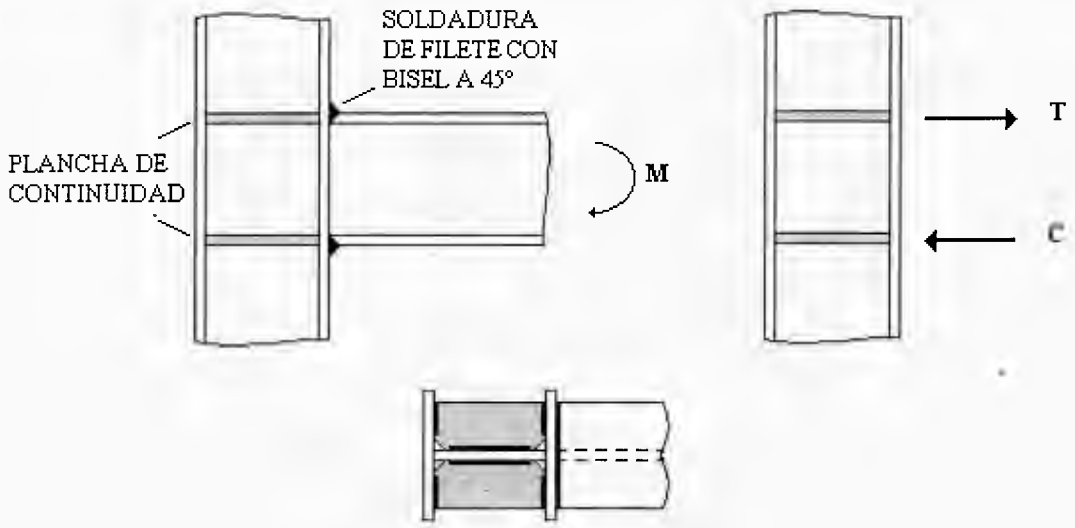


FIGURA 1.18. Conexión Precalificada. Doble plancha en el alma

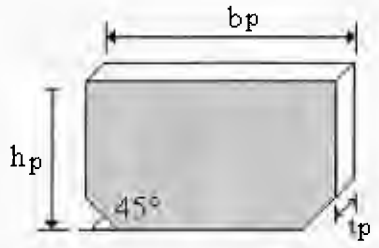


FIGURA 1.19. Notación de la plancha de continuidad

Ambas fuerzas son transmitidas al alma de la columna; de las dos fuerzas, la de compresión resulta más crítica, debido al problema de estabilidad. La carga de tensión en la parte superior distorsiona el alma de la columna al generar una carga adicional sobre la soldadura que conecta el ala de la viga al ala de la columna. Las planchas de continuidad (Figura 1.19) proporcionan un anclaje al ala de la columna. Este tipo de rigidizador debe soldarse al alma y al ala de la columna de forma alineada con las alas de la viga, tanto superior como inferior. Así mismo, este rigidizador mantiene la deflexión y la carga uniforme en el ala de la columna. Figura 1.20.

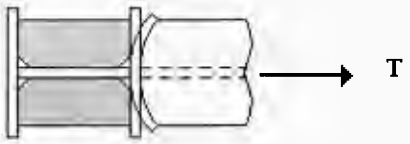


FIGURA 1.20. Distorsión del Ala de la Columna

CONEXIONES CONTINUAS ENTRE VIGA – COLUMNA

En la Figura 1.21 se puede observar un tipo de conexión continua, donde la viga está aporticada en el alma de la columna. Un apoyo hecho con una base como rigidizador (cartela), está soldado a la columna en taller, ver Figura 1.21 (a). Este rigidizador absorbe el corte que transmite la viga a la columna. Un par de planchas conectoras de alas, están soldadas en campo, tanto a la columna como a la viga. Si se usan dos planchas conectoras en vez de una sola plancha continua, la soldadura de filete en el ala de la viga, puede ser de mayor longitud para transmitir la carga requerida; como se ilustra en la Figura 1.21 (b).

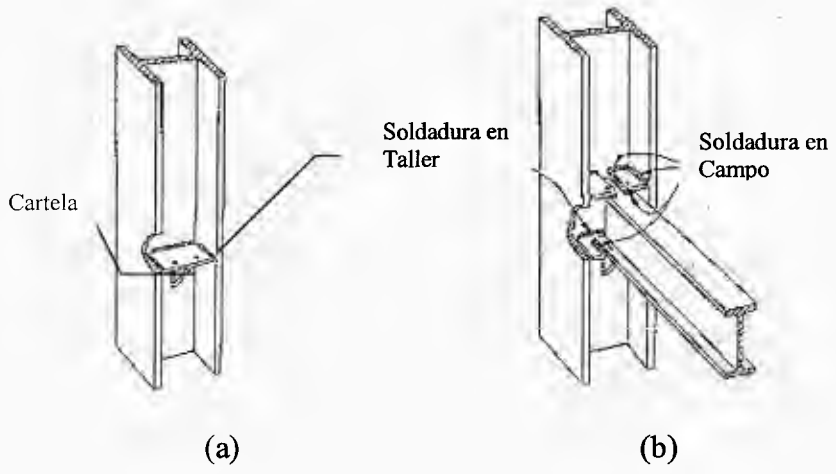


FIGURA 1.21. Viga aporticada en el alma de la columna

CAPÍTULO II
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El método de investigación consiste fundamentalmente en una serie de ensayos a compresión en probetas sobre vigas en volado. En esta investigación experimental se empleará la observación directa para evaluar el comportamiento de las diferentes uniones soldadas, sometidas a esfuerzos más allá de la fluencia. Así mismo, evaluar las eficiencias obtenidas en términos de rigidez y resistencia de los modelos a ensayar.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA

La probeta estará formada por tres elementos: una columna y dos vigas, que simularán un pórtico. Un extremo de las vigas estará empotrado a la columna y el otro extremo en volado. El material que conforman las probetas constará de perfiles metálicos de alma abierta, cortesía de las empresas SIDETUR y PROPERCA.

FIGURA 2.1. Miembros de la probeta

FIGURA 2.2. Representación del pórtico

El conjunto de probetas a ensayar se ha divido en varios grupos de acuerdo al tipo de conexión a soldar, como se describe a continuación:

GRUPO I	GRUPO II	GRUPO III
JUNTAS A TOPE	**JUNTAS CON BISEL A 45°**	**COLUMNAS RIGIDIZADAS Y JUNTAS CON BISEL A 45°**
IPN 80 - IPN 80	IPN 100 - IPN 100	IPN 120 - IPN 120
IPN 100 - IPN 100	IPN 120 - IPN 120	IPN 140 - IPN 140
IPN 120 - IPN 120		CP 140 - VP 140
CP 140 - VP 140		CP 140 - IPN100
CP 140 - IPN100		

TABLA 2.1. Clasificación de las probetas en grupos

2.1.1 GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

Vigas soldadas al ala de la Columna:

1. **IPN 80 - IPN 80**: Columna y vigas tipo I.
2. **IPN 100 - IPN 100**: Columna y vigas tipo I.
3. **IPN 120 - IPN 120**: Columna y vigas tipo I.
4. **IPN 140 - IPN 140**: Columna y vigas tipo I.
5. **CP 140 - VP 140**: Columna tipo H y vigas tipo doble T.

Vigas soldadas al alma de la Columna:

1. **CP 140–IPN 100**: Columna tipo H y vigas tipo I.

Las dimensiones de las probetas que conforman la muestra serán mostradas a continuación:

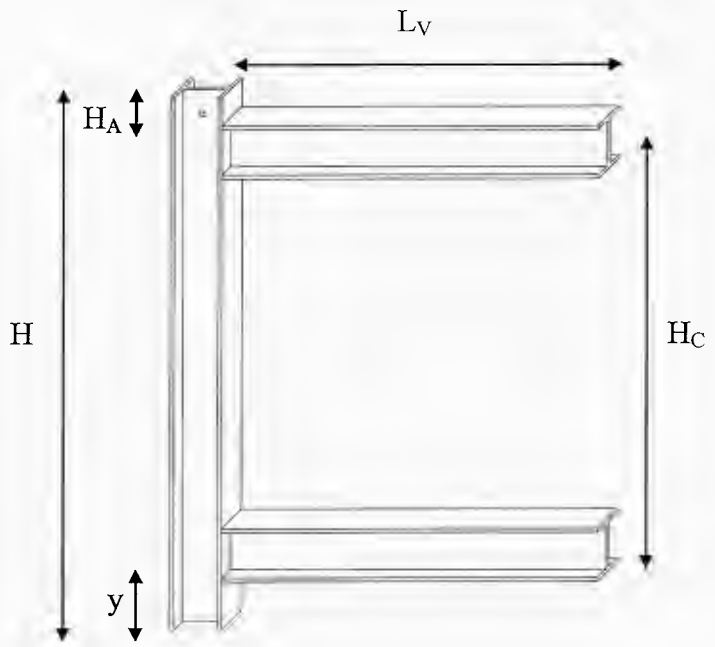


FIGURA 2.3. Dimensiones de la probeta

MUESTRA	PROBETA					PERFILES							
	COLUMNA - VIGA (mm)					COLUMNA (mm)				VIGA (mm)			
	H	H_A	Hc	Lv	y	t_f	t_w	d	b_f	t_f	t_w	d	b_f
IPN 80 - IPN 80	800	30	600	560	100	5.9	4.2	80	42	5.9	4.2	80	42
IPN 100 - IPN 100	800	30	530	480	135	6.8	4.5	100	50	6.8	4.5	100	50
IPN 120 - IPN 120	800	30	560	500	120	7.7	5.1	120	58	7.7	5.1	120	58
CP 140 - VP 140	800	30	590	520	105	9.0	6.0	140	140	3.0	6.0	140	100
CP 140 - IPN 100	800	30	550	480	125	9.0	6.0	140	140	6.8	4.5	100	50

TABLA 2.2. Dimensiones de la probeta

La relación de esbeltez k L / r de los miembros comprimidos no excederá el valor de 200, cumpliendo con la norma COVENIN–MINDUR 1618-98.

2.1.2 PREPARACIÓN PRELIMINAR

Para dar inicio a la construcción de las probetas, se debe inspeccionar la limpieza de la superficie de los perfiles, que éstos estén libres de cualquier tipo de impurezas. Se supervisará la dimensión de los perfiles cortados de acuerdo a las medidas especificadas en la Tabla 2.2.

Durante todo el proceso de construcción de las probetas, se deberán colocar los electrodos en un horno a 100–150 °C, antes de dar inicio a la ejecución de la soldadura.

FIGURA 2.4. Almacenamiento de electrodos en el horno

Las probetas se armarán con los perfiles a soldar, a través de una soldadura por punteo como guía para la ejecución del cordón de soldadura, de tal manera que se garantice la simetría de las probetas y la perpendicularidad entre viga–columna. Es preciso sujetar las piezas para soldarlas, evitando así una excesiva rigidez del conjunto.

FIGURA 2.5. Elaboración de probetas

Para la preparación de la junta, se realizará el proceso de biselado a 45° sobre los bordes a soldar en aquellas probetas en que el espesor del ala del perfil sea mayor a 6 mm. En ambos casos, ya sea junta con bisel o junta a tope, se dejará una separación de 3 mm entre viga–columna, para lograr el punteo preliminar.

Se cortarán las láminas de Acero de acuerdo a las medidas especificadas en la Tabla 2.6 (pág.56), para elaborar las planchas de continuidad de las probetas a rigidizar. A estas planchas también se les realizará un biselado en dos esquinas de la misma a 45° aproximadamente.

Como parte de la preparación preliminar del montaje, se cortarán cabillas de ½" iguales al ancho del ala (b_f) de las vigas y se soldarán a 1 cm de su extremo. También se perforará un agujero, ubicado a 3 cm del extremo superior del perfil utilizado como columna.

2.1.3 UNIONES

Las uniones viga–columna se soldaran mediante el proceso de soldadura por Arco Eléctrico y se utilizarán electrodos revestidos AGA B-10 del tipo bajo en hidrógeno, según la clasificación AWS corresponde a un E7018.

La posición de ejecución de la soldadura deberá estar en un plano horizontal y la geometría del cordón será en filete y la medida de la soldadura de filete será de 3 a 5 mm, dependiendo del espesor a soldar.

Durante la ejecución de toda la soldadura, el amperaje aplicado al electrodo se mantendrá constante en 100 amperios, al igual que el voltaje de 60 v y la velocidad de avance del cordón.

La soldadura se limpiará adecuadamente, eliminando la escoria del cordón de la misma. Posteriormente, la manipulación de las probetas se realizará una vez que éstas hayan alcanzado la temperatura ambiente.

2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para ensayar las probetas a compresión, se utilizará una prensa hidráulica (100 ton) y se diseñará un montaje general, formado por un sistema de sujeción que permita llevar a cabo las mediciones necesarias. Para evitar posibles errores de medición se verificará que los elementos de soporte estén centrados y al mismo tiempo, observar la verticalidad de la probeta.

2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

El montaje de las probetas en la prensa se realizará a través de un sistema formado por rodillos, los cuales servirán para sujetar la probeta y aplicar la carga puntual de compresión en ambos extremos de las vigas. Las cabillas soldadas a las vigas servirán para evitar el deslizamiento de los rodillos antes de comenzar el ensayo. Se prensará la probeta a fin de garantizar su verticalidad.

FIGURA 2.6. Detalle del montaje

Para evitar cualquier tipo de movimiento lateral de la probeta ajeno al ensayo, se utilizará un rigidizador lateral diseñado con listones de madera. En caso que se desprenda o falle algún miembro de la probeta, se dispondrá de un sistema de amarre, conformado por una guaya, la cual no presentará tensión alguna al inicio del ensayo. A su vez, si la falla toma otra dirección, se instalará un protector con listones de madera como sistema de seguridad.

El montaje que se usará para el sistema de medición estará constituido por un soporte imantado sujeto a la parte fija de la prensa, el que permitirá hacer las mediciones de la deflexión en dirección vertical. Se colocarán los instrumentos de medición, asegurándose que en el instante en que se inicie el ensayo a compresión, las deformaciones estén en cero.

2.2.2 SISTEMA DE MEDICIÓN

El instrumento utilizado para medir la deformación corresponde a un flexímetro, con un recorrido de 5 cm y una apreciación de 0,01 mm. El flexímetro se colocará en el

mismo plano de aplicación de la carga; es decir, ambos puntos, tanto el de medición como el de carga puntual deben estar alineados. Las mediciones que se tomarán corresponden a la deflexión que se produce por compresión entre las dos vigas en volado. Como sistema de medición adicional se dispondrá de una cinta métrica colocada de forma vertical para tomar valores alternos al flexímetro.

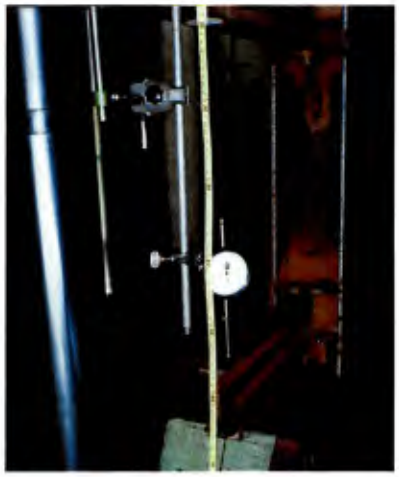


FIGURA 2.7. Sistema de medición. Flexímetro y cinta métrica

2.2.3 VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO

Para recopilar los valores del ensayo, se dispondrá de una planilla, en la cual se anotarán los datos de carga con intervalos de 0,5 mm de deflexión, leídos en el flexímetro hasta alcanzar la resistencia última de la probeta al finalizar el recorrido del flexímetro. Se utilizará la cinta métrica para realizar mediciones con intervalos de un minuto. La curva del ensayo esfuerzo-deformación se elaborará a partir de los valores calculados teóricamente y los datos obtenidos en el ensayo. Los valores de la deformación experimental se compararán con la teórica calculada a partir del modelo estático con efectos de 2° orden.

2.3 CÁLCULOS

2.3.1 UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA PRO/ENGINEER – PRO/MECHANICA (Versión 20)

El programa es una herramienta computarizada para ingeniería que ayuda a analizar y optimizar los diseños estructurales, térmicos y con requisitos dinámicos. Su finalidad es ayudar a encontrar el mejor diseño en menos tiempo. Este programa utiliza el método de elementos geométricos tipo concha para el análisis del diseño, mediante el cual los elementos se generan en forma de malla, y en funciones de forma polinómica.

Una desventaja en el análisis de las probetas con la utilización de Pro/Mechanica es que este programa se limita solo al rango elástico o lineal de la curva esfuerzo-deformación.

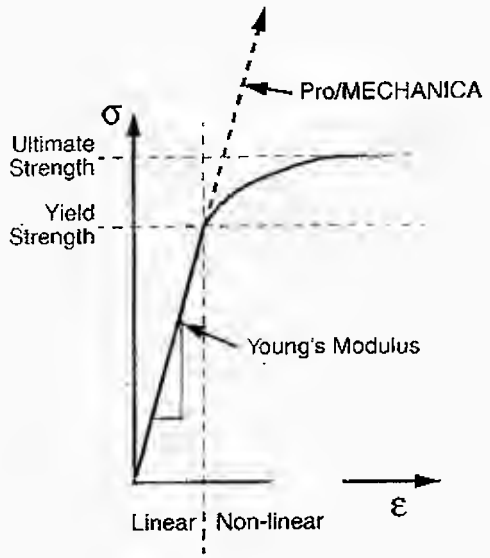


FIGURA 2.8. Pro/Mechanica: Curva Esfuerzo–Deformación

El programa define el principio de fluencia a través de la Teoría de Von Mises-Hencky, por ser la más conveniente para el caso de materiales dúctiles.

La teoría de la energía de la distorsión se originó a partir de observar que los materiales dúctiles, sometidos a esfuerzos hidrostáticos (de igual tensión o compresión), tenían resistencias de fluencias muy superiores a los valores obtenidos por el ensayo a tensión simple. Así, se postuló que la fluencia no era, de ninguna manera, un fenómeno de tensión o de compresión simple, sino más bien que estaba relacionada de algún modo con la distorsión (o deformación angular) del elemento esforzado.

Para estudio de análisis y diseño conviene definir el concepto de tensión Von Mises a partir de la ecuación:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2_x + 3\,\tau^2_{xy}}$$

Para el cálculo de las probetas se construyeron tres tipos de modelos estructurales con el programa Por/Engineer–Pro/Mechanica. Los modelos creados de forma lineal y los creados con superficie son los que arrojan resultados más confiables, ya que a través de ellos se reduce el número de elementos a analizar. Esto es válido al compararlo con el modelo construido con sólidos (3D). Para simular la unión más aproximada a la práctica, se realizará un patrón compuesto por 3 elementos: columna, viga y cordón de soldadura, y así obtener los esfuerzos más reales en la unión por soldadura.

Las restricciones establecidas en los modelos no permiten que las probetas realicen un movimiento en sentido perpendicular a su plano, manteniendo unas condiciones más reales en la unión.

Para ilustrar la simulación, se muestra en las siguientes figuras la salida del programa de la probeta CP140–IPN100. Otros resultados obtenidos de las simulaciones realizadas se presentan en el Apéndice (Figura A.1 a A.26).

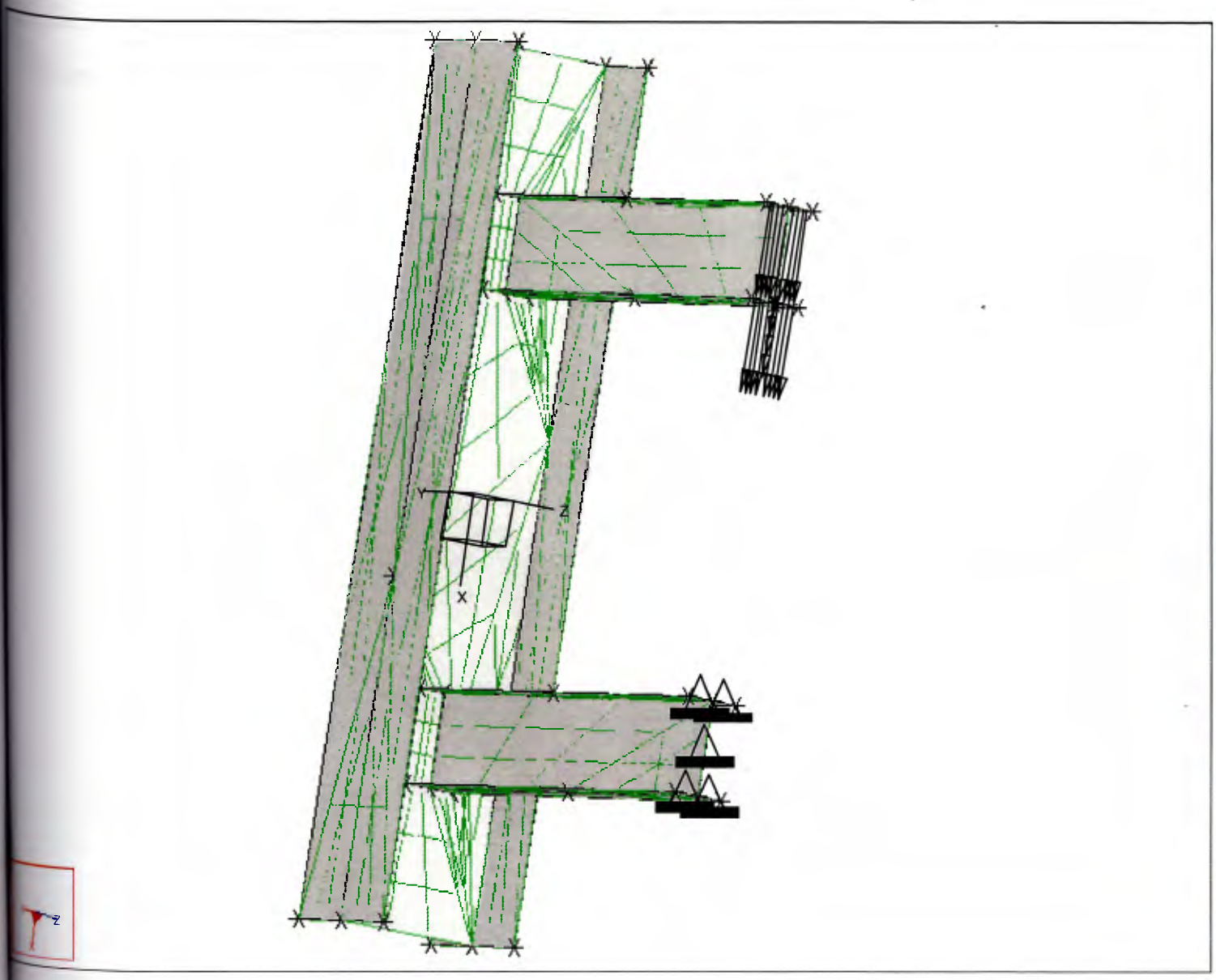


FIGURA 2.9. Elemento tipo concha mallada con restricciones y carga aplicada

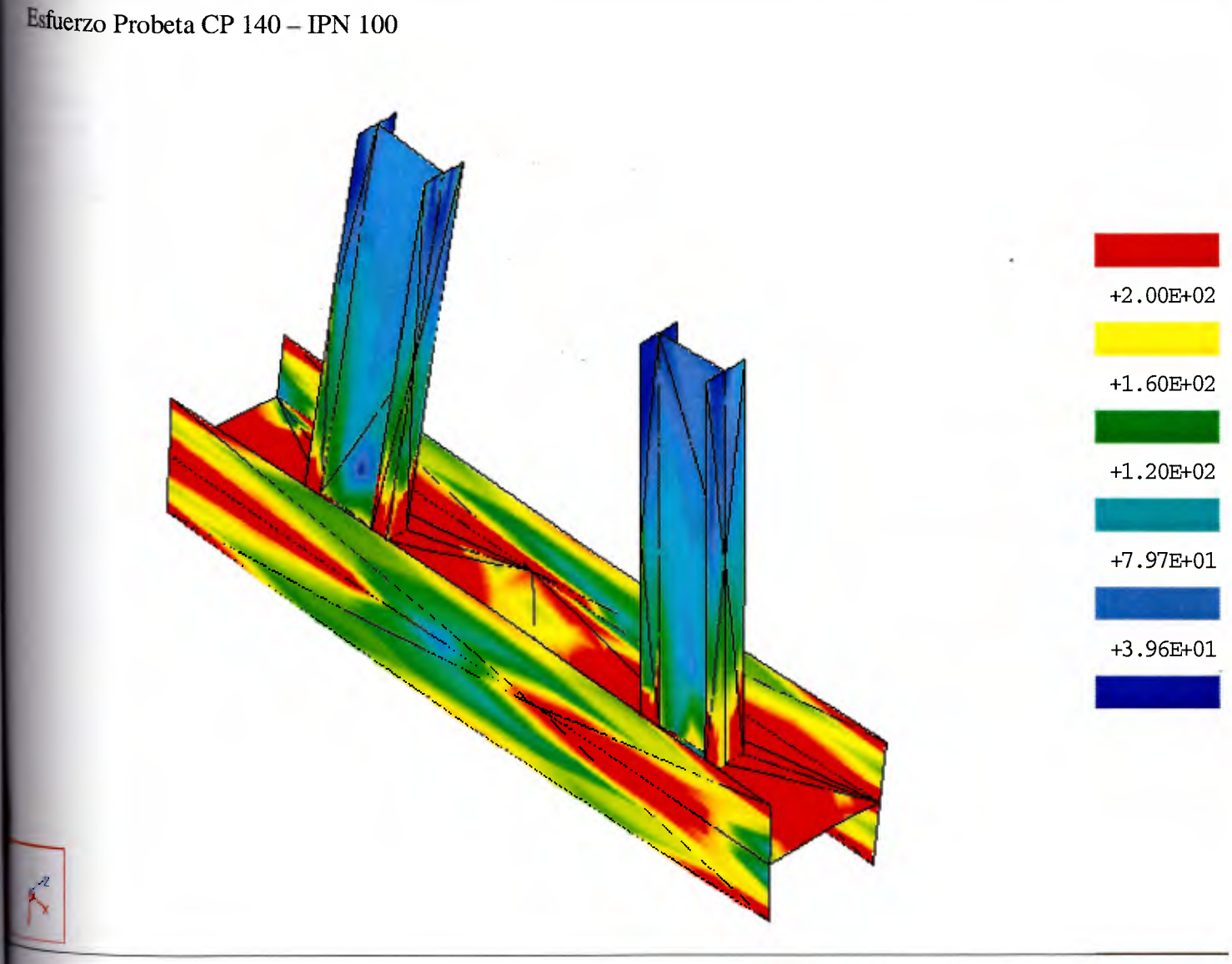


FIGURA 2.10. Diagrama de esfuerzo Von Mises (modelo con superficies)

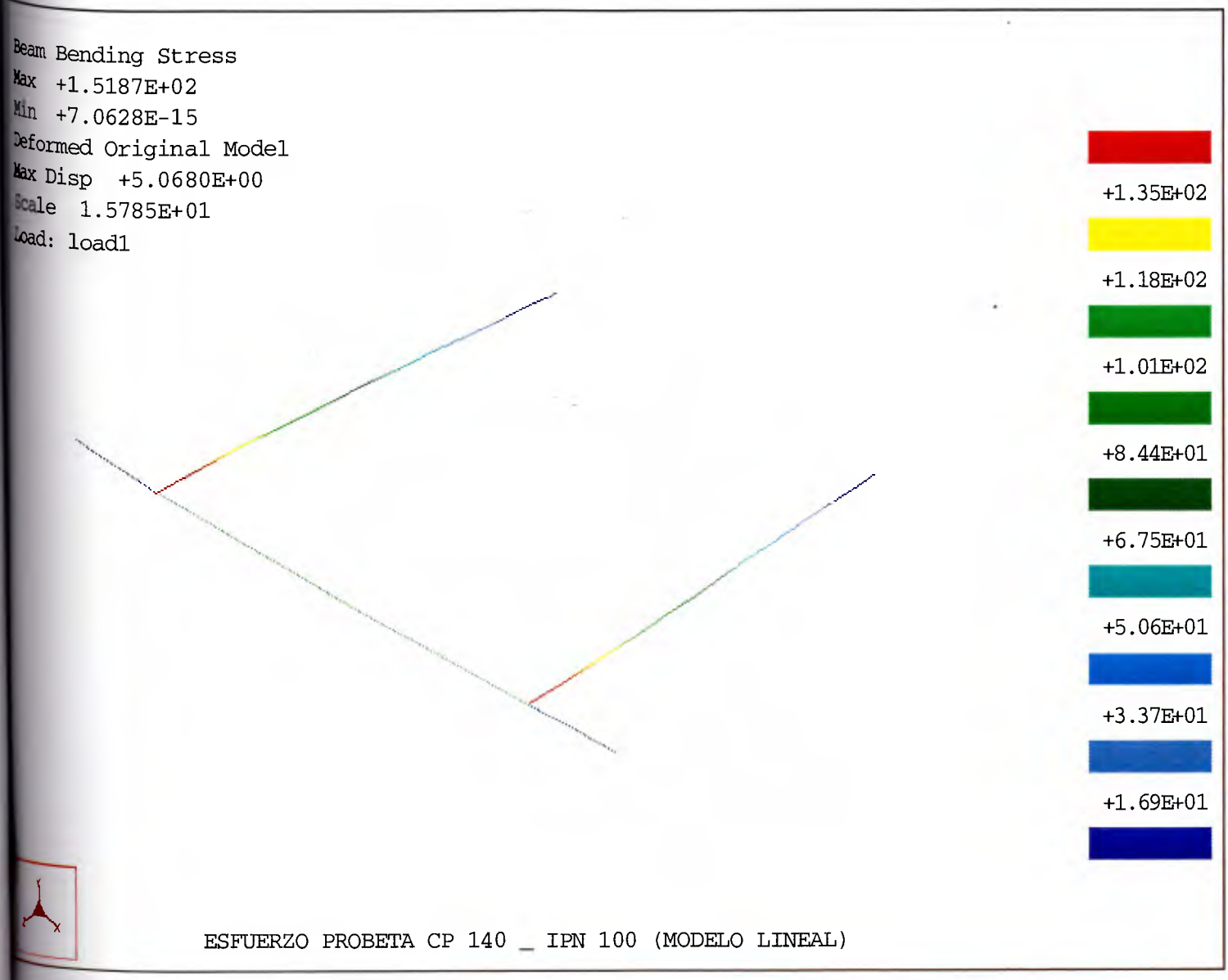


FIGURA 2.11. Diagrama de esfuerzo (modelo lineal)

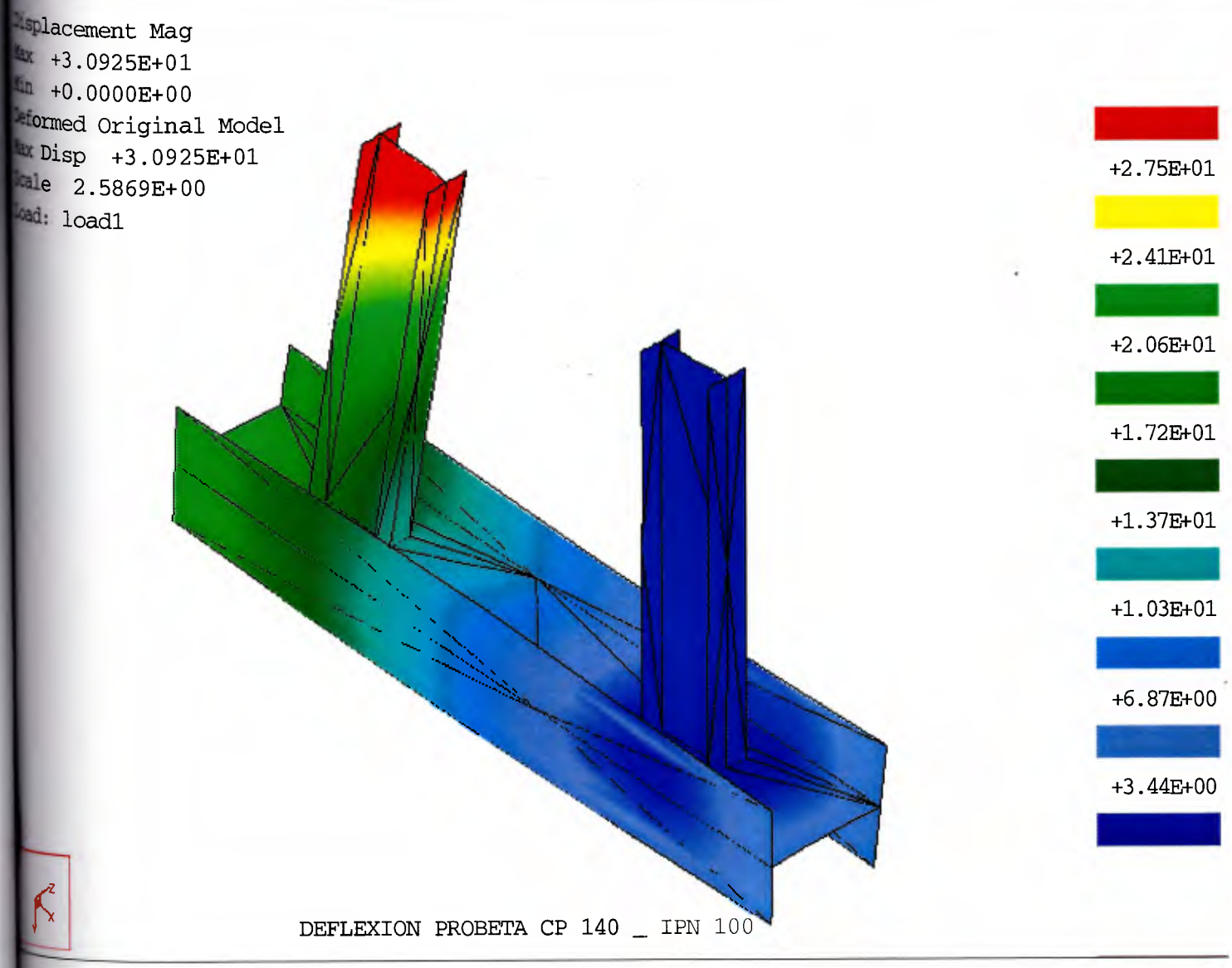


FIGURA 2.12. Deflexión (modelo con superficies)

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

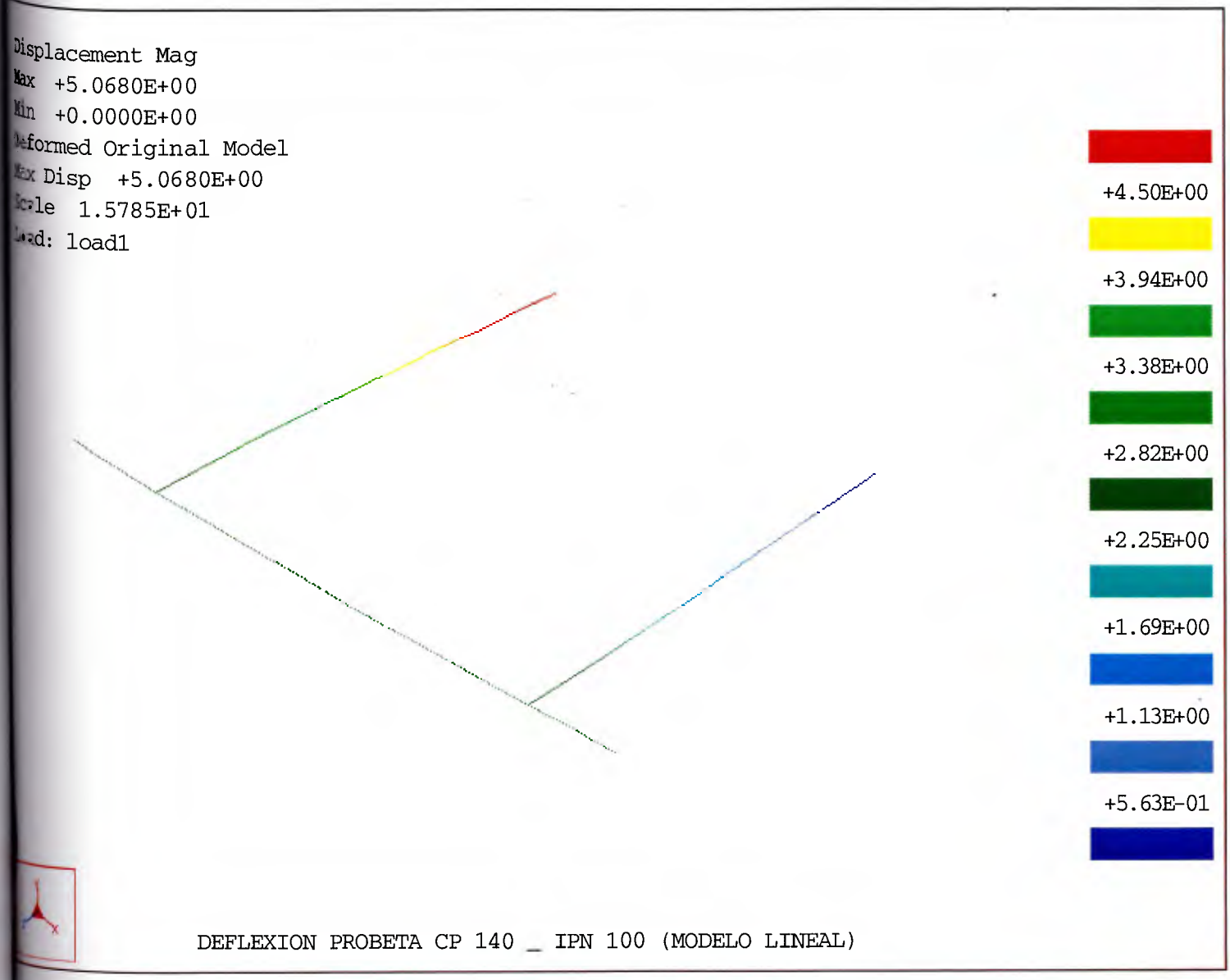


FIGURA 2.13. Deflexión (modelo lineal)

Los resultados teóricos obtenidos de la simulación se presentan en la siguiente tabla:

PROBETA	P (N)	P (kgf)	σ (N / mm²)	σ (kgf / cm²)	δ (mm)
IPN80 - IPN80	5000	510	143,80	1465,84	12,08
IPN100 - IPN100	10000	1019	137,90	1405,70	7,59
IPN120 - IPN120	15000	1529	145,21	1480,21	7,65
IPN140 - IPN140	15000	1529	101.90	1038.74	4.26
CP140 - VP140	15000	1529	68,30	696,22	4,76
CP140 - IPN100	10000	1019	151,90	1548,41	4,90

TABLA 2.3. Resultados teóricos

2.3.2 CÁLCULOS DE SOLDADURA

Para el diseño de una soldadura de filete sometida a corte y momento, es necesario calcular una fuerza resultante para compararlo con el esfuerzo transmitido al cordón de soldadura.

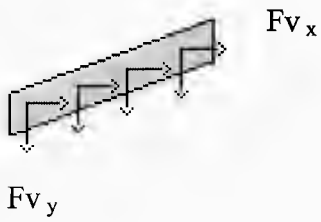


FIGURA 2.14. Diagrama de fuerzas sobre el cordón de soldadura

El espesor del cordón de soldadura se calcula tomando en cuenta los espesores mínimos especificados por la Norma "Estructura de Acero para Edificaciones. Proyecto, Fabricación y Construcción". En el caso del perfil IPN 80, debido al espesor a soldar, le corresponde un espesor mínimo de soldadura equivalente a 3 mm, y para el resto de los perfiles se utilizará un espesor mínimo de 5 mm, tomando en cuenta el diseño de la junta seleccionada para cada tipo de probeta.

La componente en X de la fuerza resultante es igual a $Fv_x = T / L_H$, y la componente en Y corresponde a: $Fv_y = V / \Sigma L$, por lo tanto la fuerza resultante se puede expresar como:

$$F_R = \sqrt{Fv_x^2 + Fv_y^2}$$

Donde T corresponde a la fuerza de tracción ejercida sobre el cordón y equivale a: $T = M / (0.95\ d)$ y el valor de V corresponde a la fuerza cortante que actúa sobre el cordón, es decir, igual a P.

PROBETA	V (kgf)	ΣL (cm)	Fv_y (kgf / cm)	M (kgf m)	d (cm)	T (kgf)	L_H (cm)	Fv_x (kgf / cm)	F_R (kgf / cm)
IPN 80 - IPN 80	860	31,96	27	556	0,59	99118	7,98	12421	12421
IPN 100 - IPN 100	1705	39,1	44	989	0,68	153079	9,55	16029	16029
IPN 120 - IPN 120	2571	46,18	56	1578	0,77	215691	11,09	19449	19449
IPN 140 - IPN 140	3652	53,26	69	2367	0,86	289678	12,63	22936	22936
CP 140 - VP 140	3818	67,4	54	2344	0,6	411306	19,7	20879	20879
CP 140 - IPN 100	1639	39,1	42	989	0,68	153079	9,55	16029	16029

TABLA 2.4. Cálculo de la fuerza resultante sobre el cordón de soldadura

2.3.3 REVISIÓN DE PANDEO LOCAL

2.3.3.1 FLEXIÓN LOCAL DE LAS ALAS

Si la carga factorizada aplicada, que es transmitida por el ala de la viga, excede la resistencia de diseño ϕR_t, para cualquiera de los estados límites considerados, deberán usarse rigidizadores. Para evitar una falla por flexión local del ala de la columna, la carga a tracción del ala de la viga no debe exceder de la resistencia teórica minorada:

$$\phi R_t = 0.90\ (6.25\ t_f^2\ Fy)$$

PROBETA	t_f (cm)	Fy (kgf / cm^2)	ϕR_t (kgf)	P_u (kgf)	T_u (kgf)
IPN80 - IPN80	0,59	2500	4895	1081	7539
IPN100 - IPN100	0,68	2500	6503	1915	9071
IPN120 - IPN120	0,77	2500	8338	3193	13164
CP140 - VP140	0,60	2530	5123	4700	17316
CP140 - IPN100	0,68	2500	4895	1600	7579

TABLA 2.5. Cálculos de resistencia teórica

De acuerdo a la norma venezolana, se hicieron los cálculos correspondientes a las probetas del Grupo I y II, los cuales indican que la solicitación aplicada (T_u) excede a la resistencia teórica minorada (ϕR_t); por lo tanto, se dispondrá de un par de rigidizadores transversales con una longitud igual al alma de la columna.

2.3.3.2 CÁLCULO DE RIGIDIZADORES

Requisitos para el dimensionado de las Planchas de Continuidad:

- El ancho de la plancha más la mitad del espesor del alma de la columna debe ser igual a, por lo menos, un tercio del ancho del ala de la viga que transmita la fuerza a la columna: $b_p + t_w / 2 \geq b_f / 3$

  $b_p \geq b_f / 3 - t_w / 2$

- El espesor de la plancha debe ser por lo menos, la mitad del espesor del ala de la viga: $t_p \geq t_f / 2$

- El espesor de la plancha no será menor que el ancho de la plancha multiplicado por $1.82 \sqrt{Fy / E}$

A continuación se presentan las dimensiones calculadas de los rigidizadores tomando en cuenta las especificaciones anteriores:

PROBETA	TIPO DE RIGIDIZADOR	DIMENSIONES (mm)		
		b_p	h_p	t_p
IPN 120 - IPN 120	Plancha de Continuidad	104,6	26,5	8
IPN 140 - IPN 140	Plancha de Continuidad	122,8	30,2	9
CP 140 - VP 140	Plancha de Continuidad	122,0	47,0	6
CP 140 - IPN 100	Plancha de Continuidad	122,0	67,0	8
CP 140 - IPN 100	Base Rigidizadora (Cartela)	75,0	75,0	9

TABLA 2.6. Dimensiones de rigidizadores

La soldadura del rigidizador de la columna se realizará basándose en los siguientes criterios:

- Sobre el lado de tracción, los rigidizadores deben soldarse al ala y al alma.
- Sobre el lado de compresión, los rigidizadores podrían apoyarse sobre el ala, pero también pueden soldarse al ala de la columna.

2.3.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

2.3.4.1 PANDEO FLEXIONAL

La resistencia minorada a compresión para este tipo de pandeo se determina por la siguiente expresión: $\phi_c N_t = A F_{cr}$

ELEMENTOS NO RIGIDIZADOS

DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO	RELACIÓN ANCHO ESPESOR	VALORES LÍMITES		
		Sección Plástica λpd	Sección Compacta λp	Sección No Compacta λr
Alas de vigas laminadas en forma de I	b / t	0,30 √ E / Fy	0,376 √ E / Fy	0,816 √ E / (Fy - Fr)
Alas de vigas soldadas solicitadas por flexión	b / t	0,30 √ E / Fy	0,376 √ E / Fy	0,937 √ E / (Fy - Fr) / Kc
Almas de perfiles doble T	d / t	------	0,30 √ E / Fy	0,75 √ E / Fy

TABLA 2.7. Relaciones ancho-espesor para elementos comprimidos no rigidizados

ELEMENTOS RIGIDIZADOS

DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO	RELACIÓN ANCHO ESPESOR	VALORES LÍMITES		
		Sección Plástica λpd	Sección Compacta λp	Sección No Compacta λr
Almas en compresión por flexión	h / t_w	3,0 √ E / Fy	3,70 √ E / Fy	5,61 √ E / Fy

TABLA 2.8. Relaciones ancho-espesor para elementos comprimidos rigidizados

PERFILES	PARÁMETROS					RELACIÓN ANCHO ESPESOR	VALORES LÍMITES		
	b (mm)	t_f (mm)	Fy (kgf/cm^2)	Fr (kgf/cm^2)	Kc		Sección Plástica λpd	Sección Compacta λp	Sección No Compacta λr
IPN 80	21	5,9	2500	700	----	3,56	8,69	10,90	27,87
IPN 100	25	6,8	2500	700	----	3,68	8,69	10,90	27,87
IPN 120	29	7,7	2500	700	----	3,77	8,69	10,90	27,87
IPN 140	33	8,6	2500	700	----	3,84	8,69	10,90	27,87
VP 140	50	6,0	2530	1160	0,59	8,33	8,64	10,83	28,18

TABLA 2.9. Cálculo de las relaciones ancho-espesor para elementos comprimidos no rigidizados correspondientes a las alas del perfil

PERFILES	PARÁMETROS				RELACIÓN ANCHO ESPESOR	VALORES LÍMITES	
	D (mm)	t_w (mm)	Fy (kgf/cm^2)	Fr (kgf/cm^2)		Sección Compacta λp	Sección No Compacta λr
IPN 80	80	4,2	2500	700	19,05	8,69	21,74
IPN 100	100	4,5	2500	700	22,22	8,69	21,74
IPN 120	120	5,1	2500	700	23,53	8,69	21,74
IPN 140	140	5,7	2500	700	24,56	8,69	21,74
VP 140	140	3,0	2530	1160	46,67	8,64	21,61

TABLA 2.10. Cálculo de las relaciones ancho-espesor para elementos comprimidos no rigidizados correspondiente al alma del perfil

PERFILES	PARÁMETROS				RELACIÓN ANCHO ESPESOR	VALORES LÍMITES		
	h (mm)	t_w (mm)	Fy (kgf/cm^2)	Fr (kgf/cm^2)		Sección Plástica λpd	Sección Compacta λp	Sección No Compacta λr
IPN 120	120	5,1	2500	700	23,53	86,95	107,24	307,27
IPN 140	140	5,7	2500	700	24,56	86,95	107,24	307,27
CP 140	140	6,0	2530	1160	23,33	86,43	106,60	238,70

TABLA 2.11. Cálculo de las relaciones ancho-espesor para elementos comprimidos rigidizados correspondiente al alma del perfil

El valor del factor ϕ_{as} es igual a 1.0 para todos los casos, ya que la relación ancho-espesor no excede el valor del límite de λ_r en todos los casos.

Donde $\lambda c = (K\,L / r\,\pi)\,\sqrt{Fy / E}$

PERFIL	Fy (kgf/cm^2)	r_x (cm)	L (cm)	λc
IPN80	2500	3,18	56	0,19
IPN100	2500	4,01	48	0,13
IPN120	2500	4,81	50	0,11
IPN140	2500	5,61	52	0,10
CP140	2530	6	52	0,10

TABLA 2.12. Cálculo de λc (Pandeo Flexional)

Para todos los casos se cumple:

PERFIL	λc	$\lambda c \sqrt{\phi as} \leq 1.5$
IPN80	0,19	0,19
IPN100	0,13	0,13
IPN120	0,11	0,11
IPN140	0,10	0,10
CP140	0,10	0,10

TABLA 2.13. Verificación de condición de λc

Por lo tanto F_{cr} se determinará de la siguiente manera:

$$F_{cr} = (0.658^{\phi as \lambda c^2}) Fy$$

2.3.4.2 PANDEO TORSIONAL

Esta resistencia minorada a compresión se determina por la expresión:

$$\phi_c N_t = A F_{cr}$$

Se calculará la tensión F_e según la simetría de la sección transversal del miembro comprimido. Para perfiles doblemente simétricos, Fe es igual a la tensión crítica de pandeo elástico por torsión:

$$F_e = [(\Pi^2 E C_w / (k_z L_t)^2) + GJ](1/ A r_o^2)$$

$$\lambda e = \sqrt{Fy / F_e}$$

PERFIL	Fy (kgf/cm^2)	C_w (cm^6)	J (cm^4)	L (cm)	A (cm^2)	r_0^2 (cm^2)	F_e (kgf/cm^2)	λe
IPN80	2500	79	0,783	56	7,77	10,92	9383,44	0,52
IPN100	2500	263	1,500	48	10,60	17,23	15828,46	0,40
IPN120	2500	673	2,550	50	14,20	24,65	18489,80	0,37
IPN140	2500	1510	4,070	52	18,20	33,43	21364,40	0,34
CP140	2530	17700	7,550	52	32,50	48,67	87441,68	0,17

TABLA 2.14. Cálculo de λe (Pandeo Torsional)

Para todos los casos se cumple la siguiente relación:

PERFIL	λe	λe √ ϕas ≤ 1,5
IPN80	0,52	0,52
IPN100	0,40	0,40
IPN120	0,37	0,37
IPN140	0,34	0,34
CP140	0,17	0,17

TABLA 2.15. Verificación de condición de λe

Por lo tanto, F_{cr} se determinará de la siguiente manera:

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda e^2}) Fy$$

2.3.4.3 RESULTADOS

PERFIL	λc	Fy (kgf/cm^2)	F_{cr} (kgf/cm^2)	A (cm^2)	ϕ_c Nt (kgf)
IPN80	0,19	2500	2461	7,77	16255
IPN100	0,13	2500	2482	10,60	22363
IPN120	0,11	2500	2486	14,20	30011
IPN140	0,10	2500	2489	18,20	38508
CP140	0,10	2530	2520	32,50	69624

TABLA 2.16. Cálculo de la resistencia teórica minorada (Pandeo Flexional)

PERFIL	λc	Fy (kgf/cm^2)	F_{cr} (kgf/cm^2)	A (cm^2)	ϕ_c N_t (kgf)
IPN80	0,52	2500	2236	7,77	14769
IPN100	0,40	2500	2340	10,60	21084
IPN120	0,37	2500	2362	14,20	28515
IPN140	0,34	2500	2381	18,20	36826
CP140	0,17	2530	2500	32,50	69050

TABLA 2.17. Cálculo de la resistencia teórica minorada (Pandeo Torsional)

La resistencia minorada a compresión corresponde al caso de Pandeo Torsional, debido a que es el menor valor entre los pandeos.

2.3.5 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS COMPARATIVOS

1. Cálculo de la Rigidez Inicial Efectiva

Suponiendo un comportamiento lineal de la curva experimental, perteneciente al gráfico Esfuerzo-Deformación de cada probeta, la Rigidez Efectiva se determinará calculando la pendiente inicial del tramo elástico, para establecer una comparación entre comportamiento general y el esperado teóricamente de cada muestra.

2. Cálculo del Módulo Tangente

El módulo tangente es una medida alterna de la rigidez, que se obtiene partir de la pendiente real de la curva de esfuerzo-deformación en un punto específico.

$$\text{Módulo Tangente } (E_T) = m_o / m_T$$

3. Cálculo de la Carga Referencial 100%

Para calcular la carga referencial se traza una recta, por el punto perteneciente de la deformación teórica (100% del valor de la deformación), paralela al tramo elástico de la curva teórica. Luego se corta la curva experimental con esta recta, obteniendo un punto ($P_{100\%}$), que se lee sobre el eje de las ordenadas y se obtiene el valor de la carga referencial. Este valor será un parámetro comparativo entre todas las muestras.

4. Cálculo del Módulo Secante

El módulo secante es una medida de rigidez, obtenida de la pendiente de la recta, desde su origen hasta el punto específico de la curva ($P_{100\%}$) ya descrito.

$$\text{Módulo Secante} = m_{100\%} / m_T$$

5. Valor de la Amplificación

La amplificación de la rotación es igual a la relación entre $\theta_{máx}$ del modelo estático de 1° orden y $\theta_{máx}$ calculado en el modelo de 2° orden.

$$\text{Amplificación } \theta = (1/2mL) \times [(1 - \cos mL) / \text{sen } mL]$$

Así mismo, la amplificación de la deflexión de la columna es la relación entre $y_{máx}$ del modelo estático de 1° orden y el valor de $y_{máx}$ del modelo de 2° orden.

$$\text{Amplificación } y = (1-\cos mL) \times (1/(mL)^2) \times [(1/\text{sen } mL) - 1]$$

CAPÍTULO III
ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En este capítulo se presentan los resultados experimentales y sus respectivos análisis, las fallas producidas y el análisis de los gráficos para cada tipo de muestra.

Una vez finalizados los ensayos, se procedió a elaborar los gráficos de esfuerzo-deformación, los cuales se presentan en el Apéndice (Gráfico A.1 al A.18). Se graficaron conjuntamente los cálculos teóricos y los resultados experimentales para obtener una mejor visión del comportamiento real de las muestras.

Para el análisis de los resultados de los ensayos, se tomaron en cuenta algunos parámetros determinantes en la eficiencia de la estructura, entre los cuales se pueden mencionar, rigidez inicial efectiva, módulo tangente, carga referencial 100%, módulo secante, magnitud de la deformación y carga última resistida.

Las probetas pertenecientes a los grupos I y II se ensayaron hasta un valor determinado de deformación, pero los resultados obtenidos no fueron los esperados para el estudio de la unión, debido al corto recorrido del flexímetro. En consecuencia, se continuaron los ensayos con un flexímetro de mayor recorrido. Posiblemente los primeros ensayos realizados a estas muestras, hayan alterado el resultado de los posteriores, por lo que se ajustaron ligeramente las curvas buscando continuidad en función a las obtenidas en los ensayos del grupo III.

Los resultados de los ensayos de cada probeta se presentan en las siguientes tablas-resumen:

GENERAL			
PROBETA	IPN 80 - IPN 80		
PESO TOTAL	11,71 kgf		
PARAMETROS VIGA			
PERFIL	IPN 80		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy=2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2		
PARAMETROS COLUMNA			
PERFIL	IPN 80		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2		
DETALLES DE CONEXIÓN			
TIPO DE CONEXIÓN	PRECALIFICADA		
SOLDADURA	FILETE		
PREPARACÓN DE BORDE	JUNTA A TOPE		(GRUPO I)
ELEMENTO RIGIDIZADOR	NO APLICA		
RESULTADOS DEL ENSAYO	**MUESTRA 1**	**MUESTRA 2**	**MUESTRA 3**
CLASIFICACIÓN	GRUPO I	GRUPO I	GRUPO I
DEFORMACIÓN TEÓRICA (mm)	92	125	96
DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL (mm)	42	41	53
RIGIDEZ ESPERADA (kgf/mm)	94,21	94,21	94,21
RIGIDEZ INICIAL EFECTIVA (kgf/mm)	44,66	47,27	47,33
RELACIÓN RIGIDEZ TANGENTE / RIGIDEZ ESPERADA	47%	50%	50%
RELACIÓN RIGIDEZ SECANTE / RIGIDEZ ESPERADA	76%	44%	53%
CARGA TEÓRICA CEDENTE (kgf)	859,65	859,65	859,65
CARGA REFERENCIAL 100% (kgf)	652	669	971

TABLA 3.1. Resultados obtenidos de la probeta IPN 80–IPN 80

BIBLIOTECA

GENERAL			
PROBETA	IPN 100 - IPN 100		
PESO TOTAL	14,68 kgf		
PARAMETROS VIGA			
PERFIL	IPN 100		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy=2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2		
PARAMETROS COLUMNA			
PERFIL	IPN 100		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2		
DETALLES DE CONEXIÓN			
TIPO DE CONEXIÓN	PRECALIFICADA		
SOLDADURA	FILETE		
PREPARACÓN DE BORDE	JUNTA A TOPE		(GRUPO I)
PREPARACÓN DE BORDE	BISEL A 45°		(GRUPO II)
ELEMENTO RIGIDIZADOR	NO APLICA		
RESULTADOS DEL ENSAYO	**MUESTRA 1**	**MUESTRA 2**	
CLASIFICACIÓN	GRUPO I	GRUPO II	
DEFORMACIÓN TEÓRICA (mm)	59	56	
DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL (mm)	46	46	
RIGIDEZ ESPERADA (kgf/mm)	301,40	301,40	
RIGIDEZ INICIAL EFECTIVA (kgf/mm)	139,17	139,86	
RELACIÓN RIGIDEZ TANGENTE / RIGIDEZ ESPERADA	46%	46%	
RELACIÓN RIGIDEZ SECANTE / RIGIDEZ ESPERADA	39%	42%	
CARGA TEÓRICA CEDENTE (kgf)	1705	1705	
CARGA REFERENCIAL 100% (kgf)	1078	1262	

TABLA 3.2. Resultados obtenidos de la probeta IPN 100–IPN 100

GENERAL					
PROBETA	IPN 120 - IPN 120				
PESO TOTAL	19,98 kgf				
PARAMETROS VIGA					
PERFIL	IPN 120				
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36				
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2				
PARAMETROS COLUMNA					
PERFIL	IPN 120				
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36				
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2				
DETALLES DE CONEXIÓN					
TIPO DE CONEXIÓN	PRECALIFICADA				
SOLDADURA	FILETE				
PREPARACÓN DE BORDE	JUNTA A TOPE			(GRUPO I)	
PREPARACÓN DE BORDE	BISEL A 45°			(GRUPO II)	
PREPARACÓN DE BORDE	BISEL A 45°			(GRUPO III)	
ELEMENTO RIGIDIZADOR	PLANCHAS DE CONTINUIDAD			(GRUPO III)	
RESULTADOS DEL ENSAYO	**MUESTRA 1**	**MUESTRA 2**	**MUESTRA 3**	**MUESTRA 4**	**MUESTRA 5**
CLASIFICACIÓN	GRUPO I	GRUPO II	GRUPO II	GRUPO III	GRUPO III
DEFORMACIÓN TEÓRICA (mm)	58	61	36	61	62
DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL (mm)	52	45	47	75	64
RIGIDEZ ESPERADA (kgf/mm)	487,70	487,70	487,70	487,70	487,70
RIGIDEZ INICIAL EFECTIVA (kgf/mm)	223,79	207,01	145,35	226,34	236,09
RELACIÓN RIGIDEZ TANGENTE / RIGIDEZ ESPERADA	46%	42%	30%	46%	48%
RELACIÓN RIGIDEZ SECANTE / RIGIDEZ ESPERADA	44%	41%	22%	40%	43%
CARGA TEÓRICA CEDENTE (kgf)	2570,75	2570,75	2570,75	2570,75	2570,75
CARGA REFERENCIAL 100% (kgf)	2000	1774	560	1855	1868

TABLA 3.3. Resultados obtenidos de la probeta IPN 120–IPN 120

GENERAL			
PROBETA	IPN 140 - IPN 140		
PESO TOTAL	26,31 kgf		
PARAMETROS VIGA			
PERFIL	IPN 140		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2		
PARAMETROS COLUMNA			
PERFIL	IPN 140		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2		
DETALLES DE CONEXIÓN			
TIPO DE CONEXIÓN	PRECALIFICADA		
SOLDADURA	FILETE		
PREPARACÓN DE BORDE	BISEL A 45°		(GRUPO III)
ELEMENTO RIGIDIZADOR	PLANCHAS DE CONT.		(GRUPO III)
RESULTADOS DEL ENSAYO	**MUESTRA 1**	**MUESTRA 2**	
CLASIFICACIÓN	GRUPO III	GRUPO III	
DEFORMACIÓN TEÓRICA (mm)	62	68	
DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL (mm)	43	78	
RIGIDEZ ESPERADA (kgf/mm)	724,44	724,44	
RIGIDEZ INICIAL EFECTIVA (kgf/mm)	321,88	332,83	
RELACIÓN RIGIDEZ TANGENTE / RIGIDEZ ESPERADA	44%	46%	
RELACIÓN RIGIDEZ SECANTE / RIGIDEZ ESPERADA	25%	42%	
CARGA TEÓRICA CEDENTE (kgf)	3651,79	3651,79	
CARGA REFERENCIAL 100% (kgf)	2140	2780	

TABLA 3.4. Resultados obtenidos de la probeta IPN 140–IPN 140

GENERAL			
PROBETA	CP 140 - VP 140		
PESO TOTAL	33,30 kgf		
PARAMETROS VIGA			
PERFIL	VP 140		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2530 kgf/cm^2 ; Fu = 4080 kgf/cm^2		
PARAMETROS COLUMNA			
PERFIL	CP 140		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2530 kgf/cm^2 ; Fu = 4080 kgf/cm^2		
DETALLES DE CONEXIÓN			
TIPO DE CONEXIÓN	PRECALIFICADA		
SOLDADURA	FILETE		
PREPARACÓN DE BORDE	JUNTA A TOPE		(GRUPO I)
PREPARACÓN DE BORDE	BISEL A 45°		(GRUPO III)
ELEMENTO RIGIDIZADOR	PLANCHAS DE CONT.		(GRUPO III)
RESULTADOS DEL ENSAYO	**MUESTRA 1**	**MUESTRA 2**	**MUESTRA 3**
CLASIFICACIÓN	GRUPO I	GRUPO III	GRUPO III
DEFORMACIÓN TEÓRICA (mm)	38	51	43
DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL (mm)	18	32	30
RIGIDEZ ESPERADA (kgf/mm)	877,17	877,17	877,17
RIGIDEZ INICIAL EFECTIVA (kgf/mm)	324,75	368	327,35
RELACIÓN RIGIDEZ TANGENTE / RIGIDEZ ESPERADA	37%	42%	37%
RELACIÓN RIGIDEZ SECANTE / RIGIDEZ ESPERADA	38%	33%	34%
CARGA TEÓRICA CEDENTE (kgf)	3817,59	3817,59	3817,59
CARGA REFERENCIAL 100% (kgf)	2500	2727	1920

TABLA 3.5. Resultados obtenidos de la probeta CP 140–VP 140

GENERAL			
PROBETA	CP 140 - IPN 100		
PESO TOTAL	28,41 kgf		
PARAMETROS VIGA			
PERFIL	IPN 100		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2500 kgf/cm^2 ; Fu = 3700 kgf/cm^2		
PARAMETROS COLUMNA			
PERFIL	CP 140		
CALIDAD DEL MATERIAL	A 36		
PROPIEDADES DEL MATERIAL	Fy = 2530 kgf/cm^2 ; Fu = 4080 kgf/cm^2		
DETALLES DE CONEXIÓN			
TIPO DE CONEXIÓN	PRECALIFICADA		
SOLDADURA	FILETE		
PREPARACÓN DE BORDE	JUNTA A TOPE		(GRUPO I)
PREPARACÓN DE BORDE	BISEL A 45°		(GRUPO III)
ELEMENTO RIGIDIZADOR	PLANCHAS DE CONT. Y CARTELA (GRUPO III)		
RESULTADOS DEL ENSAYO	**MUESTRA 1**	**MUESTRA 2**	**MUESTRA 3**
CLASIFICACIÓN	GRUPO I	GRUPO III	GRUPO III
DEFORMACIÓN TEÓRICA (mm)	26	34	31
DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL (mm)	47	26	29
RIGIDEZ ESPERADA (kgf/mm)	358,97	358,97	358,97
RIGIDEZ INICIAL EFECTIVA (kgf/mm)	64,45	228,29	230,99
RELACIÓN RIGIDEZ TANGENTE / RIGIDEZ ESPERADA	18%	64%	64%
RELACIÓN RIGIDEZ SECANTE / RIGIDEZ ESPERADA	18%	45%	46%
CARGA TEÓRICA CEDENTE (kgf)	1639,42	1639,42	1639,42
CARGA REFERENCIAL 100% (kgf)	400	1400	1450

TABLA 3.6. Resultados obtenidos de la probeta CP 140–IPN 100

El cálculo de la amplificación se presenta en las siguientes tablas:

	$\theta_{máx}$				
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**
IPN80-IPN80	1,00173	1,00236	1,00182	-------	-------
IPN100-IPN100	1,00129	1,00122	-------	-------	-------
IPN120-IPN120	1,00118	1,00125	1,00073	1,00142	1,00144
IPN140-IPN140	1,00119	1,00130	-------	-------	-------
CP140-VP140	1,00052	1,00071	1,00060	-------	-------
CP140-IPN100	1,00016	1,00022	1,00020	-------	-------

TABLA 3.7. Amplificación de la rotación ($\theta_{máx}$)

	$y_{máx}$				
	Muestra 1	**Muestra 2**	**Muestra 3**	**Muestra 4**	**Muestra 5**
IPN80-IPN80	2,98	2,49	2,90	-------	-------
IPN100-IPN100	3,53	3,64	-------	-------	-------
IPN120-IPN120	3,70	3,60	4,84	3,34	3,31
IPN140-IPN140	3,70	3,51	-------	-------	-------
CP140-VP140	5,81	4,92	5,37	-------	-------
CP140-IPN100	10,77	9,31	9,73	-------	-------

TABLA 3.8. Amplificación de la deflexión ($y_{máx}$)

El factor de amplificación para la rotación es despreciable, debido a que, en teoría el nodo fue considerado como un apoyo simple, pero en realidad se comportó como un nodo rigidizado.

Análisis de las Probetas:

Todas las probetas fueron soldadas y ensayadas en los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Andrés Bello.

Analizando los gráficos 3.2 al 3.7, se puede observar que en todas las probetas las pendientes de las curvas experimentales en la zona de carga y descarga son aproximadamente iguales, lo que es producto de la ductilidad del acero. En general, después de someter las probetas a carga y descarga, el límite elástico crece como resultado del endurecimiento por deformación que ocurrió durante la aplicación de la carga inicial.

En todos los casos, la carga teórica cedente de cada muestra superó el valor de la carga referencial 100% calculada a partir de las curvas Esfuerzo–Deformación experimentales.

En cuanto a los valores de la rigidez, se puede decir que las probetas rigidizadas presentan una mayor eficiencia que las probetas no rigidizadas.

Las probetas no rigidizadas ensayadas presentaron las siguientes fallas: Pandeo Flexional en las alas de las columnas y Pandeo Torsional tanto en la viga como en la columna; mientras que las fallas mostradas por las probetas rigidizadas fueron: Pandeo Torsional de la columna, Pandeo Local del alma de la viga y por soldadura.

En general, la deformación experimental en cada muestra se mantuvo dentro de un rango de 2 cm con respecto a la deformación teórica, lo que indica que el comportamiento de las probetas es aceptable.

Todas las curvas teóricas, se mayoraron con un factor plástico K = 1.15, correspondiente a secciones doble T, tomado del libro "Diseño de Estructuras de Acero" Bresler, Lin y Scalzi (Páginas 110 a la 113).

PROBETA IPN 80–IPN 80

Las tres muestras pertenecen al Grupo I; es decir, construidas bajo los mismos criterios de diseño. Esto se debe a las dimensiones de la sección del perfil IPN 80. Por lo tanto, no se incluyen las juntas con bisel a 45° y los rigidizadores en el diseño de la probeta. Debido a esta igualdad de elaboración de la probeta IPN 80–IPN 80, el comportamiento a compresión de estas muestras fue similar en los tres ensayos. La deformación experimental obtenida se mantuvo por debajo del valor teórico calculado. En estos ensayos no se observa el efecto de amplificación por la carga axial aplicada.

PROBETA IPN 100–IPN 100

Con este tipo de probeta sólo se abarcó la construcción de muestras pertenecientes al Grupo I y II, debido a la complejidad que implicaba rigidizar estos perfiles. Éstas fallaron de la misma forma que las IPN 80–IPN 80. Las dos muestras ensayadas arrojaron valores similares de eficiencia, a pesar de la diferencia de preparación de juntas.

(a) Pandeo Flexional en el ala de la columna

(b) Probeta deformada después de ensayar

FIGURA 3.1. Algunas fallas presentes en las probetas IPN 80–IPN 80 y en las probetas IPN 100–IPN 100

PROBETA IPN 120-IPN 120

Debido a la disponibilidad de material, se elaboraron muestras con juntas a tope, juntas con bisel a 45° y muestras rigidizadas con planchas de continuidad. El valor de la deformación en las probetas rigidizadas supera la deformación de las no rigidizadas. Las pruebas realizadas a las Probetas IPN 120–IPN 120 no rigidizadas, no fueron satisfactorias debido al comportamiento que presentaron las curvas experimentales, notándose grandes deformaciones en los perfiles utilizados como columnas. El tramo elástico de la curva experimental perteneciente a una de las muestras del Grupo II (junta con bisel a 45°) se mantuvo por debajo del campo elástico teórico, debido a que la junta se comportó de manera deficiente.

(a) Pandeo Flexional en el ala de la columna

(b) Pandeo Torsional de la columna

FIGURA 3.2. Fallas presentes en las probetas IPN 120–IPN 120 no rigidizadas

PROBETA IPN 140–IPN 140

Para este tipo de probeta, se realizaron ensayos solamente con muestras rigidizadas, basándose en los efectos producidos en las probetas IPN, descritas anteriormente. Las fallas presentes en éstas probetas son las siguientes: Pandeo Torsional de la columna y desgarramiento longitudinal de la soldadura. La falla en la soldadura se produjo debido a la poca penetración del electrodo al momento de realizar la unión viga–columna.

(a) Desgarramiento longitudinal de la soldadura

(b) Pandeo Torsional de la columna

FIGURA 3.3. Fallas presentes en las probetas IPN 140–IPN 140

PROBETA CP 140–VP 140

En esta probeta la falla más notable en los elementos no rigidizados, fue la distorsión de las alas de la columna al somerterlas a compresión. En el caso de las rigidizadas, las vigas donde se aplicó la fuerza sufrieron pandeo local del alma.

(a) Probeta rigidizada sometida a compresión

(b) Pandeo Local del alma de la viga VP 140

FIGURA 3.4. Deformación de la probeta CP 140–VP 140

PROBETA CP 140–IPN 100

La muestra elaborada con una junta a tope sufrió pandeo torsional en el alma de la columna al someterse a compresión, debido al poco espesor del alma. Las muestras rigidizadas con una conexión continua entre viga y columna, fallaron por el desgarramiento de la soldadura, dada por la poca penetración y ausencia de cordón.

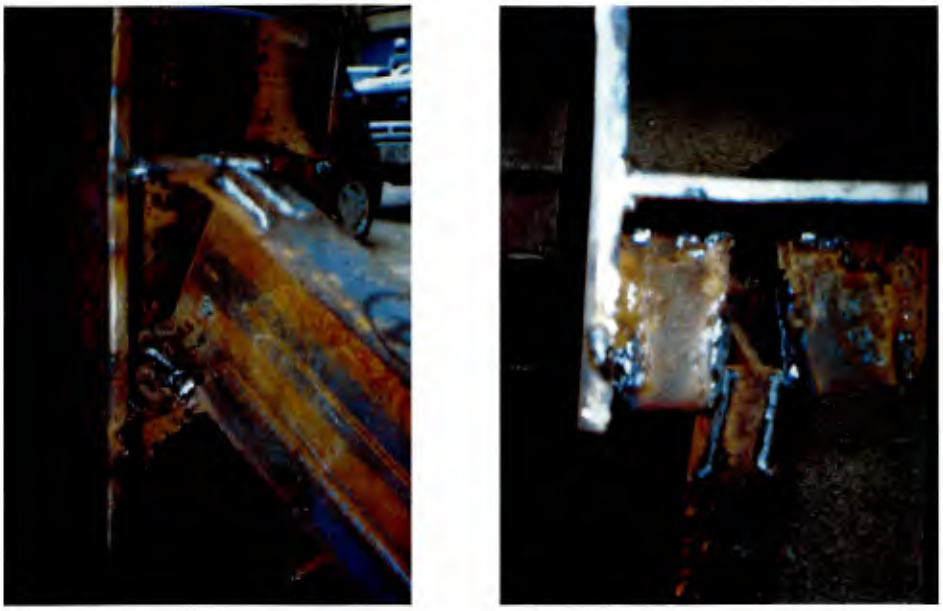


FIGURA 3.5. Desgarramiento longitudinal de la soldadura
probeta CP 140–IPN 100

FIGURA 3.6. Vista de la probeta CP 140–IPN 100 deformada

A manera de comparación, se presentan las curvas experimentales de cada muestra superpuestas en los gráficos 3.2 al 3.7.

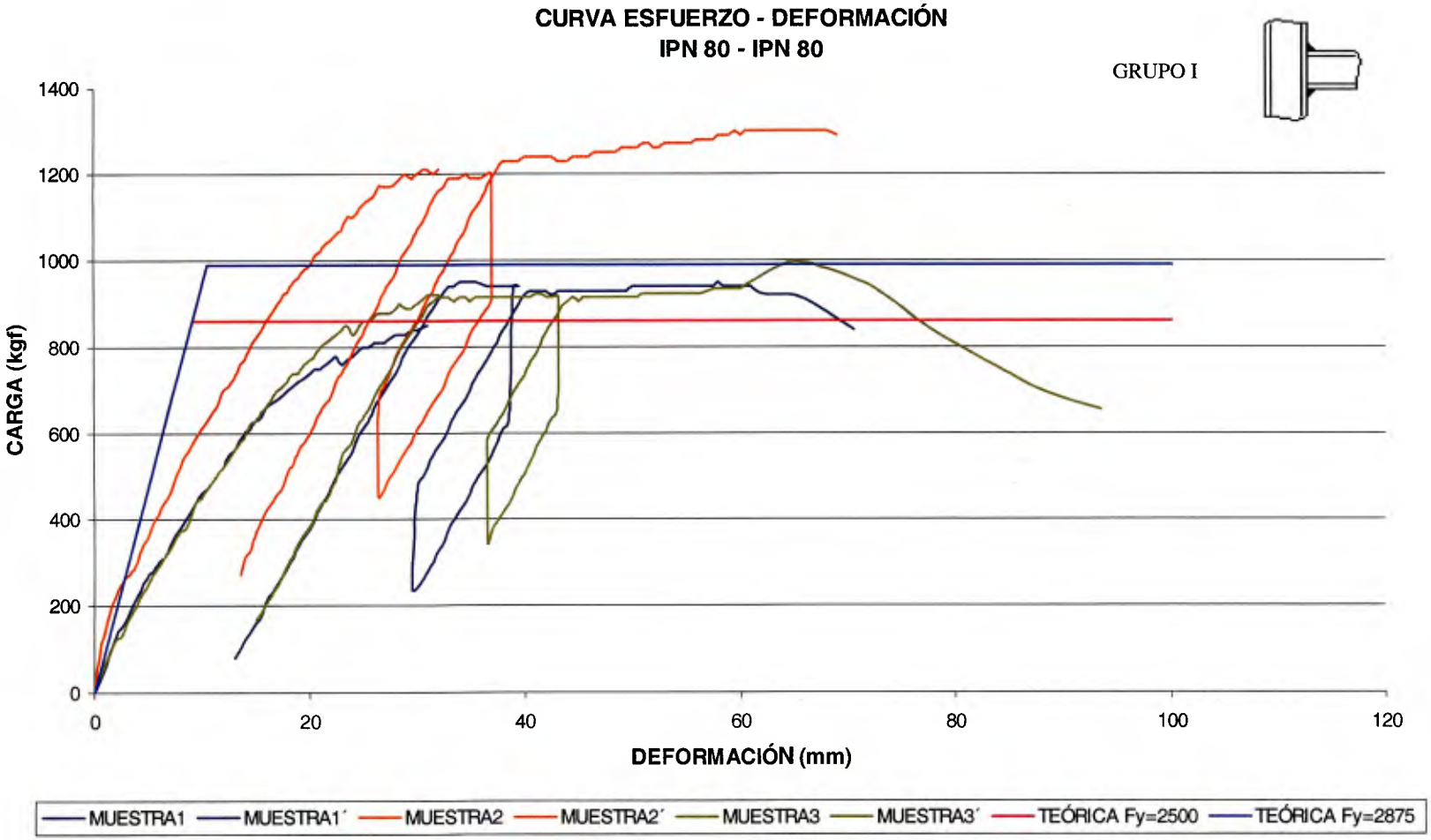


GRÁFICO 3.1. Esfuerzo–Deformación IPN 80–IPN 80

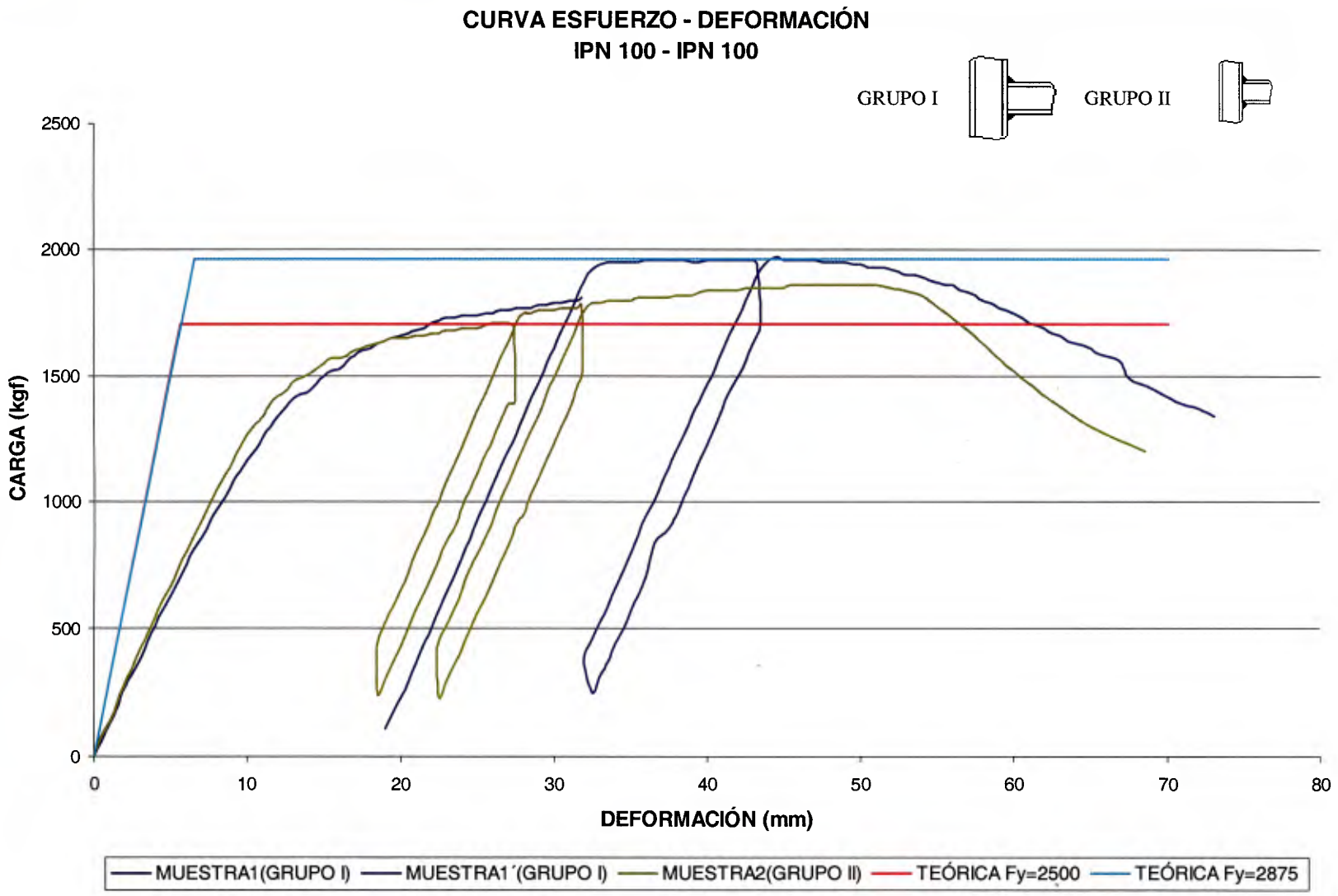


GRÁFICO 3.2. Esfuerzo–Deformación IPN 100–IPN 100

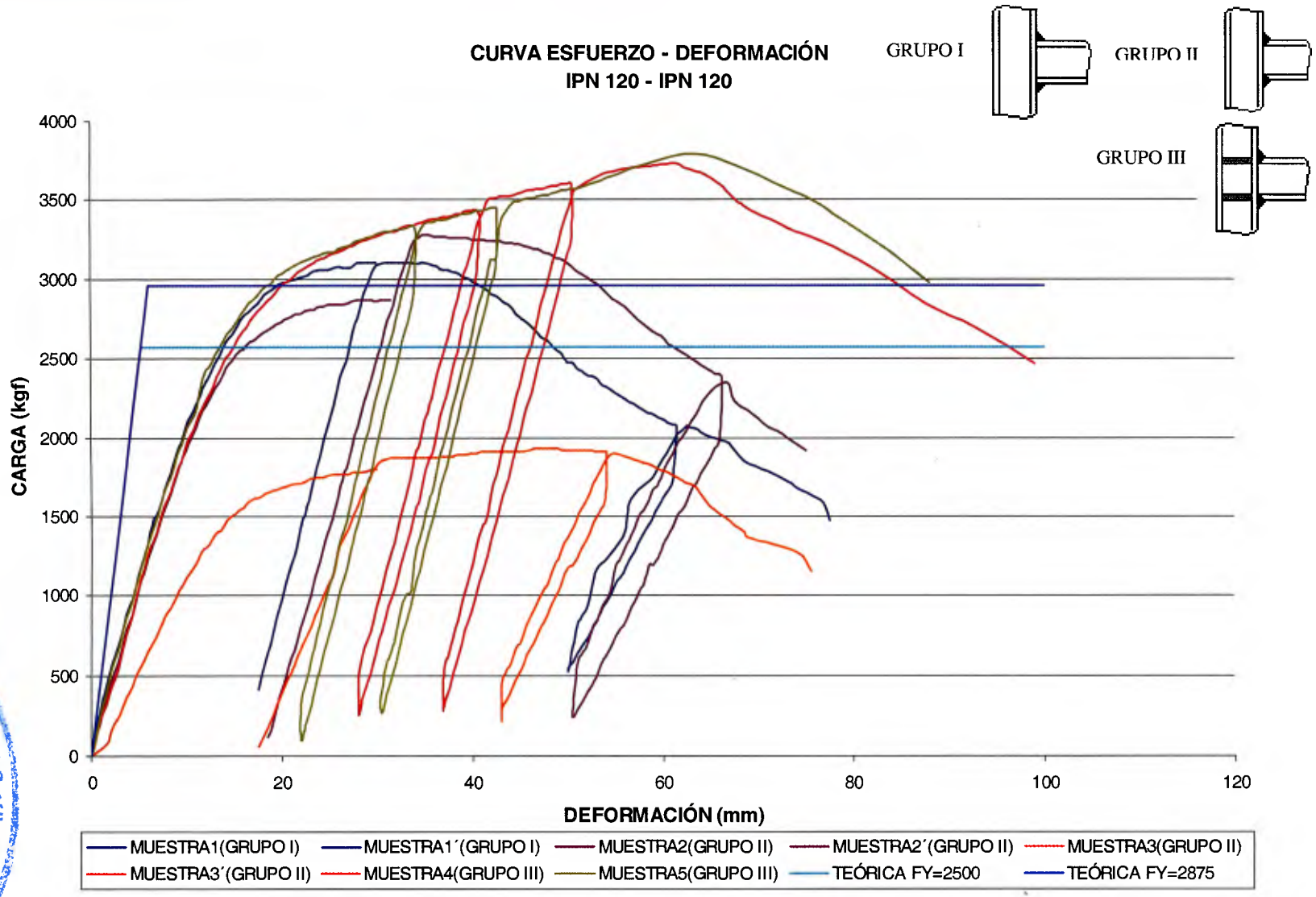


GRÁFICO 3.3. Esfuerzo–Deformación IPN 120-IPN 120

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

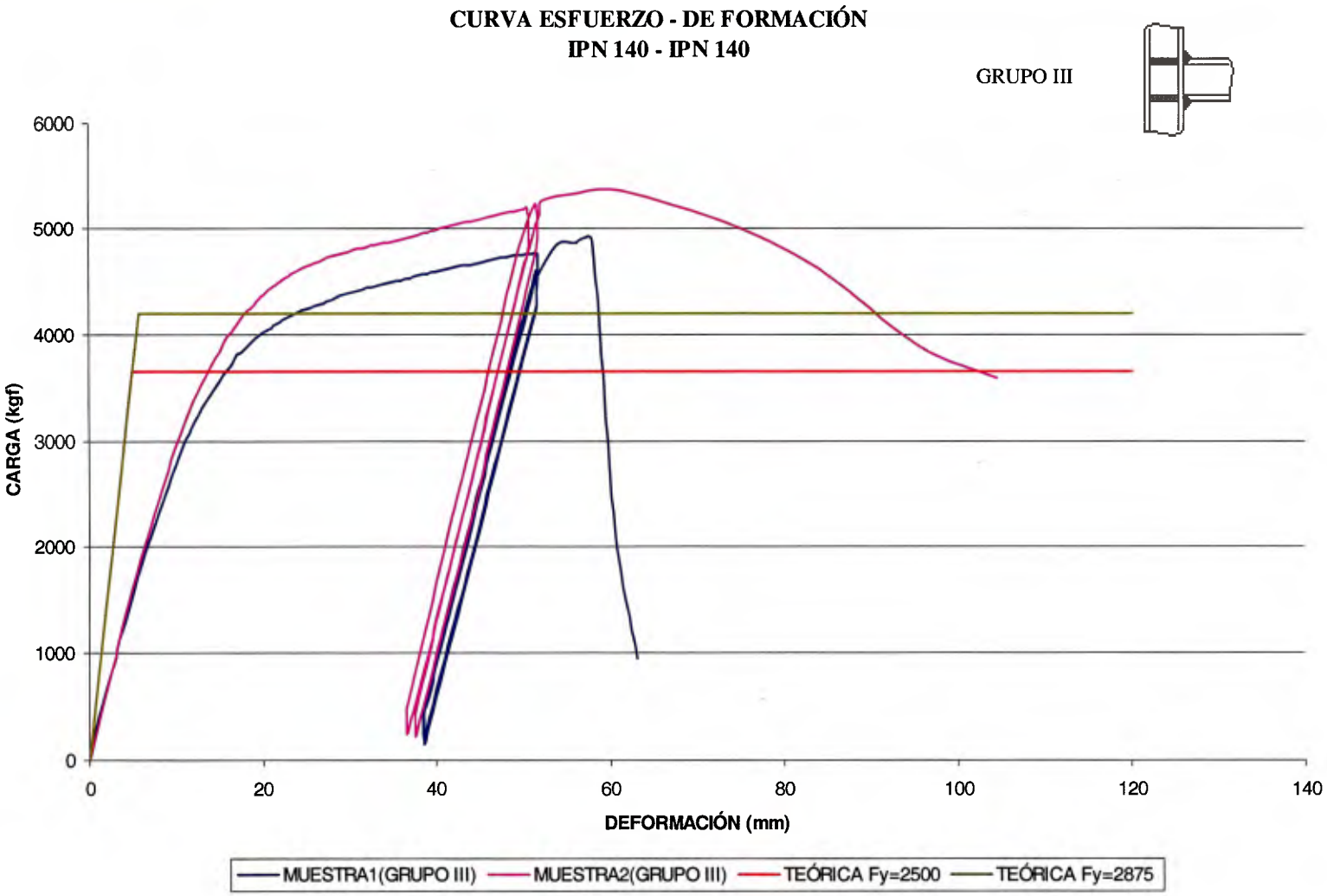


GRÁFICO 3.4. Esfuerzo–Deformación IPN 140–IPN 140

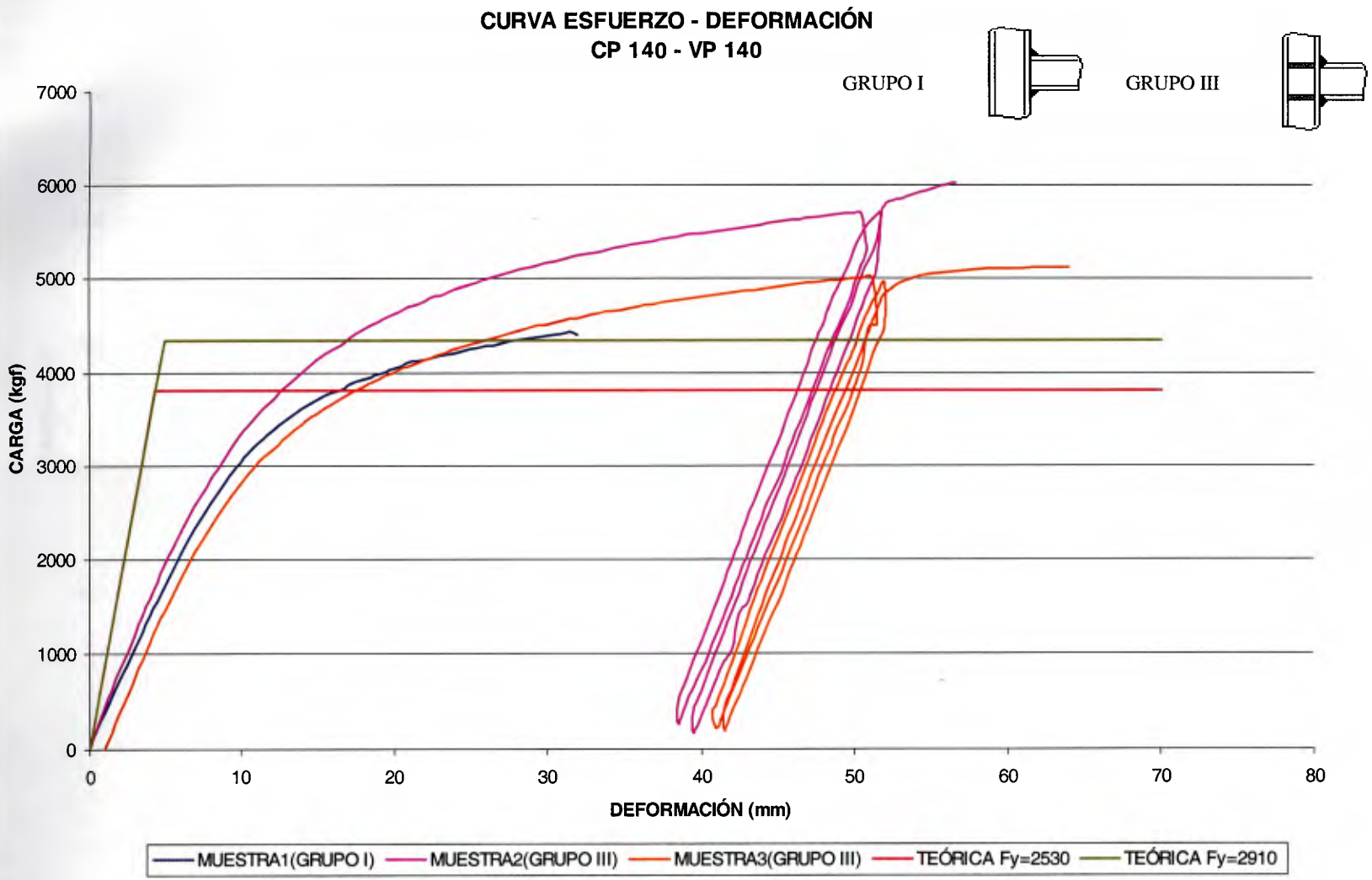


GRÁFICO 3.5. Esfuerzo–Deformación CP 140–VP 140

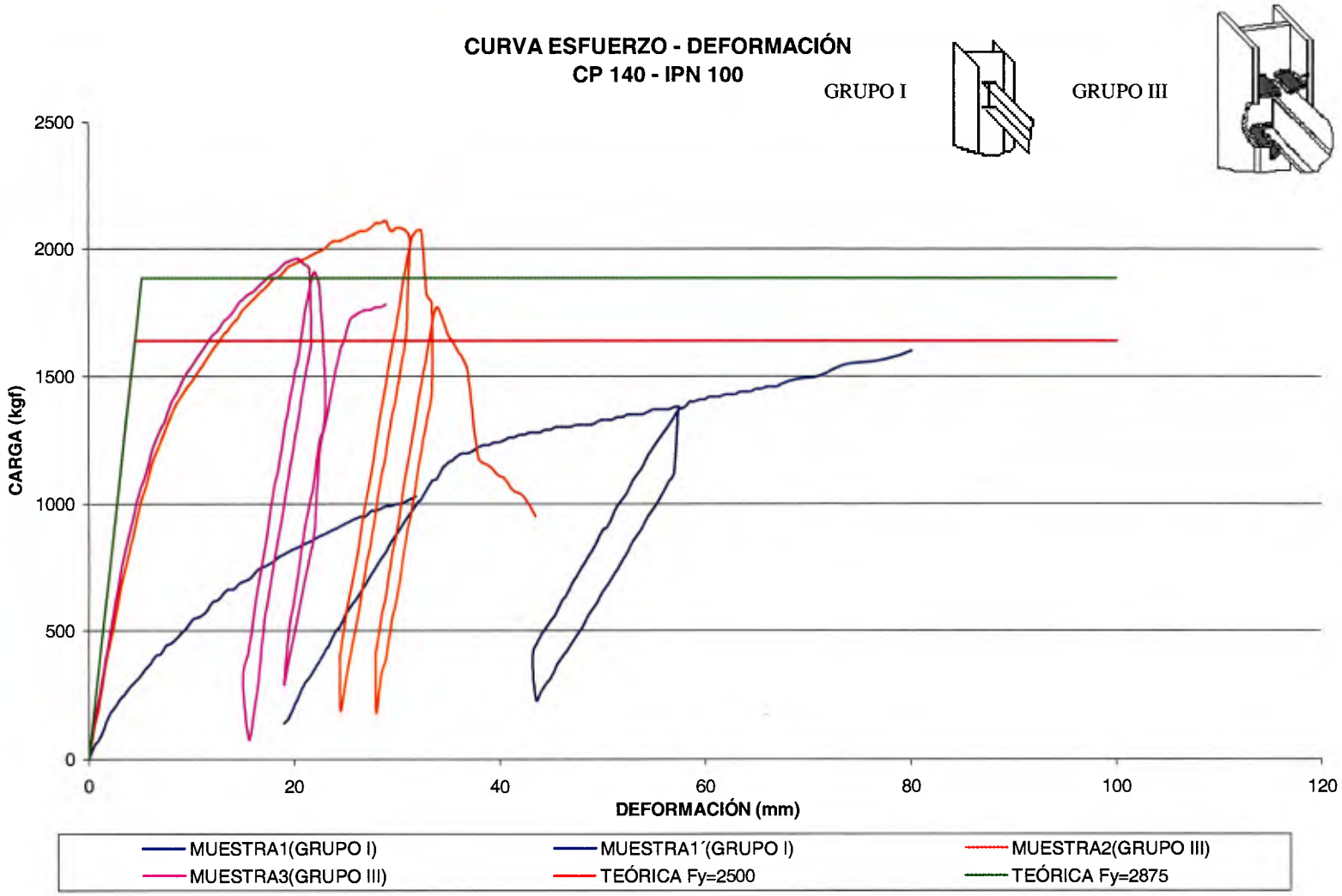


GRÁFICO 3.6. Esfuerzo–Deformación CP 140–IPN 100

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE LA TÉCNICA EXPERIMENTAL

4. ANÁLISIS DE LA TÉCNICA EXPERIMENTAL

4.1 FACTOR DE EXCENTRICIDAD DE LA CARGA APLICADA

En todos los ensayos realizados, la carga aplicada presentaba una excentricidad con respecto al centro de gravedad de la sección del perfil de la viga; por lo tanto, la fuerza multiplicada por esta excentricidad produce un momento torsor en la viga. Al dividir este momento entre la altura del perfil, se obtiene una fuerza cortante en las alas del perfil, la cual originó un momento flector con un brazo igual a la luz libre de la viga. Este momento flector es uno de los factores de la amplificación de la deformación de la probeta.

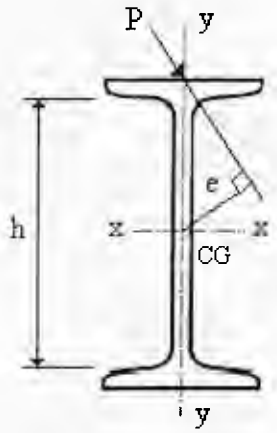


FIGURA 4.1. Representación de la excentricidad de la carga

4.2. RELACIÓN DE INERCIA DE PERFILES

En el figura 4.2, se observa que si se utilizan perfiles con relaciones de inercia Ix / Iy mayores a un valor promedio de cinco como columnas, son susceptibles a sufrir las fallas que se presentaron en este trabajo, pandeo flexional y pandeo torsional, entre otras. El gráfico se realizó con una muestra de perfiles tomados al azar y designados como vigas y columnas.

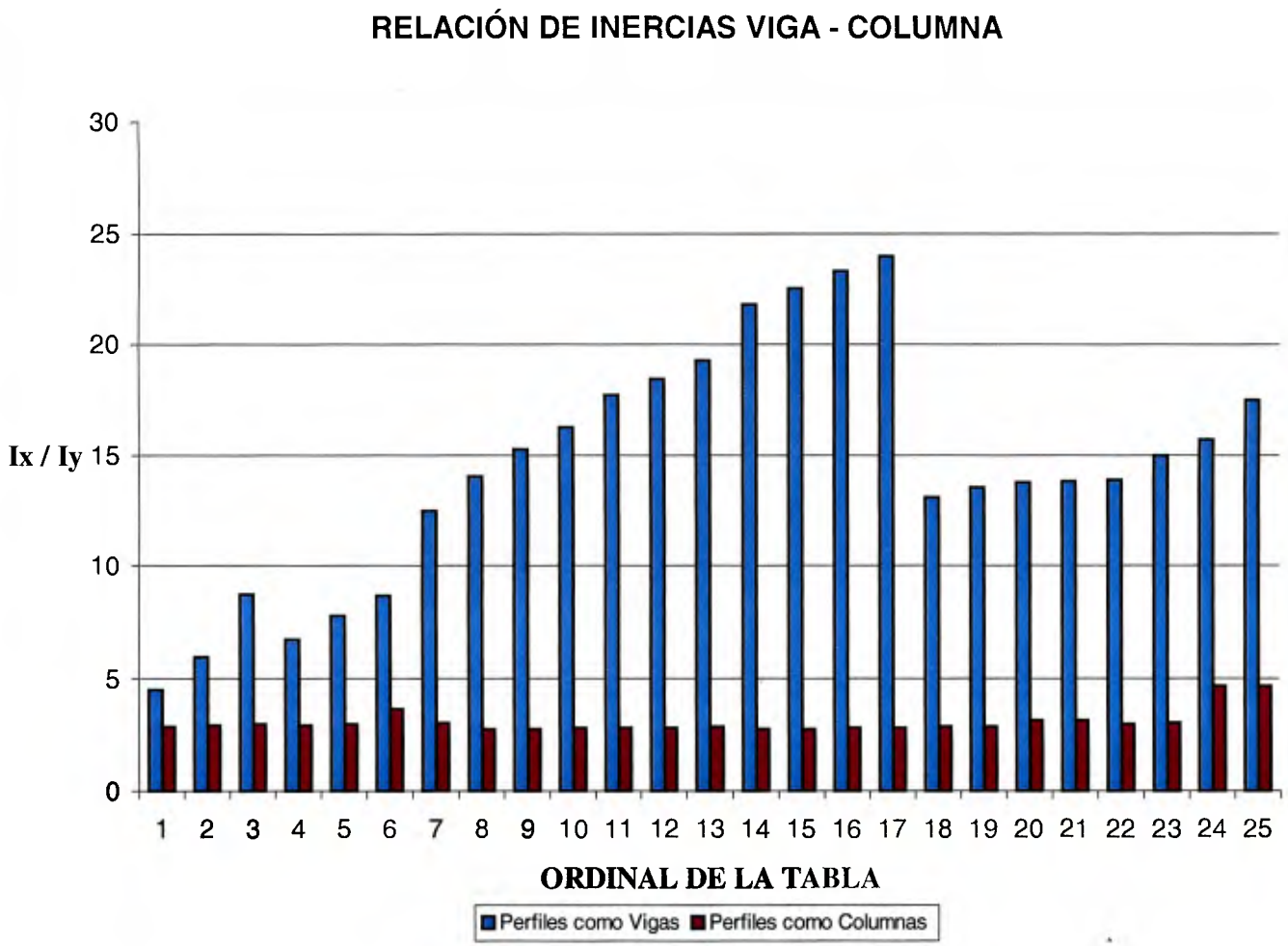


FIGURA 4.2. Relación de inercias de perfiles

4.3 ANÁLISIS DE LAS CURVAS TEÓRICAS

Las curvas teóricas características de los tres modelos de deformación correspondientes a la probeta IPN 100-IPN 100, se presentan en el siguiente gráfico:

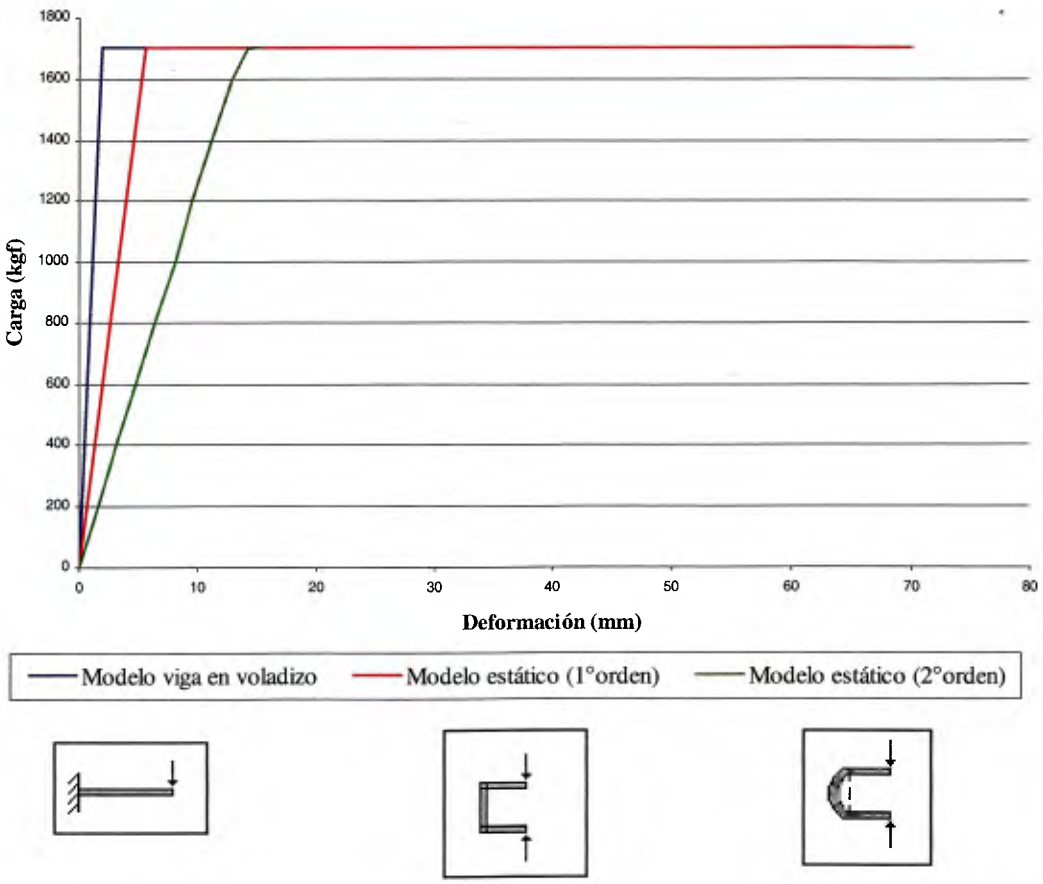


FIGURA 4.3. Curvas teóricas de Esfuerzo-Deformación probeta IPN100-IPN100

CAPÍTULO V
ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA METALOGRAFÍA

ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA METALOGRAFÍA

La metalografía es una ciencia que estudia la estructura y las propiedades de los metales y establece la relación que existe entre su composición, estructura y propiedades.

La estructura del metal de soldadura realizada para elaborar las juntas, se analizó en tres niveles:

1. Escala Macroscópica: fundamentalmente asociada a las regiones que constituyen el cordón de soldadura y la distribución, forma y tamaño de los granos, y el porcentaje volumétrico de las fases.

2. Escala Microscópica: asociada con la microsegregación y con las inclusiones no metálicas observables por medio de microscopio óptico.

3. Escala Cristalina: asociada a la estructura cristalina de las fases presentes, así como a sus defectos.

Fijando el nivel de observación es posible interpretar el comportamiento en servicio de un cordón de soldadura en función de algunos elementos estructurales. Para lograrlo debe tenerse un conocimiento cabal de cuáles son los elementos estructurales durante la deformación plástica y su efecto sobre las propiedades mecánicas.

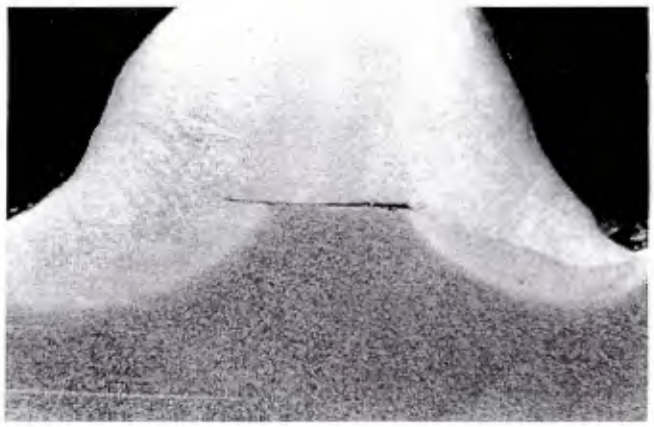
Para observar por el microscopio se preparó de la siguiente forma la junta a analizar:

1. Se pulió la superficie del material utilizando una serie de lijas: 120, 240, 320, 400, 600 y paño de 9 micras (pasta de diamante)
2. Se atacaron las muestras a nivel macro con Cloruro de Hierro y a nivel micro con el reactivo Nital al 4%.

Para conocer las variables operativas del proceso de soldadura se describen a continuación los resultados obtenidos de la metalografía: microestructura de la aleación, realizada a la unión soldada de las probetas

FOTOMACROGRAFÍAS

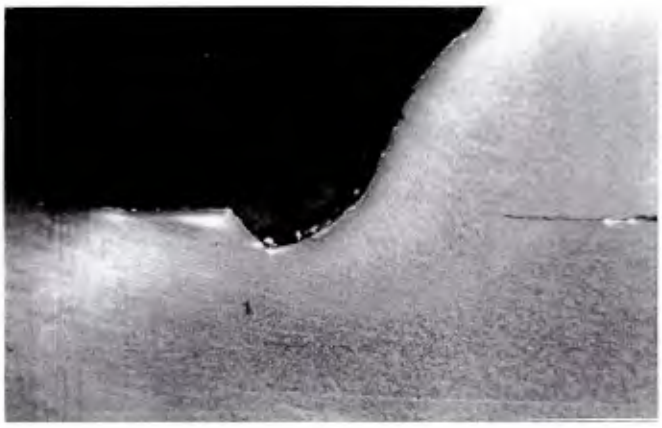
Unión soldada entre perfiles IPN 120 con bisel a 45°:



CLORURO DE HIERRO 6 X

FIGURA 5.1. Fotomacrografía correspondiente a la Zona de Fusión, Aleación y Zona Afectada por el Calor.

En esta figura, se observa una pasada de soldadura, presentando una fase alargada en la Zona de Fusión. También se puede notar una grieta por falta de fusión entre los dos materiales a soldar. La misma se debe al diseño de la junta seleccionada; es decir, un bisel de 45° por un solo lado, por tanto, no hubo penetración completa del electrodo.



CLORURO DE HIERRO 6 X

FIGURA 5.2. Fotomacrografía correspondiente a la socavación del metal

En la figura 5.2 se observa una socavación en la Zona de Fusión, producida por dos factores: la velocidad de avance o de deposición de la soldadura y el amperaje utilizado para soldar.

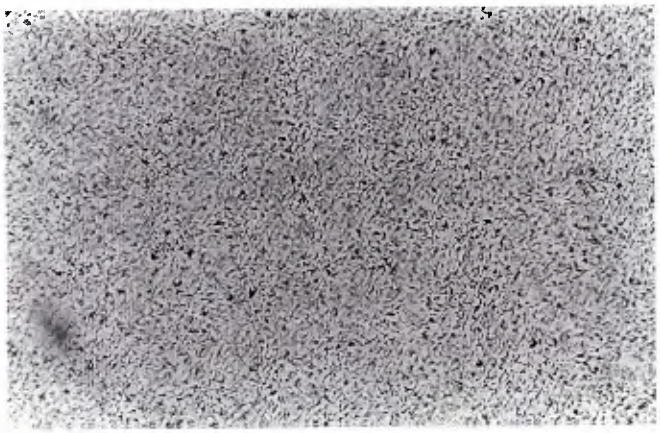
Unión soldada entre perfiles IPN 80 con junta a tope:

CLORURO DE HIERRO 6X

FIGURA 5.3. Fotomacrografía correspondientes a la falta de fusión y a la socavación

En este caso, la grieta por falta de fusión es de mayor tamaño debido al tipo de junta. No se logró una penetración completa del electrodo y no se pudo depositar una gran cantidad de material de aporte. En este tipo de unión también se observa una socavación producida por los mismos factores operativos descritos anteriormente.

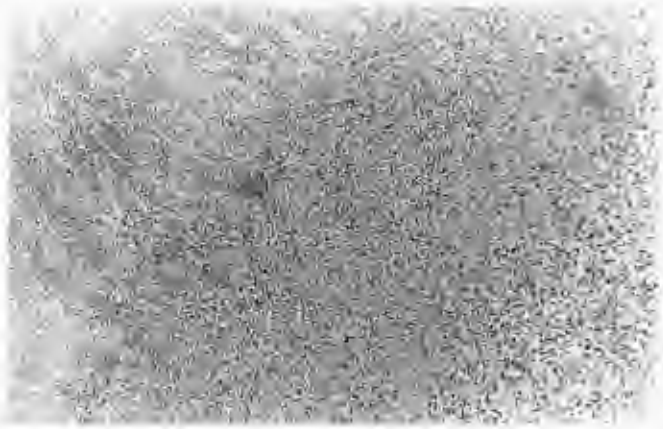
FOTOMICROGRAFÍA



NITAL 4% 50X

FIGURA 5.4. Fotomicrografía correspondiente al Metal Base

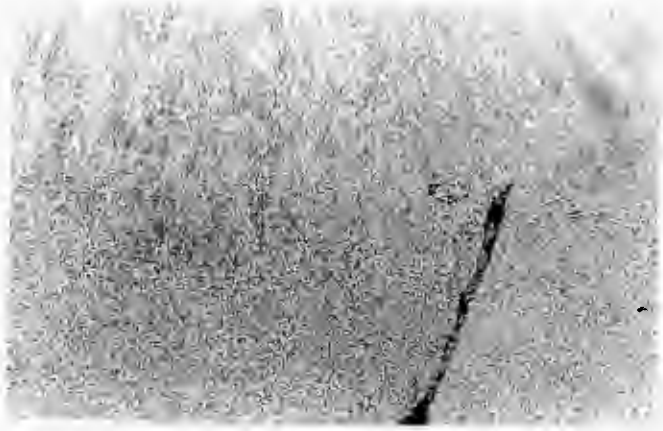
En esta figura (5.4) se puede observar una zona negra que corresponde a la ferrita y en la zona blanca, se observa la perlita del acero, componentes del material base.



NITAL 4% 100X

FIGURA 5.5. Fotomicrografía correspondiente a la interfase líquido-sólido

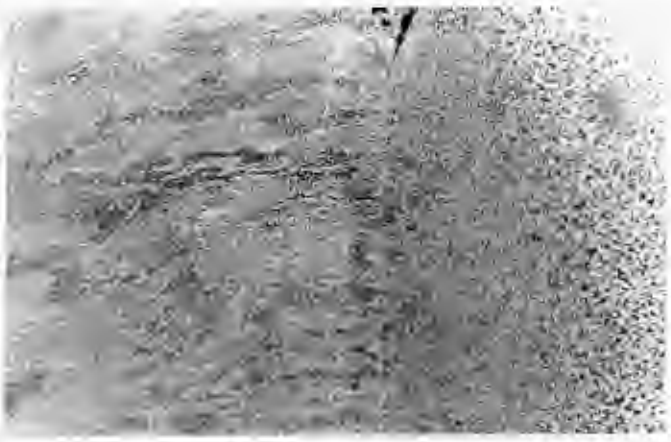
Se observa en la figura 5.5 una ampliación de las tres zonas: Zona de Fusión, Zona Afectada Térmicamente y la Zona del Metal Base.



NITAL 4% 100X

FIGURA 5.6. Fotomicrografía correspondiente a la Zona de Fusión y a la Zona Afectada por el Calor.

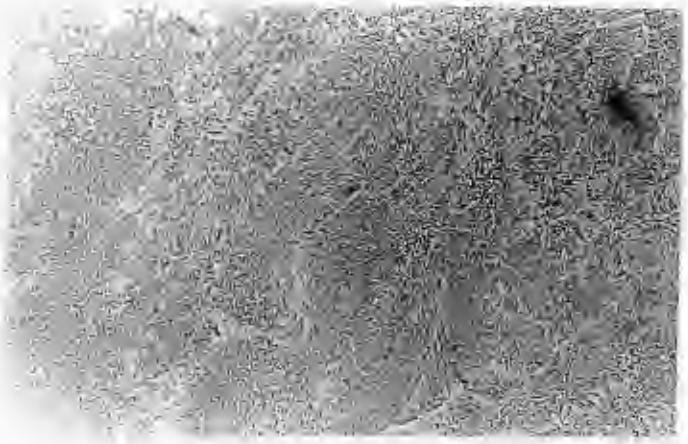
Se observa la grieta por falta de fusión indicando el inicio de la Zona Fusión.



NITAL 4% 100X

FIGURA 5.7. Fotomicrografía correspondiente a las 4 zonas afectadas por la unión soldada

Se nota claramente en la figura 4.7 la Zona de Aleación, que separa la Zona de Fusión de la Zona Afectada por el Calor. En el extremo derecho se observa un pequeño sector del metal base.



NITAL 4% 200X

FIGURA 5.8. Fotomicrografía correspondiente a la Zona de Fusión

Se puede observar que los granos de esta zona son de forma alargada, característicos de la fusión del metal.

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 Los ensayos realizados a las uniones, demuestran que la soldadura en taller cumplió con la mayoría de los parámetros del procedimiento de soldadura de filete. Por lo tanto, si se dispone de un proceso controlado en campo para la fabricación de las juntas soldadas, es posible prevenir gran cantidad de inconvenientes, obteniendo soldaduras de buena calidad.

6.1.2 Los tipos de fallas que presentaron el alma y el ala de los perfiles IPN utilizados como columna, fueron inesperados para luces tan cortas de estos miembros aporticados, lo que indica que el uso de los perfiles tipo IPN designados como vigas, está limitado como columna.

6.1.3 Al observar los gráficos obtenidos en los ensayos de todas las muestras, se puede determinar que la relación de los esfuerzos y deformaciones unitarias para este acero estructural, corresponde a un material elástico lineal y con límite de proporcionalidad indefinido.

6.1.4 El cuidado del electrodo 7018 es delicado, debido a que se debe almacenar en hornos para controlar la humedad del mismo, evitando así alterar las propiedades de este electrodo hidrófilo. Como parte de esta conclusión, el cordón ejecutado con el electrodo 7018 necesita un acabado superficial para mejorar la estética del cordón de soldadura, aumentando los costos de la unión.

6.1.5 Desde el punto de vista metalúrgico, a través de las fotomacrografías realizadas, se puede observar que la ejecución del cordón de soldadura con una pasada, produce en la Zona de Fusión una fase de forma alargada, la cual es uno de los factores que más influye en el inicio de pequeñas grietas que conducen a la falla de la unión.

6.1.6 El momento aplicado a la columna produce una deflexión inicial bastante elevada. Al transmitir una carga excéntrica a esta columna, se produce un efecto de amplificación de la deformación, ya que el valor de la carga es exagerado con relación al momento. En consecuencia, la columna sufre pandeo flexional y pandeo torsional, antes que el valor de la carga axial aplicada supere la resistencia teórica minorada.

6.1.7 Los valores de la deformación de las probetas ensayadas resultaron elevados, debido a que la carga no permaneció totalmente perpendicular al plano de aplicación por efectos del pandeo torsional.

6.1.8 Se obtuvieron valores de rigidez de las probetas ensayadas ligeramente menores al compararlos con los resultados de las muestras elaboradas con tubos estructurales. Esta comparación no es totalmente válida, ya que los modelos estructurales de las probetas no son iguales.

6.2 RECOMENDACIONES

Como aporte al estudio de las uniones viga–columna soldadas, se recomienda seguir las siguientes consideraciones para la continuidad de esta investigación:

6.2.1 Con la finalidad de simular una futura probeta experimental, es recomendable implementar el mecanismo de Columna Fuerte–Viga Débil, permitiendo una mejor evaluación de uniones por soldaduras utilizando otra combinación de perfiles, a la vez se sugiere seleccionarlos antes del ensayo.

6.2.2 Se puede recomendar que para realizar un cordón de soldadura con un electrodo 7018, se necesita un soldador calificado, ya que no es un electrodo de fácil manejo.

6.2.3 Realizar soldadura con multipasadas, es decir, ejecutar el cordón con dos pases mínimo, con la misma calidad de material de aporte, para evitar en la Zona de Fusión de la unión granos alargados, ya que originan condiciones propicias para generar la falla debido a la forma alargada.

6.2.4 Se considera importante realizar las uniones soldadas con un estricto control de variables operativas: procedimientos de soldadura, normas, usos y calificación del soldador.

6.2.5 Se recomienda tomar las fotomacrografías y fotomicrografías de varias muestras de uniones antes y después de ensayar a compresión, y así continuar definiendo el patrón de falla de la unión por soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

SIDOR, "Manual de Proyecto Estructuras de Acero, Fundamentos Teóricos". Editor CVG. Siderúrgica del Orinoco C.A.; Tomo III. Segunda Edición 1982.

Gutiérrez, A., Beyer E. " Manual de Perfiles L (Angulares)". Ediciones SIDETUR. 1990.

Lozano, L. "Laminación de Productos no Planos". 1991.

Merrit, F. "Manual del Ingeniero Civil". Editorial Mac Graw Hill. Tomo I. Segunda edición en español. 1996.

Hicks, T. "Manual de Cálculos para las Ingenierías".Editorial Mac Graw Hill. Tomo 1.Tercera edición. 1998.

Shigley, J., Mitchell, L. "Diseño de Ingeniería Mecánica". Editorial Mac Graw Hill. Tercera edición en español. 1989.

Bresler, B., Lin, T.Y., Scalzi, J. "Diseño de Estructuras de Acero". Editorial Limusa. Segunda Edición. 1983.

"Aceros productos y derivados". Publicado por Comercial SIDERO Metalúrgica Velasco S.A. Tomo I. Bilbao.

Segui, W. "Diseño de Estructuras de Acero con el LRFD". Editorial Thomson. Segunda edición. 1999.

PROPERCA. "Manual de Estructuras de Acero". Tomo I. Primera edición. 1997.

WEST-ARCO. "Manual de Soldadura". Editorial Electromanufactura S.A. 1997.

COVENIN-MINDUR. "Estructuras de Acero para Edificación. Proyecto, Fabricación y Construcción". 1618-98. Caracas.

Gutiérrez, A. "Perfiles Laminados de Acero Estructural. Tablas de Diseño según la Norma Venezolana COVENIN- MINDUR 1618-98". Enero 2000.

FEMA 350. "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings". Capítulo 3.

AMERICAN WELDING SOCIETY. "Structural Welding Code – Steel". D1.1-94.
Norma Venezolana COVENIN. "Bandas o Bobinas de Acero Estructural Laminadas en Caliente para la Fabricación de Perfiles Electrosoldados por Alta Frecuencia". 2896:1995.

Norma Venezolana COVENIN. "Aceros, Perfiles Estructurales Electrosoldados por Alta Frecuencia". 2897:1995.

Fernández I, Castañeda, J. "Evaluación de Uniones Viga-Columna Soldadas en Estructuras Tubulares Metálicas Aporticadas". Trabajo de Grado. Marzo 1999.