

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**

Caracterización experimental del pandeo local inelástico  
en flexión de vigas como modelos simplificados de barcazas

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Naval**

Presentado por:

Génesis Lissette Loyola Ortiz

Andrés Norberto Toala Ureta

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

## DEDICATORIA

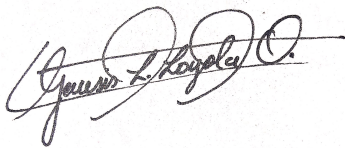
El presente proyecto lo dedicamos primeramente a Dios y luego a todas las personas que nos apoyaron a lo largo de la carrera. En especial a nuestros padres y seres queridos: María Ortiz y Raúl Loyola; Gilda Ureta, Jimmy Toala, Jim Toala y Jacinto Ureta (†)

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sincero agradecimiento a José R. Marín L. por su guía como tutor y por la formación brindada como profesor. Al Ing. Isaac Mendoza M. por la ayuda prestada en la preparación de los equipos necesarios para la realización de este trabajo.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Génesis L. Loyola* y *Andrés N. Toala* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

Génesis Lissette Loyola Ortiz



---

Andrés Norberto Toala Ureta

## **EVALUADORES**

---

**MSc. Nadia Muñoz A.**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**PhD. José R. Marín L.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Las barcasas fluviales son propensas a colapsar, rompiéndose en sección media cuando son sobrecargadas, por su baja resistencia estructural. Esto ha sucedido en países vecinos y podría ocurrir en Ecuador, donde muchas barcasas por sus sencillos diseños fueron construidas empíricamente o son réplicas escaladas de otras. Por ello, surge la necesidad de estudiar las cargas que conducen al colapso de la estructura.

En este trabajo se analizó experimentalmente el colapso en flexión de vigas, para entender dicho fenómeno como un caso simplificado de barcasas. Las vigas usadas, fueron correas G de acero, canales U y canales rectangulares de aluminio. Se realizaron experimentos de flexión aplicando carga lateral simétrica a  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{3}{4}$  de la longitud soportada según la norma ASTM-6272. Además, se desarrollaron experimentos de compresión inelástica, para comparar con el colapso en flexión.

Se registraron deformaciones unitarias en varios puntos de sección media, con ellas se estimaron distribuciones de esfuerzo normal basadas en la ecuación de Ramberg-Osgood. Estas distribuciones fueron integradas para calcular los momentos flectores que llevan al colapso a la sección.

Finalmente, se aplicaron formulaciones adaptadas para estimar el momento flector último del casco del buque, a las formas simples de las vigas. Como resultado del trabajo, se comparó la parte experimental de lo obtenido con formulaciones, ambos resultados difieren un 10% y la forma del colapso coincide cercanamente con el procedimiento del método empleado. Con esta experiencia, se puede en el futuro desarrollar aplicaciones simplificadas de este método para obtener rápidamente valores referenciales confiables de carga máxima.

**Palabras Clave:** Colapso, Barcasas, Pandeo Local, Momento flector último, Experimentación.

## **ABSTRACT**

*River barges are prone to collapse, breaking in the middle section when overloaded, due to their low structural strength. This has happened in neighboring countries and could happen in Ecuador, where many barges, due to their simple designs, were built empirically or are scaled replicas of others. Therefore, the need arises to study the loads that lead to the collapse of the structure.*

*In this work, the bending collapse of beams was experimentally analyzed in order to understand this phenomenon as a simplified case of barges. The beams used were steel G purlins, U channels, and rectangular aluminum channels. Bending experiments were carried out applying symmetric lateral load at  $\frac{1}{4}$  and  $\frac{3}{4}$  of the supported length according to the ASTM-6272 standard. In addition, inelastic compression experiments were developed, to compare with collapse in bending.*

*Unit strains were recorded at various points of the midsection, with which normal stress distributions were estimated based on the Ramberg-Osgood equation. These distributions were integrated to calculate the bending moments that lead to the collapse of the section.*

*Finally, adapted formulations were applied to estimate the ultimate bending moment of the ship's hull, to the simple shapes of the beams. As a result of the work, the experimental part of what was obtained with formulations was compared, both results differ by 10% and the shape of the collapse coincides closely with the procedure of the method used. With this experience, simplified applications of this method can be developed in the future to quickly obtain reliable reference values of maximum load.*

**Keywords:** *Collapse, Barges, Local Buckling, Ultimate Bending Moment, Experimentation.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema .....	3
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Resistencia última de barcazas.....	5
1.4.2 Método de la distribución de esfuerzos asumida.....	6
1.4.3 Fallas por Inestabilidad o Pandeo .....	6
1.4.4 Cálculo del momento flector último.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. Metodología .....	9
2.1 Ensayo de flexión .....	9
2.1.1 Descripción de equipos y estructura.....	10
2.1.2 Detalle de los especímenes.....	12
2.1.3 Descripción del ensayo de Flexión.....	15



2.2	Compresión de Vigas .....	17
2.2.1	Descripción de los equipos.....	17
2.2.2	Detalle de los especímenes.....	18
2.2.3	Descripción del ensayo de Compresión .....	19
2.3	Equipos de adquisición de Datos.....	20
2.3.1	Medición de Fuerza .....	20
2.3.2	Desplazamiento y deformaciones.....	23
2.4	Procedimiento de la adaptación del Método de Paik .....	24
CAPÍTULO 3.....		25
3.	Resultados y Análisis .....	25
3.1	Consistencia de resultados .....	25
3.2	Resultados de los ensayos de flexión .....	26
3.2.1	Deformaciones Unitarias .....	26
3.2.2	Distribuciones de esfuerzo .....	30
3.2.3	Momentos flectores y cargas últimas .....	34
3.3	Resultados de Compresión.....	36
3.4	Comparación con otras Formulaciones.....	38
3.4.1	Momento plástico.....	38
3.4.2	Adaptación Método de Paik.....	38
CAPÍTULO 4.....		39
4.	Conclusiones y Recomendaciones .....	39
4.1	Conclusiones.....	39
4.2	Recomendaciones.....	42
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		47

## ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ISSC	International Ship Structure Congress
ISFEM	Idealized Structural Unit Method
ISUM	Intelligent Supersize Finite Element Method
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEM	Finite Element Method
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
FIMCM	Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar
SIMAR Lab.	Laboratorio de Sistemas Marinos
$W_u$	Upper Web ó Alma Superior (posición)
$W_u''$	Upper Web other side ó Alma Superior del otro lado (posición)
$W_{u0}$	Upper Web 0 ó Alma Superior 0 (posición)
$W_{u1}$	Upper Web 1 ó Alma Superior 1 (posición)
$W_m$	Middle Web ó Alma Media, posición central del Alma
$W_m''$	Middle Web other side ó Alma Media del otro lado, posición central del Alma
$W_L$	Low Web 1 ó Alma Inferior (posición)
$f_s$	Flange Side ó al costado del Ala (posición)
$f_M$	Flange Middle ó en el medio del Ala (posición)
$L_f0$	Little Flange 0 ó Pestaña Superior 0 (posición)
$L_f1$	Little Flange 1 ó Pestaña Superior 1 (posición)
$F_u$	Upper Flange ó Ala Superior (posición)
$F_u''$	Upper Flange other side ó Ala Superior del otro lado (posición)
$F_{u1}$	Upper Flange 1 ó Ala Superior 1 (posición)
$F_{u2}$	Upper Flange 2 ó Ala Superior 2 (posición)
$F_{u3}$	Upper Flange 3 ó Ala Superior 3 (posición)
$FL_M$	Low Flange Middle 0 ó Ala Inferior en el centro (posición)
$F_{ult\ adp}$	Fuerza última adaptada
$F_{ult\ exp}$	Fuerza última experimental
$MF_{ult\ adp}$	Momento Flector último adaptado
$MF_{ult\ exp}$	Momento Flector último experimental
$Error_{adp/exp}$	Error entre la adaptación y lo experimental

## SIMBOLOGÍA

m	Micro
$\epsilon$ ó $\epsilon$	Deformación unitarias axiales
s	Esfuerzo
me	Micro deformaciones
d	Centroide
$\sigma_y$	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_u$	Esfuerzo último
I <sub>c</sub>	Inercia seccional
S	Módulo seccional elástico mínimo
Z	Módulo seccional plástico
f	Factor de forma
D <sub>p</sub>	Eje neutro plástico
M	Momento flector
M <sub>y</sub>	Momento flector elástico
M <sub>p</sub>	Momento flector plástico
M <sub>u</sub>	Momento flector último
F	Fuerza Lateral Aplicada
P	Fuerza Axial Interna
NA	Neutral Axis (Eje Neutro)
h <sub>Y</sub>	Height of the yielded area under axial tensión ó Altura del área cedida bajo tensión axial.
h <sub>c</sub>	Height of the collapsed area under axial compression ó Altura del área colapsada bajo compresión axial.
$\tilde{\sigma}_{cubierta}$	Esfuerzo Promedio de Cubierta
$\tilde{\sigma}_{costado}$	Esfuerzo Promedio del Costado

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de esfuerzos asumida en colapso bajo condiciones .....	6
Figura 2.1. Esquema de Carga .....	9
Figura 2.2. Soportes del ensayo de flexión .....	11
Figura 2.3. Esquema de la estructura completa, a) Modelo 3D, b) Modelo real .....	12
Figura 2.4. Especímenes; a) canal U, b) correa G, c) tubo rectangular .....	12
Figura 2.5. Disposición general de extensómetros .....	13
Figura 2.6. Extensometros (U) .....	14
Figura 2.7. Disposición y Nomenclatura de Extensometros G&R.....	14
Figura 2.8. Esquema del ensayo de flexión en canales U. ....	16
Figura 2.9. Máquina de ensayos universal.....	18
Figura 2.10. Ubicación de extensómetros en ensayos de compresión .....	19
Figura 2.11. Esquema de adquisición de datos de la celda S.....	20
Figura 2.12. Diagrama de Bloques LabView-Omega Daq 3000 .....	22
Figura 2.13. Diagrama de Bloques Labview-NI 9235.....	23
Figura 3.1. Fuerza aplicada vs tiempo en cada prueba .....	25
Figura 3.2. Fuerza vs Deformación, Prueba U1 .....	26
Figura 3.3. Fuerza vs Deformación, Prueba G2.....	27
Figura 3.4. Fuerza vs Deformación, Prueba R3.....	27
Figura 3.5. Pendiente $dF/d\varepsilon$ , Prueba U1 .....	29
Figura 3.6. Pendiente $dF/d\varepsilon$ , Prueba G2 .....	29
Figura 3.7. Pendiente $dF/d\varepsilon$ , Prueba R3 .....	30
Figura 3.8. Distribuciones, deformaciones (izq) y esfuerzos (der), “alma canal U” .....	31
Figura 3.9. Distribuciones, deformaciones (izq) y esfuerzos (der), “alma correaG” .....	32
Figura 3.10. Distribuciones, deformaciones (izq) y esfuerzos (der), “alma Canal R” .....	33
Figura 3.11. Distribuciones de deformaciones .....	35
Figura 3.12. Distribuciones de deformaciones .....	35
Figura 3.13. Deformación vs Tiempo Ucomp .....	36
Figura 3.14. Deformación vs Tiempo, Gcomp.....	37
Figura 3.15. Deformación vs Tiempo Rcomp .....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de los espécimen en flexión .....	13
Tabla 2.2. Características de los espécimen en compresión .....	18
Tabla 2.3. Especificaciones de la celda de carga .....	21
Tabla 2.4. Especificaciones del amplificador de señal .....	21
Tabla 3.1. Resumen de resultados experimentales de flexión.....	34
Tabla 3.2. Comparación de momentos flectores con formulaciones.....	38

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Ecuador la mayor parte de la transportación fluvial se ha desarrollado en los ríos del Oriente. Según la tesis de (Bahamonde, 2015) se han adquirido embarcaciones a países vecinos para transportar cargas por estos ríos. Esto indica que el país posiblemente no cuenta con una flota de barcasas fluviales adecuada para la transportación en las condiciones propias de estos ríos. Por otro lado, la vecina Colombia dispone de aproximadamente 208 barcasas fluviales según el boletín tecnológico de la (Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia, 2016), algunas de las cuales deben ser reemplazadas y se proyecta que esta flota tenga un aumento de hasta un 400%. De manera que ambos países tienen un potencial mercado de barcasas fluviales por lo que se necesita de conocimiento ingenieril sobre este tipo de embarcaciones para servicio local seguro.

En algunos lugares del mundo se han reportado estructuras de barcasas colapsadas durante sus operaciones. Por ejemplo, en (Argonautics, 2006) se reportó el hundimiento la barcaza tipo Hopper “Eva Joan” y similar a esta (McCornack, 2020) notificó el accidente de la “ACL 01700”; ambas embarcaciones estadounidenses colapsaron en la estructura de la región central y se hundieron. Señalando los casos cercanos a nuestro país, según (Rojas, 2018) y medios electrónicos de (Paraguay Fluvial, 2020), dos barcasas tipo Jumbo pertenecientes a la serie UN cargadas de fertilizante colapsaron en puertos de Uruguay y Paraguay; pese a que no hubo derrame de la carga, la contaminación pudo ser grave. En Europa también se encuentran casos de colapsos siendo uno de los más recientes el que se presentó en Serbia, donde una barcaza tipo Europa I de origen rumano que hacía servicio de dragado para el río Danubio, colapsó; afortunadamente el único marinero a bordo logró escapar con éxito (УПЛС|UPLS, 2021). En vista de todos estos casos reportados, surge el interés de que se realice un análisis estructural considerando las posibles fallas en los nuevos diseños de barcasas.

El colapso estructural de un barco usualmente se produce por combinación de varias causas y fallas locales. Estas fallas catastróficas reducen la capacidad de carga en partes de la estructura y pueden provocar la pérdida del buque. Se han desarrollado algunos trabajos para estudiar el comportamiento de colapsos de barcasas, como el realizado por (Katsura, Masaoka, Okada, & Tsubogo, 2003). Dicho trabajo, presenta un método de análisis de confiabilidad y estado límite para la resistencia al pandeo y al colapso final de la cubierta, mamparos y paneles inferiores de barcasas grandes. Trabajos más cercanos a este ámbito como el de (Meinken & Schluter, 2002) estudian la estructura típica de una barcaza de empuje utilizando el método de elementos finitos. Se determinan las imperfecciones y fallas de la barcaza para recomendar mejoras en su diseño. Debido a los estudios realizados y las formulaciones propuestas se considera importante verificar estas mediante experimentos.

### **1.1 Descripción del problema**

Cuando las barcasas fluviales soportan carga elevada en la sección media, su estructura se deforma formando una concavidad hacia arriba, generándose altos esfuerzos compresivos en cubierta. Si la carga compresiva sobrepasa la carga crítica que puede soportar cierto elemento, éste se dobla y se produce el fenómeno de pandeo local que puede desembocar en el colapso de todo el casco. Debido a esto, surge la necesidad de estudiar estas fallas en las estructuras de barcasas y las cargas que podrían llevarlas al colapso.

El pandeo local en un elemento hace que disminuya su resistencia a la compresión y a la vez limita la resistencia de la estructura global. Por ejemplo, si pandeo un refuerzo longitudinal se genera una redistribución de esfuerzos y la carga inicial que soportaba se transmite a otro elemento, usualmente a la plancha asociada, lo que puede ocasionar la falla de ésta también. Como se nota el fenómeno es bastante complicado, posiblemente con deformaciones muy altas y el material operando en el régimen plástico. Por ello es recomendable realizar un estudio intermedio experimental, analizando modelos simplificados, que permitan visualizar el fenómeno y de forma preliminar estudiar el colapso de barcasas con y sin cubierta.

## **1.2 Justificación del problema**

Uno de los objetivos principales de los diseñadores de embarcaciones es evitar fallas estructurales, y, para lograrlo deben conocer los posibles modos y cómo prevenirlas. El modo de falla de la estructura de una barcaza incluye procedimientos de análisis estructurales No lineales y posiblemente con el material operando en el régimen plástico. Mediante pruebas de flexión de estructuras simplificadas que asemejan barcazas se puede determinar la variación de la resistencia una vez que el pandeo local de algún elemento empieza a influir en la resistencia de toda la estructura. Esto permitirá que en el futuro ingenieros desarrollen cálculos numéricos del fenómeno y puedan confirmar sus modelos con los resultados experimentales de este proyecto.

La experimentación aquí propuesta sobre la carga última que soportan vigas es una parte del estudio del colapso de barcazas a ser desarrollado en una tesis de maestría en la Escuela Naval Almirante Padilla de Cartagena, Colombia. El autor de dicha propuesta el Ingeniero Arrieta pretende realizar un análisis no lineal utilizando el método de elementos finitos no lineales para predecir la carga máxima que puede soportar una barcaza fluvial para el río Magdalena.

El conjunto de resultados permitirá encontrar soluciones que ayuden en la reducción de pérdidas económicas para los armadores de las embarcaciones, propietarios de las cargas y compañías aseguradoras. Además, ayudarán a evitar; pérdidas humanas, daños ambientales o accidentes personales que podrían darse en situaciones extremas. Los beneficios económicos y sociales mencionados llevarían a que las autoridades marítimas soliciten a los ingenieros navales este tipo de análisis y cálculos como un requisito necesario para otorgar los permisos de construcción.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Describir el comportamiento de vigas en colapso debido a pandeo local y deformaciones plásticas, mediante ensayos de compresión y flexión para el estudio de la resistencia última de las vigas.



### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar las cargas máximas y momentos flectores que producen el colapso de las vigas, mediante el procesamiento de datos experimentales.
2. Estudiar la influencia de las alas en el pandeo local de las almas de vigas rectangulares, U y correas G sometidos a compresión y flexión para visualizar la variación de distribución de esfuerzo en las secciones
3. Comparar los resultados experimentales con los obtenidos aplicando formulaciones semiempíricas disponibles sobre pandeo local y resistencia última de elementos en flexión.

### **1.4 Marco teórico**

Durante décadas se han realizado investigaciones y análisis sobre el pandeo y colapso plástico de elementos estructurales. Trabajos tales como (Gardner, Fieber, & Lorenzo, 2019) han desarrollado formulaciones que han sido validadas por experimentos. Estos han modelado el problema como una viga cajón con refuerzos, cargada hasta alcanzar su resistencia última intentando reproducir el comportamiento de la estructura de un barco bajo flexión. Pese a que la mayoría de los experimentos previos ha emulado los refuerzos internos de la embarcación, el experimento propuesto en este trabajo consiste en una geometría más simplificada en donde la presencia o ausencia de cubierta es la sección principal del análisis.

Frecuentemente, las pruebas experimentales del colapso de vigas se han realizado en paralelo con el desarrollo de formulaciones analíticas. Por ejemplo, las llevadas a cabo por (Faulkner, 1975), (Smith, 1975), (Guedes Soares & Søreide, 1983), consisten en un ensayo de flexión de 4 puntos en donde la viga se divide en 3 segmentos, dos partes de apoyo simétricas y, en el medio, una tiene el modelo de viga cajón a ensayar. La viga cajón se somete a un momento flector puro, que induce tensión en la parte inferior y compresión en la parte superior de la sección. En trabajos recientes como el de (Gordo & Soares, 2008) y (Su, Young, & Gardner, 2016) estos ensayos se realizan siguiendo los estándares de ASTM. En vista del interés generado por validar y modificar las formulaciones existentes se han

realizado experimentos en donde los ensayos de 4 puntos han sido los más utilizados.

#### **1.4.1 Resistencia última de barcasas.**

El cálculo de la resistencia última de un buque requiere de métodos precisos y efectivos. Según (Hughes & Paik, 2010) los métodos para realizar este cálculo se clasifican en cinco tipos:

- el de la teoría de la viga simple,
- el basado en distribución de esfuerzos asumida,
- el de la unidad estructural idealizada (ISUM),
- el inteligente de elementos finitos de gran tamaño (ISFEM), y,
- elementos finitos no lineales.

Los trabajos más recientes que estudian el comportamiento del colapso de barcasas han sido realizados con métodos de elementos finitos no lineales y análisis de confiabilidad. A pesar del continuo uso del MEF para el cálculo de resistencia última, otra opción que puede validar estos resultados es el método de distribución de esfuerzos, que usa formulaciones deducidas con secciones rectangulares simples.

La industria marítima ha desarrollado softwares basados en métodos semiempíricos para el cálculo de la resistencia última del casco de un buque. Recientemente (Van Tuyen & Ping, 2018) presentaron un programa para determinar el momento flector último del casco aplicando el método directo (Zhu, Young, & M.ASCE, 2009) y el de distribución de esfuerzos desarrollado por (Paik & Mansour, 1995). El método directo no toma en cuenta el efecto de las fallas locales de miembros estructurales, mientras que el método de Paik si considera el pandeo de elementos en compresión y la cedencia de miembros en tensión. Por consiguiente, se pueden usar las formulaciones semiempíricas del método de distribución de esfuerzos asumida para comparar resultados experimentales de estudios de barcasas como las mostradas en (Paik, y otros, 2013)

### 1.4.2 Método de la distribución de esfuerzos asumida

El método de la distribución de esfuerzos asumida para el momento flector extremo se basa en la teoría del estado límite último. En ella, si la deformación unitaria sobrepasa el valor de fluencia, un aumento en deformación no producirá un incremento en esfuerzo. Apoyados en estudios experimentales y numéricos, (Paik, y otros, 2013) mencionan que el estado límite se consigue cuando los elementos que están en tensión llegan al límite elástico del material, y, aquellos que están en compresión alcanzan la resistencia a pandeo. Sin embargo, dependiendo de las propiedades geométricas y/o materiales de las secciones transversales del casco, los miembros verticales cercanos al ala tensionada también pueden ceder hasta que alcancen el estado límite último. Por lo tanto, la distribución supuesta del esfuerzo de flexión en el estado límite último original de Paik-Mansour se modifica a la que se muestra en la Figura 1.1

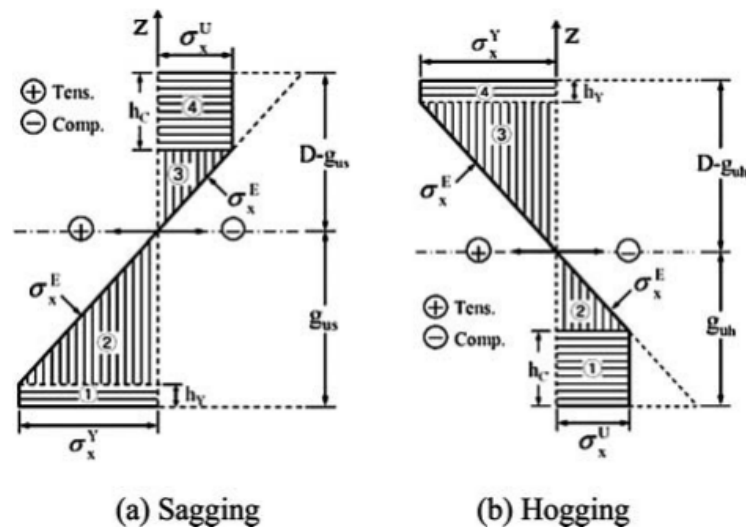


Figura 1.1. Distribución de esfuerzos asumida en colapso bajo condiciones

a) arrufo, y, b) quebranto

[FUENTE: (Paik, y otros, 2013)]

### 1.4.3 Fallas por Inestabilidad o Pandeo

En general las planchas con refuerzos longitudinales en compresión pueden pandear elásticamente conocido comúnmente como "pandeo" o pueden pandear inelásticamente lo cual involucra "colapso". El pandeo local ocurre cuando los refuerzos longitudinales o el panel entre refuerzos se pandea deformándose

lateralmente; si los refuerzos colapsan, la plancha reforzada pierde rigidez y el pandeo global se vuelve inminente (Cameron, Nadeau, & LoSciuto, 1997). Debido a esto, el pandeo local es una de las fallas principales que debe controlarse en el análisis de colapso de estructuras.

Las ecuaciones para calcular el esfuerzo crítico de pandeo de perfiles sujeto a flexión se basan en las ecuaciones para planchas aisladas con condiciones de frontera fijas y de soporte simple, según el Comité Europeo de Estandarización (EN 1993-1-5, 2006). Dichas ecuaciones dependen del ancho y espesor de la plancha, el módulo de elasticidad del material, la razón de Poisson y el coeficiente de pandeo de la plancha. Este último factor a su vez depende de tres parámetros: la razón de aspecto de la plancha, las condiciones de frontera de los bordes y la distribución de esfuerzos resultante de la carga aplicada. objetivo.

#### 1.4.4 Cálculo del momento flector último

El momento flector que provoca que una barcaza colapse puede calcularse conociendo la distribución de deformaciones unitarias en la sección media y convirtiéndolas a esfuerzo. La aproximación de esfuerzos se la puede realizar siguiendo la formulación de Ramberg-Osgood, ver Ecuación (1.1), (1.2), (1.3) y APÉNDICE E. **Error! Reference source not found.** En la zona plástica la formulación se compara con la curva experimental de cada material. Los coeficientes de dureza implícitos en la formulación ( $\alpha$ , N) son calculados siguiendo la estimación de (Kamaya, 2016)

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \frac{\sigma}{\sigma_o} + \alpha \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^N \quad (1.1)$$

$$\alpha = \frac{E \cdot \varepsilon_o}{\sigma_o} \quad (1.2)$$

$$N = 3.93 \cdot \left(\ln\left(\frac{\sigma_{ultimo}}{\sigma_o}\right)\right)^{-0.754}, \text{ para } \varepsilon_o = 0.002 \quad (1.3)$$

donde  $\varepsilon_o, \sigma_o, \sigma_{ultimo}$  son la deformación y el esfuerzo en la cedencia y el esfuerzo último respectivamente, mientras que  $\varepsilon, \sigma$  son los valores de interés a calcular.

Mediante la integración del primer momento y de la distribución de esfuerzos, se determina el momento flector en la sección y la fuerza axial que debe ser nula, ver Ec. (1.5) y (1.7).

$$M_z = -\frac{\sigma_x \cdot I_o}{y} = -\iint \sigma_x \cdot y \cdot dA \quad (1.4)$$

$$M_z = -\left[2 \cdot t \cdot \iint \sigma_x \cdot y \cdot dy + 2 \cdot t \cdot \iint \sigma_x \cdot y \cdot dz\right] = \frac{F \cdot L}{6} \quad (1.5)$$

$$P = \iint \sigma_x \cdot dA = 0 \quad (1.6)$$

$$P = 2 \cdot t \cdot \int \sigma_x \cdot dy + t \cdot \sigma_x \cdot z = 0 \quad (1.7)$$

donde F, es la fuerza aplicada en el centro de la viga, L es la longitud soportada, A es el área transversal de la viga y t el espesor.

Parte de las formulaciones de secciones enfocadas en la zona plástica son aplicables para una sección rectangular de ancho  $b$  y alto  $d$ , donde los ejes neutros elástico y plástico de una sección transversal rectangular coinciden y pasan a través del centroide del área de la sección. Como referencia el momento flector para que la fibra más alejada alcance el límite elástico es:

$$M_Y = \frac{\frac{\sigma_Y \cdot b \cdot d^3}{12}}{\frac{d}{2}} = \sigma_Y \cdot \frac{b \cdot d^2}{6} \quad (1.8)$$

Momento flector para alcanzar la carga máxima, es decir que toda la sección alcance al límite elástico (Régimen Plástico) es:

$$M_Y = \sigma_Y \cdot \frac{b \cdot d}{2} \cdot \left(\frac{d}{4} + \frac{d}{4}\right) = \sigma_Y \cdot \frac{b \cdot d^2}{4} \quad (1.9)$$

donde,  $M_Y$  es el momento flector en fluencia (Yield Moment),  $b$  es el ancho de la sección y  $d$  la altura.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

Para estudiar el colapso de modelos sencillos de barcazas, se llevaron a cabo ensayos de flexión y compresión en vigas de secciones rectas. Se decidió utilizar la técnica de experimentación ya que el problema no es sencillo de estudiar analíticamente. La problemática trata fenómenos no lineales, que no se estudian en pregrado. Sin embargo, para conocer el comportamiento se realizaron experimentos con geometrías simplificadas de barcazas, como son canales rectangulares o en U. Los experimentos fueron llevados a cabo en laboratorios de la universidad. Los ensayos de flexión se realizaron en el laboratorio SIMAR. de FIMCM, mientras que los ensayos de compresión se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción de FICT. En ambos ensayos se utilizaron equipos disponibles de cada laboratorio. Estos dos ensayos permitieron estudiar el fenómeno de pandeo local en las vigas.

### 2.1 Ensayo de flexión

Se desarrollaron ensayos estándares de flexión de 4 puntos siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM 6272 (APÉNDICE B). En estos ensayos el momento flector en la zona central se mantuvo constante y no generó fuerzas cortantes. La norma indicaba que las pruebas pueden realizarse con separaciones entre cargas simétricas de  $1/2$  o  $1/3$  de la longitud soportada de cada viga, como se ve en la Figura 2.1

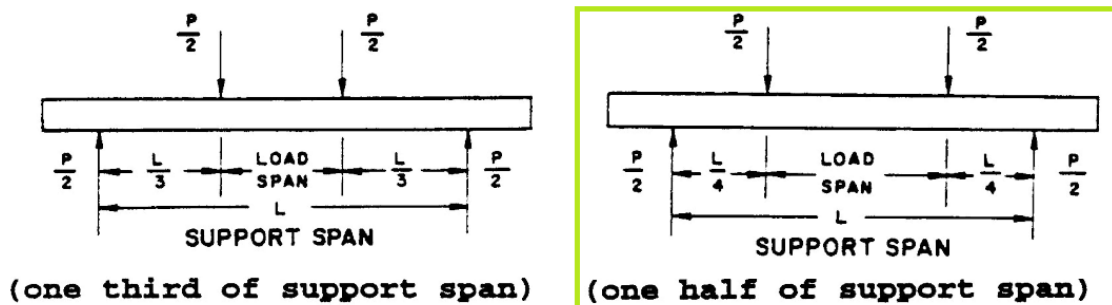


Figura 2.1. Esquema de Carga

[FUENTE: (ASTM, 2010)]

### **2.1.1 Descripción de equipos y estructura**

Para la realización de los ensayos se adecuaron sobre un marco estructural los equipos necesarios para aplicación de fuerza y soporte. También se utilizó otras piezas como prensas y láminas de acero, que sirvieron para ajustar, nivelar y centrar los especímenes. Las características de dichos equipos y estructuras se detallan a continuación.

#### **2.1.1.1 Cilindro hidráulico**

Para la aplicación de la carga se empleó el cilindro hidráulico, de la marca Wolverine modelo W40010-S. La capacidad nominal es de 2500 psi, con diámetro de 4" y carrera de 12". El cilindro es de doble efecto, avanza y retrocede en ambas direcciones del eje. El pistón es accionado por una bomba que inyecta aceite a presión. La unidad hidráulica es de 14 litros y una presión máxima de 600 psi. La velocidad de desplazamiento es definible ya que se regula el flujo de aceite por medio de válvulas direccionales. Por lo que para los ensayos de flexión se reguló la presión de la bomba a 400psi, para que no sobrepasara 2 toneladas, que es el límite de medición de la celda de carga.

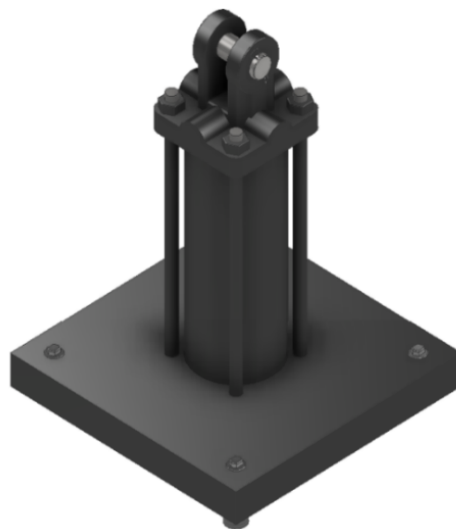


Figura 2.1. Cilindro Hidráulico Wolverine W40010-S  
[FUENTE: (Wolverine, 2001)]

### 2.1.1.2 Soportes

Se construyeron dos bases móviles para representar las condiciones de frontera de soporte simple. El modelo consta de un tubo cuadrado de acero de 2", y 37 cm de altura, la misma que se calculó considerando la carrera del pistón hidráulico. En la parte superior se colocó una varilla de 2 cm de diámetro de acero galvanizado que realiza la función de apoyo simple permitiendo desplazamientos axiales del espécimen, como se puede ver en la Figura 2.2. Puesto que la longitud entre especímenes varía, se soldaron dos segmentos de ángulos de 4 cm, a las bases para que se puedan colocar y ajustar con prensas en las posiciones requeridas.

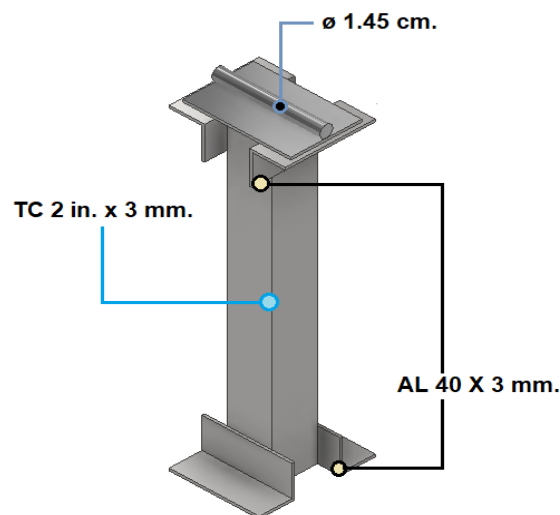


Figura 2.2. Soportes del ensayo de flexión

[FUENTE: Propia]

### 2.1.1.3 Estructura

Se utilizó un marco estructural para el soporte global del sistema y las cargas máximas que se generen en los ensayos. El sistema soportado incluye el pistón hidráulico, el conjunto de apoyos móviles, el espécimen y el sensor de desplazamiento. Previo a realizar los experimentos se reforzaron las uniones de esta estructura, alcanzando una capacidad de hasta 2.5 toneladas con un factor de seguridad de 4. Debido a la restricción de los equipos de 2 toneladas como máximo, se aplicaron cargas de hasta 1.5 toneladas, teniendo así un factor adicional de 1.67.



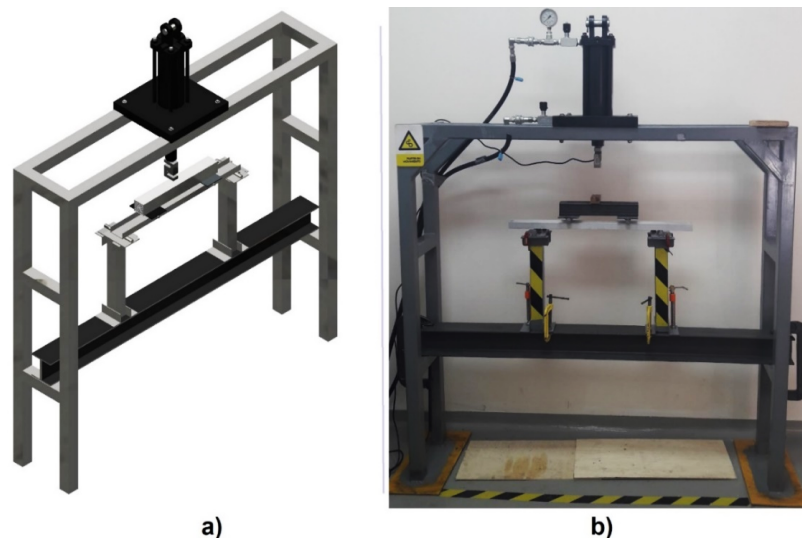


Figura 2.3. Esquema de la estructura completa, a) Modelo 3D, b) Modelo real

[FUENTE: Propia]

### 2.1.2 Detalle de los especímenes.

Para emular de manera simplificada las formas de barcasas, se trabajó con tubos rectangulares, canales U y correas G. Las partes de las vigas fueron denominadas como se aprecia en la Figura 2.4, para tener uniformidad en los conceptos. Se usaron los tres tipos de vigas mencionados para estudiar la influencia de las alas en el pandeo local de las almas. El material de los tubos rectangulares y los canales U fue aluminio 6063-T5, mientras que las correas G fueron de acero A36 ya que no se consiguió el mismo perfil en aluminio. Debido a limitaciones de material y a restricciones en la aplicación de la carga se utilizaron vigas disponibles comercialmente con relación ancho/alto entre 2 y 3 (Ver APÉNDICE A)

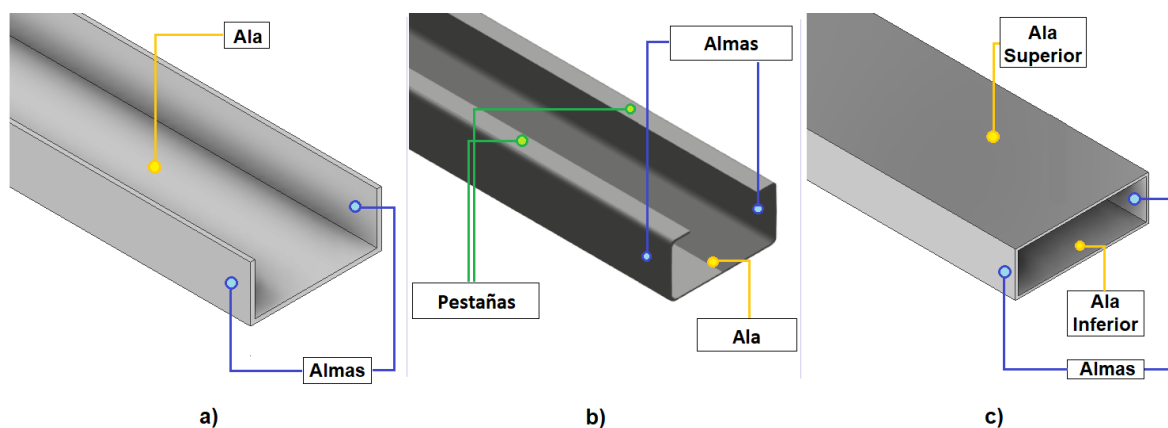


Figura 2.4. Especímenes; a) canal U, b) correa G, c) tubo rectangular

[FUENTE: Propia]

Las longitudes de las vigas se definieron a partir de cálculos de esfuerzos longitudinales en las secciones transversales. El colapso de las vigas se da cuando los elementos superiores de las secciones sobrepasan el esfuerzo de fluencia del material. Debido a esto, se determinaron las dimensiones y la fuerza que se debe aplicar para que todos los puntos de la sección media alcancen el límite elástico. En la Tabla 2.1 se muestra las características de las vigas usadas en los experimentos.

Tabla 2.1. Características de los espécimen en flexión

[Fuente: Propia]

	<b>Espécimen1</b>	<b>Espécimen2</b>	<b>Espécimen3</b>
	Canal U	Correa G	Rectangular
<b>Longitud no soportada, [mm]</b>	670	920	670
<b>Ancho, [mm]</b>	60	80	76.2
<b>Alto, [mm]</b>	25.4	40	25.4
<b>Espesor, [mm]</b>	2	1.5	1.45
<b>Material</b>	Aluminio	Acero	Aluminio
<b>Especificación</b>	6063 – T5	ASTM A36	6063 – T5
<b>Fluencia, [MPa]</b>	145	250	145
<b>Fuerza aprox. fluencia, [N]</b>	2793	6281	3702

Para medir las deformaciones se instalaron extensómetros en dos secciones de las vigas. Por simetría solo se colocaron en un costado de los especímenes, en la superficie exterior. No se incluyeron extensómetros en la superficie interior ya que el espesor era suficiente para no considerar una variación en la deformación. La posición de los extensómetros se definió como se puede ver en la Figura 2.5.

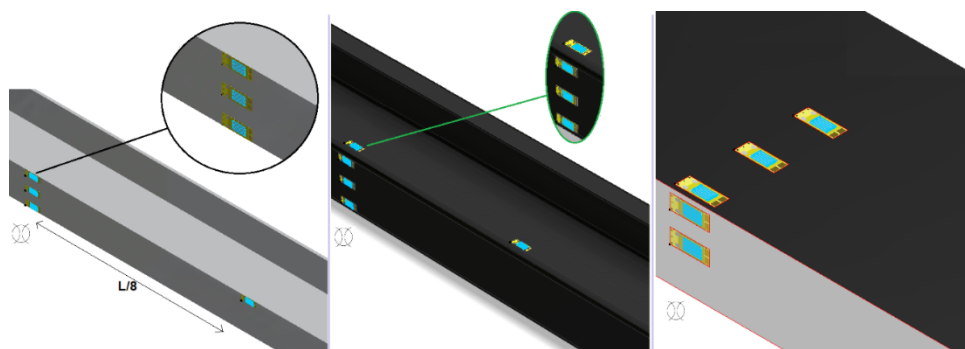


Figura 2.5. Disposición general de extensómetros

[FUENTE: Propia]

En los canales U, se instalaron 3 galgas en el alma y 2 en el ala inferior de la sección media, además otra en el alma entre el punto de la carga aplicada y la mitad del espécimen. Se denominó cada extensómetro según el elemento y ubicación. Por ejemplo, “wu1” es: alma superior 1 por sus siglas en inglés (web-upper1), mientras que “fs” sería ala al costado (flange-side).

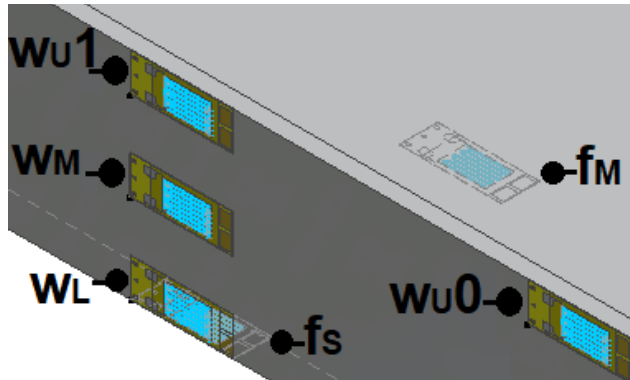
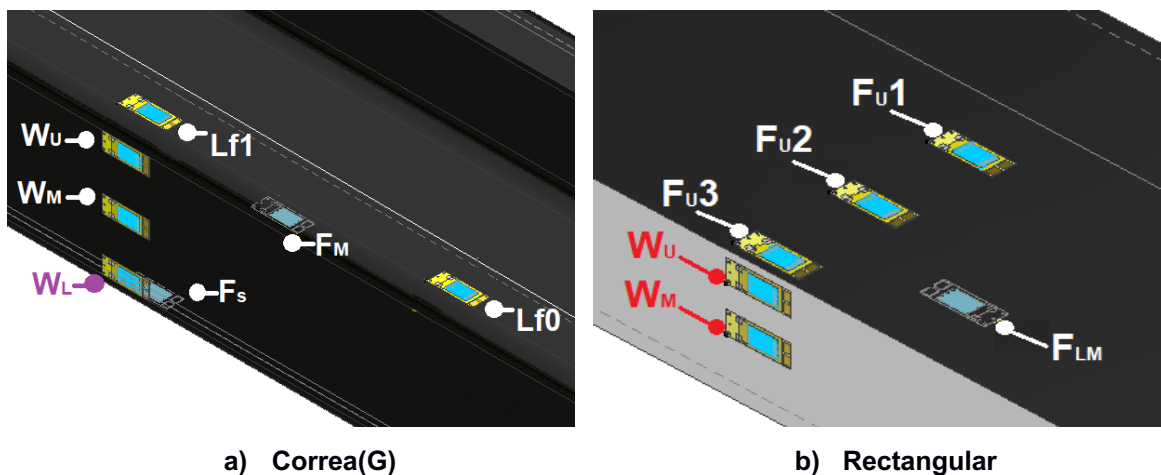


Figura 2.6. Extensómetros (U)

[FUENTE: Propia]

En la correa G, la posición de los extensómetros como se aprecia en la Figura 2.7.(a) Se incluyó 2 extensómetros en la pestaña de la correa, los cuales son definidos con “Lf” ó pequeña ala (Little flange). En el caso del tubo rectangular la disposición cambio al agregar 3 extensómetros en el ala superior (fu<sub>1,2,3</sub>), resumido en la Figura 2.7.(b)



a) Correa(G)

b) Rectangular

Figura 2.7. Disposición y Nomenclatura de Extensómetros G&R

[FUENTE: Propia]

### **2.1.3 Descripción del ensayo de Flexión**

El ensayo de flexión consistió en aplicar dos cargas iguales y simétricas en el centro de las vigas hasta que colapsen presentando fallas de pandeo local y deformaciones plásticas. Para ello cada viga fue montada en los soportes simples y sobre esta se colocó el sistema para la aplicación de la carga.

Se aplicaron dos cargas equivalentes a la mitad de la fuerza producida por el pistón hidráulico. El conjunto que transmitía las fuerzas equidistantes fue posicionado en el centro de la viga, de forma que las cargas fueran simétricas respecto de sección media, fueron aplicadas a 1/4 y 3/4 de separación entre soportes, como se puede ver en la Figura 2.8. Finalmente, la carga fue aplicada por el pistón hidráulico, desplazándose 1mm cada 10 segundos en promedio, esto permitió que el tiempo de la prueba fuera de 3 min aproximadamente.

Antes de cada prueba, los apoyos y miembros de la estructura se nivelaron y centraron en las 3 direcciones. Para cada tipo de canal fue necesario mover las bases de los apoyos debido a que la longitud no soportada cambiaba entre tipos de vigas ya que el material era diferente.

Para medir el desplazamiento vertical de las vigas se colocaron dos medidores. Uno digital denominado transductor de desplazamiento LVDT, y un medidor de caratula analógico, el cual se registró por medio de videograbación. Se colocaron cámaras para que registre todas las mediciones analógicas. Ambos medidores se colocaron dejando una separación hasta las vigas de 15, 10 y 9 mm para los canales U, rectangular y correas G, respectivamente. Este espacio correspondía al recorrido vertical que realizaba la viga dentro del régimen elástico para que la medición solo registrara el comportamiento inelástico.

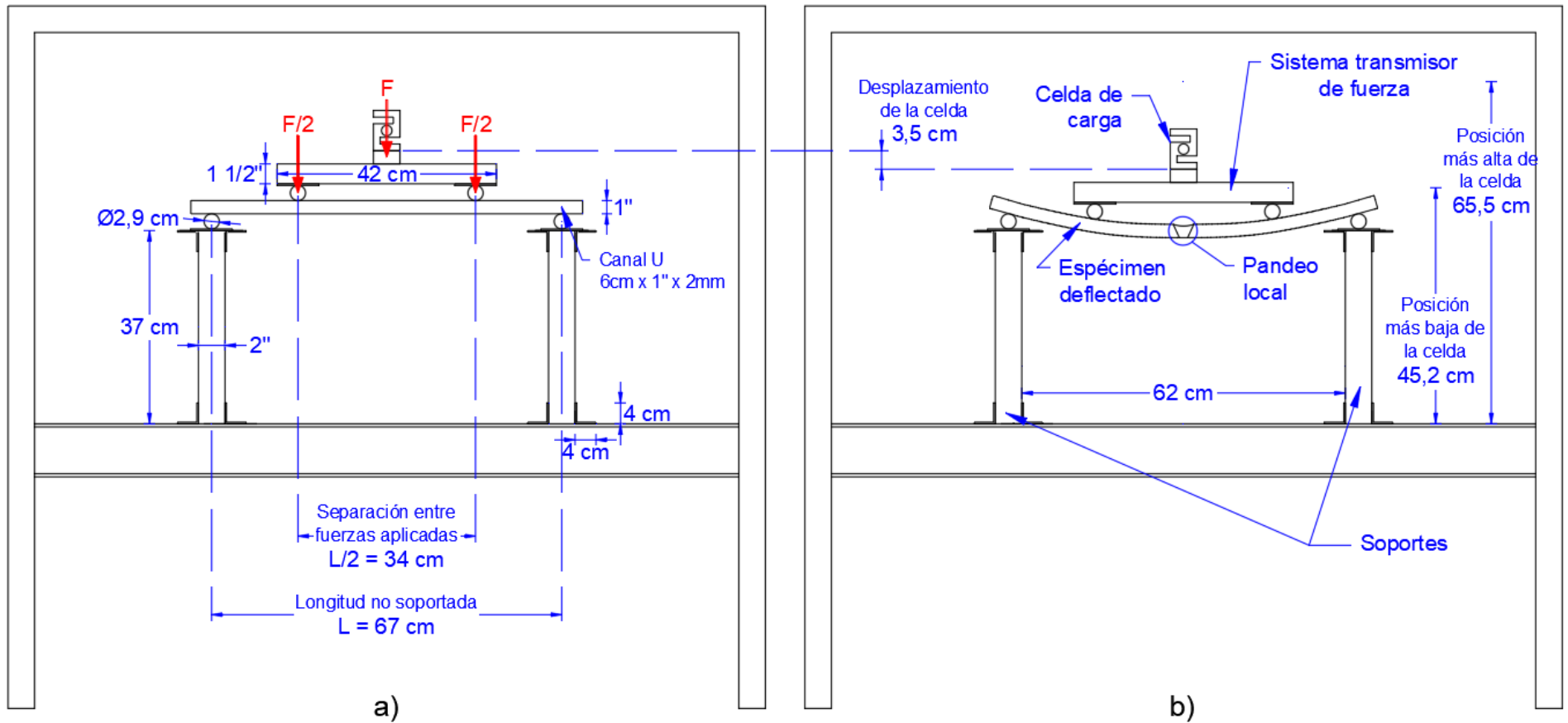


Figura 2.8. Esquema del ensayo de flexión en canales U.  
 a) antes de la prueba, b) despues de la prueba.

[FUENTE: Propia]

## **2.2 Compresión de Vigas**

Para estudiar el fenómeno de pandeo local en las vigas se realizaron ensayos de compresión. El fenómeno de pandeo se da en elementos en compresión, por lo que a más de estudiarse con esfuerzos compresivos en flexión se consideró compresión pura. Este experimento genera esfuerzos constantes en toda la sección de los especímenes. El ensayo se realizó de manera controlada bajo la norma (ASTM, 2009), hasta sobrepasar la fluencia y los resultados se compararon con el estudio del pandeo local en flexión.

### **2.2.1 Descripción de los equipos**

Las pruebas de compresión se realizaron con la máquina de ensayos universales de FICT. El equipo es de la marca SHIMADZU, modelo UH-F500kNX, con una capacidad nominal de 500 kN. Por motivos de seguridad solo se puede operar hasta el 75% de la capacidad (375 kN ó 30 Ton aprox). Las cargas estimadas para que llegue al límite elástico fueron; para el canal U 32.13 kN, para el tubo rectangular 41.50 kN, mientras que para la correa G de acero, 64.85 kN. El máximo valor aplicado nos otorgó un margen de seguridad de 5, por lo que después de alcanzar este punto se pudo avanzar hasta que se presentaron las fallas locales de pandeo en las almas.

La máquina universal cuenta con equipos mecánicos que permiten su funcionamiento. Consta con dos bloques, uno fijo en la parte superior y otro móvil en la parte inferior, como se observa en la Figura 2.9. En el bloque inferior se encuentra el pistón que es accionado por una bomba hidráulica situada en la unidad de control. Atrás del pistón se sitúa la celda de carga interna que detecta la presión del aceite. A través de un proceso electrónico se convierte esta presión a una señal en milivoltios, y mediante una curva de calibración se obtiene unidades de fuerza. En la misma parte inferior existe una polea, que dependiendo si el pistón sube o baja, mide el desplazamiento vertical de todo el bloque. Con esto se pudo registrar la carga aplicada y el desplazamiento del pistón a través del tiempo.

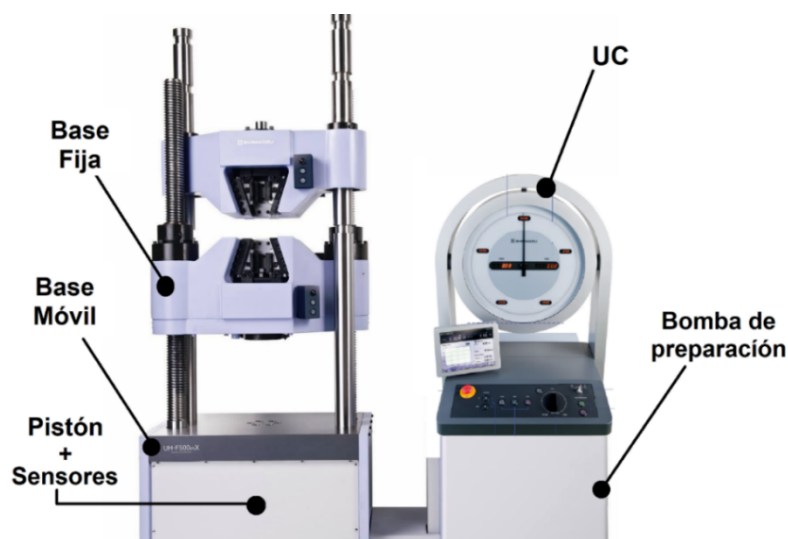


Figura 2.9. Máquina de ensayos universal

[FUENTE: Shimadzu]

### 2.2.2 Detalle de los especímenes.

Se determinó la longitud de cada espécimen en base a las características de la máquina. El espacio disponible desde el pistón a la base fija es de 55 cm, por lo que, reduciendo el espesor de las placas, se definió el largo de todas las vigas en 45cm. Además, para restringir la deformación en los extremos se realizaron adaptaciones a las vigas. En los extremos se unieron placas de 12cm x 8.5 cm para los canales U, y de 14cm x 8.5 cm para los tubos rectangulares y correas G, ambas de 6mm de espesor, unidas a la viga con soldadura en fría (Figura H.3).

Tabla 2.2. Características de los espécimen en compresión

[Fuente: Propia]

	<b>Especímen1</b>	<b>Especímen2</b>	<b>Especímen3</b>
	Canal U	Correa G	Rectangular
<b>Distancia de compresión, [mm]</b>	450	450	450
<b>Ancho, [mm]</b>	60	80	76.2
<b>Alto, [mm]</b>	25.4	40	25.4
<b>Espesor, [mm]</b>	2	1.5	1.45
<b>Material</b>	Aluminio	Acero	Aluminio
<b>Especificación</b>	6063-T5	ASTM A36	6063-T5
<b>Fluencia, [MPa]</b>	145	250	145
<b>Fuerza aprox. fluencia,[KN]</b>	32.13	64.86	41.50

Para la medición de las deformaciones se colocaron extensómetros en la sección media de los especímenes. Según trabajos anterior debido a posibles excentricidades en la aplicación de la carga, no se puede considerar simetría en la sección. La terminología de los extensómetros será similar a flexión, estos se colocarán alrededor de la sección media por lo que la terminología anterior Wu, (Upper Web), será llamada Wu” para referirse al otro lado del perfil, así mismo Fs”.

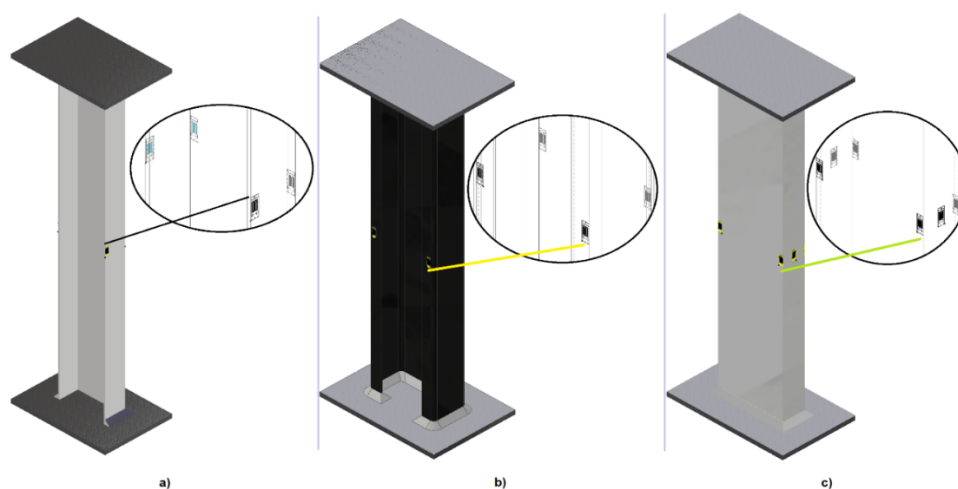


Figura 2.10. Ubicación de extensómetros en ensayos de compresión

a) Canal U, b) Correa G, c) Rectangular,

[FUENTE: Propia]

### 2.2.3 Descripción del ensayo de Compresión

La prueba de compresión se realizó de forma controlada. En la norma mencionada se encontró los aspectos importantes para desarrollar la prueba de compresión en metales. El más importante fue la velocidad de carga, la cual se reguló en 0.005  $\epsilon$ /min. Previo al experimento se ingresó estos datos de forma manual en la unidad de control de la máquina. El bloque fijo se elevó hasta la posición adecuada para que el espécimen encajara de tal manera que el bloque móvil inferior sea el que comprima.

Para que la carga sea aplicada en toda el área se usó un bloque de acero de mayor dimensión que es accesorio de la máquina. Finalmente se realizó la prueba hasta que las partes de las secciones alcancen el límite de fluencia del material, y se presentaran deformaciones locales. Luego de esto se sobrepasó la resistencia



última y la carga necesaria para comprimirla se redujo. La prueba culminó hasta que, en el descenso, la carga alcanzó menos de 20% de la máxima, recomendado en (Ye, Hajirasouliha, & Becque, 2018).

## 2.3 Equipos de adquisición de Datos.

En los ensayos de los especímenes sometidos a flexión y compresión se registraron valores de fuerza, micro deformaciones unitarias (m/m), además de desplazamiento lineal en la zona central de la viga y en un extremo o punto cercano a la aplicación de la fuerza en el caso particular de flexión.

### 2.3.1 Medición de Fuerza

En el ensayo de flexión la fuerza original medida por una celda de carga o sensor de pesaje tipo “S” de 2000 Kg de capacidad. La celda se conectó a una fuente de energía de 12 V e intensificó su señal usando un amplificador AE-301, las especificaciones se resumen en la Tabla 2.3 y Tabla 2.4. Finalmente, la conexión Fuente-Celda-Amplificador digitaliza los resultados a un scan rate de 1000 [hz] utilizando un programa en bloques previamente creado en el entorno de LabView 2017.

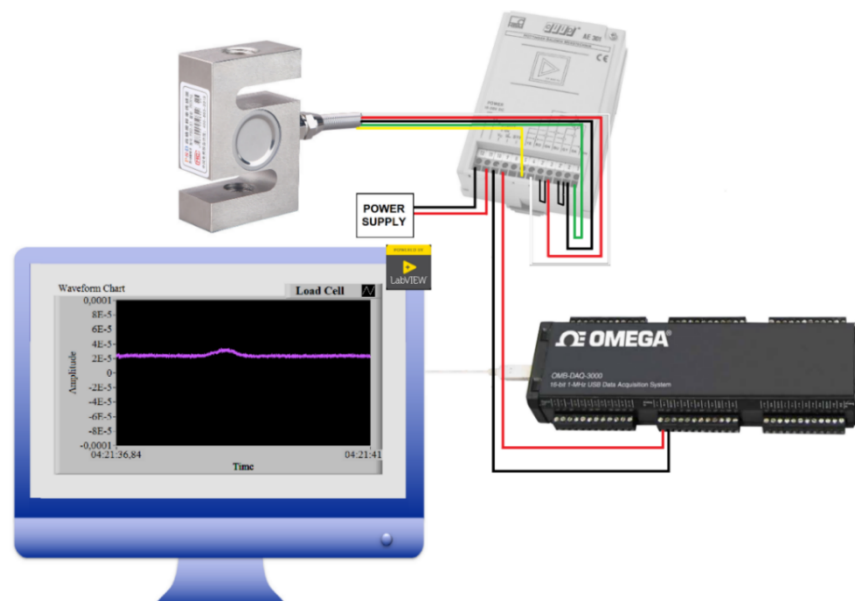


Figura 2.11. Esquema de adquisición de datos de la celda S

[FUENTE: Propia]

Los datos registrados por la celda no fueron directamente valores de fuerza. Los resultados se encontraban en unidades de voltios por lo que requirió un previo proceso de calibración, se agregaron 4 pesos conocidos en intervalos de 10 segundos cada uno y finalmente se retiraron. Los valores reportados en voltios en la adición de cada peso eran relacionados con el peso conocido generando una recta de conversión. (Ver APÉNDICE C)

Tabla 2.3. Especificaciones de la celda de carga

[FUENTE: (HTC Sensor)]

<b>Modelo</b>	PSD-S1
<b>Capacidad, [kg]</b>	2000
<b>Material</b>	Aleación de Acero
<b>Temperatura de operación, [°]</b>	-30 ~ 65
<b>Resistencia de entrada, [ohm]</b>	350 ±10
<b>Resistencia de entrada, [ohm]</b>	350 ±2
<b>Salida nominal, [mv/v]</b>	2.0 ±0.004
<b>Voltaje [v]</b>	10 ~ 12 (AC/DC)
<b>Peso, [Kg]</b>	0.6

Tabla 2.4. Especificaciones del amplificador de señal

[FUENTE: (HBM, 2016)]

<b>Modelo</b>	AE 301
<b>Temperatura de operación, [°]</b>	-20 ~ 60
<b>Clase de precisión</b>	0.1
<b>Voltaje de Excitación en el Puente, [V]</b>	2~5
<b>Max longitud del cable al sensor, [m]</b>	500
<b>Max voltaje permitido, [V]</b>	±10
<b>Resistencia interna, [ohm]</b>	2
<b>Peso, [Kg]</b>	0.2

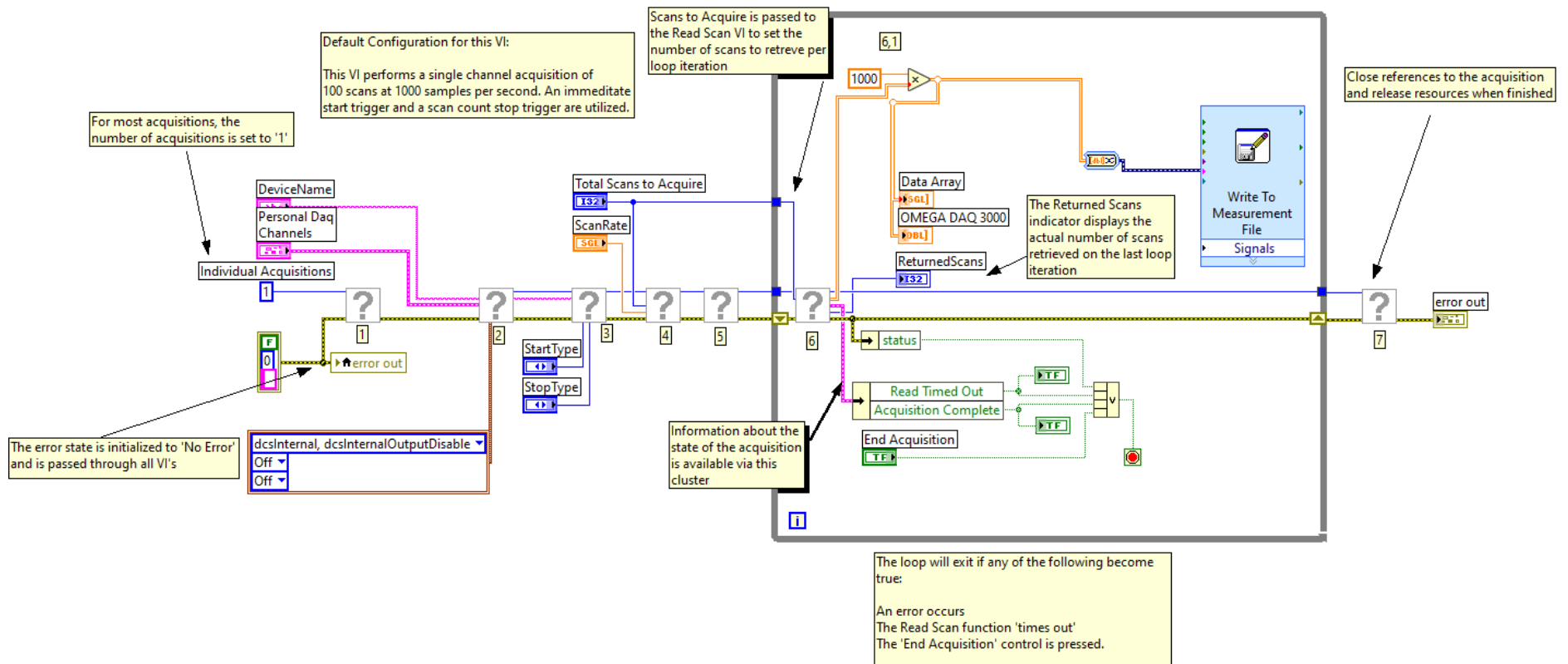


Figura 2.12. Diagrama de Bloques LabView-Omega Daq 3000

[FUENTE: Omega Daq 3000 User guide]

### 2.3.2 Desplazamiento y deformaciones.

En los ensayos de flexión y compresión se ubicaron extensómetros en secciones de las vigas para medir las deformaciones unitarias y con esta información conocer la distribución de esfuerzos luego de sobrepasar el límite elástico, los extensómetros se conectaron a la Tarjeta de 8 canales (NI-9235), esta a su vez se conectó al chasis (Cdaq-9174), usando una conexión USB para digitalizar la señal en el entorno de LabView(2017), usando un programa de bloques.

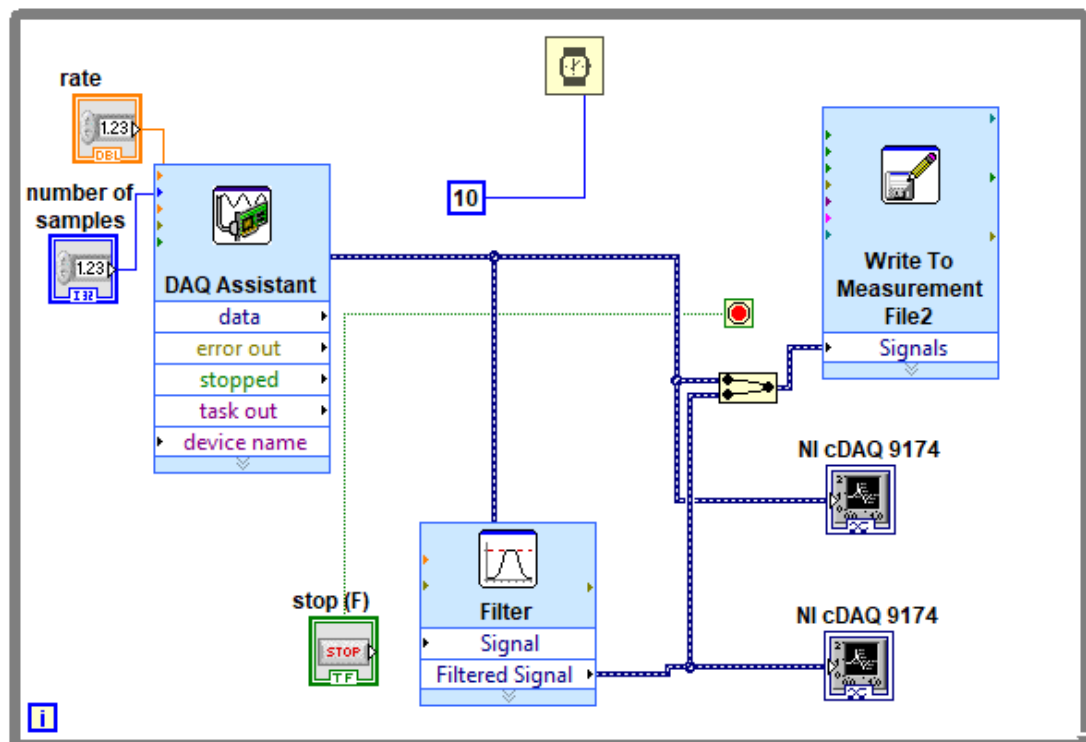


Figura 2.13. Diagrama de Bloques Labview-NI 9235

[FUENTE: Propia]

En el ensayo de flexión otro dato a registrar fue el desplazamiento vertical en sección media, se empleó el sensor LMC 15, colocado sobre un stand magnético ajustable en la base al nivel de los soportes.

Todos los resultados de la adquisición fueron seteados a un scan rate de 1000 [Hz]. El elevado valor del rate fue debido a la restricción de 794 [Hz] mínimo del equipo NI-9235, los demás sensores trabajaron a 1000 [Hz] de rate para tener uniformidad en los resultados. Debido al elevado número de 1000 muestras por segundo se filtró a 100 puntos por segundo usando programación Python (APÉNDICE D).

## **2.4 Procedimiento de la adaptación del Método de Paik**

Se realizaron adaptaciones para calcular los esfuerzos críticos siguiendo las expresiones de (Paik, y otros, 2013). Se complementaron con la fórmula de interacción para elementos individuales de (Bannerman, Jr., David B.; Jan, Hsien Y., 1980). Los coeficientes de pandeo para el cálculo de los esfuerzos críticos fueron tomados de (Bryan, 2009), asumiendo las pestañas de la correa G, como una plancha con un borde empotrado y otro libre. Mientras que para los costados se asumió una plancha simplemente soportada en los 4 bordes con carga variable.

En el proceso iterativo primero se asume “ $h_c$ ” que es la altura de la parte superior del alma que pandeo, en la que el esfuerzo crítico es uniforme. Luego se asume la relación entre el esfuerzo crítico y el esfuerzo de fluencia, con eso se determina el coeficiente de pandeo “ $k$ ”. Finalmente se calcula el esfuerzo crítico buscando que la relación sea la misma asumida anterior. Sino sucede se itera hasta conseguir la igualdad. Una vez obtenido los esfuerzos principales se realiza la distribución asumida por Paik y se integra para verificar que la fuerza neta axial sea nula. Si esta no es cero, se debe cambiar  $h_c$  y realizar el mismo proceso.

Con los valores de esfuerzos críticos obtenido se asume la misma distribución de esfuerzos de Paik y se integra para obtener el momento flector último, este debe ser menor a los experimentales ya que se considera que el centro de la sección aún tiene una distribución lineal lo cual genera más de resistencia, y la viga realmente podría soportar un poco más de carga.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos de los experimentos. Se analizó una de las 3 pruebas realizadas para cada viga. Las gráficas de fuerza-deformación permitieron determinar la carga máxima y con la que ocurren las fallas. Se compararon las distribuciones de esfuerzos experimentales con las distribuciones teóricas obtenidas de un programa de análisis de flexión plástica. Finalmente se obtuvieron también los momentos flectores integrando las distribuciones de esfuerzos, para compararlos con el método iterativo de (Paik, y otros, 2013).

### 3.1 Consistencia de resultados

Al menos 3 pruebas de cada espécimen mostraron resultados consistentes. A continuación, se gráfica fuerza-tiempo, para las pruebas de los tres perfiles. Donde las curvas de tonos azules, rojos y verdes representan los canales U, Rectangular y correa G respectivamente.

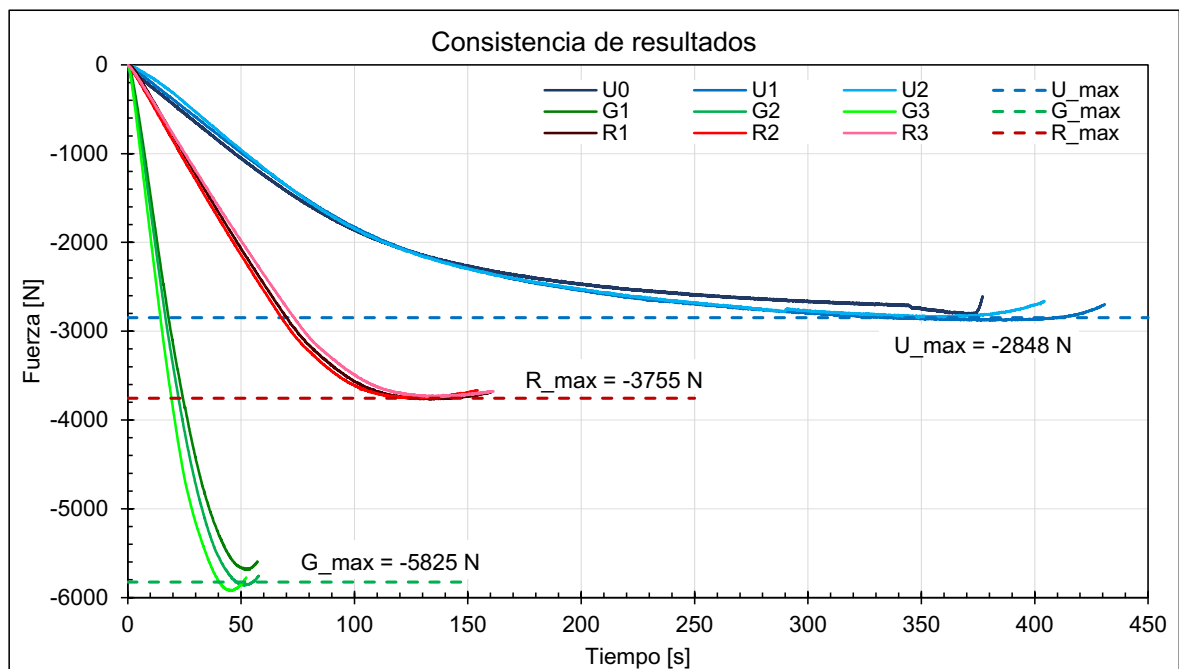


Figura 3.1. Fuerza aplicada vs tiempo en cada prueba

[FUENTE: Propia]

Todas las curvas muestran una tendencia similar entre sí. Las fuerzas máximas en las vigas U, R y G fueron cercanas, con promedios de 2848, 3755 y 5825 N respectivamente. Para facilitar el procesamiento de las mediciones de Fuerza, deformaciones y deflexiones, se creó un registro ver APÉNDICE F.

### 3.2 Resultados de los ensayos de flexión

Para el análisis se seleccionó los ensayos más significativos. Siendo las pruebas U1, G2 y R3. legales.

#### 3.2.1 Deformaciones Unitarias

A continuación, se grafican las Fuerzas aplicadas en función de las deformaciones para cada viga.

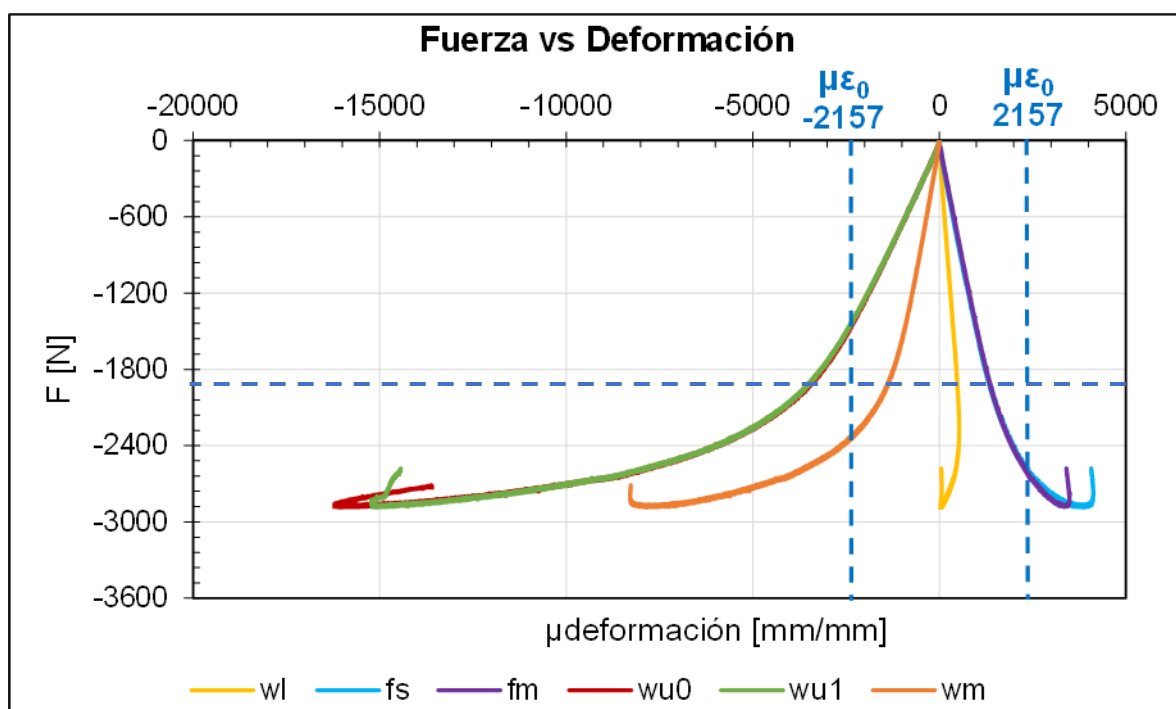


Figura 3.2. Fuerza vs Deformación, Prueba U1

[FUENTE: Propia]

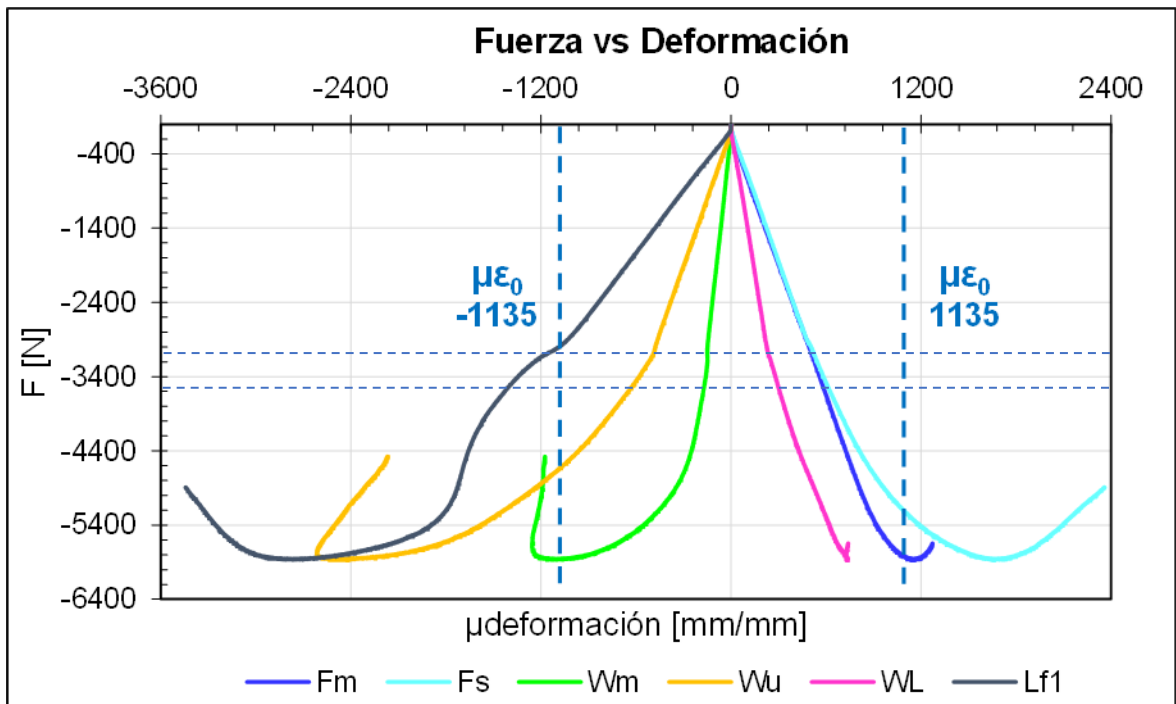


Figura 3.3. Fuerza vs Deformación, Prueba G2  
 [FUENTE: Propia]

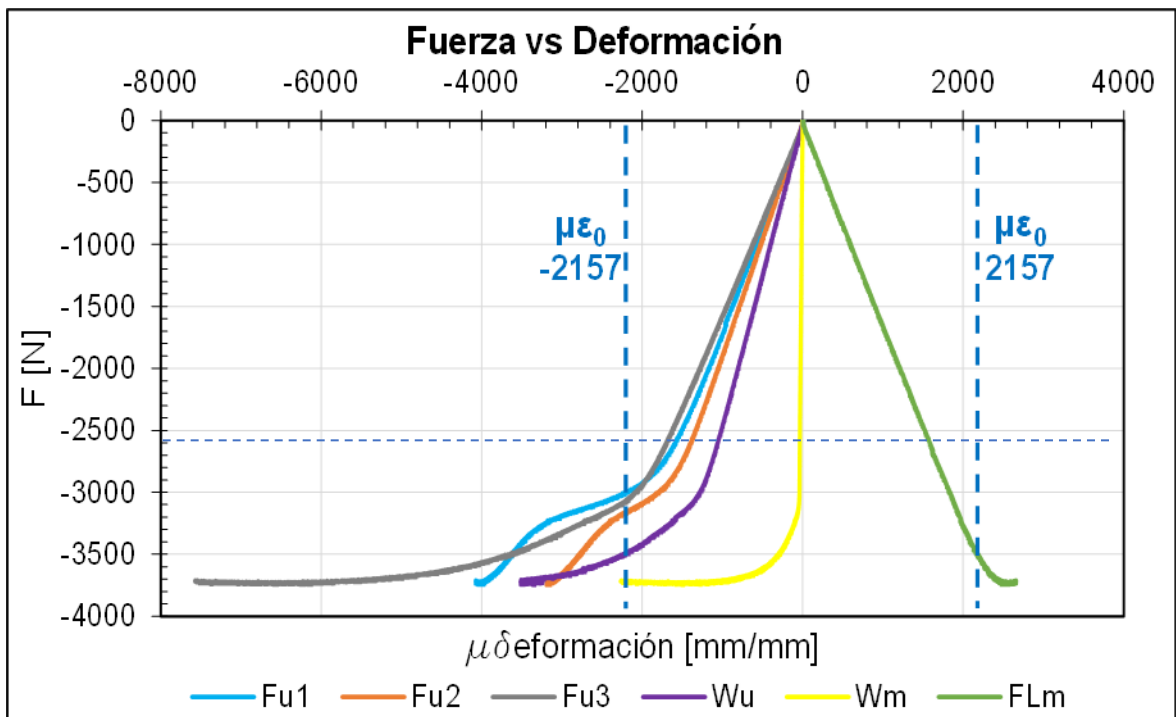


Figura 3.4. Fuerza vs Deformación, Prueba R3  
 [FUENTE: Propia]



Las gráficas anteriores permitieron determinar aproximadamente las fuerzas que producen los pandeos locales. En la Figura 3.2 para el canal U, las curvas  $wu_0$  y  $wu_1$  son idénticas, esto comprueba la ausencia de fuerzas cortantes. Se aprecia un cambio en la tendencia de la curva alrededor 2000 N, lo que presume sería el inicio del pandeo local. Las curvas  $fs$  y  $fm$  también son iguales e indican que los esfuerzos en el ala son uniformes. Por último, la curva  $wl$  regresa a 0, significa que esa no se deformó plásticamente.

La correa G sufre dos pandeos locales, el más importante en la pestaña y se puede observar su efecto en la Figura 3.3 Entre 3000 N y 5000 N se nota un cambio en la concavidad de la curva, esto debido a la deflexión de la pestaña hacia arriba. Luego cuando se aplicó 3100 N la curva  $Wu$  cambió súbitamente su tendencia, posiblemente fue porque comenzó a fallar el alma. Luego a partir de 3600 N las curvas  $Fs$  y  $Fm$  se diferenciaron y viendo el estado de la viga deformada en la Figura G.3, se presume que hubo torsión.

En la viga rectangular también suceden dos fallas locales. En la Figura 3.4, a 2600N, las curvas  $Fu1$ ,  $Fu2$ ,  $Fu3$  cambiaron de tendencia, se presume allí ocurrió el pandeo a la cubierta. Luego a 3000 N el costado comenzó a fallar esto debido al cambio en las curvas  $Wu$  y  $Wm$ . Luego rápidamente se alcanzó la carga máxima. Finalmente, el fondo llegó al límite elástico cuando se aplicó 3600 N.

Otra manera de ver cómo se comporta la viga es a través de la razón de cambio de la fuerza vs deformación ( $dF/d\varepsilon$ ). A continuación, se muestra la gráfica de la pendiente de las gráficas anteriores, para los elementos superiores y la parte alta del alma. Los picos en las curvas indican el cambio de curvatura de las gráficas de fuerza vs deformación. Todas las curvas comienzan con una recta horizontal ya que corresponde a la zonal elástica. Es decir, se mantiene la linealidad y la pendiente es constante. Luego cuando llegan a un valor de deformación comienzan a cambiar de tendencia, teniendo que cuando la pendiente se reduce la resistencia de ese elemento también.

Las curvas “Top alma” de las figuras anteriores muestran una tendencia similar, hasta que llegaron a  $1100 \mu\epsilon$  para las vigas U y Rectangular, y  $500 \mu\epsilon$ , para la correa G. En estas gráficas se presentan picos altos para las vigas con elementos superiores cambiando alrededor de la deformación en cedencia. En el caso de la correa G, se presenta a  $1664 \mu\epsilon$ , en este punto la pestaña ya pandeo, pero se produjo un endurecimiento de este elemento, ver Figura G.3, APÉNDICE G. Mientras que en la viga rectangular no fue pronunciado, pero ocurrió a  $3600 \mu\epsilon$ , casi en la carga máxima. Al final, las curvas de pendiente llegan a 0, lo cual tiene sentido ya que después de eso la fuerza que soporta se reduce.

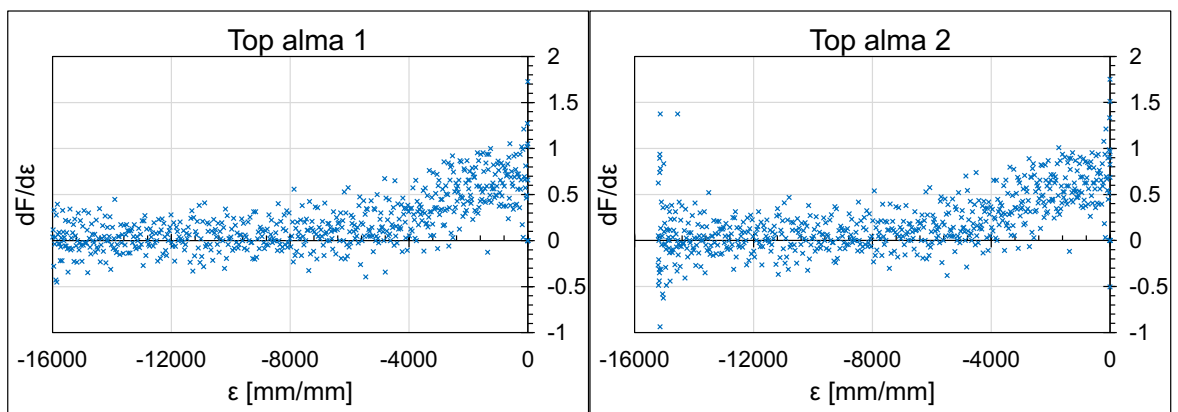


Figura 3.5. Pendiente  $dF/d\epsilon$ , Prueba U1

[FUENTE: Propia]

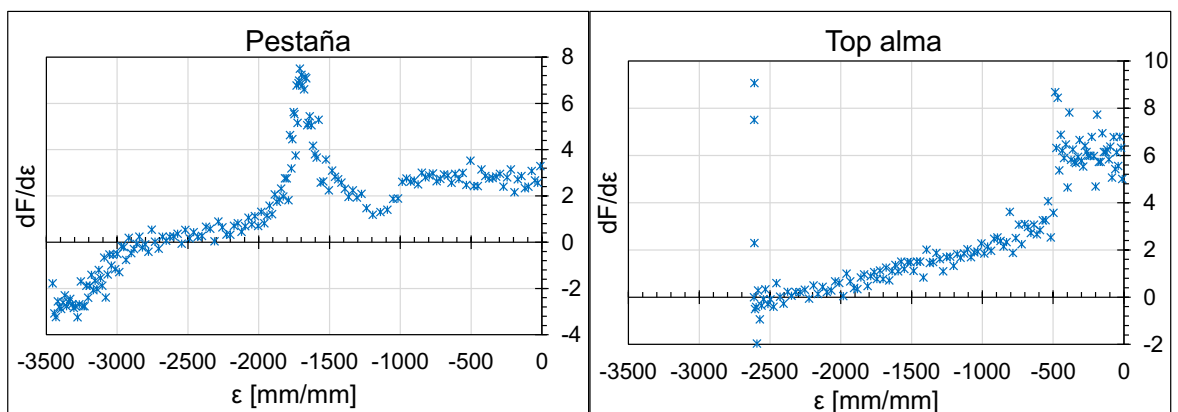


Figura 3.6. Pendiente  $dF/d\epsilon$ , Prueba G2

[FUENTE: Propia]

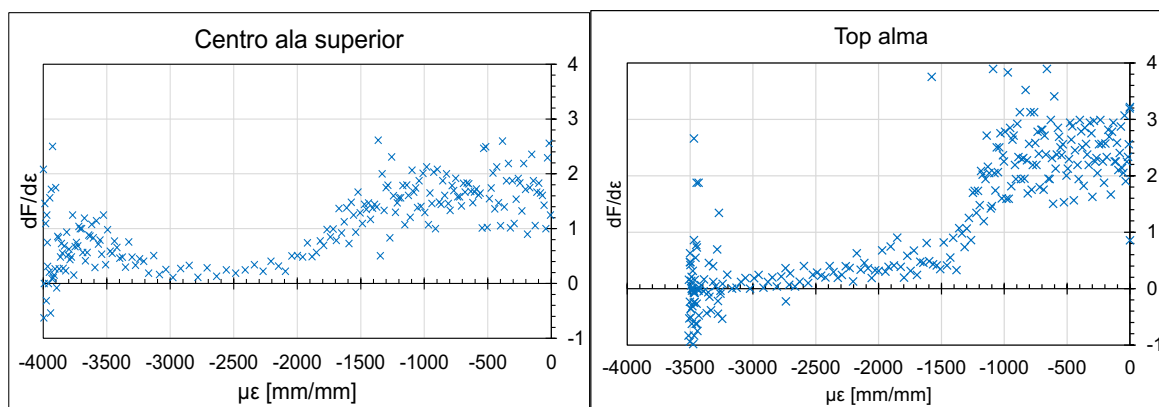


Figura 3.7. Pendiente  $dF/d\varepsilon$ , Prueba R3

[FUENTE: Propia]

### 3.2.2 Distribuciones de esfuerzo

Las distribuciones de esfuerzo nos ayudaron a medir el grado de las partes afectadas por las fallas locales. A continuación, se grafican las distribuciones de deformaciones y de esfuerzos en el alma de las vigas, En el título de cada gráfica, la primera letra indica el tipo de viga, seguido del valor de la fuerza y la unidad. Se comparan además con las distribuciones teóricas obtenidas mediante un programa de análisis de flexión plástica realizado por (Marín, 2021).

La primera fila muestra las distribuciones elástica de la sección de cada espécimen. Mientras la última fila son las distribuciones en la carga última. Figura 3.8 Todas las distribuciones de deformaciones muestran una tendencia lineal esto comprueba que se cumple la hipótesis cinemática.

Los pandeos locales en las almas de las vigas U, G y R comenzaron en 2080 N, 4744 N y 3686 N respectivamente. En las segundas gráficas de la derecha, se observa que la distribución en la parte superior del alma comienza a ser recta. Los puntos superiores alcanzaron valores de esfuerzos muy cercanos al límite elástico. Al aplicar la carga máxima los esfuerzos llegaron a 170, 260 y 146  $N/mm^2$  según el orden mencionado. Dichos valores son convergentes con 2 distribuciones anteriores, por ello se tomaron como esfuerzos críticos. La parte central tiene esfuerzos aún elásticos, y la parte inferior alcanza valores aproximados al esfuerzo de fluencia. Con esto se comprobó en los 3 casos, la Teoría de la Distribución de esfuerzos asumida por (Paik, y otros, 2013)

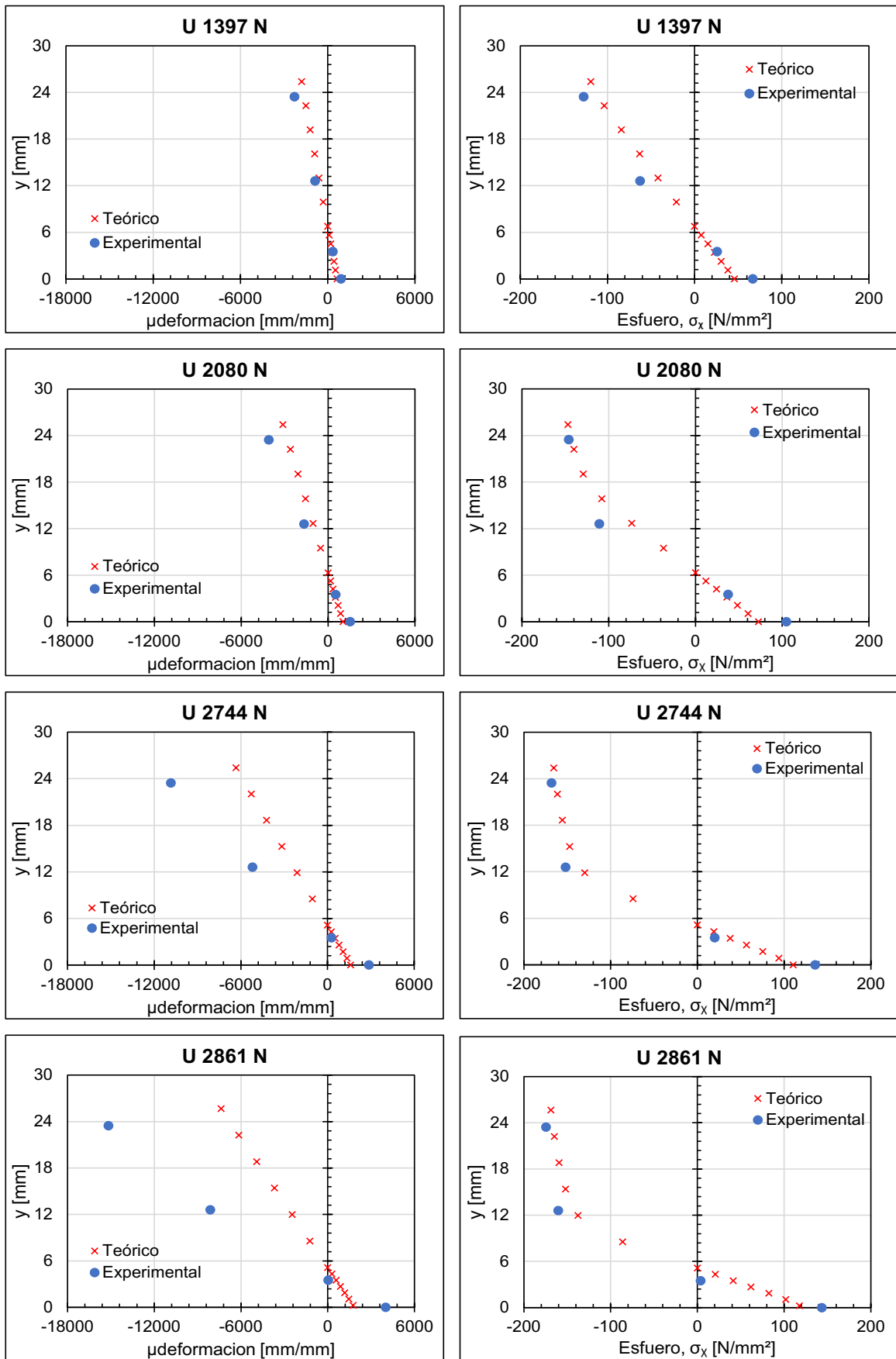


Figura 3.8. Distribuciones, deformaciones (izq.) y esfuerzos (der), “alma canal U”

[FUENTE: Propia & (Marín, 2021)]

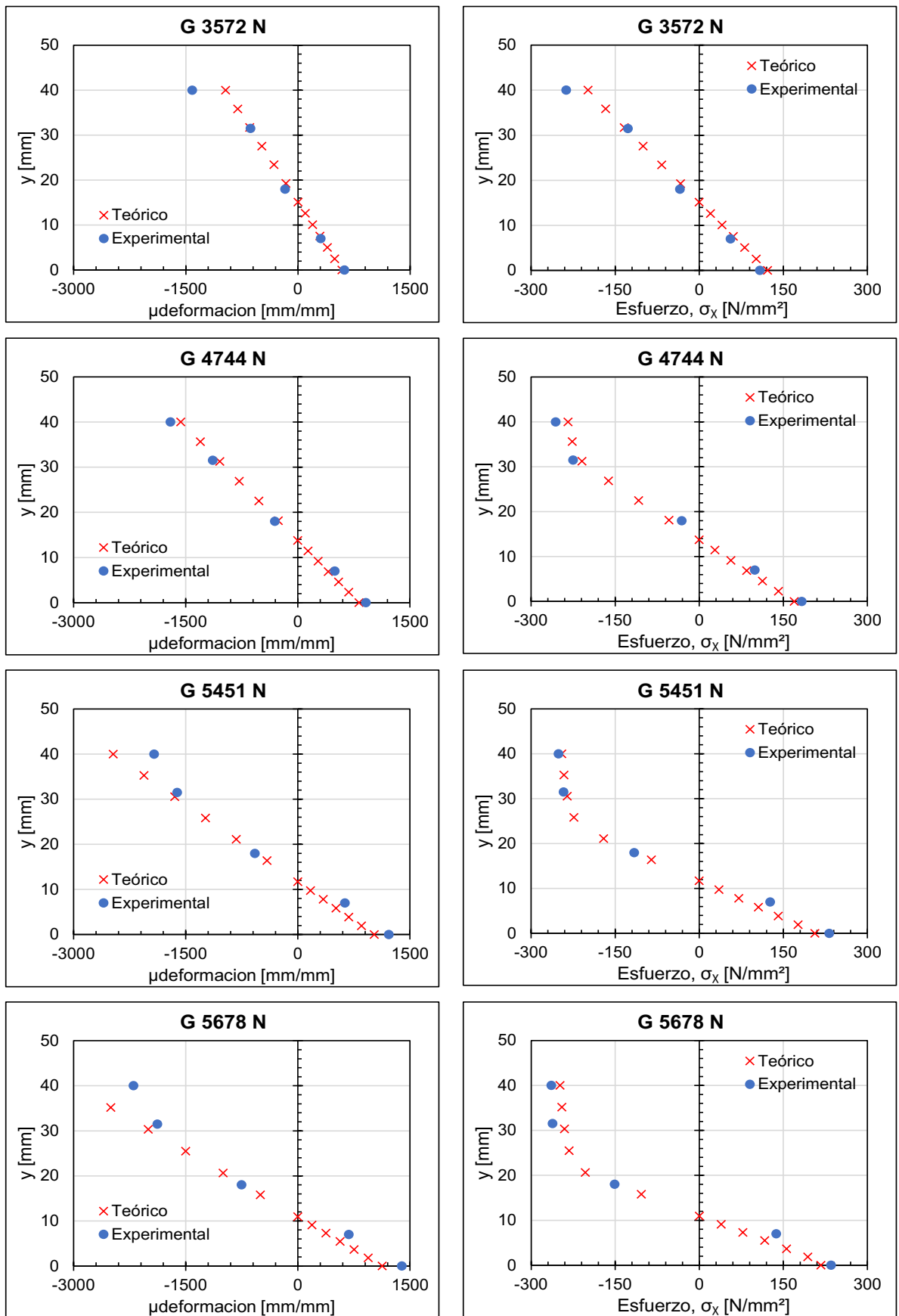


Figura 3.9. Distribuciones, deformaciones (izq) y esfuerzos (der), “alma correaG”

[FUENTE: Propia & (Marín, 2021)]

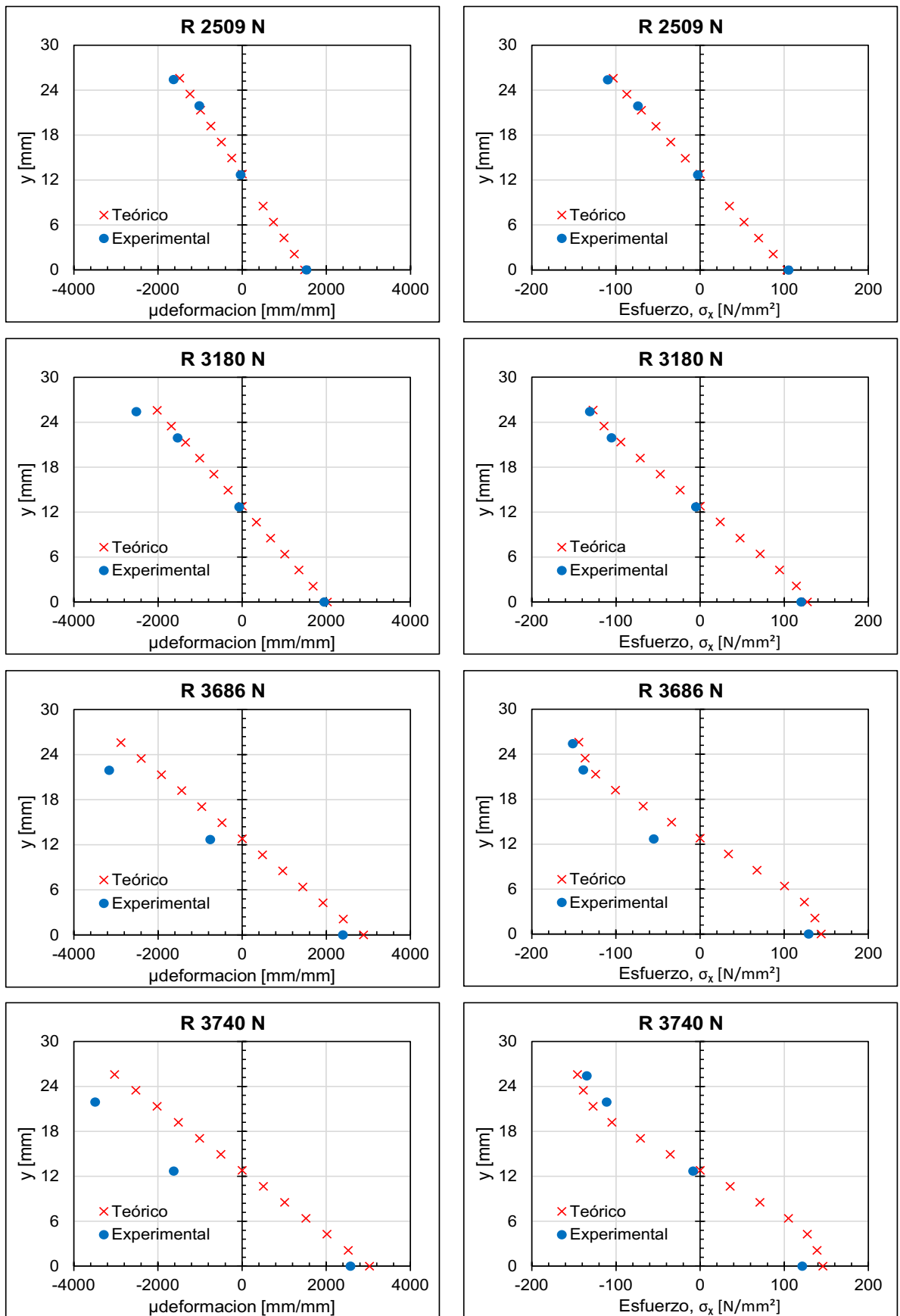


Figura 3.10. Distribuciones, deformaciones (izq) y esfuerzos (der), “alma Canal R”

[FUENTE: Propia & (Marín, 2021)]

Las distribuciones de deformaciones experimentales difieren de las teóricas. Las deformaciones unitarias medidas con los extensómetros son captadas en la zona exterior de la viga. El fenómeno de pandeo local incluye distribuciones de esfuerzo uniformes y variables. Lo que midieron las galgas fueron una combinación de estos dos efectos. Por ello las deformaciones negativas experimentales son mayores a las teóricas, y las deformaciones positivas son menores. Sin embargo, las distribuciones de esfuerzo coinciden casi a perfección con las teóricas. Esto debido a que, en la zona plástica, los esfuerzos no aumentan tanto en comparación con las deformaciones.

### 3.2.3 Momentos flectores y cargas últimas

Se integró numéricamente las distribuciones de esfuerzo y se obtuvieron los momentos al aplicar carga. A continuación, se muestra una tabla resumen de las fuerzas y momentos obtenidos para cada tipo de viga.

Tabla 3.1. Resumen de resultados experimentales de flexión

[FUENTE: Propia]

Viga	Estado	F exp [N]	F teo [N]	MF exp [Nmm]	MF teo [Nmm]	Error [%]	P [N]	NA [mm]
Canal U	Elástico	429.5	418.7	34541.3	35433.6	2.5%	0.09	6.45
	Pandeo	2080.4	1974.3	162875.6	171637.0	5.1%	7.70	5.60
	Último	2875.9	2614.3	215679.7	237262.3	9.1%	4.67	3.61
Correa G	Elástico	2854.0	2574.2	394712.8	437616.3	10.9%	-0.47	15.48
	Pandeo	4744.5	4368.5	669833.7	727487.4	8.6%	-1.06	14.76
	Último	5678.1	5213.4	799384.8	870649.0	8.9%	0.07	14.03
Tubo R	Elástico	1708.4	1845.9	203049.9	187919.5	7.5%	-0.39	12.63
	Pandeo	3686.4	3443.9	378832.5	405501.1	7.1%	-0.66	11.54
	Último	3740.8	3815.4	419689.0	411485.8	1.9%	-0.15	11.03

En la Figura 3.11, se verificó que los momentos flectores experimentales siguieran la relación lineal  $FL/8$  para el canal U y  $FL/6$  para las otras vigas. La longitud soportada del canal U fue de 660 mm, por ello la relación  $L/8$  fue 82.5, equivale a la pendiente de la recta inferior. Para la viga rectangular, L fue 660 mm también,  $L/6$  fue 110 siendo la pendiente de curva intermedia. Y para la correa G, L fue 920 mm, entonces  $L/6$  es 153.33, pendiente de la recta superior.

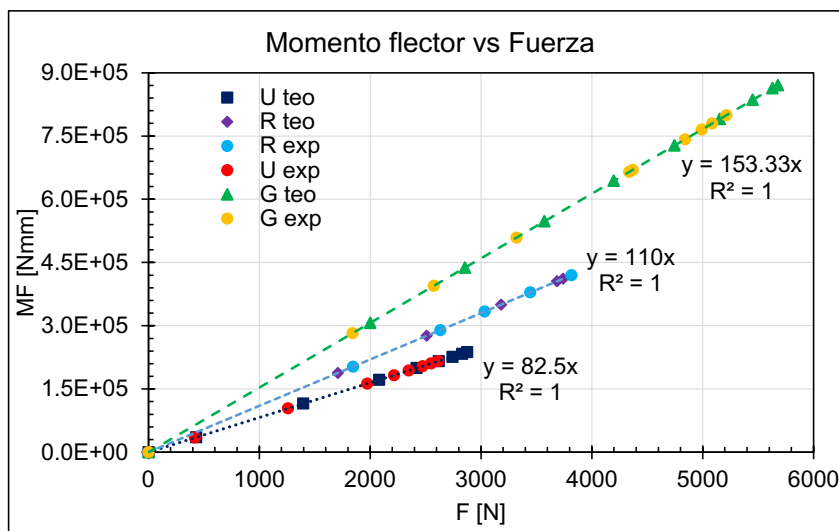


Figura 3.11. Distribuciones de deformaciones

[FUENTE: Propia]

En la Figura 3.12. se muestra el desplazamiento del eje neutro a medida que aumenta la fuerza. En la correa G es menos notorio que en el canal U. Por otro lado, pese a que la sección de la viga rectangular es simétrica respecto de ambos ejes, la resistencia en el ala superior disminuye cuando esta padea, por ello el eje neutro también se desplaza en este caso. Esto demuestra la redistribución de esfuerzos provocada por los pandeos locales.

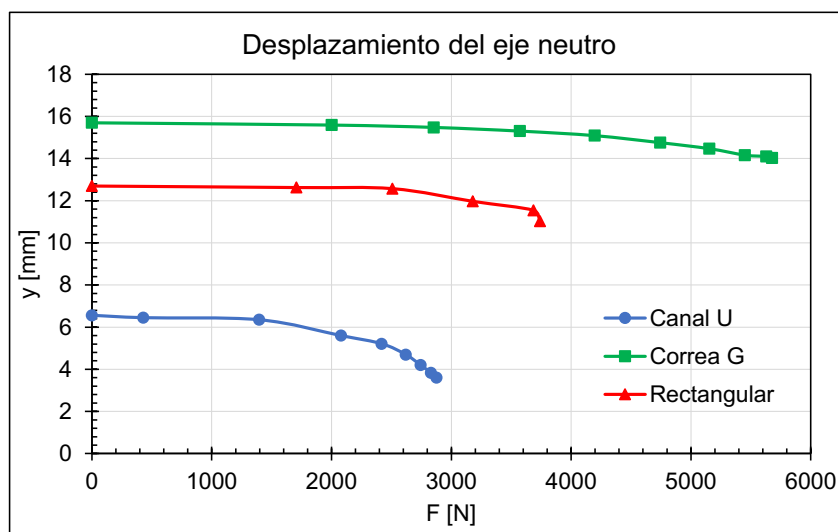


Figura 3.12. Distribuciones de deformaciones

[FUENTE: Propia]



### 3.3 Resultados de Compresión

Estos ensayos se realizaron para comprobar que la carga máxima en esta condición sea superior a la de los ensayos de flexión. A continuación, se muestran las gráficas de deformación-tiempo para visualizar el comportamiento de las vigas.

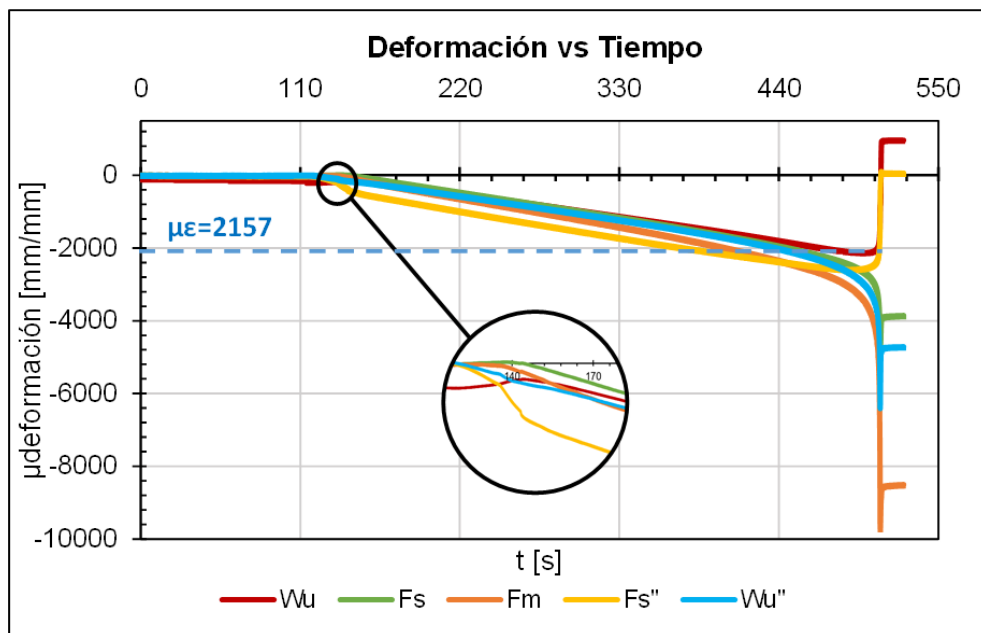


Figura 3.13. Deformación vs Tiempo Ucomp

[FUENTE: Propia]

La deformación en compresión del espécimen perfil U se asemeja al rectangular. El grupo de deformaciones se mantuvo hasta separarse en el límite elástico. Las curvas siguieron la relación  $F/A$  hasta que ocurrió el pandeo local, este ocurrió en el centro del ala en la U, en el perfil rectangular en el centro del alma y en el ala superior (APÉNDICE H).

La adición de las contribuciones de fuerza, producto del esfuerzo promedio y área permitieron verificar la fuerza entregada por la máquina. Las fuerzas máximas registradas de 36740 N y 39562 N fueron muy superiores a las alcanzadas en flexión de 2883 N y 3740 N de los canales U y R respectivamente.

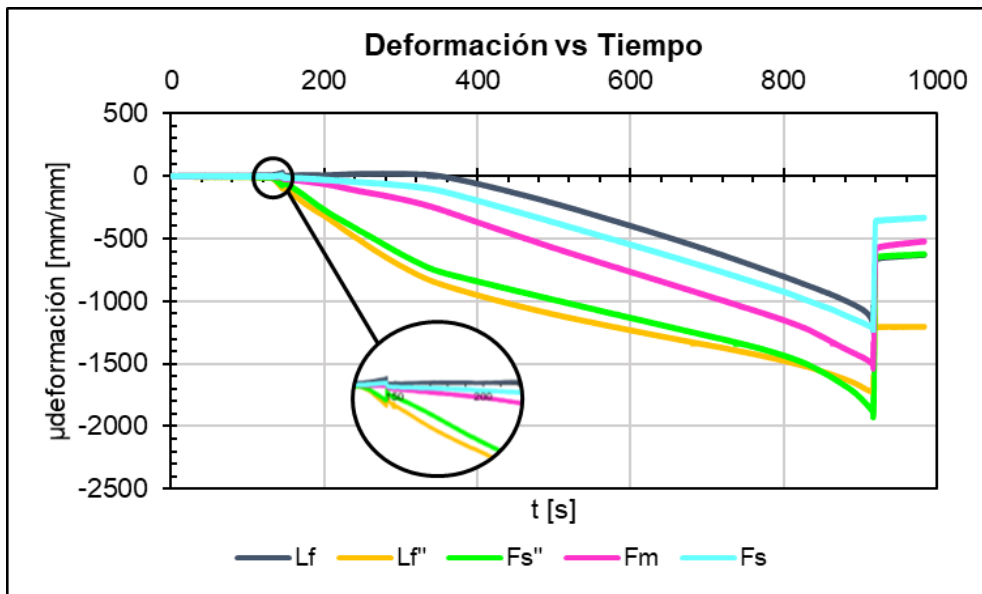


Figura 3.14. Deformación vs Tiempo, Gcomp

[FUENTE: Propia]

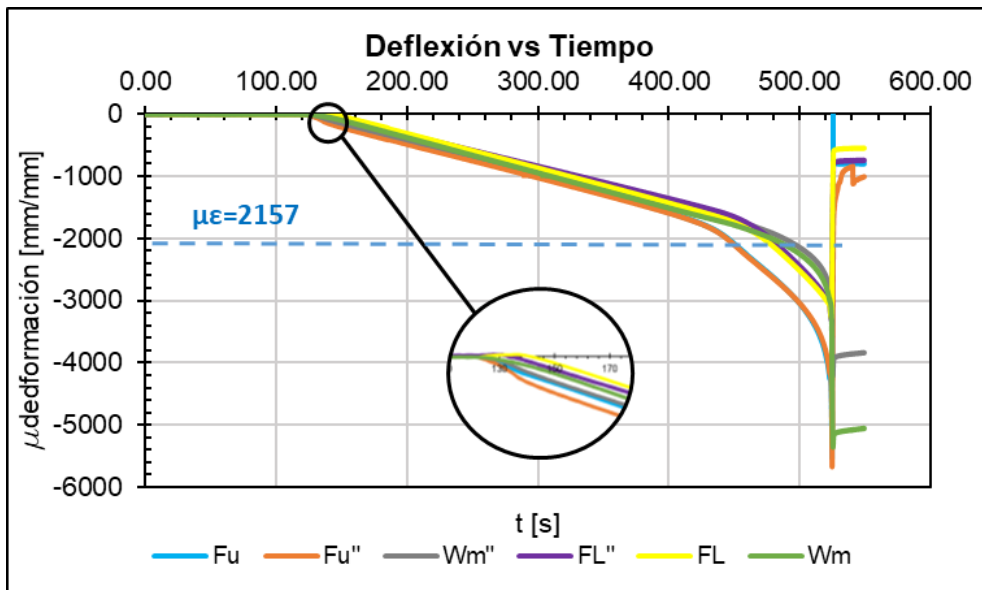


Figura 3.15. Deformación vs Tiempo Rcomp

[FUENTE: Propia]

El comportamiento de la correa G, muestra una separación del conjunto muy temprana (Figura 3.14). El apoyo no estuvo completamente perpendicular a la base, por ello, el esfuerzo desarrollado en la sección no fue uniforme. En contraste con la fuerza máxima de 5865 N en flexión, el ensayo de compresión mostró una carga superior de 76734 N.

### 3.4 Comparación con otras Formulaciones

#### 3.4.1 Momento plástico

El análisis plástico busca la carga necesaria que provoque el colapso de la estructura (Megson, 2019). El método propuesto indicó que la carga máxima en el régimen plástico es superior a la que causa la cedencia.

#### 3.4.2 Adaptación Método de Paik

Para verificar y aplicar los resultados obtenidos se realizó una adaptación al método de Paik propuesto en el CAPÍTULO 2. Este método permite obtener el momento flector último con el cual colapsa la sección de una embarcación. Es un proceso iterativo que busca una distribución de esfuerzos asumida, donde la parte superior alcanza el esfuerzo crítico de la cubierta, y el fondo llega al esfuerzo de fluencia. A continuación, se muestra los resultados obtenidos aplicando la adaptación del método de Paik para las formas estudiadas y de momento plástico.

Tabla 3.2. Comparación de momentos flectores con formulaciones  
[FUENTE: Propia]

	<b>Canal U</b>	<b>Correa G</b>	<b>Tubo R</b>
$\tilde{\sigma}_{cubierta}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0	221.96	104.23
hc [mm]	1.36	3.29	1.19
$\tilde{\sigma}_{costado}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	120.75	234.95	150.74
<b>Comparaciones</b>			
F ult adp [N]		4746.62	3439.59
F ult exp [N]	2875.90	5678.10	3740.80
MF ult adp [Nmm]		727815	378355
MF ult exp [Nmm]	215680	799385	419689
Diferencia [%]		9.0%	9.8%

Los momentos flectores últimos experimentales son menores que los momentos plásticos ya que debido a que el centro de los especímenes aún tiene resistencia. Por esto los elementos superiores e inferiores de las secciones pierden rápidamente resistencia luego de presentarse las fallas locales.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha analizado en forma experimental el colapso en flexión de vigas de secciones simples para entender dicho fenómeno en el caso de las estructuras de barcasas. También se aplicaron formulaciones de análisis plástico en flexión de vigas para estimar el momento flector último, este es el valor al producirse el colapso. Luego de la comparación entre los resultados experimentales y teóricos, se puede concluir:

### 4.1 Conclusiones

#### Descripción del colapso

- Se observó el comportamiento de vigas de diferentes secciones, U, G y rectangulares, hasta alcanzar primero el colapso debido al pandeo local que limita la resistencia de la sección. Las fallas empezaron cuando los elementos horizontales ó bien las fibras superiores tal como se esperaba alcanzaron los esfuerzos compresivos críticos para su colapso. En el caso de la correa G pandeó la pestaña y en la viga rectangular en el ala superior (ó cubierta para la estructura de una barcaza); en la viga U, la parte superior del costado se flectó como resultado del colapso local. Las gráficas de fuerza total vertical aplicada-deformación muestran cambios ostensibles en las curvas correspondientes a estos elementos, a 3000 N (G-acero) y 2600 N (Rectangular aluminio), respectivamente. Mientras que las deformaciones unitarias del alma cambiaron de tendencia a partir de 3200 N y 3000 N en el mismo orden anterior, esto es un poco después de que las alas superiores habían fallado. Luego la carga máxima ocurre cuando el esfuerzo de las alas inferiores sobrepasa el límite elástico. A partir de allí prácticamente la viga no tiene más resistencia y la fuerza necesaria para continuar la deflexión se reduce. Estas observaciones corresponden en forma simplificada al procedimiento del Profesor (Paik, y otros, 2013) para el cálculo del momento flector último del casco de buques.

### **Desplazamiento del eje neutro**

- Una vez que los esfuerzos normales sobrepasan el valor crítico para el pandeo local, se produce un cambio en su distribución en la sección, separándose de la variación lineal en función de la distancia al eje neutro. Sin embargo, dado que las cargas externas se aplican en dirección vertical únicamente, la fuerza interna axial debe ser nula. Esto se manifiesta con un cambio en la ubicación del eje neutro, que se desplaza hacia abajo del centroide de la sección conforme se incrementa el momento flector. Sin embargo, en los costados de las vigas, alrededor del eje neutro, se mantiene la distribución lineal del esfuerzo respecto de su posición vertical. En la correa G este efecto fue menos notorio que en el canal U y en la viga rectangular. Pese a que la sección rectangular es simétrica respecto de ambos ejes; la resistencia en el ala superior disminuye cuando pandea y el ala inferior contribuyó más en la resistencia dado que el esfuerzo puede incrementarse hasta la fluencia. Por ello en esta sección con simetría, el eje neutro también se desplazó. Debido a esto se concluye que los pandeos locales provocan una redistribución de esfuerzos en la sección, con una reubicación del eje neutro.

### **Influencia de los elementos superiores**

- Durante las pruebas con momentos flectores positivos, los elementos ubicados en la región superior de la sección soportan los más altos esfuerzos compresivos y por tanto alcanzan primero su colapso y como resultado sufren elevadas deformaciones. Estas distorsiones que sufren los elementos superiores inducen desalineamientos de los costados de la sección que tienden a flectarse localmente. Esto es lo que se observó en las secciones G en las que se observó una deflexión lateral de los costados. En el caso del canal U las máximas deformaciones unitarias en la parte más alta del alma causaron una flexión local muy notorias, mientras que para el perfil rectangular la ondulación que se presentó en el ala superior indujo flexión en los costados. Con ello se puede concluir que los elementos superiores inciden en la forma en que fallan los costados.

### **Comparación con el método de Paik**

- La distribución de esfuerzos con la carga máxima se comparó con la obtenida aplicando el método desarrollado por el profesor Paik para el cálculo de la resistencia última del casco de buques. Dicho proceso iterativo fue adaptado y aplicado para las secciones G y rectangular analizadas en este trabajo. Experimentalmente se encontró que los niveles de esfuerzo en las zonas superiores e inferiores fueron cercanos al de fluencia. Los esfuerzos críticos para los elementos superiores, la ceja en la G y la cubierta en la rectangular, son muy elevados de manera que el esfuerzo crítico efectivo está muy cerca del esfuerzo de fluencia. A partir de las mediciones de deformaciones unitarias se estimaron distribuciones de esfuerzo basándose en el modelo Ramberg-Osgood. La integración del primer momento de estas distribuciones permitió obtener los momentos flectores últimos teniendo diferencias del 9.8% para el canal rectangular, y del 9.0% en promedio para la sección G. Las comparaciones mostraron que la adaptación realizada del método de Paik-Mansour coincide bastante bien con los resultados experimentales y resultará muy útil como una aplicación simple en especial para secciones con múltiples elementos superiores.

### **Carga última en compresión**

- Se realizó finalmente una comparación entre los resultados de los ensayos de flexión y compresión como columnas con las tres secciones probadas. Por su razón de esbeltez las columnas probadas son consideradas como cortas. Debido a la forma uniforme en que se aplica el esfuerzo compresivo sobre toda la sección, las deformaciones no mostraron mayores perturbaciones, hasta que ocurría el pandeo local y luego de eso la deformación se incrementaba rápidamente. Se encontró que la carga última en el caso de compresión es entre 10 y 13 veces superior a la requerida en flexión. Todo esto confirma que el colapso de la sección ocurría debido a la flexión ocasionada con fibras excediendo el límite de fluencia, pandeo inelástico de las columnas.

## 4.2 Recomendaciones

- Desarrollar una aplicación computacional aplicando el método iterativo de Paik y otros investigadores para el caso específico de barcas. De esta manera se obtendría de manera rápida y confiable valores referenciales de momento flector y carga máxima, considerando el desgaste por la corrosión. Esto ayudaría para comprobar que, para dicho tipo de embarcaciones, con el estado actual de sus estructuras estén suficientemente alejadas del colapso.
- Realizar un análisis del colapso de las vigas utilizadas en este trabajo aplicando el método de elementos finitos para verificar el orden de magnitud de deformaciones y carga máxima. Dicho proceso debe incluir no linealidades geométricas y de material cuyos parámetros se podrán ajustar empleando los resultados experimentales provistos en este trabajo

# BIBLIOGRAFÍA

- Argonautics. (2006). *Argonautics*. Retrieved from Slvage Broken Hopper Barge: [http://www.argonautics.com/Salvage\\_Hopper\\_Barge.html](http://www.argonautics.com/Salvage_Hopper_Barge.html)
- ASTM. (2009). ASTM E9, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. In A. S. MATERIALS, *ASTM Committee E28* (p. 9). Filadelfia: ASTM International.
- ASTM. (2010). ASTM D6272-10, Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending. In A. S. MATERIALS, *Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01* (p. 10). Filadelfia: ASTM International.
- Bahamonde, L. E. (2015). *Diseño preliminar de una barcaza portacontenedores para la hidrovía Manta-Manaos*. Guayaquil: Dspace\_ESPOL.
- Bannerman, Jr., David B.; Jan, Hsien Y. (1980). Analysis and Design of Principal Hull Structure. In SNAME, & R. Taggart (Ed.), *Ship Design and Construction* (pp. 255-256). New York.
- Bryan, G. H. (2009). On the Stability of a Plane Plate Under Thrusts in Its Own Plane, with Applications. *Plate stability - SSRC Guide 2009 Chapter 4, 5-7*. (B. Schafer, Ed.) Johns Hopkins, Cold-Formed Steel Structures. Retrieved from Dr.S.'s Cold-Formed Steel Library Page: <https://www.ce.jhu.edu/cfs/cfslibrary/SSRC%20Guide%202009%20Ch%204%20plates%20Schafer%20version.pdf>
- Cameron, J., Nadeau, J., & LoSciuto, J. (1997). *Ultimate Strength Analysis of Inland Tank Barges*. USCG Marine Safety Center.
- EN 1993-1-5. (2006). *Eurocode 3: design of steel structures - part 1-5: plated structural elements*. Bruselas: European Committee for Standardization.
- Faulkner, D. (1975). A review of Effective Plating for Use in the Analysis of Stiffened Plating in Bending and Compression. In *Journal of Ship Research, Vol. 19* (pp. 1-17).



- Gardner, L., Fieber, A., & Lorenzo, M. (2019). *Formulae for Calculating Elastic Local Buckling Stresses of Full Structural*. Londres: Department of Civil and Environmental Engineering.
- Gordo, J. M., & Soares, C. G. (2008). Compressive Tests on Short Continuous Panels. In *Marine Structures, Vol. 21* (pp. 113 - 137).
- Guedes Soares, C., & Sørense, T. H. (1983). Behaviour of Stiffened Plates under Predominantly Compressive Loads. In *International Shipbuilding Progress, Vol. 30* (pp. 13-27).
- HBM. (2016). *Clip Electronic Amplifier for installation onto mounting rails*. Retrieved from Operating manual: <https://docplayer.net/20877079-Operating-manual-clip-electronic-amplifier-for-installation-onto-mounting-rails-clip-ig-industrial-amplifier-in-cast-housing-a0114-6.html>
- HTC Sensor. (n.d.). Retrieved from S TYPE LOAD CELL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/parts/1/2/2/3/8/TAS501.pdf>
- Hughes, O. F., & Paik, J. K. (2010). *Ship Structural analysis and design*. New Jersey: SNAME.
- Kamaya, M. (2016). Ramberg–Osgood type stress–strain curve estimation using yield and ultimate strengths for failure assessments. In *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, (pp. 1-12).
- Kang, H., & Kim, J. (2014). Progressive Collapse of Steel Moment Frames Subjected to Vehicle Impact. *Journal of Performance of Constructed Facilities (United States)*, 29(6) (04014172), 1-2. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000665
- Katsura, S., Masaoka, K., Okada, H., & Tsubogo, T. (2003). *A study on structural design of huge barge structures based on collapsing behavior and reliability analysis*. Cancun.
- Marín, J. R. (2021). *Notas de Clase, Mecánica de Sólidos Avanzadas*. Guayaquil: ESPOL.
- McCornack, F. (2020, Febrero 7). *The Waterways Journal Weekly*. Retrieved from Barge Splits In Half, Sinks In GIWW: <https://www.waterwaysjournal.net/2020/02/07/barge-splits-in-half-sinks-in-giww/>
- Megson, T. H. (2019). Plastic Analysis of Beams and Frames. In *Structural and Stress Analysis* (pp. 653-687). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102586-4.00018-4>

- Meinken, A., & Schluter, H. J. (2002). *Collapse behavior of a push-barge*. Marine Structures.
- Paik, J. K., & Mansour, A. (1995). *A simple formulation for predicting the ultimate strength of ships*. Journal of Marine Science and Technology.
- Paik, J. K., & Thayamballi, A. K. (2003). *Ultimate limit state design of steel-plated structures*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Paik, J. K., Kim, D. K., Park, D. H., Kim, H. B., Mansour, A. E., & Caldwell, J. B. (2013). Modified Paik–Mansour formula for ultimate strength calculations of ship hulls. In *Ships and Offshore Structures* (Vol. 8, pp. 1-17). doi:10.1080/17445302.2012.676247
- Paik, J., Hughes, O., & Mansour, A. (2001). Advanced Closed-Form Ultimate Strength. *Journal of Ship Research*, 45.
- Paraguay Fluvial. (2020, Junio 18). *Paraguay Fluvial & Logística*. Retrieved from Barcaza sufre arrufamiento en plena operación de carga en San Antonio: <https://paraguayfluvial.com/barcaza-sufre-arrufamiento-en-plena-operacion-de-carga-en-san-antonio/>
- Rojas, D. (2018, julio 13). *El País*. Retrieved from Se partió barcaza en Nueva Palmira: <https://www.elpais.com.uy/informacion/politica/partio-barcaza-nueva-palmira.html#>
- SimarLab. (2017). Guide Connection Labview 2017 with Daq 3000. Guayaquil, Guayas, Ecuador: ESPOL.
- Smith, C. S. (1975). Compressive Strength of Welded Ship Grillages. In *Transactions RINA* (pp. 73-79).
- Su, M. N., Young, B., & Gardner, L. (2014). Testing and design of aluminum alloy cross. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 140(9) (04014047). doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000972
- Su, M. N., Young, B., & Gardner, L. (2016). Flexural response of aluminium alloy SHS and RHS with internal stiffeners. *Engineering Structures*, 121.
- Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia. (2016). *Barcazas, Boletín Tecnológico Centro de Información Tecnológica y Apoyo a la Gestión de la Propiedad Industrial (CIGEPI)*. Colombia.

- Van Tuyen, V. U., & Ping, Y. (2018). *Tool for Predicting the Ultimate Bending Moment of Ship and Ship-Shaped Hull Girders*. J. Shanghai Jiao Tong Univ. doi:doi.org/10.1007/s12204-018-1973-2
- Wolverine. (2001, Noviembre 21). *Prince Manufatering Corporation*. Retrieved from <http://www.princehyd.com/mobileservices/princeWebServices.aspx/FetchLiterature?fileKey=wolv-TieRodCylinders>
- Ye, J., Hajirasouliha, I., & Becque, J. (2018). Experimental investigation of local-flexural interactive buckling of cold-formed steel channel columns. In *Thin-Walled Structures Volume 125* (pp. 245-258). Elsevier BV.
- Zhu, J.-H., Young, B., & M.ASCE. (2009). *Design of Aluminum Alloy Flexural Members Using Direct Strength Method*. Journal of Structural Engineering, ASCE.
- УПЛС|UPLS. (2021, Abril 8). *The Association of Professional Boatman of Serbia*. Retrieved from Sunken Barge near Smederevo: <https://udruzenjeladjara.com/en/blog/2021/04/08/potonula-barza-u-blizini-smedereva/>

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## CÁLCULOS INICIALES

Tabla A.1. Perfil U (Aluminio)

Element	Base b [cm]	Height h [cm]	Centroid d [cm]	Area A [cm <sup>2</sup> ]	A*d [cm <sup>3</sup> ]	A*d <sup>2</sup> [cm <sup>4</sup> ]	Io [cm <sup>4</sup> ]
1	0.200	2.540	1.270	0.5080	0.6452	0.8194	0.2731
2	0.200	2.540	1.270	0.5080	0.6452	0.8194	0.2731
3	6.000	0.200	0.100	1.2000	0.1200	0.0120	0.0040
$\Sigma$				2.216	1.410	1.651	0.550
Neutral Axis [cm]			0.64	I base line [cm <sup>4</sup> ]	2.201	I <sub>Cent</sub> [cm <sup>4</sup> ]	1.303
						I <sub>Cent</sub> [mm <sup>4</sup> ]	13033.78

Longitud entre soportes [mm]	660	y [mm]	$\sigma_y$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	F [N]	MF (L/2) [Nm]
Fondo		-6.36	150	2792.68	307.19
Cubierta		19.04	-150	1244.91	136.94

Tabla A.2. Correa G (Acero)

Element	Base b [cm]	Height h [cm]	Centroid d [cm]	Area A [cm <sup>2</sup> ]	A*d [cm <sup>3</sup> ]	A*d <sup>2</sup> [cm <sup>4</sup> ]	Io [cm <sup>4</sup> ]
1	8.000	0.150	0.075	1.2000	0.0900	0.0068	0.0023
2	0.150	3.700	2.000	0.5550	1.1100	2.2200	0.6332
3	0.150	3.700	2.000	0.5550	1.1100	2.2200	0.6332
4	1.500	0.150	3.925	0.2250	0.8831	3.4663	0.0004
5	1.500	0.150	3.925	0.2250	0.8831	3.4663	0.0004
$\Sigma$				2.760	4.076	11.379	1.269
Neutral Axis [cm]			1.48	I base line [cm <sup>4</sup> ]	12.649	I <sub>Cent</sub> [cm <sup>4</sup> ]	6.628
						I <sub>Cent</sub> [mm <sup>4</sup> ]	66284.78

<b>Longitud entre soportes</b> [mm]	920	<b>y</b> [mm]	<b><math>\sigma_y</math>,</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>F</b> [N]	<b>MF (L/2)</b> [Nm]
<b>Fondo</b>		-15.50	235	6554.10	1004.96
<b>Cubierta</b>		55.50	-235	1830.43	280.66

Tabla A.3. Tubo Rectangular (Aluminio)

<b>Element</b>	<b>Base</b> b [cm]	<b>Height</b> h [cm]	<b>Centroid d</b> [cm]	<b>Area</b> A [cm <sup>2</sup> ]	A*d [cm <sup>3</sup> ]	A*d <sup>2</sup> [cm <sup>4</sup> ]	lo [cm <sup>4</sup> ]
1	0.145	2.540	1.270	0.3683	0.4677	0.5940	0.1980
2	0.145	2.540	1.270	0.3683	0.4677	0.5940	0.1980
3	7.330	0.145	2.468	1.0629	2.6226	6.4712	0.0019
4	7.330	0.145	0.073	1.0629	0.0771	0.0056	0.0019
$\Sigma$				2.862	3.635	7.665	0.400
<b>Neutral Axis</b> [cm]			1.27	<b>I base line</b> [cm <sup>4</sup> ]	8.065	<b>I<sub>Cent</sub></b> [cm <sup>4</sup> ]	3.448
						<b>I<sub>Cent</sub></b> [mm <sup>4</sup> ]	34480.12

<b>Longitud entre soportes</b> [mm]	660	<b>y</b> [mm]	<b><math>\sigma_y</math>,</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>F</b> [N]	<b>MF (L/2)</b> [Nm]
<b>Fondo</b>		-12.70	150	3702.23	407.24
<b>Cubierta</b>		12.70	-150	3702.23	407.24

# APÉNDICE B

## NORMAS ENSAYO DE FLEXIÓN



Designation: D6272 – 10

### Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D6272; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

#### 1. Scope\*

1.1 This test method covers the determination of flexural properties of unreinforced and reinforced plastics, including high-modulus composites and electrical insulating materials in the form of rectangular bars molded directly or cut from sheets, plates, or molded shapes. These test methods are generally applicable to rigid and semirigid materials. However, flexural strength cannot be determined for those materials that do not break or that do not fail in the outer fibers. This test method utilizes a four point loading system applied to a simply supported beam.

1.2 This test method may be used with two procedures:

1.2.1 *Procedure A*, designed principally for materials that break at comparatively small deflections.

1.2.2 *Procedure B*, designed particularly for those materials that undergo large deflections during testing.

1.2.3 Procedure A shall be used for measurement of flexural properties, particularly flexural modulus, unless the material specification states otherwise. Procedure B may be used for measurement of flexural strength.

1.3 Comparative tests may be run according to either procedure, provided that the procedure is found satisfactory for the material being tested.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values provided in parentheses are for information only.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 1—This test method is equivalent to ISO 14125 (Method B).

#### 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:<sup>2</sup>

[D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing](#)

[D638 Test Method for Tensile Properties of Plastics](#)

[D790 Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials](#)

[D883 Terminology Relating to Plastics](#)

[D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials](#)

[D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens](#)

[E4 Practices for Force Verification of Testing Machines](#)

[E83 Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems](#)

[E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method](#)

2.2 *ISO Standard*:<sup>3</sup>

[ISO 14125 \(Method B\) Fibre-Reinforced Plastic Composites—Determination of Flexural Properties](#)

#### 3. Terminology

3.1 *Definitions*:

3.1.1 Definitions of terms applying to these test methods appear in Terminology [D883](#) and Annex A2 of Test Method [D638](#).

#### 4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section rests on two supports and is loaded at two points (by means of two loading noses), each an equal distance from the adjacent support point. The distance between the loading noses (the load span) is either one third or one half of the support span (see [Fig. 1](#)). A support span-to-depth ratio of 16:1 shall be used unless there is reason to suspect that a larger span-to-depth ratio may be required, as

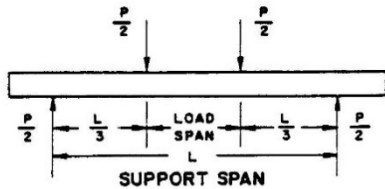
<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved April 1, 2010. Published April 2010. Originally approved in 1998. Last previous edition approved in 2008 as D6272 - 02(2008)<sup>1</sup>. DOI: 10.1520/D6272-10.

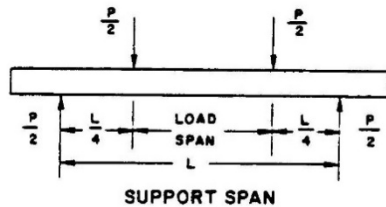
<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard



(one third of support span)



(one half of support span)

FIG. 1 Loading Diagram

may be the case for certain laminated materials (see Section 7 and Note 8 for guidance).

4.2 The specimen is deflected until rupture occurs in the outer fibers or until the maximum fiber strain (see 12.7) of 5 % is reached, whichever occurs first.

### 5. Significance and Use

5.1 Flexural properties determined by this test method are especially useful for quality control and specification purposes.

5.2 This test method may be more suited for those materials that do not fail within the strain limits imposed by Test Method D790. The major difference between four point and three point bending modes is the location of the maximum bending moment and maximum axial fiber stress. In four point bending the maximum axial fiber stress is uniformly distributed between the loading noses. In three point bending the maximum axial fiber stress is located immediately under the loading nose.

5.3 Flexural properties may vary with specimen depth, temperature, atmospheric conditions, and the difference in rate of straining specified in Procedures A and B.

5.4 Before proceeding with this test method, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters covered in the material specification, or both, shall take precedence over those mentioned in this test method. If there are no material specifications, then these default conditions apply. Table 1 in Classification D4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

### 6. Apparatus

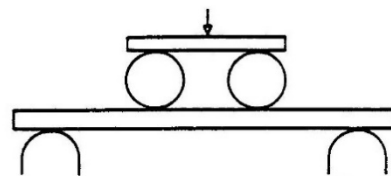
6.1 *Testing Machine*—A properly calibrated testing machine that can be operated at constant rates of crosshead motion over the range indicated, and in which the error in the load measuring system shall not exceed 6.1 % of maximum load expected to be measured. It shall be equipped with a deflection measuring device. The stiffness of the testing machine shall be such that the total elastic deformation of the system does not exceed 1 % of the total deflection of the test specimen during testing, or appropriate corrections shall be made. The load indicating mechanism shall be essentially free from inertial lag at the crosshead rate used. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E4.

6.2 *Loading Noses and Supports*—The loading noses and supports shall have cylindrical surfaces. In order to avoid excessive indentation, or failure due to stress concentration directly under the loading noses, the radii of the loading noses and supports shall be 5.0 ± 0.1 mm (0.197 ± 0.004 in.) unless otherwise specified or agreed upon between the interested parties. When other loading noses and supports are used they must comply with the following requirements: they shall be at least 3.2 mm (1/8 in.) for all specimens, and for specimens 3.2 mm (1/8 in.) or greater in depth, the radius of the supports may be up to 1.6 times the specimen depth. They shall be this large if significant indentation or compressive failure occurs. The arc of the loading noses in contact with the specimen shall be sufficiently large to prevent contact of the specimen with the sides of the noses (see Fig. 2).

NOTE 2—Test data have shown that the loading noses and support dimensions can influence the flexural modulus and flexural strength values. The loading noses dimension has the greater influence. Dimensions of loading noses and supports must be specified for material specifications.

6.3 *Deflection Measuring Device*—A properly calibrated device to measure the deflection of the beam at the common center of the loading span, that meets or exceeds Practice E83, Class C, shall be used. The device shall automatically and continuously record the deflection during the test.

6.4 *Micrometers*—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semi-rigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of non-rigid test specimens shall have: a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), a movable circular contact foot



NOTE 1—Default radii 5.0 mm; see 6.2.

FIG. 2 Loading Noses and Supports (Example of One Third Support Span)



# APÉNDICE C

## CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN

Tabla C.1. Calibración de la Celda de carga de 2000 kg

#	Peso [Kg]
1	0.664
2	4.9
3	4.18
4	5.448
5	1.408

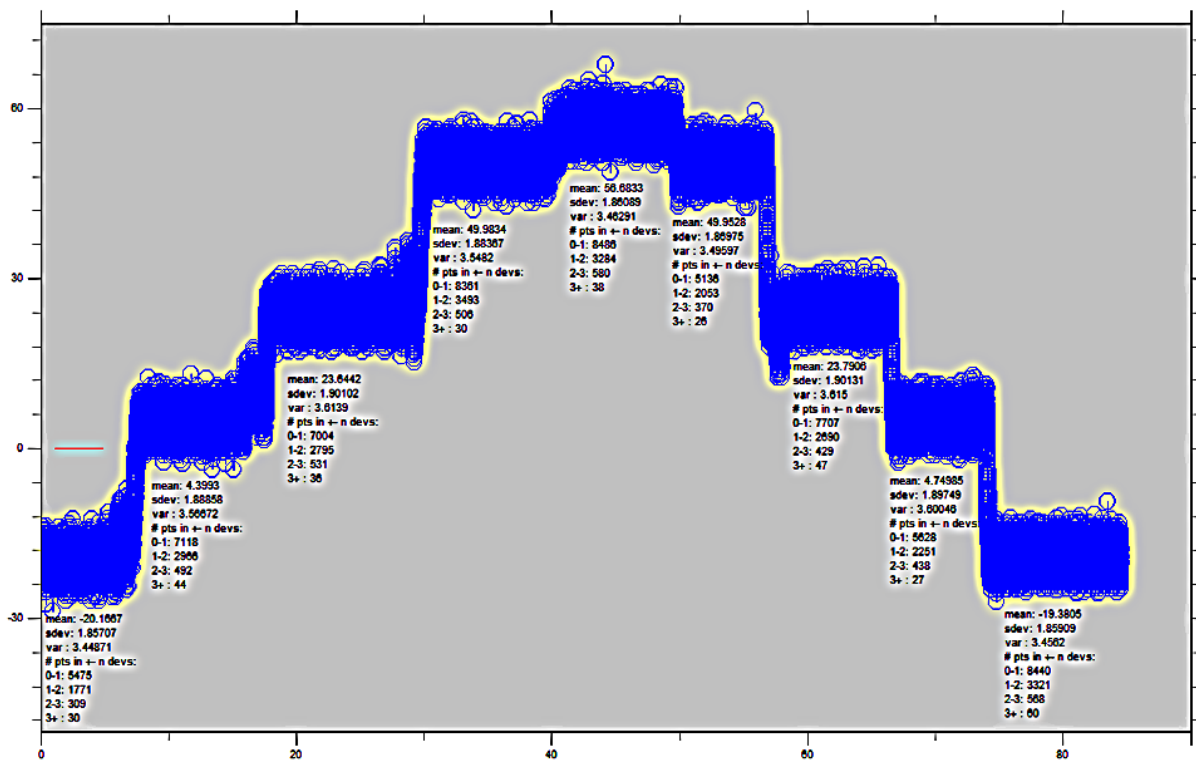


Figura C.1. Datos estadísticos de la calibración, Easyplot

[FUENTE: Propia]

Tabla C.2. Resumen de datos de la calibración

[Fuente: Propia]

		Peso [Kg]	Load [mV]	Load [Kg]
IDA	1	0.66	-20.1667	0.52
	1+2	5.56	4.3993	5.65
	1+2+3	9.74	23.6442	9.68
	1+2+3+4	15.19	49.9834	15.19
	1+2+3+4+5	16.60	56.6833	16.59
Vuelta	1+2+3+4	15.19	49.9528	15.18
	1+2+3	9.74	23.7906	9.71
	1+2	5.56	4.74985	5.73
	1	0.66	-19.3805	0.68

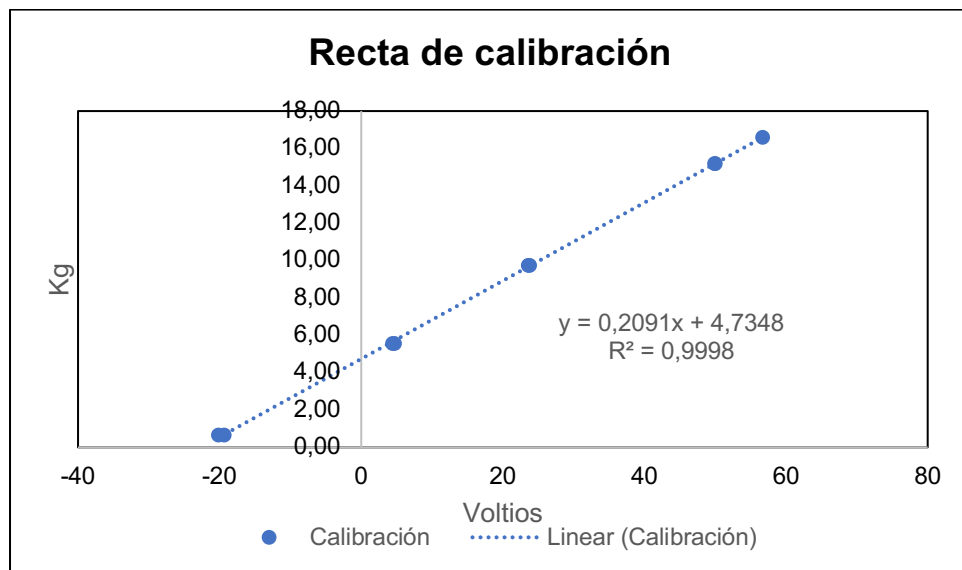


Figura C.2. Recta de Calibración de Voltios a Kgf

[FUENTE: Propia]

## Verificación de Datos de extensómetros

Se verifico que los resultados dados por el equipo NI-9235 sean deformaciones unitarias (mm/mm) comparándolos con los resultados del anterior equipo InstruNet i4000 de 4 slots, este equipo estaba ajustado en micras ( $\times 10^{-6}$ )

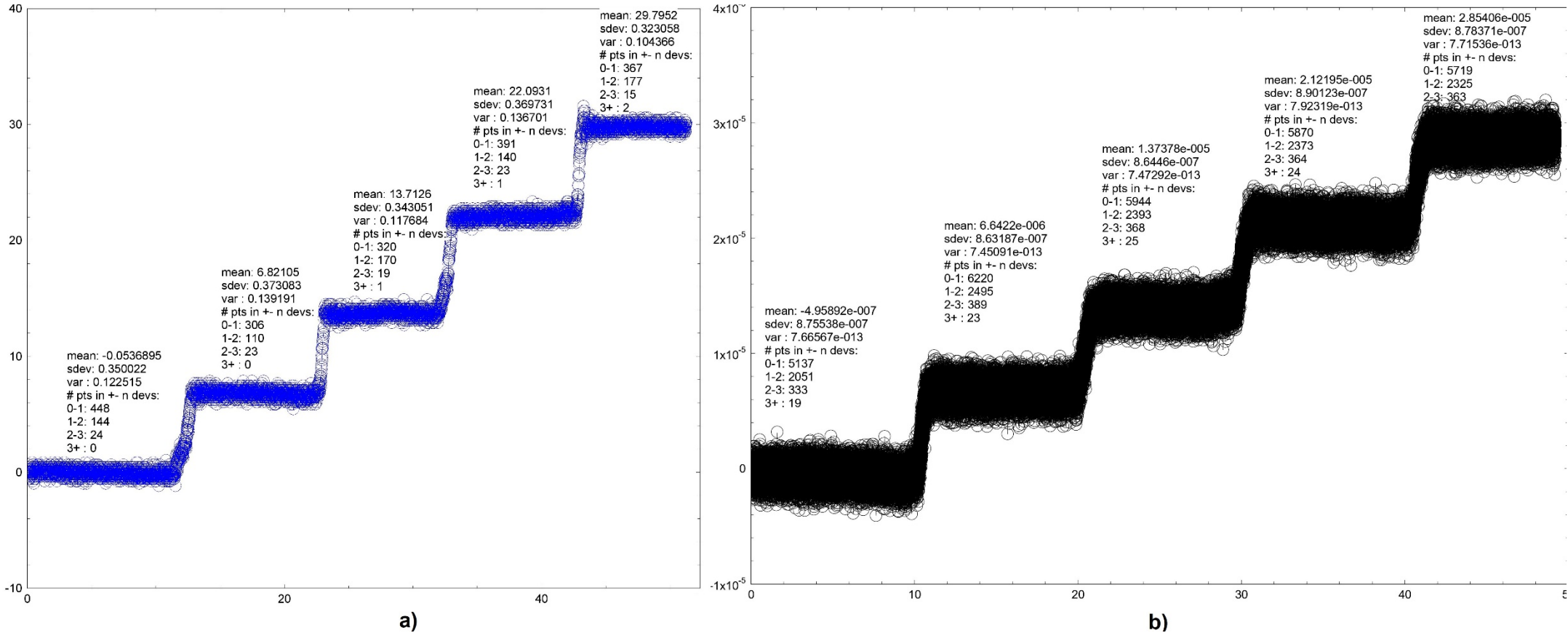


Figura C.3. Verificación de resultados, a) InstruNet i4000, b) NI-9235

[FUENTE: Propia]

## APÉNDICE D

### PYTHON

Reducción del scan rate de los resultados, de 1000 Hz a 100 Hz y aproximación de esfuerzo utilizando la relación de Ramberg\_Osgood

#### Rate (-) Program

```
import numpy as np
contador=0                #inicia contador en 0
filename=input("Escriba nombre de archivo de entrada: ")
archivo=open(filename,"r") #abre archivo de datos

resultsname=input("Ingrese nombre de archivo de salida: ")
nuevo=open(resultsname,"w") #crea nuevo archivo de resultados

rate=[1,2,5,10,20,25,40,50,100,200,250,500,1000]
interval=int(input("ingrese rate: "))
while interval not in rate:
    interval=int(input("ingrese rate: "))
step=int(int(1000/interval) -1)
for linea in archivo:
    if linea[0].isdigit():
        nuevo.write(linea)
        contador+=1        #cuenta cada linea seleccionada
        for j in range(step): #lee lineas cada n lineas
            archivo.readline() #añade la linea requerida
nuevo.close()
archivo.close()           #cierra ambos archivos
```

## Ramberg Osgood Aproximation Program

```
import numpy as np
f=open("strainreducido.txt","r") #txt with data
E, Sy, Su, e0 = f.readline().strip().split("\t")
E=eval(E); Sy=eval(Sy); Su=eval(Su); e0=eval(e0)
Elements=[] #Data of elements

for i in f:
    line=i.strip().split("\t")
    S = []
    for j in line:
        S.append(eval(j))
    Elements.append(S)
f.close()

Elements=np.array(Elements)
A=round((E*e0)/Sy,2)
N=10

def ramps(ex): #Fn Newton Rampson para obtener sigma de forma iterativa
    fx = lambda sig,ex: ((sig/Sy)+ ((A)*((sig/Sy)**N)))-(ex/(e0))
    gx= lambda sig,ex: ((1/Sy)+ ((A)*(N/Sy)*((sig/Sy)**(N-1))))
    a=0.01
    error=0.0000001
    space=2*error
    while (space>=error):
        fp=fx(a, ex)
        gp= gx(a, ex)
        xn=abs(a- fp/gp)
        space=np.abs(xn-a)
        a=xn
    return a
```

```
final=[]
for i in Elements:
    C=[]
    for j in i:
        stress=ramps(abs(j))
        C.append(stress)
    final.append(C)
final=np.array(final)
# print(final)

nuevo=open('Results_stress.txt',"w")
for i in final:
    for j in i:
        nuevo.write(str(j)+'\t')
    nuevo.write('\n')
nuevo.close()
```

## APÉNDICE E

### CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN

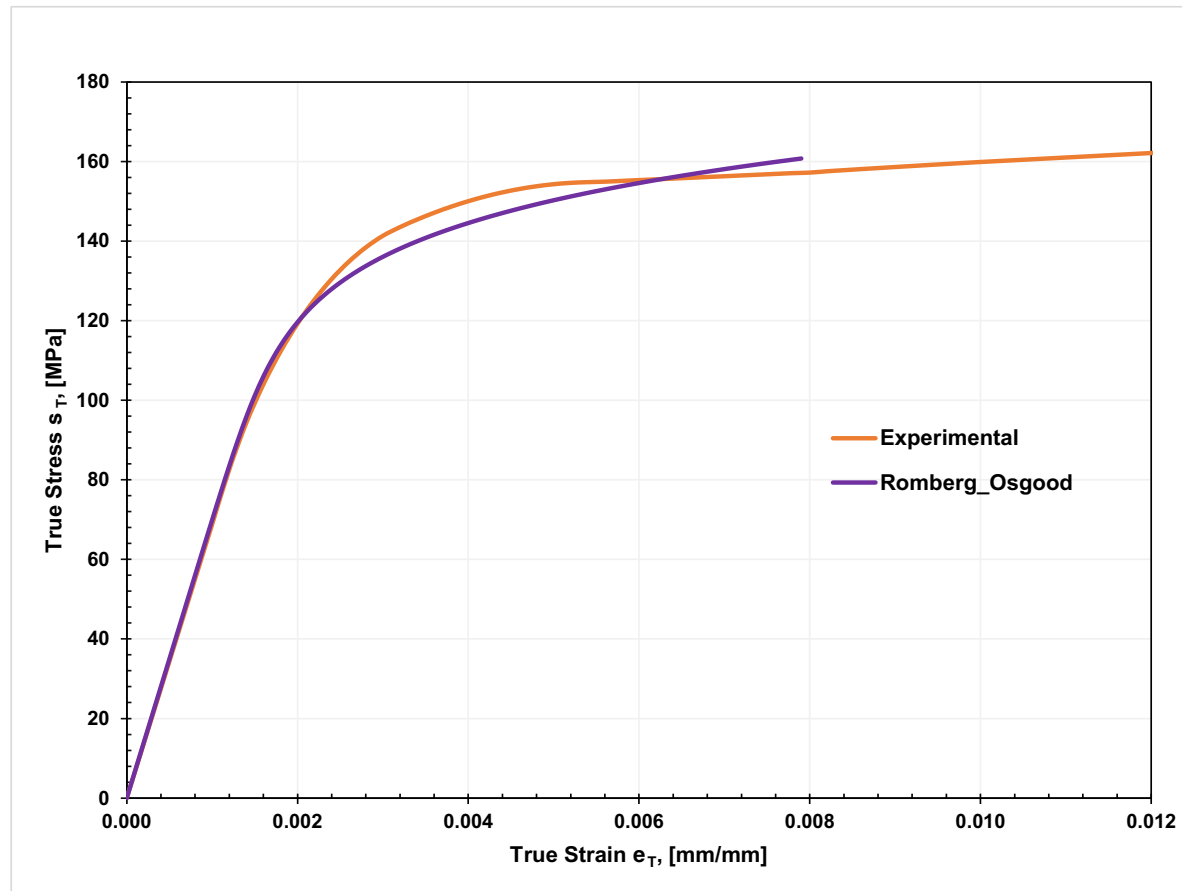


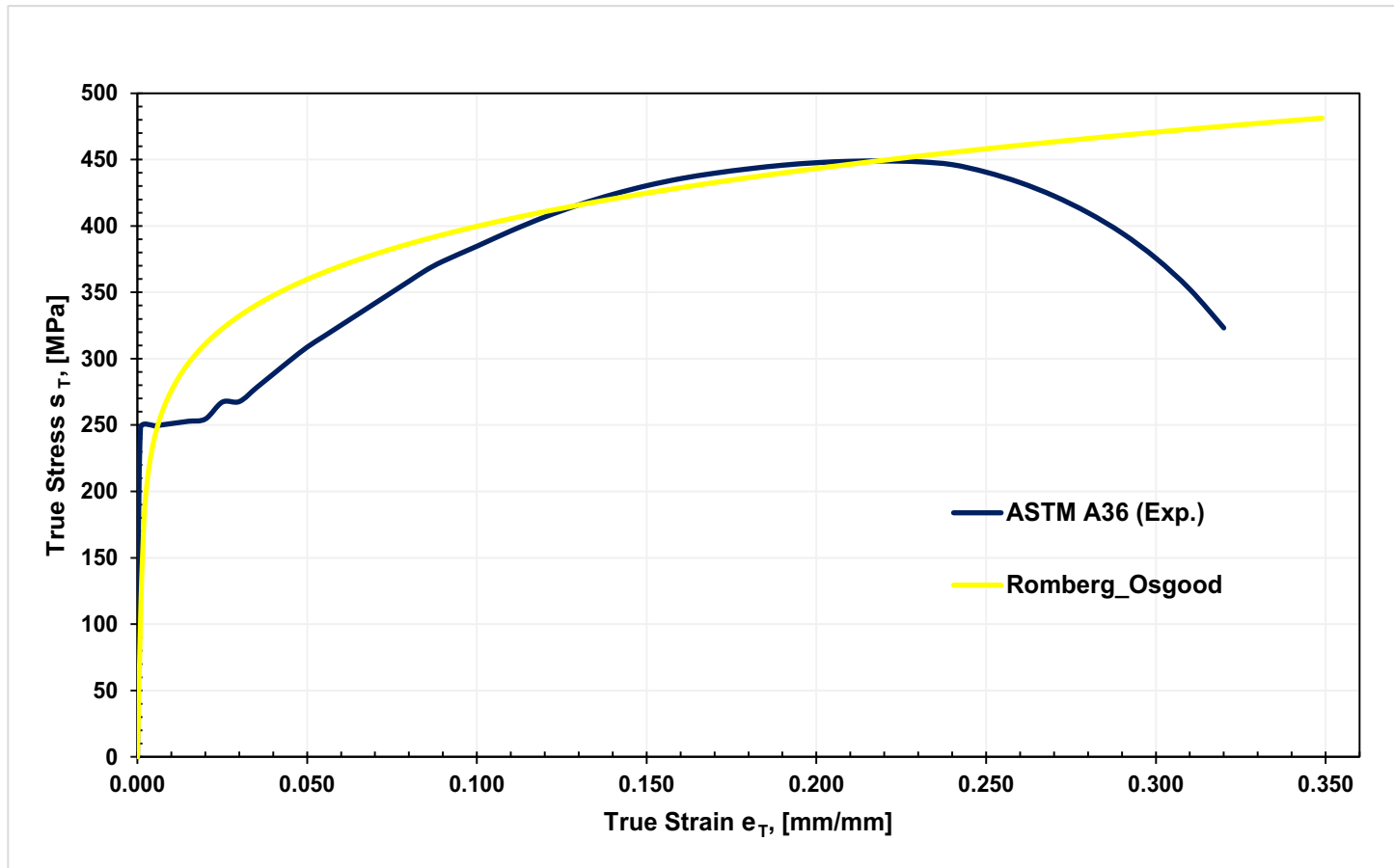
Figura E.1. Curva Esfuerzo Deformacion Real y Ramberg\_Osgood Aluminio

[FUENTE: (Su, Young, & Gardner, 2014)]

Tabla E.1. Coeficientes  
Ramberg Osgood Aluminio

<b>E, [N/mm<sup>2</sup>]</b>	70400
<b><math>s_y</math>, [N/mm<sup>2</sup>]</b>	151
<b><math>s_u</math>, [N/mm<sup>2</sup>]</b>	181
<b><math>e_0</math></b>	0.002145
<b>a</b>	1.0
<b>N</b>	10

Tabla E.2. Coeficientes  
Ramberg Osgood Acero



<b>E, [N/mm<sup>2</sup>]</b>	210000
<b>sy, [N/mm<sup>2</sup>]</b>	250
<b>su, [N/mm<sup>2</sup>]</b>	450
<b>e<sub>0</sub></b>	0.002142
<b>A</b>	1.8
<b>N</b>	6.867

Figura E.2. Curva Esfuerzo Deformacion Real y Ramberg\_Osgood Acero

[FUENTE: (Kang & Kim, 2014)]



# APÉNDICE F

## REGISTRO DE ENSAYOS

Tabla F.1. Registro de Ensayos

[Fuente: Propia]

Fecha	Tipo	Archivos Generados		Duración de la Prueba, [s]	Velocidad avance promedio, [mm/s]
<b>FLEXIÓN</b>					
03/ Dic / 2021	Correa G	0G	omegadata_001 straingage_001	663	1/20
06/ Dic / 2021		1G	omegadata_002 straingage_002	187	1/10
07/ Dic / 2021		2G	omegadata_003 straingage_003	120	
08/ Dic / 2021		3G	omegadata_004 straingage_004	145	
13/ Dic / 2021	Perfil U	0U	omegadata_001 straingage_001	1583	1/16
		1U	omegadata_002 straingage_002	585	1/7
14/ Dic / 2021		2U	omegadata_003 straingage_003	487	
15/ Dic / 2021		3U	omegadata_004 straingage_004	362	
15/ Dic / 2021	Rectangular	1R	omegadata_001 straingage_001	330	
		2R	omegadata_002 straingage_002	227	
17/ Dic /2021		3R	omegadata_003 straingage_003	279	
<b>COMPRESIÓN</b>					
16/ Dic / 2021	Correa G	0GC	straingage_01c	983	0.1 KN/s
		1GC	straingage_02c	468	0.2 KN/s
	Perfil U	UC	straingage_01c	526	0.1 KN/s
	Rectangular	RC	straingage_02c	549	

# APÉNDICE G

## EXPERIMENTO DE FLEXIÓN

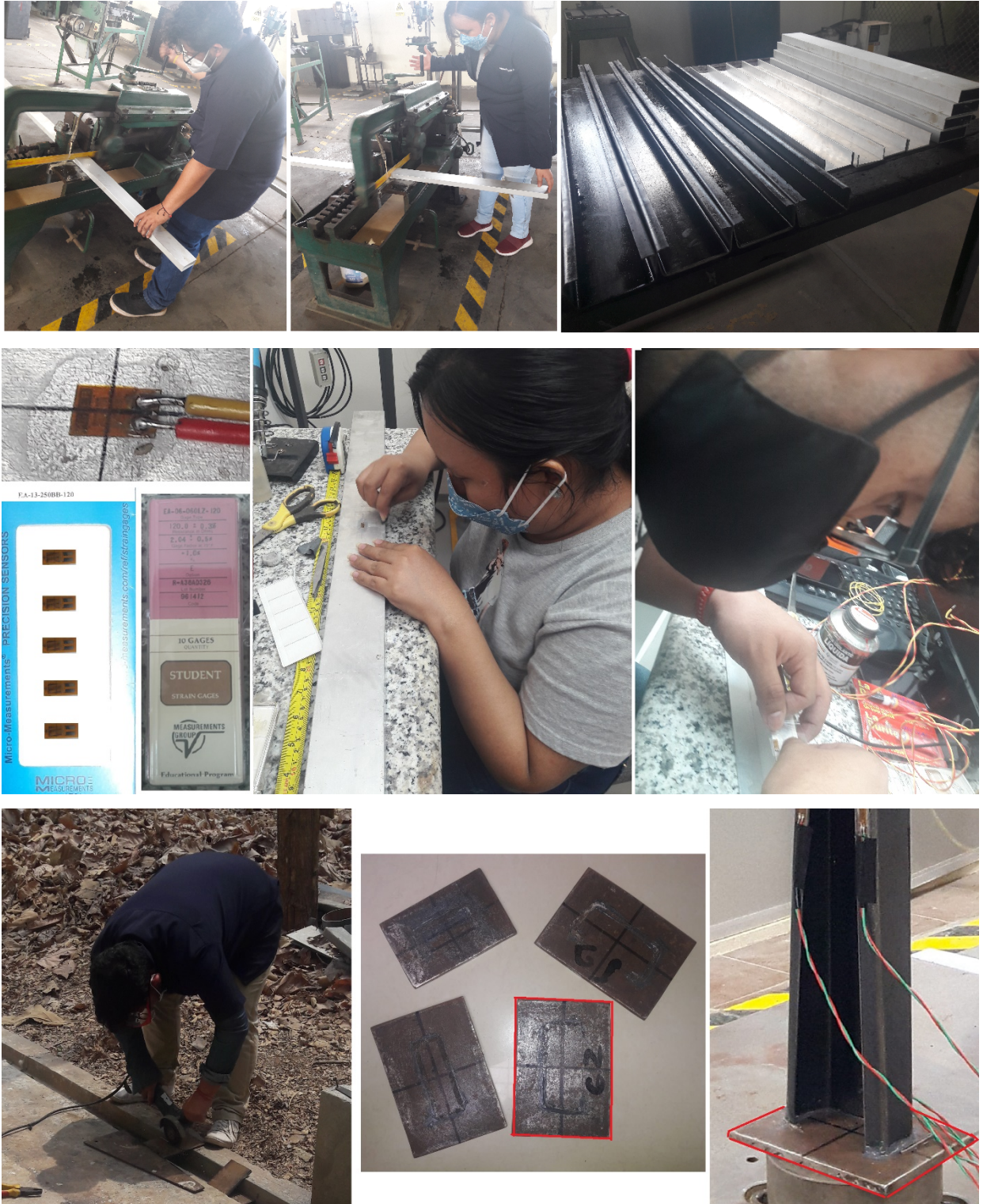
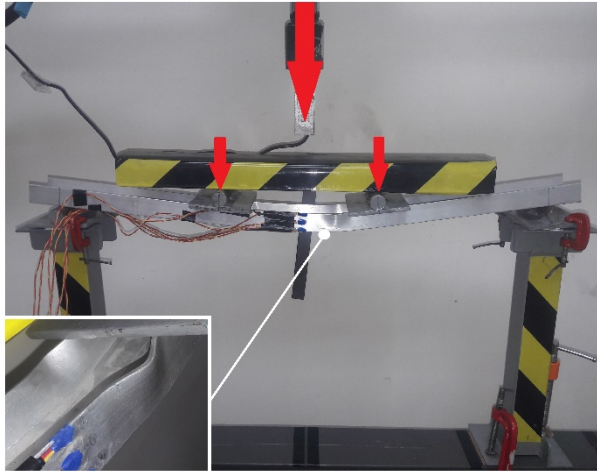
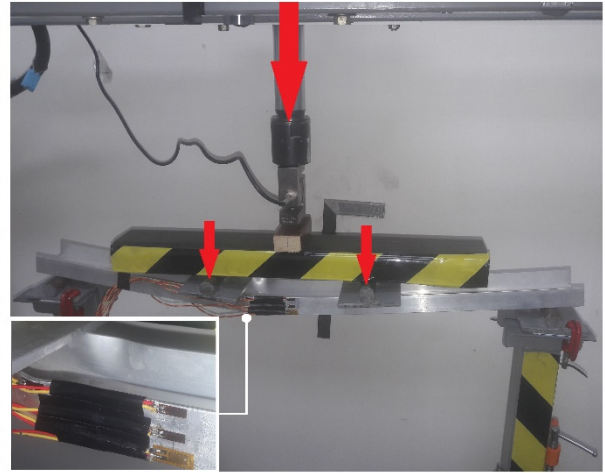


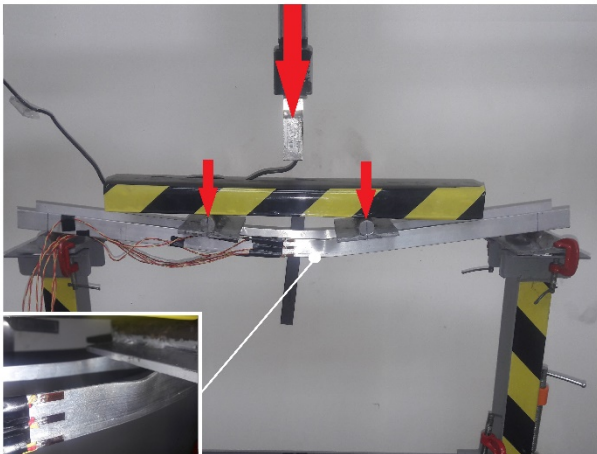
Figura G.1. Preparación de Especímenes  
[FUENTE: Propia]



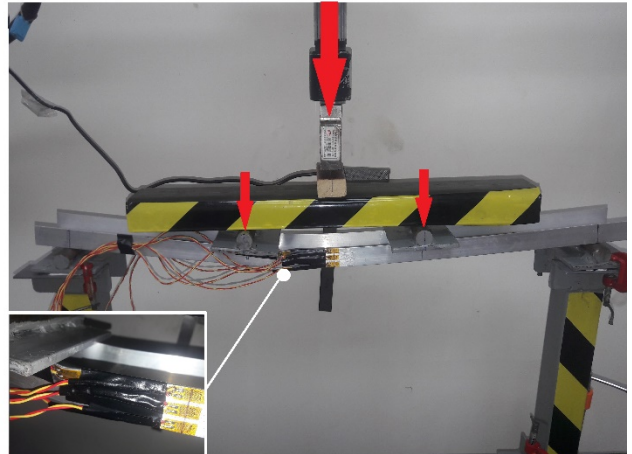
U0



U1



U2



U3

Figura G.2. Puebas de Flexion, Canal U

[FUENTE: Propia]

Tabla G.1. Fuerza y Momento Flector del Perfil U a 50 s

[FUENTE: Propia]

<b>t 50 s</b>						
<b>y [mm]</b>	<b><math>\sigma(y)</math> [Mpa]</b>	<b>y' [mm]</b>	<b><math>\sigma(y')</math> [MPa]</b>	<b>Factor</b>	<b>Producto 1</b>	<b>Producto 2</b>
25.4	-50.8	18.95	-50.8	1	-50.8	-962.3
21.5	-40.3	15.05	-40.3	4	-161.3	-2428.2
17.6	-29.9	11.15	-29.9	2	-59.8	-666.6
13.7	-19.4	7.25	-19.4	4	-77.7	-563.9
9.8	-9.0	3.35	-9.0	2	-18.0	-60.3
5.9	1.5	-0.55	1.5	4	5.8	-3.2
2.0	11.9	-4.45	11.9	1	11.9	-52.9
<b>Centroides Elementos Horizontales</b>		-5.45	15.16		-454.8	-6158.5
					<b>Int1 [N/mm]</b>	<b>Int2 [N]</b>

<b>Centroide Inicial</b>	<b>Fuerza axial Elem. Vert</b>	<b>Fuerza axial Elem. Horiz.</b>	<b>Fuerza Axial total</b>
<b><math>\bar{y}</math> [mm]</b>	<b>P1 [N]</b>	<b>P2 [N]</b>	<b>P=P1+ P2 [N]</b>
6.45	-1819.1	1819.2	0.1

<b>M. Flector Elem. Verticales</b>	<b>M. Flector Elem. Horiz.</b>	<b>M. Flector Exp.</b>	<b>M. Flector Teorico</b>	<b>Error M. Flector</b>
<b>M1 [Nmm]</b>	<b>M2 [Nmm]</b>	<b>Mexp [Nmm]</b>	<b>Mth [Nmm]</b>	<b>[%]</b>
24633.9	9907.4	34541.3	35433.6	3%

<b>Fuerza Exp. F. Exp [N]</b>	<b>Fuerza Teorica F. Teo. [N]</b>	<b>Error Fuerza [%]</b>
429.5	418.7	3%

Tabla G.2. Fuerza y Momento Flector del Perfil U a 200 s

[FUENTE: Propia]

t 200 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
25.4	-159.9	20.19	-157.2	1	-159.9	-3173
21.5	-152.0	16.29	-153.3	4	-613.4	-9992
17.6	-144.0	12.39	-149.5	2	-299.1	-3705
13.7	-149.9	8.49	-145.7	4	-582.9	-4949
9.8	-88.4	4.59	-88.4	2	-176.9	-812
5.9	-14.4	0.69	-14.4	4	-57.6	-40
2.0	72.2	-3.21	72.2	1	72.2	-232
<b>Centroides Elementos Horizontales</b>		-4.21	78.80		-2362.8	-29773
					<b>Int1 [N/mm]</b>	<b>Int2 [N]</b>

Centroide Inicial y' [mm]	Fuerza axial Elem. Vert P1 [N]	Fuerza axial Elem. Horiz. P2 [N]	Fuerza Axial total P=P1+ P2 [N]
5.21	-10869	10874	5

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
136957	45784	182741	199548	8%

Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
2419	2215	8%

Tabla G.3. Fuerza y Momento Flector del Perfil U a 400 s

[FUENTE: Propia]

t 400 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
25.4	-177.1	21.79	-179.2	1	-179.2	-3905
21.5	-172.1	17.89	-174.1	4	-696.4	-12460
17.6	-167.0	13.99	-169.0	2	-338.0	-4730
13.7	-161.9	10.09	-158.9	4	-635.7	-6416
9.8	-140.7	6.19	-140.0	2	-280.1	-1734
5.9	-67.6	2.29	-67.6	4	-270.5	-620
2.0	58.3	-1.61	58.3	1	58.3	-94
<b>Centroides Elementos Horizontales</b>					-3044.0	-38947
					<b>Int1 [N/mm]</b>	<b>Int2 [N]</b>
		-2.61	101.50			

Centroide Inicial	Fuerza axial Elem. Vert	Fuerza axial Elem. Horiz.	Fuerza Axial total
$\bar{y}$ [mm]	P1 [N]	P2 [N]	P=P1+ P2 [N]
3.61	-14002	14007	5

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
179155	36525	215680	237262	9%

Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
2876	2614	9%

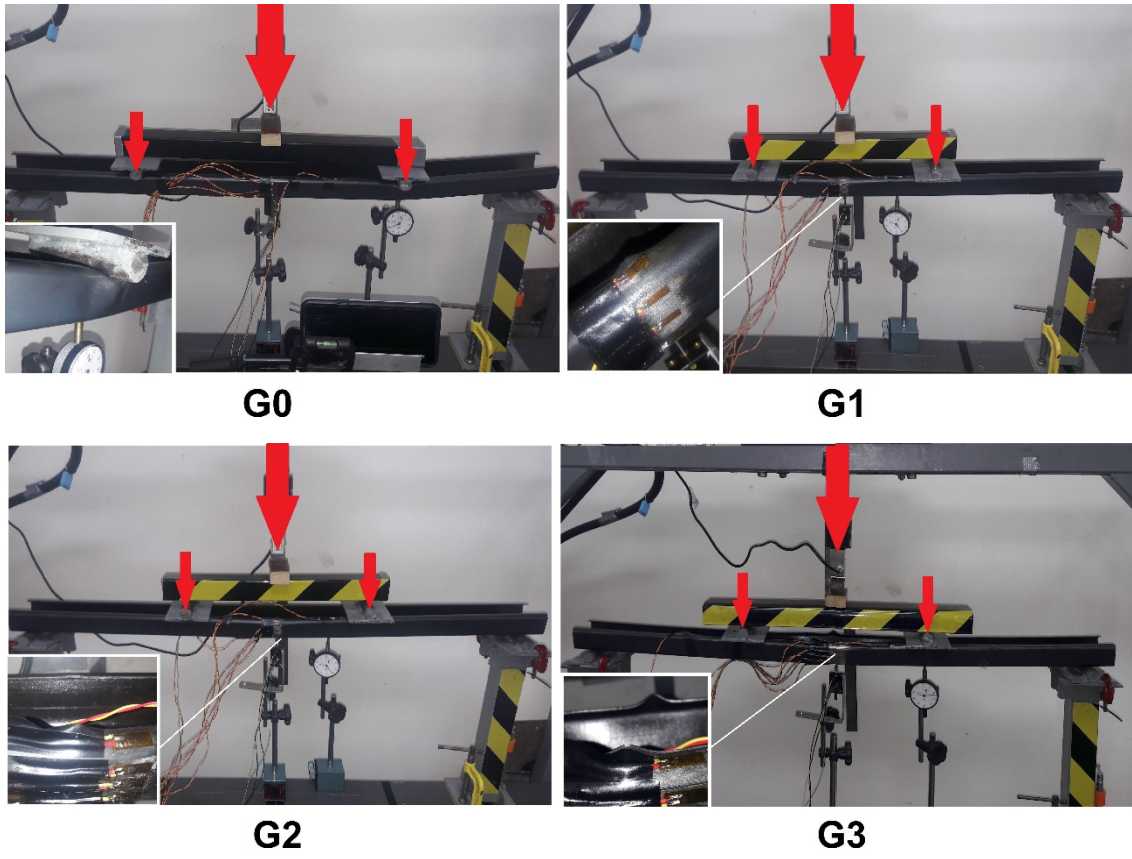


Figura G.3. Puebas de Flexion, Correa G.

[FUENTE: Propia]

Tabla G.4. Fuerza y Momento Flector de la Correa G a 12 s

[FUENTE: Propia]

t 12 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
34.5	-86.6	20.91	-86.6	1	-86.6	-1811.2
29.7	-56.2	16.07	-56.2	4	-225.0	-3616.3
24.8	-34.9	11.24	-34.9	2	-69.7	-784.0
20.0	-18.9	6.41	-18.9	4	-75.7	-485.0
15.2	-4.8	1.57	-4.8	2	-9.6	-15.1
10.3	11.1	-3.26	11.1	4	44.3	-144.4
5.5	32.3	-8.09	32.3	1	32.3	-261.4
<b>Centroides</b>		-12.51	59.77		-628.4	-11467.0
<b>Elementos Horizontales</b>		24.91	-121.16		<b>Int1</b> [N/mm]	<b>Int2</b> [N]

Centroide Inicial	Fuerza axial Elem. Vert	Fuerza axial Elem. Horiz.	Fuerza Axial total
$\bar{y}$ [mm]	P1 [N]	P2 [N]	P=P1+ P2 [N]
13.59	-1885.2	1883.1	-2.1

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
34400.9	247729.8	282130.7	306920.2	8.1%

Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
2001.7	1840.0	8%



Tabla G.5. Fuerza y Momento Flector de la Correa G a 30 s

[FUENTE: Propia]

t 30 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
34.5	-238.4	21.74	-240.2	1	-240.2	-5223
29.7	-197.8	16.91	-200.8	4	-803.3	-13585
24.8	-140.4	12.08	-144.3	2	-288.7	-3487
20.0	-72.8	7.24	-77.1	4	-308.5	-2235
15.2	-1.1	2.41	-5.6	2	-11.2	-27
10.3	68.1	-2.42	64.0	4	255.9	-620
5.5	128.5	-7.26	125.1	1	125.1	-908
<b>Centroides</b>		-11.68	142.3		-2047.6	-42025
<b>Elementos Horizontales</b>		25.75	-255.4		<b>Int1</b> [N/mm]	<b>Int2</b> [N]

Centroide Inicial	Fuerza axial Elem. Vert	Fuerza axial Elem. Horiz.	Fuerza Axial total
$\bar{y}$ [mm]	P1 [N]	P2 [N]	P=P1+ P2 [N]
12.76	-6143	6142	-1

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
126074	543759	669834	727487	8%

Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
4744	4368	8%

Tabla G.6. Fuerza y Momento Flector de la Correa G a 43 s

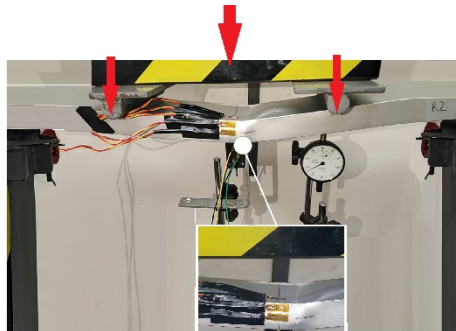
[FUENTE: Propia]

t 43 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
34.5	-287.0	22.47	-287.0	1	-287.0	-6450
29.7	-272.9	17.64	-272.8	4	-1091.4	-19254
24.8	-225.9	12.81	-225.9	2	-451.8	-5787
20.0	-153.8	7.97	-153.8	4	-615.3	-4907
15.2	-64.1	3.14	-64.1	2	-128.3	-403
10.3	35.6	-1.69	35.6	4	142.2	-241
5.5	137.7	-6.53	137.7	1	137.7	-898
<b>Centroides Elementos Horizontales</b>		-10.95	184.49		-3695.7	-61125
		26.48	-268.53		<b>Int1</b> [N/mm]	<b>Int2</b> [N]

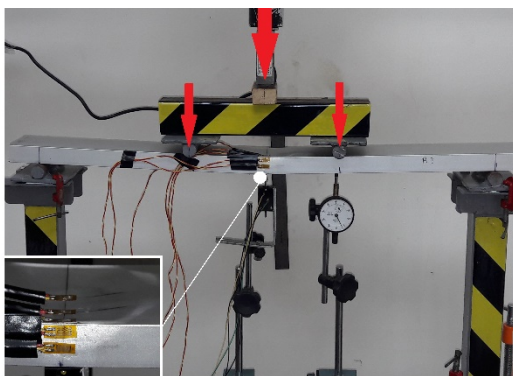
Centroide Inicial $\bar{y}$ [mm]	Fuerza axial Elem. Vert P1 [N]	Fuerza axial Elem. Horiz. P2 [N]	Fuerza Axial total P=P1+ P2 [N]
12.03	-11087	11087	0

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
183376	616009	799385	870649	8%

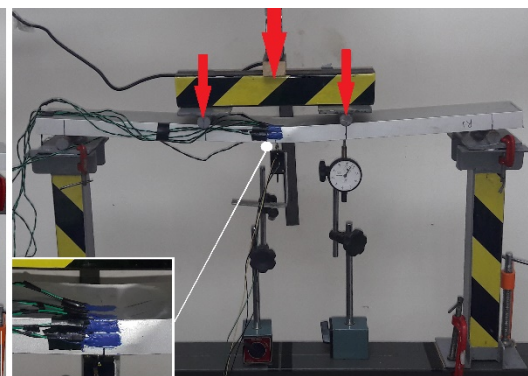
Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
5678	5213	8%



R1



R2



R3

Figura G.4. Puebas de Flexion, Rectangular.

[FUENTE: Propia]

Tabla G.7. Fuerza y Momento Flector del Perfil R a 71 s

[FUENTE: Propia]

t 71 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
25.4	-75.2	10.8	-63.4	1	-63.4	-683
21.2	-50.3	6.9	-40.5	4	-161.8	-1112
16.9	-25.3	3.0	-17.5	2	-35.0	-104
12.7	-0.4	-0.9	5.5	4	21.8	-20
8.5	24.5	-4.8	28.4	2	56.8	-274
4.2	49.4	-8.7	51.4	4	205.5	-1794
0.0	74.3	-12.6	74.3	1	74.3	-939
<b>Centroides</b>		-11.90	67.28		138.7	-6952
<b>Elementos Horizontales</b>		12.05	-70.92		<b>Int1</b> [N/mm]	<b>Int2</b> [N]

Centroide Inicial	Fuerza axial Elem. Vert	Fuerza axial Elem. Horiz.	Fuerza Axial total
$\bar{y}$ [mm]	P1 [N]	P2 [N]	P=P1+ P2 [N]
12.63	402	-403	0

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
20160	182890	203050	187920	8%

Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
1708	1846	8%

Tabla G.8. Fuerza y Momento Flector del Perfil R a 112 s

[FUENTE: Propia]

t 112 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
25.4	-134.9	11.4	-134.9	1	-134.9	-1542
21.2	-92.4	7.5	-92.4	4	-369.5	-2782
16.9	-49.8	3.6	-49.8	2	-99.7	-362
12.7	-7.3	-0.3	-7.3	4	-29.3	8
8.5	35.2	-4.2	35.2	2	70.4	-294
4.2	77.7	-8.1	77.8	4	311.0	-2510
0.0	120.3	-12.0	120.3	1	120.3	-1440
<b>Centroides</b>		-11.25	114.87		-185.8	-12590
<b>Elementos Horizontales</b>		12.70	-110.00		<b>Int1</b> [N/mm]	<b>Int2</b> [N]

Centroide Inicial	Fuerza axial Elem. Vert	Fuerza axial Elem. Horiz.	Fuerza Axial total
$\bar{y}$ [mm]	P1 [N]	P2 [N]	P=P1+ P2 [N]
11.97	-539	538	-1

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
36510	297138	333647	349850	5%

Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
3180	3033	5%

Tabla G.9. Fuerza y Momento Flector del Perfil R a 166 s

[FUENTE: Propia]

t 166 s						
y [mm]	$\sigma(y)$ [Mpa]	y' [mm]	$\sigma(y')$ [MPa]	Factor	Producto 1	Producto 2
25.4	-135.3	11.37	-135.3	1	-135.3	-1538
21.2	-105.0	7.47	-105.1	4	-420.2	-3138
16.9	-60.4	3.57	-60.4	2	-120.8	-431
12.7	-8.4	-0.33	-8.4	4	-33.6	11
8.5	43.9	-4.23	43.9	2	87.8	-372
4.2	89.5	-8.13	89.5	4	357.9	-2911
0.0	121.2	-12.03	121.2	1	121.2	-1459
<b>Centroides</b>		-11.31	146.2		-201.7	-13881
<b>Elementos Horizontales</b>		12.64	-140.9		<b>Int1</b> [N/mm]	<b>Int2</b> [N]

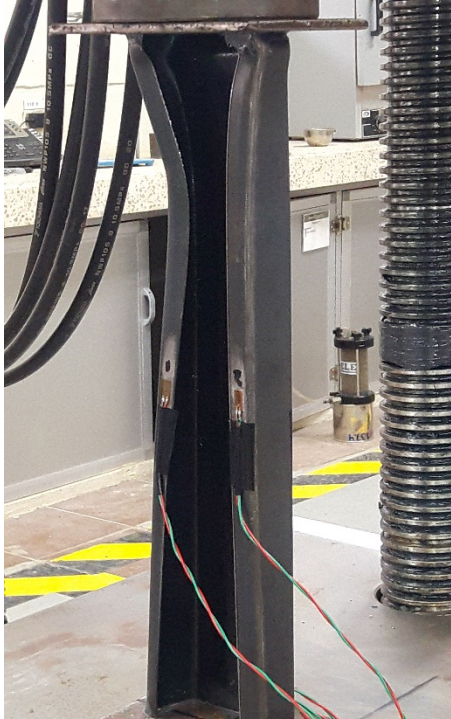
Centroide Inicial $\bar{y}$ [mm]	Fuerza axial Elem. Vert P1 [N]	Fuerza axial Elem. Horiz. P2 [N]	Fuerza Axial total P=P1+ P2 [N]
12.03	-585	585	0

M. Flector Elem. Verticales	M. Flector Elem. Horiz.	M. Flector Exp.	M. Flector Teorico	Error M. Flector
M1 [Nmm]	M2 [Nmm]	Mexp [Nmm]	Mth [Nmm]	[%]
40255	379434	419689	411486	2%

Fuerza Exp. F. Exp [N]	Fuerza Teorica F. Teo. [N]	Error Fuerza [%]
3741	3815	2%

## APÉNDICE H

### EXPERIMENTO DE COMPRESIÓN



1\_1 Correa G1



1\_2 Correa G2



1\_3 Canal U



1\_4 Rectangular

Figura H.1. Puebas de Compresión (Todos los Especímenes)

[FUENTE: Propia]

Key Word		Product Name	
Test File Name	MAT INT NAVAL LOYOLA TOALA.xtux	Method File Name	SIN NORMA COMPRESION EN PERFILES DE ACERO.xmux
Report Date	12/16/2021	Test Date	12/16/2021
Test Mode	Single	Test Type	Tensile
Speed	0.1kN/sec	Shape	Plate
No of Batches:	1	Qty/Batch:	4

Name Parameters	Max_Force Calc. at Entire Areas	Max_Displ. Calc. at Entire Areas	Max_Time Calc. at Entire Areas
Unit	kN	mm	sec
1_1	80.6662	2.45975	780.080
1_2	65.7692	2.21450	326.740
1_3	37.7113	2.18038	372.850
1_4	39.7183	2.05063	392.490
Average	55.9663	2.22632	468.040
Standard Deviation	20.8441	0.17089	209.844
Range	42.9549	0.40912	453.340

Name	Thickness	Width	Gauge_Length	VEL
Unit	mm	mm	mm	
1_1	1.0000	1.0000	100.0000	0.1
1_2	1.0000	1.0000	100.0000	0.2
1_3	1.0000	1.0000	100.0000	0.1
1_4	1.0000	1.0000	100.0000	0.1

Figura H.2. Archivo Resumen Generado Shimadzu FX-5000  
[FUENTE: Shimadzu FX-5000]



Figura H.3. Soldadura en Frio.  
[FUENTE: JB WELD]



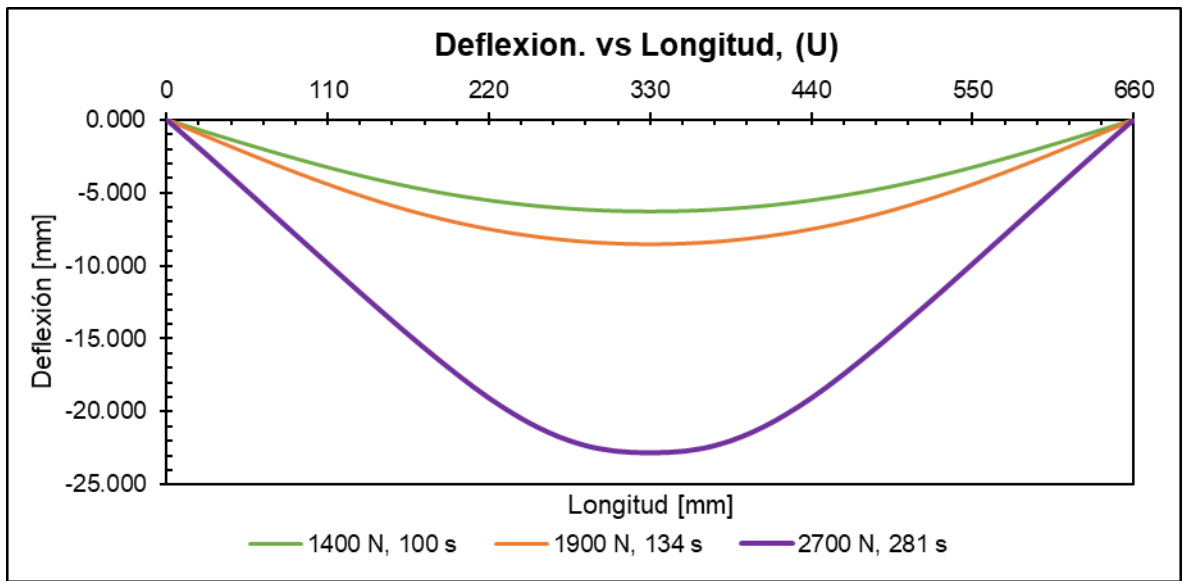


Figura H.4. Perfil de Deflexion del Perfil U en el tiempo.

[FUENTE: Propia]