

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE VIGAS COMPUESTAS  
TUBULARES SUJETAS A FLEXIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

XAVIER EDISON FLORES SANCHEZ

flores.sanchez.xavier@gmail.com

DIRECTOR: ING. VINTIMILLA JARAMILLO JORGE RICARDO

vintimilla.j@gmail.com

Quito, Diciembre 2014

## DECLARACIÓN

Yo, Xavier Edison Flores Sánchez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la ley de propiedad intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Xavier Edison Flores Sánchez

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Señor Xavier Edison Flores Sánchez, bajo mi supervisión.

---

Ing. Jorge Vintimilla.  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## AGRADECIMIENTO

A la Escuela Politécnica Nacional, por acogerme en sus aulas y darme los conocimientos necesarios para ejercer mi profesión dignamente. A todo el personal logístico, administrativo y docente que conforman esta noble institución, el tiempo compartido con ellos desde mi primer día en la universidad hasta el último, son un recuerdo que llevaré permanentemente en mi diario vivir.

Al ing. Jorge Vintimilla, por su colaboración y guía en la realización de este documento.

## DEDICATORIA

A mi familia, amigos, conocidos... a toda la gente que de alguna u otra manera a interactuado conmigo en el devenir de todos estos años, así como también a las personas que vendrán, a aquellos que han influido en mi formación como persona y como profesional, pocas o muchas líneas son insuficientes para resarcir todo lo aprendido de ustedes.

A las personas que por curiosidad intelectual, lean parte o la totalidad de esta obra, les tengo que decir de antemano muchas gracias. Espero haber creado un documento entendible y practico que contribuya en algo a su investigación y al desarrollo del país.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	IX
RESUMEN .....	X
PRESENTACIÓN.....	XI
CAPITULO 1 .....	1
1.1 INTRODUCCION .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 IMPORTANCIA .....	2
CAPITULO 2 .....	3
2.1 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES INDIVIDUALES.....	3
2.1.1 ACERO.....	3
2.1.2 HORMIGÓN .....	6
2.2 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HORMIGON-ACERO.....	7
2.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HORMIGÓN ACERO PARA EL ENSAYO A FLEXION .....	8
2.3.1 CONSTRUCCIÓN DEL PERFIL TUBULAR .....	8
2.3.2 ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN.....	12

2.3.3 FUNDICIÓN DE LOS ELEMENTOS ACERO – HORMIGÓN .....	13
CAPITULO 3 .....	15
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	15
3.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	15
3.3 ESQUEMA Y DIMENCIONES DEL MARCO DE CARGA.....	16
3.4 SIMBOLOGÍA DE LAS PROBETAS .....	17
3.5 CÁLCULOS EXPERIMENTALES .....	19
3.5.1 CÁLCULO DEL MOMENTO FLECTOR .....	20
3.5.2 CÁLCULO DE CONSTANTE EI EXPERIMENTAL .....	22
3.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS .....	23
3.6.1 COMPARACION DE RESULTADOS .....	27
3.6.2 ANÁLISIS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS .....	28
CAPITULO 4 .....	34
4.1 ANÁLISIS DE LA NORMATIVA VIGENTE.....	34
4.2 ANÁLISIS DE LOS ELEMENTOS VACIOS .....	34
4.2.1 EUROCÓDIGO 3.....	34
4.2.2 AISC (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCCIÓN) .....	46
4.3 ANÁLISIS DE LOS ELEMENTOS RELLENOS DE HORMIGÓN.....	52
4.3.1 EUROCODIGO 4.....	52
4.3.2 AISC (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCCIÓN) .....	52
4.3.3 ANÁLISIS ELÁSTICO Y PLÁSTICO DE LAS SECCIONES MIXTAS ACERO-HORMIGÓN .....	55
4.4 CALCULO ANALÍTICO DE LA FLECHA.....	61

CAPITULO 5 .....	64
5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	64
5.1.1 COMPARACION DE MOMENTOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES .....	64
5.1.2 COMPARACION DE FLECHAS .....	66
5.1.3 COMPARACION DE EI EXPERIMENTAL Y TEÓRICO .....	67
CAPITULO 6 .....	68
6.1 CONCLUSIONES .....	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXOS .....	72
ANEXO 1. GRÁFICAS MOMENTO – DEFLEXIÓN ELEMENTOS VACIOS .....	73
ANEXO 2. GRÁFICAS MOMENTO – DEFLEXIÓN ELEMENTOS RELLENOS.....	84
ANEXO 3. GRÁFICAS EI EXPERIMENTAL – M/M <sub>p</sub> ELEMENTOS RELLENOS.....	95
ANEXO 4. INFORME COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN.....	106



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. CURVA CARACTERÍSTICA	
ESFUERZO – DEFORMACIÓN DEL ACERO .....	4
FIGURA 3.1 ESQUEMA DEL MARCO DE CARGAS.....	16
FIGURA 3.2 MODELO DE CÁLCULO EXPERIMENTAL.....	20
FIGURA 4.1 ESQUEMA DE REDUCCIÓN DE ÁREA EFICAZ.....	41
FIGURA 4.2 DIAGRAMA ELÁSTICO DE SECCIÓN TIPO .....	55
FIGURA 4.3 DIAGRAMA PLÁSTICO DE SECCIÓN TIPO .....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA ACERO A36 .....	3
TABLA 2.2 PERFILES TIPO “CAJÓN” .....	8
TABLA 2.3 PERFILES TIPO “U” .....	9
TABLA 2.4 PROBETAS DE ACERO (VACÍAS) ARMADAS.....	10
TABLA 2.5 PROBETAS ACERO-HORMIGÓN (RELLENAS) ARMADAS .....	11
TABLA 2.6 COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN .....	12
TABLA 2.7 RESISTENCIA A COMPRESIÓN SOBRE PROBETAS DEL MISMO TIPO .....	12
TABLA 3.1 SECCIONES VACÍAS ENSAYADAS .....	18
TABLA 3.2 SECCIONES RELLENAS ENSAYADAS .....	18
TABLA 3.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ELEMENTOS VACÍOS.....	23
TABLA 3.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ELEMENTOS REFORZADOS CON HORMIGÓN .....	24
TABLA 3.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ELEMENTOS VACÍOS.....	25
TABLA 3.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS ELEMENTOS RELLENOS .....	25
TABLA 3.7 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE $EI_{exp\ eff}$ PARA LOS ELEMENTOS RELLENOS .....	26
TABLA 3.8 APOORTE DEL HORMIGÓN A LA RESISTENCIA EN EL ENSAYO .....	27
TABLA 4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES SEGÚN EUROCÓDIGO 3 .....	35
TABLA 4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS SEGÚN EL EUROCÓDIGO 3 .....	36
TABLA 4.3 MOMENTO ÚLTIMO ELÁSTICO DE LAS SECCIONES DE CLASE 1, 2 Y 3 EUROCÓDIGO 3 .....	38

TABLA 4.4 MOMENTO ÚLTIMO PLÁSTICO DE LAS SECCIONES DE CLASE 1, 2 Y 3 EUROCÓDIGO 3 .....	39
TABLA 4.5 COEFICIENTES $k_{\sigma}$ Y $\psi$ .....	42
TABLA 4.6 CALCULO DE LA ANCHURA REDUCIDA DEL PATÍN $b_{eff}$ .....	43
TABLA 4.7 CALCULO DEL MOMENTO ELÁSTICO CON SECCIÓN REDUCIDA, PARA SECCIONES CLASE 4, EUROCÓDIGO 3 .....	44
TABLA 4.8 CALCULO DEL MOMENTO PLÁSTICO, PARA LAS SECCIONES CLASE 4, EUROCÓDIGO 3.....	45
TABLA 4.9 CLASIFICACIÓN AISC DE LOS ELEMENTOS RECTANGULARES HUECOS .....	46
TABLA 4.10 CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES SEGÚN EL AISC .....	47
TABLA 4.11 MOMENTOS ÚLTIMOS ELÁSTICOS SEGÚN EL CÓDIGO AISC .....	50
TABLA 4.12 MOMENTOS ÚLTIMOS PLÁSTICOS SEGÚN EL CÓDIGO AISC .....	51
TABLA 4.13 RAZONES ANCHO-ESPESOR PARA ELEMENTOS MIXTOS RECTANGULARES ACERO-HORMIGÓN SUJETOS A FLEXIÓN.....	53
TABLA 4.14 CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES MIXTAS ACERO-HORMIGÓN SEGÚN EL AISC.....	54
TABLA 4.15 MOMENTOS ÚLTIMOS ELÁSTICOS ANALÍTICOS DE LAS SECCIONES RELLENAS.....	57
TABLA 4.16 MOMENTOS PLÁSTICOS ÚLTIMOS ANALÍTICOS DE LAS SECCIONES RELLENAS.....	60
TABLA 4.17 CALCULO ANALÍTICO DE LA FLECHA ELÁSTICA SECCIONES VACÍAS.....	62
TABLA 4.18 CALCULO ANALÍTICO DE $EI_{teo\ eff}$ PARA SECCIONES RELLENAS.....	62

TABLA 4.19 CALCULO ANALÍTICO DE LA FLECHA ELÁSTICA SECCIONES RELLENAS .....	63
TABLA 5.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS .....	64
TABLA 5.2 APORTE DEL HORMIGÓN A LA RESISTENCIA DE LAS SECCIONES .....	65
TABLA 5.3 COMPARACIÓN DE LAS FLECHAS TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES PARA LOS ELEMENTOS VACÍOS .....	66
TABLA 5.4 COMPARACIÓN DE LAS FLECHAS TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES PARA LOS ELEMENTOS RELLENOS .....	66
TABLA 5.5 COMPARACIÓN DE $EI_{exp\ eff}$ Y $EI_{teo\ eff}$ PARA LOS ELEMENTOS RELLENOS .....	67

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 3.1 MOMENTO FLECTOR .....	21
ECUACIÓN 3.2 RELACION MOMENTO CARGA DEL EXPERIMENTO .....	21
ECUACIÓN 3.3 FLECCHA TEORICA.....	22
ECUACIÓN 4.1 PARAMETRO DE ABOLLADURA.....	35
ECUACIÓN 4.2 MOMENTO ÚLTIMO ELASTICO.....	36
ECUACIÓN 4.3 MOMENTO ÚLTIMO PLÁSTICO.....	36
ECUACION 4.4 MÓDULO RESISTENTE ELÁSTICO DE LA SECCIÓN .....	36
ECUACIÓN 4.5 MÓDULO RESISTENTE PLÁSTICO DE LA SECCIÓN .....	37
ECUACIÓN 4.6 MOMENTO ÚLTIMO ELASTICO EFECTIVO.....	40
ECUACIÓN 4.7 MÓDULO RESISTENTE ELÁSTICO EFICAZ .....	40
ECUACIÓN 4.8 ANCHURA REDUCIDA EFECTIVA.....	41
ECUACIÓN 4.9 FACTOR DE REDUCCION DE ANCHURA.....	42
ECUACIÓN 4.10 FACTOR DE REDUCCION .....	42
ECUACIÓN 4.11 MOMENTO PLÁSTICO SEGÚN AISC .....	48
ECUACIÓN 4.12 MOMENTO ELÁSTICO SEGÚN AISC .....	48
ECUACIÓN 4.13 MÓDULO SECCIONAL ELÁSTICO EFECTIVO.....	48
ECUACIÓN 4.14 ANCHO EFECTIVO DE LA SECCIÓN SEGÚN AISC .....	49
ECUACIÓN 4.15 MOMENTO ULTIMO ELÁSTICO DE SECCIONES COMPUESTAS RECTANGULARES .....	55
ECUACIÓN 4.16 MÓDULO SECCIONAL ELÁSTICO EFECTIVO DEL ACERO.....	56
ECUACION 4.17 MOMENTO ÚLTIMO PLÁSTICO DE SECCIONES COMPUESTAS RECTANGULARES .....	58
ECUACIÓN 4.18 PARTE DEL MÓDULO PLÁSTICO QUE NO ACTÚA EN EL ACERO .....	58

ECUACION 4.19 PARTE DEL MÓDULO PLÁSTICO QUE NO ACTÚA EN EL HORMIGÓN.....	58
ECUACIÓN 4.20 ALTURA DESDE EL EJE DE GRAVEDAD AL LÍMITE PLÁSTICO.....	59
ECUACIÓN 4.21 FLECHA PARA ELEMENTOS VACIOS .....	61
ECUACIÓN 4.22 $EI_{teo\ eff}$ DE LOS ELEMENTOS RELLENOS.....	61
ECUACIÓN 4.23 FACTOR DE REDUCCION AISC.....	62

## **RESUMEN**

El presente documento, pretende hacer un estudio comparativo entre lo teórico y experimental, de los elementos tubulares “rectangulares” sujetos a flexión.

Cuando los elementos tubulares de acero se encuentran sometidos a fuertes solicitaciones de naturaleza estática o dinámica, se puede producir el fenómeno del “Pandeo local”, capaz de ocasionar la pérdida de resistencia y rigidez e incluso el colapso del elemento. Planteando el reforzamiento del perfil tubular vertiendo concreto en su interior, se puede obtener un mejor rendimiento de estas secciones. A este tipo de combinación acero - hormigón se las conoce como secciones compuestas.

Las normativas respecto a las secciones compuestas, se encuentran contempladas en los códigos Eurocódigo y AISC americanos. El AISC, en su parte correspondiente al pandeo local estipula que las relaciones ancho espesor deben cumplir ciertos límites para evitar fallas por dicha condición, obtenidas a partir de secciones simples.

La finalidad de la investigación es estudiar el “Pandeo Local” del elemento, por lo cual utilizaremos secciones de acero que sobrepasen este límite establecido por los códigos para observar y evaluar los fenómenos que ocurren en estos materiales al probarlos en un ensayo a flexión.

Para tener un mejor control se realizara los ensayos con secciones huecas y el resto con secciones rellenas de hormigón para analizar la contribución del hormigón a la resistencia del elemento.

## **ABSTRACT**

This paper aims to make a comparative study between the theoretical and experimental of the tubular elements "rectangular" subject to bending.

When the tubular steel elements are subjected to heavy loads either static or dynamic, could appears the "local buckling" phenomenon, able to cause loss of strength and stiffness and even the collapse of the part. Posed the reinforcement of tubular profile, pouring concrete inside, can get a better performance of these sections. These types of combination steel - concrete are known as composite or mixed sections.

The standards regarding composite sections are covered into the Eurocode and AISC American, norms. AISC's current specifications for local buckling, stipule that relationships width thickness must meet certain limits to avoid failures by such condition, obtained from single sections.

This research aim is studies the phenomenon of "local buckling" in elements, for which we will use steel sections that exceeding the limit set by the codes and norms in order to observe and evaluate the phenomena that occur in these materials exposed to bending test.

To have better control the tests are performed with hollow and concrete filled sections in order to analyze the contribution of the concrete in the resistance of part.



# CAPITULO 1

## 1.1 INTRODUCCION

Los elementos combinados Acero - Hormigón y sus ventajas constructivas, han sido ampliamente documentados a través del tiempo y normados por medio de códigos en los diferentes países.

En el caso específico de los perfiles tubulares de acero rellenos de hormigón los materiales se brindan mutuamente los siguientes beneficios; por su parte el hormigón brinda más resistencia al pandeo local del perfil y aumenta su resistencia a las altas temperaturas, mientras que el perfil brinda al hormigón confinamiento evitando su disgregación al resistir fuerzas de compresión.

Este beneficio será cuantificado en un ensayo a flexión de perfiles tubulares, primeramente vacíos y luego rellenos de un hormigón simple, se cuantificara el aporte del concreto a la resistencia del perfil especialmente al pandeo local que es la condición crítica estudiada.

Para este experimento se diseñó dos series de perfiles rectangulares de 2 y 3 milímetros de espesor ( $t$ ), con una altura ( $h$ ), constante de 10 centímetros y base ( $b$ ), variable con el fin de sobrepasar la relación  $b/t$  de 50 recomendada en el código AISC. Con esta configuración se persigue que el material falle a pandeo local.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el estudio del "Pandeo Local", de las secciones compuestas sometidas a un ensayo por flexión del elemento.

Establecer el análisis de datos proveniente del ensayo a flexión con la curva Fuerza - Desplazamiento característica de este ensayo.

Identificar las posibles dificultades técnicas en la construcción de las vigas, como adherencia hormigón – acero, vibración del hormigón etc.

Documentar los fenómenos clásicos que se dan en este tipo de ensayos como deformaciones locales provocadas por la delgadez del acero en la probeta

### **1.3 IMPORTANCIA**

Es importante para nuestro medio comprobar mediante ensayos controlados las diferentes limitaciones y normas contempladas en los códigos extranjeros que se han venido aplicando en ausencia de un código local.

Los nuevos códigos locales de la construcción "NEC", contemplan en capítulos separados al concreto reforzado y el acero estructural en sus capítulos 4 y 5 respectivamente. El capítulo referente a estructuras de acero, entre sus limitaciones menciona que los elementos compuestos no están contemplados en la norma, por lo que se debe tener un referente con esta investigación y las siguientes a realizarse, que den una idea en cuanto a esta disposición que es ampliamente usada actualmente en la construcción.

La experiencia que arroje el resultado obtenido ayudara a futuras investigaciones a conocer una metodología para el correcto ensayo de estos materiales o a mejorar la interacción de los mismos, a partir de los resultados que arroje este experimento.

## CAPITULO 2

### 2.1 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES INDIVIDUALES

Se hará una breve reseña de los materiales que componen los elementos mixtos Hormigón-Acero, para distinguir por separado las fortalezas y debilidades de estos materiales y después explicar su funcionamiento conjunto en los elementos construidos.

#### 2.1.1 ACERO

El tipo de acero empleado en el experimento es del tipo ASTM A36, conformado en caliente en planchas y doblado posteriormente en frío con forma de “U”, para su posterior armado en perfil tubular mediante suelda.

Es el tipo de Acero más utilizado a nivel general para las estructuras de carácter metálico como son los puentes, las torres de alta tensión, las pancartas de señalización en las vías y en las edificaciones.

La densidad media del acero es  $7850 \text{ Kg/m}^3$ , y su módulo de elasticidad “ $E_s$ ” es aproximadamente igual a  $2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ .

Las características químicas de este tipo de Acero se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1.  
Composición Química Acero A36

<b>Composición Química Acero ASTM A36</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Carbono (C)	0.26
Manganeso (Mn)	No hay requisito
Fósforo (P)	0.04
Azufre (S)	0.05
Silicio (Si)	0.4
*Cobre (Cu)	0.2
*Cuando es especificado en el Acero	

Fuente. <http://es.scribd.com/doc/89693272/Acero-ASTM-A36>

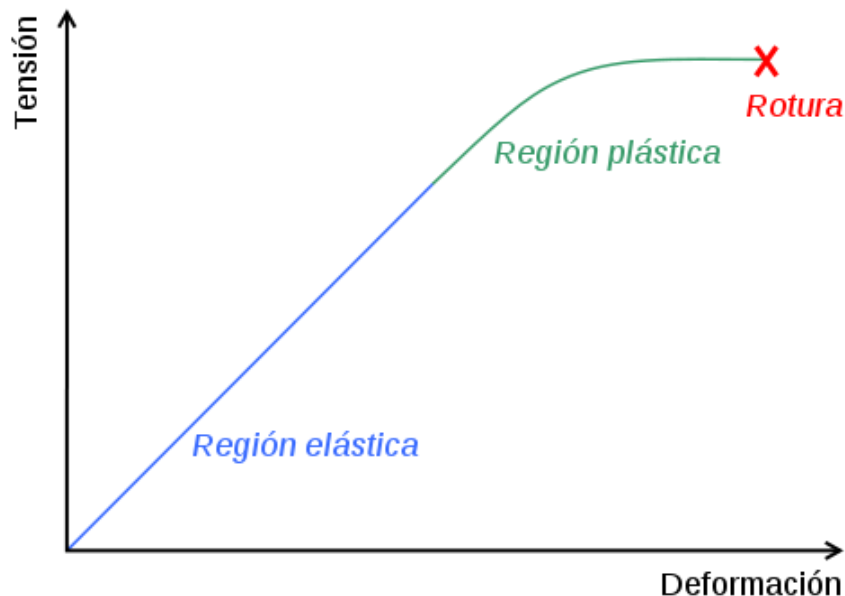
Las ventajas del Acero como material de construcción son muchas empezando por su alta resistencia en relación a su peso, el casi nulo cambio en las propiedades del material a través del tiempo, ventajas constructivas en relación al tiempo comparado con otros materiales, la posibilidad de prefabricación de elementos etc. Y obviamente su alta resistencia a las fuerzas de tracción.

El acero A36 que viene en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores de 203 mm tiene un límite de fluencia mínimo de 250 MPa (2540 Kg/cm<sup>2</sup>), un límite de rotura mínimo de 410 MPa (4100 Kg/cm<sup>2</sup>).

Entre las desventajas estaría su facilidad para propagar el calor debido a sus propiedades térmicas y en el costo de mantenimiento de estas estructuras que requieren de permanente cuidado anti-corrosivo.

Siendo el acero un material dúctil es necesario analizar el comportamiento de esta material mediante la curva característica que presenta en un ensayo esfuerzo – deformación.

Figura 2.1.  
Curva característica Esfuerzo – Deformación del Acero



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Plasticidad\\_\(mecánica\\_de\\_sólidos\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Plasticidad_(mecánica_de_sólidos))

Podemos distinguir dos regiones en la cual el material se comporta de manera distinta y que describimos a continuación:

**Región Elástica.-** Es el rango de esfuerzos donde el material al ser sometido a fuerzas externas, es capaz de retomar su geometría inicial una vez retirada la fuerza.

**Limite Elástico.-** Es el punto límite en donde el acero pierde su capacidad de regresar a su estado inicial y presenta deformación permanente.

**Región Plástica.-** Es la región donde el material no es capaz de regresar a su geometría inicial, donde pequeños o nulos incrementos de carga producen deformaciones rápidas.

**Rotura.-** Es el mayor esfuerzo que puede soportar el acero desde el cual el material empieza a colapsar. Es el máximo valor alcanzado en el ensayo a tracción del material.

**Fotografía 1: Perfiles de Acero Tipo Cajón**



Tomada por: Xavier Flores

### 2.1.2 HORMIGÓN

El hormigón es un material compuesto, ampliamente usado en el medio para diferentes obras de construcción. Está conformado por cemento, arena, ripio, agua y en ciertas ocasiones aditivos que mejoran las propiedades del material.

La principal característica de este material es su alta resistencia a las fuerzas de compresión. Al ser sometido a fuerzas de tracción y corte presenta debilidades que se corrigen agregando una armadura de refuerzo compuesta de acero que ayuda a resistir dichas sollicitaciones.

La densidad media del Hormigón es alrededor de  $2350 \text{ Kg/m}^3$ , y su módulo de elasticidad " $E_c$ " aproximadamente igual a  $15000\sqrt{f'_c}$ .

La resistencia promedio a la compresión del hormigón varía de 100 a 500  $\text{Kg/cm}^2$ .

#### Fotografía 2: Fundición de una losa con hormigón.



Tomada por: Xavier Flores

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HORMIGÓN-ACERO**

Al tener el Acero y el Hormigón similares características de dilatación térmica, se hace muy útil trabajar con estos materiales en la industria de la construcción.

Específicamente en el caso de los perfiles tubulares de acero rellenos de hormigón, se pueden notar las siguientes ventajas:

1. El Acero aporta resistencia a las fuerzas de tracción y corte mientras que el Hormigón brinda resistencia a las fuerzas de compresión.
2. Se retrasa el efecto del pandeo local en el perfil de acero por acción del hormigón contenido en su interior.
3. Al estar confinado el hormigón, este brinda un crecimiento en su resistencia a fuerzas de compresión evitando su disgregación.
4. El perfil de acero sirve como un encofrado para el hormigón aliviando costos por estos rubros.
5. Debido a su facilidad de construcción unir de esta forma los materiales acorta los tiempos de construcción.
6. Debido a la diferente conductividad térmica de los materiales, estos elementos resisten mejor alzas de temperatura en el caso de un incendio.

Los materiales compuestos también tienen sus desventajas, entre las que podemos citar:

1. Es difícil lograr que el hormigón se adhiera a las paredes del perfil tubular y así garantizar el funcionamiento conjunto de los materiales.
2. Es difícil trabajar con secciones de acero pequeñas y esbeltas, especialmente en el vertido del concreto, que pueden ocasionar vacíos en el interior y afectar la resistencia estimada para esos elementos.

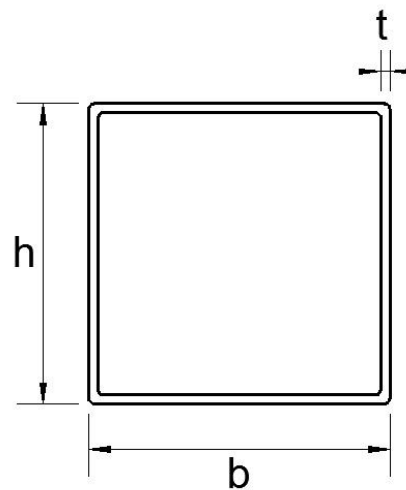
## 2.3 CONSTRUCCION DE LOS MATERIALES COMPUESTOS HORMIGON ACERO PARA EL ENSAYO A FLEXION.

Para la construcción de los elementos compuestos primero se armó un perfil tubular a partir de perfiles “U” unidos mediante suelda, después se vació el hormigón en el perfil. Para las secciones más pequeñas las dimensiones requeridas se encontraban disponibles en forma comercial y no requirieron trabajos de armado por lo cual se vació directamente el hormigón en su interior.

### 2.3.1 CONSTRUCCION DEL PERFIL TUBULAR.

Se utilizó perfiles tubulares-rectangulares de dimensiones comerciales de las siguientes características:

Tabla 2.2  
Perfiles Tipo “Cajón”



Perfil	b (mm)	h (mm)	t (mm)
O 100x100x2	100	100	2
O 100x150x2	150	100	2
O 100x150x3	150	100	3

Elaborado por: Xavier Flores



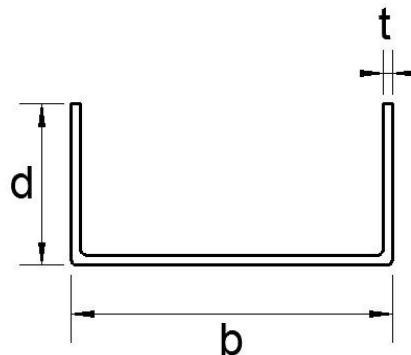
Para las demás dimensiones requeridas armamos perfiles tipo “U” en forma de cajón, unidos con suelda eléctrica, utilizando electrodos 6011.

La simbología del Electrodo 6011 significa:

1. Los dos primeros números la resistencia a la tracción de la suelda (60 lb/pulg<sup>2</sup> ~ 4.21 Kg/cm<sup>2</sup>).
2. Las dos últimas cifras significan:
  - 2.1 La penúltima se refiere a la posición para soldar (1-para todas las posiciones).
  - 2.2 La última para el tipo de corriente a utilizar y su penetración (1-para corriente alterna-continua, de alta penetración).

El resumen de los perfiles tipo “U” utilizados es el siguiente:

Tabla 2.3  
Perfiles Tipo “U”



Perfil	b (mm)	d (mm)	t (mm)
U 200x50x2	200	50	2
U 400x50x2	400	50	2
U 225x50x3	225	50	3
U 300x50x3	300	50	3
U 450x50x3	450	50	3

Elaborado por: Xavier Flores

Por cada dimensión de los perfiles se construyó de 3 a 4 probetas, dependiendo de la disponibilidad del material, con el fin de dejar 1 o 2 probetas vacías, para su respectivo ensayo y posterior comparación con los perfiles rellenos.

El resumen de los perfiles vacíos construidos para el ensayo es el siguiente

Tabla 2.4.  
Probetas de Acero (vacías) armadas.

SERIE 1					
L (m)	h (mm)	b (mm)	t (mm)	b/t	No: Probetas
2	100	100	2	50	1
2	100	150	2	75	1
2	100	200	2	100	2
2	100	400	2	200	2
<b>Total</b>					6

SERIE 2					
L (m)	h (mm)	b (mm)	t (mm)	b/t	No: Probetas
2	100	150	3	50	2
2	100	225	3	75	1
2	100	300	3	100	2
2	100	450	3	150	2
<b>Total</b>					7

<b>Total Probetas Vacías</b>	13
------------------------------	----

Elaborado por: Xavier Flores

Finalmente se armó los siguientes perfiles rectangulares rellenas de hormigón:

Tabla 2.5.

Probetas Acero-Hormigón (Rellenas) armadas.

**SERIE 1**

<b>L (m)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>b/t</b>	<b>No: Probetas</b>
2	100	100	2	50	2
2	100	150	2	75	2
2	100	200	2	100	2
2	100	400	2	200	2
<b>Total</b>					8

**SERIE 2**

<b>L (m)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>b/t</b>	<b>No: Probetas</b>
2	100	150	3	50	2
2	100	225	3	75	2
2	100	300	3	100	2
2	100	450	3	150	2
<b>Total</b>					8

<b>Total Probetas Rellenas</b>	16
--------------------------------	----

Elaborado por: Xavier Flores

### 2.3.2 ELABORACION DEL HORMIGON

Se utilizó un hormigón simple 1:2:3 (Una parte de cemento, dos de arena y tres partes de ripio). Las resistencias que presentó el hormigón en el laboratorio se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2.6  
Compresión en Cilindros de Hormigón

No.	Fecha Fabrica	Descripción	Fecha Rotura	Edad (Días)	P. Especifico (gr/cm <sup>3</sup> )	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	12/12/2013	Tesis	19/12/2013	7	2.20	51
2	12/12/2013	Tesis	19/12/2013	7	2.18	52
3	12/12/2013	Tesis	09/01/2014	28	2.15	82
4	12/12/2013	Tesis	09/01/2014	28	2.14	92

Fuente. Laboratorio de Ensayo de Materiales EPN.

Los ensayos se realizaron a los 119 días de la Fabricación del hormigón (10 de Abril de 2014), esto es a 91 días del último ensayo en el laboratorio, por lo cual debemos hacer una estimación de la resistencia del hormigón.

Para la estimación nos guiaremos según la Instrucción Española EHE donde en su tabla 30.4b proporciona valores estimativos de la resistencia al hormigón en relación a los 28 días.

Tabla 2.7  
Resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo.

Edad del Hormigón (Días)	3	7	28	90	360
Hormigones de endurecimiento normal	0.40	0.65	1.00	1.20	1.35
Hormigones de endurecimiento rápido	0.55	0.75	1.00	1.15	1.20

Fuente. Ministerio de Fomento. EHE. Instrucción de Hormigón Estructura EHE-081 Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid, 2008

Esta información nos dice que para hormigones de endurecimiento normal la resistencia del material a los 90 días es de un 20% más del obtenido a los 28 días, tomaremos ese valor para calcular la resistencia estimada de nuestro concreto a los 119 días.

La mayor resistencia obtenida en laboratorio a los 28 días es de  $92 \text{ Kg/cm}^2$  si le sumamos el 20% de ese valor nos da que para los 119 días en donde comenzamos los ensayos de laboratorio la resistencia del hormigón será de  $110 \text{ Kg/cm}^2$ , que utilizaremos como dato para el diseño de los elementos compuestos.

### **2.3.3 FUNDICION DE LOS ELEMENTOS ACERO - HORMIGON**

La fundición se realizó el día 12 de diciembre de 2013, se formó un solo paquete con todas las secciones con una abertura en un extremo del elemento y la otra tapada con madera. Debido a la altura de los elementos (2 metros), se inclinó los elementos para poder hacer el vaciado del hormigón como se muestra en la fotografías 3 y 4.

#### **Fotografía 3: Fundición de los elementos compuestos 1 de 2**



Tomada por: Xavier Flores

**Fotografía 4: Fundición de los elementos compuestos 2 de 2**

Tomada por: Xavier Flores

## CAPITULO 3

### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se definen los parámetros empleados en los experimentos y su configuración, que se llevaron a cabo en el laboratorio del Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, así como también los cálculos experimentales y resultados obtenidos.

### 3.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Los resultados de un experimento de estas características están relacionados con los materiales empleados, la geometría de la sección, su esbeltez y el punto de aplicación de la carga.

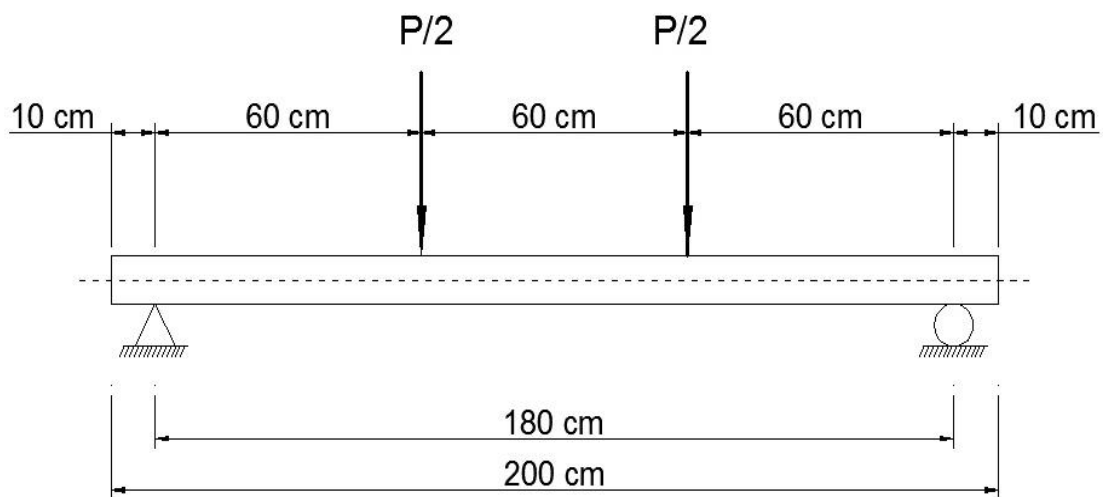
Tomando en cuenta esas variables y los trabajos previos relacionados con los elementos compuestos, las variables a tomar en cuenta en el experimento son las siguientes:

1. Relación  $b/t$ ; Uno de los objetivos de este trabajo es el estudio del “Pandeo Local” de las secciones tanto vacías como rellenas de hormigón, por lo que se empieza con secciones rectangulares comerciales ( $100 \times 150 \times 3 - b/t=50$ ) y se termina con secciones armadas de ( $100 \times 450 \times 3 - b/t=150$ ), con el fin de sobrepasar los límites establecidos  $b/t$ , y estudiar este fenómeno.
2. Longitud del Elemento; La esbeltez no es uno de los parámetros a cuantificar en los ensayos planeados, por lo que debemos establecer una longitud del elemento relativamente corta (2 metros), para asegurar que las secciones no muestres fallos por esta condición.
3. Resistencia a la compresión del hormigón; Con la estimación obtenida en los ensayos ( $110 \text{ Kg/cm}^2$ ), podemos cuantificar el aporte del concreto a la resistencia de los elementos compuestos Acero-Hormigón.
4. Centro Geométrico de la Sección; Para evitar movimientos laterales en la sección transversal y longitudinal del elemento, se trazaron ejes en los elementos, para su ubicación totalmente centrada a las fuerzas aplicadas y evitar este tipo de comportamiento al realizar el experimento.

### 3.3 ESQUEMA Y DIMENSIONES DEL MARCO DE CARGA

Se armó el marco de cargas en el laboratorio según la figura 3.1 que representa un ensayo a flexión compuesto de una viga simplemente apoyada recibiendo la acción de dos fuerzas puntuales. Quedo finalmente como en la fotografía 5.

Figura 3.1  
Esquema del marco de cargas



Elaborado por: Xavier Flores

**Fotografía 5: Marco de Cargas en laboratorio**

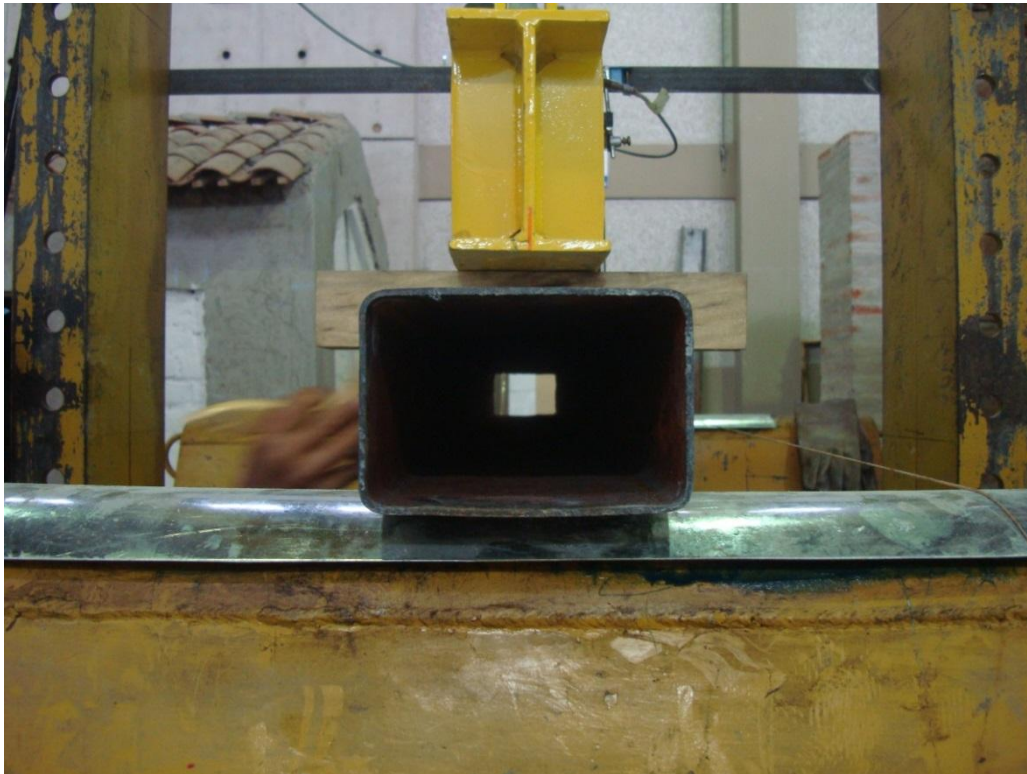


Tomada por: Xavier Flores



Lateralmente se puede apreciar en la fotografía 6, que el distribuidor de cargas está colocado en el centro geométrico de la probeta, repartido por dos troncos de madera (80x80x450 mm), colocados a las distancias anteriormente indicadas.

**Fotografía 6: Vista lateral del ensayo.**



Tomada por: Xavier Flores

### **3.4 SIMBOLOGIA DE LAS PROBETAS**

Con el fin de identificar mejor las probetas en los ensayos, se les asignó una simbología según los siguientes parámetros:

[SR(1-2)-SV(1-2)] (h x b x t)

1. SR o SV; Se refiere a si la serie de probetas es “Rellena de hormigón” (SR) o es una serie de probetas “Vacía” (SV).
2. 1 o 2; Anota el número de serie de las probetas, que se dividieron según el espesor del acero, “1” para espesores de 2 mm y “2” para espesores de 3 mm

3. h; Trata sobre la dimensión en milímetros de la altura del elemento, como esta es constante en todas las probetas se la coloco antes que la base.
4. b; Es la dimensión en milímetros de la base como es variable se colocó después que la altura.
5. t; Se refiere al espesor del acero en milímetros.

Con lo anteriormente anotado el resumen de las probetas con su simbología es el siguiente:

Tabla 3.1 Secciones Vacías  
ensayadas

<b>SECCIONES</b>	<b>Numero Unid.</b>
SV1 100x400x2	2
SV1 100x200x2	2
SV1 100x150x2	1
SV1 100x100x2	1
SV2 100x450x3	2
SV2 100x300x3	2
SV2 100x225x3	1
SV2 100x150x3	2
	13

Tabla 3.2 Secciones Rellenas  
Ensayadas

<b>SECCIONES</b>	<b>Numero Unid.</b>
SR1 100x400x2	2
SR1 100x200x2	2
SR1 100x150x2	2
SR1 100x100x2	2
SR2 100x450x3	2
SR2 100x300x3	2
SR2 100x225x3	2
SR2 100x150x3	2
	16

Elaborado por: Xavier Flores

### 3.5 CALCULOS EXPERIMENTALES

En la flexión simple los datos a tomar en cuenta y que recogen los instrumentos de medición son los siguientes:

1. Fuerza  $P$ ; Esta magnitud se aplica progresivamente al elemento ensayado hasta alcanzar la rotura mediante un sistema hidráulico a presión.
2. Tiempo  $T$ ; Registra el tiempo empleado desde la primera aplicación de la fuerza hasta la rotura del elemento, no muy importante para nuestros propósitos.
3. Desplazamiento; Se mide instalando en la probeta un “Deformímetro” que es un aparato capaz de medir la deformación aplicada conforme aumenta la fuerza aplicada.

Se puede observar en la fotografía 7, el sistema de medición completo.

**Fotografía 7: Sistema de carga y deformación del experimento**

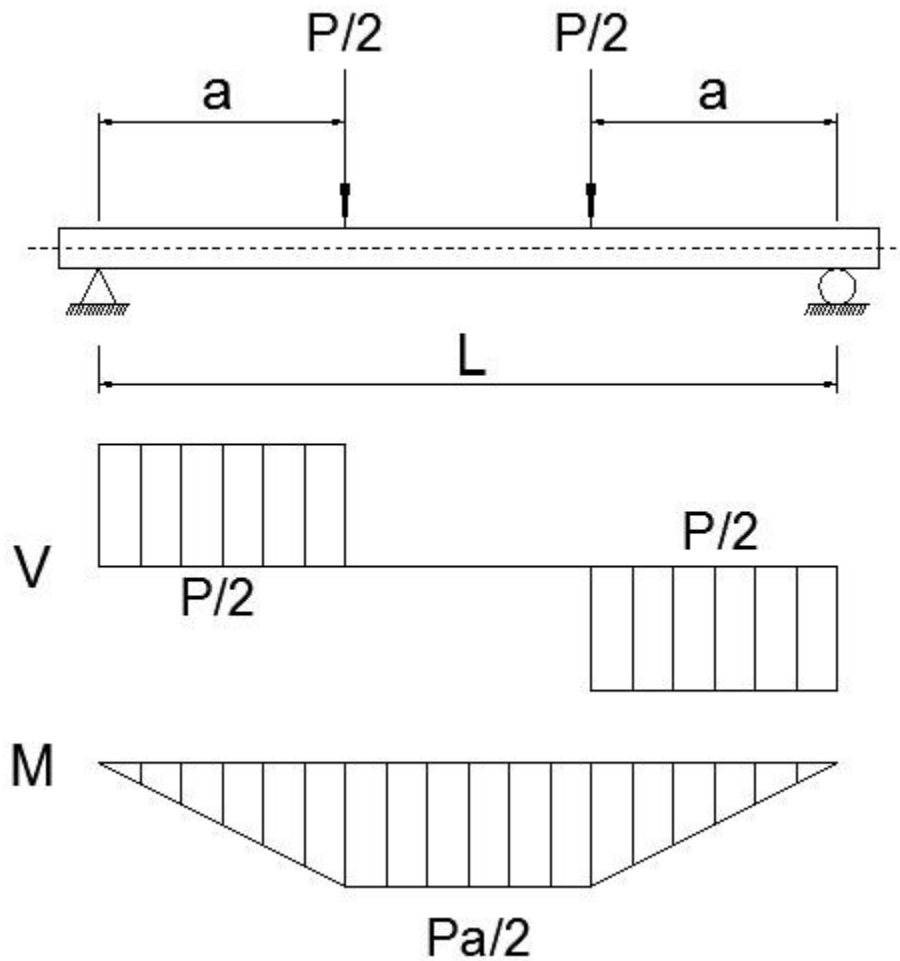


Tomada por: Xavier Flores

### 3.5.1 CALCULO DEL MOMENTO FLECTOR

Para el cálculo del momento flector debemos hacer una idealización del experimento mediante un esquema que se detalla a continuación.

Figura 3.2.  
Modelo de Cálculo Experimental



Elaborado por: Xavier Flores

Dónde:

$P$ ; Es la carga aplicada en los puntos especificados.

$L$ ; Es la longitud de la Viga.

$a$ ; Distancia desde el apoyo hasta la fuerza aplicada.

V; Diagrama de Esfuerzos Cortantes.

M; Diagrama de momentos Flectores.

En la misma figura 3.2 podemos observar también que la parte media del ensayo es la más solicitada a Flexión resultando la expresión mostrada en la ecuación 3.1, para el momento flector.

$$M_s = \frac{P \cdot a}{2} \quad (3.1)$$

Si realizamos las operaciones correspondientes obtenemos el valor del momento flector para cada carga si  $a=0.6$  metros.

$$M_s = \frac{0.6 \cdot P}{2}$$
$$M_s = 0.3 \cdot P \quad (3.2)$$

Esta información nos servirá para calcular el  $M_{ue}$  (Momento último elástico) y el  $M_{up}$  (Momento último Plástico o de rotura) experimentales.

### 3.5.2 CALCULO DE CONSTANTE EI EXPERIMENTAL.

También determinaremos la flecha  $f$  (*Elástica, plástica y de fractura*), del experimento que se presenta a las diferentes cargas.

La flecha para una viga simplemente apoyada sujeta a dos fuerzas  $P/2$  se obtiene a partir de la fórmula 3.3, en los elementos rellenos de hormigón, podemos calcular la constante  $EI_{exp\ eff}$  del elemento combinado y compáralo posteriormente con la  $EI_{teo\ eff}$ , obtenido mediante las formulas proporcionadas por los códigos de construcción para estructuras compuestas.

$$f = \frac{P_e \cdot a \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2)}{24 \cdot EI_{exp\ eff}} \quad (3.3)$$

Dónde:

$f_e$ : Flecha elástica del elemento.

$P_e$ : Carga elástica aplicada.

$a$ : Distancia desde el apoyo a la fuerza más cercana.

$L$ : Distancia entre apoyos.

$EI_{exp\ eff}$ : Constante del material combinado hormigón acero experimental.

### 3.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Se obtuvieron de los ensayos los siguientes datos:

1.  $P_{ue}$ ; Carga ultima elástica, que es el punto limite donde el elemento pierde sus propiedades elásticas o de retorno a su condición inicial y adquiere deformaciones permanentes.
2.  $P_{up}$ ; Carga ultima plástica o también llamada  $P_{máx}$ , es la máxima fuerza aplicada para el colapso del elemento.
3.  $M_{ue}$ ; Obtenido de la fórmula 3.2, usando la carga  $P_{ue}$ .
4.  $M_{up}$ ; Igualmente obtenido de la fórmula 3.2, usando  $P_{up}$ .

Para los elementos de acero sin hormigón estos fueron los resultados experimentales.

Tabla 3.3  
Resultados experimentales de los elementos vacíos.

<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES ELEMENTOS VACIOS</b>					
<b>Probeta</b>	<b>No:</b>	<b>Pue (Ton)</b>	<b>Pup (Ton)</b>	<b>Mue (Ton-m)</b>	<b>Mup (Ton-m)</b>
<b>SERIE 1</b>					
SV1 100x100x2	1	2.480	2.832	0.744	0.849
SV1 100x150x2	1	2.870	3.146	0.861	0.944
SV1 100x200x2	1	2.120	2.330	0.636	0.699
	2	2.170	2.375	0.651	0.712
SV1 100x400x2	1	2.300	2.547	0.690	0.764
	2	2.180	2.566	0.654	0.770
<b>SERIE 2</b>					
SV2 100x150x3	1	4.050	4.419	1.215	1.326
	2	4.100	4.449	1.230	1.335
SV2 100x225x3	1	3.580	3.869	1.074	1.161
SV2 100x300x3	1	4.600	4.880	1.380	1.464
	2	3.420	3.945	1.026	1.184
SV2 100x450x3	1	4.050	4.628	1.215	1.388
	2	4.300	5.064	1.290	1.519

Elaborado por: Xavier Flores

Para los elementos reforzados con hormigón estos fueron los resultados.

Tabla 3.4

Resultados experimentales de los elementos reforzados con Hormigón.

<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES ELEMENTOS RELLENOS</b>					
<b>Probeta</b>	<b>No:</b>	<b>Pue (Ton)</b>	<b>Pup (Ton)</b>	<b>Mue (Ton-m)</b>	<b>Mup (Ton-m)</b>
<b>SERIE 1</b>					
SR1 100x100x2	1	3.200	4.009	0.960	1.203
	2	3.320	4.330	0.996	1.299
SR1 100x150x2	1	3.300	4.039	0.990	1.212
	2	3.300	4.150	0.990	1.245
SR1 100x200x2	1	3.100	4.603	0.930	1.381
	2	3.200	4.594	0.960	1.378
SR1 100x400x2	1	5.300	7.651	1.590	2.295
	2	5.100	7.638	1.530	2.291
<b>SERIE 2</b>					
SR2 100x150x3	1	5.200	7.495	1.560	2.248
	2	5.190	7.554	1.557	2.266
SR2 100x225x3	1	5.000	7.333	1.500	2.200
	2	5.310	7.662	1.593	2.299
SR2 100x300x3	1	6.200	9.148	1.860	2.744
	2	7.100	9.892	2.130	2.968
SR2 100x450x3	1	8.700	11.950	2.610	3.585
	2	8.130	11.908	2.439	3.572

Elaborado por: Xavier Flores.

También se obtuvieron, las deformaciones “Flechas” elásticas, plásticas y de fractura, resumidas en la tabla 3.5. y 3.6. Adicionalmente se calculó la ductilidad de desplazamiento “ $\mu$ ” que es la división de la flecha de fractura y la flecha plástica, todos los valores fueron <4.5 lo que significa que significa que en flexión los materiales no tuvieron ductilidad.



Tabla 3.5  
Resultados experimentales de los elementos vacíos.

<b>FLECHA EXPERIMENTAL DE LOS ELEMENTOS VACIOS</b>				
<b>Probeta</b>	<b>fe</b>	<b>fp</b>	<b>fu</b>	<b><math>\mu=fu/fp</math></b>
	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	
<b>SERIE 1</b>				
SV1 100x100x2	14.0	18.6	56.1	3.02
SV1 100x150x2	18.5	23.6	52.1	2.21
SV1 100x200x2	13.7	18.4	36.1	1.96
	16.1	22.0	40.0	1.82
SV1 100x400x2	17.0	23.8	55.9	2.34
	9.0	22.9	54.0	2.35
<b>SERIE 2</b>				
SV2 100x150x3	14.5	19.2	51.9	2.71
	15.5	20.7	56.0	2.71
SV2 100x225x3	12.7	21.9	58.5	2.67
SV2 100x300x3	11.0	16.9	40.6	2.40
	10.9	21.2	55.0	2.59
SV2 100x450x3	11.1	20.7	50.2	2.43
	8.6	17.3	58.1	3.37

Elaborado por: Xavier Flores.

Tabla 3.6  
Resultados experimentales de los elementos rellenos.

<b>FLECHA EXPERIMENTAL DE LOS ELEMENTOS RELLENOS</b>				
<b>Probeta</b>	<b>fe</b>	<b>fp</b>	<b>fu</b>	<b><math>\mu=fu/fp</math></b>
	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	
<b>SERIE 1</b>				
SR1 100x100x2	15.0	27.6	75.0	2.72
	15.1	36.8	72.0	1.96
SR1 100x150x2	15.2	102.2	125.0	1.22
	14.1	102.5	117.5	1.15
SR1 100x200x2	12.1	57.4	85.0	1.48
	13.2	53.5	84.0	1.57
SR1 100x400x2	17.1	32.2	63.2	1.96
	11.5	26.2	60.0	2.29
<b>SERIE 2</b>				
SR2 100x150x3	16.0	60.8	87.0	1.43
	16.1	64.5	87.5	1.36
SR2 100x225x3	10.0	83.2	112.0	1.35
	14.0	87.5	110.0	1.26
SR2 100x300x3	11.0	46.2	84.0	1.82
	12.0	44.1	78.5	1.78
SR2 100x450x3	10.0	35.1	63.0	1.80
	12.0	35.4	65.2	1.84

Elaborado por: Xavier Flores.

Finalmente se calculo  $EI_{exp\ eff}$  del elemento compuesto, con ayuda de la fórmula 3.3 anteriormente especificada.

Tabla 3.7

Resultados experimentales de  $EI_{exp\ eff}$  para los elementos rellenos.

<b>Probeta</b>	<b><math>EI_{exp\ eff}</math> (Ton-m<sup>2</sup>)</b>
<b>SERIE 1</b>	
SR1 100x100x2	44.2
	45.5
SR1 100x150x2	44.9
	48.4
SR1 100x200x2	53.0
	50.2
SR1 100x400x2	64.2
	91.8
<b>SERIE 2</b>	
SR2 100x150x3	67.3
	66.7
SR2 100x225x3	103.5
	78.5
SR2 100x300x3	116.7
	122.5
SR2 100x450x3	180.1
	140.2

Elaborado por: Xavier Flores.

### 3.6.1 COMPARACION DE RESULTADOS

Para evaluar el aporte del hormigón a la resistencia a flexión del ensayo es necesario comparar los resultados obtenidos de las probetas vacías contra las probetas rellenas de hormigón.

Tabla 3.8

Aporte del Hormigón a la resistencia en el ensayo.

<b>Aporte del Hormigón a la Resistencia a Flexión</b>						
<b>Dimensiones</b>	<b>Probetas Vacías</b>		<b>Probetas Rellenas</b>		<b>Aporte del concreto (%)</b>	
	<b>Mue</b>	<b>Mup</b>	<b>Mue</b>	<b>Mup</b>	<b>Me</b>	<b>Mp</b>
	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>		
<b>Serie 1</b>						
100x100x2	0.744	0.849	0.960	1.203	29.03	41.60
	--	--	0.996	1.299	--	--
100x150x2	0.861	0.944	0.990	1.212	14.98	28.37
	--	--	0.990	1.245	--	--
100x200x2	0.636	0.699	0.930	1.381	46.23	97.55
	0.651	0.712	0.960	1.378	47.47	93.45
100x400x2	0.690	0.764	1.590	2.295	130.43	200.37
	0.654	0.770	1.530	2.291	133.94	197.66
<b>Serie 2</b>						
100x150x3	1.215	1.326	1.560	2.248	28.40	69.60
	1.230	1.335	1.557	2.266	26.59	69.80
100x225x3	1.074	1.161	1.500	2.200	39.66	89.57
	-	-	1.593	2.299	--	--
100x300x3	1.380	1.464	1.860	2.744	34.78	87.48
	1.026	1.184	2.130	2.968	107.60	150.73
100x450x3	1.215	1.388	2.610	3.585	114.81	158.22
	1.290	1.519	2.439	3.572	89.07	135.15

Elaborado por: Xavier Flores

Como podemos apreciar existen aportes del concreto que van desde el 14% hasta máximos del 200% en la resistencia a flexión de los elementos.

### 3.6.2 ANALISIS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

Durante y después de los ensayos es necesario tomar documentación fotográfica de los fenómenos que se presentan, para poder interpretar mejor los resultados numéricos.

En el ensayo de las probetas sin refuerzo de hormigón se pudo apreciar claramente el fallo del elemento por pandeo local, al no existir un material interno los elementos fallaron en los lugares donde se aplicó la carga como se muestra en las siguientes fotografías.

**Fotografía 8 y 9: Falla del elemento sin Hormigón.**



Tomada por: Xavier Flores

**Fotografías 9, 10 y 11: Fallas de los elementos sin hormigón.**



Tomadas por: Xavier Flores

En los ensayos con las probetas de hormigón, se apreció un mejor funcionamiento del elemento a las fuerzas aplicadas alcanzando su rotura a mayores fuerzas.

**Fotografía 12: Elemento listo para ser ensayado**



Tomada por: Xavier Flores

Igual que con los ensayos con probetas vacías se presentaron fallas en los puntos de aplicación de la carga existiendo en las de mayor sección (Elementos Armados), una falla por suelda del material.

**Fotografía 13: Falla del elemento compuesto sin soldar**



Tomada por: Xavier Flores

**Fotografía 14, 15 y 16: Falla del elemento compuesto armado por soldadura.**



Tomada por: Xavier Flores

También existió un “Desplazamiento” interno del bloque de concreto, producido por la fractura interna del elemento.

**Fotografías 17 y 18: Desplazamiento interno del Hormigón.**



Tomada por: Xavier Flores



Para conocer el comportamiento interno del hormigón se cortó con la ayuda de una amoladora dos probetas al azar. Se apreció que la falla del concreto fue por fractura en el sitio de aplicación de la fuerza y en otras partes al azar en las probetas de dimensiones más pequeñas, estas fracturas fueron paralelas entre sí.

**Fotografías 19 y 20: Falla interna del Hormigón.**



Tomada por: Xavier Flores

## CAPITULO 4

### 4.1 ANALISIS DE LA NORMATIVA VIGENTE

Es necesario comparar los resultados obtenidos experimentalmente con normas internacionales para ese propósito utilizaremos dos códigos, el Eurocódigo y el AISC 2015.

### 4.2 ANALISIS DE LOS ELEMENTOS VACIOS.

Para este análisis utilizaremos los códigos Eurocódigo 3 (Proyecto para estructuras de acero), y el AISC (American Institute of Steel Construction 2015).

#### 4.2.1 EUROCÓDIGO 3

Para el diseño a flexión por este código, la norma pide una previa clasificación de los elementos según el tipo.

La norma contempla 4 tipos de clasificación, según su forma transversal y se citan a continuación:

1. Clase 1; son aquellas que pueden desarrollar rótulas plásticas, con la capacidad de rotación requerida para un análisis global plástico, sin reducción de la resistencia de la sección ( $W_{pl}$ ).
2. Clase 2; son aquellas que pueden alcanzar su momento resistente plástico, pero que poseen una capacidad de rotación limitada a causa de la aparición de fenómenos de inestabilidad local (abolladura) ( $W_{pl}$ ).
3. Clase 3; son aquellas para las que la tensión calculada en la fibra comprimida más solicitada del elemento, suponiendo una distribución elástica de tensiones, puede alcanzar el límite de elasticidad del acero, pero en las que el desarrollo de fenómenos de inestabilidad local es susceptible de impedir el desarrollo del momento resistente plástico de la sección ( $W_e$ ).
4. Clase 4; son aquellas en las que la abolladura local se produce antes de alcanzarse el límite de elasticidad en una o varias zonas comprimidas de chapa de la sección transversal ( $W_{eff}$ ).

Para esta clasificación se debe consultar la Tabla 4.1.

Tabla 4.1

Clasificación de las secciones según Eurocódigo 3.

	<b>CLASE 1</b>	<b>CLASE 2</b>	<b>CLASE 3</b>	<b>CLASE 4</b>
$c/t \leq$	$72 \xi^2$	$83 \xi^2$	$124 \xi^2$	$> 124 \xi^2$

Elaborado por: Xavier Flores.

Dónde:

c; Lado más largo de la sección.

t; Espesor.

$\xi$ ; Parámetro de abolladura (formula 4.1).

$$\xi = \sqrt{\frac{235}{fy}} \quad (4.1)$$

$fy$ ; Limite elástico del Acero en N/mm<sup>2</sup>.

Con ayuda de las tablas y las formulas anteriormente especificadas, podemos realizar la tabla 4.2 donde clasificamos las secciones según los parámetros dispuestos en el Eurocódigo.

Tabla 4.2  
Clasificación de los Elementos según el Eurocódigo 3.

C	t	c/t	F <sub>y</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	F <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ε	72 ε <sup>2</sup>	83 ε <sup>2</sup>	124 ε <sup>2</sup>	Tipo de Sección
<b>SERIE 1</b>									
100	2	50	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 1
150	2	75	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 2
200	2	100	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 3
400	2	200	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 4
<b>SERIE 2</b>									
150	3	50	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 1
225	3	75	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 2
300	3	100	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 3
450	3	150	2540	249	0.97	67.95	78.33	117.03	CLASE 4

Elaborado por: Xavier Flores

Como podemos apreciar obtenemos una clasificación diferente de las secciones por cada dimensión disponible.

El siguiente paso es aplicar la fórmula de la resistencia a flexión dependiendo de la clase obtenida.

Para los tipos de sección 1, 2 y 3, las fórmulas del momento último elástico y el momento último plástico, son las siguientes.

$$M_{ue} = W_e \cdot f_y \quad (4.2)$$

$$M_{up} = W_{pl} \cdot f_y \quad (4.3)$$

Dónde:

$W_e$ ; Módulo resistente elástico de la sección.

$$W_e = \frac{I_x}{Y_{max}} \quad (4.4)$$

$I_x$ ; Momento de inercia de la sección respecto al eje de gravedad.

$Y_{max}$ ; Distancia desde la fibra más alejada hasta la línea neutra.

$W_{pl}$ ; Módulo resistente plástico de la sección.

$$W_{pl} = \frac{A}{2} \cdot (Y_{G1} + Y_{G2}) \quad (4.5)$$

$A$ ; Área de la sección.

$Y_{G1}$ ; Distancia del centro de gravedad de la parte superior de la sección a la línea media.

$Y_{G2}$ ; Distancia del centro de gravedad de la parte inferior de la sección a la línea media.

Existe un factor de reducción que divide la ecuación del momento flector

$$M_u = \frac{W \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ que en el caso de estructuras para edificios es, } \gamma_{M0} = 1$$

Los valores de  $M_{ue}$  y  $M_{up}$  para las secciones de clase 1, 2 y 3 según lo anteriormente expuesto se resumen en la tabla 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3 Momento ultimo elástico de las secciones de clase 1, 2 y 3 Eurocódigo 3.

Clase de Sección	h (mm)	b (mm)	t (mm)	Ix (mm <sup>4</sup> )	Ymax (mm)	We (mm <sup>3</sup> )	fy (N/mm <sup>2</sup> )	Mue (N-mm)	Mue (ton-m)
<b>SERIE 1</b>									
CLASE 1	100	100	2	1255445.33	50	25108.91	249	6252117.76	0.64
CLASE 2	100	150	2	1735712.00	50	34714.24	249	8643845.76	0.88
CLASE 3	100	200	2	2215978.67	50	44319.57	249	11035573.76	1.13
<b>SERIE 2</b>									
CLASE 1	100	150	3	2532992.00	50	50659.84	249	12614300.16	1.29
CLASE 2	100	225	3	3591842.00	50	71836.84	249	17887373.16	1.82
CLASE 3	100	300	3	4650692.00	50	93013.84	249	23160446.16	2.36

Elaborado por: Xavier Flores

Tabla 4.4 Momento ultimo plástico de las secciones de clase 1, 2 y 3 Eurocódigo 3.

Clase de Sección	h (mm)	b (mm)	t (mm)	Yg1 - Yg2 (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	A/2 (mm <sup>2</sup> )	Wpl (mm <sup>3</sup> )	fy (N/mm <sup>2</sup> )	Mup (N-mm)	Mup (ton-m)
<b>SERIE 1</b>										
CLASE 1	100	100	2	36.76	784	392	28816	249	7175184	0.73
CLASE 2	100	150	2	39.24	984	492	38616	249	9615384	0.98
CLASE 3	100	200	2	40.89	1184	592	48416	249	12055584	1.23
<b>SERIE 2</b>										
CLASE 1	100	150	3	38.87	1464	732	56904	249	14169096	1.44
CLASE 2	100	225	3	41.13	1914	957	78729	249	19603521	2.00
CLASE 3	100	300	3	42.54	2364	1182	100554	249	25037946	2.55

Elaborado por: Xavier Flores

Para las secciones de clase 4 (SV1 100x400x2 y SV2 100x450x3), se debe aplicar las expresiones siguientes, donde cambia el modulo resistente elástico.

$$M_{ue} = W_{e_{eff}} \cdot f_y \quad (4.6)$$

$$M_{up} = W_{pl} \cdot f_y \quad (4.3)$$

Dónde:

$W_{e_{eff}}$ ; Módulo resistente elástico eficaz.

$$W_{e_{eff}} = \frac{I_{x_{eff}}}{Y_{max}} \quad (4.7)$$

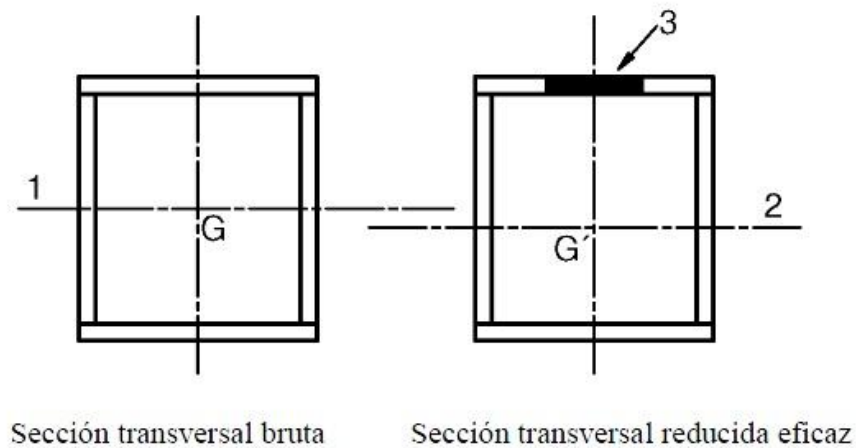
$I_{x_{eff}}$ ; Inercia de la sección eficaz.

$Y_{max}$ ; Distancia desde la fibra más alejada hasta la línea neutra.

Para sacar estos valores es necesario reducir la sección como en la siguiente Figura 4.1 y sacar sus nuevas propiedades.



Figura 4.1  
Esquema de reducción de área eficaz



#### Leyenda

- G Centro de gravedad de la sección bruta
- G' Centro de gravedad de la sección reducida eficaz
- 1 Eje baricéntrico de la sección bruta
- 2 Eje baricéntrico de la sección reducida eficaz
- 3 Área no efectiva

Fuente: Eurocódigo 3.

La anchura reducida es el factor a calcular para la conformación de la nueva sección eficaz.

$$b_{eff} = \rho \cdot (b - 3t) \quad (4.8)$$

Dónde:

$b$ ; Anchura original de la sección.

$t$ ; Espesor de la sección.

$\rho$ ; Factor de reducción que es igual en nuestro caso a la siguiente expresión.

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$$

$$\text{para } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} \quad (4.9)$$

$\bar{\lambda}_p$ ; Factor que se calcula con la expresión.

$$\bar{\lambda}_p = \frac{(b-3t)}{t} \frac{1}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (4.10)$$

$\xi$ ; Se obtiene de la fórmula 4.1

$k_\sigma$  y  $\psi$ ; Se obtienen de la tabla 4.5, para nuestro caso son 4 y 1 respectivamente.

Tabla 4.5

Coefficientes  $k_\sigma$  y  $\psi$

Distribución de tensiones (compresión positiva)			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0
Coefficiente de abolladura $k_\sigma$	4.0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7.81

Fuente: Eurocódigo 3.

Los resultados de la anchura reducida  $b_{eff}$  para las dos secciones clase 4 son las siguientes:

Tabla 4.6 Calculo de la anchura reducida del patín  $b_{eff}$

Clase de Sección	h (mm)	b (mm)	t (mm)	$\xi$	$k\sigma$	$\psi$	$\lambda\rho$ (mm)	$\lambda\rho > 0,5 + \sqrt{(0,085 - 0,055 \cdot \psi)}$	$\rho < 1$	b eff (mm)
<b>SERIE 1</b>										
CLASE 4	100	400	2	0.97	4.00	1.00	3.57	0.67	0.26	104
<b>SERIE 2</b>										
CLASE 4	100	450	3	0.97	4.00	1.00	2.66	0.67	0.34	152

Elaborado por: Xavier Flores.

Con  $B_{eff}$  podemos obtener  $I_{x_{eff}}$  y  $Y_{max}$ , de las dos secciones clase 4, para calcular sus módulos resistentes elásticos y sus momentos elásticos.

Tabla 4.7 Calculo del Momento elástico con sección reducida, para secciones clase 4, Eurocódigo 3.

Clase de Sección	h (mm)	b (mm)	t (mm)	$I_{x \text{ eff}}$ (mm <sup>4</sup> )	Ymax (mm)	W <sub>eff</sub> (mm <sup>3</sup> )	f <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	M <sub>ue</sub> (N-mm)	M <sub>ue</sub> (ton-m)
<b>SERIE 1</b>									
CLASE 4	100	400	2	2110970.65	70.84	29799.52	249	7420080.68	0.76
<b>SERIE 2</b>									
CLASE 4	100	450	3	3871559.90	68.29	56688.83	249	14115518.1	1.44

Elaborado por: Xavier Flores

Los momentos plásticos para las secciones clase 4, son los siguientes.

Tabla 4.8 Calculo del Momento plástico, para las secciones clase 4, Eurocódigo 3.

<b>Clase de Sección</b>	<b>h (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>Yg1 - Yg2 (mm)</b>	<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>A/2 (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Wpl (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>fy (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Mup (N-mm)</b>	<b>Mup (ton-m)</b>
<b>SERIE 1</b>										
CLASE 4	100	400	2	44.16	1984	992.00	87616.00	249	21816384	2.22
<b>SERIE 2</b>										
CLASE 4	100	450	3	44.18	3264	1632.00	144204.00	249	35906796	3.66

Elaborado por: Xavier Flores

#### 4.2.2 AISC (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCCIÓN).

El código americano contempla las mismas fórmulas para calcular el momento en su estado elástico y plástico difiriendo únicamente en su simbología.

Existe una multiplicación final por un factor de seguridad que en este caso es diferente de uno, dependiendo del método de diseño (LRFD o ASD).

Este código presenta una variación en la clasificación de los elementos según su sección transversal en compactos, no-compactos y esbeltos, haciendo una combinación entre sus partes (Alas y Patines), para aplicar las formulas pertinentes a cada caso.

Tabla 4.9  
Clasificación AISC de los elementos rectangulares huecos.

Elemento	Compacto	No - Compacto	Esbelto
	$\lambda < \lambda_p$	$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$	$\lambda > \lambda_r$
Patín	$\lambda_{pf} = 1,12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 31,8$		$\lambda_{rf} = 1,4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 39,7$
Alma	$\lambda_{pw} = 2,42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 68,7$		$\lambda_{rw} = 5,7 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 161,8$

Fuente: AISC

Dónde:

$\lambda_p$ ; Limite de la sección compacta y no-compacta.

$\lambda_r$ ; Limite de la sección no-compacta y esbelta.

$\lambda_f$ ; Relación ancho espesor del patín.

$\lambda_w$ ; Relación ancho espesor del alma.

$f_y$ ; Esfuerzo de fluencia 2540 kg/cm<sup>2</sup>

$E$ ; Módulo de elasticidad 2043000 Kg/cm<sup>2</sup>.

Con estos datos podemos levantar un cuadro con la clasificación de las secciones según la norma AISC.

Tabla 4.10 Clasificación de las secciones según el AISC.

<b>h</b>	<b>b</b>	<b>t</b>	$\lambda_w=h/t$	$\lambda_f=b/t$	<b>F<sub>y</sub></b> <b>(Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	$\lambda_{pw}$	$\lambda_{rw}$	$\lambda_{pf}$	$\lambda_{rf}$	<b>Sección</b> <b>Alma</b>	<b>Sección</b> <b>Patín</b>
<b>SERIE 1</b>											
100	100	2	50	50	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto
100	150	2	50	75	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto
100	200	2	50	100	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto
100	400	2	50	200	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto
<b>SERIE 2</b>											
100	150	3	33.33	50	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto
100	225	3	33.33	75	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto
100	300	3	33.33	100	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto
100	450	3	33.33	150	2540	68.70	161.80	31.80	39.70	Compacta	Esbelto

Elaborado por: Xavier Flores.

Todos los elementos analizados según el código AISC, son de alma compacta y de patín esbelto, según la norma tenemos que revisar dos estados que son, la fluencia (Momento plástico), y el pandeo local del patín (Momentos elástico).

La fluencia se revisa con la expresión 4.11.

$$M_p = \phi \cdot Z_x \cdot f_y \quad (4.11)$$

Dónde:

$M_p$ ; Momento plástico de la sección.

$Z_x$ ; Módulo plástico.

$\phi$ ; Factor de reducción igual a 0,9 (LRFD).

Mientras tanto el pandeo local del patín se revisa con la expresión 4.12.

$$M_e = \phi \cdot S_{eff} \cdot f_y \quad (4.12)$$

Dónde:

$M_e$ ; Momento elástico.

$S_{eff}$ ; Módulo seccional elástico efectivo.

$\phi$ ; Factor de reducción igual a 0,9 (LRFD).

$$S_{eff} = \frac{I_{eff}}{c} \quad (4.13)$$

$I_{eff}$ ; Inercia efectiva de la sección reducida.

$c$ ; Distancia del eje neutro a la fibra más alejada de la sección.



Para el cálculo de la inercia efectiva es necesario reducir la sección analizada, es AISC nos dice que apliquemos la siguiente fórmula de reducción.

$$b_e = 1,92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left[ 1 - \frac{0,38}{b/t} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] < b \quad (4.14)$$

Dónde;

$b_e$ ; Ancho efectivo de la sección.

$b$ ; Ancho original de la sección reducida.

$t$ ; Espesor de la sección.

Al igual que el Eurocódigo, la sección se reduce como en la figura 4.1 y se calcula una nueva inercia efectiva de la sección.

Con estas fórmulas calculamos los momentos plásticos y elásticos teóricos de los elementos estudiados como se puede observar en las tablas 4.11 y 4.12.

Tabla 4.11 Momentos últimos elásticos según el código AISC.

Clase de Sección (Alma-Patín)	h (mm)	b (mm)	t (mm)	B eff (cm)	Ix eff (cm <sup>4</sup> )	c (cm)	S eff (cm <sup>3</sup> )	fy (Kg/cm <sup>2</sup> )	φ LRFD	Mue (Kg-cm)	Mue (Ton-m)
<b>SERIE 1</b>											
Compacto-Esbelto	100	100	2	8.45	117.77	5.20	22.64	2540	0.9	51749.96	0.52
Compacto-Esbelto	100	150	2	9.28	142.50	5.64	25.25	2540	0.9	57715.64	0.58
Compacto-Esbelto	100	200	2	9.69	161.66	6.03	26.80	2540	0.9	61256.71	0.61
Compacto-Esbelto	100	400	2	10.30	210.10	7.09	29.62	2540	0.9	67700.66	0.68
<b>SERIE 2</b>											
Compacto-Esbelto	100	150	3	12.67	236.01	5.24	45.01	2540	0.9	102895.82	1.03
Compacto-Esbelto	100	225	3	13.92	289.25	5.75	50.28	2540	0.9	114932.00	1.15
Compacto-Esbelto	100	300	3	14.54	329.30	6.18	53.25	2540	0.9	121733.68	1.22
Compacto-Esbelto	100	450	3	15.15	386.44	6.83	56.55	2540	0.9	129263.49	1.29

Elaborado por: Xavier Flores.

Tabla 4.12 Momentos últimos plásticos según el código AISC.

Clase de Sección (Alma-Patín)	h (mm)	b (mm)	t (mm)	Yc - Yt (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	A/2 (cm <sup>2</sup> )	Zx (cm <sup>3</sup> )	fy (Kg/cm <sup>2</sup> )	φ LRFD	Mup (Kg-cm)	Mup (ton-m)
<b>SERIE 1</b>											
Compacto-Esbelto	100	100	2	3.68	7.84	3.92	28.82	2540	0.9	65873	0.66
Compacto-Esbelto	100	150	2	3.92	9.84	4.92	38.62	2540	0.9	88276	0.88
Compacto-Esbelto	100	200	2	4.09	11.84	5.92	48.42	2540	0.9	110679	1.11
Compacto-Esbelto	100	400	2	4.42	19.84	9.92	87.62	2540	0.9	200290	2.00
<b>SERIE 2</b>											
Compacto-Esbelto	100	150	3	3.89	14.64	7.32	56.90	2540	0.9	130083	1.30
Compacto-Esbelto	100	225	3	4.11	19.14	9.57	78.73	2540	0.9	179974	1.80
Compacto-Esbelto	100	300	3	4.25	23.64	11.82	100.55	2540	0.9	229866	2.30
Compacto-Esbelto	100	450	3	4.42	32.64	16.32	144.20	2540	0.9	329650	3.30

Elaborado por: Xavier Flores

### **4.3 ANALISIS DE LOS ELEMENTOS RELLENOS DE HORMIGON.**

Para el análisis elástico y plástico utilizaremos las recomendaciones del Eurocódigo 4 (Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón), y las del AISC (American Institute of Steel Construction).

#### **4.3.1 EUROCODIGO 4.**

La norma admite la utilización de la clasificación de secciones huecas utilizada anteriormente en el Eurocódigo 3, y resumida en la tabla 4.2 de este documento.

La norma hace varias recomendaciones para el cálculo del momento elástico y plástico.

Para el momento elástico:

1. El análisis elástico de la sección se puede utilizar para determinar la resistencia a flexión de cualquier clase de sección.
2. Se debe despreciar la resistencia a tracción del hormigón.
3. El área eficaz de la sección de acero estructural alcanza el valor del límite elástico a tracción o a compresión.

Para el momento plástico:

1. Se debe realizar el análisis plástico de secciones utilizando la teoría de la plasticidad.
2. Existe una interacción total entre el acero y el hormigón.
3. El área eficaz del hormigón comprimido alcanza tensiones de  $0.85 f'_c$ , constante en toda la altura entre la fibra neutra plástica y la fibra más comprimida del hormigón.

#### **4.3.2 AISC (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCCIÓN).**

La norma para este tipo de secciones se encuentra contemplada en el capítulo "I" (Diseño de miembros de sección compuesta).

La normativa contempla las mismas disposiciones planteadas en el Eurocódigo 4, respecto al análisis de las secciones por medio de la teoría elástica y plástica

para encontrar los momentos respectivos, por eso se realizó un único análisis, tomando en cuenta las recomendaciones de ambos códigos.

Para nuestro caso (Secciones rectangulares rellenas), el AISC utiliza una nueva forma de clasificación de las secciones para el pandeo local que se muestra en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13

Razones Ancho-Espesor para elementos mixtos rectangulares Acero-Hormigón sujetos a flexión.

Descripción del Elemento	Razón Ancho Espesor	$\lambda_p$ Compacto – No Compacto	$\lambda_r$ No Compacto – Esbelto	Máximo Permitido
<b>Patín</b>	$b/t$	$2,26 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$3,00 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,00 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
<b>Alma</b>	$h/t$	$3,00 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fuente: AISC Capitulo I.

Dónde:

$\lambda_p$ ; Limite de la sección compacta y no-compacta.

$\lambda_r$ ; Limite de la sección no-compacta y esbelta.

$\lambda_f = b/t$ ; Relación ancho espesor del patín.

$\lambda_w = h/t$ ; Relación ancho espesor del alma.

$f_y$ ; Esfuerzo de fluencia 2540 kg/cm<sup>2</sup>.

$E$ ; Módulo de elasticidad del acero 2043000 Kg/cm<sup>2</sup>.

La nueva clasificación se detalla en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Clasificación de las secciones mixtas Acero-Hormigón según el AISC.

<b>h</b>	<b>b</b>	<b>t</b>	$\lambda_w=h/t$	$\lambda_f=b/t$	$\lambda_{pw}$	$\lambda_{rw}$	$\lambda_{w\ max}$	$\lambda_{pf}$	$\lambda_{rf}$	$\lambda_{f\ max}$	<b>Sección Alma</b>	<b>Sección Patín</b>
<b>SERIE 1</b>												
100	100	2	50	50	85	162	162	64	85	142	Compacta	Compacta
100	150	2	50	75	85	162	162	64	85	142	Compacta	No-Compacta
100	200	2	50	100	85	162	162	64	85	142	Compacta	Esbelto
100	400	2	50	200	85	162	162	64	85	142	Compacta	N/A
<b>SERIE 2</b>												
100	150	3	33.33	50	85	162	162	64	85	142	Compacta	Compacta
100	225	3	33.33	75	85	162	162	64	85	142	Compacta	No-Compacta
100	300	3	33.33	100	85	162	162	64	85	142	Compacta	Esbelto
100	450	3	33.33	150	85	162	162	64	85	142	Compacta	N/A

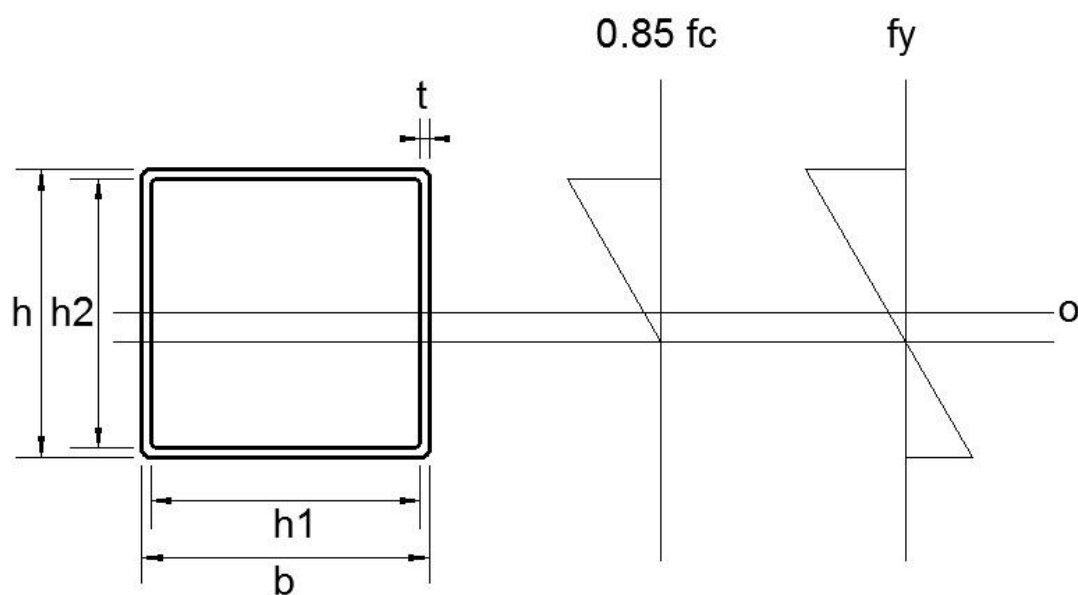
Elaborado por: Xavier Flores

### 4.3.3 ANALISIS ELÁSTICO Y PLÁSTICO DE LAS SECCIONES MIXTAS ACERO-HORMIGON.

Realizamos el análisis elástico y plástico de una sección estándar para aplicar las formulas pertinentes según sea el caso, aplicaremos el factor de reducción 0.9 según el método LRFD del AISC.

El diagrama elástico sería el siguiente:

Figura 4.2 Diagrama elástico de sección tipo.



Elaborado por: Xavier Flores.

Del diagrama se trae la expresión:

$$M_{ue} = \phi \cdot (S_{ey} \cdot f_y + \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot S_{ec}}{2}) \quad (4.15)$$

Dónde:

$M_e$ ; Momento elástico.

$S_{ey}$ ; Modulo seccional elástico efectivo del acero.

$\phi$ ; Factor de reducción igual a 0,9 (LRFD).

$$S_{ey} = \frac{I_{eff}}{c} \quad (4.16)$$

$I_{eff}$ ; Inercia efectiva de la sección reducida.

$c$ ; Distancia del eje neutro a la fibra más alejada de la sección.

$f_y$ ; Esfuerzo de fluencia del acero 2540 kg/cm<sup>2</sup>.

$f'_c$ ; Esfuerzo del hormigón a compresión 110 Kg/cm<sup>2</sup>.

$S_{ec}$ ; Modulo seccional elástico del hormigón, calculado con la misma fórmula del  $S_{ey}$ , pero para la sección de concreto.

Para el cálculo de la inercia efectiva es necesario reducir la sección analizada, es AISC nos dice que apliquemos la siguiente fórmula de reducción.

$$b_e = 1,92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left[ 1 - \frac{0,38}{b/t} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] < b \quad (4.14)$$

Dónde;

$b_e$ ; Ancho efectivo de la sección.

$b$ ; Ancho original de la sección reducida.

$t$ ; Espesor de la sección.

El resumen de los momentos elásticos de las secciones mixtas es el siguiente.



Tabla 4.15 Momentos últimos elásticos analíticos de las secciones rellenas.

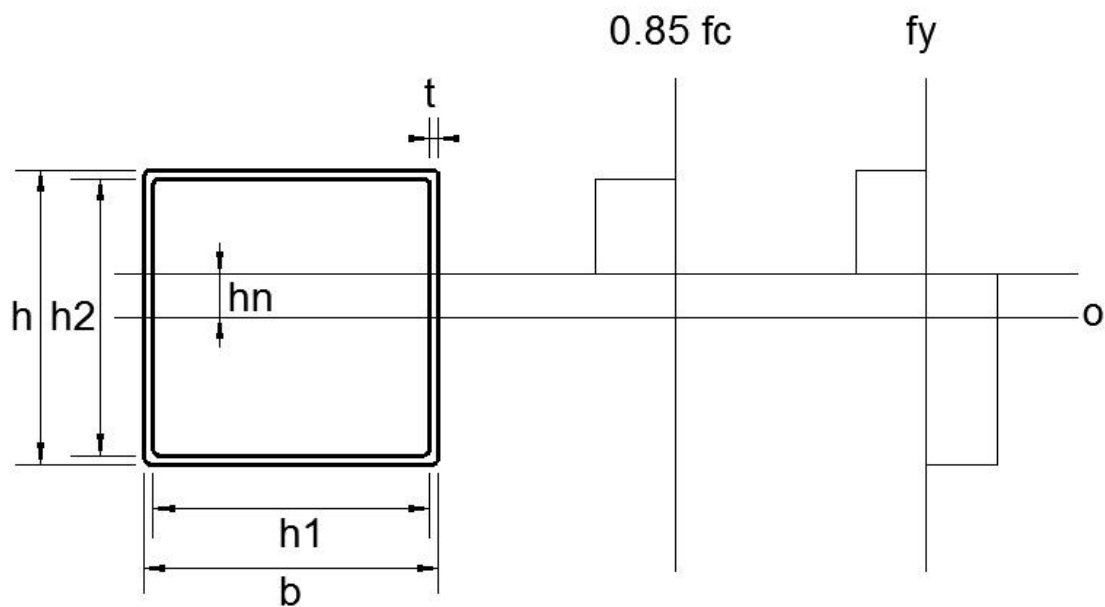
Clase de Sección (Patin)	h (mm)	b (mm)	t (mm)	B eff (cm)	Ix eff (cm <sup>4</sup> )	c (cm)	Sey (cm <sup>3</sup> )	h1 (cm <sup>2</sup> )	h2 (cm <sup>2</sup> )	Sec (cm <sup>3</sup> )	$\phi$ LRFD	Mue (Kg-cm)	Mue (ton-m)
<b>SERIE 1</b>													
Compacta	100	100	2	8.45	117.77	5.20	22.64	9.6	9.6	136.05	0.9	57474	0.57
No-Compacta	100	150	2	9.28	142.50	5.64	25.25	14.6	9.6	190.71	0.9	65740	0.66
Esbelto	100	200	2	9.69	161.66	6.03	26.80	19.6	9.6	239.53	0.9	71335	0.71
N/A	100	400	2	10.30	210.10	7.09	29.62	39.6	9.6	411.55	0.9	85017	0.85
<b>SERIE 2</b>													
Compacta	100	150	3	12.67	236.01	5.24	45.01	14.4	9.4	190.09	0.9	110894	1.11
No-Compacta	100	225	3	13.92	289.25	5.75	50.28	21.9	9.4	263.47	0.9	126018	1.26
Esbelto	100	300	3	14.54	329.30	6.18	53.25	29.4	9.4	329.07	0.9	135579	1.36
N/A	100	450	3	15.15	386.44	6.83	56.55	44.4	9.4	449.68	0.9	148184	1.48

Elaborado por: Xavier Flores.

El análisis plástico de la sección sería el siguiente:

Figura 4.3

Diagrama plástico de sección tipo.



Elaborado por: Xavier Flores.

Del diagrama se desprende la siguiente expresión:

$$M_{up} = 0,9 \cdot (f_y \cdot Z_s + 1/2 \cdot 0,85 \cdot f'_c \cdot Z_c - f_y \cdot Z_{sn} - 1/2 \cdot 0,85 \cdot f'_c \cdot Z_{cn}) \quad (4.17)$$

Dónde:

$f_y$ ; Esfuerzo de fluencia del acero 2540 kg/cm<sup>2</sup>.

$f'_c$ ; Esfuerzo del hormigón a compresión 110 Kg/cm<sup>2</sup>.

$Z_s$ ; Modulo plástico del acero.

$Z_c$ ; Modulo plástico del hormigón.

$$Z_{sn} = 2 \cdot t \cdot h_n^2 \quad (4.18)$$

$$Z_{cn} = h_1 \cdot h_n^2 \quad (4.19)$$

$Z_{sn}$ : Parte del módulo plástico que no actúa en el acero.

$Z_{cn}$ : Parte del módulo plástico que no actúa en el hormigón

$$h_n = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot h_1 \cdot h_2}{2 \cdot [0,85 \cdot f'_c \cdot h_1 + 4 \cdot t \cdot f_y]} \leq \frac{h_2}{2} \quad (4.20)$$

$h_1$ : Base del concreto.

$h_2$ : Altura del concreto.

$h_n$ : Altura desde el eje de gravedad al límite plástico.

$t$ : Espesor de la sección de acero.

Con estas fórmulas calculamos los momentos plásticos últimos teóricos de las secciones y se muestran a continuación.

Tabla 4.16 Momentos plásticos últimos analíticos de las secciones rellenas.

Clase de Sección (Patín)	h (mm)	b (mm)	t (mm)	Yc - Yt (cm)	A/2 (cm <sup>2</sup> )	Zs (cm <sup>3</sup> )	Zsn (cm <sup>3</sup> )	h1 (cm)	h2 (cm)	hn (cm)	Zc (cm <sup>3</sup> )	Zcn (cm <sup>3</sup> )	φ LRFD	Mup (Kg-cm)	Mup (ton-m)
<b>SERIE 1</b>															
Compacta	100	100	2	3.68	3.92	28.82	0.87	9.60	9.60	1.47	884.74	20.76	0.9	100247	1.00
No – Compacta	100	150	2	3.92	4.92	38.62	1.49	14.60	9.60	1.93	1345.54	54.32	0.9	139202	1.39
Esbelto	100	200	2	4.09	5.92	48.42	2.07	19.60	9.60	2.28	1806.34	101.55	0.9	177671	1.78
N/A	100	400	2	4.42	9.92	87.62	3.84	39.60	9.60	3.10	3649.54	380.35	0.9	329058	3.29
<b>SERIE 2</b>															
Compacta	100	150	3	3.89	7.32	56.90	1.24	14.40	9.40	1.44	1272.38	29.86	0.9	179517	1.80
No - Compacta	100	225	3	4.11	9.57	78.73	2.14	21.90	9.40	1.89	1935.08	78.12	0.9	253214	2.53
Esbelto	100	300	3	4.25	11.82	100.55	2.98	29.40	9.40	2.23	2597.78	146.04	0.9	326210	3.26
N/A	100	450	3	4.42	16.32	144.20	4.41	44.40	9.40	2.71	3923.18	326.12	0.9	470922	4.71

Elaborado por: Xavier Flores.

#### 4.4 CALCULO ANALITICO DE LA FLECHA.

Para el cálculo de la flecha en el rango elástico utilizamos la siguiente expresión, para los elementos vacíos.

$$f = \frac{P_e \cdot a \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2)}{24 \cdot E_s \cdot I_{sx}} \quad (4.21)$$

Dónde:

$f$ : Flecha elástica del elemento.

$P_e$ : Carga elástica aplicada en Kg.

$a$ : Distancia desde el apoyo a la fuerza más cercana.

$L$ : Distancia entre apoyos.

$E_s$ : Módulo de elasticidad del acero 2043000 Kg/cm<sup>2</sup>.

$I_{sx}$ : Inercia de la sección de acero.

Para las secciones rellenas se debe aplicar la siguiente expresión para el cálculo  $EI_{teo\ eff}$ .

$$EI_{teo\ eff} = E_s \cdot I_{sx} + C_3 \cdot E_c \cdot I_{cx} \quad (4.22)$$

Dónde:

$E_s$ : Módulo de elasticidad del acero 2043000 Kg/cm<sup>2</sup>.

$I_{sx}$ : Inercia de la sección de acero efectiva.

$E_c$ : Módulo de elasticidad del hormigón  $15100 \cdot \sqrt{f'_c}$ , 158370 Kg/cm<sup>2</sup>.

$I_{cx}$ : Inercia de la sección de concreto.

$C_3$ : Factor de reducción.

$$C_3 = 0.6 + 2 \cdot \left( \frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.9 \quad (4.23)$$

$A_s$ : Área del Acero.

$A_c$ : Área del concreto.

Los cálculos de la  $EI_{teoeff}$  son los siguientes.

El resumen de los resultados se encuentran en las tablas 4.16, 4.17 y 4.18 respectivamente.

Tabla 4.17

Calculo analítico de la flecha elástica secciones vacías.

Clase de Sección	h (mm)	b (mm)	t (mm)	Pe (Kg)	Es (Kg/cm <sup>2</sup> )	Isx (cm <sup>4</sup> )	f (cm)
<b>SERIE 1</b>							
SV1	100	100	2	1725	2043000	117.77	1.48
SV1	100	150	2	1924	2043000	142.50	1.37
SV1	100	200	2	2042	2043000	161.66	1.28
SV1	100	400	2	2257	2043000	210.10	1.09
<b>SERIE 2</b>							
SV2	100	150	3	3430	2043000	236.01	1.47
SV2	100	225	3	3831	2043000	289.25	1.34
SV2	100	300	3	4058	2043000	329.30	1.25
SV2	100	450	3	4309	2043000	386.44	1.13

Elaborado por: Xavier Flores.

Tabla 4.18

Calculo analítico de  $EI_{teoeff}$  para secciones rellenas.

Clase de Sección	Es (Kg/cm <sup>2</sup> )	Isx (cm <sup>4</sup> )	As (cm <sup>2</sup> )	Ac (cm <sup>2</sup> )	C3	Ec (Kg/cm <sup>2</sup> )	Icx (cm <sup>4</sup> )	EI teo eff (Ton-m <sup>2</sup> )
<b>SERIE 1</b>								
SR1 100x100x2	2043000	117.77	7.84	92.2	0.76	158370	707.79	32.5
SR1 100x150x2	2043000	142.50	9.84	140.2	0.73	158370	1076.43	41.6
SR1 100x200x2	2043000	161.66	11.84	188.2	0.72	158370	1445.07	49.5
SR1 100x400x2	2043000	210.10	19.84	380.2	0.70	158370	2919.63	75.3
<b>SERIE 2</b>								
SR2 100x150x3	2043000	236.01	14.64	135.4	0.80	158370	996.70	60.8
SR2 100x225x3	2043000	289.25	19.14	205.9	0.77	158370	1515.82	77.6
SR2 100x300x3	2043000	329.30	23.64	276.4	0.76	158370	2034.93	91.7
SR2 100x450x3	2043000	386.44	32.64	417.4	0.75	158370	3073.16	115.2

Elaborado por: Xavier Flores

Tabla 4.19

Calculo analítico de la flecha elástica secciones rellenas.

Clase de sección	h (mm)	b (mm)	t (mm)	Pe (Kg)	<i>El teo eff</i> (Ton-m <sup>2</sup> )	f (cm)
<b>SERIE 1</b>						
SR1	100	100	2	1916	32.5	1.22
SR1	100	150	2	2191	41.6	1.09
SR1	100	200	2	2378	49.5	1.00
SR1	100	400	2	2834	75.3	0.78
<b>SERIE 2</b>						
SR2	100	150	3	3696	60.8	1.26
SR2	100	225	3	4201	77.6	1.12
SR2	100	300	3	4519	91.7	1.02
SR2	100	450	3	4939	115.2	0.89

Elaborado por: Xavier Flores.

## CAPITULO 5

### 5.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo haremos una comparación entre los resultados experimentales obtenidos y los datos obtenidos de forma teórica.

#### 5.1.1 COMPARACIÓN DE MOMENTOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.

En los resultados experimentales de existir dos probetas se realizara un promedio entre los momentos semejantes y además se tomaran los valores teóricos correspondientes al código AISC.

Tabla 5.1

Comparación de resultados experimentales y teóricos.

Probeta	Experimentales		Teóricos		Variación Mue	Variación Mup
	Mue	Mup	Mue	Mup		
	(Ton-m)	(Ton-m)	(Ton-m)	(Ton-m)	(%)	(%)
<b>SERIE 1 ELEMENTOS VACIOS</b>						
SV1 100x100x2	0.74	0.85	0.52	0.66	43.77	28.96
SV1 100x150x2	0.86	0.94	0.58	0.88	49.18	6.92
SV1 100x200x2	0.64	0.71	0.61	1.11	5.05	-36.24
SV1 100x400x2	0.67	0.77	0.68	2.00	-0.74	-61.71
<b>SERIE 2 ELEMENTOS VACIOS</b>						
SV2 100x150x3	1.22	1.33	1.03	1.30	18.81	2.26
SV2 100x225x3	1.07	1.16	1.15	1.80	-6.55	-35.52
SV2 100x300x3	1.20	1.32	1.22	2.30	-1.18	-42.41
SV2 100x450x3	1.25	1.45	1.29	3.30	-3.10	-55.90
<b>SERIE 1 ELEMENTOS RELLENOS</b>						
SR1 100x100x2	0.98	1.25	0.57	1.00	70.16	24.79
SR1 100x150x2	0.99	1.23	0.66	1.39	50.59	-11.76
SR1 100x200x2	0.95	1.38	0.71	1.78	32.47	-22.35
SR1 100x400x2	1.56	2.29	0.85	3.29	83.49	-30.31
<b>SERIE 2 ELEMENTOS RELLENOS</b>						
SR2 100x150x3	1.56	2.26	1.11	1.80	40.54	25.74
SR2 100x225x3	1.55	2.25	1.26	2.53	22.72	-11.17
SR2 100x300x3	2.00	2.86	1.36	3.26	47.15	-12.45
SR2 100x450x3	2.52	3.58	1.48	4.71	70.36	-24.01

Elaborado por: Xavier Flores.

Cerca de la mitad de los resultados (15) no cumplieron la resistencia teórica esperada y presentan variación negativa, especialmente en las secciones con mayor relación  $b/t$ .



También podemos evaluar el aporte del hormigón a la resistencia por flexión en la Tabla 5.2, para los elementos experimentales y los teóricos.

Tabla 5.2

Aporte del Hormigón a la resistencia de las secciones.

<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>						
<b>SECCION</b>	<b>Elementos Vacíos</b>		<b>Elementos Rellenos</b>		<b>Aporte Mue</b>	<b>Aporte Mup</b>
	<b>Mue</b>	<b>Mup</b>	<b>Mue</b>	<b>Mup</b>		
	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
<b>SERIE 1</b>						
100x100x2	0.74	0.85	0.98	1.25	31.45	47.26
100x150x2	0.86	0.94	0.99	1.23	14.98	30.14
100x200x2	0.64	0.71	0.95	1.38	46.85	95.48
100x400x2	0.67	0.77	1.56	2.29	132.14	199.01
<b>SERIE 2</b>						
100x150x3	1.22	1.33	1.56	2.26	27.48	69.70
100x225x3	1.07	1.16	1.55	2.25	43.99	93.81
100x300x3	1.20	1.32	2.00	2.86	65.84	115.76
100x450x3	1.25	1.45	2.52	3.58	101.56	146.17

<b>RESULTADOS TEORICOS</b>						
<b>SECCION</b>	<b>Elementos Vacíos</b>		<b>Elementos Rellenos</b>		<b>Aporte Mue</b>	<b>Aporte Mup</b>
	<b>Mue</b>	<b>Mup</b>	<b>Mue</b>	<b>Mup</b>		
	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(Ton-m)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
<b>SERIE 1</b>						
100x100x2	0.52	0.66	0.57	1.00	11.06	52.18
100x150x2	0.58	0.88	0.66	1.39	13.90	57.69
100x200x2	0.61	1.11	0.71	1.78	16.45	60.53
100x400x2	0.68	2.00	0.85	3.29	25.58	64.29
<b>SERIE 2</b>						
100x150x3	1.03	1.30	1.11	1.80	7.77	38.00
100x225x3	1.15	1.80	1.26	2.53	9.65	40.69
100x300x3	1.22	2.30	1.36	3.26	11.37	41.91
100x450x3	1.29	3.30	1.48	4.71	14.64	42.86

Elaborado por: Xavier Flores.

Obtenemos aportes del 199% de aumento en la resistencia para los resultados experimentales y aportes teóricos de hasta el 64%.

### 5.1.2 COMPARACION DE FLECHAS

Se realizó una comparación entre las flechas obtenidas en los ensayos y las flechas calculadas mediante las fórmulas de la teoría de la elasticidad, los resultados fueron.

Tabla 5.3

Comparación de las flechas teóricas y experimentales para los elementos vacíos.

SECCION	Flecha		Variación
	Experimental	Teórica	%
	cm	cm	
<b>SERIE 1</b>			
SV1 100x100x2	1.40	1.48	-5.7
SV1 100x150x2	1.85	1.37	35.2
SV1 100x200x2	1.49	1.28	16.4
SV1 100x400x2	1.30	1.09	19.5
<b>SERIE 2</b>			
SV2 100x150x3	1.50	1.47	1.9
SV2 100x225x3	1.27	1.34	-5.4
SV2 100x300x3	1.10	1.25	-12.3
SV2 100x450x3	0.99	1.13	-12.8

Elaborado por: Xavier Flores

Tabla 5.4

Comparación de las flechas teóricas y experimentales para los elementos rellenos.

SECCION	Flecha		Variación
	Experimental	Teórica	%
	cm	cm	
<b>SERIE 1</b>			
SR1 100x100x2	1.51	1.22	23.5
SR1 100x150x2	1.47	1.09	34.3
SR1 100x200x2	1.27	1.00	27.1
SR1 100x400x2	1.43	0.78	83.4
<b>SERIE 2</b>			
SR2 100x150x3	1.61	1.26	27.5
SR2 100x225x3	1.20	1.12	7.1
SR2 100x300x3	1.15	1.02	12.7
SR2 100x450x3	1.10	0.89	23.9

Elaborado por: Xavier Flores

### 5.1.3 COMPARACION DE EI EXPERIMENTAL Y TEORICO.

Para los elementos rellenos se calculó anteriormente dos constantes EI, proveniente de los resultados experimentales y de los teóricos, los resultados fueron los siguientes.

Tabla 5.5

Comparación de  $EI_{exp\ eff}$  y  $EI_{teo\ eff}$  para los elementos rellenos.

SECCION	EI		Variación
	Experimental	Teórica	%
	Ton-m <sup>2</sup>	Ton-m <sup>2</sup>	
<b>SERIE 1</b>			
SR1 100x100x2	44.84	32.54	37.8
SR1 100x150x2	46.69	41.58	12.3
SR1 100x200x2	51.61	49.47	4.3
SR1 100x400x2	77.98	75.25	3.6
<b>SERIE 2</b>			
SR2 100x150x3	67.00	60.77	10.3
SR2 100x225x3	91.01	77.58	17.3
SR2 100x300x3	119.57	91.69	30.4
SR2 100x450x3	160.17	115.21	39.0

Elaborado por: Xavier Flores.

Podemos ver que existe una variación máxima del 40% entre el valor experimental y el teórico de EI.

## CAPITULO 6

### 6.1 CONCLUSIONES.

Las secciones tubulares que no requirieron de armado previo, mostraron un mejor comportamiento al ser ensayadas, mientras que varias secciones armadas presentaron fallos por soldadura en los elementos rellenos.

Las curvas momento – deflexión obtenidas en los ensayos de elementos vacíos, fueron más lineales según su relación  $b/t$  era menor, en cambio las mayores presentaron desfases importantes debido al acomodo del material mientras recibía la carga.

En los elementos rellenos la curva momento – deflexión, fue más definida y no existió gran diferencia de los valores obtenidos entre las probetas de la misma dimensión.

El 46% de las probetas fallaron antes que su estimación teórica principalmente en el rango plástico, posiblemente debido al deterioro del material por corrosión.

En las secciones rellenas de mayor dimensión, se pudo documentar el desplazamiento interno del hormigón a grandes cargas, debido a la poca adherencia y la falta de una armadura interna que haga trabajar a los dos materiales en conjunto, esto hizo que la suposición para el cálculo teórico donde se especifica que debe existir interacción total entre el acero y el concreto, cause variación entre los resultados teóricos y prácticos.

La contribución del hormigón simple elaborado de forma artesanal fue muy significativa, aportando resistencias del 199% en algunos casos y en el caso más desfavorable del 14%.

La deformación vertical del elemento o “flecha”, presento variaciones mayores a las esperadas en los cálculos del 15% al 30% de su valor teórico.

El valor  $EI_{exp\,eff}$  obtenido de cada sección por ensayos, fue del 3% al 40% mayor que la  $EI_{teo\,eff}$  obtenida por el AISC. Este es un valor esperado por la naturaleza conservadora de los códigos constructivos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/AISC 360-10. (2010). Specifications for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois, USA.

ACI 318-05. (2005). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

Martín López S. (2011). Estudio del comportamiento a flexión de Perfiles tubulares de aceros utilizados en protecciones colectivas y medios auxiliares de edificación. España. Tesis fin de Master Universidad Politécnica de Madrid.

Carrasco S, Herrera R, Beltrán J y Massone L. (2010). Recomendaciones de Diseño de Columnas Mixtas. Chile. Asociación Latinoamericana del Acero – Alacero.

Eurocódigo 3. (2008). Proyecto de Estructuras de Acero. España. Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR.

Eurocódigo 4. (2011). Proyecto de Estructuras Mixtas de Acero y Hormigón. España. Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR.

Hernández D. (2012). Estudio experimental del pandeo de perfiles tubulares rectangulares de acero, rellenos de hormigón de alta resistencia, bajo carga axial y diagrama de momentos variable. España. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia.

Espinoza P. (2014). Diseño Estructural de una Edificación con Secciones Mixtas. Ecuador. Monografía de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras de Acero y Hormigón Armado, Universidad de Cuenca.

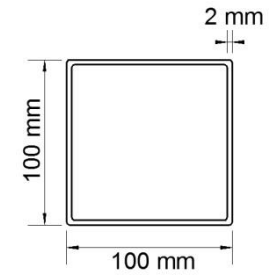
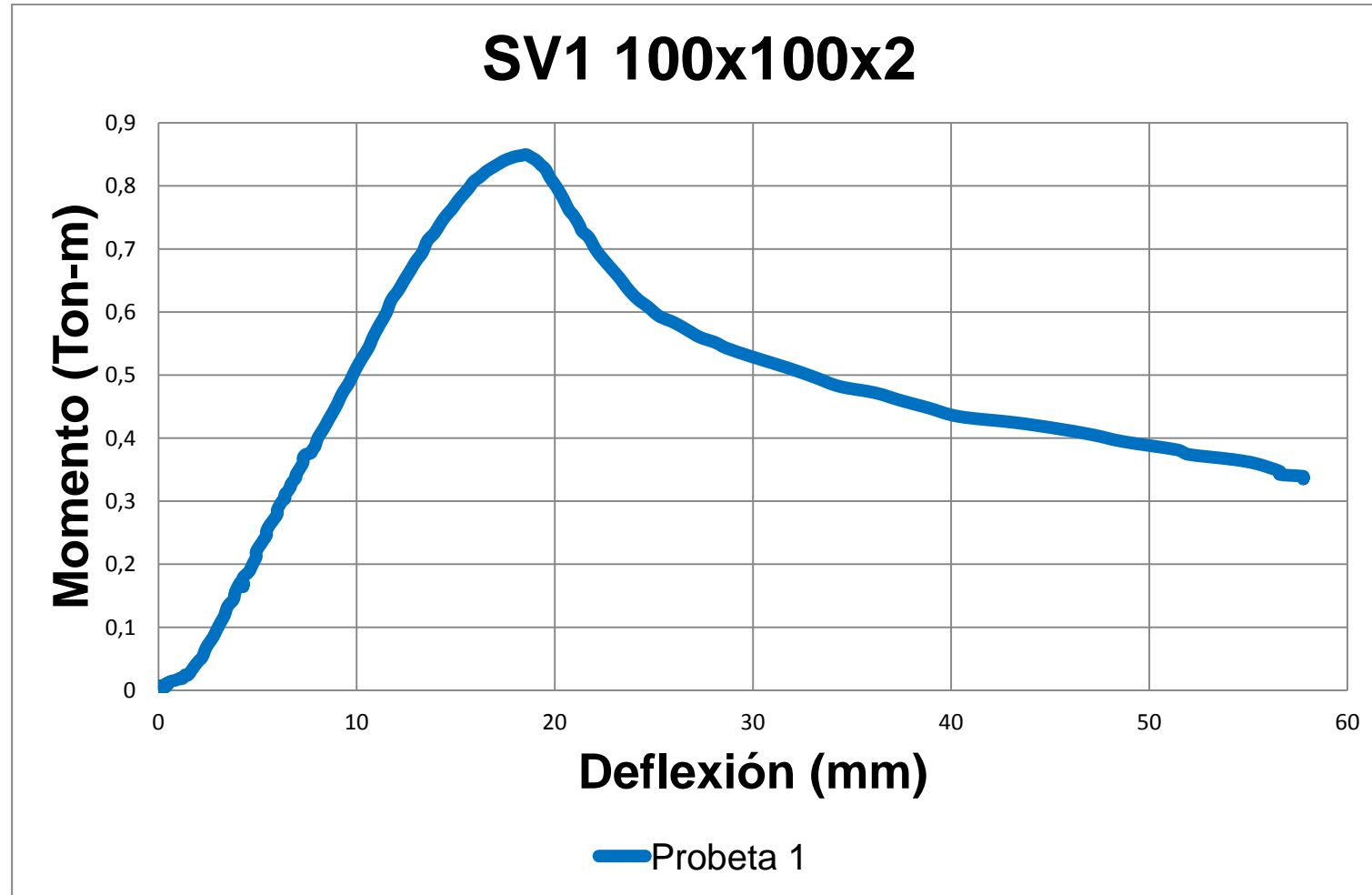
Leon R. T. y Hajjar J. F. (2008). Limit State Response of Composite Columns and Beam-Columns Part II: Application of Design Provisions for the 2005 AISC Specification. Estados Unidos, Engineering Journal, First Quarter: 21-46.

## **ANEXOS**



**ANEXOS No: 1**  
**GRÁFICAS MOMENTO – DEFLEXIÓN**  
**ELEMENTOS VACIOS**

Gráfico 1. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



Probeta 1

$M_{e1} = 0.74 \text{ Ton-m}$

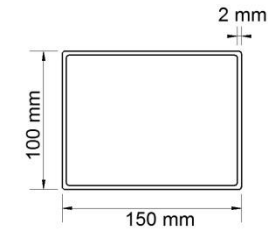
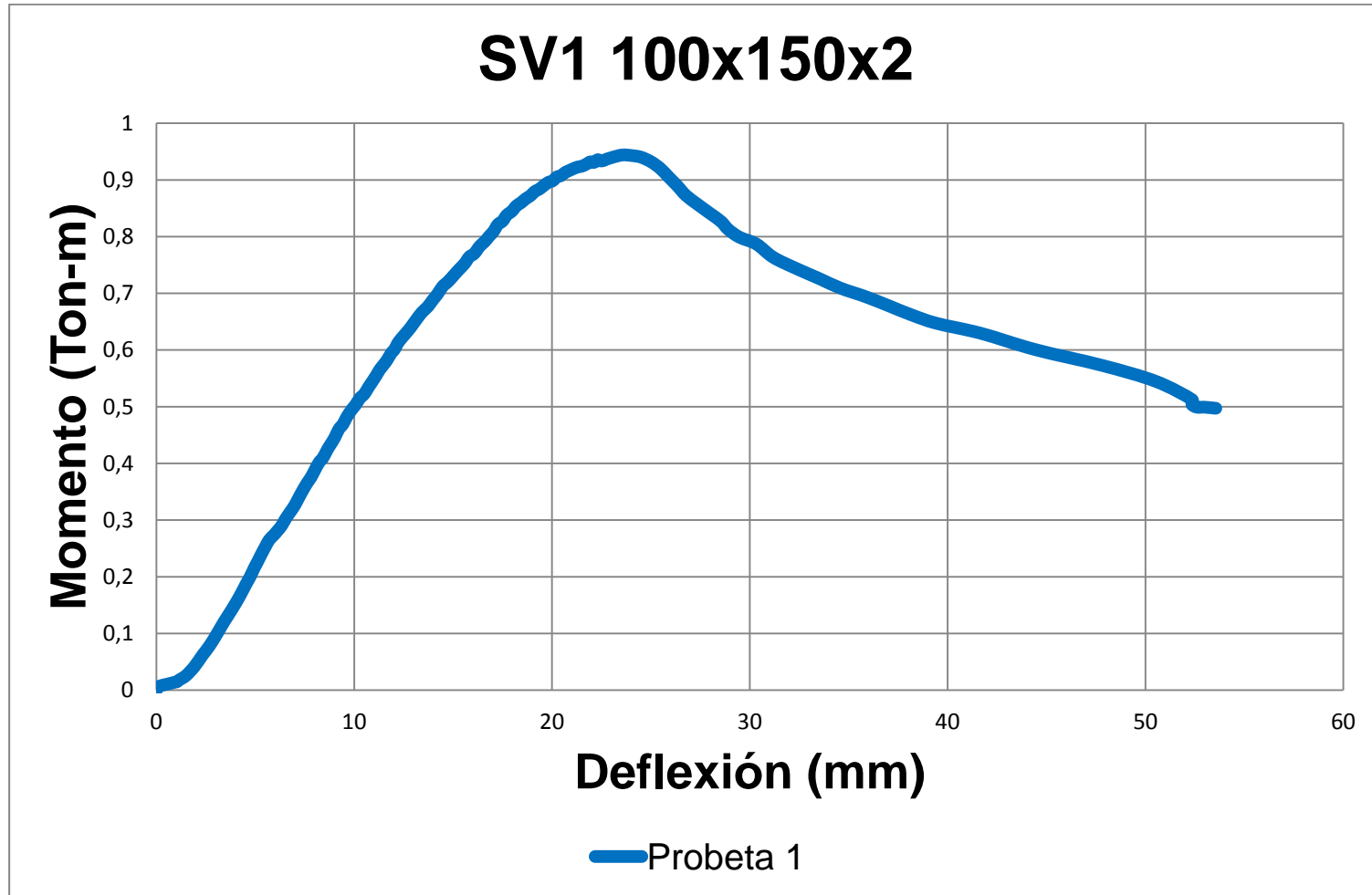
$M_{p1} = 0.85 \text{ Ton-m}$

$f_{u1} = 5.61 \text{ cm}$

$f_{p1} = 1.86 \text{ cm}$

$\mu = 3.02$

Gráfico 2. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



Probeta 1

Me1 = 0.86 Ton-m

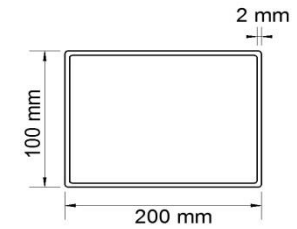
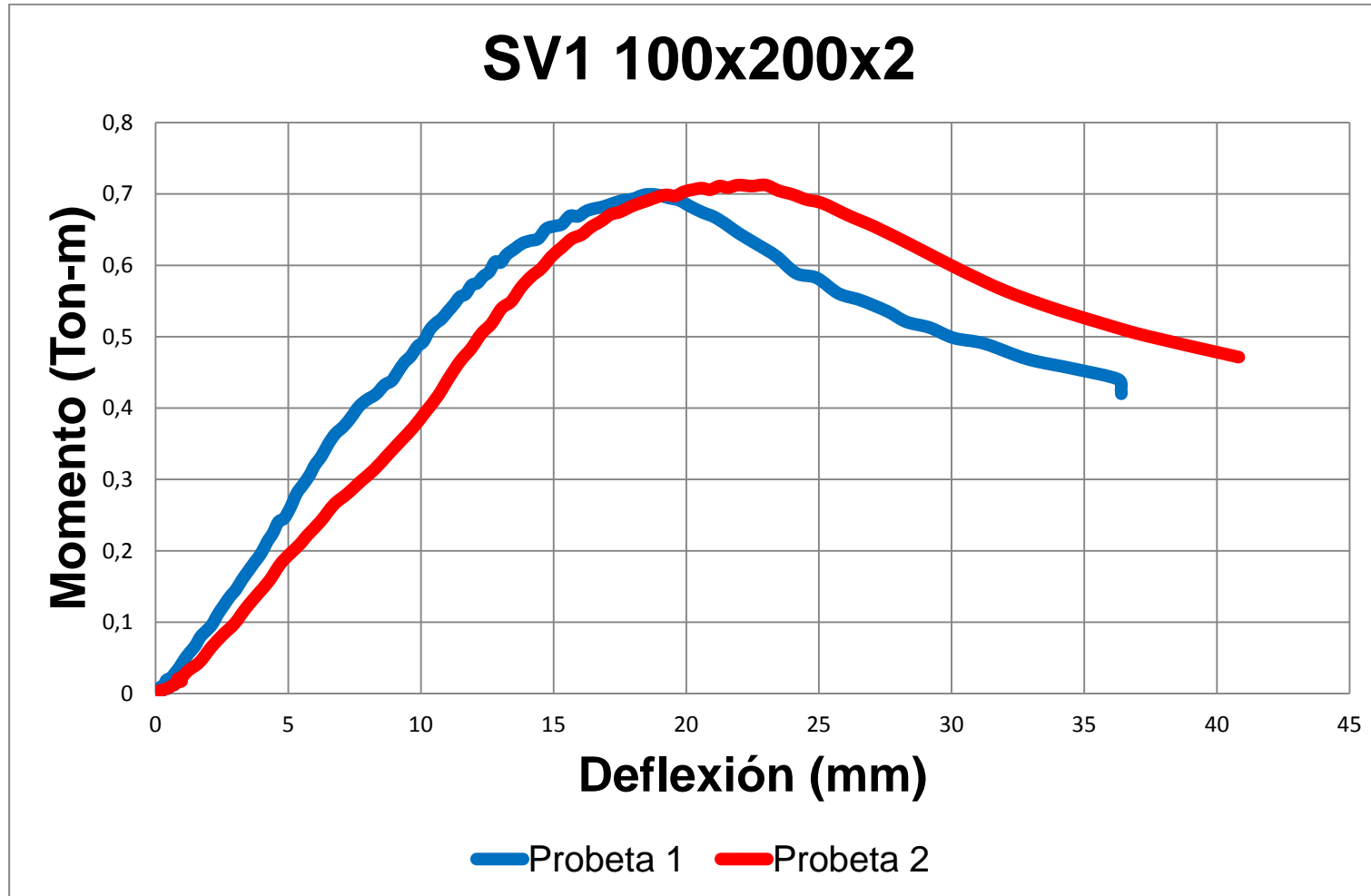
Mp1 = 0.94 Ton-m

fu1 = 5.21 cm

fp1 = 2.36 cm

 $\mu = 2.21$

Gráfico 3. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



Probeta 1

Me1 = 0.64 Ton-m

Mp1 = 0.69 Ton-m

fu1 = 3.61 cm

fp1 = 1.84 cm

$\mu = 1.96$

Probeta 2

Me2 = 0.65 Ton-m

Mp2 = 0.71 Ton-m

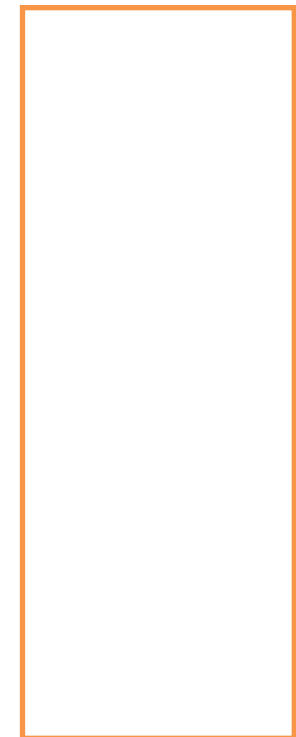
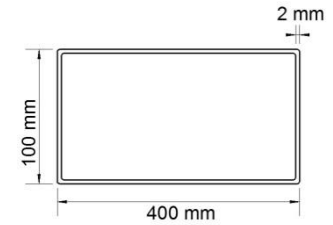
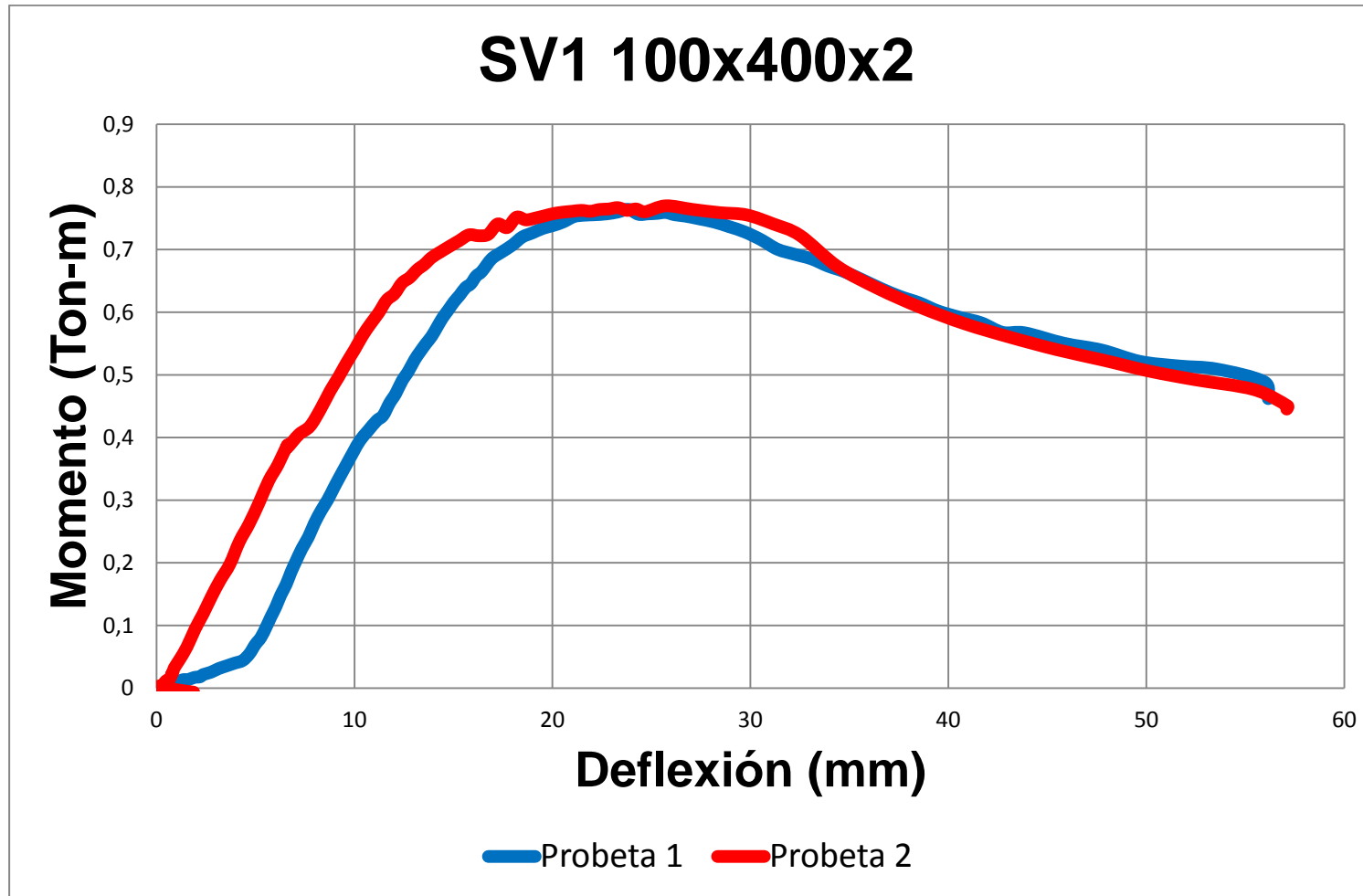
fu2 = 4.00 cm

fp2 = 2.20 cm

$\mu = 1.82$

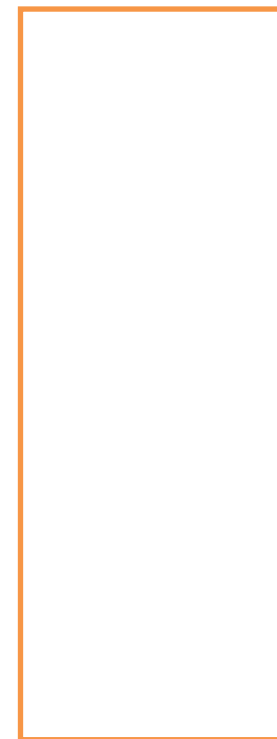
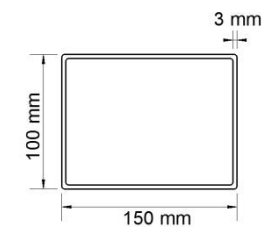
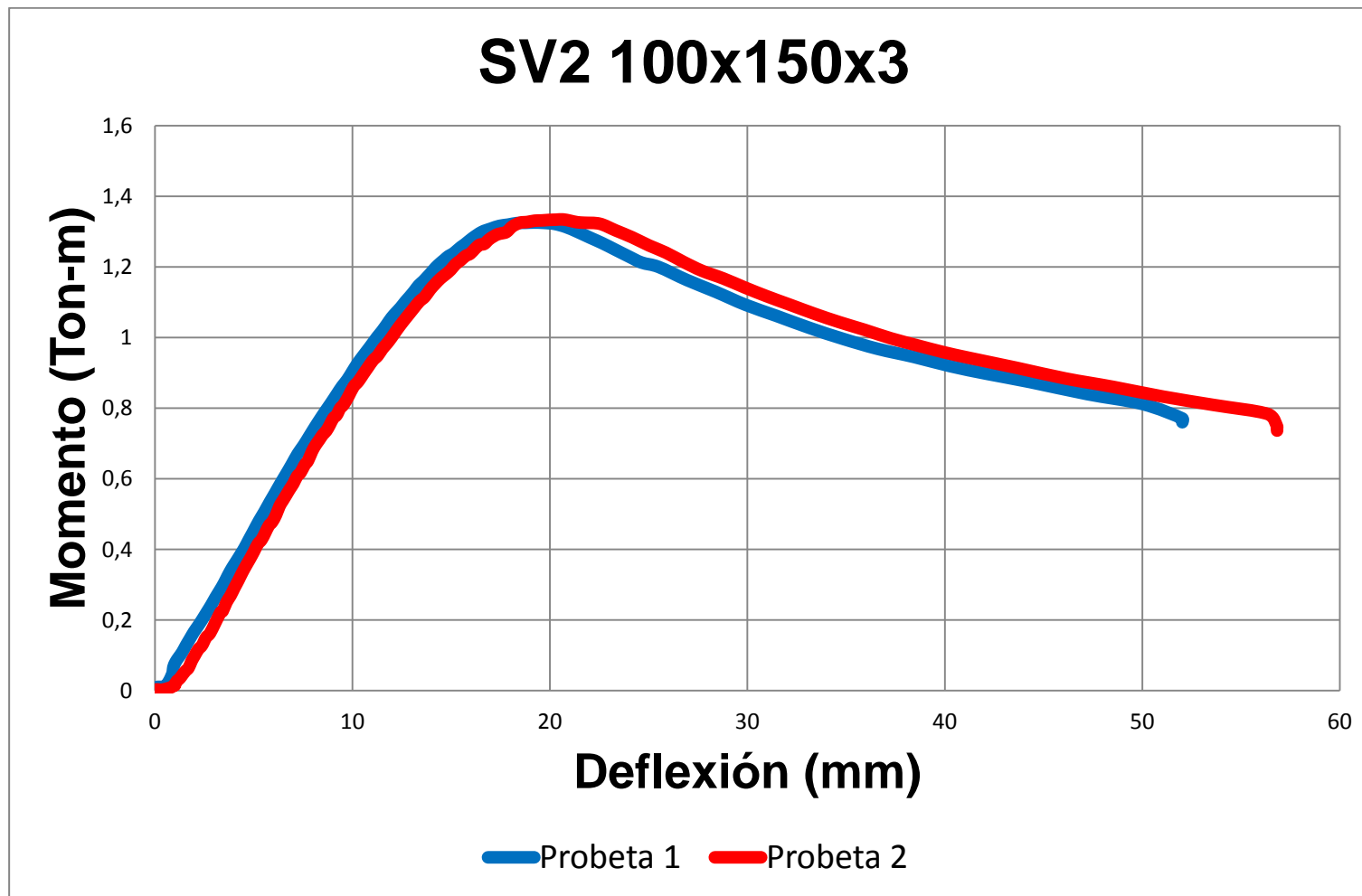
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 4. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



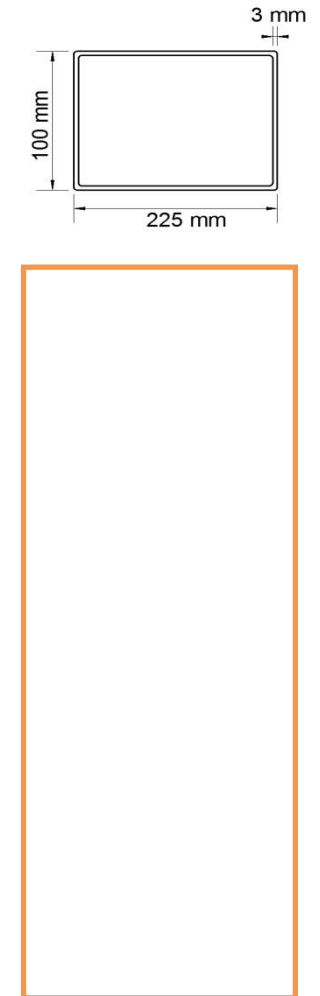
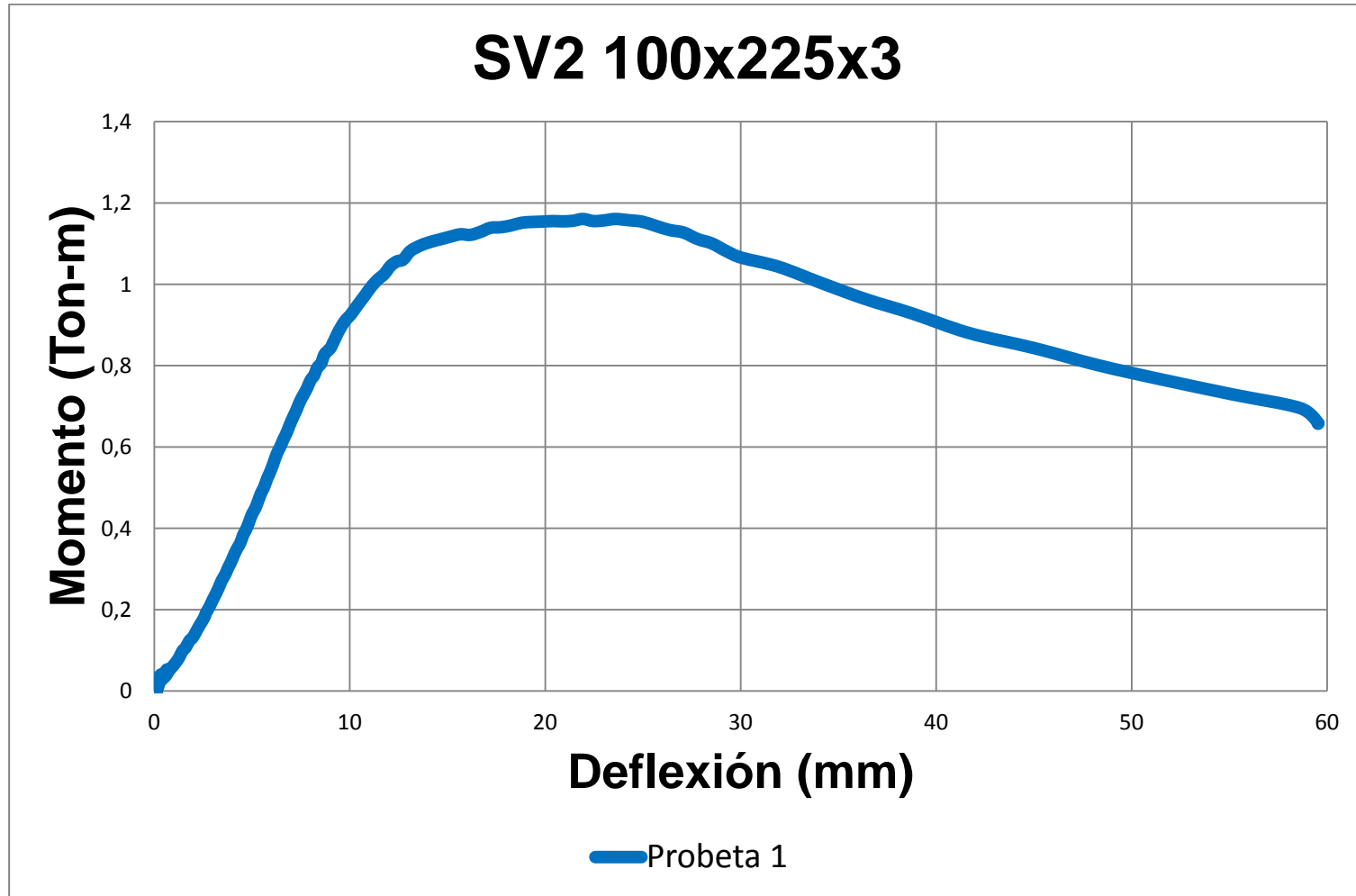
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 5. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



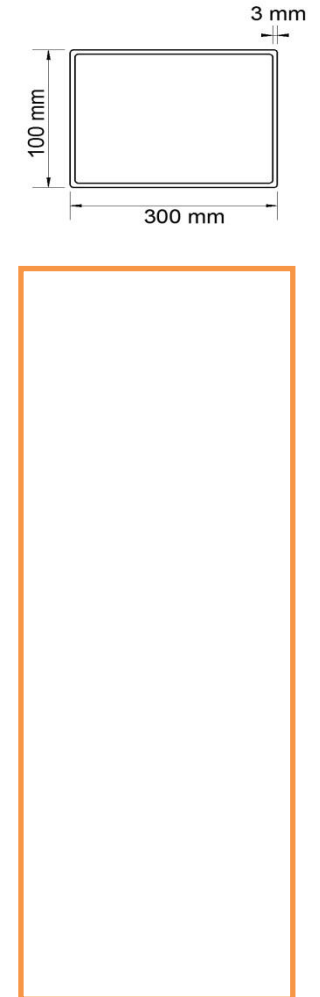
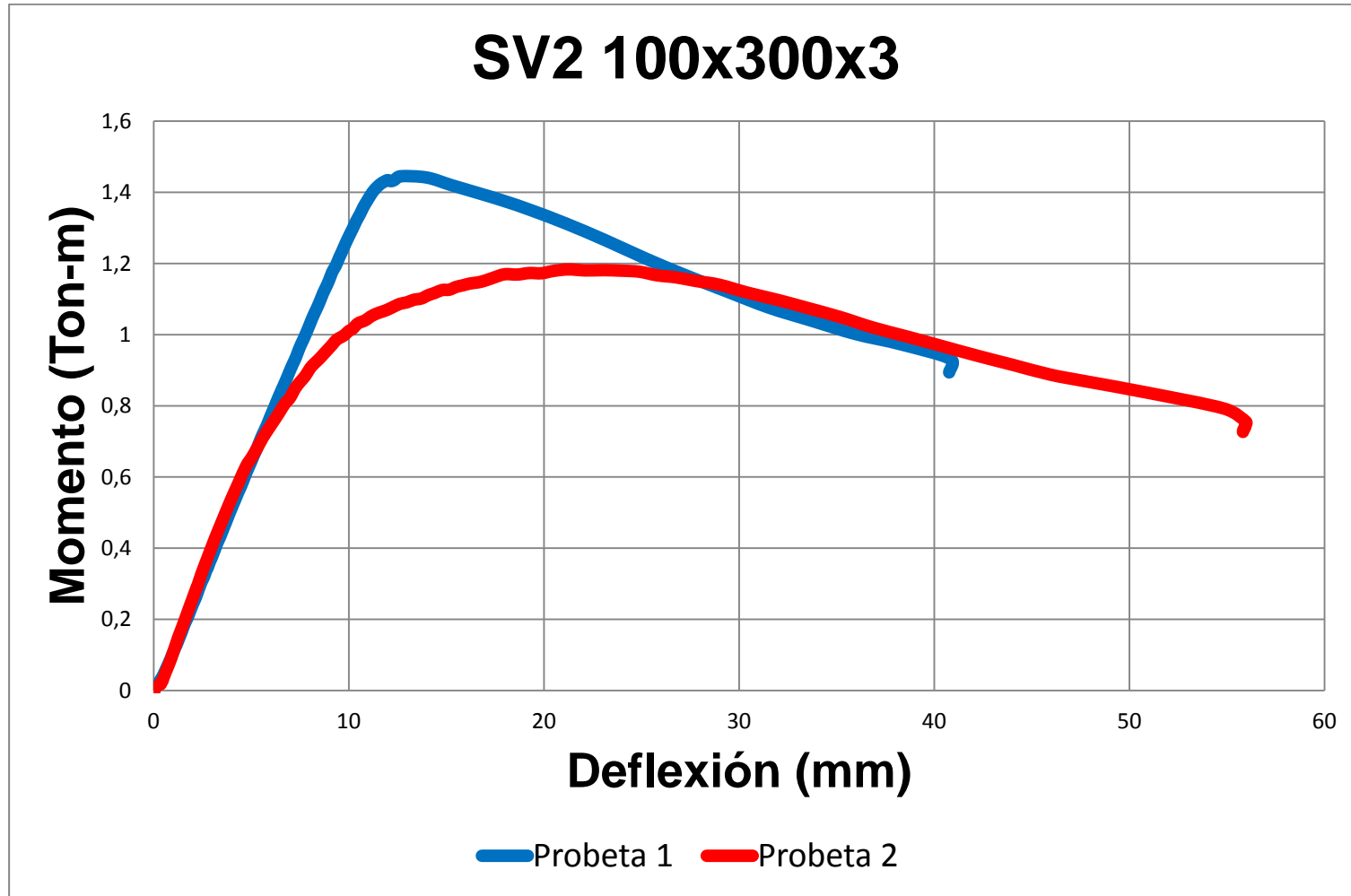
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 6. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



Elaborado por: Xavier Flores.

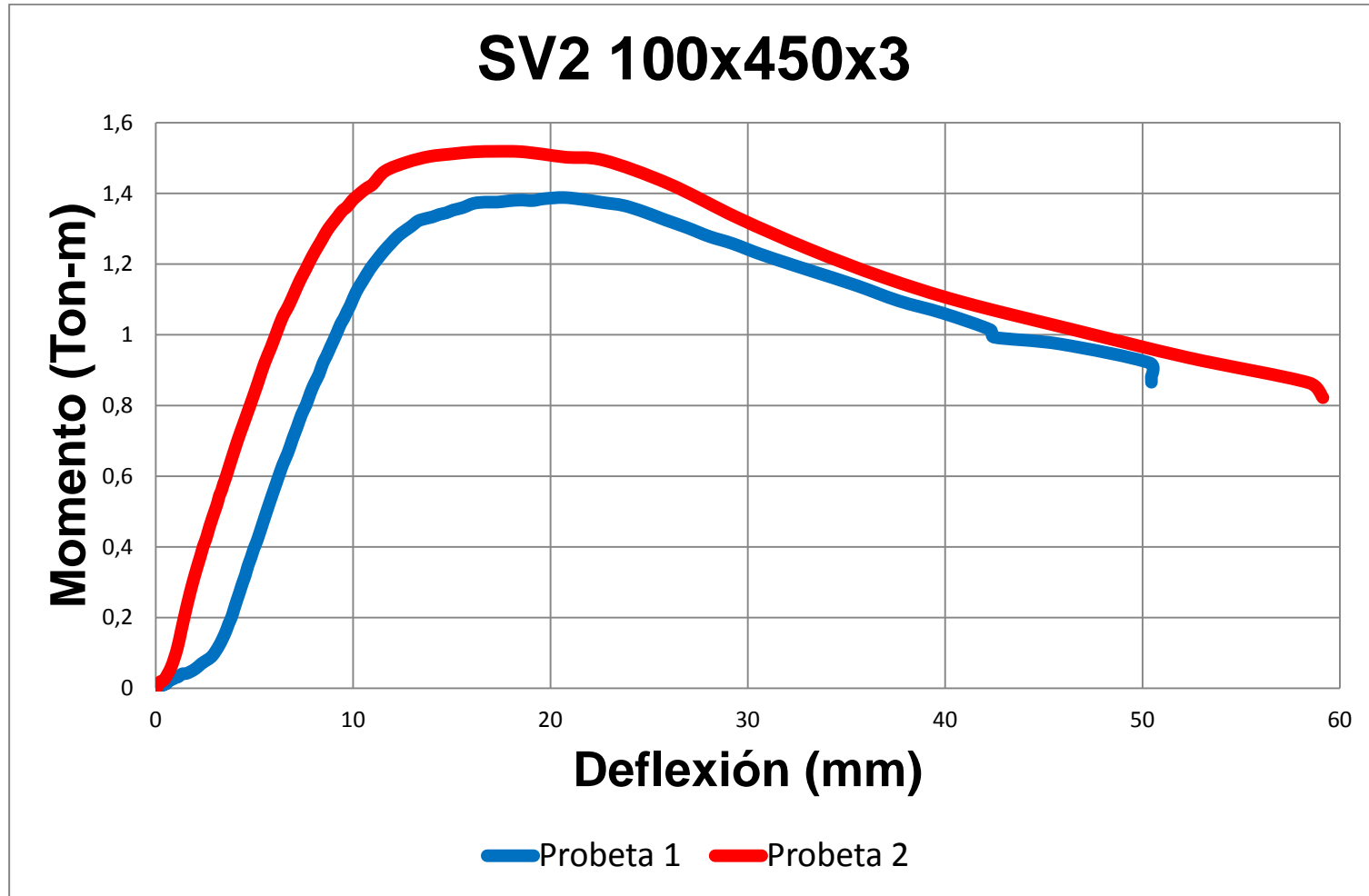
Gráfico 7. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



Elaborado por: Xavier Flores.

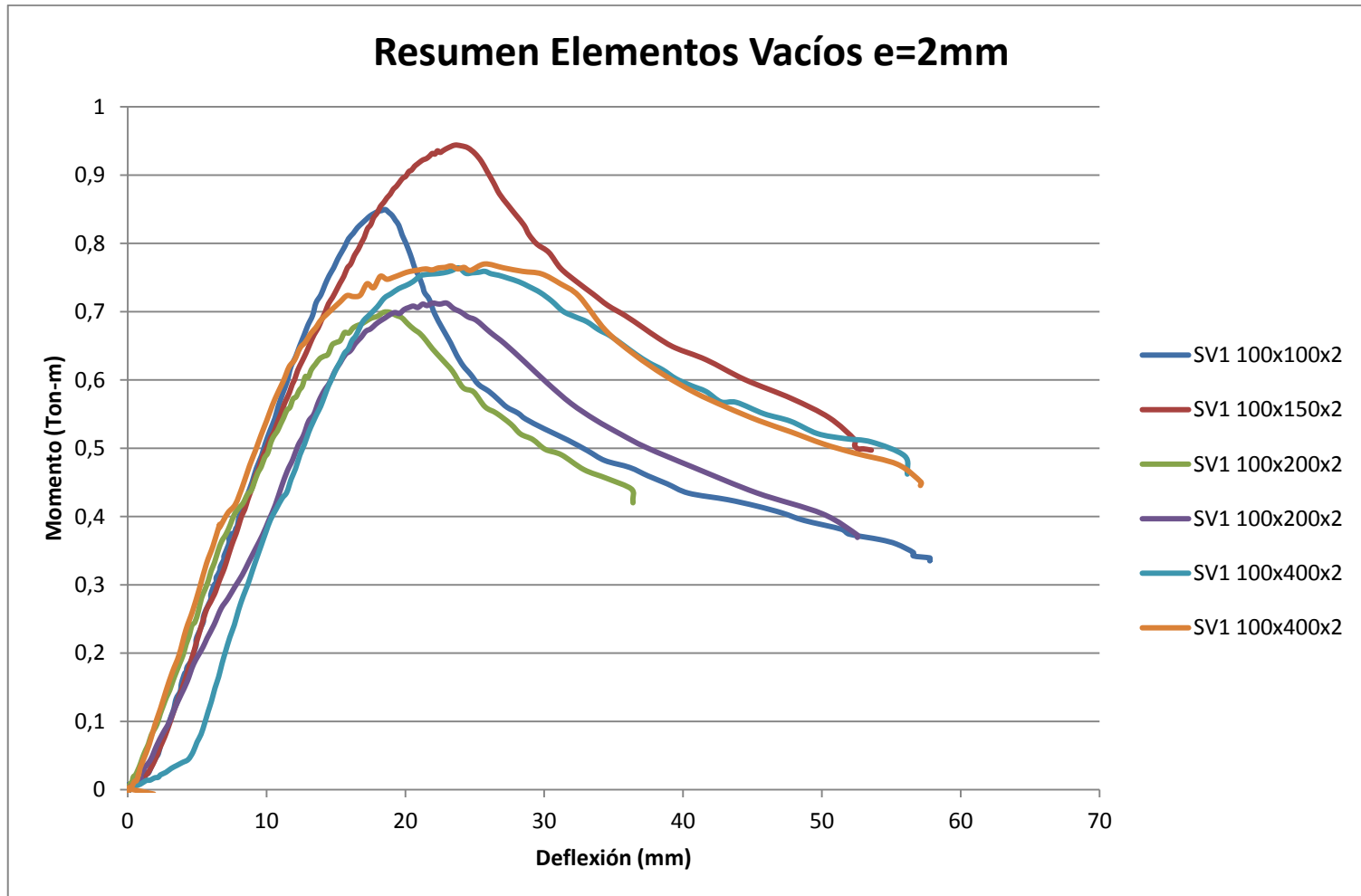


Gráfico 8. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



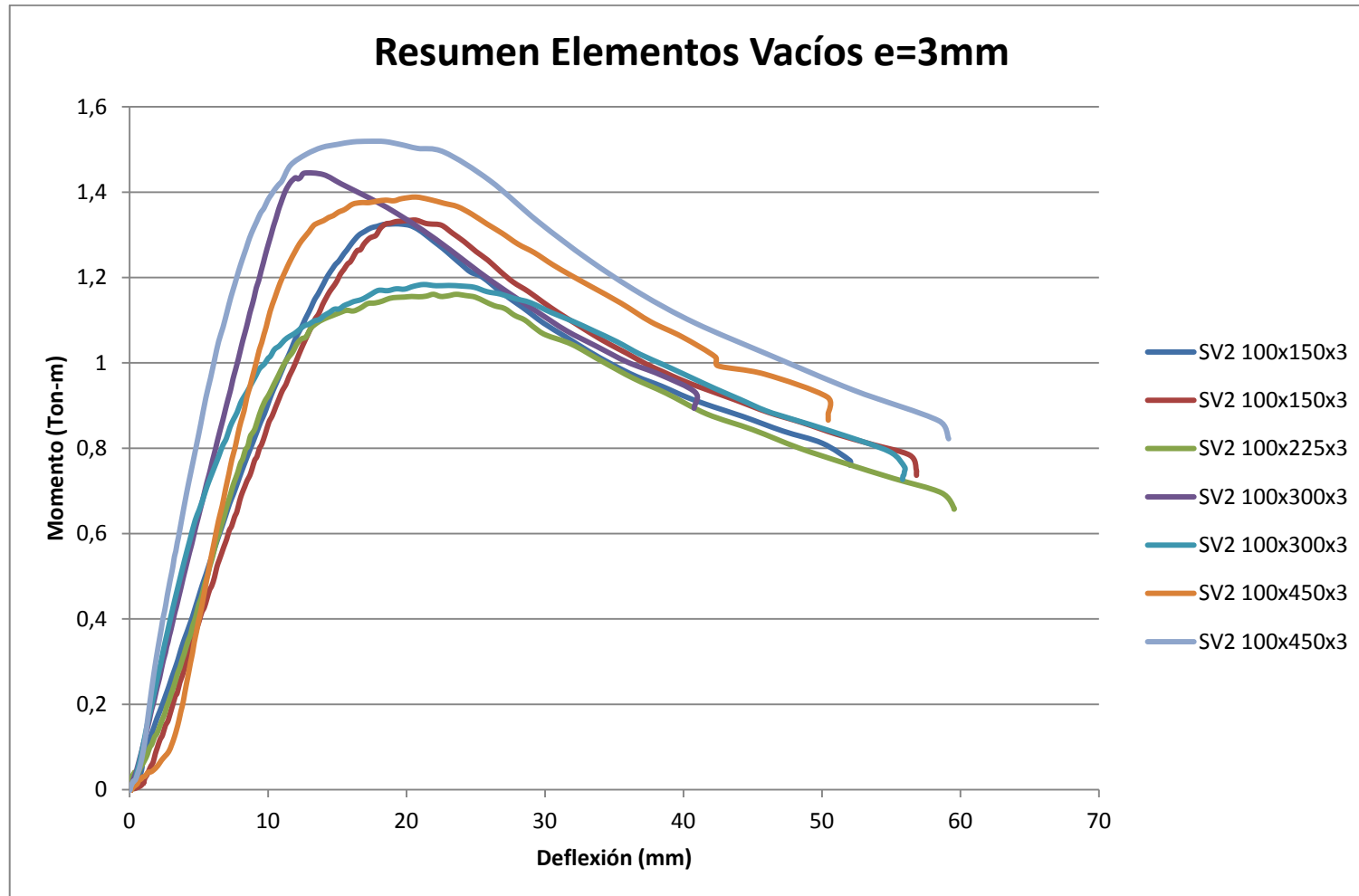
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 9. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



Elaborado por: Xavier Flores.

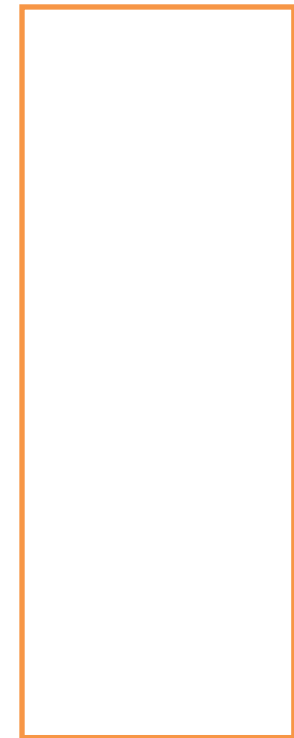
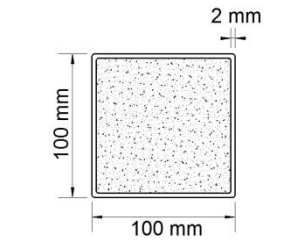
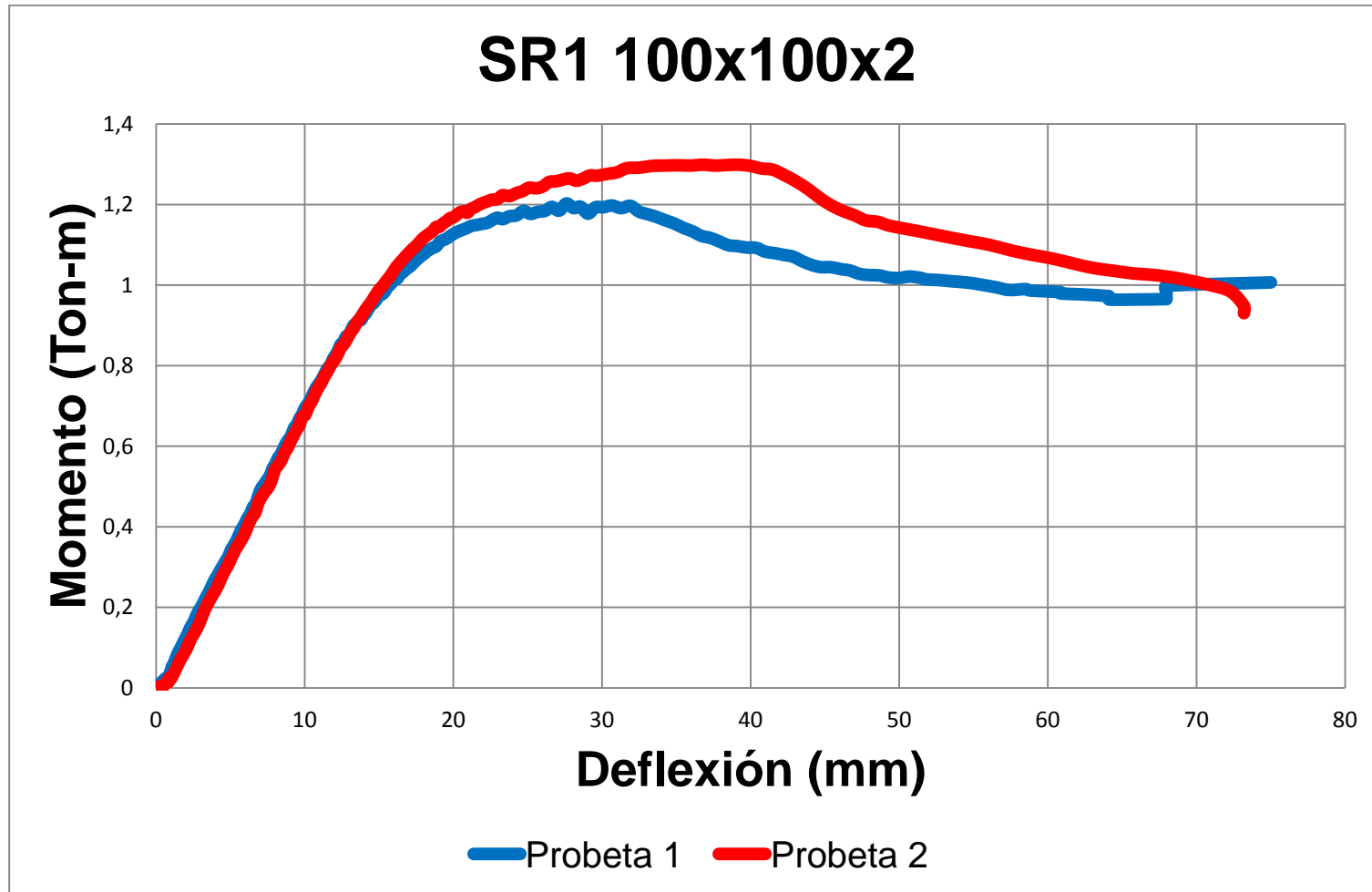
Gráfico 10. Curva Momento – Deflexión elementos vacíos.



Elaborado por: Xavier Flores

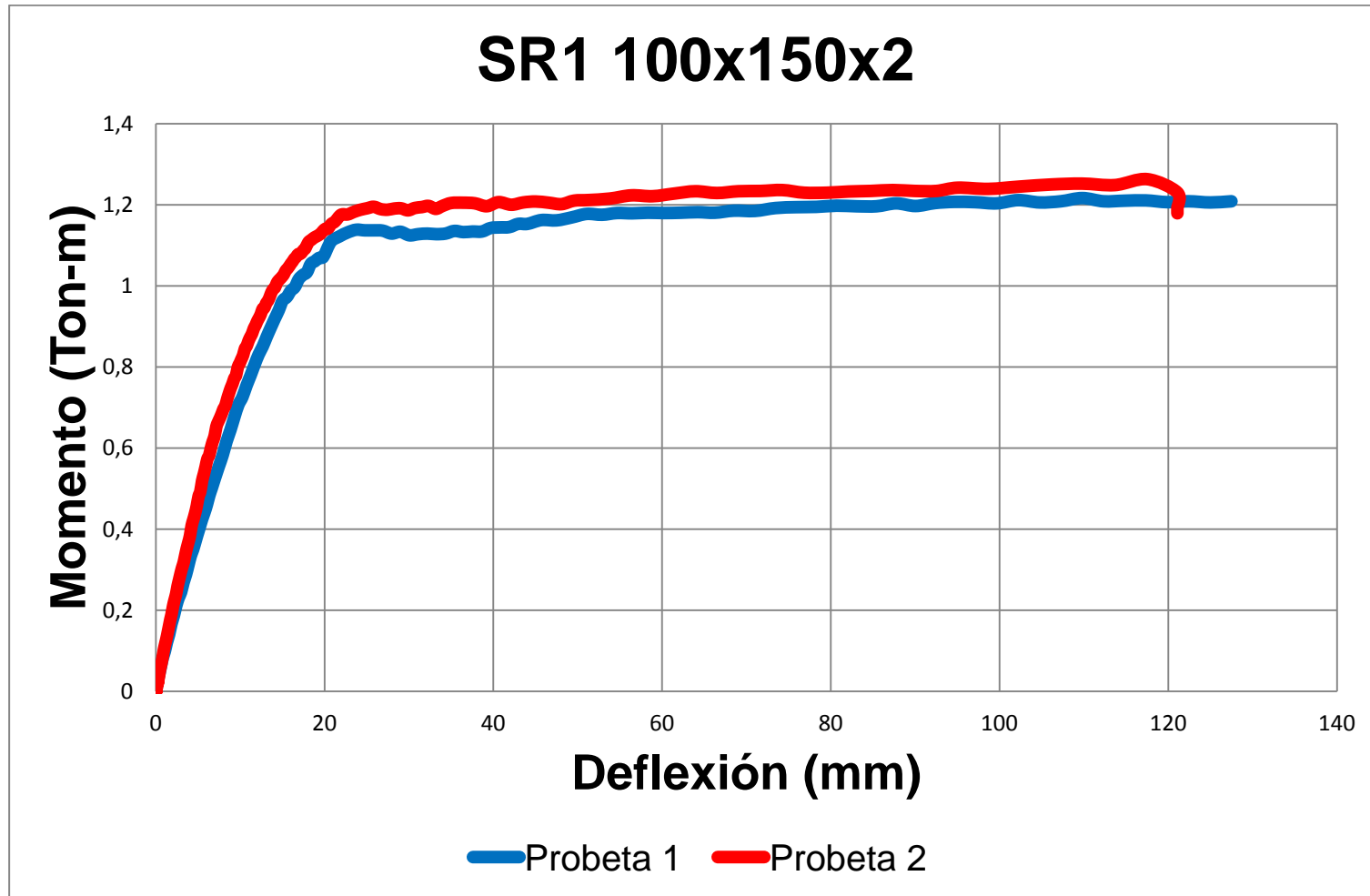
**ANEXOS No: 2**  
**GRÁFICAS MOMENTO - DEFLEXIÓN**  
**ELEMENTOS RELLENOS**

Gráfico 11. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



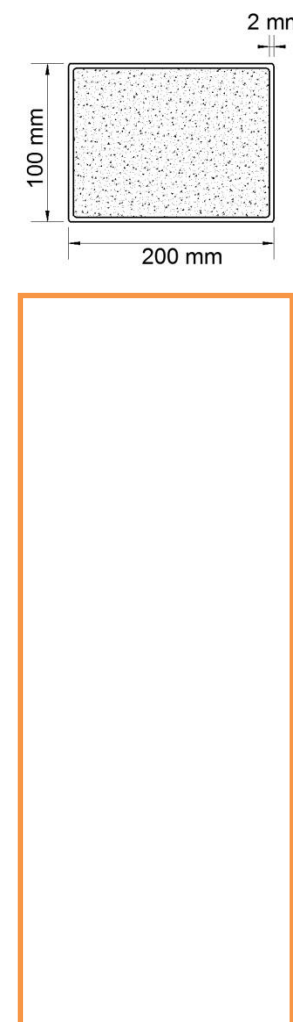
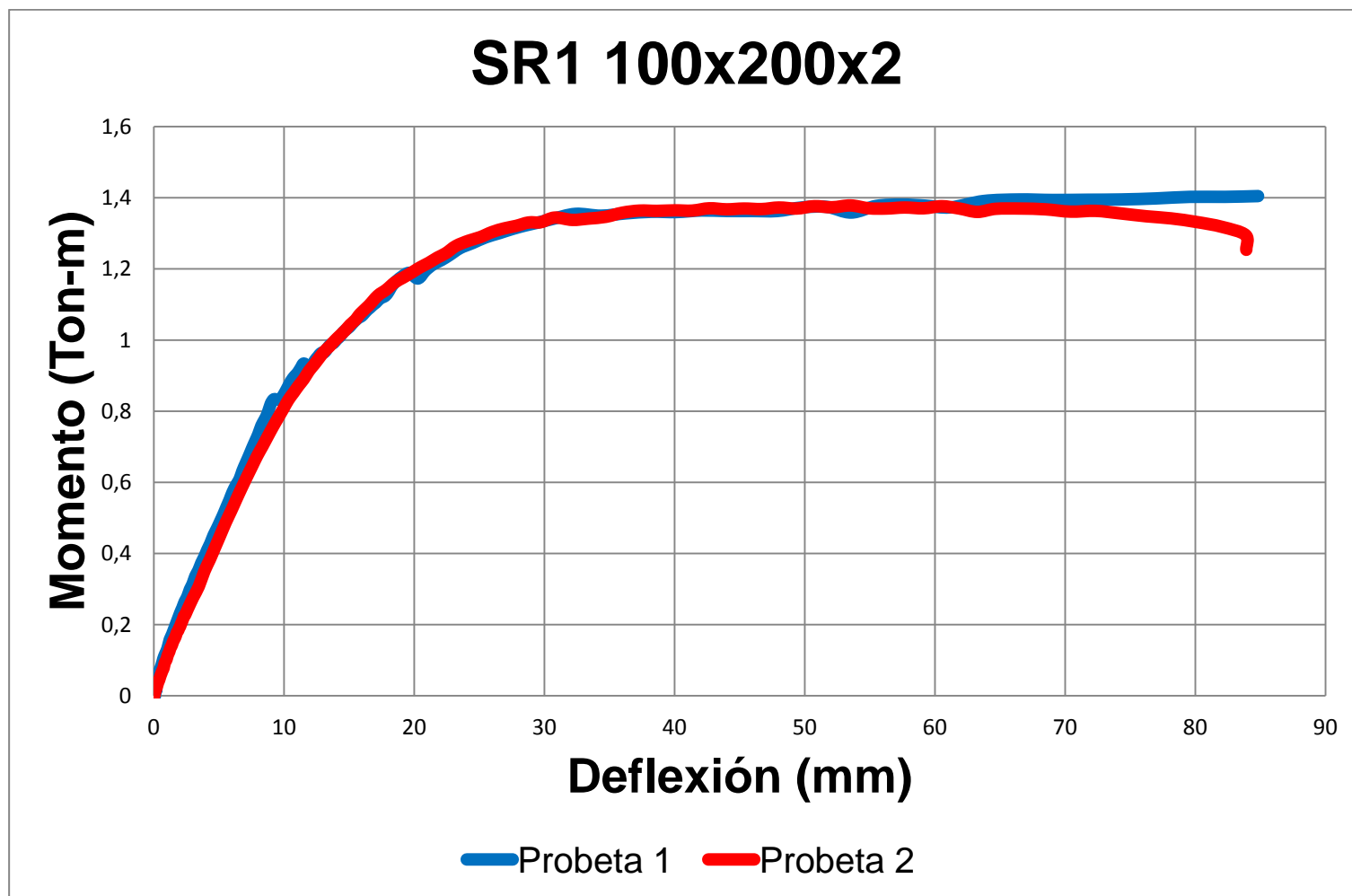
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 12. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



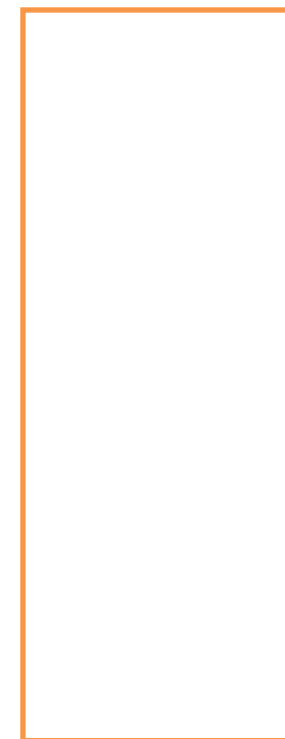
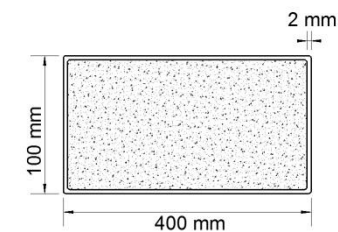
Elaborado por: Xavier Flores

Gráfico 13. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



Elaborado por: Xavier Flores.

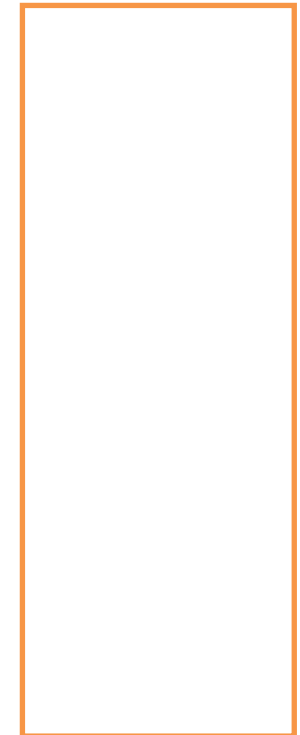
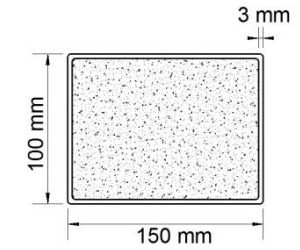
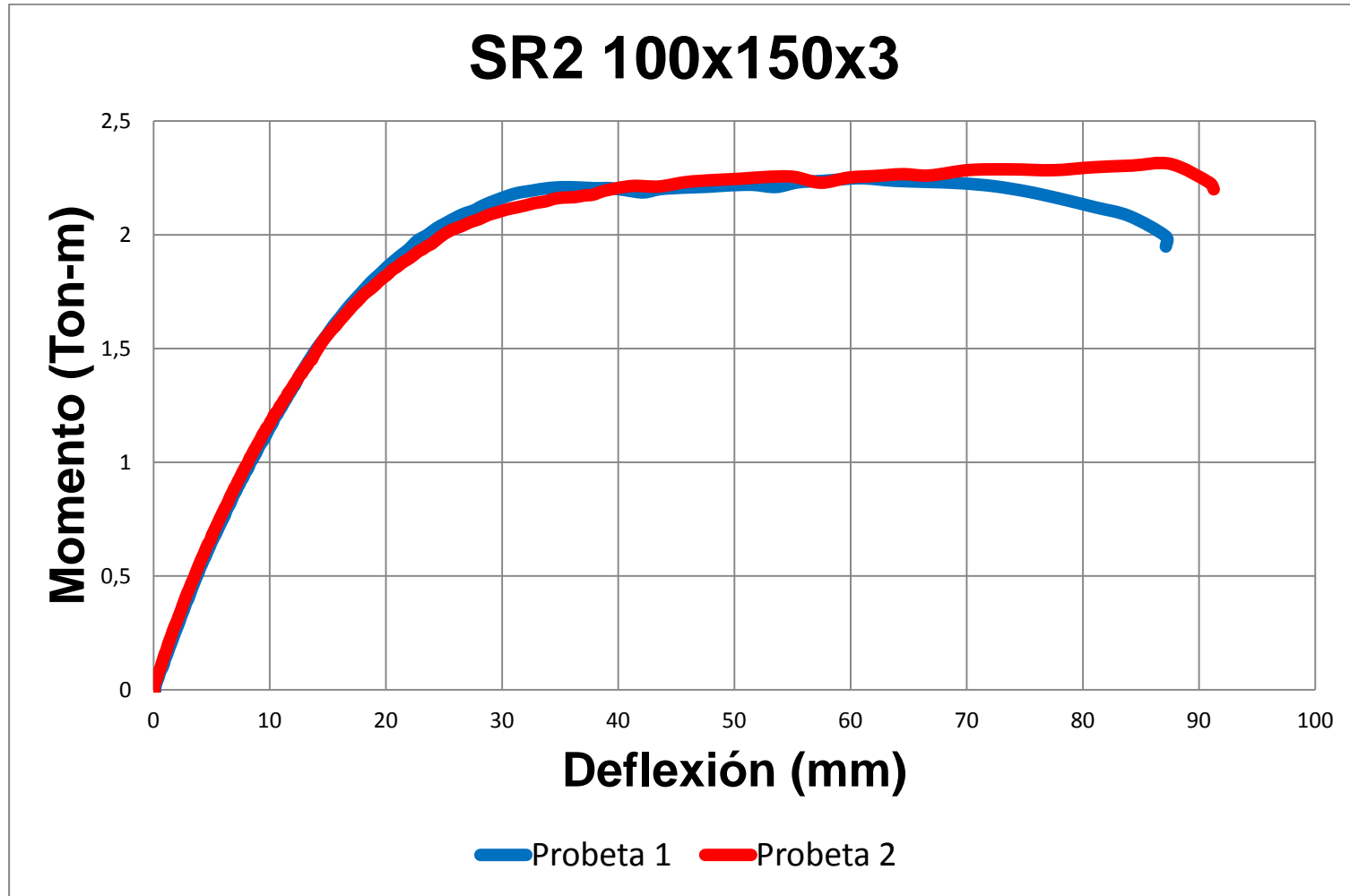
Gráfico 14. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



Elaborado por: Xavier Flores.

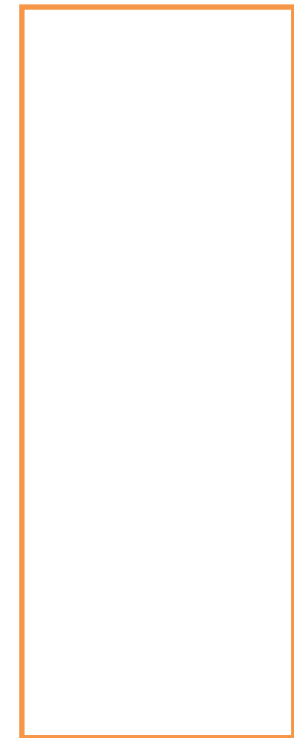
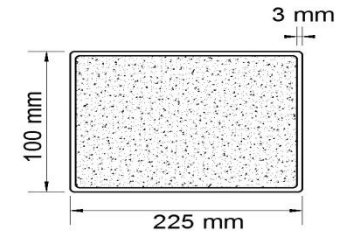
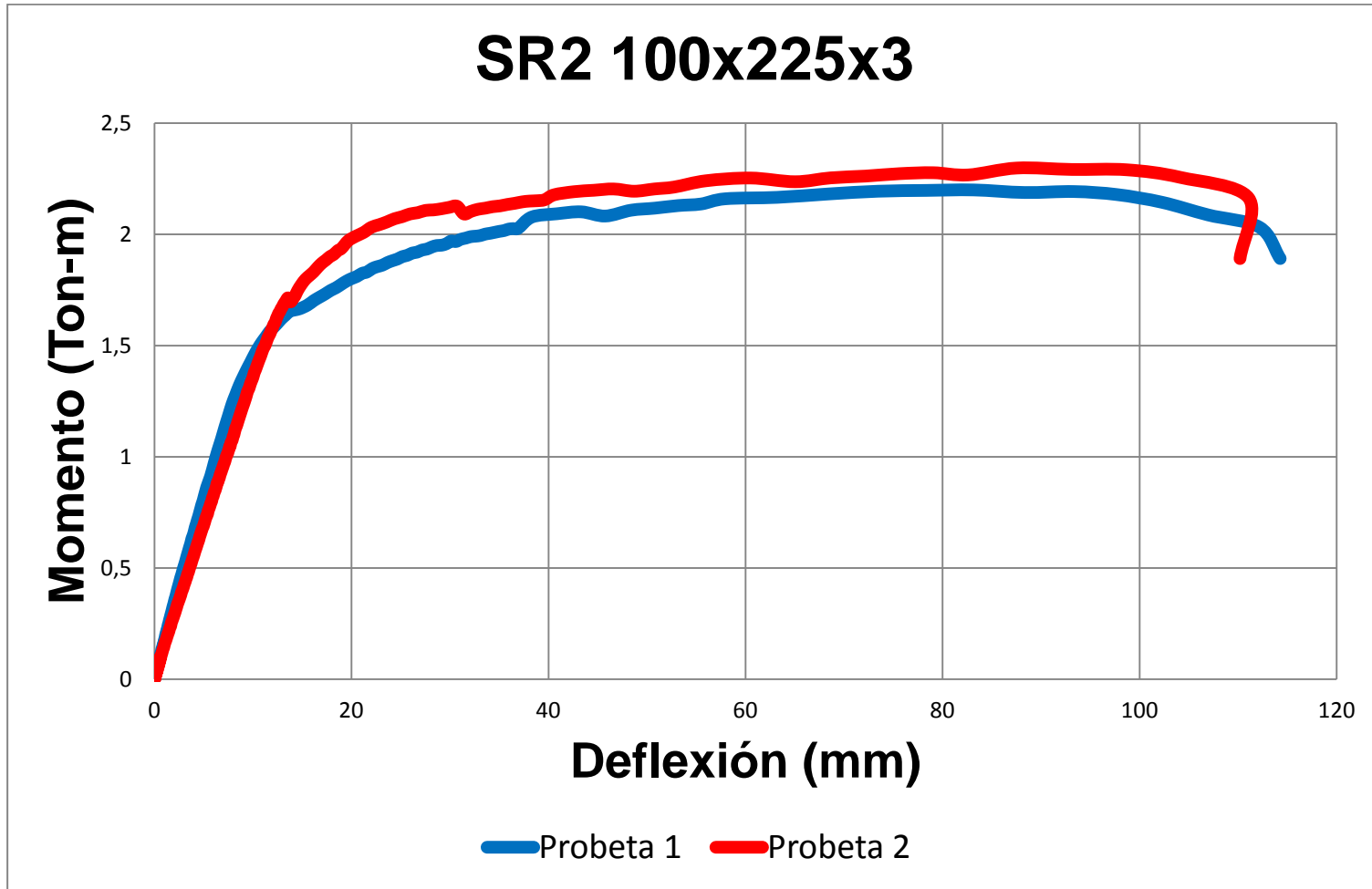


Gráfico 15. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



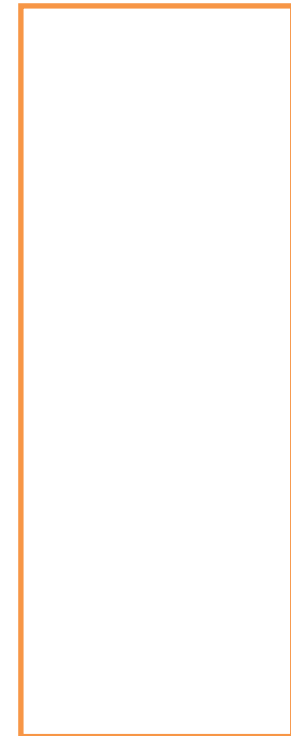
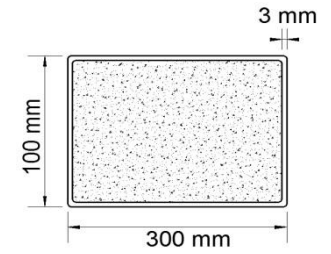
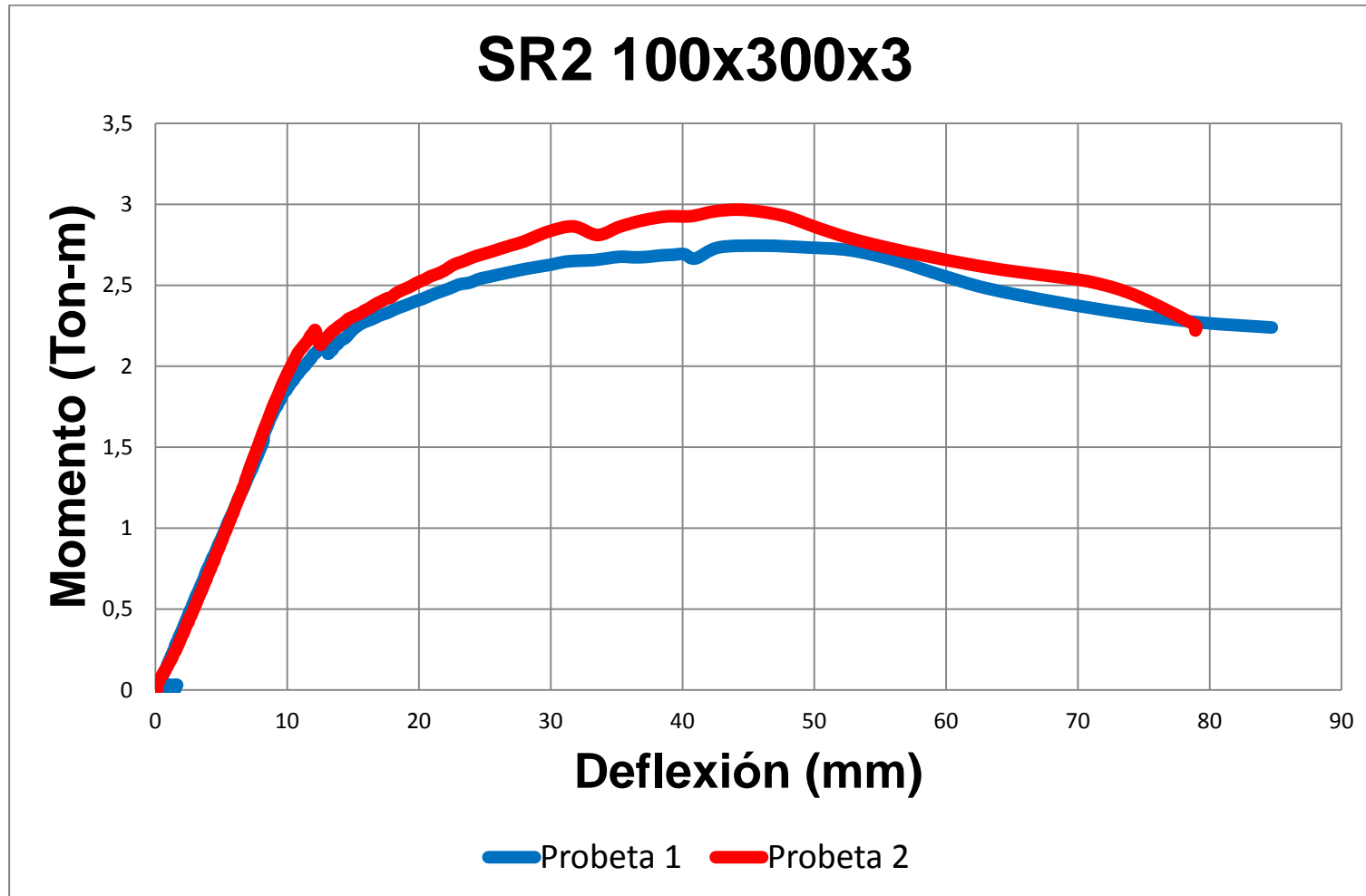
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 16. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



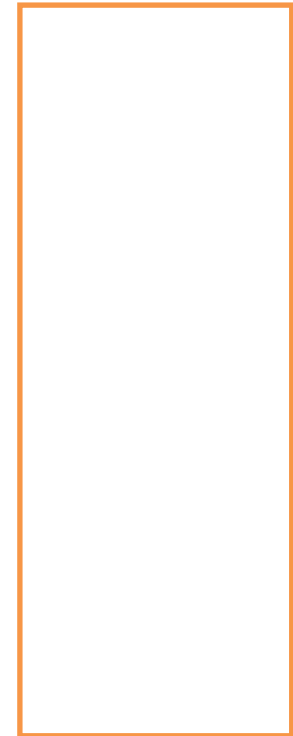
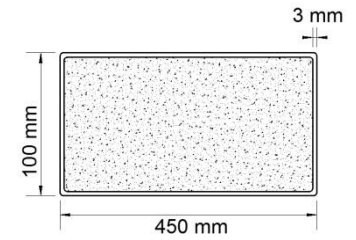
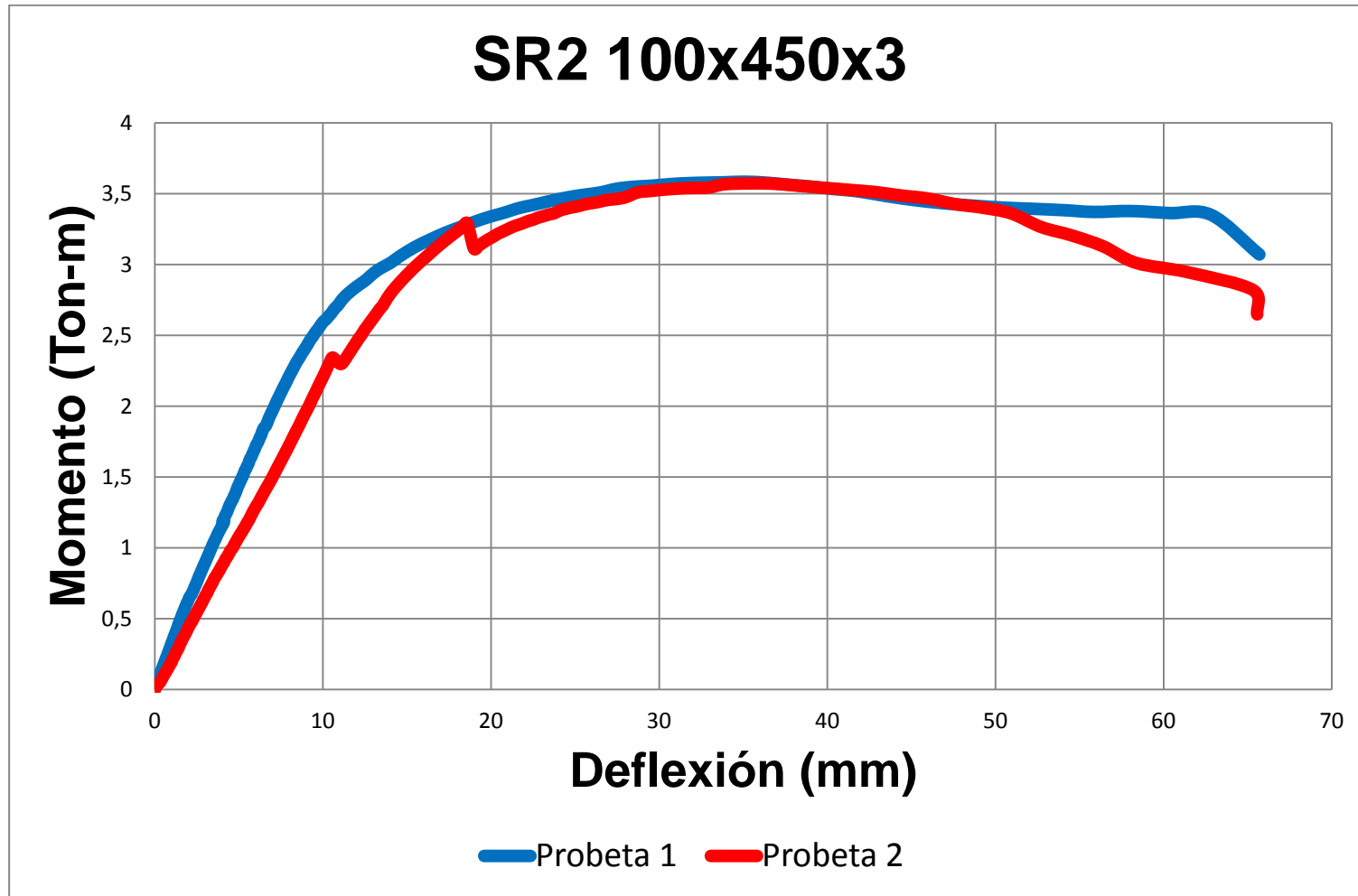
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 17. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



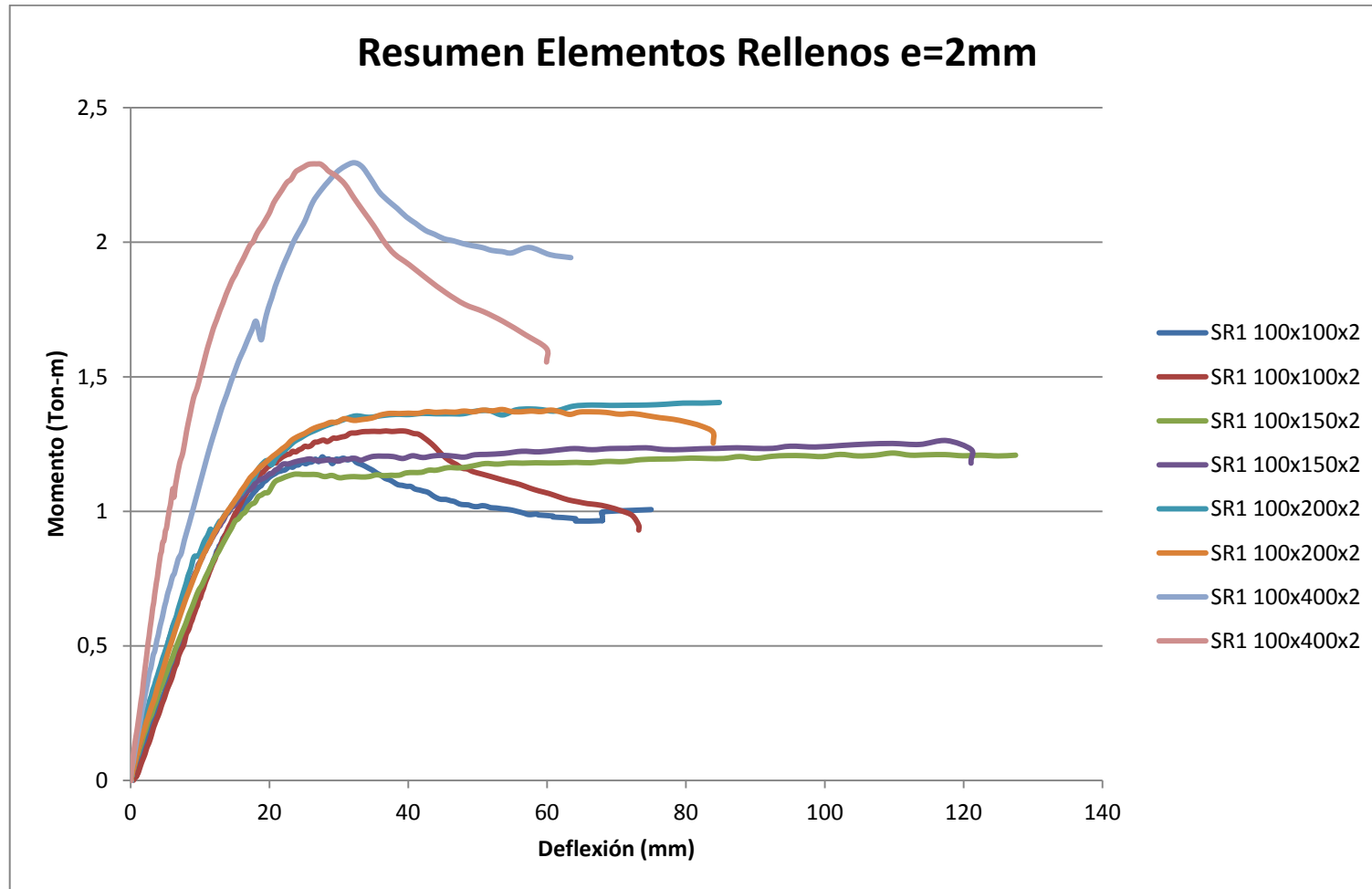
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 18. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



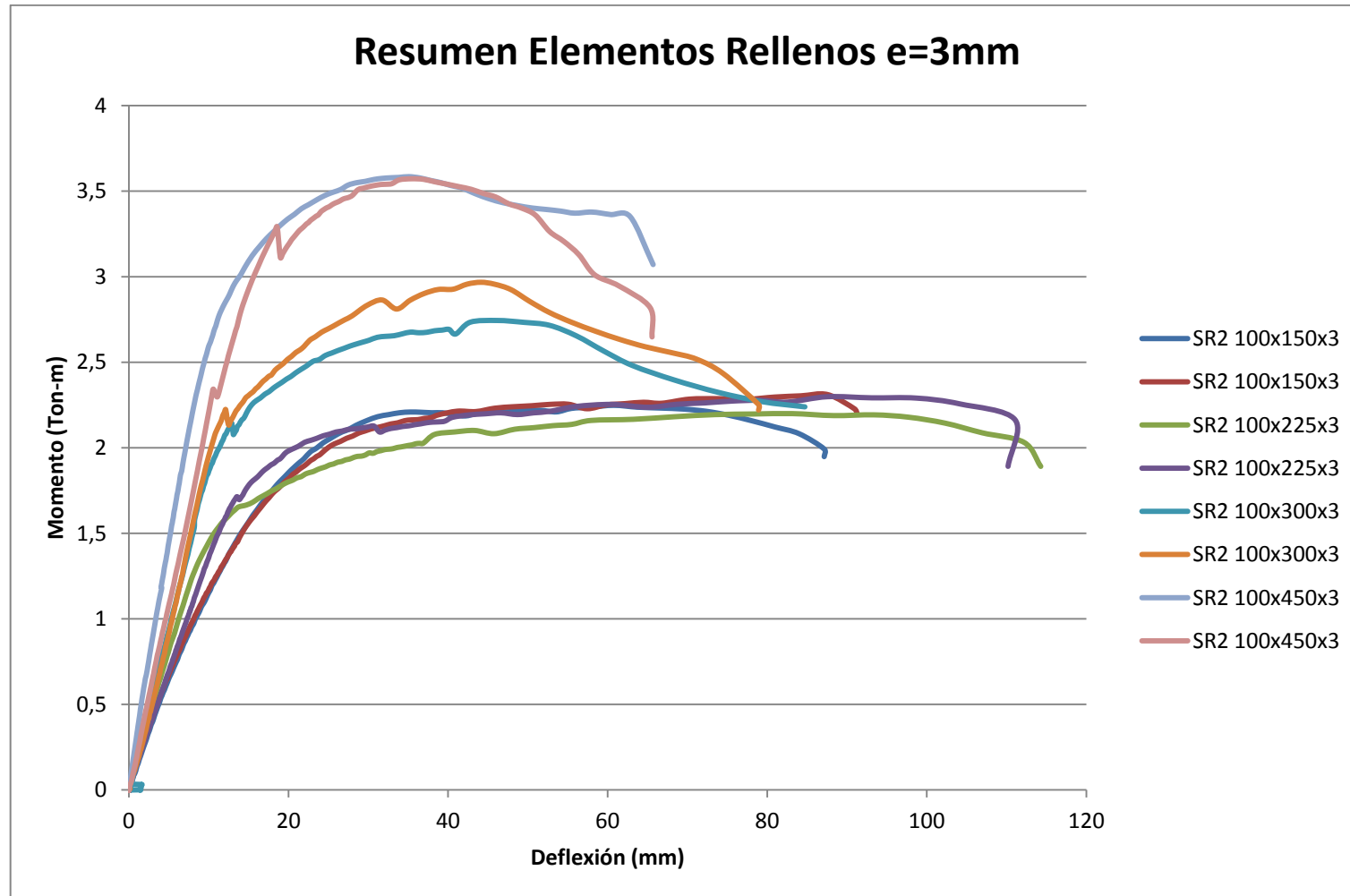
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 19. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



Elaborado por: Xavier Flores

Gráfico 20. Curva Momento – Deflexión elementos rellenos.



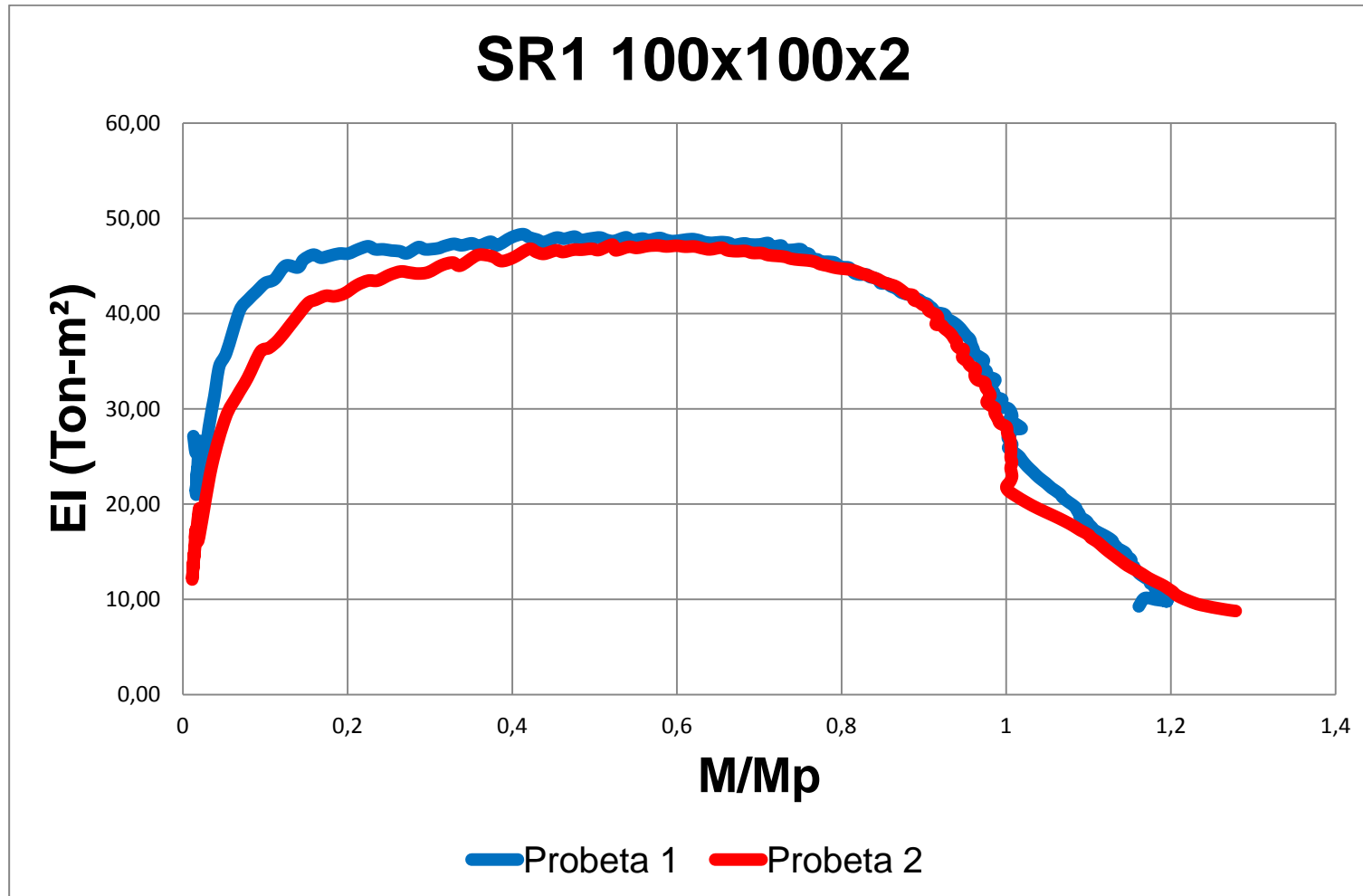
Elaborado por: Xavier Flores

**ANEXOS No: 3**

**GRAFICAS EI EXPERIMENTAL – M/M<sub>p</sub>**

**ELEMENTOS RELLENOS**

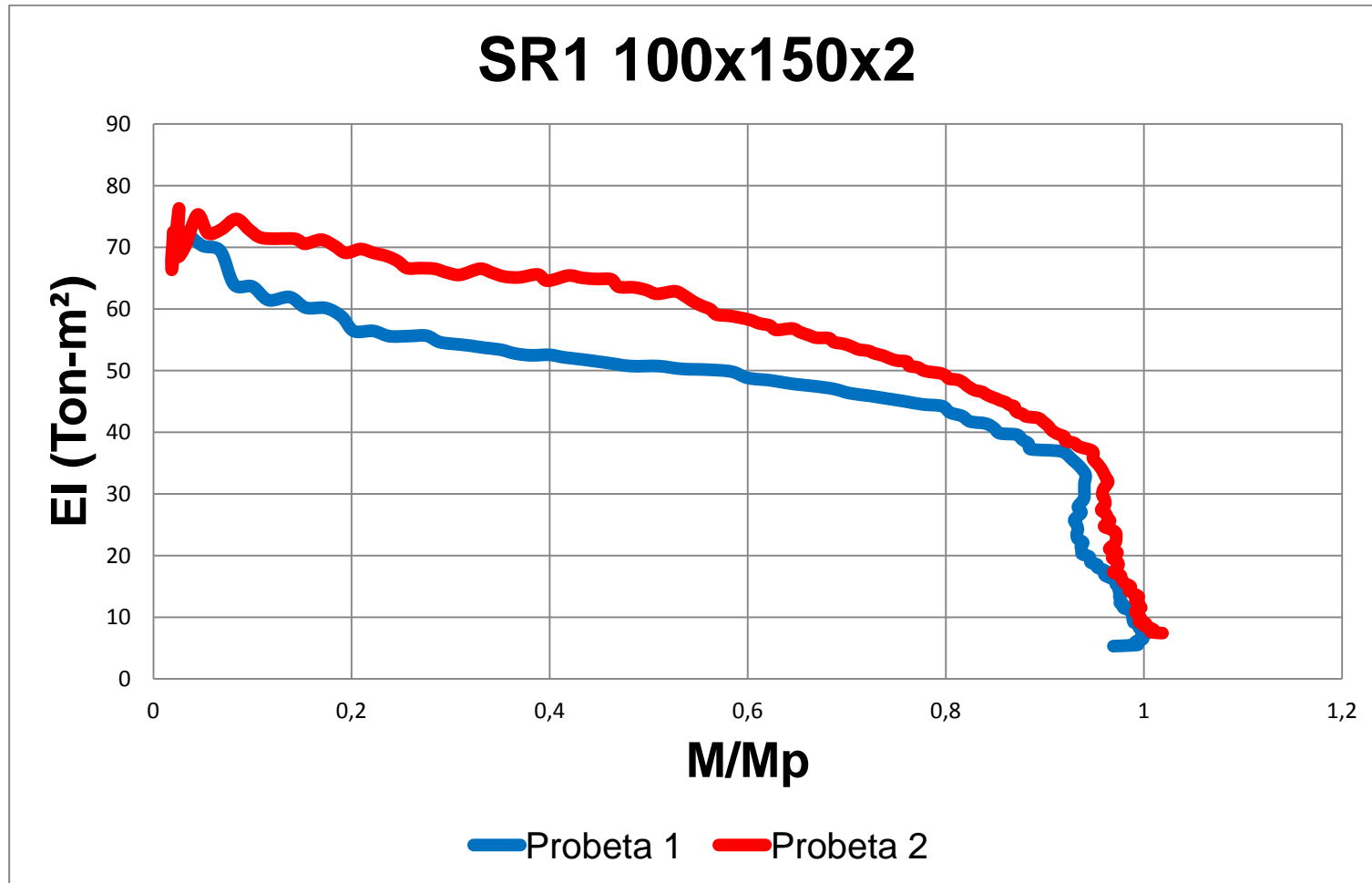
Gráfico 21. Curva EI experimental – M/Mp.



Elaborado por: Xavier Flores.

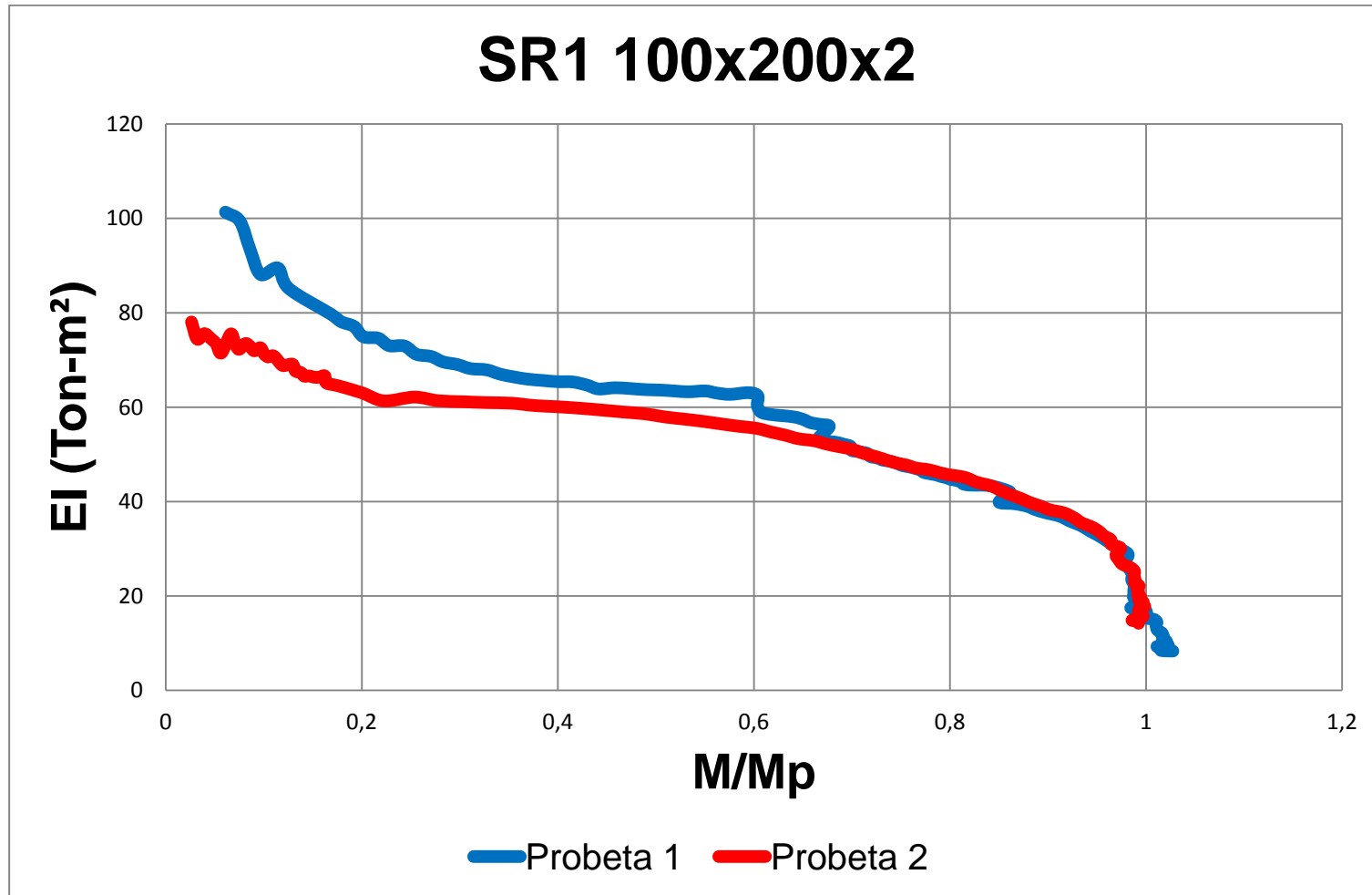


Gráfico 22. Curva EI experimental – M/Mp.



Elaborado por: Xavier Flores.

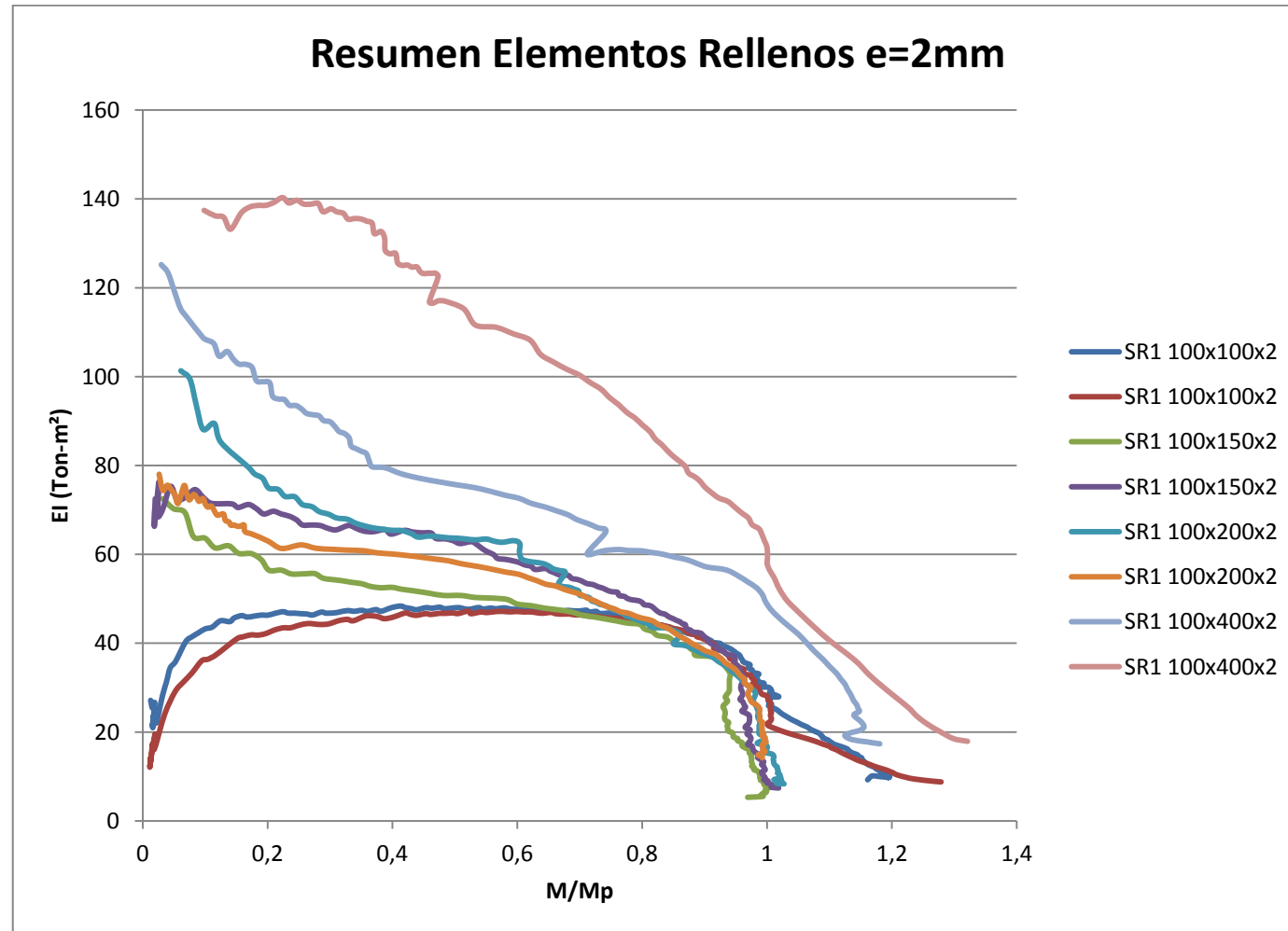
Gráfico 23. Curva EI experimental – M/Mp.



Elaborado por: Xavier Flores.

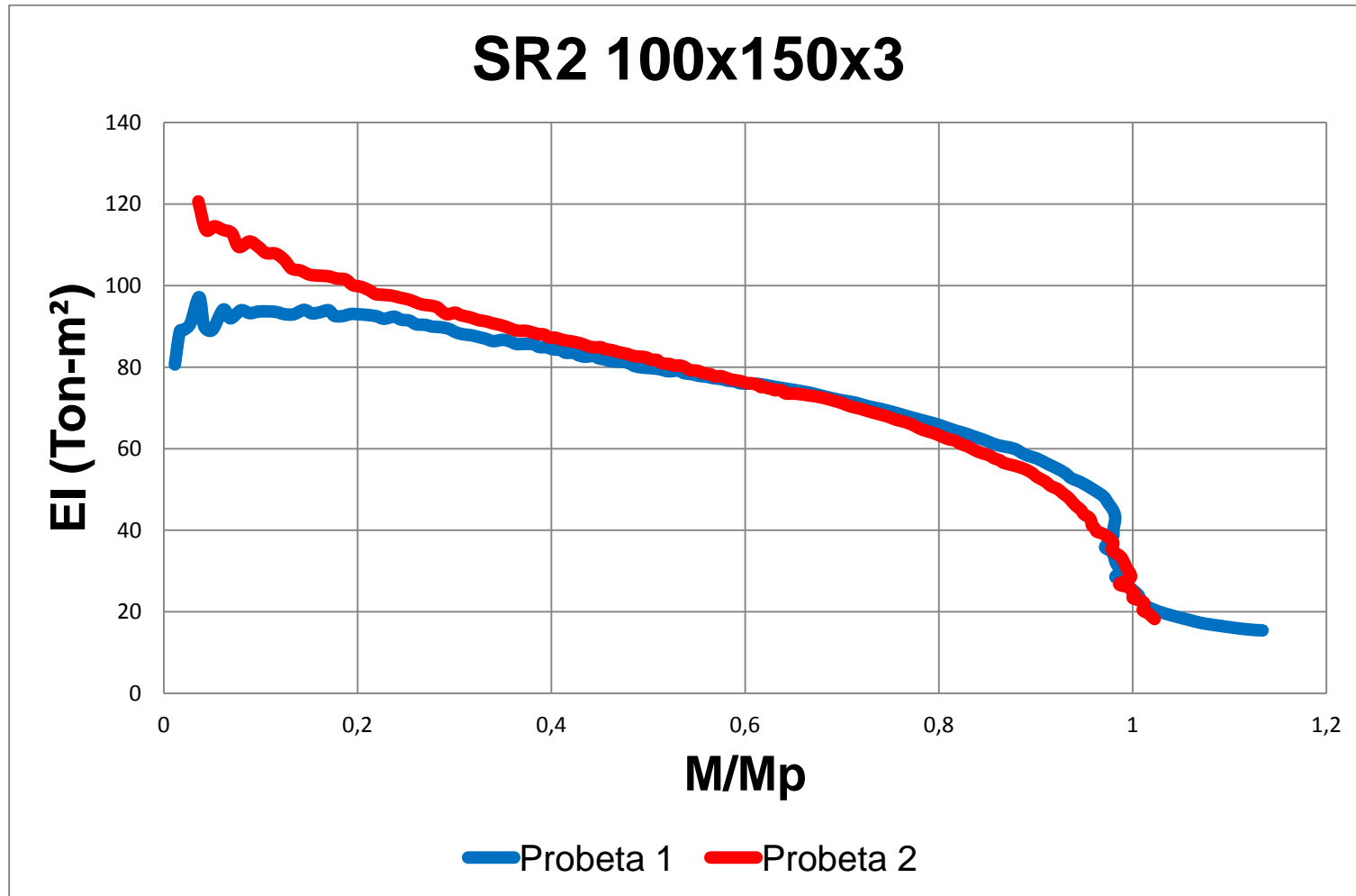


Gráfico 25. Curva EI experimental – M/Mp resumen.



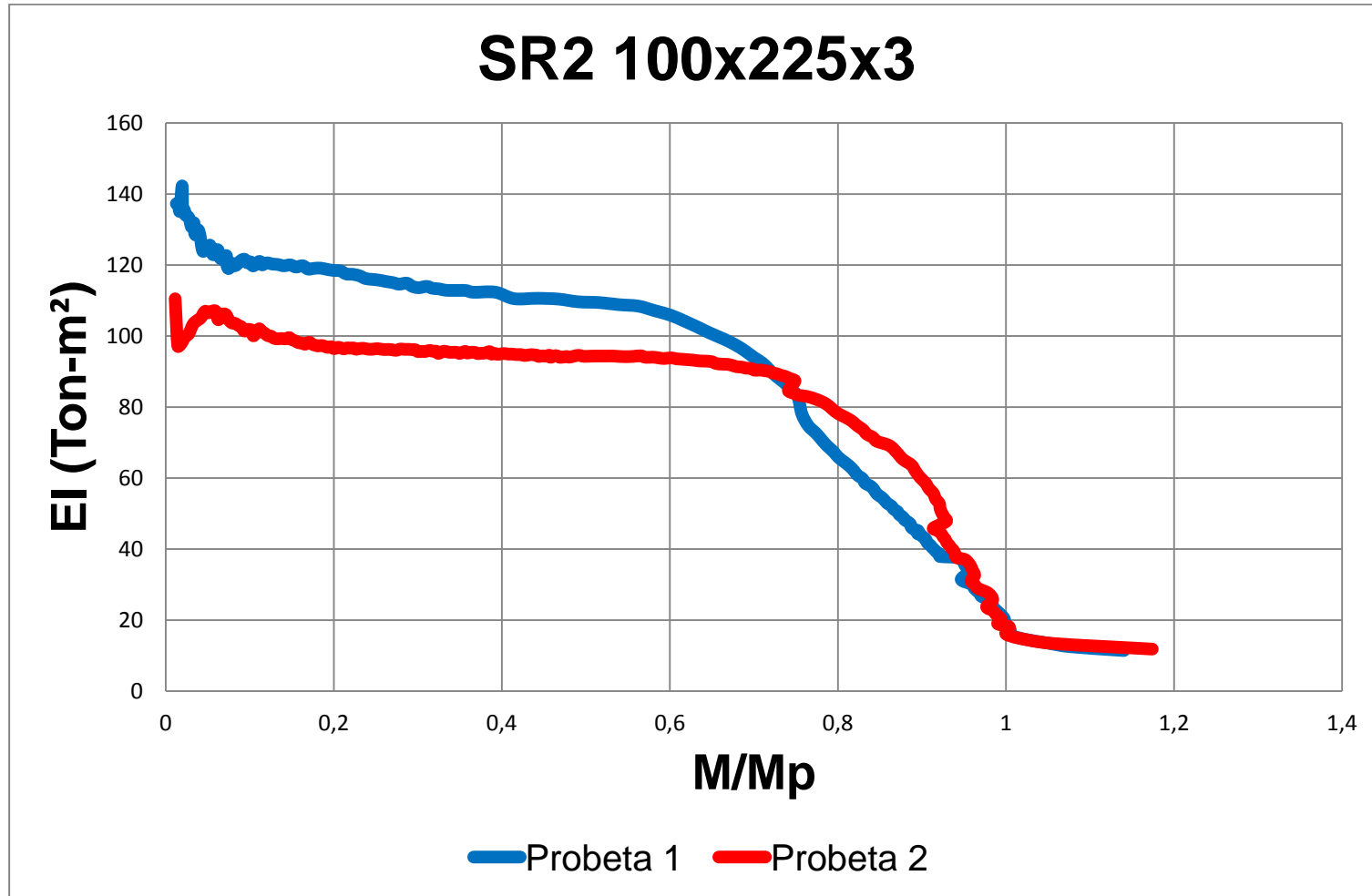
Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 26. Curva EI experimental – M/Mp.



Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 27. Curva EI experimental – M/Mp.



Elaborado por: Xavier Flores.

Gráfico 28. Curva EI experimental – M/Mp.

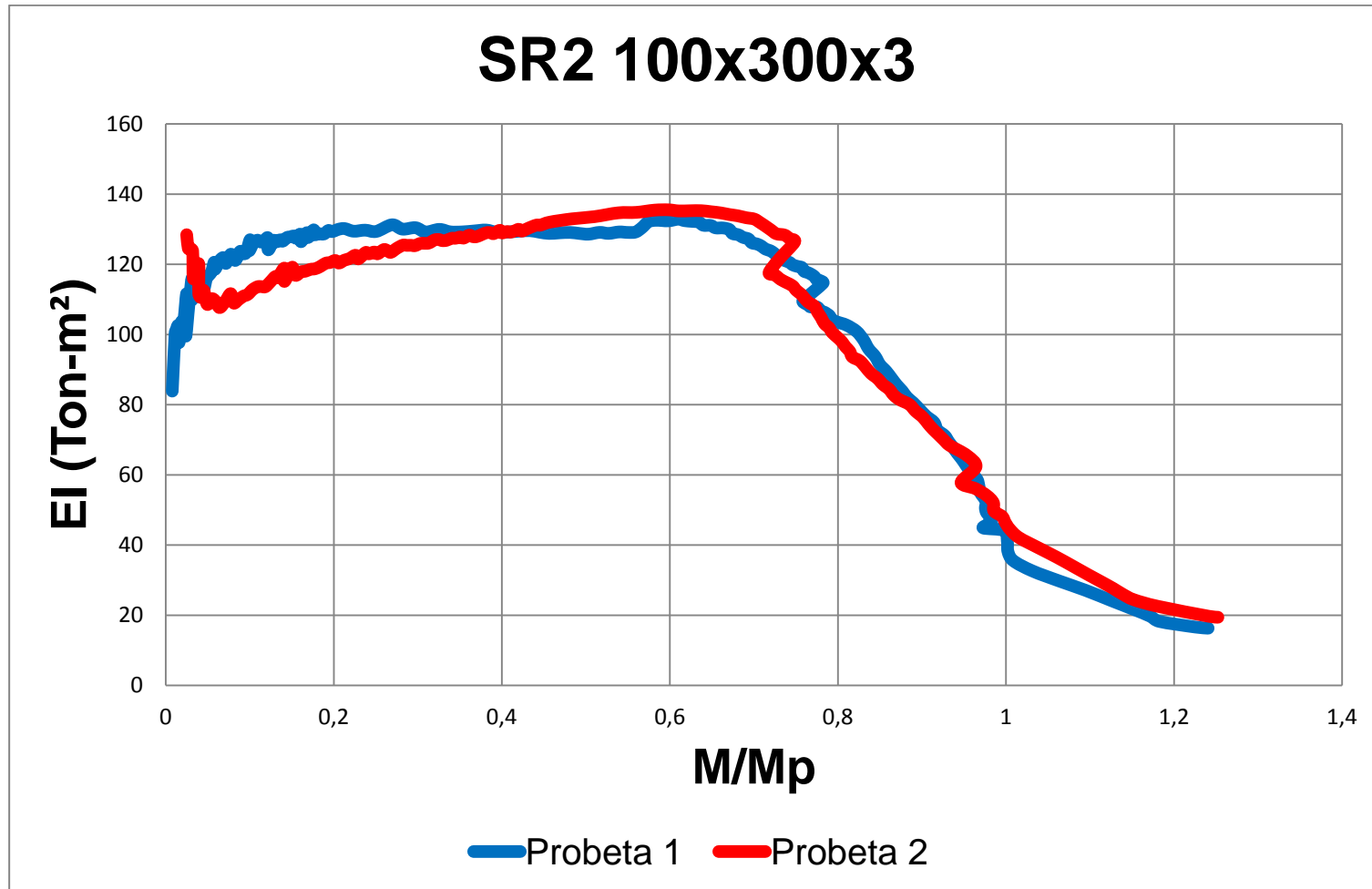
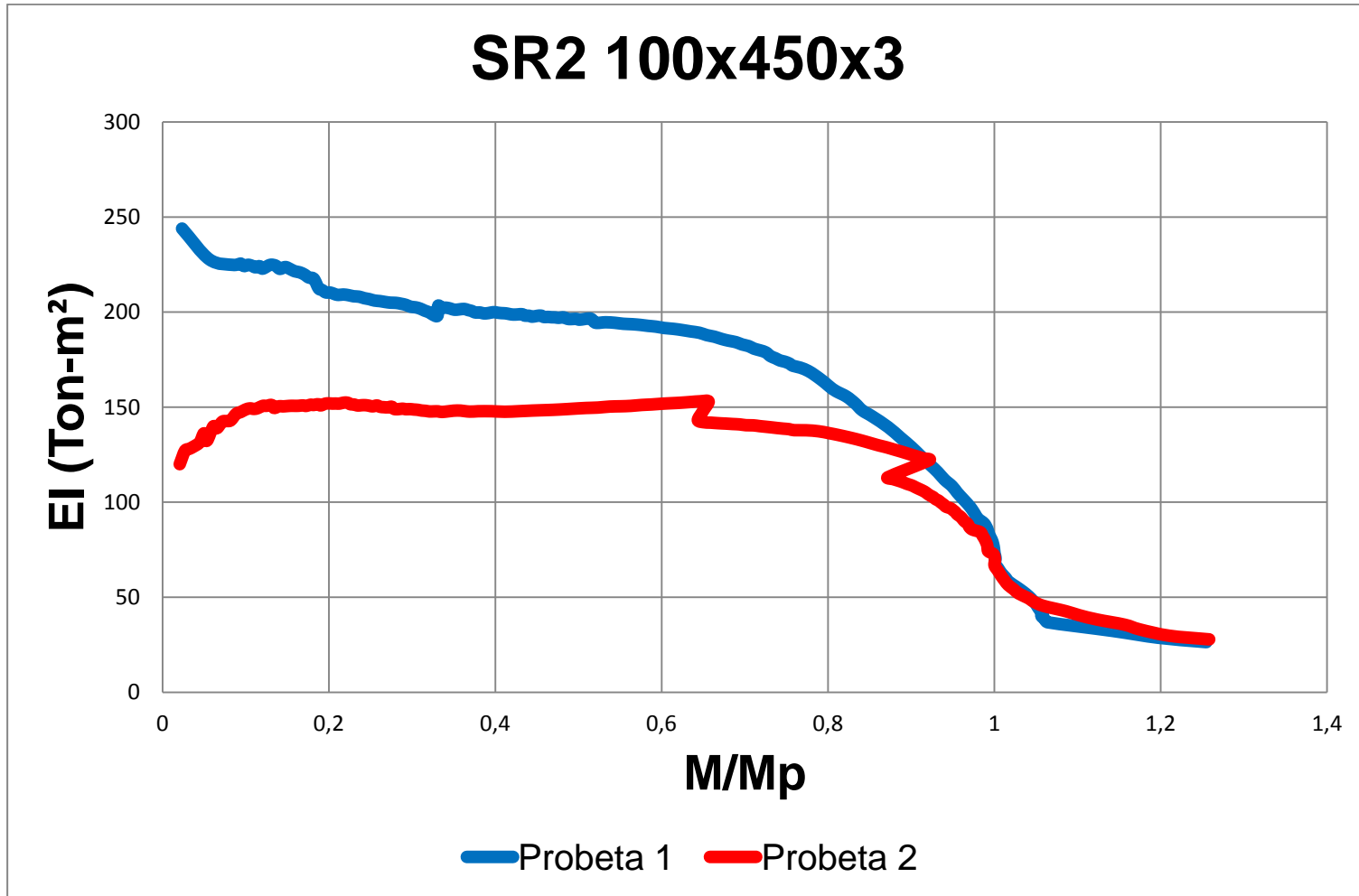


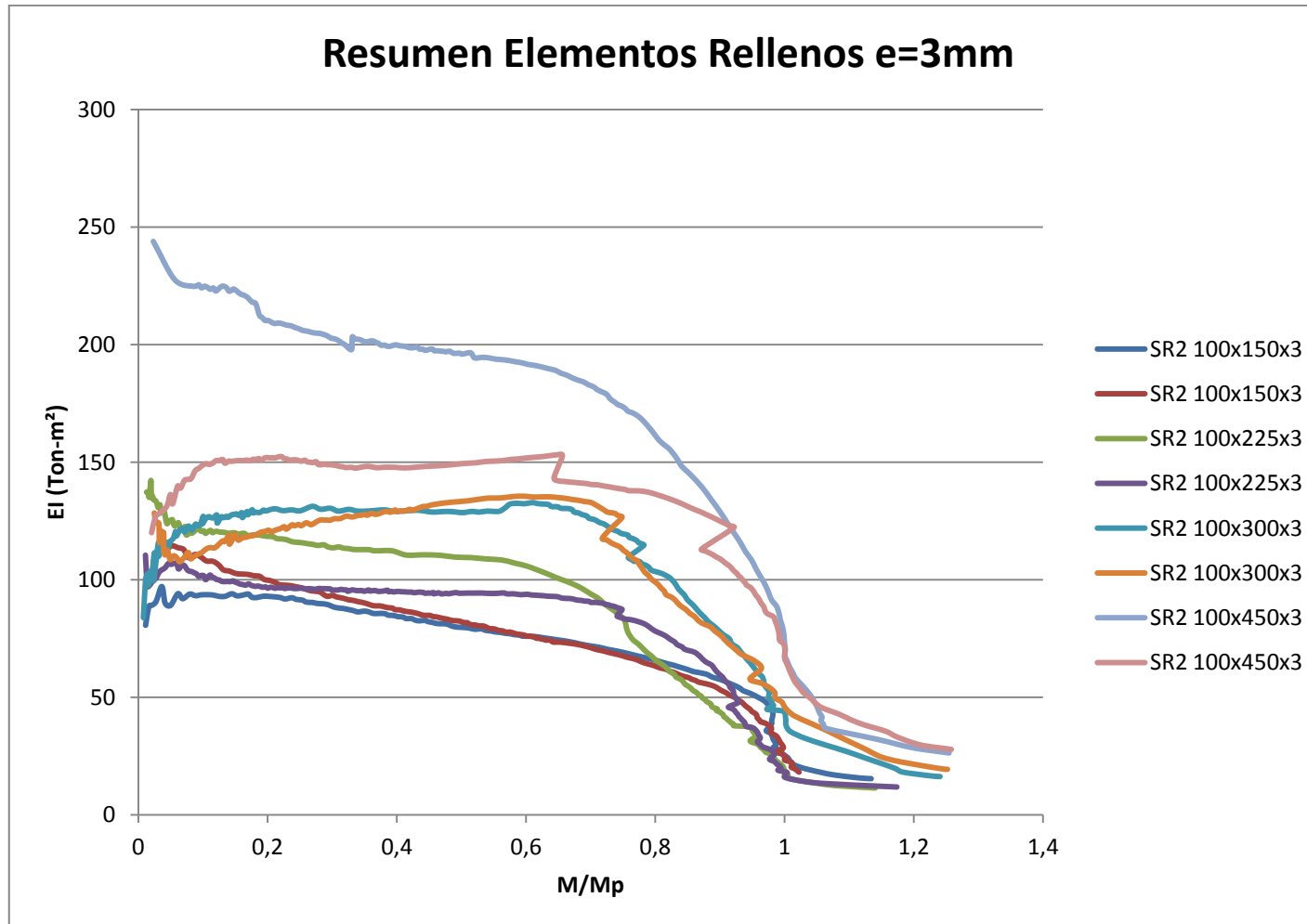
Gráfico 29. Curva EI experimental – M/Mp.



Elaborado por: Xavier Flores.



Gráfico 30. Curva EI experimental – M/Mp resumen.



Elaborado por: Xavier Flores.

**ANEXOS No: 4**

**INFORME COMPRESIÓN EN  
CILINDROS DE HORMIGÓN**



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

### LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

#### COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 14 - 0017  
Hoja 1 de 1

Quito, 13 de Enero de 2014.

**SOLICITA:** XAVIER FLORES  
**CONTRATISTA:** \*\*\*\*\*  
**PROYECTO:** TESIS  
**FISCALIZADOR:** \*\*\*\*\*  
**ELEMENTO:** INDICADOS  
**NORMA:** ASTM C39/C39M - 05

No.	FECHA FABRICA	DESCRIPCION	FECHA	EDAD	P. ESPEC.	RESISTENCIA
			ROTURA	(dias)	(gr/cm <sup>3</sup> )	(Kg/cm <sup>2</sup> )
1	12/12/2013	TESIS	19-dic-13	7	2,20	51
2	12/12/2013	TESIS	19-dic-13	7	2,18	52
3	12/12/2013	TESIS	09-ene-14	28	2,15	82
4	12/12/2013	TESIS	09-ene-14	28	2,14	92

  
  
 ING. MERCEDES VILLACIS  
 JEFE DEL LABORATORIO