

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Relación entre el esfuerzo de fluencia en elementos de acero conformados en frío y en acero virgen, de los productos fabricados en Costa Rica.

Proyecto Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Josué Rojas Muñoz

Directora del Proyecto de Graduación:

Ing. Andrea Ramírez Villalba

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Hoja de aprobación



Ing. Andrea Ramírez Villalba

Directora



Ing. Guillermo González Beltrán, Ph.D.

Asesor



Ing. Pío Miranda Jenkins, MSc.

Asesor



Josué Rojas Muñoz

Autor

Derechos de autor

Fecha: 2021, Junio, 24

El suscrito, Josué Rojas Muñoz, cédula 4-0219-0794, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con el número de carné **B15753**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Relación entre el esfuerzo de fluencia en elementos de acero conformados en frío y en acero virgen, de los productos fabricados en Costa Rica**, bajo la dirección de la Ing. Andrea Ramírez Villalba, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mi madre Ruth Muñoz Astorga y mi padre Fernando Rojas Vargas.

Agradecimientos

A Dios.

A mis padres por apoyarme incondicionalmente para desarrollar mis estudios universitarios.

A mis hermanas Gabriela y Silvia por ser inspiración y darme la bendición de disfrutar la compañía, amor y consuelo de mis sobrinos.

A Melissa por apoyarme apasionadamente.

A mis amigos de la universidad (11 civiles y 1 pollo) por compartir tantos momentos inolvidables.

Al comité asesor por guiarme en la investigación, especialmente a la Directora Ing. Andrea Ramírez.

A los representantes de las empresas Metalco, Macopa y Metales Flix que me recibieron amablemente en sus instalaciones.

Índice General

Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1. Problema específico	1
1.1.2. Importancia	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivo específico	4
1.4. Delimitación del problema.....	4
1.4.1. Alcance.....	4
1.4.2. Limitaciones.....	5
1.5. Metodología.....	6
1.5.1. Revisión bibliográfica	6
1.5.2. Desarrollo experimental	6
1.5.3. Análisis de resultados	6
1.5.4. Informe final	7
Capítulo 2. Marco teórico	7
2.1. Proceso de fabricación de tubos conformados en frío	7
2.2. Esfuerzos residuales en tubos conformados en frío	9
2.3. Aproximación numérica del esfuerzo de fluencia	10
2.3.1. Normativa AISI S100-16.....	10
2.3.2. Especificación Canadiense CSA S136-94	12
2.4. Prueba de tracción en productos tubulares de acero	13
2.5. Requerimientos del Código Sísmico de Costa Rica	15
2.6. Conceptos básicos de estadística general	16
Capítulo 3. Desarrollo experimental	18
3.1. Descripción del muestreo y confección de las probetas.....	18
3.1.1. Proceso de recolección de las muestras	18
3.1.2. Confección de probetas.....	21
3.3. Prueba de falla a tracción	25

Capítulo 4. Resultados	27
4.1. Curvas de esfuerzo-deformación de los especímenes	27
4.1.1. Curvas con meseta de fluencia clara.....	27
4.1.2. Curvas que no presentan meseta	28
4.2. Esfuerzo de fluencia de los especímenes	29
4.3. Relación F_u/F_y	31
4.4. Factor de relación entre el esfuerzo de fluencia del fleje F_{ys} y del tubo F_{yt}	34
4.5. Correlación del esfuerzo de fluencia.....	36
4.6. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye}	38
4.6.1. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} inicial	38
4.6.2. Esfuerzo de fluencia esperado $F_{ye} < F_{yt}$ con 95% de probabilidad	42
4.7. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ya} utilizando la ecuación Eq. A3.3.2-1 del AISI S100-16	45
4.8. Esfuerzo de fluencia esperado F_y' utilizado en la norma CSA S136-94.	47
Capítulo 5. Análisis de resultados.....	49
5.1. Variable utilizada para determinar el factor de relación.....	49
5.2. Valores atípicos eliminados	49
5.2.1. Empresa E02:	49
5.2.2. Empresa E03:	50
5.3. Comparación de esfuerzos de fluencia F_{ys} , F_{yt} , F_{ye} , F_{ya} y F_y'	50
5.4. Análisis estadísticos de los resultados	51
5.4.1. Experimento 1.....	51
5.4.2. Experimento 2.....	52
5.4.3. Experimento 3.....	52
5.4.4. Experimento 4.....	53
5.4.5. Experimento 5.....	54
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	55
6.1. Conclusiones.....	55
6.2. Recomendaciones	56
Referencias bibliográficas.....	58
Anexos.....	60
Anexo 1. Cantidad de muestras obtenidas por empresa.....	60
Anexo 2. Dimensiones de las probetas de falla a tracción	62

Anexo 3. Dimensiones nominales de la longitud L y el radio interno r de cada sección de tubo analizada	69
Anexo 4. Curvas esfuerzo-deformación de las probetas falladas a tracción	70
Anexo 5. Resultados experimentales del esfuerzo de fluencia y esfuerzo último	103
Anexo 6. Factor de relación FR	107
Anexo 7. Análisis de valores atípicos	111
Anexo 8. Resultados de esfuerzo de fluencia esperado F_{ye}	115
Anexo 9. Resultados de esfuerzo de fluencia esperado F_{ya}	116
Anexo 10. Resultados de esfuerzo de fluencia esperado F_y'	118

Índice de Figuras

Figura 1. Metodología utilizada en la investigación	7
Figura 2. Conformado en frío mediante el método de la prensa a presión. la fuerza para deformar la lámina se aplica sobre secciones puntuales.....	8
Figura 3. Proceso de fabricación de tubos mediante el método de conformado en frío	8
Figura 4. Diagrama esfuerzo-deformación de acero conformado en frío en la investigación de Winter, Chajes y Britvec.	9
Figura 5. Efecto del trabajo en frío en las propiedades del material, como resultado de las investigaciones realizadas por Karren & Winter.	10
Figura 6. Tiras longitudinales para pruebas de tracción en productos tubulares.	13
Figura 7. Dimensiones de la probeta de ensayo a tracción	14
Figura 8. Diagrama esfuerzo-deformación, método Offset (a) y el método de sobrecarga a tensión (b)	15
Figura 9. Maquina utilizada para el conformado de tubos en frío en las fábricas visitadas	18
Figura 10. Acumulador de fleje en posición horizontal	19
Figura 11. Acumulador de fleje en posición vertical	19
Figura 12. Muestra de fleje de 25 cm y de tubo de 50 cm obtenida de uno de los fabricantes nacionales	20
Figura 13. Galgas de radios para medir radios internos y externos.....	21
Figura 14. Uso de galgas de radio para obtener el radio de curvatura interno de las secciones analizadas.....	21
Figura 15. Placas de acero para fabricación de las probetas	22
Figura 16. Esmeril utilizado para la fabricación de las placas de 2,5 cm x 25 cm	22
Figura 17. Cuarto externo marcado de la sección acero para obtener las probetas.....	23
Figura 18. Sección de la que se confecciona la probeta del tubo.....	23
Figura 19. Torno utilizado en fabricación de probetas.....	24
Figura 20. Probetas listas para ser falla	24
Figura 21. Maquina MTS 810 propiedad del LanammeUCR utilizada en la falla de las probetas.....	25
Figura 22. Probeta debidamente colocada en las mordazas antes de ser fallada	26
Figura 23. Elongación final de la probeta E02 F1.5 – 100.....	26
Figura 24. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 F1.5 - 50	28

Figura 25. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 T50x1.5 - 01	28
Figura 26. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 F1.5 - 50	29
Figura 27. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 T50x1.5 - 01	30
Figura 28. Resultados de esfuerzo de fluencia F_y y esfuerzo último F_u de probetas de la Empresa 01	30
Figura 29. Resultados de esfuerzo de fluencia F_y y esfuerzo último F_u de probetas de la Empresa 02	31
Figura 30. Resultados de esfuerzo de fluencia F_y y esfuerzo último F_u de probetas de la Empresa 03	31
Figura 31. Relación de F_u/F_y de probetas obtenidas de la Empresa 01.....	32
Figura 32. Relación de F_u/F_y de probetas obtenidas de la Empresa 02.....	32
Figura 33. Relación de F_u/F_y de probetas obtenidas de la Empresa 03.....	33
Figura 34. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} de la Empresa 01	35
Figura 35. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} de la Empresa 02	35
Figura 36. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} de la Empresa 03	36
Figura 37. Regresión lineal del factor de relación FR con el espesor t	38
Figura 38. Regresión lineal del factor de relación FR con la expresión matemática α	38
Figura 39. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} obtenido de los primeros resultados, comparado con el esfuerzo de fluencia del fleje F_{ys} y el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} . 39	
Figura 40. Regresión lineal del factor de relación FR con la expresión matemática utilizada sin los valores atípicos.	41
Figura 41. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} sin los valores atípicos, comparado con el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} y el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt}	42
Figura 42. Distribución normal de la diferencia $F_{ye} - F_{yt}$. Se muestra el valor correspondiente al 95% de probabilidad igual a 24,95 MPa.....	43
Figura 43. Línea de tendencia β' ajustada con 25 MPa como constante de corrección.....	44
Figura 44. Resultados del esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} menor que el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} con 95 % de probabilidad.....	45
Figura 45. Área total de la sección en tensión	46

Figura 46. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ya}	47
Figura 47. Longitud de sección completa, l_{sc}	48
Figura 48. Esfuerzo de fluencia esperado F_y'	48

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Dimensiones de la probeta de ensayo a tracción indicadas por la norma ASTM A370 - 20	14
Cuadro 2. Relación F_u/F_y de probetas de 1.5 mm de espesor de la Empresa 03	33
Cuadro 3. Análisis de covarianza y coeficiente de correlación en relación con el factor de relación reducido.....	37
Cuadro 4. Resultados del segundo análisis de valores atípicos en la diferencia $F_{ye} - F_{ys}$	40
Cuadro 5. Probetas con resultados considerados como valores atípicos.....	40
Cuadro 6. Variaciones de líneas de tendencia para los datos mostrados en la Figura 40 y sus respectivos valores de R^2	41
Cuadro 7. Resultados promedio del F_y experimental y de las estimaciones realizadas.	51

Rojas Muñoz, Josué

Relación entre el esfuerzo de fluencia en elementos de acero conformados en frío y en acero virgen, de los productos fabricados en Costa Rica.

Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R:

J. Rojas M., 2021

xiii, 59, [60]h; ils. col. – 19 refs.

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la relación entre el esfuerzo de fluencia de elementos de acero conformados en frío y el acero virgen de flejes utilizados para la fabricación de dichos elementos, con el fin incluirla como una alternativa en la normativa costarricense del producto.

Para el desarrollo del proyecto se contó con la participación de tres empresas que realizan el proceso de conformado de tubos en el territorio nacional. Se obtuvo secciones del fleje antes del conformado y secciones del tubo después del proceso mencionado.

Con una maquina de falla universal se ensayó las probetas recolectadas y se determinó el esfuerzo de fluencia del material de los flejes y del material los tubos. Se buscó la correlación entre los resultados, con la cual se propuso una ecuación que permite estimar el esfuerzo de fluencia de los tubos utilizando las propiedades mecánicas y físicas del material de los flejes con los que se producen los tubos. Finalmente se realizaron análisis estadísticos para garantizar resultados con un nivel de significancia del 95%.

La ecuación propuesta brinda una alternativa para estimar el esfuerzo de fluencia del producto terminado. Permitiendo a los productores realizar los ensayos desde los rollos de fleje del acero, destinando menos recursos económicos para obtener la propiedad mecánica mencionada.

J.R.M.

Palabra clave: ESFUERZO DE FLUENCIA, ACERO CONFORMADO EN FRÍO, INCREMENTO RESISTENCIA, DISMINUCIÓN DUCTILIDAD

Ing. Andrea Ramírez Villaba

Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. Problema específico

La normativa costarricense vigente para tubos de acero al carbono conformados en frío, desarrollada por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, INTE C412:2018, indica que los especímenes de ensayo en tracción para obtener el esfuerzo de fluencia deben ser tomados de secciones de tamaño completo o de tiras longitudinales. Agrega además que, en tubos electrosoldados, la tira longitudinal debe ser tomada al menos a 90° desde la soldadura.

Se entiende entonces que las pruebas de tracción para tubería estructural conformada en frío se deben realizar mediante probetas o secciones del producto terminado. Excluyendo la posibilidad mencionada en la norma AISI S100-16 sección A3.3.2, que permite calcular mediante una ecuación el esfuerzo de fluencia promedio a partir del esfuerzo de fluencia del acero virgen.

Con esta limitación, los fabricantes de tubería estructural conformada en frío deben destinar mayores recursos económicos al realizar las pruebas en sus productos tubulares finalizados que cuando se realizan los ensayos a partir del acero virgen en fleje.

Se considera entonces que incluir métodos alternativos en la norma INTE C412 para estimar el límite de fluencia mediante los ensayos a especímenes del fleje de acero virgen en la normativa costarricense, es de importancia para los productores y para el consumidor. De este modo, no se requeriría destinar una importante cantidad de productos terminados para el cálculo de la resistencia de tracción, significando un ahorro de recursos para los productores.

1.1.2. Importancia

Rodríguez (2010), menciona que, debido a su bajo peso, facilidad de instalar, alta resistencia y beneficio económico, los tubos cuadrados y rectangulares conformados en frío se utilizan actualmente en mayor cantidad en las estructuras sismorresistentes. Y aunque como destaca Gómez (2013), el promedio de los valores del esfuerzo de fluencia de la tubería es 43% mayor que el indicado por el fabricante ($F_y = 227 \text{ MPa}$), es importante verificar constantemente que los valores de F_y mínimo se cumplen. Además, en el diseño sísmico se debe limitar el esfuerzo máximo y la relación $F_{y\max} / F_y$.

Actualmente, en el país se encuentran al menos tres empresas fabricantes de tubería conformada en frío, colocando en el mercado más de 20 secciones diferentes entre tubos cuadrados y rectangulares.

Romanjek (2001) y Monge y Vindas (2002), en sus respectivas investigaciones, mencionan que la mayoría de los perfiles conformados en frío en Costa Rica se realizan con láminas de acero provenientes del sur del continente americano y responden a la norma japonesa JIS G3132 Hot-rolled carbon steel strip for pipes and tubes (Tiras de acero laminado en caliente para tubos y tubería), normativa no incluida en las listas de acero aceptadas por el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI, por sus siglas en inglés). Los espesores utilizados para la fabricación de elementos tubulares varían entre 1,2 mm a 4,75 mm, distribuidos en tubos de diferentes secciones.

Estas investigaciones anteriores han contado con la participación de la empresa Metalco y la extinta Tubotico (adquirida por Metalco). Pero con el ingreso al mercado de más empresas fabricantes, es importante incorporarlas en las nuevas investigaciones para obtener resultados que sean representativos de los productos actualmente fabricados en el país, para simplificar el procedimiento del ensayo y facilitar el control de las propiedades mecánicas del material utilizado en Costa Rica.

1.2. Antecedentes

En el ámbito internacional, Romanjek (2001) menciona que los primeros estudios sobre perfiles de lámina delgada conformada en frío fueron realizados en la Universidad de Cornell, de los Estados Unidos de Norteamérica.

Los resultados de dichas investigaciones fueron usados en la norma AISI S100-16 tal como se amplía en la sección 2.3 del Marco Teórico de este documento.

Karren y Winter (1967) demostraron la similitud de resultados entre las características de tracción-deformación calculadas con la fórmula y las obtenidas mediante pruebas para una sección de canal y una sección de vigueta. (Comentario AISI S100-16).

Por su parte, Yu & LaBoube (2010) mencionan que en la Especificación Canadiense de 1994 para calcular el esfuerzo de fluencia de una sección completa en tensión o compresión se incluyó otra propuesta basada en las investigaciones de Lind y Schroff (1971), quienes utilizando un modelo de lineal esfuerzo-endurecimiento y los datos experimentales de Karren (1967),

concluyeron que el incremento en el esfuerzo de fluencia depende solo de la razón r/t y el margen de endurecimiento ($F_u - F_y$). Ver más detalle en la sección 2.3 del Marco Teórico de este documento.

En Costa Rica, tanto en la Universidad de Costa Rica (UCR) como en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) se han realizado estudios sobre el acero conformado en frío, unos referentes a los perfiles abiertos y otros para tubería cerrada. Sin embargo, la mayoría son sobre evaluaciones del material en diseños estructurales específicos.

Una de las primeras investigaciones realizadas en el país fue la tesis de maestría de la Ing. Marija Romanjek Blimel, en el año 2001, quien analizó las propiedades estructurales de la perfilería de acero conformado en frío producida en el mercado nacional entre los años 1999 y 2001.

En la investigación se compara de forma directa los esfuerzos promedios obtenidos mediante la prueba de tracción de probetas de tubos con los esfuerzos límites probables incrementados de los ensayos del acero virgen.

Para ello, Romanjek determinó las propiedades mecánicas del acero virgen especificado como tipo JIS G3132 utilizado en la confección de tubos de perfil delgado, llegando a la conclusión de que la ductilidad total y uniforme del material es mayor que lo mínimo requerido en el AISI 100-16, por lo tanto, ese tipo de acero puede ser usado sin restricciones en miembros estructurales.

Romanjek (2001) concluye también que los valores del límite de fluencia ($F_y = 227$ MPa) y el esfuerzo último ($F_u = 340$ MPa) son confiables, ya que sus resultados dieron en promedio 31% y 21% mayor respectivamente que los especificados por el distribuidor y el fabricante del acero.

Al comparar los resultados de los esfuerzos límites probables incrementados obtenidos a partir de los ensayos en el acero virgen, según lo permite la normativa S100-16 del AISI y los promedios obtenidos de los ensayos a tracción, Romanjek (2001) determinó que los valores experimentales del límite de fluencia son inferiores a los resultados teóricos. La mayor diferencia encontrada fue de 7%.

Posteriormente, el Ing. Carlos Gómez Godínez (2013) realizó su tesis de licenciatura sobre las propiedades mecánicas del acero de tubos estructurales conformados en frío, en secciones cuadradas y rectangulares. Las muestras utilizadas fueron tomadas entre los años 2011 y 2012 de diferentes construcciones en el Gran Área Metropolitana. Gómez incluye además un análisis estadístico para validar los resultados obtenidos.

Dentro de las conclusiones, Gómez destaca que el esfuerzo de cedencia promedio obtenido en sus resultados fue $F_y = 325,15$ MPa, 43% mayor que el mínimo especificado por el fabricante ($F_y = 227$ MPa), dejando nuevamente en evidencia la necesidad de monitorear las características de los materiales de los tubos conformados, debido a la diferencia significativa encontrada. La desviación estándar de los resultados de Gómez fue de 28,51 MPa.

Además, se concluyó que el esfuerzo de fluencia promedio obtenido en su investigación es un resultado confiable debido a que su muestra fue representativa de la población total.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la relación entre el esfuerzo de fluencia de elementos de acero conformados en frío (secciones cuadradas y rectangulares) y el acero virgen de flejes utilizados para la fabricación de dichos elementos en Costa Rica para que sea valorada su inclusión como una alternativa en la norma del producto.

1.3.2. Objetivo específico

- a. Determinar el proceso de recolección de las muestras.
- b. Medir experimentalmente el esfuerzo de fluencia del acero virgen utilizado en la fabricación de tubos conformados en frío en Costa Rica.
- c. Medir experimentalmente el esfuerzo de fluencia del acero de tubos conformados en frío.
- d. Correlacionar los resultados experimentales del esfuerzo de fluencia del acero de tubos conformados en frío con los resultados experimentales del esfuerzo de fluencia del acero virgen y de definir una ecuación que describa la correlación.
- e. Estimar el esfuerzo de fluencia del acero de tubos conformados en frío mediante la ecuación obtenida de la correlación.
- f. Analizar por métodos estadísticos los resultados obtenidos experimentalmente para determinar su representatividad.

1.4. Delimitación del problema

1.4.1. Alcance

La investigación se enfocó en calcular la variación en el esfuerzo de fluencia F_y de tubería cuadrada y rectangular cuando se mide en el producto terminado y en el acero virgen.

Se utilizó tubería de espesores de 1.5, 1.8, 2.37 y 3.17 mm con la intención de obtener varios resultados que muestren la variación debida a esta característica física. En cuanto a los anchos de las secciones planas, se utilizaron de 50, 72 y 100 mm.

Se analizaron muestras de fleje con el cual se formó el tubo, con el fin de comparar resultados y determinar la relación de los esfuerzos de fluencia del producto terminado y del acero virgen.

Las muestras utilizadas fueron brindadas por tres empresas fabricantes de tubería conformada en frío en Costa Rica.

Para el producto terminado, se elaboraron tres especímenes por cada combinación entre los anchos de sección y los espesores mencionados, sin embargo, de la Empresa 01 no se obtuvo material de 3.17 mm de espesor. En total se obtuvieron 99 especímenes de los tubos.

Para las pruebas del acero virgen obtenido de los flejes, se obtuvo tres especímenes por cada espesor en cada una de las empresas, con la misma limitante en el material de 3.17 mm de espesor en uno de los fabricantes, generando 33 especímenes. Por lo tanto, el tamaño total de las muestras utilizada fue de $n = 132$.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Para obtener las propiedades de material se aplicaron los procedimientos de la norma ASTM A370.

1.4.2. Limitaciones

A pesar de existir una buena disposición por parte de los fabricantes, una de las limitaciones se encuentra en la disponibilidad del producto requerido, ya que este responde a la demanda de los consumidores y a la capacidad del fabricante para confeccionarlos.

En la Empresa 01 no se brindó material de espesor de 3,17 mm ya que los tubos que ofrecen del calibre mencionado no son conformados en su planta de fabricación.

Además, el fabricante de la Empresa 01 no permitió la presencia del investigador en la obtención de las secciones de fleje y de tubo en la fábrica. Se justificó dicha decisión haciendo referencia a la complejidad de coordinar las visitas. Solo se permitió estar presente en dos de las nueve secciones de tubos y fleje brindadas.

Por su parte, en la recolección de la sección de tubo de dimensiones 100 mm x 100 mm de 3,17 mm de espesor y su respectivo fleje de la Empresa 03, no fue posible para el investigador estar presente. Sin embargo, el fabricante separó las muestras y se recogieron posteriormente.

1.5. Metodología

1.5.1. Revisión bibliográfica

El desarrollo del proyecto inició con una búsqueda de información relacionada con los aceros conformados en frío. Existen algunas investigaciones de la Universidad de Costa Rica que dieron una base de información importante en los aceros conformados en frío del territorio nacional. Adicionalmente, se estudió investigaciones realizadas en otros países, algunas de las cuales han sido las bases para la normativa estadounidense.

Esta revisión incluyó el proceso de fabricación de los tubos conformados en frío, esfuerzos residuales debido al conformado en frío, normativa que regula las pruebas de ensayo requerida y restricciones de la reglamentación costarricense.

1.5.2. Desarrollo experimental

El desarrollo de la investigación requirió realizar pruebas de ensayo a probetas obtenidas de tubos conformados en frío de fabricación nacional. Para ello, fue indispensable la participación de fabricantes que donaron el material requerido. Se trabajó con tres empresas: Metalco, Metal Gypsum y Metales Flix, quienes facilitaron las secciones de tubo y de fleje requeridas en el proyecto.

Una vez que se tuvo el material de ensayo, se procedió a la fabricación de los especímenes, según lo estipulado en la normativa correspondiente, para realizar el proceso de falla experimental. Los ensayos experimentales se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) con la colaboración de los técnicos especialistas.

1.5.3. Análisis de resultados

Los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio fueron procesados para obtener el esfuerzo de fluencia (F_y), la resistencia última (F_u) y las deformaciones unitarias respectivas para verificar que se cumplen las restricciones del CSCR-14.

Se realizó pruebas de hipótesis según la teoría de la estadística inferencial que permitieron verificar los resultados.

1.5.4. Informe final

Se realizó el informe final donde se muestran los resultados analizados, así como las conclusiones y recomendaciones. Este punto dio fin a la investigación.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de lo descrito anteriormente.

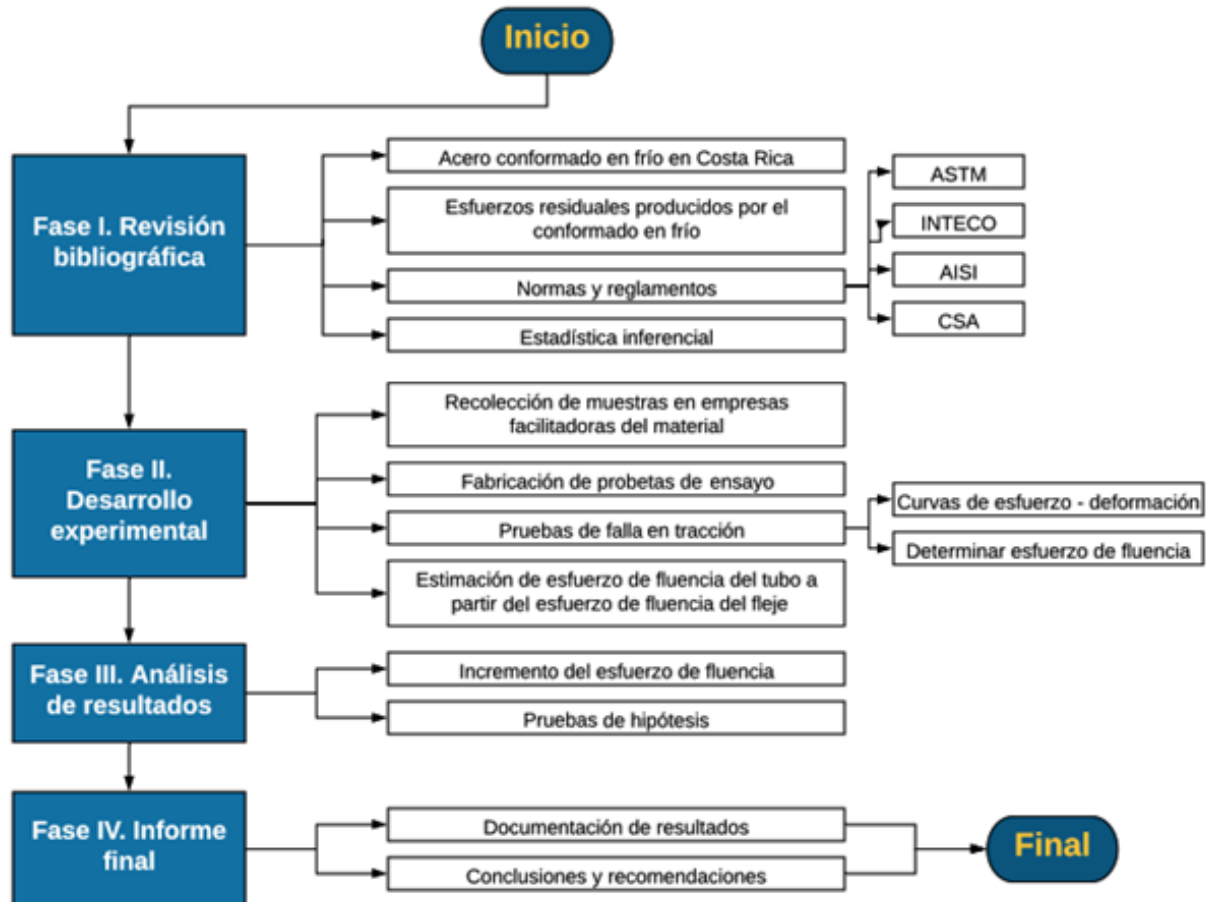


Figura 1. Metodología utilizada en la investigación

Fuente. El autor

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Proceso de fabricación de tubos conformados en frío

La fabricación de tubos conformados en frío usualmente se realiza mediante dos métodos: el *método de prensa* para perfiles de sección abierta y el *método de conformado en frío* para secciones tubulares. Gómez (2013) menciona que el primer método consiste en doblar a presión las láminas de acero, mediante una prensa hidráulica, como se muestra en la Figura 2, con el fin de brindarle la geometría deseada. Por su parte, el segundo método hace pasar la lámina por

varios rodillos que en primera instancia genera una sección circular, la cual es moldeada hasta alcanzar las secciones cuadradas y rectangulares requeridas (ver Figura 3).

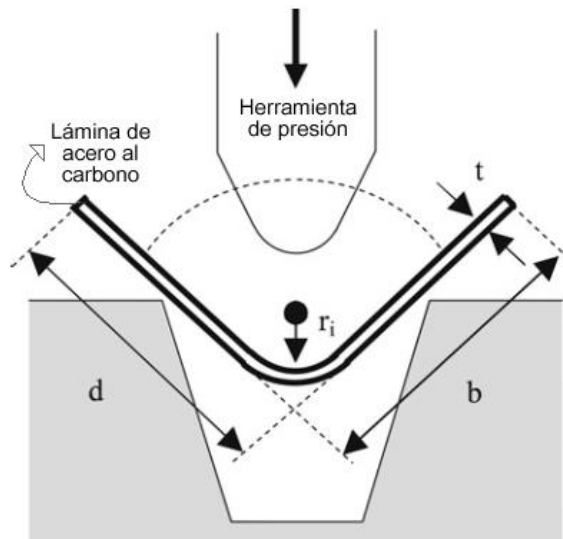


Figura 2. Conformado en frío mediante el método de la prensa a presión. la fuerza para deformar la lámina se aplica sobre secciones puntuales.

Fuente: Cruise y Gardner, 2008

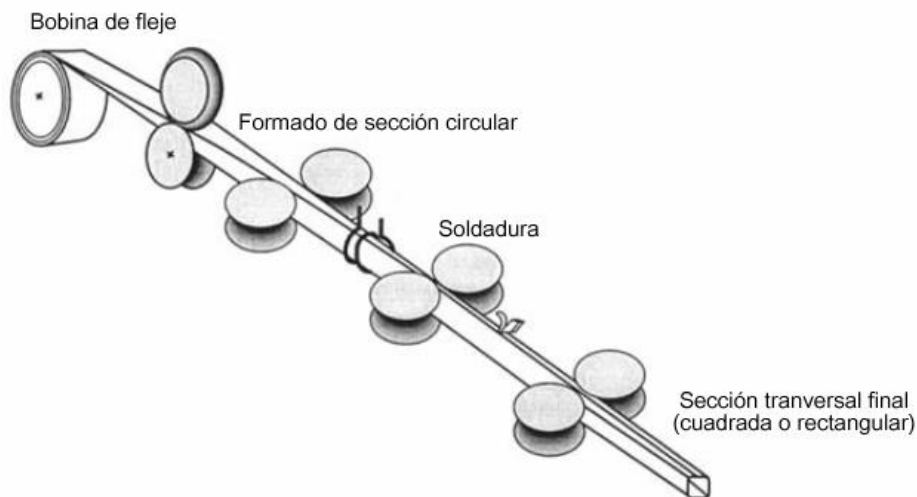


Figura 3. Proceso de fabricación de tubos mediante el método de conformado en frío

Fuente: Heinilä, Björk y Marquis, 2008

Modificada por el autor

2.2. Esfuerzos residuales en tubos conformados en frío

Weng y Peco (1990), en su investigación experimental mencionan que los esfuerzos residuales tienen importancia en el diseño estructural de miembros de acero; dentro de las causas que los provocan se encuentran el conformado en frío de láminas delgadas. Los resultados muestran un incremento en el esfuerzo de fluencia y en la resistencia a la tracción.

Yu & LaBoube (2010), indican que el incremento del esfuerzo último es mucho menor que el que se da en el esfuerzo de fluencia, generando una reducción en la separación entre ambos, o bien, una reducción de la ductilidad del material después del endurecimiento (Figura 4).

Yu & LaBoube (2010), también mencionan que investigaciones realizadas por Winter, Karren, Chajes, Britvec y Uribe demostraron que el cambio de las propiedades mecánicas en aceros conformados en frío se da por dos factores: endurecimiento por la deformación plástica y endurecimiento por el envejecimiento de deformación, como se muestra en la Figura 4.

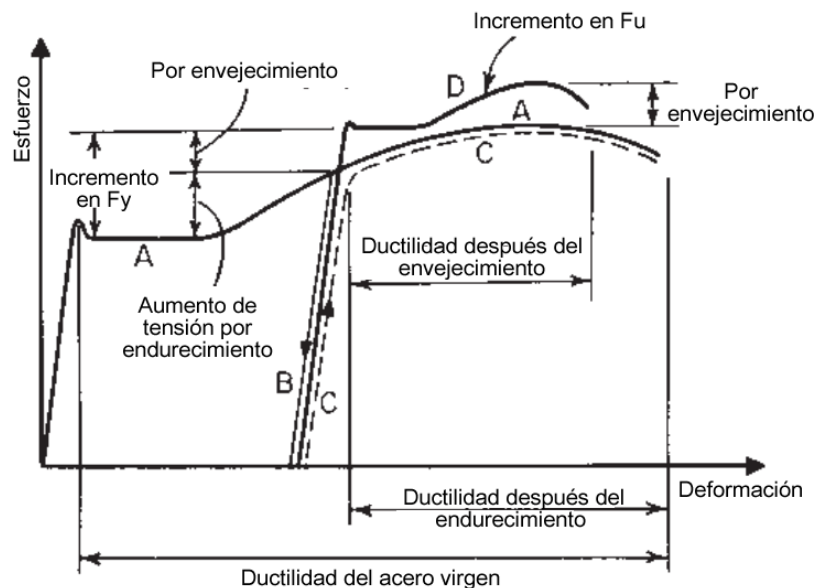


Figura 4. Diagrama esfuerzo-deformación de acero conformado en frío en la investigación de Winter, Chajes y Britvec.

Fuente: Yu & LaBoube, 2010

En secciones rectangulares y cuadradas se dan mayores deformaciones en las esquinas generando propiedades mecánicas diferentes en la sección transversal. La Figura 5 muestra las variaciones en las propiedades geométricas para cada sección específica. Se observa que en las

partes planas el F_y es considerablemente menor, lo cual explica porque el pandeo o la fluencia inicia siempre en estas secciones.

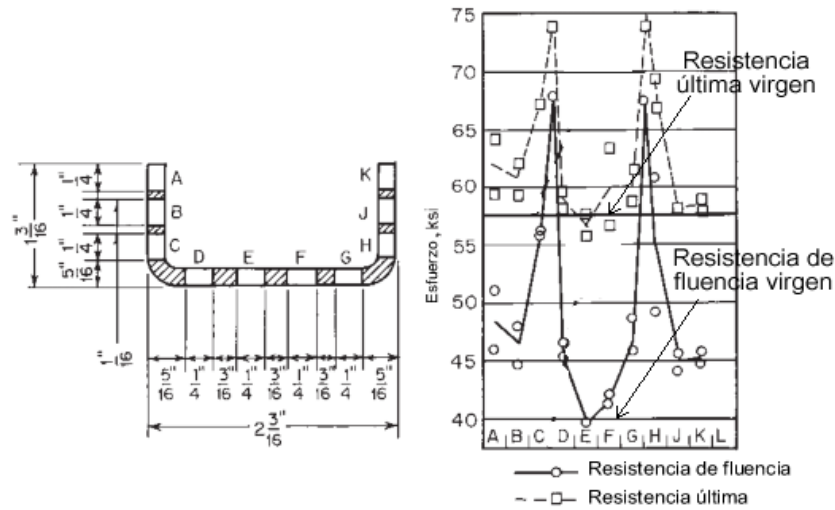


Figura 5. Efecto del trabajo en frío en las propiedades del material, como resultado de las investigaciones realizadas por Karren & Winter.

Fuente: Yu & LaBoube, 2010.

Yu & LaBoube (2010), mencionan que los cambios de las propiedades mecánicas en las esquinas de tubos conformados en frío usualmente dependen de varios factores: el tipo de acero, el tipo de carga aplicada (tensión o compresión), la dirección del esfuerzo con respecto a la dirección del trabajo en frío, la razón F_u/F_y , la razón R/t y la magnitud de fuerza aplicada. Sin embargo, la razón F_u/F_y , la razón R/t son los factores de mayor importancia.

2.3. Aproximación numérica del esfuerzo de fluencia

2.3.1. Normativa AISI S100-16

El Instituto Estadounidense de Hierro y Acero (AISI, por sus siglas en inglés), en la Especificación para el Diseño de Miembros de Acero Estructural Conformado en Frío, S100-16, indica en la sección A.3.3.2 que el esfuerzo de fluencia de diseño en tensión (F_{ya}) se puede determinar mediante dos métodos:

- (1) Prueba en tracción de sección completa, mediante el procedimiento de ASTM A370
- (2) Calculándolo con la siguiente ecuación:

$$F_{ya} = C \cdot F_{yc} + (1 - C)F_{yf} \leq F_{uv} \quad (1)$$

Donde:

F_{ya} = Promedio del límite de fluencia de una sección completa en los elementos sometidos a compresión o en el ancho plano de una sección sometida a flexión.

C = Para los miembros en compresión y tensión, razón del área total de las esquinas (A_c) de la sección y el área total de la sección (A); para elementos en flexión, razón del área de la de la esquina del ala (A_c) considerada y el área total del ala (A_f).

F_{yf} = Promedio del límite de fluencia de porciones planas establecida de acuerdo con la Sección K2.3.2 o esfuerzo de fluencia del acero virgen si no se realizan pruebas.

F_{yc} = Límite de fluencia de las esquinas. Se aplica solo cuando $F_{uv}/F_{yv} \geq 1.2$, $R/t \leq 7$ y el ángulo $\leq 120^\circ$. Se calcula de acuerdo con la Ecuación (2).

$$F_{yc} = B_c \cdot F_{yv} / (R/t)^m \quad (2)$$

$$B_c = 3.69 \left(F_{uy} / F_{yv} \right) - 0.819 \left(F_{uy} / F_{yv} \right)^2 \quad (3)$$

$$m = 0.92 \left(F_{uy} / F_{yv} \right) - 0.068 \quad (4)$$

Donde:

R = Radio de curvatura interno

t = Espesor de la sección

F_{yv} = Límite de fluencia del acero virgen especificado por la Sección A3 o establecido de acuerdo con la Sección K2.3.3 del AISI S100-16.

F_{uv} = Esfuerzo último del acero virgen especificado por la Sección A3 o establecido de acuerdo con la Sección K2.3.3 del AISI S100-16.

2.3.2. Especificación Canadiense CSA S136-94

Yu & LaBoube (2010) mencionan que en la Especificación Canadiense de 1994 para calcular el esfuerzo de fluencia de una sección completa en tensión o compresión se utilizó la Ecuación 3 basada en las investigaciones de Lind and Schroff.

Lind & Schroff (1971) utilizaron un modelo lineal esfuerzo-endurecimiento y los datos experimentales de Karren. Concluyeron que el incremento en el esfuerzo de fluencia depende solo de la razón R/t y el margen de endurecimiento $(F_u - F_y)$.

$$F_y' = F_y + \frac{5D}{W^*} (F_u - F_y) \quad (5)$$

Donde:

F_y' = Esfuerzo de fluencia esperado

F_y = Esfuerzo de fluencia del acero virgen

F_u = Esfuerzo último del acero virgen

D = Suma de los ángulos de las esquinas dividido entre 90.

W^* = Razón entre la longitud de una línea de centro de la sección en tensión y el espesor t .

Sloof & Schuster (2000), realizaron una investigación en la Universidad de Waterloo donde se analizaron doce secciones diferentes. Recogieron los datos del material virgen, secciones completas y de las partes planas de secciones conformadas. Se analizaron los resultados experimentales, los resultados usando la ecuación utilizada en la especificación estadounidense AISI 1994 y los obtenidos mediante la ecuación propuesta en la especificación canadiense CSA S136-94.

Uno de sus principales propósitos fue determinar si existía una expresión simplificada que produjera resultados similares a los que brinda la ecuación usada en el AISI con menos datos de entrada.

Dentro de las conclusiones se menciona que los límites de fluencia de las pruebas a tensión de sección completa se comparan bien con lo calculado utilizando ambos enfoques AISI o S136. Además, recomiendan al AISI adoptar el enfoque S136 por su simplicidad.

2.4. Prueba de tracción en productos tubulares de acero

La norma ASTM A500-18 menciona en la sección 15.2. que se puede realizar la prueba de tracción longitudinal por medio de especímenes de sección completa o tiras longitudinales obtenidas del producto tubular.

En caso de que la tubería estructural haya sido soldada, se deben tomar las tiras longitudinales al menos a 90° de la soldadura como se muestra en la Figura 6.

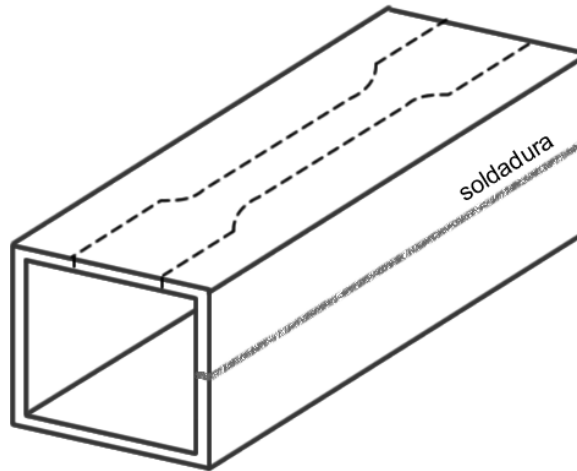


Figura 6. Tiras longitudinales para pruebas de tracción en productos tubulares.

Fuente: El autor

La norma ASTM A370-20 indica las dimensiones mínimas que se deben cumplir con su respectivo margen de tolerancia en las probetas de falla a tracción. La Figura 7 muestra la nomenclatura utilizada y por su parte el Cuadro 1 muestra las dimensiones mínimas requeridas para láminas tipo hoja que abarca los espesores de 0,13 mm hasta 25 mm.

Una de las notas adjuntas indica que es deseable que la longitud de sección de agarre B sea al menos igual a dos terceras partes del largo del agarre de la máquina de falla utilizada.

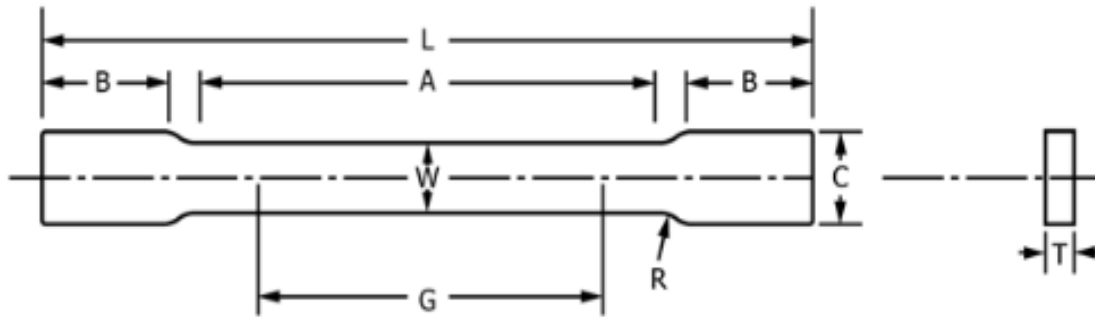


Figura 7. Dimensiones de la probeta de ensayo a tracción

Fuente: ASTM, 2020

Cuadro 1. Dimensiones de la probeta de ensayo a tracción indicadas por la norma ASTM A370 - 20

Lámina de acero tipo hoja	
Nomenclatura	Dimensiones (mm)
G - Longitud de control	$50 \pm 0,1$
W - Ancho	$12,5 \pm 0,25$
T - Espesor	Espesor del material
R - Radio	13
L - Longitud total	200
A - Longitud de sección reducida	60
B - Longitud de sección de agarre	50
C - Ancho de sección de agarre	20

Otro aspecto importante es el método para determinar el esfuerzo de fluencia. Yu & LaBoube (2010), mencionan que determinar el punto del esfuerzo de fluencia depende del tipo de gráfico esfuerzo-deformación que se presente. Un gráfico con un cambio agudo en la pendiente del rango elástico, convirtiéndose en una meseta, presenta su F_y en el promedio de la meseta mencionada. Mientras que cuando el gráfico muestra cambios graduales entre el esfuerzo y la deformación y no existe un cambio abrupto se debe estimar por un método alternativo; generalmente se utiliza el método Offset o el método de esfuerzo a una deformación especificada.

El método Offset es comúnmente utilizado en trabajos de investigación, consiste en trazar una línea paralela al rango elástico con un desfase en la mayoría de los casos de $\epsilon_m = 0,2\%$ como se muestra en la Figura 8. Mientras que la deformación unitaria generalmente especificada en el método de esfuerzo a una deformación es de $0,5\%$.

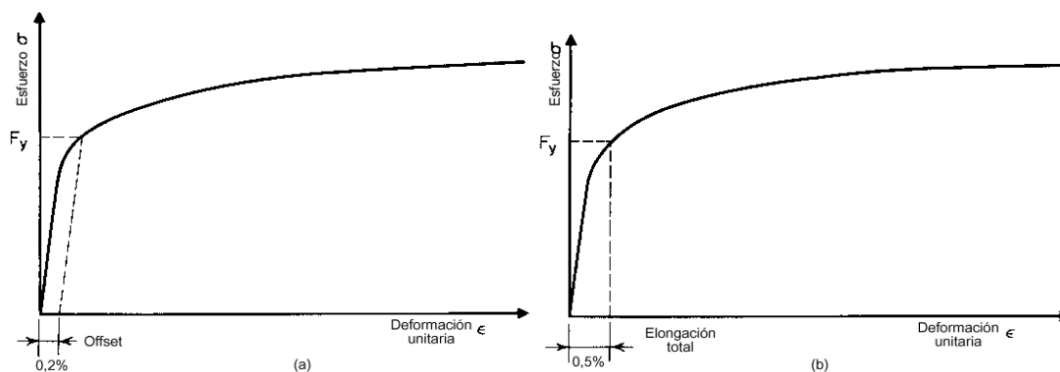


Figura 8. Diagrama esfuerzo-deformación, método Offset (a) y el método de sobrecarga a tensión (b)

Fuente: Yu & LaBoube, 2010

2.5. Requerimientos del Código Sísmico de Costa Rica

Se establece en la sección 10.1.3.1 d. del CSCR-14 que los aceros para la fabricación de perfiles conformados en frío deben cumplir con una relación entre el esfuerzo último y el esfuerzo de cedencia (F_u/F_y) igual o mayor que 1,08. Mientras que la elongación de probetas debe ser al menos 10% en longitudes de medición de 50 mm y 7% en longitudes de medición de 200 mm. Estos requisitos buscan garantizar una ductilidad mínima en elementos, componentes y uniones de los sistemas sismorresistentes.

La tabla 10.1 de CSCR-14 incluye el concepto de resistencia esperada del material, e indica que para obtener la resistencia esperada (F_{ye}) del material en acero correspondiente a la norma JIS G3132 multiplica el esfuerzo de fluencia especificado F_y por un factor $R_y=1,6$. Y en el caso del esfuerzo de tracción esperado (F_{te}), se multiplica el esfuerzo último (F_u) por un factor $R_t=1,2$. Esta tabla se basa en las investigaciones previas a la realizada por Gómez (2013)

En la sección 1.2 de este documento se había mencionado que Gómez (2013) en su investigación encontró que el F_y real es en promedio 43% mayor que el indicado por los fabricantes ($F_y = 227$ MPa).

El apartado 10.2.6 del CSCR-14 indica que para fabricar elementos estructurales el espesor mínimo es de 3 mm. Se permite usar espesores menores siempre y cuando se cumplan con las condiciones mencionadas en dicho apartado.

2.6. Conceptos básicos de estadística general

El análisis estadístico utilizado en la investigación se basa en dos principios: distribución de probabilidad conjunta y estadística descriptiva.

Montgomery y Runger (2003), mencionan que la distribución de probabilidad conjunta permite describir el comportamiento simultaneo de dos variables aleatorias. En la investigación se desea medir la relación entre dos variables, para ello se utiliza el concepto de Covarianza y Coeficiente de correlación.

Montgomery y Runger (2003), presentan la Covarianza como una medida de asociación lineal entre las variables aleatorias que describe la variación existente entre las mismas.

Walpole, Myers y Myers (2012), mencionan que si los valores grandes (o pequeños) de la variable 1 están relacionados a los valores grandes (o pequeños) de la variable 2 se tendrá un valor positivo de covarianza. Mientras que si los valores grandes (o pequeños) de la variable 1 están relacionados a los valores pequeños (o grandes) de la variable 2 se tendrá un valor negativo de covarianza. Sin embargo, la covarianza no indica el peso de la relación existente.

Para ello se utiliza el coeficiente de correlación, el cual toma un valor igual a cero cuando la Covarianza es cero y un valor de 1 o -1 cuando hay dependencia lineal exacta de las variables.

Por otro lado, se utiliza la estadística descriptiva para describir numéricamente las características de los datos. Se utilizan principalmente dos caracterizadores: la media y la desviación estándar.

Por lo que para realizar la prueba de hipótesis de dos muestras se seguirá el procedimiento mostrado a continuación (Montgomery D., y Runger G., 2003).

Utilizando el estadístico de prueba:

$$Z_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - \Delta_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (6)$$

Se define la hipótesis nula:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0 \quad (7)$$

Hipótesis alternativas:

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0 \quad (8)$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 > \Delta_0 \quad (9)$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 < \Delta_0 \quad (10)$$

Criterio de rechazo:

$$Z_0 > Z_{\alpha/2} \text{ o } Z_0 < -Z_{\alpha/2} \quad (11)$$

$$Z_0 > Z_{\alpha} \quad (12)$$

$$Z_0 < -Z_{\alpha} \quad (13)$$

donde:

H_0 = hipótesis que se desea probar

H_1 = hipótesis alternativa, el rechazo de H_0 conduce a la aceptación de H_1

Δ_0 = diferencia entre los promedios de cada población

μ_i = promedio de la población i

σ_i = desviación estándar de las muestras i

$\bar{X}_i$ = promedio de las muestras i

n_i = cantidad de muestras para el grupo i

Z_0 = variable aleatorio normal estándar

Z_{α} = representa el nivel de confianza de la prueba de hipótesis

Capítulo 3. Desarrollo experimental

Este capítulo describe el proceso experimental realizado. Incluye la descripción del muestreo, fabricación de las probetas y el desarrollo de la falla a tracción.

3.1. Descripción del muestreo y confección de las probetas

3.1.1. Proceso de recolección de las muestras

Para realizar el muestreo se contó con la colaboración de tres empresas que realizan conformado de tubo de perfil delgado en Costa Rica: Macopa, Metalco y Metales Flix. Estas empresas donaron el material utilizado en la investigación. Por su parte, el investigador visitó las plantas de producción para estar presente a la hora de obtener las muestras, en la mayoría de los casos.

La fabricación de los tubos conformados en frío en las plantas de producción de las tres empresas se realiza mediante el método de conformado, mencionado en la Sección 2.1., similar al que se muestra en la Figura 9. Sin embargo, el almacenamiento del material previo a ingresar a la línea de producción se realiza con diferentes procedimientos.

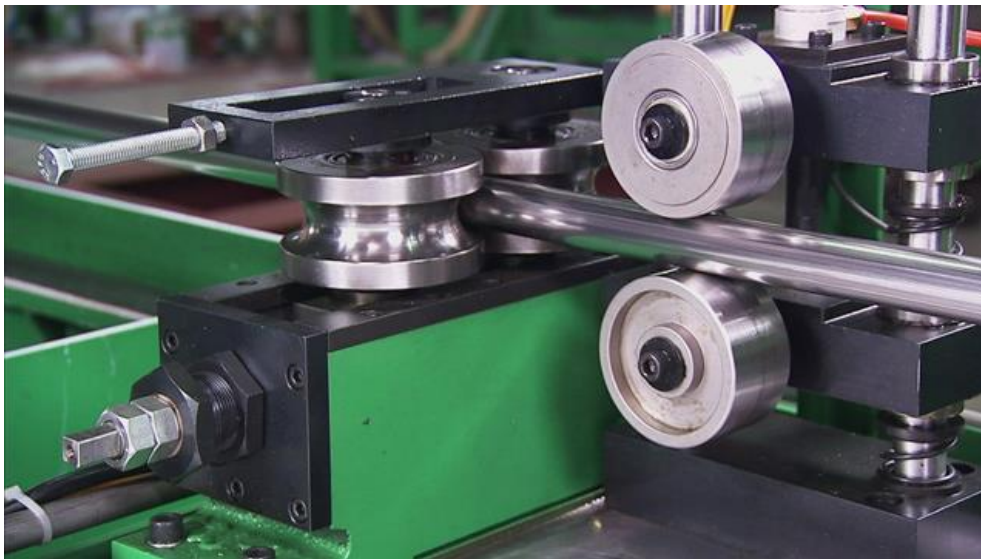


Figura 9. Maquina utilizada para el conformado de tubos en frío en las fábricas visitadas

Fuente: es.machinetools.net.tw

El procedimiento consiste en desenrollar el fleje para que ingrese en la línea de producción. Se dispone de acumulares horizontales y verticales. Los primeros almacenan el material en forma de espiral evitando que se generen deformaciones, mientras los segundos permiten que el acero se doble de forma abrupta lo que genera deformaciones que podrían alterar las características

mecánicas del acero. La Figura 10. y Figura 11. muestran los tipos de acumuladores utilizados por los fabricantes.

También se observó que se utiliza el desenrollado del fleje sin el acumulador, sin embargo, en cada cambio de fleje se detiene el proceso de producción.

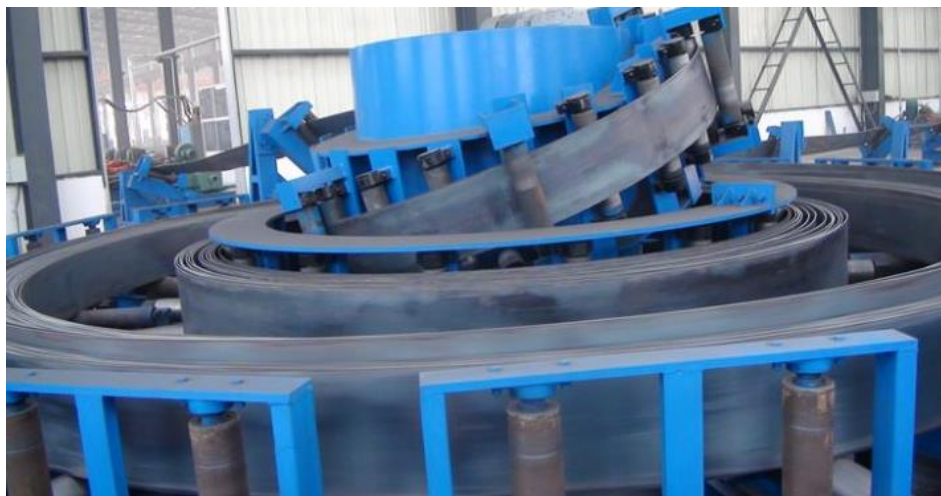


Figura 10. Acumulador de fleje en posición horizontal

Fuente: <httpm.es.starise-equipment.com>



Figura 11. Acumulador de fleje en posición vertical

Fuente: <httpm.es.starise-equipment.com>

Las muestras de fleje se tomaron de la bobina, antes de que el material ingresara a los acumuladores. Mientras que la sección del tubo se obtuvo cuando el proceso había finalizado por completo.

Parte fundamental de la investigación es garantizar que el material utilizado en las pruebas correspondiera a un mismo fleje, sin embargo, esto se logró verificar en el 76% de las muestras recogidas. El porcentaje restante fue proveído por el fabricante, quien comunicó que el proceso de recolección fue el mismo.

La Figura 12 muestra la sección de fleje y de tubo obtenido en una de las empresas correspondiente a un tubo de dimensiones 50 mm x 50 mm en 1.5 mm de espesor.



Figura 12. Muestra de fleje de 25 cm y de tubo de 50 cm obtenida de uno de los fabricantes nacionales

Fuente: El autor

El Anexo 1. detalla la cantidad de secciones brindadas por cada uno de los fabricantes, el código de identificación, la fecha de recolección y si el investigador estuvo presente para garantizar que la sección de tubo correspondiera al mismo fleje muestreado.

Para la caracterización de los tubos se requiere del ancho nominal de la sección y el radio de curvatura interno. La dimensión del radio se obtuvo utilizando galgas de radio, similares a las mostradas en la Figura 13 y Figura 14.

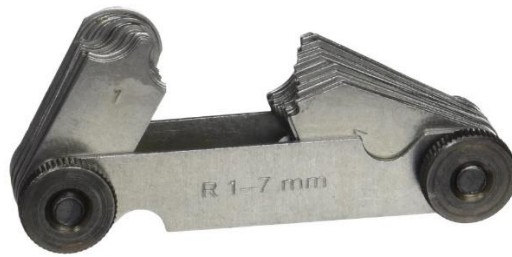


Figura 13. Galgas de radios para medir radios internos y externos

Fuente: bosnia.desertcart.com



Figura 14. Uso de galgas de radio para obtener el radio de curvatura interno de las secciones analizadas

Fuente: El autor

Se tomó la medida de las cuatro esquinas y los cuatros lados, luego se promediaron los resultados para cada tubo. La tabla de resultados se muestra en el Anexo 3.

3.2.2. Confección de probetas

Para la realizar las probetas de ensayo se contó con la colaboración del laboratorio de estructuras del Lanamme-UCR y se cumplió con las indicaciones de la norma estadounidense ASTM A370-20, sección 9.5.1.

Antes de llevar el material al laboratorio se realizaron placas de 2,5 cm x 25 cm para facilitar el proceso de confección de las probetas, como se muestra en la Figura 15. La fabricación de las placas se realizó con una esmeriladora de 4 ½" con disco de corte de fino de 1,5 mm, como se muestra en la Figura 16.

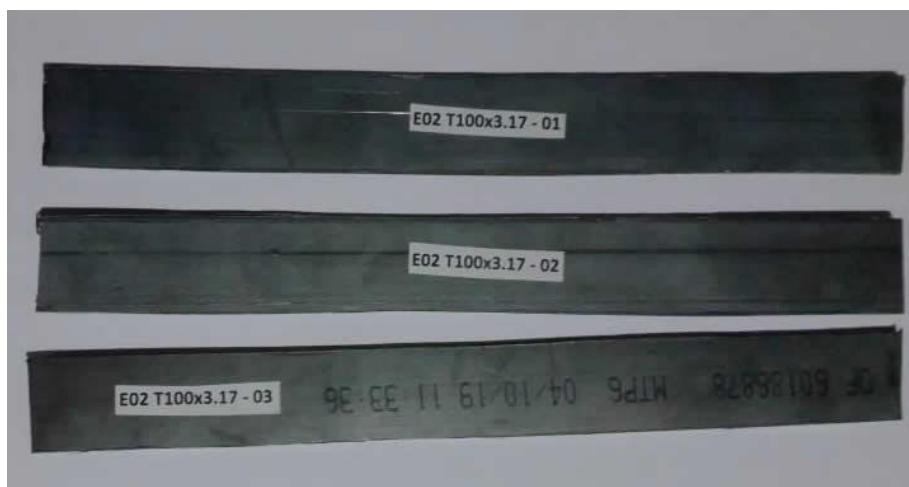


Figura 15. Placas de acero para fabricación de las probetas

Fuente: El autor



Figura 16. Esmeril utilizado para la fabricación de las placas de 2,5 cm x 25 cm

Fuente: El autor

Respetando lo que indica la normativa estadounidense AISI S100-16 en la sección K2.3.3, las probetas del material del fleje se tomaron del cuarto externo de la sección muestreada en dirección longitudinal, como se indica en la Figura 17. Se resalta la franja extraída para la

fabricación de la probeta y a su vez, se muestra la parte central marcada con equis, la cual se debe descartar según lo indicado.

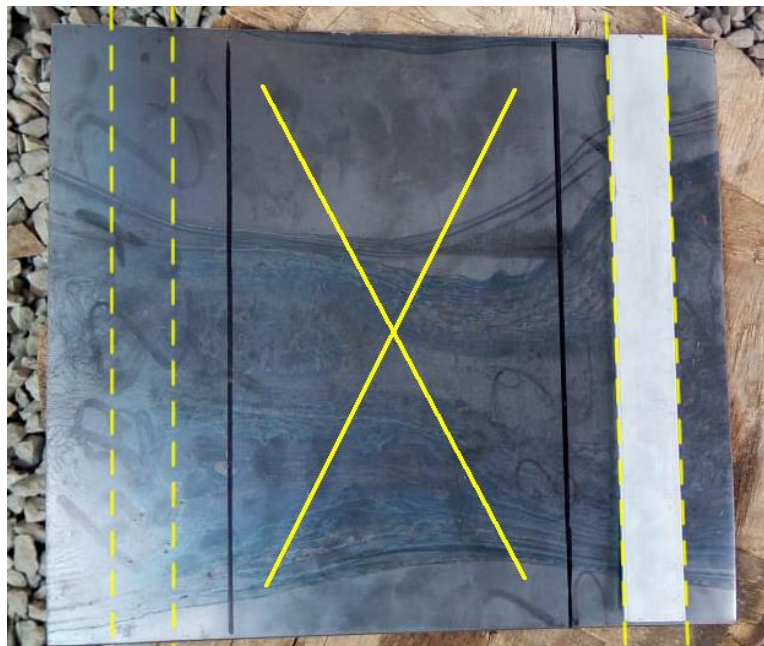


Figura 17. Cuarto externo marcado de la sección acero para obtener las probetas

Fuente: El autor

Por su parte, las probetas de los tubos se adquirieron de las partes planas, respetando los 90° mínimos desde la soldadura, tal como se mostró en la Figura 6. La Figura 18. muestra la placa guía que se utilizó para obtener las placas rectangulares y una de las secciones de tubo de la muestra.



Figura 18. Sección de la que se confecciona la probeta del tubo.

Fuente: El autor

La fabricación de las probetas se realizó con el torno UCR282495 propiedad del Lanamme-UCR para obtener la forma y las dimensiones requeridas.

La broca utilizada es de 2,5 cm de diámetro, tal como se muestra en la Figura 19. Finalmente se obtienen las probetas con las dimensiones requeridas. En la Figura 20 se observa las probetas.

En el Cuadro del Anexo 2 se muestran las dimensiones de todas las probetas realizadas. Las mediciones se tomaron con un vernier marca Mitutoyo PR-022 y con el micrómetro marca Mituyo MC-002, ambos propiedad del Lanamme-UCR.



Figura 19. Torno utilizado en fabricación de probetas

Fuente: El autor



Figura 20. Probetas listas para ser falla

Fuente: El autor

3.3. Prueba de falla a tracción

La prueba de falla a tracción se realizó con la máquina universal MTS 810, propiedad del LanammeUCR de código MU-005, mostrada en la Figura 21.



Figura 21. Máquina MTS 810 propiedad del LanammeUCR utilizada en la falla de las probetas

Fuente: El autor

En la Figura 22. se observa la probeta colocada debidamente en las mordazas de la máquina universal MTS.

El procedimiento consiste en aplicar la carga axial hasta que la probeta falle. La velocidad a la cual se aplica la carga no debe exceder los 690 MPa/min antes de llegar al esfuerzo de fluencia o bien mantenerse a una velocidad máxima de 0,0625 mm/min por mm de sección reducida.

Es importante mencionar que, aunque se colocó un extensómetro de rayo láser para medir la deformación los resultados de dichas medidas no fueron utilizados en esta investigación. Se utilizó solamente la elongación indicada por la máquina MTS 810.



Figura 22. Probeta debidamente colocada en las mordazas antes de ser fallada

Fuente: El autor

Al dar por concluida la falla a tracción se retiran las secciones de probeta y se mide la elongación final, tal como lo solicita la norma ASTM A370-20. La Figura 23. muestra la longitud final de la probeta E02 F1.5 - 100.



Figura 23. Elongación final de la probeta E02 F1.5 - 100

Fuente: El autor

Capítulo 4. Resultados

4.1. Curvas de esfuerzo-deformación de los especímenes

Una vez realizadas las pruebas de falla a tracción de los especímenes, se graficaron las curvas esfuerzo-deformación unitaria. Para ello, fue necesario calcular los valores del esfuerzo y de la deformación unitaria asociados a la carga aplicada a cada espécimen.

Los valores de esfuerzo se obtienen al dividir la fuerza aplicada entre el área transversal de la sección de control, tal como se especifica en la sección 14.3 de la norma INTE C403:2018. Mientras que la deformación unitaria es el resultado de dividir el cambio del desplazamiento entre la longitud de control inicial.

Pese a que los ensayos de falla en tracción se instrumentaron con un extensómetro laser para registrar las deformaciones del espécimen de forma más exacta, los resultados de la medición con dicho extensómetro mostraron incongruencias en algunas probetas.

Se comparó algunos resultados obtenidos del extensómetro laser con los obtenidos utilizando únicamente de la máquina universal y se encontraron resultados similares. Por lo tanto, se utilizó solo la deformación unitaria que registró la máquina universal MTS 810 y se supuso que la deformación unitaria aparente es proporcional a la deformación unitaria real. Como consecuencia las curvas esfuerzo-deformación obtenidas no reflejan el módulo de elasticidad E representativo del acero.

Los gráficos obtenidos muestran dos variaciones de las curvas esfuerzo-deformación, tal como se mencionó en la Sección 2.4.

- Curvas con meseta de fluencia clara, tal como se observa en la Figura 24.
- Curvas que no presentan meseta, tal como se observa en la Figura 25.

4.1.1. Curvas con meseta de fluencia clara

Se observa en materiales que no presentan esfuerzos residuales, se puede asociar a las probetas obtenidas del fleje.

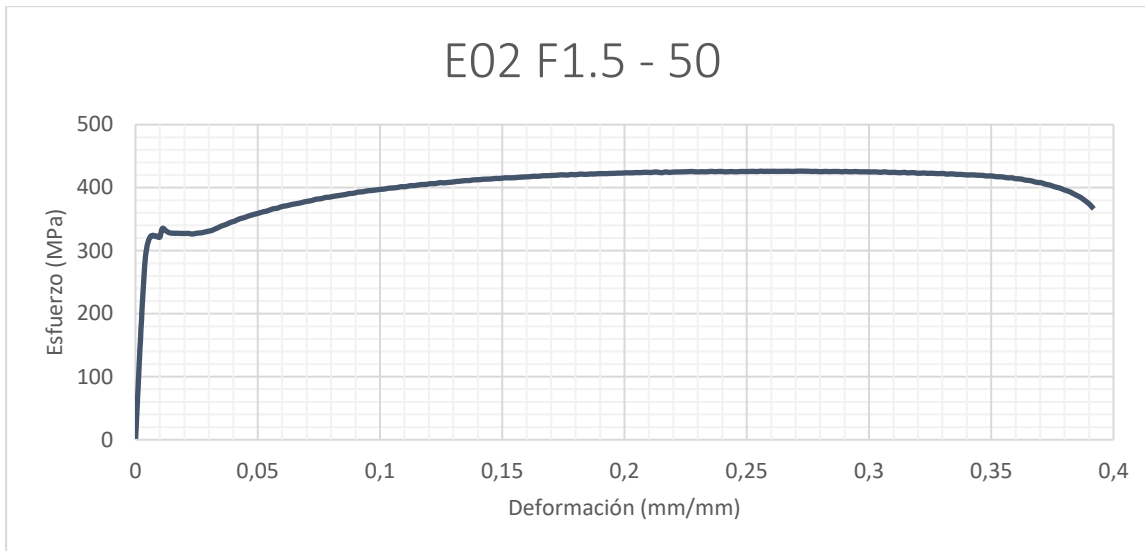


Figura 24. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 F1.5 - 50

Fuente: El autor

4.1.2. Curvas que no presentan meseta

Se da en materiales que han sido sometidos a esfuerzos residuales, este caso se asocia a las probetas obtenidas de los tubos conformados en frío.

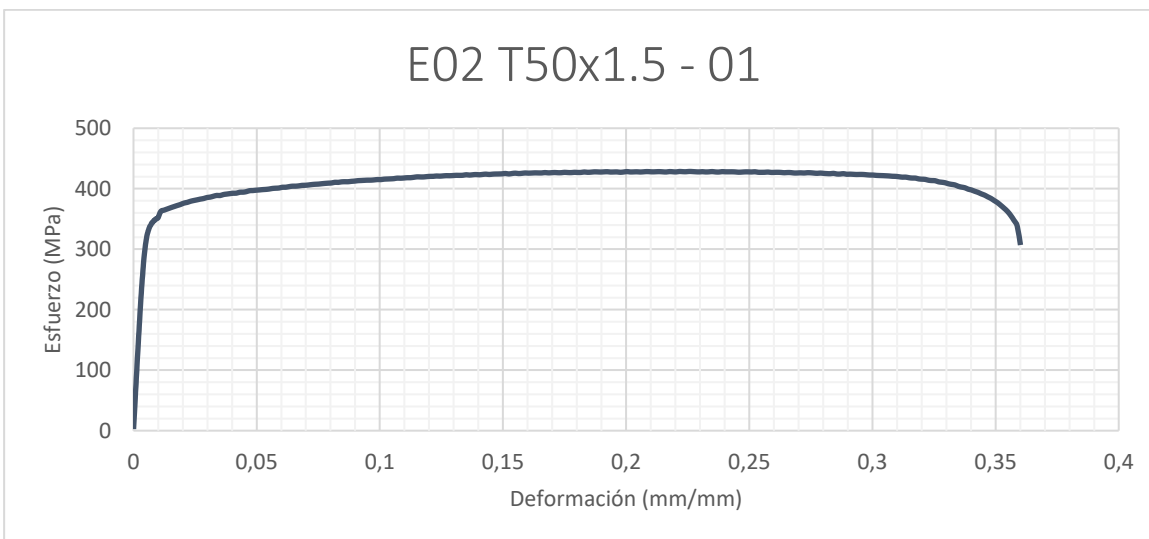


Figura 25. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 T50x1.5 - 01

Fuente: El autor

En el Anexo 4. se muestran las curvas esfuerzo-deformación de todas las probetas analizadas. Se observan algunas curvas de flejes que no tienen meseta, lo cual sugiere que presentan esfuerzos residuales.

4.2. Esfuerzo de fluencia de los especímenes

Para obtener el esfuerzo de fluencia en cada uno de los gráficos se utiliza una vista ampliada de la curva esfuerzo-deformación en el rango elástico. Los resultados del esfuerzo de fluencia de las 132 pruebas realizadas se muestran en el Cuadro A5. del Anexo 5.

En los donde las curvas presentan meseta, el valor de F_y se obtiene mediante el valor promedio en la sección plana. La Figura 26. muestra la vista ampliada de la curva que corresponde a la probeta E02 F1.5 - 50, mostrada en la Figura 24.

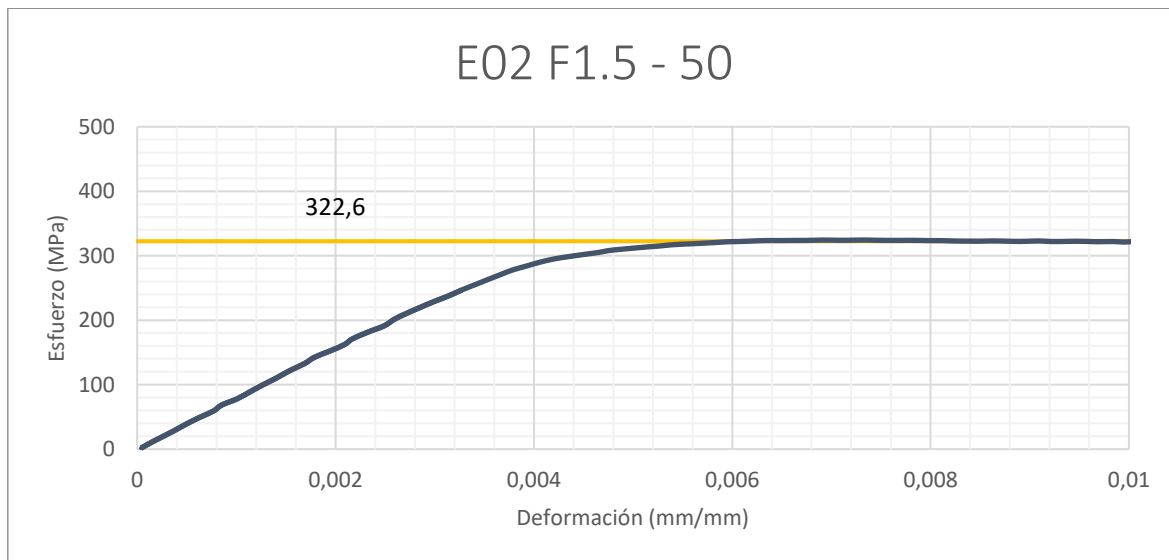


Figura 26. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 F1.5 - 50

Fuente: El autor

En los casos donde las curvas no presentan meseta, el valor de F_y se obtiene mediante el método Offset mostrado en la Figura 8. La Figura 27 muestra la vista ampliada de la curva que corresponde a la probeta E02 T50x1.5 – 01, mostrada en la Figura 25.

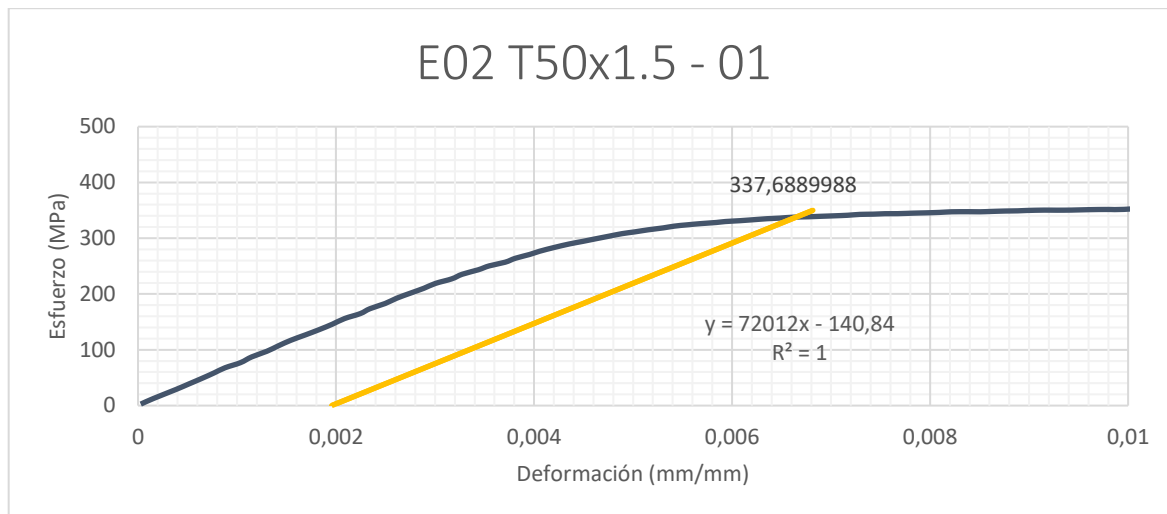


Figura 27. Curva esfuerzo-deformación de la probeta E02 T50x1.5 - 01

Fuente: El autor

La Figura 28, Figura 29 y Figura 30 muestran los resultados de esfuerzo de fluencia F_y y esfuerzo último F_u de probetas obtenidas de las empresas 01, 02 y 03 respectivamente.

Se observa que el esfuerzo de fluencia F_y incrementa en las probetas de los tubos (identificados con la letra T en el código) en comparación con las probetas de sus flejes respectivos (identificados con la letra F en el código).

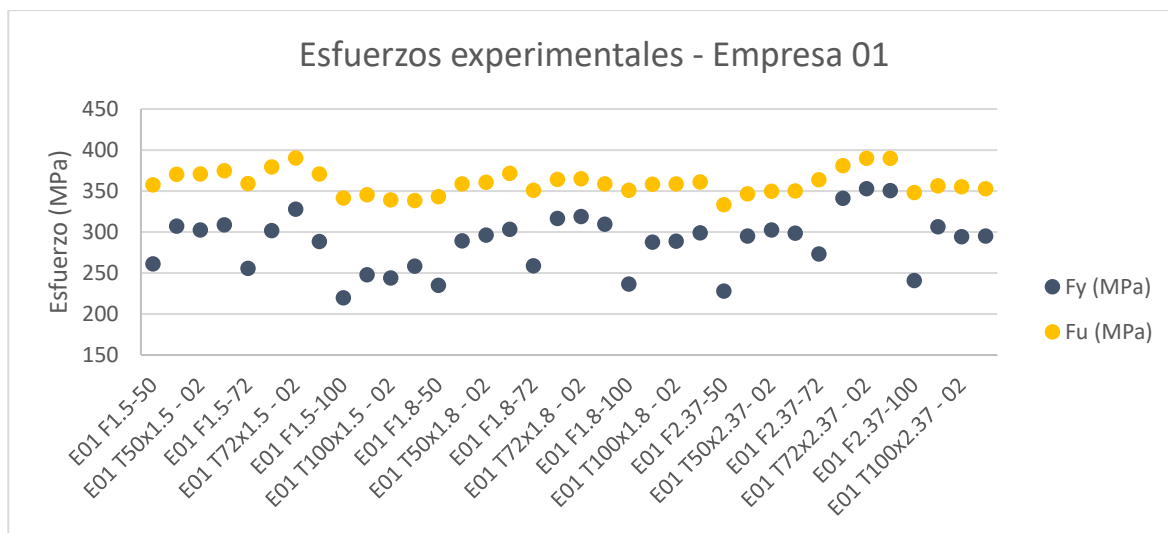


Figura 28. Resultados de esfuerzo de fluencia F_y y esfuerzo último F_u de probetas de la Empresa 01

Fuente: El autor

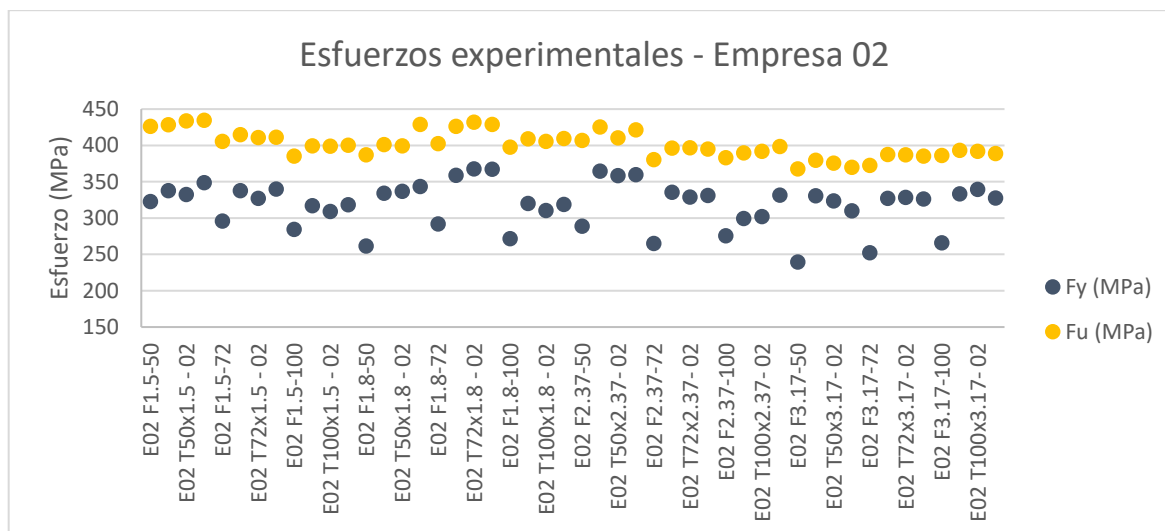


Figura 29. Resultados de esfuerzo de fluencia F_y y esfuerzo último F_u de probetas de la Empresa 02

Fuente: El autor

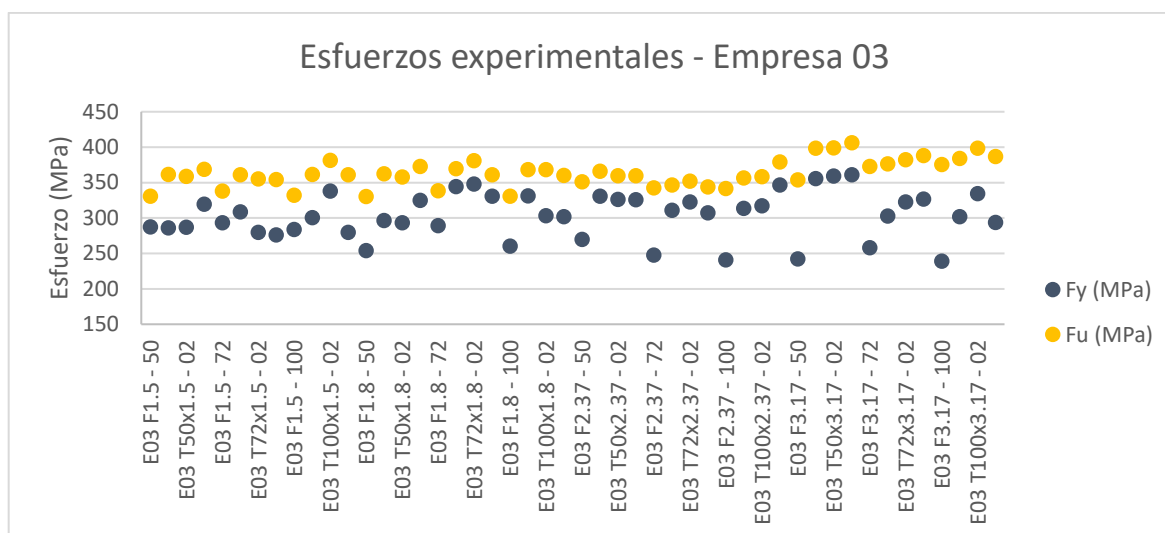


Figura 30. Resultados de esfuerzo de fluencia F_y y esfuerzo último F_u de probetas de la Empresa 03

Fuente: El autor

4.3. Relación F_u/F_y

Los resultados de la relación F_u/F_y fueron mayores de 1,08 en la mayoría de las pruebas realizadas, tal como lo establece el CSCR-14 en la sección 10.1.3.1 d. Sin embargo, la probeta E03 T72x1.8 - 01 presentó un valor de 1,07.

Las figuras mostradas en el Anexo 4, la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 evidencian que se da una disminución de la razón F_u/F_y en las probetas de los tubos con respecto a las de sus respectivos flejes, lo cual concuerda con lo propuesto por Winter, Chajes y Britvec (1967), mostrado en la Figura 4.

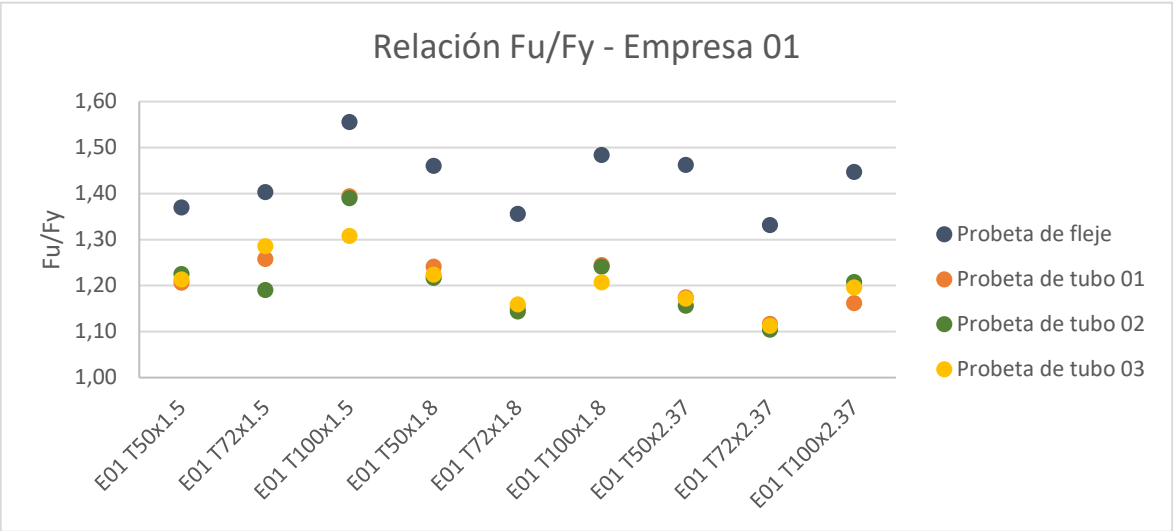


Figura 31. Relación de F_u/F_y de probetas obtenidas de la Empresa 01

Fuente: El autor

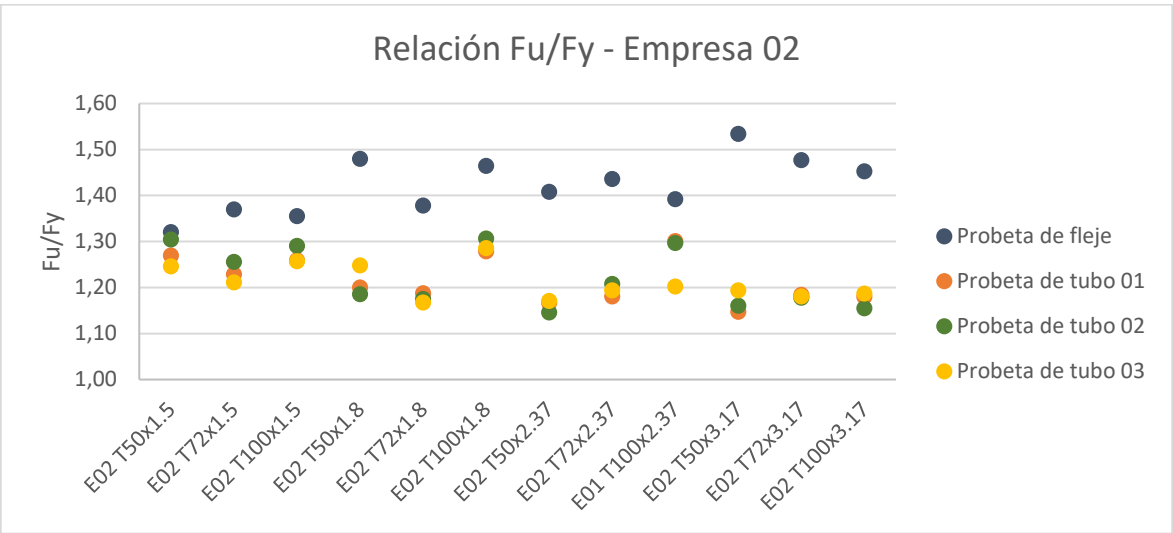


Figura 32. Relación de F_u/F_y de probetas obtenidas de la Empresa 02

Fuente: El autor

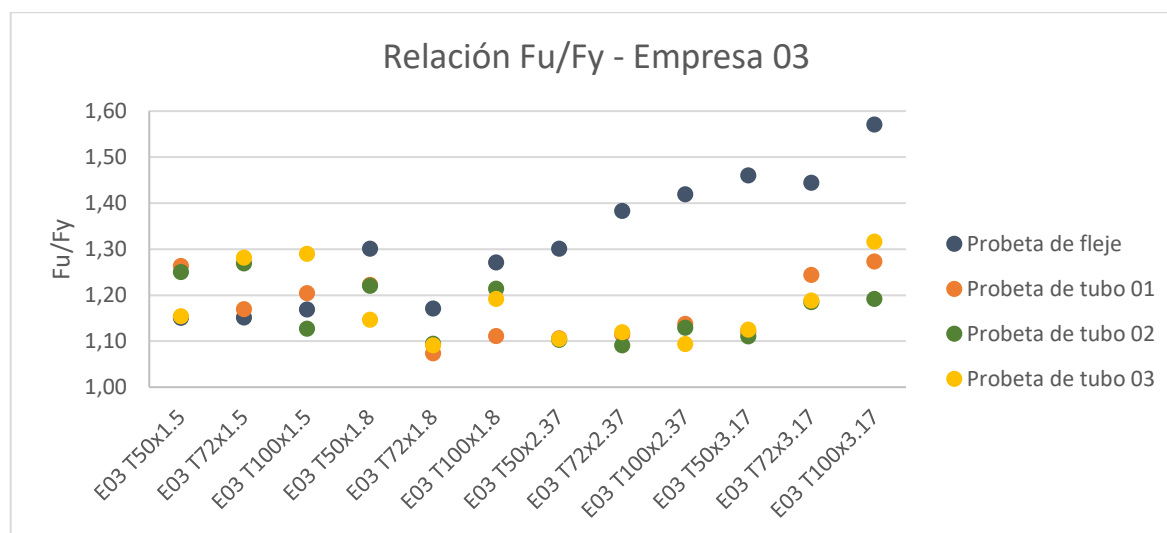


Figura 33. Relación de F_u/F_y de probetas obtenidas de la Empresa 03

Fuente: El autor

En contraste a lo mencionado, se presentó la particularidad que los resultados de las pruebas del material de 1,5 mm de espesor en la Empresa 03 muestran un factor F_u/F_y mayor en las probetas de los tubos (t) que de los flejes (s). Lo anterior se observa en los datos del Cuadro 2.

Cuadro 2. Relación F_u/F_y de probetas de 1.5 mm de espesor de la Empresa 03

Código de probeta	F_{ys} (MPa)	F_{us} (MPa)	$F_{us}/F_{ys} >$ 1,08	Código de probeta	F_{yt} (MPa)	F_{ut} (MPa)	$F_{ut}/F_{yt} >$ 1,08
E03 F1.5 - 50	288	331	1,15	E03 T50x1.5 - 01	286	362	1,26
				E03 T50x1.5 - 02	287	359	1,25
				E03 T50x1.5 - 03	320	369	1,15
E03 F1.5 - 72	293	338	1,15	E03 T72x1.5 - 01	309	36	1,17
				E03 T72x1.5 - 02	280	355	1,27
				E03 T72x1.5 - 03	277	354	1,28
E03 F1.5 - 100	284	332	1,17	E03 T100x1.5 - 01	300	362	1,20
				E03 T100x1.5 - 02	338	381	1,13
				E03 T100x1.5 - 03	280	361	1,29

Al analizar los resultados del esfuerzo de fluencia de los flejes F_{ys} mencionados en el Cuadro 2 se observa que los valores son similares entre ellos: 288 MPa, 293 MPa y 284 MPa de menor a mayor ancho. De igual forma los resultados F_{us} son similares.

Además, los resultados de F_{us} de las probetas de los tubos mencionadas en el Cuadro 2 son similares con desviaciones estándar aproximadas de 5 MPa, 4 MPa y 12 MPa de menor a mayor ancho.

Sin embargo, los resultados F_{yt} de las probetas 01, 02 y 03 de los tubos mencionados en el Cuadro 2 presentan diferencias significativas, con desviaciones estándar aproximadas de 19 MPa, 18 MPa y 30 MPa.

Las probetas de tubo E03 T50x1.5 - 03, E03 T72x1.5 - 01 y E03 T100x1.5 - 02 mostraron resultados de esfuerzo de fluencia ligeramente mayores que las demás probetas del mismo tubo respectivo. En estos casos el factor F_{ut}/F_{yt} presentó un comportamiento más cercano a lo descrito teóricamente. Lo anterior sugiere que las demás probetas de los tubos mencionados en el Cuadro 2. Llegaron al esfuerzo de fluencia antes de los esperado.

4.4. Factor de relación entre el esfuerzo de fluencia del fleje F_{ys} y del tubo F_{yt}

A partir de los resultados experimentales, se obtiene el factor de relación FR entre los esfuerzos de fluencia del fleje F_{ys} y el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} . Posteriormente se busca la correlación existente entre el FR y las distintas variables involucradas.

La Figura 34, Figura 35 y Figura 36 muestran el factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia de fleje F_{ys} de las empresas 01, 02 y 03 respectivamente.

El Cuadro A6 del Anexo 6 muestra los resultados del factor de relación FR de todos los tubos analizados. En dicho cuadro se incluyó las distintas variables involucradas que afectan el FR para posteriormente determinar la correlación existente.

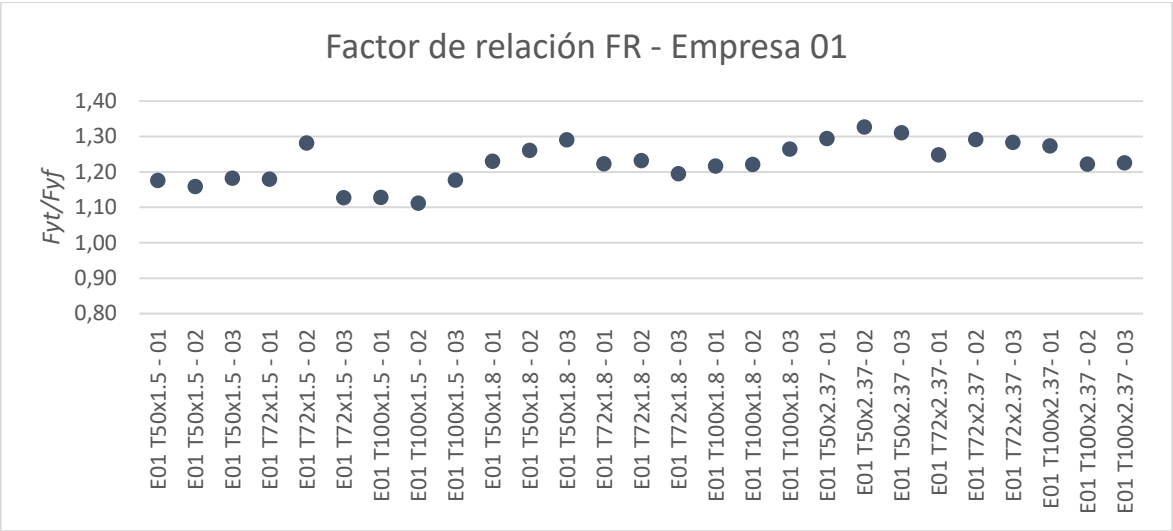


Figura 34. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} de la Empresa 01
Fuente: El autor

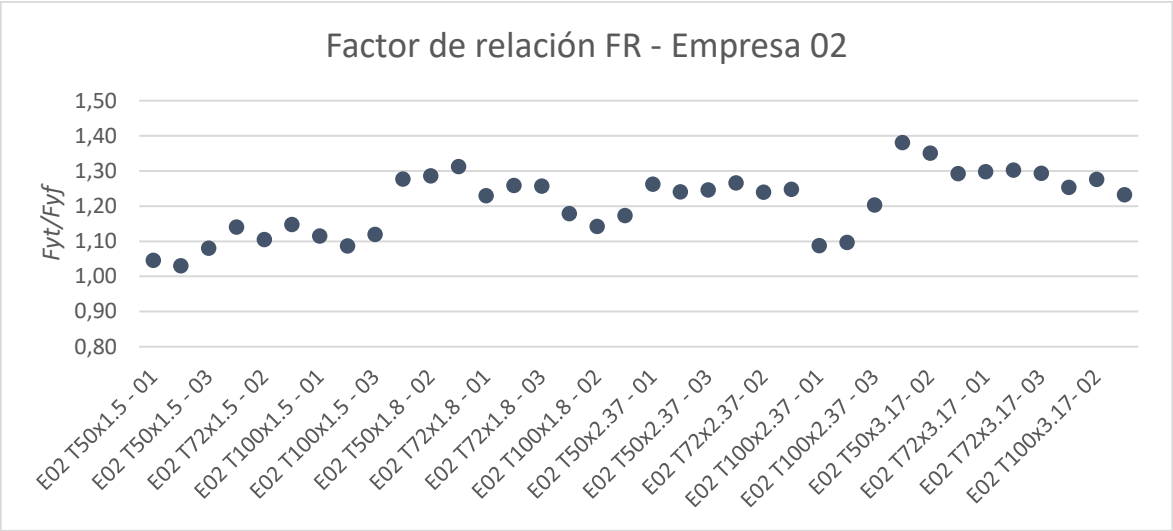


Figura 35. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} de la Empresa 02
Fuente: El autor

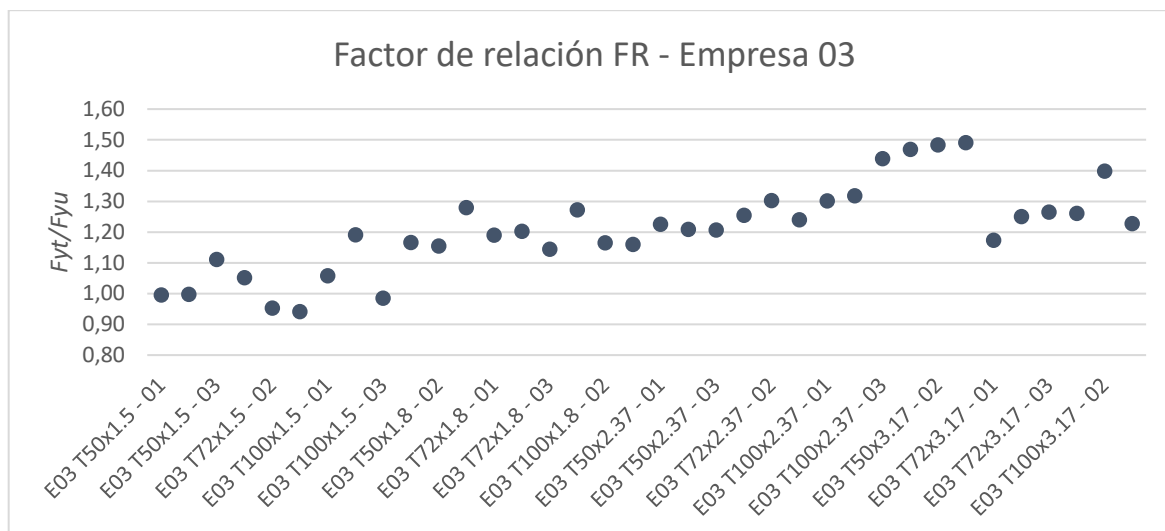


Figura 36. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} de la Empresa 03

Fuente: El autor

4.5. Correlación del esfuerzo de fluencia

Según las investigaciones de Karren realizadas a finales de los años 60's, para determinar el efecto del conformado en frío en las propiedades mecánicas del acero, tal como se comentó en la sección 2.2. de este documento, los factores que más influyen en el incremento del esfuerzo son:

- r/t : razón entre el radio de curvatura y el espesor
- F_{uf}/F_{yf} : razón entre el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia

Mientras que según las investigaciones de Lind & Schroff realizadas en 1971, tal como se comentó en la sección 2.3.2. de este documento, el principal es:

- $F_{uf} - F_{yf}$: diferencia entre el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia

Para conocer cuales variables presentan mayor importancia a la hora de obtener el factor de relación FR de los resultados experimentales, se realizó un análisis de covarianza y del factor de correlación de cada una de ellas. Si la covarianza es distinta de cero, se evidencia que existe una relación lineal, sin embargo, para saber que tanto peso tiene dicha relación lineal se utiliza el coeficiente de correlación.

El Cuadro 3 muestra el análisis de covarianza realizado a partir de los resultados del Cuadro A.6. del Anexo 6. Se observa que todas las variables presentan una covarianza distinta a cero. Las

variables que tienen el coeficiente de correlación cercano a uno indican una relación fuerte entre las variables analizadas, mientras que los valores cercanos a cero evidencian que la relación es débil.

En los resultados del Cuadro 3. se observa que las variables t , L/t , F_{ys} , $(F_{us}-F_{yf})$ y F_{us}/F_{yf} presentan coeficientes de correlación superiores a 0,5. Mientras que las variables L , r y r/t presentan coeficientes cercanos a cero. Lind & Schroff (1971) habían llegado a la conclusión de que el factor propuesto por Karren r/t influye muy poco en el aumento del esfuerzo de fluencia, lo cual se evidencia con los resultados obtenidos.

De las variables con los coeficientes de correlación cercanos a uno se realizaron varias combinaciones para encontrar una que presentara una correlación mayor. Se muestra en el Cuadro 3 que la expresión matemática $(F_{ys})/[(F_{us}/F_{ys}) \cdot t]$ fue la que presentó el valor más cercano a uno. Esta expresión matemática se puede reorganizar de la siguiente forma: $(F_{ys})^2/(F_{us} \cdot t)$

Cuadro 3. Análisis de covarianza y coeficiente de correlación en relación con el factor de relación reducido

Parámetro estadístico	F_{ys} (MPa)	F_{us}/F_{ys}	$F_{us}-F_{ys}$ (MPa)	r (mm)	L (mm)	t (mm)	r/t	L/t	$\alpha=(F_{ys})^2/(F_{us} \cdot t)$
Covarianza	-1,42	0,01	91,2	0,48	0,14	0,04	0,23	0,07	40,8
Coeficiente de correlación	-0,58	0,60	0,52	0,11	-0,13	0,65	-0,33	0,59	-0,79

Mediante una regresión lineal se obtuvo la línea de tendencia de las dos variables con coeficiente de correlación más cercano a uno, t y la expresión $\alpha = (F_{ys})^2/(F_{us} \cdot t)$. La Figura 37 y la Figura 38 muestra el resultado obtenido.

Los resultados de la expresión matemática α presentan un coeficiente de determinación R^2 mayor, por lo que se prefiere seguir trabajando con esta variable.

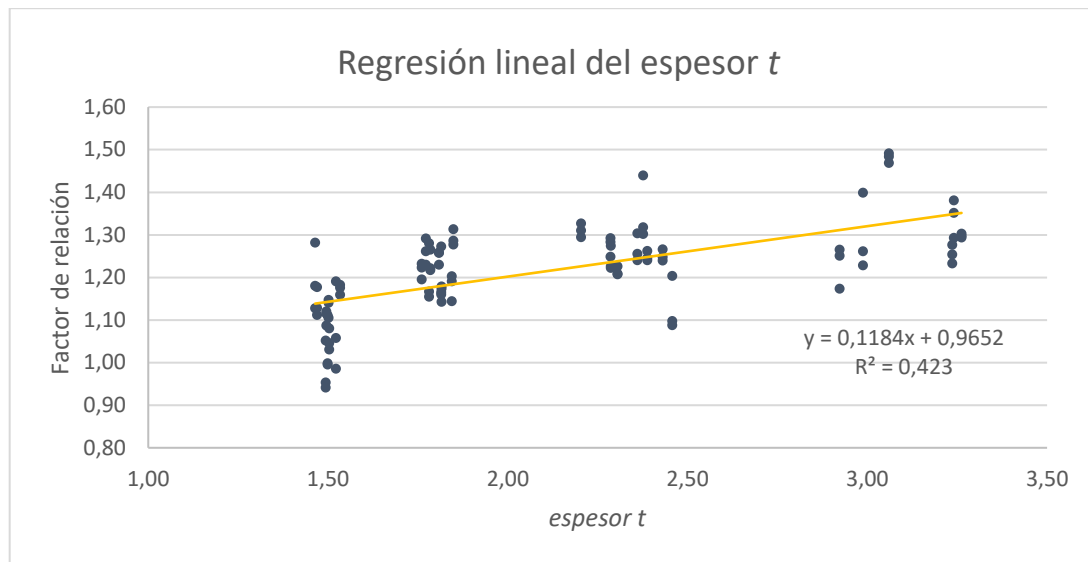


Figura 37. Regresión lineal del factor de relación FR con el espesor t

Fuente: El autor

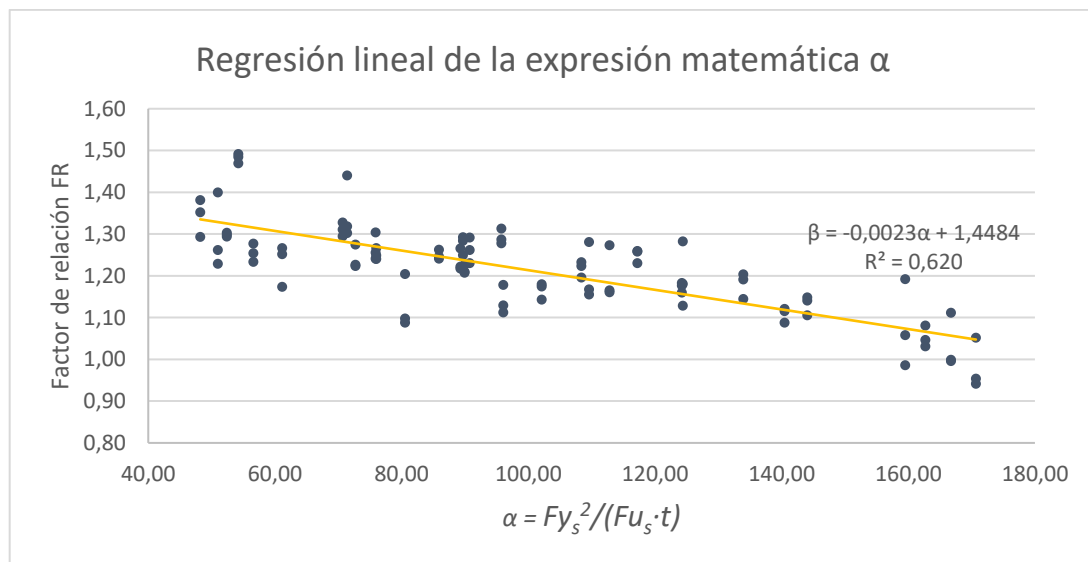


Figura 38. Regresión lineal del factor de relación FR con la expresión matemática α

Fuente: El autor

4.6. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye}

4.6.1. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} inicial

Utilizando el factor de relación β obtenido a partir de la línea de tendencia de la curva de la Figura 38 y el valor de α propuesto en la Cuadro 3, se planteó la primera propuesta del esfuerzo de fluencia esperado F_{yer} como se muestra a continuación:

$$\beta = -0,0023\alpha + 1,4484 \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{F_{ys}^2}{F_{us} \cdot t} \quad (15)$$

$$F_{ye} = \beta \cdot F_{ys} \quad (16)$$

Donde:

t: espesor de la sección analizada (ver Figura 45).

F_{ys} : esfuerzo de fluencia del fleje

F_{us} : esfuerzo último del fleje

Los valores estimados a partir de la Ecuación (16) para el esfuerzo de fluencia esperada F_{ye} son similares a los valores obtenidos experimentalmente de esfuerzos de fluencia del tubo F_{yt} . Sin embargo, en algunas probetas puntuales el resultado estimado se aleja del experimental.

La Figura 39 muestra que las probetas E02 T100x2.37 y E03 T50x3.17 son las que presentan una diferencia mayor, en la primera el valor F_{ye} está sobreestimado, mientras que en la segunda está subestimado.

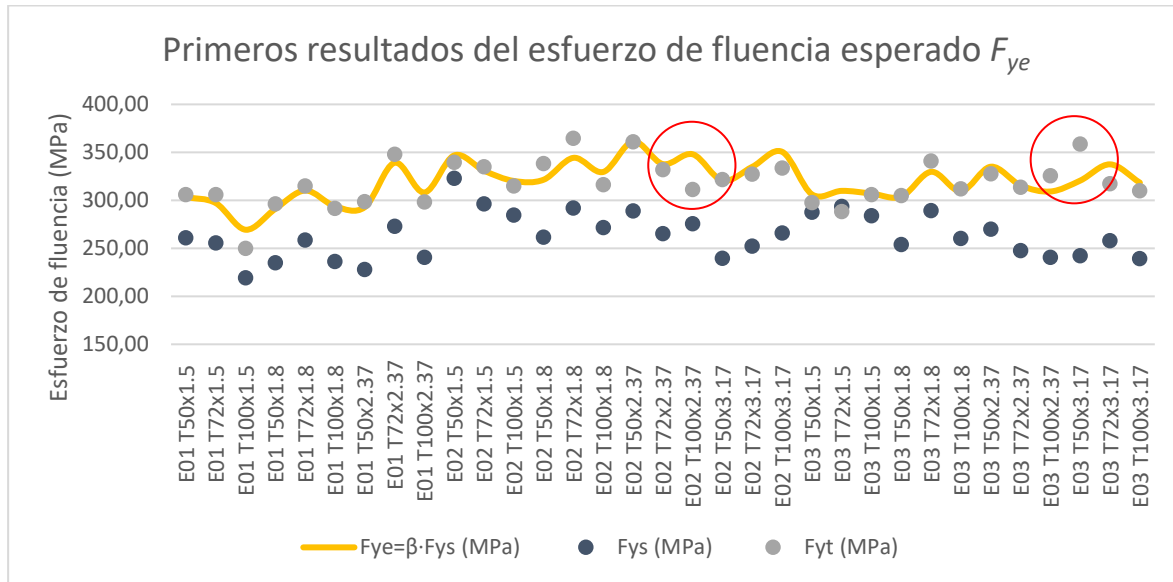


Figura 39. Esfuerzo de fluencia esperada F_{ye} obtenido de los primeros resultados, comparado con el esfuerzo de fluencia del fleje F_{ys} y el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} .

Fuente: El autor

Se realizó el análisis de valores atípicos en la diferencia entre F_{ye} y F_{yt} para determinar si existen resultados distantes del resto. Thode H. (2002)., en su libro Testing For Nomality (Prueba de Normalidad) menciona que según Tukey (1977), se pueden identificar los posibles valores atípicos como los valores que se estén fuera del rango $[Q1 - 1,5 \cdot (Q3 - Q1), Q3 + 1,5 \cdot (Q3 - Q1)]$. Siendo $Q1$ y $Q3$, el primer y tercer cuartil respectivamente.

El Cuadro 4. muestra el rango obtenido en el segundo análisis de los valores de la diferencia entre F_{ye} y F_{yt} . En el Anexo 7. se desarrolla el primer y segundo análisis de los valores atípicos.

Cuadro 4. Resultados del segundo análisis de valores atípicos en la diferencia $F_{ye} - F_{ys}$

Segundo análisis - Valores atípicos	
Tercer cuartil ($Q3$)	10,6
Primer cuartil ($Q1$)	-7,16
$Q3 - Q1$	17,8
factor g	1,50
$g' = g \cdot (Q3 - Q1)$	26,7
Límite superior = $Q3 + g'$	37,3
Límite inferior = $Q3 - g'$	-33,9

Los valores atípicos encontrados en el análisis corresponden a las siguientes probetas:

Cuadro 5. Probetas con resultados considerados como valores atípicos.

Probeta	F_{yt} (MPa)	$F_{ye} = \beta \cdot F_{ys}$ (MPa)	$F_{ye} - F_{yt}$ (MPa)
E02 T100x2.37 - 01	300	348	48,4
E02 T100x2.37- 02	302	348	45,7
E03 T100x2.37 - 03	347	309	-37,4
E03 T50x3.17 - 01	355	321	-35,2
E03 T50x3.17 - 02	359	321	-38,8
E03 T50x3.17 - 03	361	321	-40,5

Para poder eliminar los resultados de probetas que presentaron valores atípicos en la diferencia $F_{ye} - F_{yt}$ se analizan los resultados de cada una, comparándolas con las probetas similares en espesor, tamaño y empresa.

Se calculó la regresión lineal nuevamente y se determinó una nueva línea de tendencia de la expresión matemática $(F_{ys})^2/(F_{us} \cdot t)$, como se muestra a continuación.

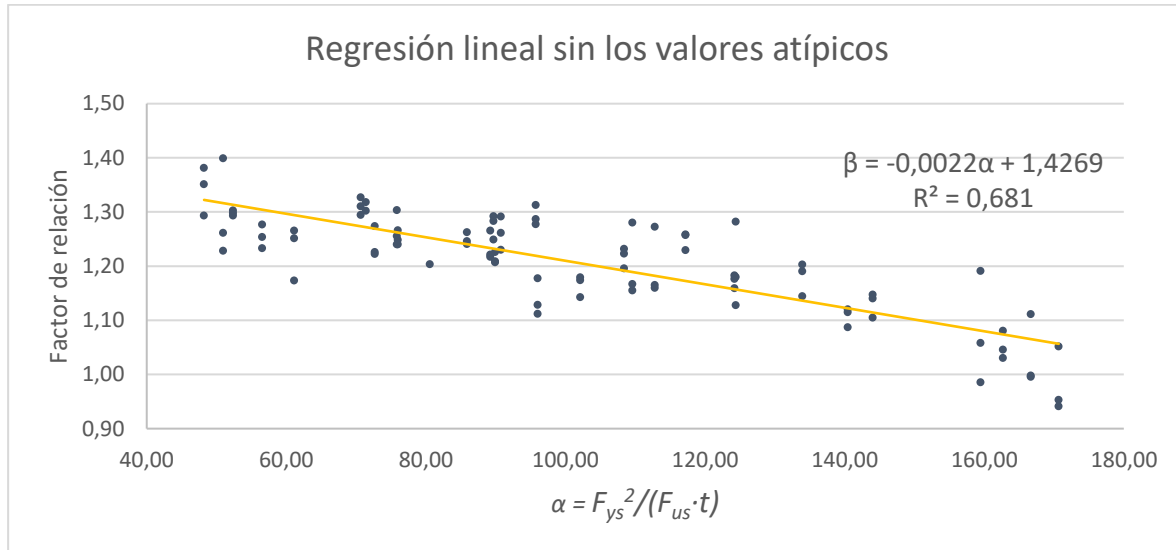


Figura 40. Regresión lineal del factor de relación FR con la expresión matemática utilizada sin los valores atípicos.

Fuente: El autor

A pesar de que con una línea de tendencia polinómica de segundo y tercer grado se obtiene un R^2 mayor que con la línea de tendencia lineal, se prefiere utilizar esta última por que la diferencia en el R^2 es poca y su cálculo es más sencillo. El Cuadro 6 muestra las distintas líneas de tendencia y sus respectivos valores de R^2 .

Cuadro 6. Variaciones de líneas de tendencia para los datos mostrados en la Figura 40 y sus respectivos valores de R^2

Ecuación	R^2
$\beta = -0,0022\alpha + 1,4269$	0,682
$\beta = 1,4539^{-0,002\alpha}$	0,679
$\beta = -0,203\ln(\alpha) + 2,1302$	0,612
$\beta = -1 \times 10^{-5} \alpha^2 + 8 \times 10^{-4} \alpha + 1,281$	0,717
$\beta = -3 \times 10^{-7} \alpha^3 + 8 \times 10^{-5} \alpha^2 - 0,0086 \alpha + 1,569$	0,732
$\beta = 2,6475 \alpha^{-0,173}$	0,601

La Figura 41 muestra los resultados del esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} sin los valores atípicos.

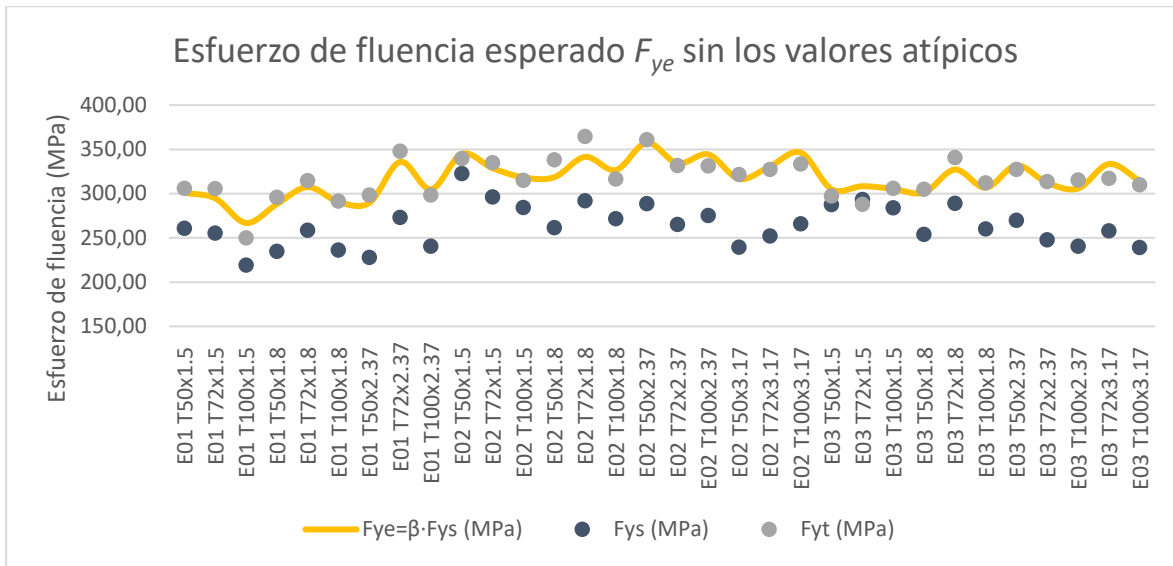


Figura 41. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} sin los valores atípicos, comparado con el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} y el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} .

Fuente: El autor

4.6.2. Esfuerzo de fluencia esperado $F_{ye} < F_{yt}$ con 95% de probabilidad

Para garantizar resultados estadísticamente aprobados, es importante asegurar que los valores del esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} son menores que el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} con un 95% de probabilidad. Para ello, se obtiene un valor X en el que existe un 95 % de probabilidad que los resultados de la diferencia $F_{ye} - F_{yt}$ sean menores al mismo. Una vez obtenido el valor X , se utiliza como una constante de corrección en la ecuación de β .

La Figura 42 muestra la distribución normal de la diferencia entre F_{ye} y F_{yt} . Se observa que el valor que representa el 95 % de probabilidad es aproximadamente 25 MPa.

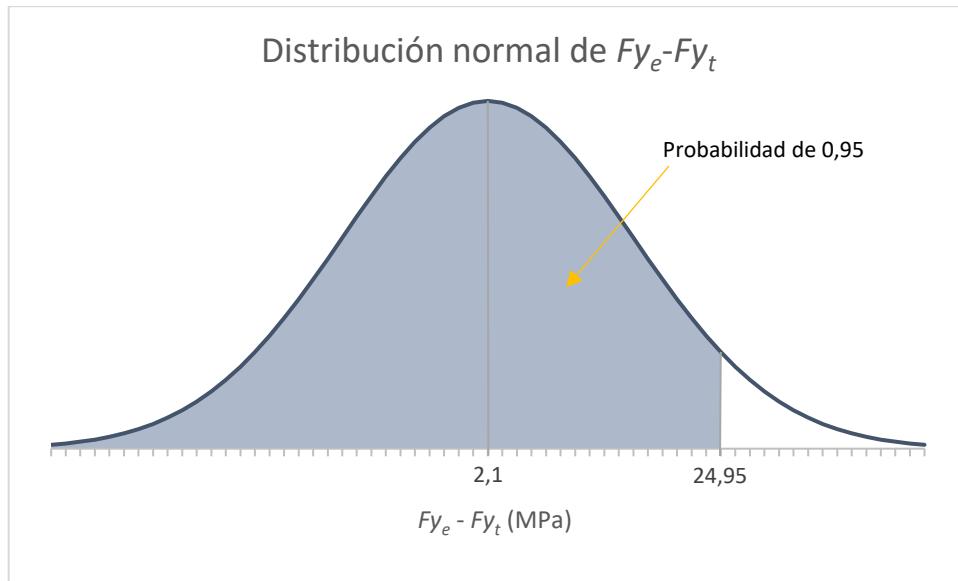


Figura 42. Distribución normal de la diferencia $F_{ye} - F_{yt}$. Se muestra el valor correspondiente al 95% de probabilidad igual a 24,95 MPa.

Fuente: El autor

Utilizando 25 MPa como constante de corrección se obtiene la ecuación β' con un 95% de probabilidad de que F_{ye} sea menor que F_{yt} como se muestra a continuación:

$$F_{ye}' = F_{ye} - 25 \text{ MPa} \quad (17)$$

$$\beta' = \frac{F_{ye}'}{F_{yf}} = \frac{F_{ye} - 25}{F_{yf}} \quad (18)$$

La Figura 43 muestra los valores del factor de relación ajustado β' . Se observa que para valores de α mayores a 140, se obtienen factores de relación ajustado β' menores que uno, por lo que es necesario restringir β' a valores mayores o iguales que uno.

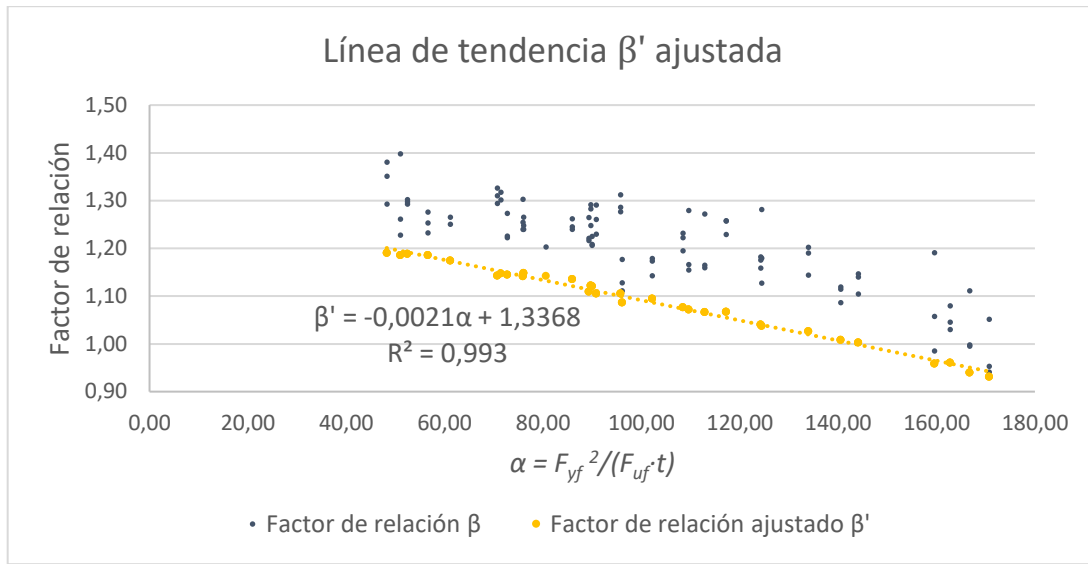


Figura 43. Línea de tendencia β' ajustada con 25 MPa como constante de corrección

Fuente: El autor

Finalmente, se propone usar el factor de relación β como se muestra a continuación:

$$\beta = -0,0021\alpha + 1,3368 \geq 1 \quad (19)$$

A continuación, se desarrolla el resultado para el tubo E01 T50x1.5 con la Ecuación (15), la Ecuación (16), y la Ecuación (19):

$$\alpha = \frac{F_{yf}^2}{F_{uf} \cdot t} = \frac{260,98^2}{357,52 \cdot 1,53} = 124,52$$

$$\beta = -0,0021\alpha + 1,3368 = -0,0021(124,52) + 1,3368 = 1,08 \geq 1$$

$$F_{ye} = \beta \cdot F_{yf} = 1,08 \cdot 260,98 = 280,64 \text{ MPa}$$

La Figura 44 muestra los resultados del esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} menor al esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} con 95 % de probabilidad. El Cuadro del Anexo 8 muestra el desarrollo de los resultados de F_{ye} .

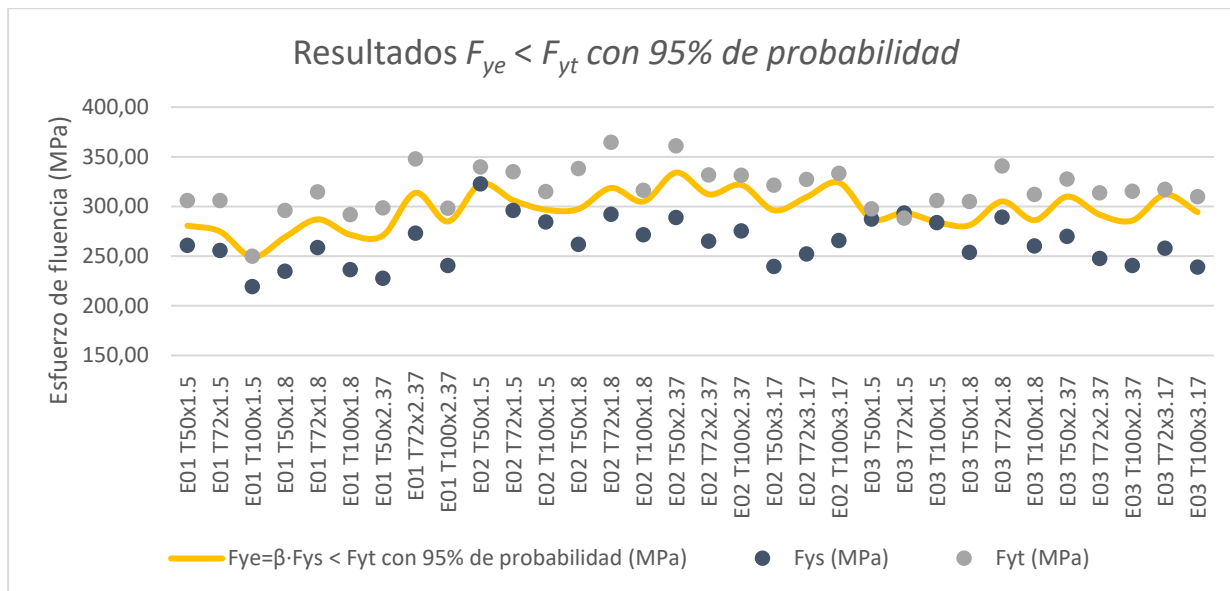


Figura 44. Resultados del esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} menor que el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} con 95 % de probabilidad

Fuente: El autor

4.7. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ya} utilizando la ecuación Eq. A3.3.2-1 del AISI S100-16

Como se menciona en la Sección 2.3., el AISI en la Especificación S100-16, permite estimar el incremento del esfuerzo de fluencia debido al proceso de conformado en frío F_{ya} a partir del esfuerzo de fluencia del acero virgen, con la Ecuación (1).

A continuación, se desarrolla el resultado para el tubo E01 T50x1.5:

Se calcula el factor C, para el cual se debe conocer el área de las esquinas y el área total involucrada. La Figura 45 muestra el área total achurada y las cotas utilizadas en el cálculo del factor.

Los valores del radio de curvatura r y el ancho del tubo L se toman del Anexo 3, mientras que el espesor t se obtuvo del valor promedio de las probetas que corresponden a cada tubo del Cuadro del Anexo 2.

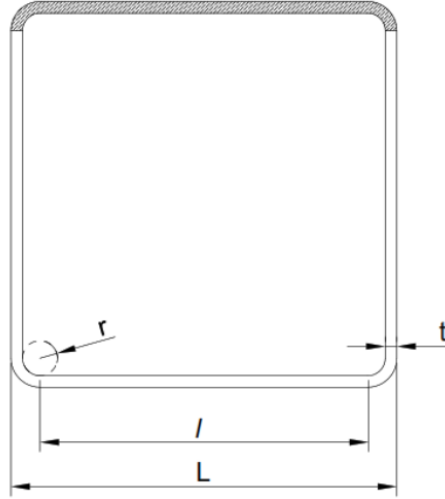


Figura 45. Área total de la sección en tensión

Fuente: El autor

$$C = \frac{a_e}{a_t} = \frac{2 \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot ((r+t)^2 - r^2) \right]}{a_e + l \cdot t} = \frac{2 \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot ((2,31 + 1,53)^2 - 2,31^2) \right]}{2 \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot ((2,31 + 1,53)^2 - 2,31^2) \right] + 43,31 \cdot 1,53} = 0,18$$

$$\frac{F_{uv}}{F_{yv}} = 1,37 \geq 1,2$$

$$Bc = 3,69 \cdot \left(\frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right) - 0,819 \left(\frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right)^2 - 1,79$$

$$Bc = 3,69 \cdot \left(\frac{357,52}{260,98} \right) - 0,819 \cdot \left(\frac{357,52}{260,98} \right)^2 - 1,79 = 1,73$$

$$m = 0,192 \cdot \left(\frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right) - 0,068 = 0,192 \cdot \left(\frac{352,58}{245,36} \right) - 0,068 = 0,20$$

$$\frac{r}{t} = \frac{2,31}{1,53} = 1,51 < 7$$

$$F_{yc} = \frac{Bc \cdot F_{yv}}{\left(\frac{r}{t} \right)^m} = \frac{1,73 \cdot 260,98}{(1,51)^{0,20}} = 416,24 \text{ MPa}$$

$$F_{yf} = F_{yv}$$

$$F_{ya} = C \cdot F_{yc} + (1 - C) \cdot F_{yf} = 0,18 \cdot 416,24 + (1 - 0,18) \cdot 260,98 = 289,33 \leq F_{uv}$$

El Cuadro del Anexo 9 muestra el desarrollo de los resultados obtenidos utilizando la Ecuación (1).

La Figura 46 muestra los resultados del esfuerzo de fluencia esperado desarrollado con la metodología propuesta en el AISI S100-16. Se observa que en las probetas E02 T50x1.5, E03 T72x1.5, E03 T100x1.5 y E03 T72x1.8 no se puede obtener el F_{ya} por que no cumplen con la restricción de F_{uv}/F_{yv} mayor que 1,2.

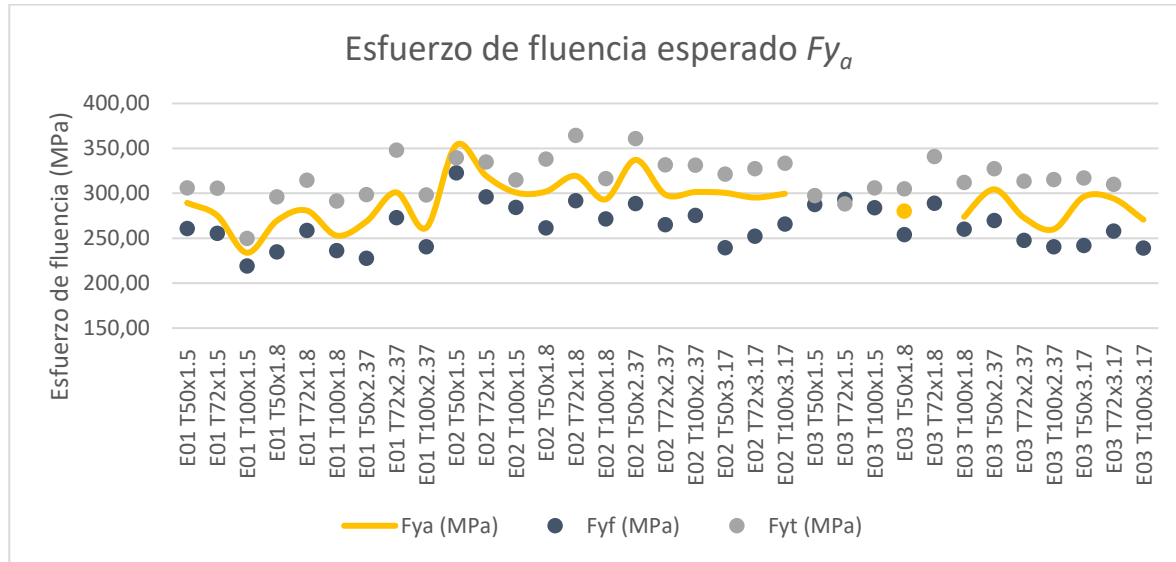


Figura 46. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ya} .

Fuente: El autor

4.8. Esfuerzo de fluencia esperado F_y' utilizado en la norma CSA S136-94.

En la Sección 2.3., también se menciona que gracias a las investigaciones de Lind & Schroff, la especificación canadiense S136-94 incluyó una ecuación alternativa para estimar el esfuerzo de fluencia esperado de secciones completas de tubos conformados en frío a partir del esfuerzo de fluencia del acero virgen.

A continuación, se desarrolla el resultado para el tubo E01 T50x1.5, con la Ecuación (2).

$$F_y' = F_y + \frac{5D}{W^*} (F_u - F_y) \quad (20)$$

El primer paso es obtener el factor W^* , para el cual se debe conocer la longitud de sección completa l_{sc} . La Figura 47. Muestra de forma clara la longitud l_{sc} .



Figura 47. Longitud de sección completa, l_{sc}

Fuente: El autor

Los valores de r , L y t corresponden a los mismos mostrados en la Figura 45. Los resultados se observan en el Cuadro A3 y en el Cuadro A2. respectivamente. El valor D corresponde a la cantidad de ángulos de 90° existentes.

$$W^* = \frac{l_{sc}}{t} = \frac{2 \cdot \frac{\left(2\pi \cdot \left(r + \frac{t}{2}\right)\right)}{4} + l}{t} = \frac{2 \cdot \frac{\left(2\pi \cdot \left(2,31 + \frac{1,53}{2}\right)\right)}{4} + 43,31}{1,53} = 34,55$$

$$F_y' = F_y + \frac{5D}{W^*}(F_u - F_y) = 245,36 + \frac{5 \cdot 2}{34,55}(352,58 - 245,36) = 276,39 \text{ MPa}$$

El Cuadro del Anexo 10 muestra el desarrollo de los resultados obtenidos utilizando la Ecuación (2).

La Figura 48 muestra los resultados del esfuerzo de fluencia esperado desarrollado con la metodología propuesta en la Especificación Canadiense de 1994.

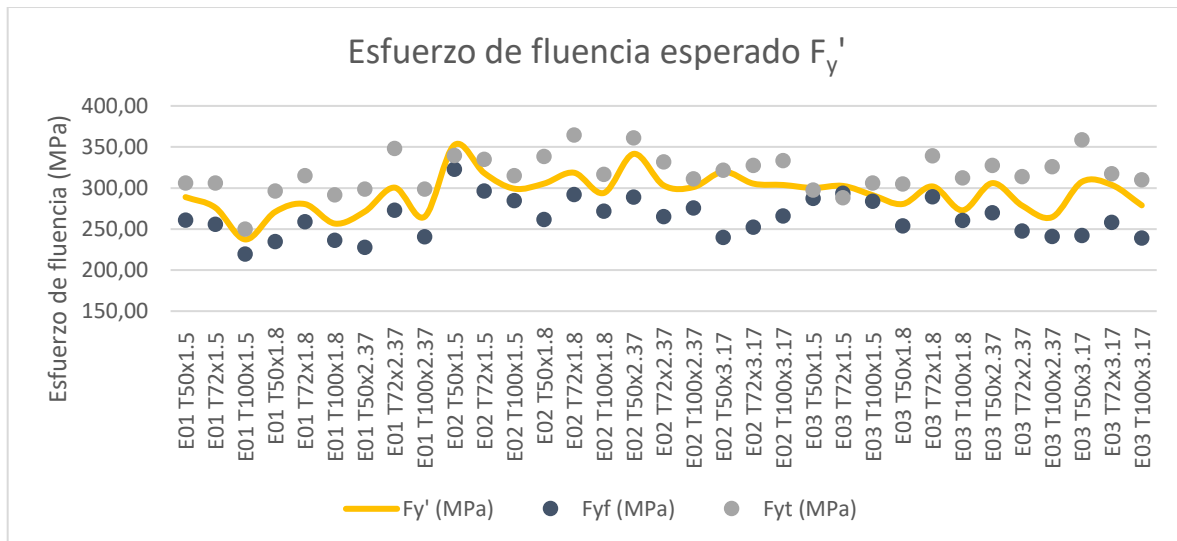


Figura 48. Esfuerzo de fluencia esperado F_y'

Fuente: El autor

Capítulo 5. Análisis de resultados

5.1. Variable utilizada para determinar el factor de relación

Al comparar el coeficiente de determinación R^2 de la regresión lineal de $\alpha = (F_{ys})^2/(F_{us} \cdot t)$ con el obtenido de la regresión lineal de t en la sección 4.3, es evidente que modelo de regresión lineal de α toma en cuenta en mayor porcentaje la variabilidad de los datos, siendo este de 62%. Por este motivo se prefiere utilizar la expresión matemática α para estimar el esfuerzo de fluencia esperado. Una vez eliminados los valores de esfuerzo de fluencia de las probetas con valores atípicos en la diferencia $F_{ye}-F_{yt}$ se obtiene un coeficiente de determinación R^2 de 68%.

5.2. Valores atípicos eliminados

5.2.1. Empresa E02:

En el Cuadro del Anexo 6 se observa que las muestras obtenidas en la Empresa 02 de espesor de 2.37 mm presentan en su mayoría resultados del factor de relación FR superiores a 1,2 excepto las probetas E02 T100x2.37 - 01 y E02 T100x2.37 - 02 que presentan un FR igual que 1,09 y 1,10 respectivamente. En la obtención de estas probetas el investigador estuvo presente.

El esfuerzo de fluencia F_{ys} de la probeta del fleje E02 F2.37-100 es similar al obtenido para las demás probetas de flejes del mismo espesor E02 F2.37-50 y E02 F2.37-72, lo que sugiere que los resultados F_{ys} son correctos y que los datos erróneos provienen del F_{yt} de las probetas de los tubos conformados E02 T100x2.37 - 01 y E02 T100x2.37 - 02.

Otra forma de determinar que los resultados F_{yt} de las probetas E02 T100x2.37 - 01 y E02 T100x2.37 - 02 son distintos, es comparar los resultados F_{yt} con las demás probetas provenientes de tubos en la empresa E02 de 2,37 mm de espesor.

Al tratarse de una comparación de tubos de una misma empresa, es muy probable que el material utilizado para los diferentes tubos sea del mismo proveedor y tengan la misma composición química, por lo cual debería mantenerse una relación F_{ut}/F_{yt} similar.

En el Cuadro 2 se observa que la razón F_{ut}/F_{yt} en la mayoría de las probetas que provienen de los tubos E02 T50x2.37, E02 T72x2.37 y E02 T100x2.37 es aproximadamente 1,18 excepto en las probetas E02 T100x2.37 - 01 y E02 T100x2.37 - 02 que tiene un valor de 1,30. Se observa que los valores de esfuerzo último F_{ut} de las probetas del tubo E02 T100x2.37 son similares entre sí, lo que sugiere que las probetas E02 T100x2.37 - 01 y E02 T100x2.37 - 02 alcanzaron el esfuerzo de fluencia F_{yt} antes de lo esperado.

5.2.2. Empresa E03:

Por su parte, las probetas con resultados atípicos de la empresa E03, a diferencia de las probetas de la empresa E02, presentan esfuerzos de fluencia de los tubos F_{yt} superiores a los esperados. De igual forma el investigador estuvo presente en la obtención de estas probetas.

Al revisar las curvas esfuerzo-deformación de las probetas E03 T100x2.37 - 03, E03 T50x2.37 - 01, E03 T50x2.37 - 02 y E03 T50x2.37 - 03 se observa que la deformación máxima (0,25 mm/mm) es menor que la observada en la mayoría de las probetas (0,35 mm/mm). Lo que sugiere que estas probetas presentan esfuerzos residuales superiores a los generados por los rodillos en el conformado en frío.

En la empresa E03 se observa en varias curvas esfuerzo-deformación deformaciones máximas menores de 0,25 mm/mm.

Basándose en las apreciaciones mencionadas se decidió eliminar las probetas que presentaron valores atípicos.

5.3. Comparación de esfuerzos de fluencia F_{ys} , F_{yt} , F_{ye} , F_{ya} y F_y'

Se comparan los promedios del esfuerzo de fluencia obtenidos, tanto de los valores experimentales de las probetas de los flejes y tubos desarrollado en la Sección 4.2., como las diferentes proyecciones realizadas mediante los métodos desarrollados a partir del esfuerzo de fluencia de los flejes, Sección 4.6, Sección 4.7 y Sección 4.8.

El Cuadro 7, muestra que el esfuerzo de fluencia de los flejes F_{yf} es mayor que el propuesto por los fabricantes (227 MPa) en un 16 %.

Por su parte, el promedio F_{yt} es mayor que el valor propuesto por la Ing. Romanyek ($F_y = 297$ MPa) y menor que el propuesto por el Ing. Gómez ($F_y = 325,15$ MPa) en sus respectivas investigaciones. De igual forma, el promedio F_{yt} es menor que el indicado en el CSCR-10 ($F_{ye} = 1,6 \cdot F_y = 363,2$ MPa)

Se observa además que el promedio F_{ye} es 7% menor que el promedio F_{yt} de los tubos analizados. Mientras que los promedios del esfuerzo de fluencia F_{ya} desarrollado en la Sección 4.7 y el esfuerzo de fluencia F_y' desarrollado en la Sección 4.8 son aproximadamente 10% y 8% menores que F_{yt} respectivamente.

Cuadro 7. Resultados promedio del F_y experimental y de las estimaciones realizadas.

	F_{ys} (MPa)	F_{yt} (MPa)	F_{ya} (MPa)	F_y' (MPa)	F_{ye} (MPa)
Promedio	263	318	290	294	297
Desviación estándar	23,1	23,5	25,0	23,5	19,6

5.4. Análisis estadísticos de los resultados

Con el fin de validar los resultados, se realizaron pruebas de hipótesis con un nivel de confianza del 95%.

5.4.1. Experimento 1

Para determinar si existe relación lineal entre $\alpha = (F_{ys})^2 / (F_{us} \cdot t)$ y el factor de relación experimental FR, se desea conocer si la pendiente m de la regresión lineal es igual o distinta de cero, utilizando un nivel de confianza del 95%.

a) Hipótesis del experimento

$$H_0: m = 0$$

$$H_1: m \neq 0$$

b) Datos de la muestra

$$n = 93$$

$$m = -0,0022$$

$$\hat{\sigma}^2 = 0,0028$$

$$S_{xx} = 114581,28$$

c) Modelo estadístico

$$t_o = \frac{m}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{S_{xx}}}} = \frac{-0,0022}{\sqrt{\frac{0,0028}{114581,28}}} = -14,1$$

Debido a que para $\alpha/2=2,5\%$ con 91 grados de libertad el $t = 1,99$ y $|t_o| > t$, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa

Por lo tanto, se puede decir con 95% de confianza que existe relación lineal entre FR y la expresión matemática $\alpha = (F_{yt})^2 / (F_{ur} \cdot t)$.

5.4.2. Experimento 2

Se desea conocer si el esfuerzo de fluencia F_{yt} es igual o menor que el esfuerzo de fluencia esperado indicado en el CSCR-10, utilizando un nivel de confianza del 95%.

a) Hipótesis del experimento

$$H_0: \mu = \mu_0 = 363,2 \text{ MPa}$$

$$H_1: \mu = \mu_0 < 363,2 \text{ MPa}$$

b) Datos de la muestra

$$n = 99$$

$$\bar{X} = 318,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 23,46 \text{ MPa}$$

c) Modelo estadístico

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = \frac{318,46 - 363,2}{\frac{23,46}{\sqrt{99}}} = -18,98$$

Dado que Z_{α} es de -1,645 y Z se encuentra a la izquierda de Z_{α} , se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

Por lo tanto, se puede decir con 95% de confianza que hay evidencia estadística de que el promedio de F_{yt} es menor que 363,2 MPa.

5.4.3. Experimento 3

Se desea conocer si el esfuerzo de fluencia F_{ya} es igual o menor que el esfuerzo de fluencia F_{yt} , utilizando un nivel de confianza del 95%.

a) Hipótesis del experimento

$$H_0: \mu = \mu_0 = 318,46 \text{ MPa}$$

$$H_1: \mu = \mu_0 < 318,46 \text{ MPa}$$

d) Datos de la muestra

$$n = 29$$

$$\bar{X} = 289,87 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 25,01 \text{ MPa}$$

e) Modelo estadístico

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = \frac{289,87 - 318,46}{\frac{25,01}{\sqrt{29}}} = -6,16$$

Dado que Z_{α} es -1,645 y Z se encuentra a la izquierda de Z_{α} , se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

Por lo tanto, se puede decir con 95% de confianza que hay evidencia estadística de que el promedio de F_{ya} es menor que 318,46 MPa.

5.4.4. Experimento 4

Se desea conocer si el esfuerzo de fluencia F_y' es igual o menor que el esfuerzo de fluencia F_{yt} , utilizando un nivel de confianza del 95%.

b) Hipótesis del experimento

$$H_0: \mu = \mu_0 = 318,46 \text{ MPa}$$

$$H_1: \mu = \mu_0 < 318,46 \text{ MPa}$$

f) Datos de la muestra

$$n = 33$$

$$\bar{X} = 293,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 23,52 \text{ MPa}$$

g) Modelo estadístico

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = \frac{293,88 - 318,46}{\frac{23,52}{\sqrt{33}}} = -6,00$$

Dado que Z_{α} es de -1,645 y Z se encuentra a la izquierda de Z_{α} , se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

Por lo tanto, se puede decir con 95% de confianza que hay evidencia estadística de que el promedio de F_y es menor que 318,46 MPa.

4.4.5. Experimento 5

Se desea conocer si el esfuerzo de fluencia F_{ye} es igual o menor que el esfuerzo de fluencia F_{yt} utilizando un nivel de confianza del 95%.

c) Hipótesis del experimento

$$H_0: \mu = \mu_0 = 318,46 \text{ MPa}$$

$$H_1: \mu = \mu_0 < 318,46 \text{ MPa}$$

h) Datos de la muestra

$$n = 32$$

$$\bar{X} = 297,30 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 19,64 \text{ MPa}$$

i) Modelo estadístico

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = \frac{297,30 - 318,46}{\frac{19,64}{\sqrt{32}}} = -6,09$$

Dado que Z_α es de -1,645 y Z se encuentra a la izquierda de Z_α , se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

Por lo tanto, se puede decir con 95% de confianza que hay evidencia estadística de que el promedio de F_{ye} es menor que 318,46 MPa.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Se determinó la relación entre el esfuerzo de fluencia de elementos de acero conformados en frío y el acero virgen de los flejes utilizados para la fabricación de dichos elementos, mediante las ecuaciones (15), (16) y (19), descritas en la Sección 4.6.

En el desarrollo de la investigación se observó el proceso de fabricación de los tubos y se comprobó que el método de conformado utilizado en las tres empresas fabricantes es el mismo. Se encontró diferencias en el proceso de desenrollado, sin embargo, no hay evidencia para indicar que el método de desenrollado influye significativamente en los resultados obtenidos.

Los resultados del esfuerzo de fluencia de flejes F_{ys} y del esfuerzo de fluencia de tubos F_{yt} obtenidos experimentalmente son en promedio 16% y 40% mayores que el valor indicado por los fabricantes. Estas diferencias reafirman las conclusiones abordadas en investigaciones anteriores donde se reportan diferencias significativas entre los datos teóricos y experimentales. Sin embargo, con estos resultados se logra evidenciar que dichas diferencias no corresponden únicamente al incremento del esfuerzo debido al conformado en frío. Se puede decir que el conformado en frío es responsable únicamente del 24% de la diferencia teórico experimental.

Al correlacionar el esfuerzo de fluencia de los tubos conformados en frío a partir del esfuerzo fluencia virgen obtenido de los flejes, se determinó que las variables que permiten estimar el incremento del esfuerzo de fluencia son: el esfuerzo de fluencia del fleje F_{ys} , la relación F_{us}/F_{ys} y el espesor del material t . Lo cual concuerda con la investigación realizada por Lind & Schroff. Otra de las variables que se esperaba que influyera en el incremento del esfuerzo de fluencia era el ancho de la sección de tubo L , sin embargo, se demostró que no influye de manera significativa.

Al estimar el esfuerzo de fluencia de los tubos conformados en frío mediante la Ecuación (1), propuesta en la normativa estadounidense AISI S100-16 y la Ecuación (2), propuesta en la normativa canadiense CSA S136-94, se observó que, a pesar de obtener resultados similares en ambas estimaciones, la propuesta del CSA S136-94 es más sencilla de aplicar y no presenta restricciones, mientras que en la propuesta del AISI se debe cumplir con que la razón entre el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia sea mayor que 1,2 lo cual no se logró en el 15% de las probetas analizadas.

Los análisis estadísticos permitieron verificar los resultados obtenidos experimentalmente con un nivel de significancia del 95%. Con las pruebas de hipótesis se evidenció que existe una relación lineal entre la expresión matemática $\alpha = (F_{yf})^2 / (F_{uf} \cdot t)$ y el incremento en el esfuerzo de fluencia. También se verificó que el esfuerzo de fluencia obtenido de los tubos es menor que la estimación indicada en el CSCR-10, lo cual evidencia la necesidad de realizar pruebas periódicas que brinden mayor seguridad en el diseño de estructuras.

Por último, se comprobó que el esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} es menores que el esfuerzo de fluencia de los tubos analizados F_{yt} . Esto es de vital importancia ya que permite tener la seguridad de que las estimaciones serán conservadoras.

6.2. Recomendaciones

A continuación, se describen las recomendaciones producto de la investigación realizada:

- Al Comité Técnico encargado de actualizar las normativas referentes a los tubos de acero conformados en frío se les recomienda incluir la estimación del esfuerzo de fluencia de los tubos conformados en frío a partir del esfuerzo de fluencia del acero virgen. Utilizando las ecuaciones (15), (16) y (19), descritas en la Sección 4.6.
- Al Comité de Acero del CSCR se le recomienda realizar más investigaciones para verificar y de ser necesario actualizar el factor de sobrerresistencia R_y indicado actualmente en el CSCR-10.
- Se recomienda verificar estadísticamente el supuesto mencionado en la Sección 4.1 donde se indica que la deformación unitaria aparente (obtenida mediante la deformación registrada con la máquina universal) es proporcional a la deformación unitaria real (obtenida con el extensómetro laser) utilizando los datos generados en esta investigación.
- Se recomienda realizar futuras investigaciones con los resultados de las pruebas de falla a tracción de esta investigación para determinar un factor de correlación del esfuerzo último de tubos conformados en frío a partir del esfuerzo último del acero virgen.
- A los futuros investigadores sobre el tema del incremento del esfuerzo debido al conformado en frío se les recomienda incluir: tubos de 4,17 mm de espesor, tubos de secciones transversales superiores a 100 mm de ancho, tubos de secciones circulares y tubos de secciones abiertas.

- A los profesionales interesados se les recomienda guiarse en el cálculo de las estimaciones de esfuerzo de fluencia esperado con los ejemplos descritos.
- Para futuras investigaciones se recomienda incluir más fabricantes de tubos conformados en frío del mercado nacional.

Referencias bibliográficas

American Iron and Steel Institute. (2016). *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. E.E.U.U.

American Iron and Steel Institute. (2016). *Commentary North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. E.E.U.U.

American Society for Testing and Materials, A370-20. (2020). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. E.E.U.U.

American Society for Testing and Materials, A500-18. (2018). *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes*. E.E.U.U.

Britvec S.J., Chajes A., Karren K. W., Uribe J., & Winter G. (1970). *Effects of cold work in cold-formed steel structural members. CCFSS Library (1939 - present)*. 170. Obtenido de: <https://scholarsmine.mst.edu/ccfss-library/170>

CFIA. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. 4a. ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Gómez C. (2013). *Propiedades Mecánicas del Acero de los Tubos Estructurales Laminados en Frío con Sección Cuadrada y Rectangular Fabricados en Costa Rica* (tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

INTECO. (2014). *Métodos de ensayo y deficiones para ensayos mecánicos de productos de acero*. 2a. ed. Costa Rica.

INTECO. (2018). *PN INTE C412:2018 Aceros para la construcción. Tubos de acero al carbono conformados en frío y electrosoldados, circulares y de otras formas*. 3a. ed. Costa Rica.

Lind N.C. and Schroff D.K. (1971). *Utilization of Cold Work in Light Gage Steel*. CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1971 - 2018). 2. Obtenido de: <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/1iccfss/1iccfss-session1/2>

Monge D. y Vindas R. (2002). *Manual de Construcción para Estructuras Metálicas con Base en Perfiles Doblados en Frío* (tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

Montgomery D., Runger G., (2003). Probabilidad y estadística a la ingeniería. Limusa Wiley, Segunda Edición.

Rodriguez J. (2010). *Evaluación Teórico-Experimental del Pandeo Local en Columnas Cortas de Sección Tubular Cuadrada y Rectangular Fabricados en Costa Rica* (tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Romanjek M. (2001). *Propiedades Estructurales de Perfiles de Acero Laminado en Frío Producidos en Costa Rica* (tesis de maestría). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Sloof, P. A. and Schuster, R. M. (2000). "Yield Strength Increase of Cold Formed Sections Due to Cold Work of Forming". *CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1971 - 2018)*. 4. Obtenido de: <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/15iccfss/15iccfss-session9/4>

Thode, H.C. (2002) Testing for Normality. Marcel Dekker, New York.

Walpole t., Myers R., Myers S., Ye K. (2012). Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Novena Edición. Pearson Educación, México.

Weng C., y Pekoz T., (1990). *Residual Stresses in Cold-Formed Steel Members*. Member ASCE.

Yu W. y LaBoube R. (2010). *Cold-Formed Steel Design*. Missouri, E.E.U.U: John Wiley & Sons, Inc

Anexos

Anexo 1. Cantidad de muestras obtenidas por empresa

Cuadro A1. 1. Muestras obtenidas de la empresa 01

Cantidad de muestras obtenidas - Empresa 01							
Tubo	Espesor	Longitud de tubo (cm)	Código del tubo	Longitud del fleje (cm)	Código del fleje	Fecha de recolección	Investigador presente
50x50	1,5	50	E01 T50x1,5	25	E01 F1,5 - 50	21/08/2019	No
	1,8	50	E01 T50x1,8	25	E01 F1,8 - 50	21/08/2019	No
	2,37	50	E01 T50x2,37	25	E01 F2,37 - 50	20/09/2019	Sí
	3,17	No se fabrica tubo de este espesor					
72x72	1,5	50	E01 T72x1,5	25	E01 F1,5 - 72	02/07/2019	No
	1,8	50	E01 T72x1,8	25	E01 F1,8 - 72	02/07/2019	No
	2,37	50	E01 T72x2,37	25	E01 F2,37 - 72	21/08/2019	Sí
	3,17	No se fabrica tubo de este espesor					
100x100	1,5	50	E01 T100x1,5	25	E01 F1,5 - 100	02/07/2019	No
	1,8	50	E01 T100x1,8	25	E01 F1,8 - 100	02/07/2019	No
	2,37	50	E01 T100x2,37	25	E01 F2,37 - 100	02/07/2019	No
	3,17	No se fabrica tubo de este espesor					

Cuadro A1. 2. Muestras obtenidas de la empresa 02

Cantidad de muestras obtenidas - Empresa 02							
Tubo	Espesor	Longitud de tubo (cm)	Código del tubo	Longitud del fleje (cm)	Código del fleje	Fecha de recolección	Investigador presente
50x50	1,5	50	E02 T50x1,5	25	E02 F1,5 - 50	16/09/2019	Sí
	1,8	50	E02 T50x1,8	25	E02 F1,8 - 50	16/09/2019	Sí
	2,37	50	E02 T50x2,37	25	E02 F2,37 - 50	02/09/2019	Sí
	3,17	50	E02 T50x3,17	25	E02 F3,17 - 50	10/10/2019	Sí
72x72	1,5	50	E02 T72x1,5	25	E02 F1,5 - 72	10/09/2019	Sí
	1,8	50	E02 T72x1,8	25	E02 F1,8 - 72	10/09/2019	Sí
	2,37	50	E02 T72x2,37	25	E02 F2,37 - 72	04/10/2019	Sí
	3,17	50	E02 T72x3,17	25	E02 F3,17 - 72	04/10/2019	Sí
100x100	1,5	50	E02 T100x1,5	25	E02 F1,5 - 100	05/09/2019	Sí
	1,8	50	E02 T100x1,8	25	E02 F1,8 - 100	05/09/2019	Sí
	2,37	50	E02 T100x2,37	25	E02 F2,37 - 100	27/09/2019	Sí
	3,17	50	E02 T100x3,17	25	E02 F3,17 - 100	27/09/2019	Sí

Cuadro A1. 3. Muestras obtenidas de la Empresa 03

Cantidad de muestras obtenidas - Empresa 03							
Tubo	Espesor	Longitud de tubo (cm)	Código del tubo	Longitud del fleje (cm)	Código del fleje	Fecha de recolección	Investigador presente
50x50	1,5	50	E03 T50x1,5	25	E03 F1,5 - 50	18/10/2019	Sí
	1,8	50	E03 T50x1,8	25	E03 F1,8 - 50	18/10/2019	Sí
	2,37	50	E03 T50x2,37	25	E03 F2,37 - 50	31/10/2019	Sí
	3,17	50	E03 T50x3,17	25	E03 F3,17 - 50	31/10/2019	Sí
72x72	1,5	50	E03 T72x1,5	25	E03 F1,5 - 72	15/11/2019	Sí
	1,8	50	E03 T72x1,8	25	E03 F1,8 - 72	15/11/2019	Sí
	2,37	50	E03 T72x2,37	25	E03 F2,37 - 72	17/02/2020	Sí
	3,17	50	E03 T72x3,17	25	E03 F3,17 - 72	17/02/2020	Sí
100x100	1,5	50	E03 T100x1,5	25	E03 F1,5 - 100	14/10/2019	Sí
	1,8	50	E03 T100x1,8	25	E03 F1,8 - 100	28/01/2020	Sí
	2,37	50	E03 T100x2,37	25	E03 F2,37 - 100	17/02/2020	Sí
	3,17	50	E03 T100x3,17	25	E03 F3,17 - 100	10/03/2020	No

Anexo 2. Dimensiones de las probetas de falla a tracción

Cuadro A2. Dimensiones de las probetas confeccionadas.

Código de probeta	Longitud de control G (mm)	Ancho W (mm)	Espesor T (mm)	Radio R (mm)	Longitud total L (mm)	Longitud de sección reducida A (mm)	Longitud sección de agarre B - izq (mm)	Longitud sección de agarre B - der (mm)	Ancho sección de agarre (C)
E01 F1.5-50	50,07	12,56	1,51	12,5	250,99	63,23	86,86	86,20	20,02
E01 T50x1.5 - 01	50,10	12,60	1,53	12,5	248,86	62,14	85,71	85,09	19,93
E01 T50x1.5 - 02	49,92	12,53	1,53	12,5	249,10	60,74	84,88	86,55	19,99
E01 T50x1.5 - 03	49,95	12,54	1,54	12,5	249,60	59,56	85,72	86,26	19,98
E01 F1.5-72	50,08	12,55	1,46	12,5	249,45	61,35	83,14	87,49	20,54
E01 T72x1.5 - 01	50,05	12,46	1,46	12,5	250,17	60,80	89,35	81,96	20,49
E01 T72x1.5 - 02	50,08	12,39	1,45	12,5	248,20	61,63	82,56	86,68	20,49
E01 T72x1.5 - 03	49,92	12,50	1,48	12,5	249,44	60,10	82,16	88,35	20,56
E01 F1.5-100	49,91	12,31	1,45	12,5	249,54	60,34	82,00	88,74	20,31
E01 T100x1.5 - 01	49,94	12,44	1,45	12,5	255,31	61,10	82,93	94,61	20,38
E01 T100x1.5 - 02	50,09	12,45	1,48	12,5	256,28	61,92	82,64	94,96	20,53
E01 T100x1.5 - 03	50,09	12,53	1,48	12,5	249,67	61,33	86,71	84,97	20,07
E01 F1.8-50	50,07	12,57	1,86	12,5	248,27	61,78	86,21	84,78	20,08
E01 T50x1.8 - 01	49,94	12,53	1,78	12,5	248,40	61,17	85,24	85,25	20,13
E01 T50x1.8 - 02	50,10	12,54	1,76	12,5	249,12	61,64	85,30	85,80	20,16
E01 T50x1.8 - 03	49,93	12,55	1,78	12,5	249,63	61,38	86,54	84,54	20,11
E01 F1.8-72	50,06	12,44	1,75	12,5	249,01	61,09	81,84	86,46	20,47
E01 T72x1.8 - 01	50,07	12,53	1,75	12,5	250,38	61,18	82,55	88,84	20,56
E01 T72x1.8 - 02	49,94	12,39	1,76	12,5	249,82	59,97	81,98	87,59	20,40
E01 T72x1.8 - 03	50,10	12,39	1,77	12,5	250,00	61,00	85,50	85,50	20,09

Cuadro A2. Dimensiones de las probetas confeccionadas. (Cont.)

Código de probeta	Longitud de control G (mm)	Ancho W (mm)	Espesor T (mm)	Radio R (mm)	Longitud total L (mm)	Longitud de sección reducida A (mm)	Longitud sección de agarre B - izq (mm)	Longitud sección de agarre B - der (mm)	Ancho sección de agarre (C)
E01 F1.8-100	49,95	12,56	1,78	12,5	248,07	61,40	82,97	90,81	19,98
E01 T100x1.8 - 01	50,04	12,47	1,79	12,5	249,87	60,70	78,40	95,53	19,87
E01 T100x1.8 - 02	50,03	12,58	1,77	12,5	248,52	60,81	81,03	89,06	20,00
E01 T100x1.8 - 03	50,00	12,55	1,79	12,5	251,93	60,27	79,95	93,14	19,95
E01 F2.37-50	50,02	12,48	2,22	12,5	250,39	61,36	84,79	86,57	20,01
E01 T50x2.37 - 01	50,09	12,53	2,20	12,5	248,85	61,24	86,02	84,33	19,96
E01 T50x2.37- 02	50,10	12,54	2,20	12,5	249,66	61,16	86,84	84,93	20,06
E01 T50x2.37 - 03	50,09	12,52	2,21	12,5	249,16	60,56	84,61	85,70	20,10
E01 F2.37-72	50,07	12,38	2,25	12,5	252,80	60,80	86,63	87,62	20,00
E01 T72x2.37- 01	50,07	12,54	2,29	12,5	250,42	61,05	85,25	85,37	20,04
E01 T72x2.37 - 02	50,09	12,48	2,29	12,5	250,20	60,38	85,81	86,69	20,12
E01 T72x2.37 - 03	50,03	12,43	2,28	12,5	250,72	61,25	86,55	84,22	20,06
E01 F2.37-100	50,09	12,60	2,26	12,5	256,35	60,54	80,57	97,20	20,03
E01 T100x2.37- 01	50,10	12,65	2,28	12,5	249,05	60,93	88,29	81,18	20,07
E01 T100x2.37 - 02	49,95	12,63	2,28	12,5	248,65	61,60	88,58	81,20	19,99
E01 T100x2.37 - 03	50,09	12,74	2,29	12,5	249,50	61,89	89,85	80,68	19,98
E02 F1.5-01	49,94	12,51	1,48	12,5	261,74	59,94	96,13	87,51	20,10
E02 T50x1.5 - 01	50,10	12,51	1,51	12,5	250,91	59,65	84,02	87,79	20,05
E02 T50x1.5 - 02	49,92	12,46	1,50	12,5	251,75	59,72	84,76	87,96	20,13
E02 T50x1.5 - 03	50,08	12,48	1,50	12,5	251,05	59,49	84,86	88,24	20,07

Cuadro A2. Dimensiones de las probetas confeccionadas. (Cont.)

Código de probeta	Longitud de control G (mm)	Ancho W (mm)	Espesor T (mm)	Radio R (mm)	Longitud total L (mm)	Longitud de sección reducida A (mm)	Longitud sección de agarre B - izq (mm)	Longitud sección de agarre B - der (mm)	Ancho sección de agarre (C)
E02 F1.5-02	49,95	12,59	1,45	12,5	253,02	59,54	89,64	85,50	19,96
E02 T72x1.5 - 01	50,18	12,58	1,51	12,5	251,66	58,88	86,73	87,08	19,98
E02 T72x1.5 - 02	50,04	12,63	1,49	12,5	252,56	59,35	87,91	86,22	20,02
E02 T72x1.5 - 03	50,10	12,59	1,51	12,5	251,77	59,44	86,73	86,93	20,02
E02 F1.5-03	50,03	12,49	1,51	12,5	257,20	60,26	90,62	88,07	20,01
E02 T100x1.5 - 01	50,10	12,47	1,50	12,5	251,16	60,18	86,46	86,27	20,02
E02 T100x1.5 - 02	50,10	12,48	1,49	12,5	251,23	60,11	86,71	86,16	20,03
E02 T100x1.5 - 03	50,03	12,48	1,50	12,5	249,79	60,16	85,89	85,48	20,00
E02 F1.8-01	50,03	12,53	1,78	12,5	250,50	59,38	85,19	87,19	20,06
E02 T50x1.8 - 01	50,08	12,55	1,85	12,5	251,01	59,26	86,08	86,90	20,10
E02 T50x1.8 - 02	50,02	12,65	1,85	12,5	249,48	59,93	84,53	88,32	20,14
E02 T50x1.8 - 03	50,02	12,55	1,85	12,5	250,56	59,61	85,53	86,98	20,19
E02 F1.8-02	50,10	12,52	1,78	12,5	251,26	59,59	86,24	87,30	19,94
E02 T72x1.8 - 01	49,96	12,49	1,79	12,5	251,34	59,23	86,20	86,99	19,97
E02 T72x1.8 - 02	50,04	12,51	1,82	12,5	250,53	59,07	87,43	85,44	19,90
E02 T72x1.8 - 03	50,02	12,47	1,82	12,5	251,33	59,24	86,65	87,20	19,69
E02 F1.8-03	49,95	12,53	1,80	12,5	251,25	59,84	85,96	87,20	20,01
E02 T100x1.8 - 01	50,00	12,52	1,82	12,5	250,81	59,95	87,02	85,59	19,99
E02 T100x1.8 - 02	50,04	12,53	1,82	12,5	250,74	59,95	86,02	86,51	20,06
E02 T100x1.8 - 03	49,99	12,53	1,81	12,5	249,63	60,02	85,83	85,52	20,02

Cuadro A2. Dimensiones de las probetas confeccionadas. (Cont.)

Código de probeta	Longitud de control G (mm)	Ancho W (mm)	Espesor T (mm)	Radio R (mm)	Longitud total L (mm)	Longitud de sección reducida A (mm)	Longitud sección de agarre B - izq (mm)	Longitud sección de agarre B - der (mm)	Ancho sección de agarre (C)
E02 F2.37-01	50,00	12,41	2,33	12,5	252,55	59,43	86,25	89,05	19,88
E02 T50x2.37 - 01	50,01	12,40	2,39	12,5	251,17	59,29	86,97	86,30	19,97
E02 T50x2.37- 02	50,07	12,40	2,38	12,5	249,30	59,59	84,42	86,91	19,98
E02 T50x2.37 - 03	49,92	12,44	2,39	12,5	251,34	59,78	86,41	87,40	20,00
E02 F2.37-02	49,97	12,62	2,38	12,5	249,55	59,77	86,37	85,16	20,14
E02 T72x2.37 - 01	50,00	12,65	2,42	12,5	250,03	59,84	86,27	85,66	20,11
E02 T72x2.37- 02	50,03	12,61	2,44	12,5	247,93	59,85	84,24	85,58	20,09
E02 T72x2.37 - 03	50,00	12,62	2,43	12,5	250,43	59,87	86,18	86,13	20,07
E02 F2.37 - 03	50,00	12,55	2,44	12,5	251,40	60,00	87,90	85,25	20,04
E02 T100x2.37 - 01	50,00	12,56	2,45	12,5	253,78	59,65	85,94	89,93	20,01
E02 T100x2.37 - 02	50,00	12,55	2,44	12,5	254,71	59,86	85,10	91,50	20,02
E02 T100x2.37 - 03	50,00	12,53	2,48	12,5	254,08	59,86	84,93	91,03	20,05
E02 F3.17-01	50,09	12,51	3,17	12,5	252,10	59,89	86,76	87,16	20,09
E02 T50x3.17 - 01	50,05	12,54	3,25	12,5	254,53	59,39	89,33	87,43	20,01
E02 T50x3.17- 02	50,06	12,50	3,24	12,5	251,28	59,71	87,60	84,25	20,06
E02 T50x3.17- 03	49,99	12,48	3,24	12,5	251,45	59,62	88,27	85,29	19,97
E02 F3.17-02	50,01	12,62	3,19	12,5	251,44	59,88	85,75	87,56	20,13
E02 T72x3.17 - 01	50,02	12,63	3,29	12,5	246,73	59,77	83,71	84,99	20,12
E02 T72x3.17- 02	50,01	12,61	3,25	12,5	248,87	59,73	84,41	86,48	20,08
E02 T72x3.17 - 03	50,02	12,57	3,25	12,5	252,89	59,53	86,54	88,57	20,04

Cuadro A2. Dimensiones de las probetas confeccionadas. (Cont.)

Código de probeta	Longitud de control G (mm)	Ancho W (mm)	Espesor T (mm)	Radio R (mm)	Longitud total L (mm)	Longitud de sección reducida A (mm)	Longitud sección de agarre B - izq (mm)	Longitud sección de agarre B - der (mm)	Ancho sección de agarre (C)
E02 F3.17 - 03	50,00	12,55	3,18	12,5	256,32	60,04	89,51	88,52	20,11
E02 T100x3.17 - 01	49,99	12,57	3,23	12,5	250,64	60,14	84,13	88,11	20,18
E02 T100x3.7 - 02	49,99	12,55	3,27	12,5	249,52	59,87	83,70	87,69	20,07
E02 T100x3.7 - 03	50,07	12,59	3,21	12,5	249,95	60,03	84,59	87,08	20,06
E03 F1.5-01	50,03	12,47	1,51	12,5	250,43	60,05	80,23	91,90	20,03
E03 T50x1.5 - 01	50,00	12,48	1,49	12,5	253,16	60,05	91,02	83,83	19,99
E03 T50x1.5 - 02	50,00	12,48	1,49	12,5	253,18	59,90	90,15	84,88	19,97
E03 T50x1.5 - 03	50,00	12,49	1,52	12,5	254,67	59,84	91,61	84,97	19,96
E03 F1.5-02	50,00	12,51	1,48	12,5	255,55	59,80	88,09	89,41	20,00
E03 T72x1.5 - 01	50,00	12,54	1,52	12,5	251,80	59,80	87,37	86,37	19,99
E03 T72x1.5 - 02	50,00	12,51	1,48	12,5	252,48	59,65	87,06	87,52	19,97
E03 T72x1.5 - 03	50,00	12,53	1,48	12,5	252,19	59,92	86,65	87,36	19,99
E03 F1.5-03	50,00	12,45	1,50	12,5	253,10	59,90	89,66	85,29	19,98
E03 T100x1.5 - 01	50,00	12,49	1,53	12,5	251,57	59,57	89,26	84,48	19,97
E03 T100x1.5 - 02	50,00	12,47	1,54	12,5	251,54	60,20	88,28	84,80	19,95
E03 T100x1.5 - 03	50,00	12,47	1,49	12,5	252,11	59,81	89,59	84,45	19,98
E03 F1.8-01	50,00	12,44	1,75	12,5	252,32	60,06	89,76	84,24	19,98
E03 T50x1.8 - 01	50,02	12,46	1,76	12,5	250,66	59,94	87,31	85,15	19,95
E03 T50x1.8 - 02	50,01	12,47	1,78	12,5	250,86	59,85	88,56	84,20	19,99
E03 T50x1.8 - 03	50,00	12,45	1,80	12,5	250,30	59,80	87,98	84,26	20,01

Cuadro A2. Dimensiones de las probetas confeccionadas. (Cont.)

Código de probeta	Longitud de control G (mm)	Ancho W (mm)	Espesor T (mm)	Radio R (mm)	Longitud total L (mm)	Longitud de sección reducida A (mm)	Longitud sección de agarre B - izq (mm)	Longitud sección de agarre B - der (mm)	Ancho sección de agarre (C)
E03 F1.8-02	50,00	12,54	1,77	12,5	252,32	59,82	87,77	86,48	19,97
E03 T72x1.8 - 01	50,01	12,52	1,84	12,5	250,73	59,89	86,50	86,09	19,98
E03 T72x1.8 - 02	50,02	12,52	1,87	12,5	251,08	59,77	87,14	85,91	19,98
E03 T72x1.8 - 03	50,00	12,52	1,82	12,5	251,21	60,05	86,78	86,12	19,96
E03 F1.8-03	50,01	12,43	1,75	12,5	250,65	59,97	88,26	84,17	19,99
E03 T100x1.8 - 01	50,01	12,45	1,86	12,5	250,54	59,97	88,61	83,71	19,97
E03 T100x1.8 - 02	50,00	12,47	1,80	12,5	250,83	59,77	84,42	88,38	20,01
E03 T100x1.8 - 03	50,00	12,47	1,78	12,5	249,57	59,72	86,97	84,63	19,97
E03 F2.37 - 01	50,00	12,50	2,27	12,5	251,12	59,72	87,53	85,61	20,03
E03 T72x2.37 - 01	50,01	12,51	2,34	12,5	252,80	59,72	89,04	85,78	20,02
E03 T72x2.37 - 02	50,01	12,54	2,29	12,5	252,25	59,72	89,51	84,76	20,04
E03 T72x2.37 - 03	50,01	12,53	2,28	12,5	251,67	59,73	89,22	84,47	20,05
E03 F2.37 - 02	50,02	12,46	2,34	12,5	248,09	60,43	87,09	82,31	20,02
E03 T72x2.37 - 01	50,00	12,47	2,33	12,5	250,36	60,18	88,56	83,36	20,02
E03 T72x2.37 - 02	50,04	12,48	2,39	12,5	250,86	60,18	87,34	85,09	19,99
E03 T72x2.37 - 03	50,05	12,47	2,36	12,5	251,27	59,89	86,71	86,41	20,02
E03 F2.37 - 03	49,95	12,51	2,32	12,5	253,82	60,45	85,29	89,82	20,11
E03 T100x2.37 - 01	50,00	12,51	2,35	12,5	250,30	60,44	86,66	84,94	20,02
E03 T100x2.37 - 02	49,96	12,53	2,36	12,5	250,48	60,45	83,88	87,89	20,02
E03 T100x2.37 - 03	50,02	12,51	2,41	12,5	250,49	60,30	85,37	86,57	20,01

Cuadro A2. Dimensiones de las probetas confeccionadas. (Cont.)

Código de probeta	Longitud de control G (mm)	Ancho W (mm)	Espesor T (mm)	Radio R (mm)	Longitud total L (mm)	Longitud de sección reducida A (mm)	Longitud sección de agarre B - izq (mm)	Longitud sección de agarre B - der (mm)	Ancho sección de agarre (C)
E03 F3.17 - 01	50,08	12,47	3,05	12,5	251,03	60,48	84,00	88,29	19,98
E03 T50x3.17 - 01	50,00	12,46	3,02	12,5	250,26	60,34	83,90	87,76	19,95
E03 T50x3.17 - 02	49,96	12,46	3,02	12,5	251,11	60,43	85,39	87,03	19,96
E03 T50x3.17 - 03	49,98	12,48	3,13	12,5	252,11	60,04	86,21	87,60	19,95
E03 F3.17 - 02	50,00	12,49	2,84	12,5	251,37	59,83	86,56	86,72	20,02
E03 T72x3.17 - 01	50,01	12,47	2,94	12,5	250,83	59,77	86,50	86,31	20,01
E03 T72x3.17 - 02	50,01	12,50	2,84	12,5	249,51	59,70	86,25	85,30	20,01
E03 T72x3.17 - 03	50,01	12,47	2,99	12,5	249,59	59,71	86,67	84,95	20,02
E03 F3.17 - 03	50,01	12,48	3,26	12,5	254,37	59,76	85,32	91,04	20,03
E03 T100x3.17 - 01	50,01	12,48	2,99	12,5	250,55	59,81	86,03	86,45	20,04
E03 T100x3.17 - 02	50,01	12,49	3,06	12,5	252,34	59,91	86,76	87,41	20,05
E03 T100x3.17 - 03	50,01	12,48	2,91	12,5	255,89	59,90	86,70	91,04	20,04

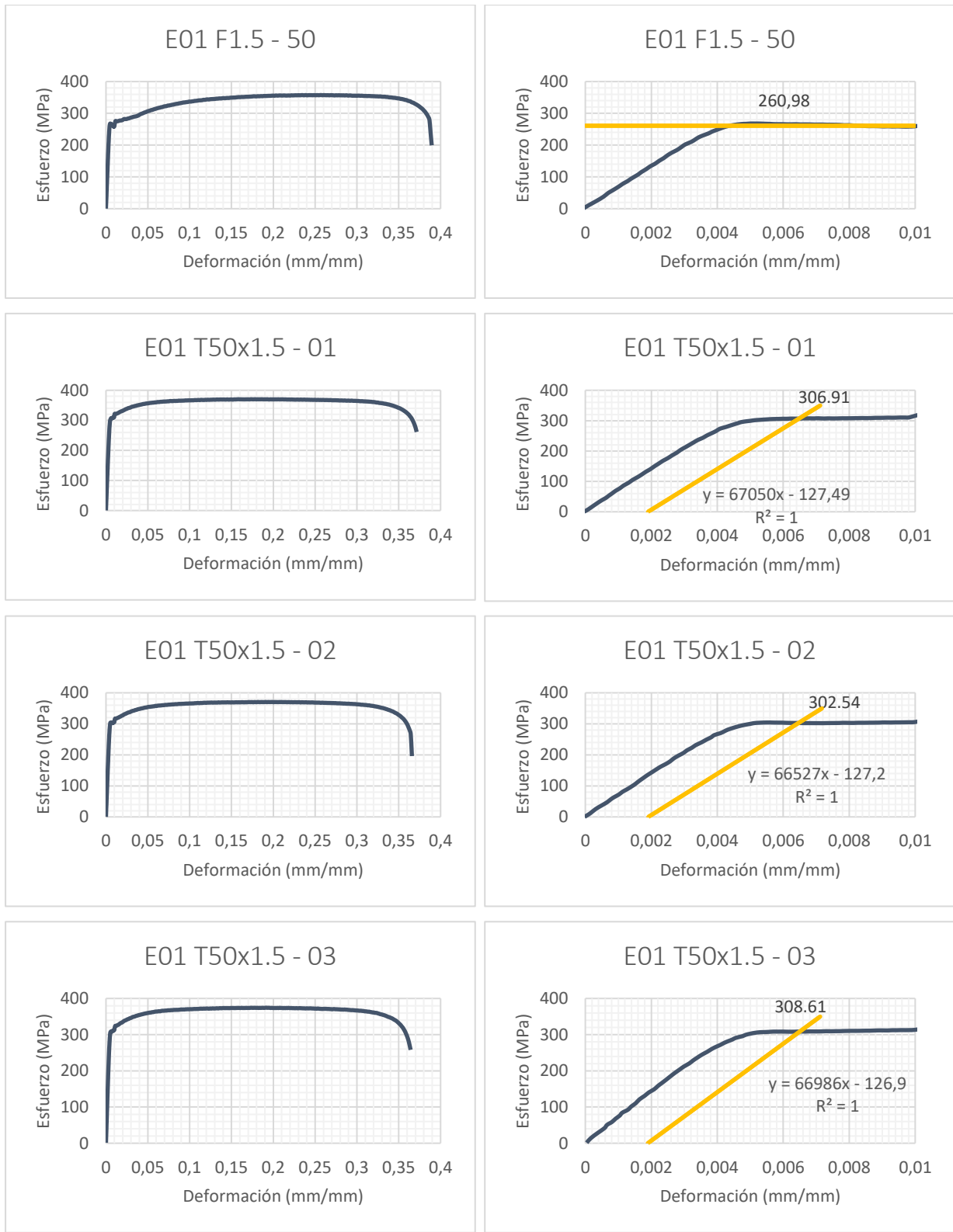
Anexo 3. Dimensiones nominales de la longitud L y el radio interno r de cada sección de tubo analizada

Cuadro A3. Ancho L y radio interno r de las secciones de tubo obtenidas.

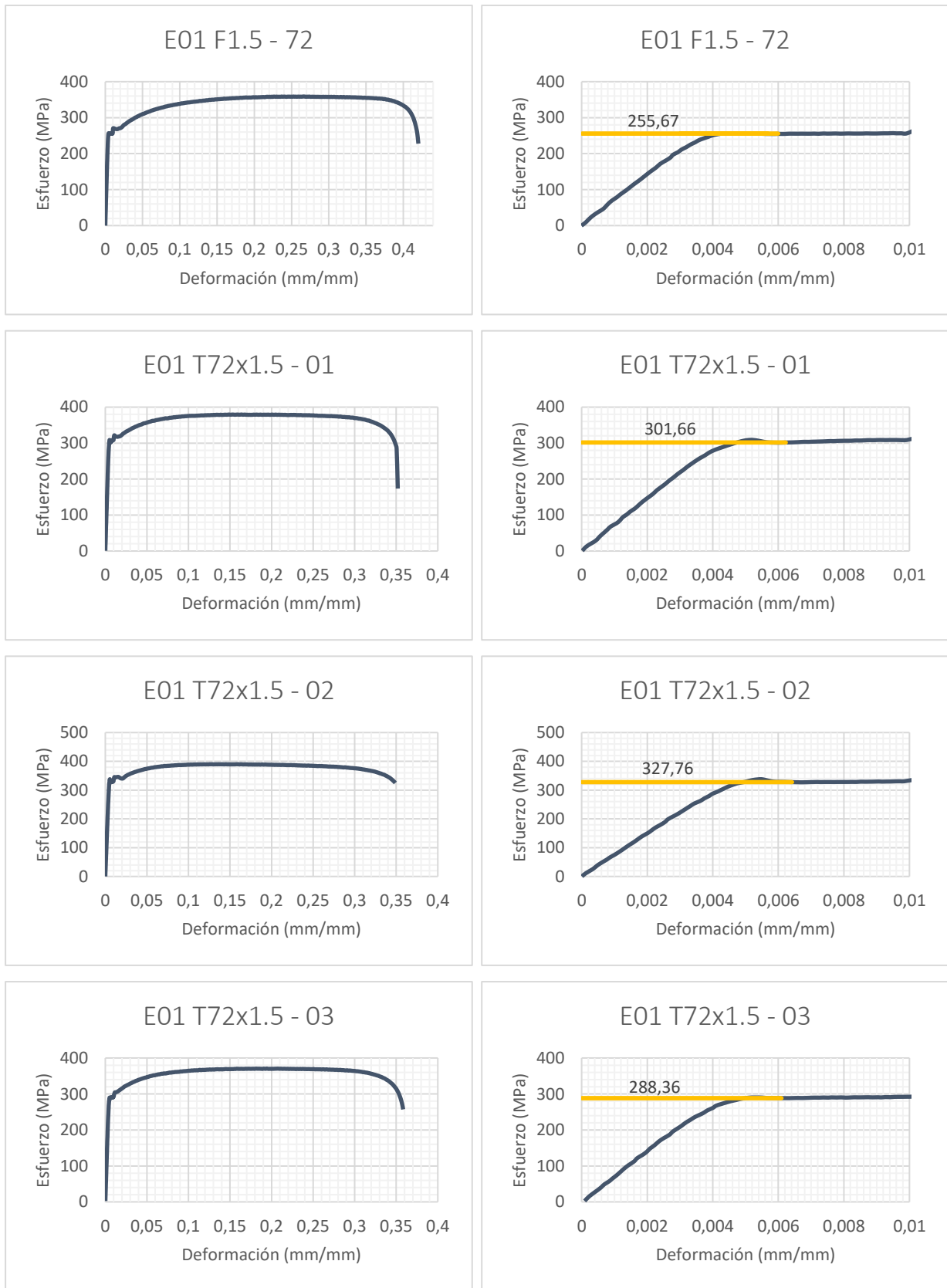
Código del tubo	L (mm)	r (mm)
E01 T50x1.5	51,00	2,31
E01 T72x1.5	72,63	2,00
E01 T100x1.5	99,13	1,31
E01 T50x1.8	50,88	2,69
E01 T72x1.8	72,75	2,63
E01 T100x1.8	99,63	1,38
E01 T50x2.37	50,88	3,13
E01 T72x2.37	73,00	3,13
E01 T100x2.37	99,38	2,06
E02 T50x1.5	50,75	2,13
E02 T72x1.5	72,50	2,81
E02 T100x1.5	99,88	3,25
E02 T50x1.8	51,13	2,50
E02 T72x1.8	72,63	2,94
E02 T100x1.8	99,88	2,94
E02 T50x2.37	51,50	2,56
E02 T72x2.37	72,25	2,31
E02 T100x2.37	100,17	3,88
E02 T50x3.17	51,00	1,81
E02 T72x3.17	72,63	2,31
E02 T100x3.17	100,50	3,50
E03 T50x1.5	50,50	1,81
E03 T72x1.5	72,50	1,19
E03 T100x1.5	100,25	1,31
E03 T50x1.8	50,13	1,81
E03 T72x1.8	70,25	1,75
E03 T100x1.8	99,88	2,56
E03 T50x2.37	50,63	2,06
E03 T72x2.37	72,75	1,13
E03 T100x2.37	100,63	1,31
E03 T50x3.17	50,88	2,25
E03 T72x3.17	73,00	1,50
E03 T100x3.17	101,13	2,63

Anexo 4. Curvas esfuerzo-deformación de las probetas falladas a tracción

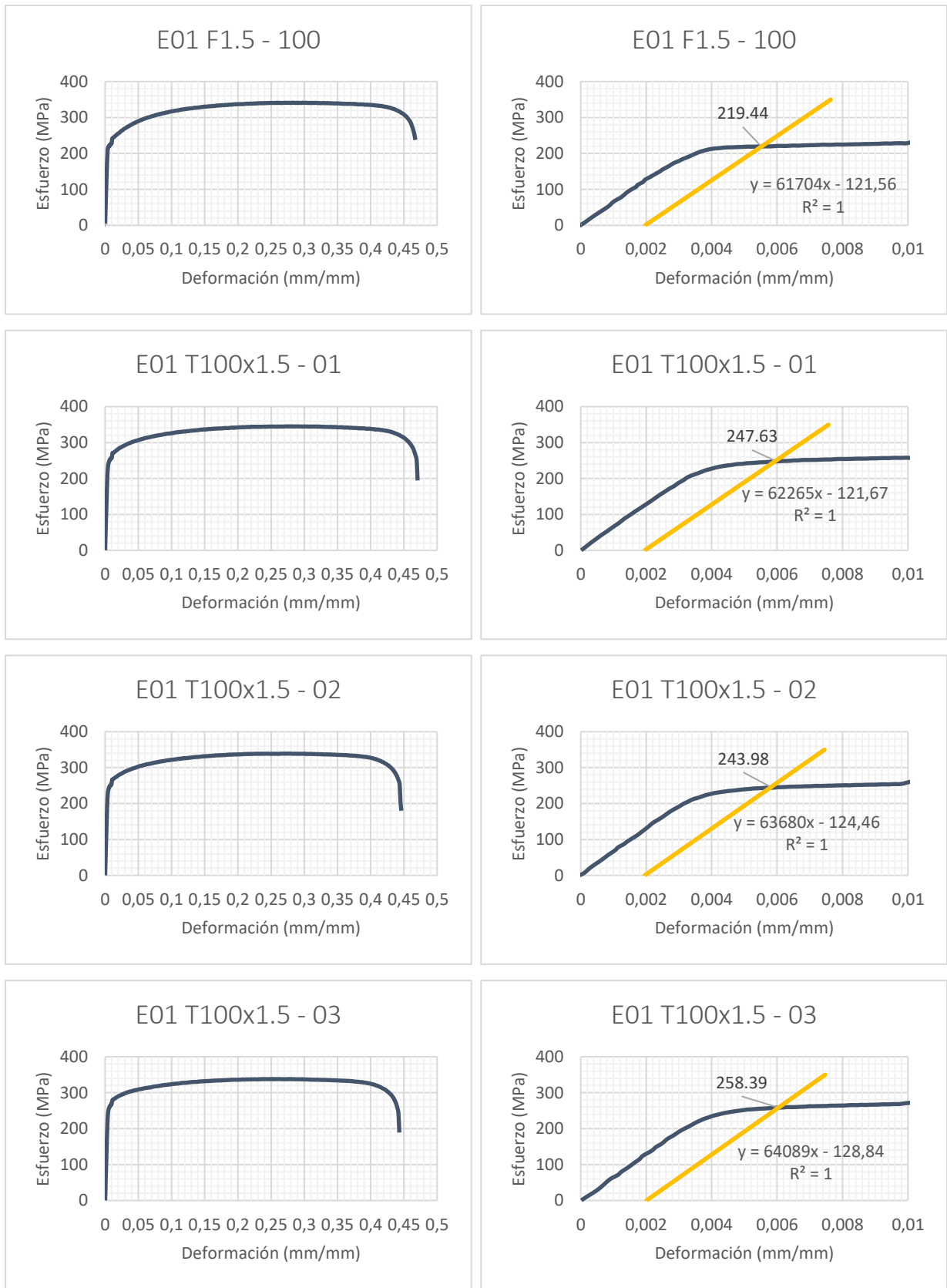
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 1.5 mm de espesor.



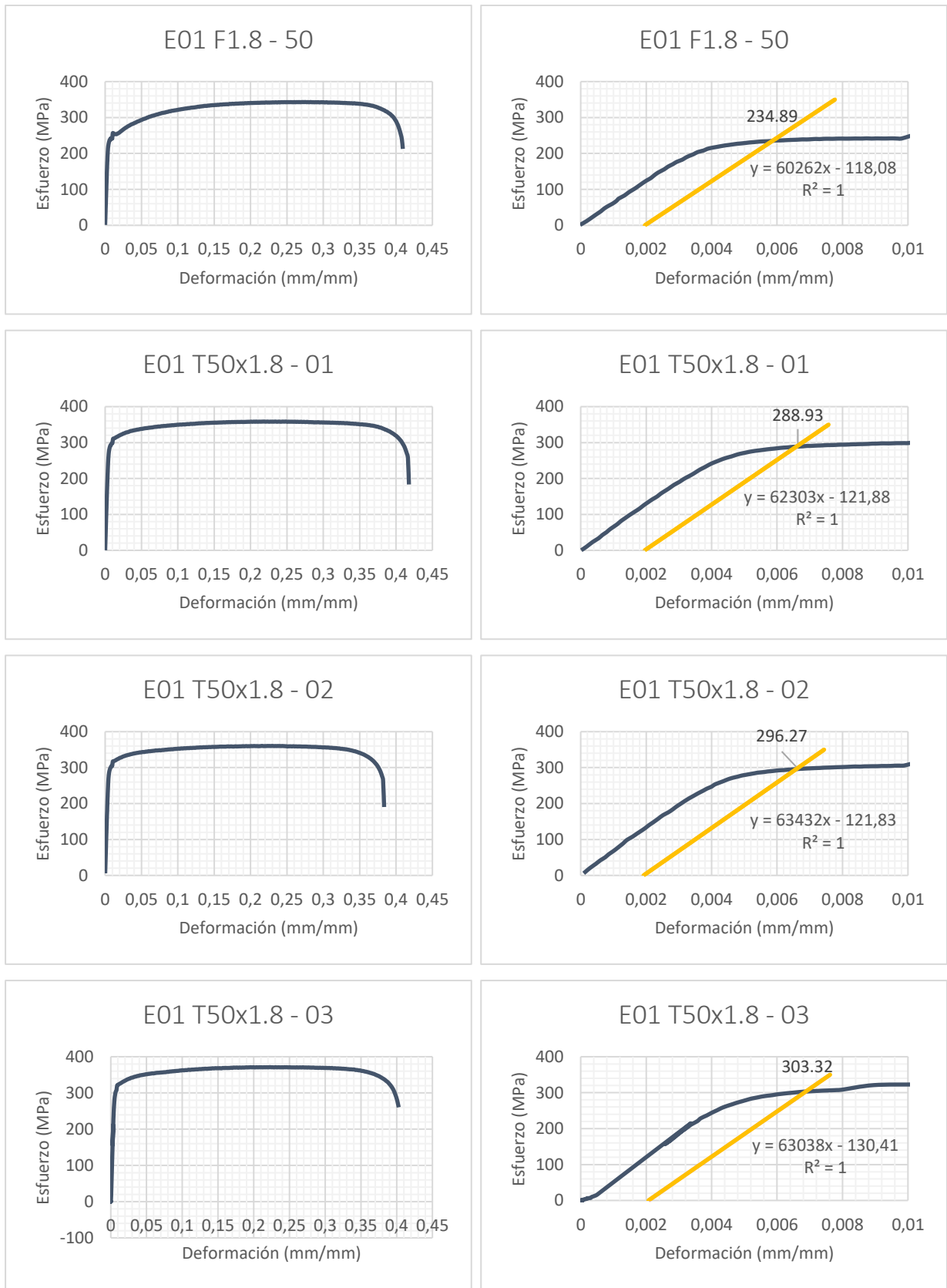
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 1.5 mm de espesor.



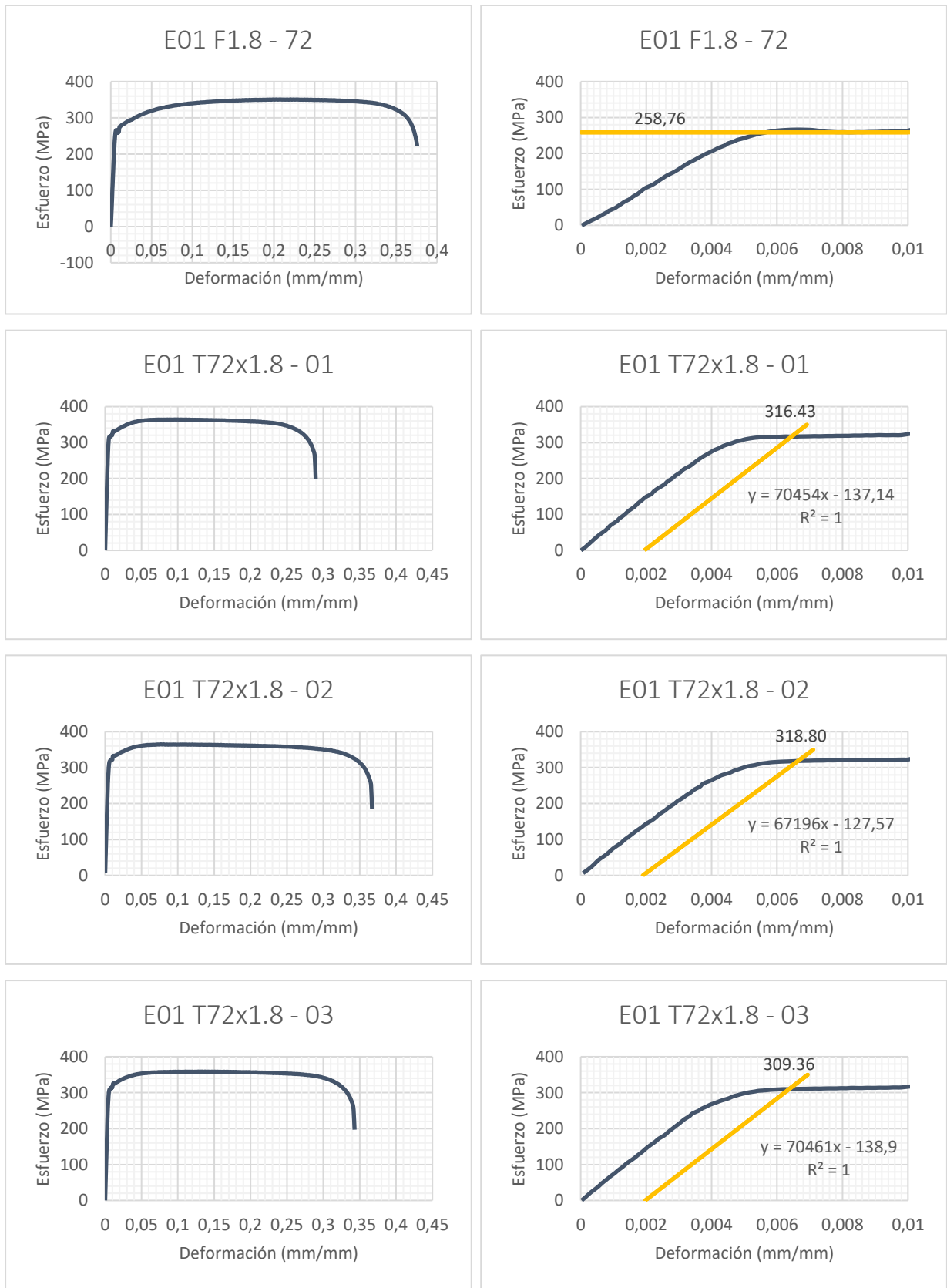
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 1.5 mm de espesor.



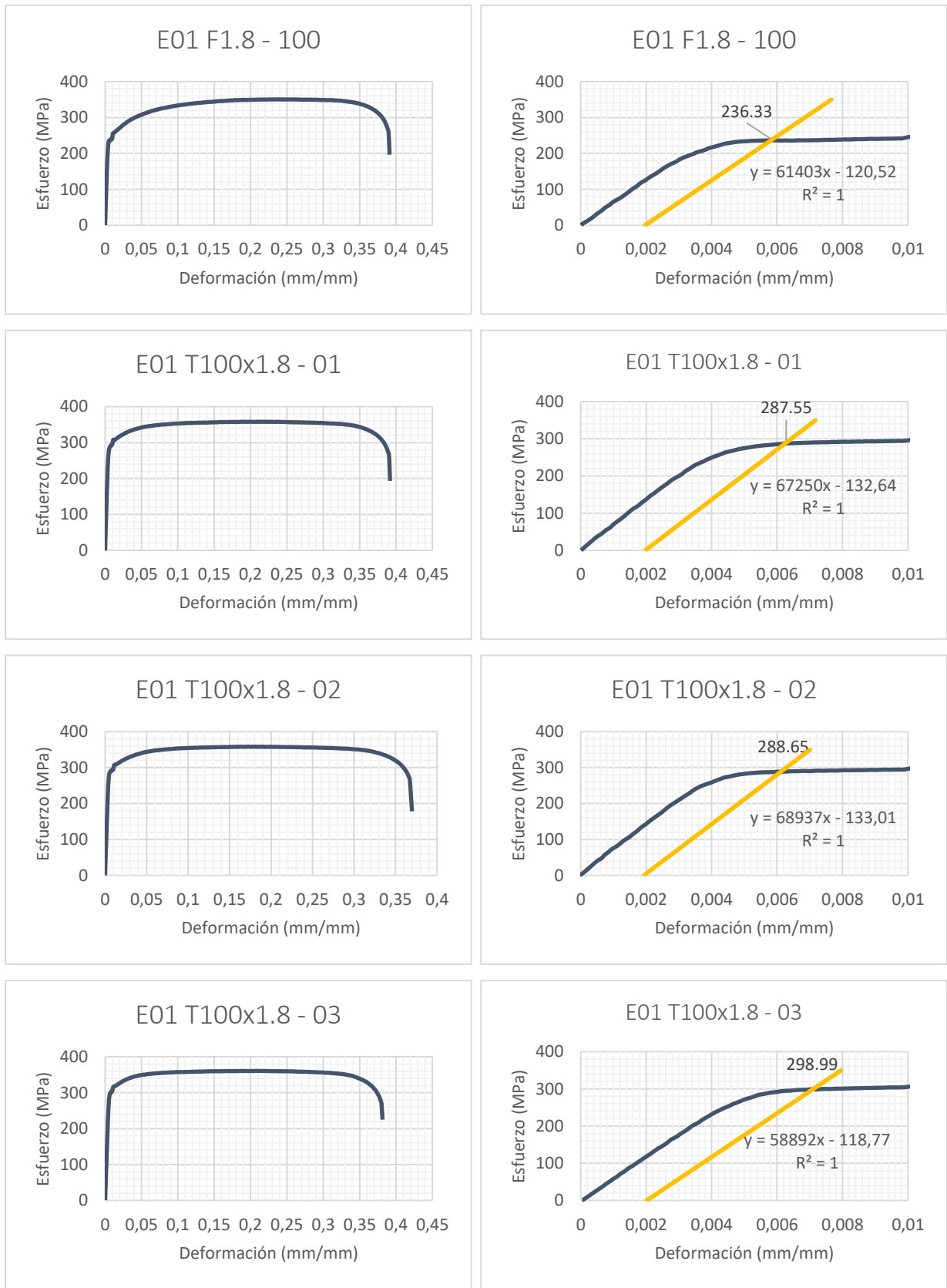
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 1.8 mm de espesor.



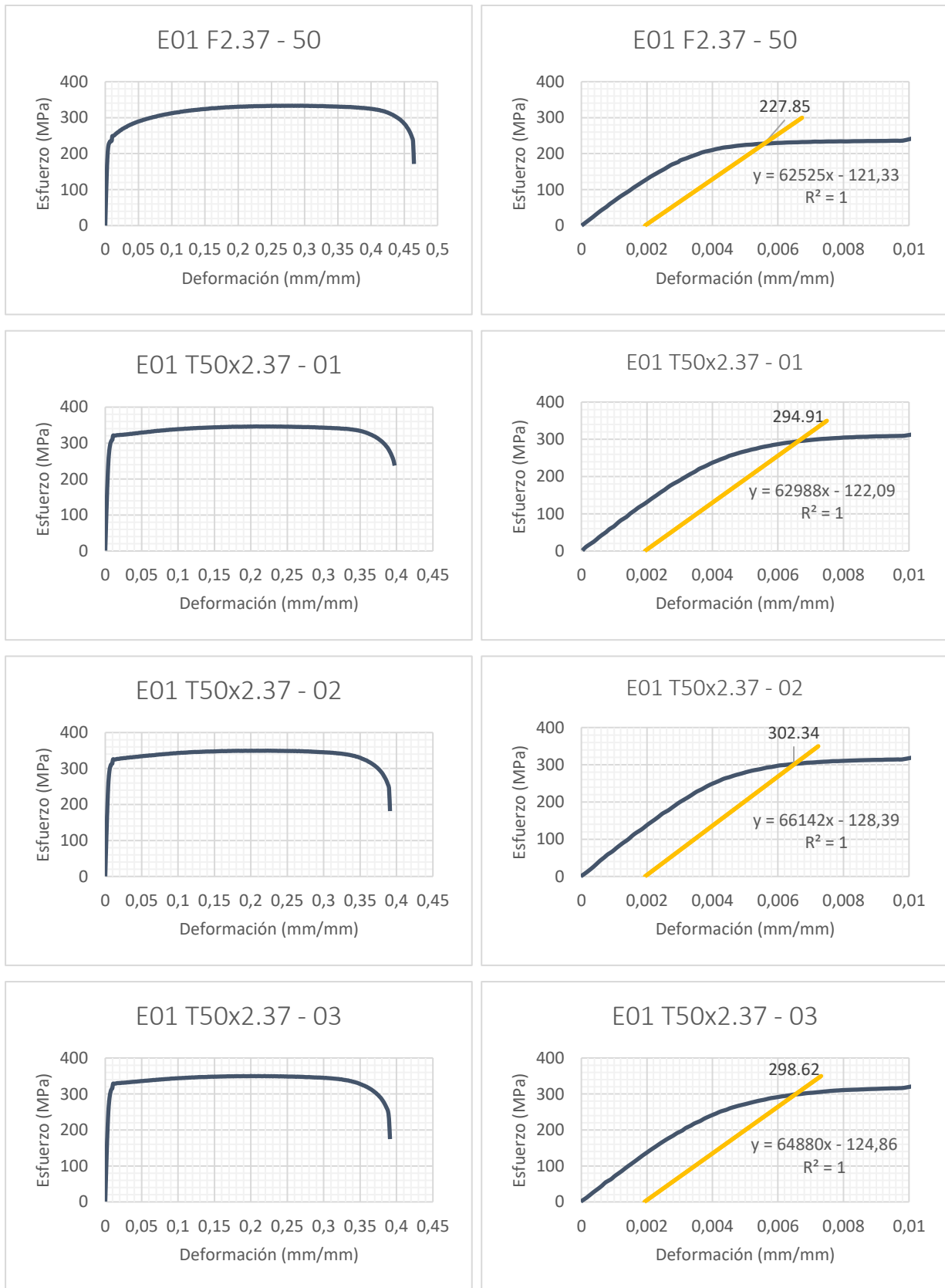
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 1.8 mm de espesor.



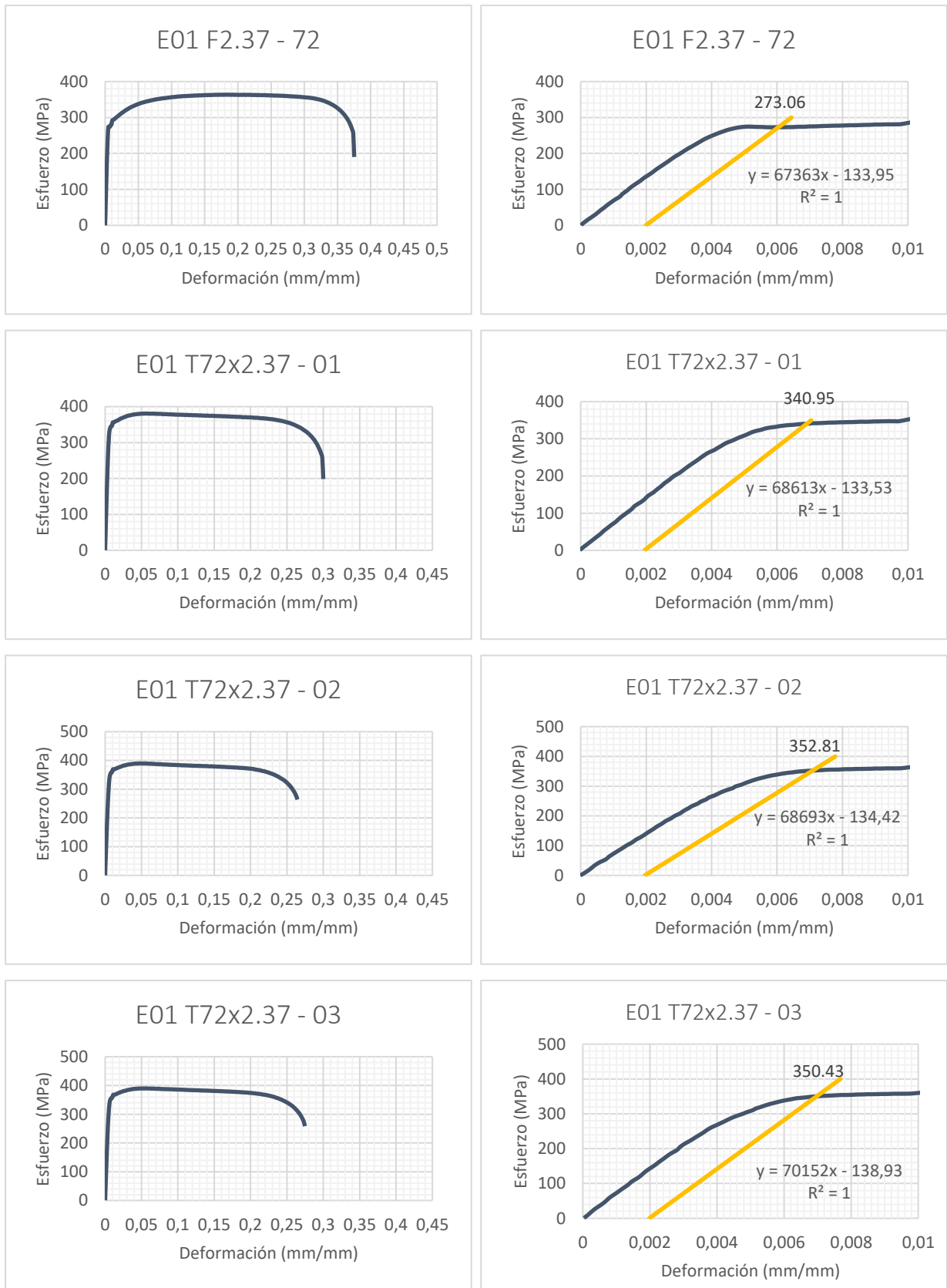
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 1.8 mm de espesor.



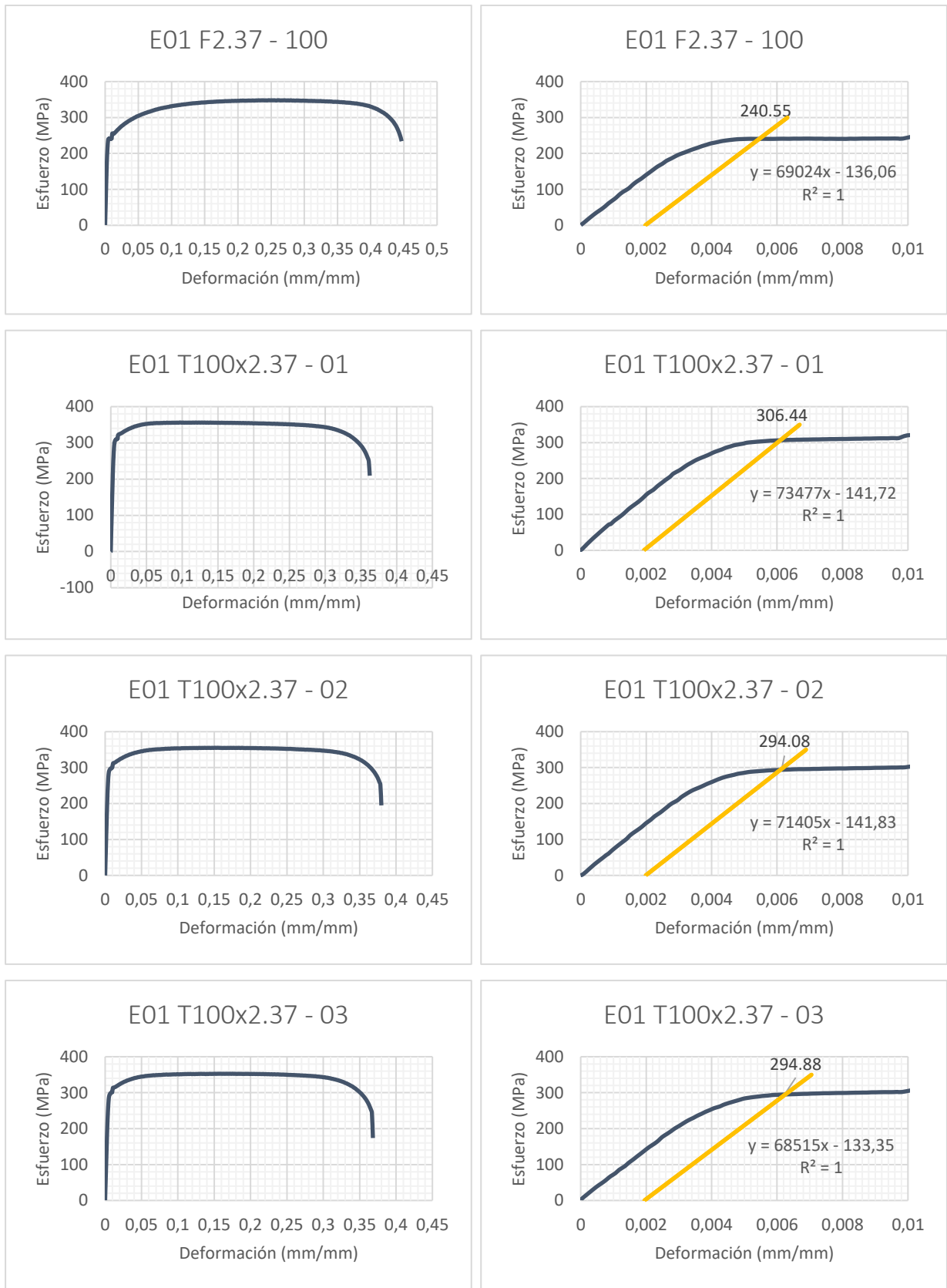
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 2.37 mm de espesor.



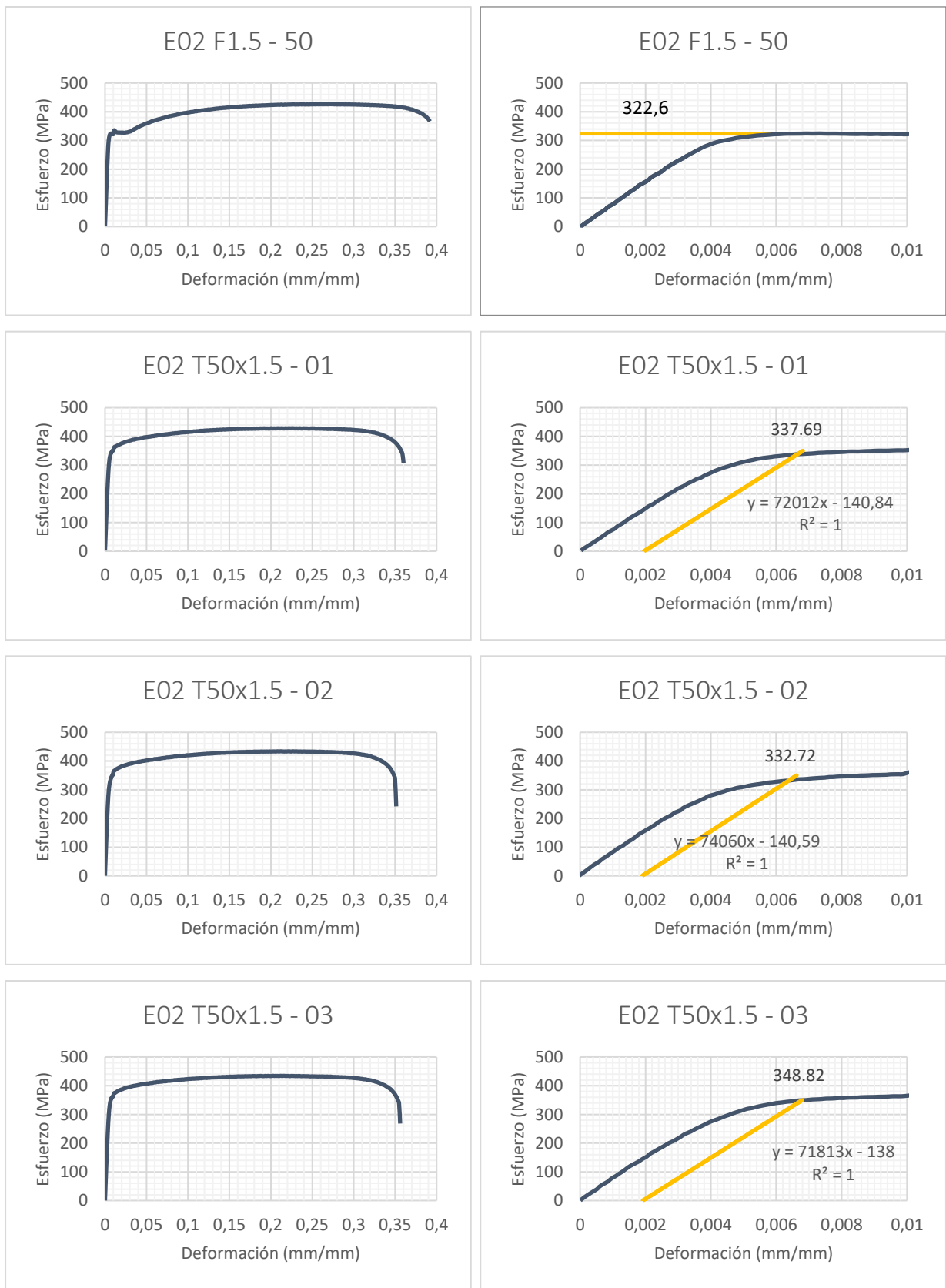
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 2.37 mm de espesor.



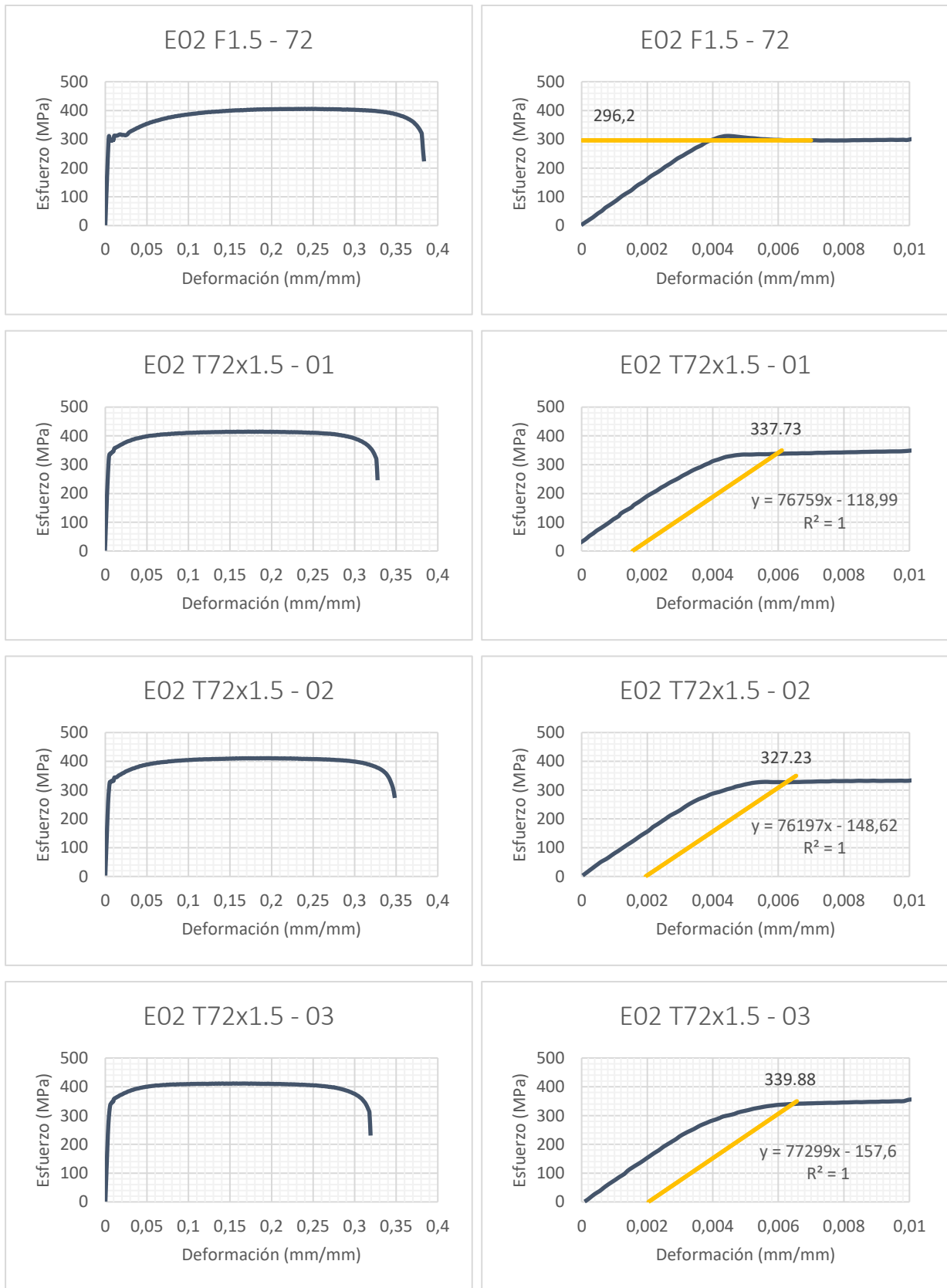
Probetas de Empresa 01. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 2.37 mm de espesor.



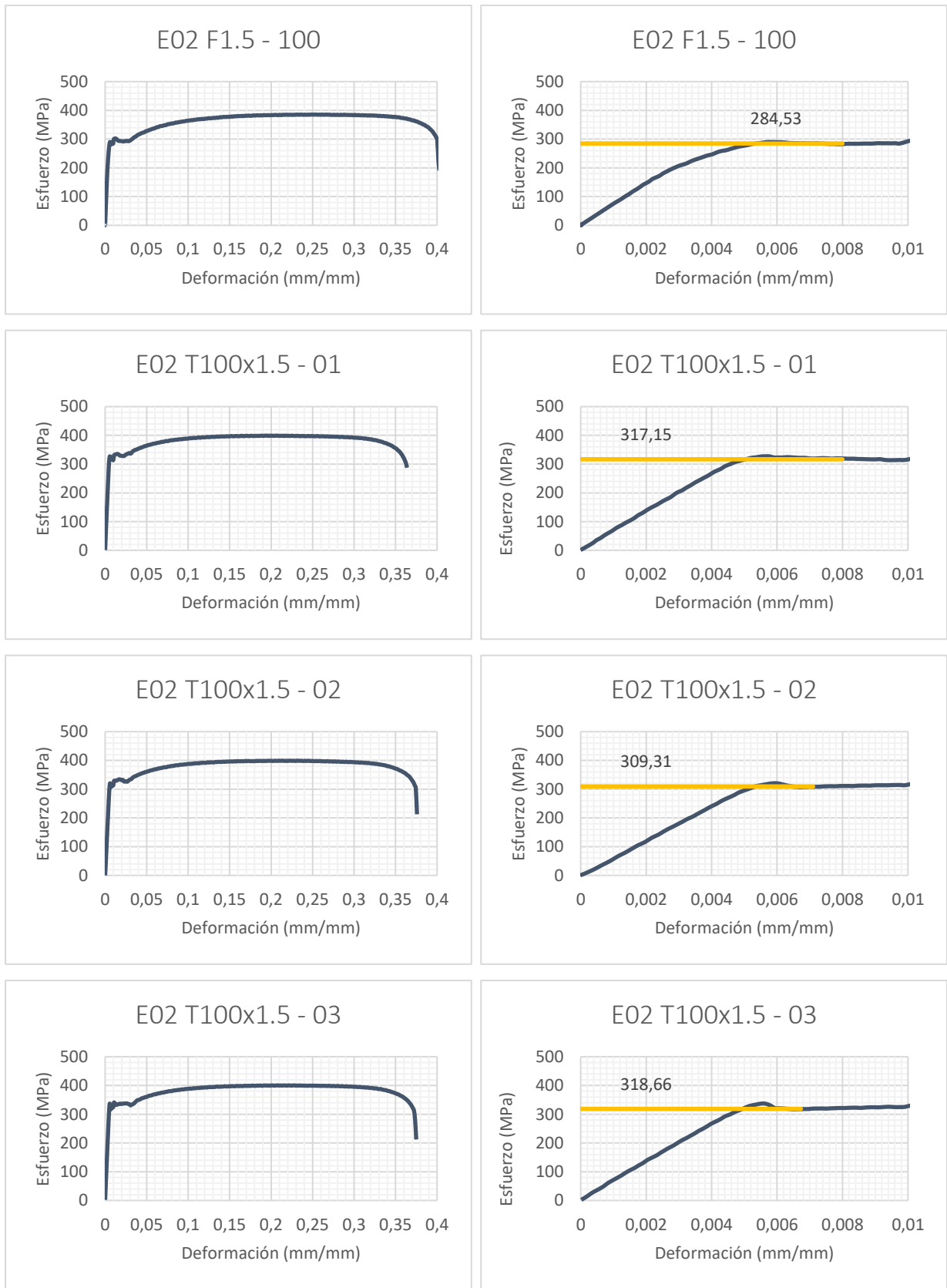
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 1.5 mm de espesor.



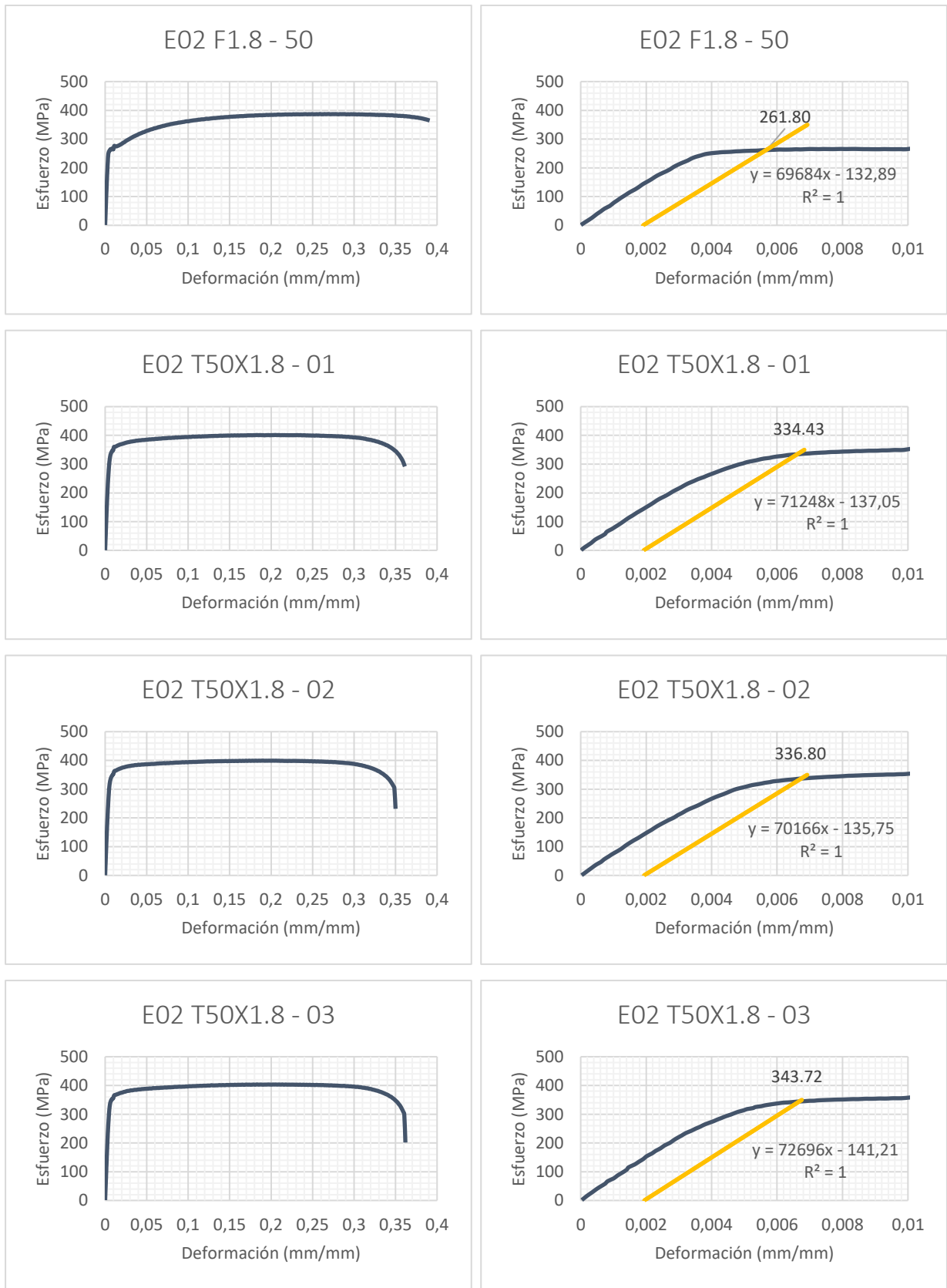
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 1.5 mm de espesor.



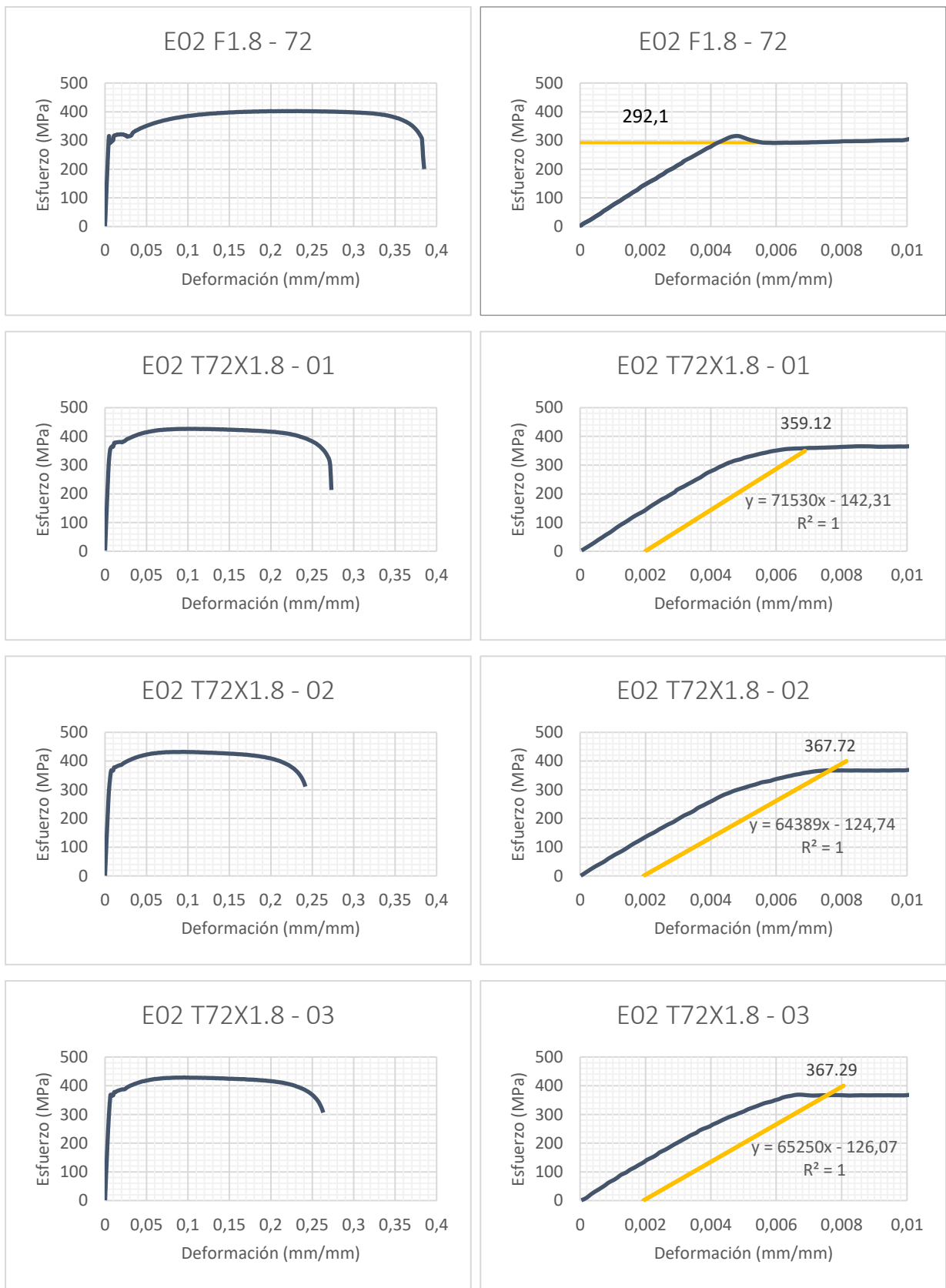
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 1.5 mm de espesor.



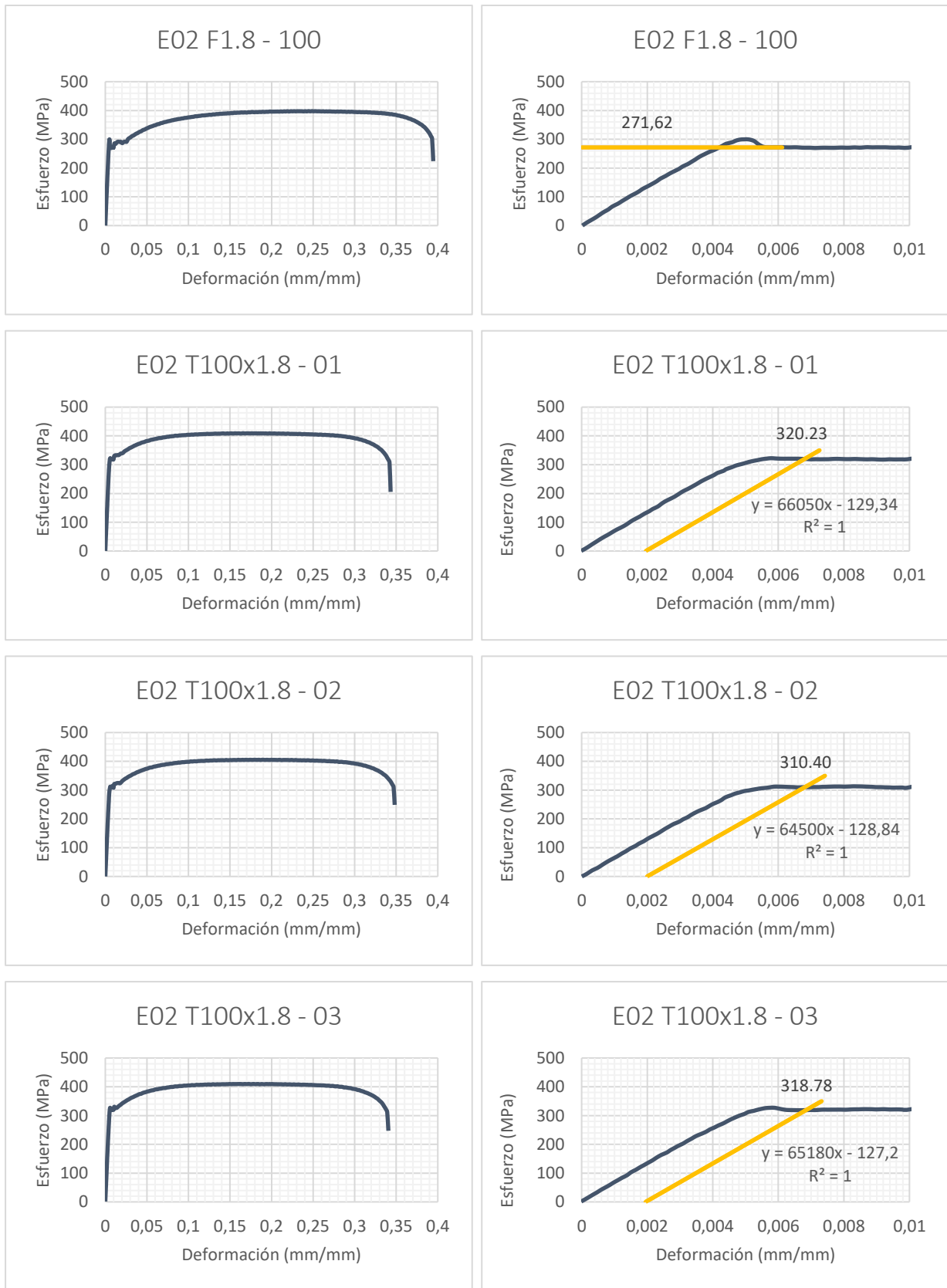
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 1.8 mm de espesor.



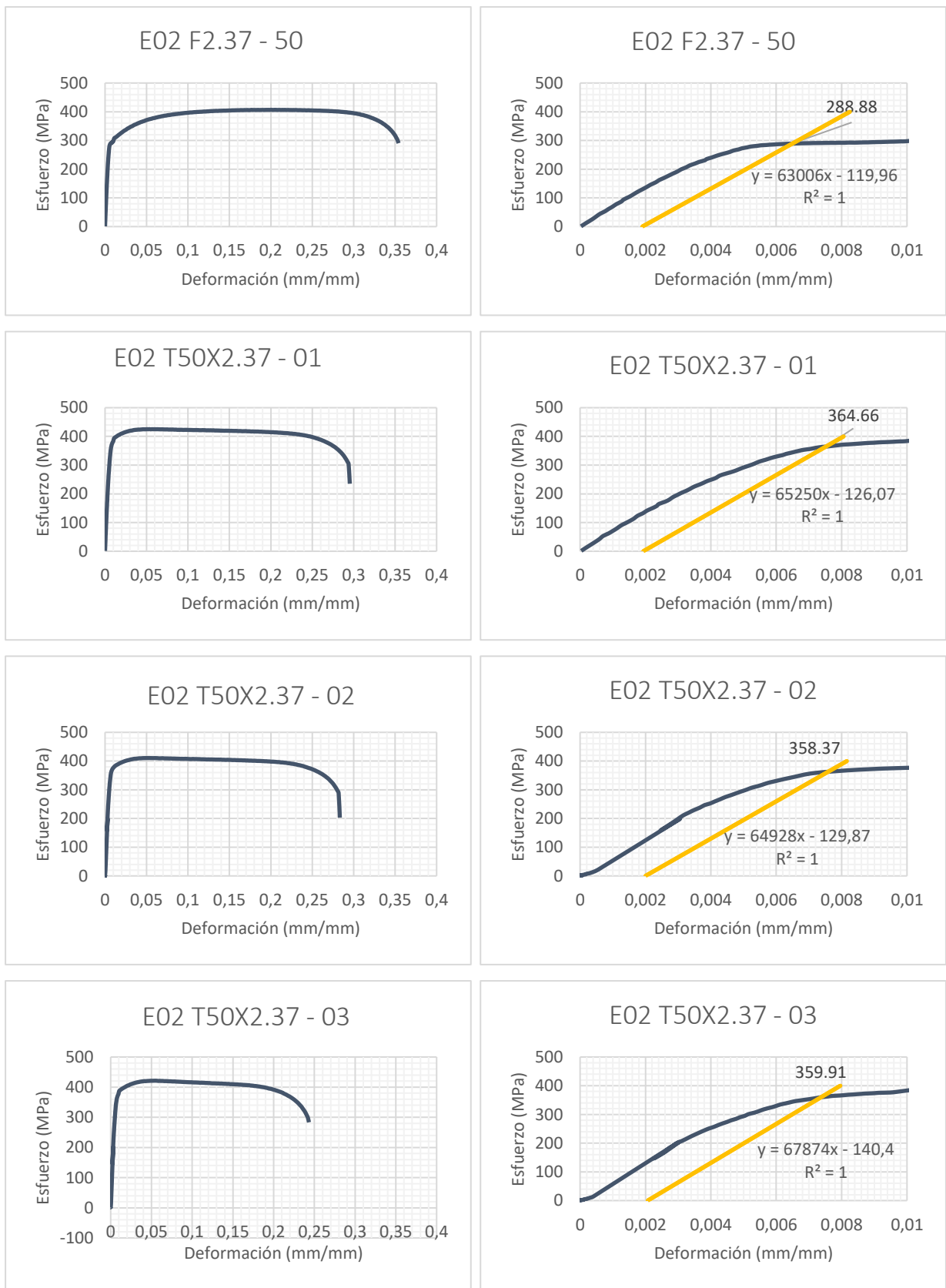
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 1.8 mm de espesor.



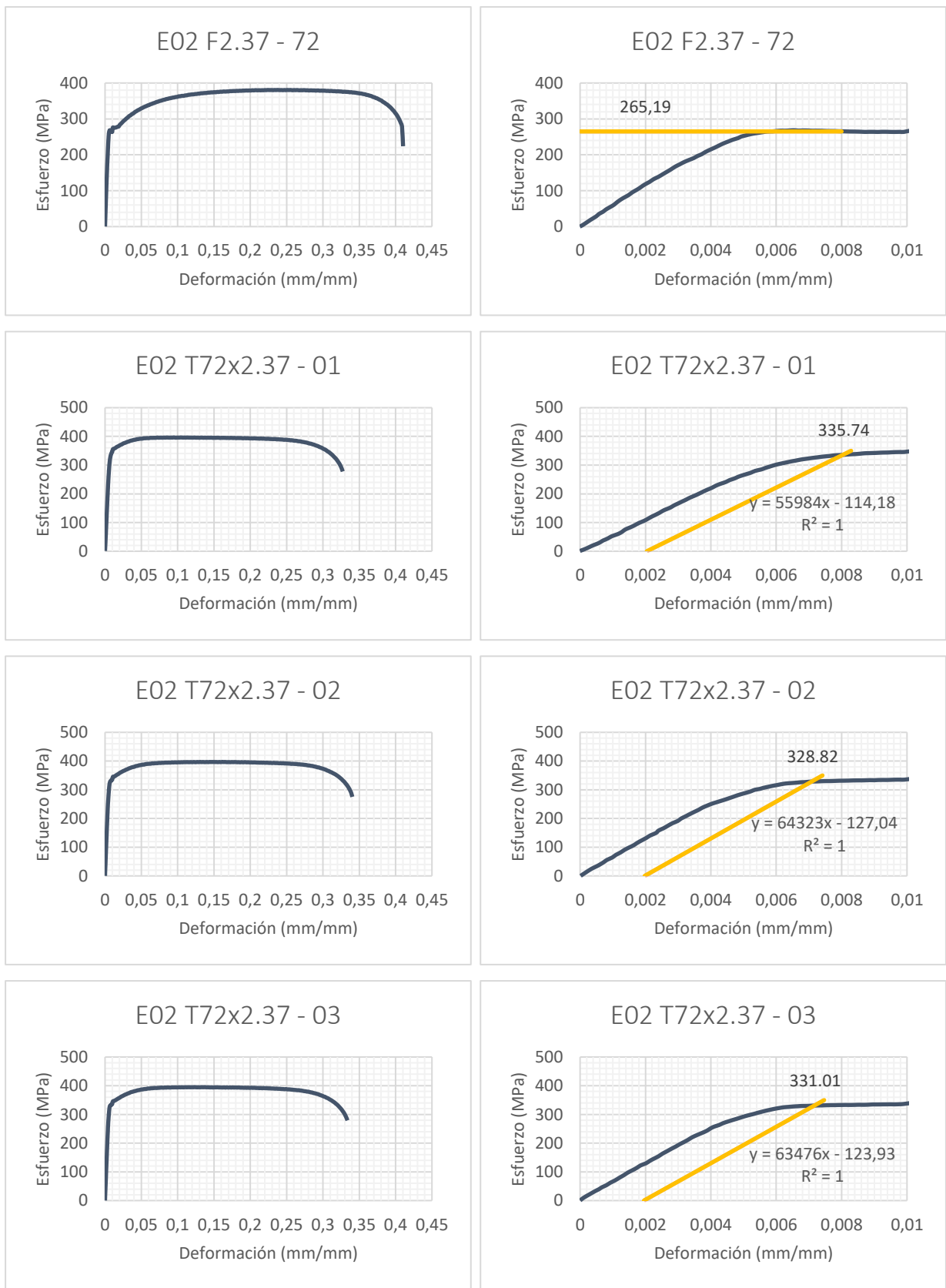
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 1.8 mm de espesor.



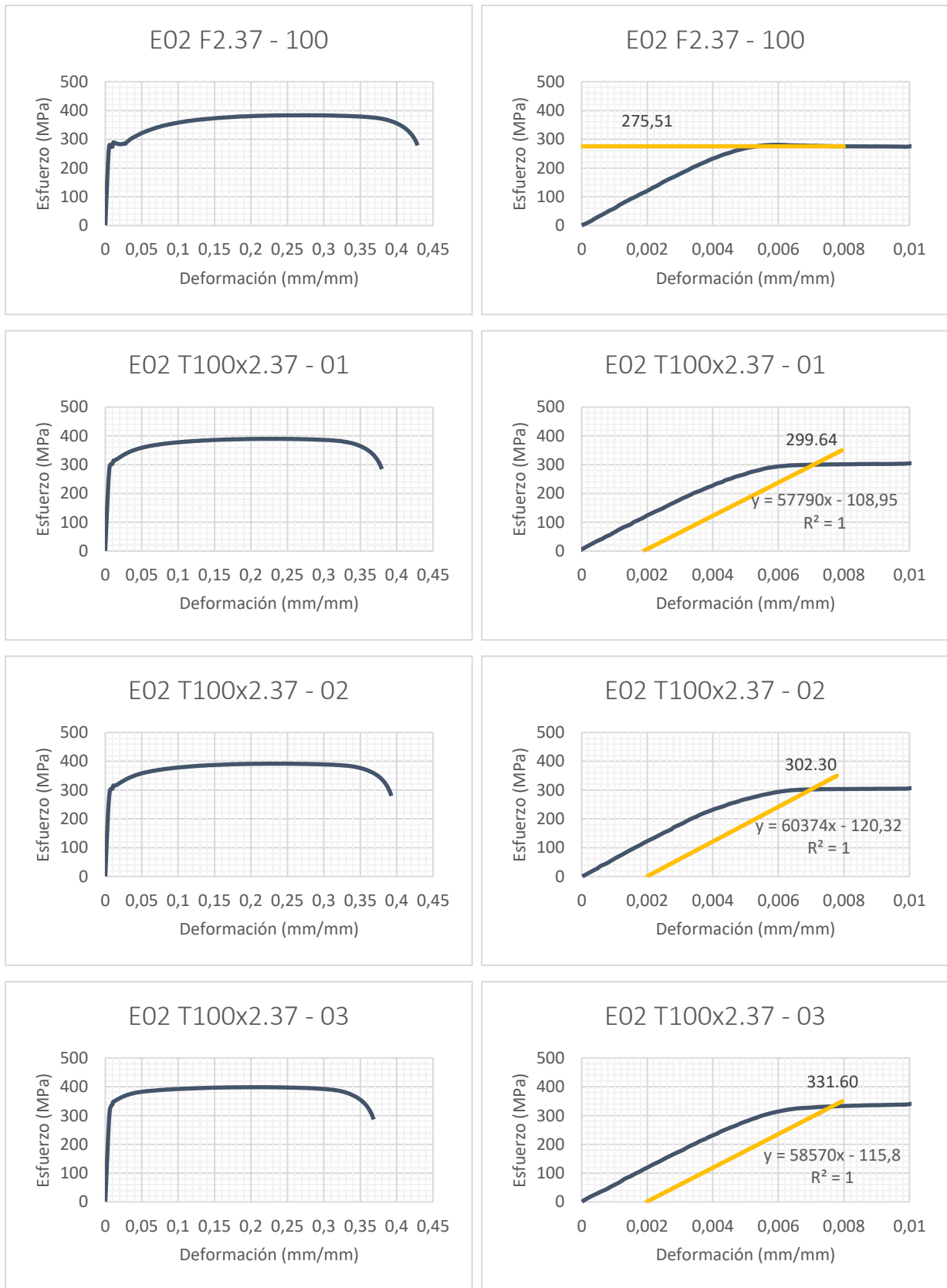
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 2.37 mm de espesor.



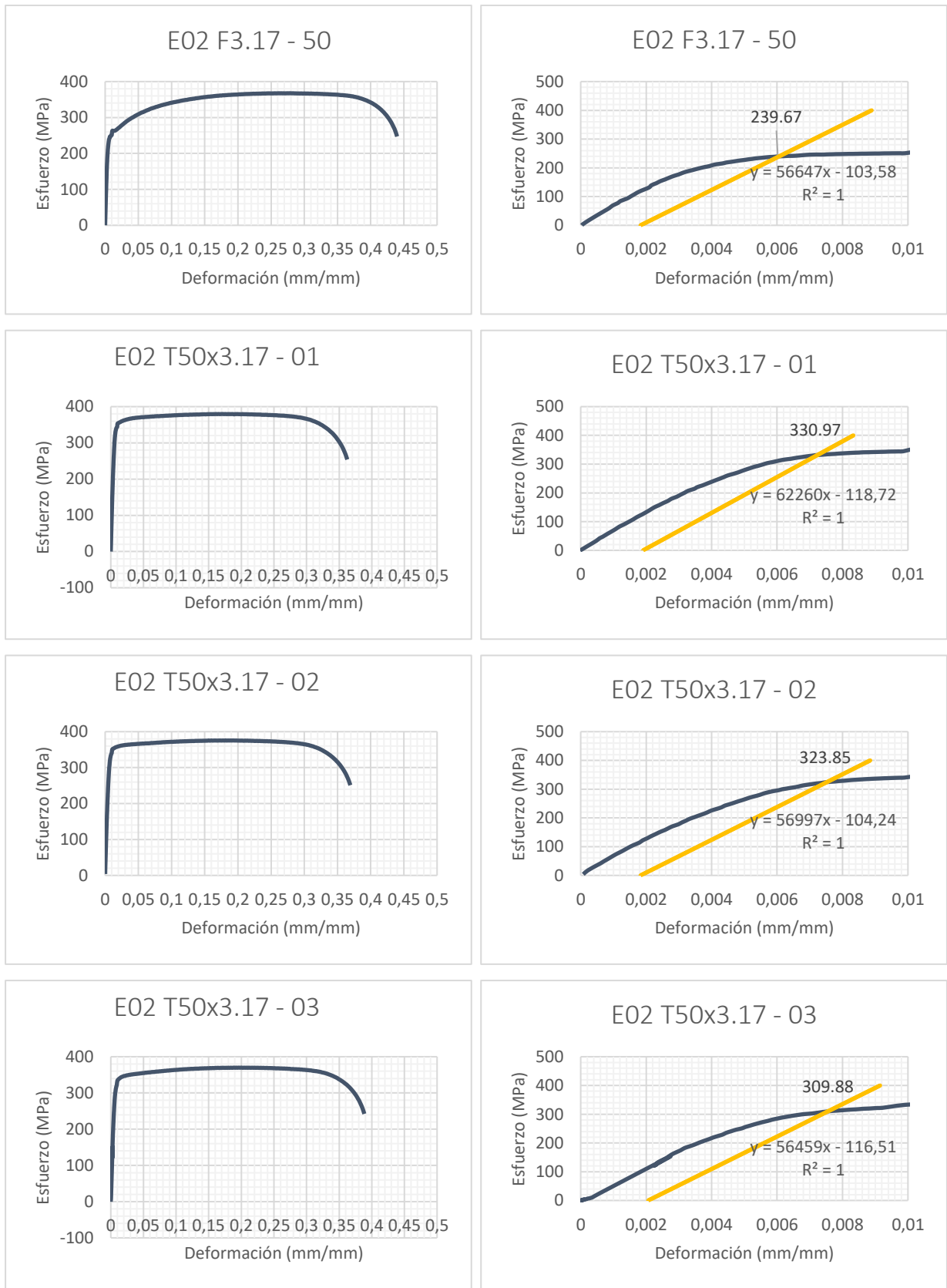
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 2.37 mm de espesor.



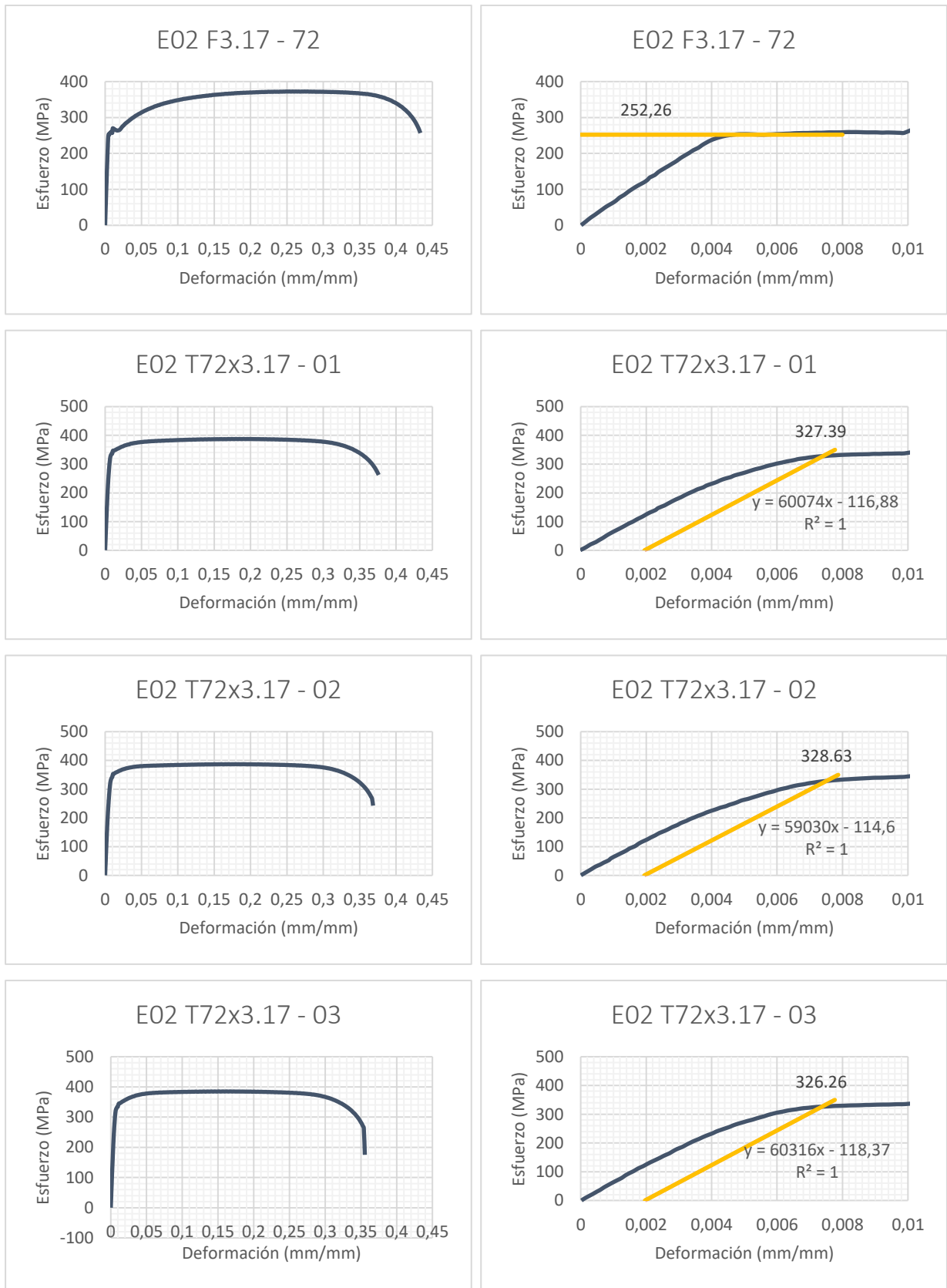
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 2.37 mm de espesor.



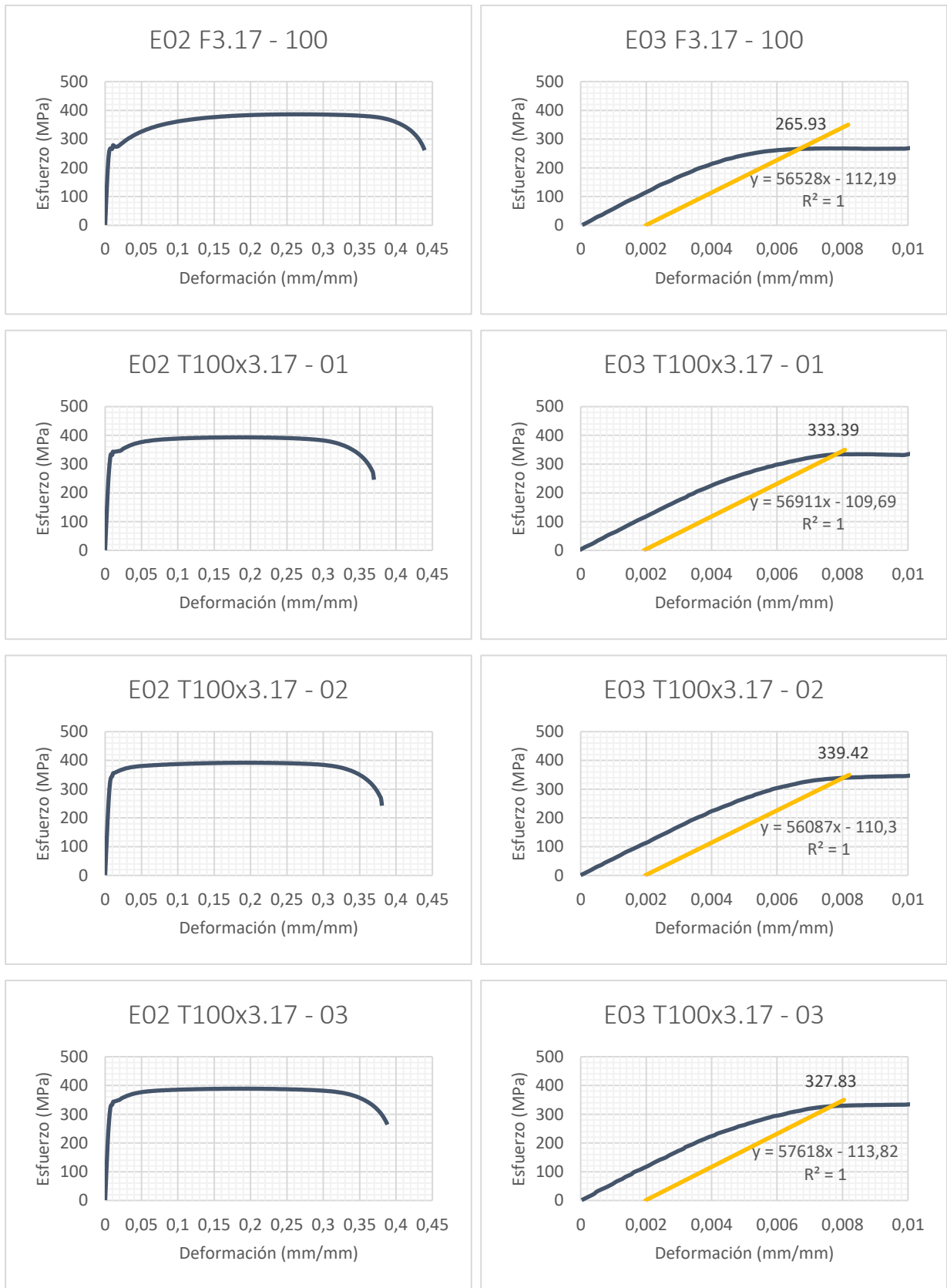
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 3.17 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 3.17 mm de espesor.



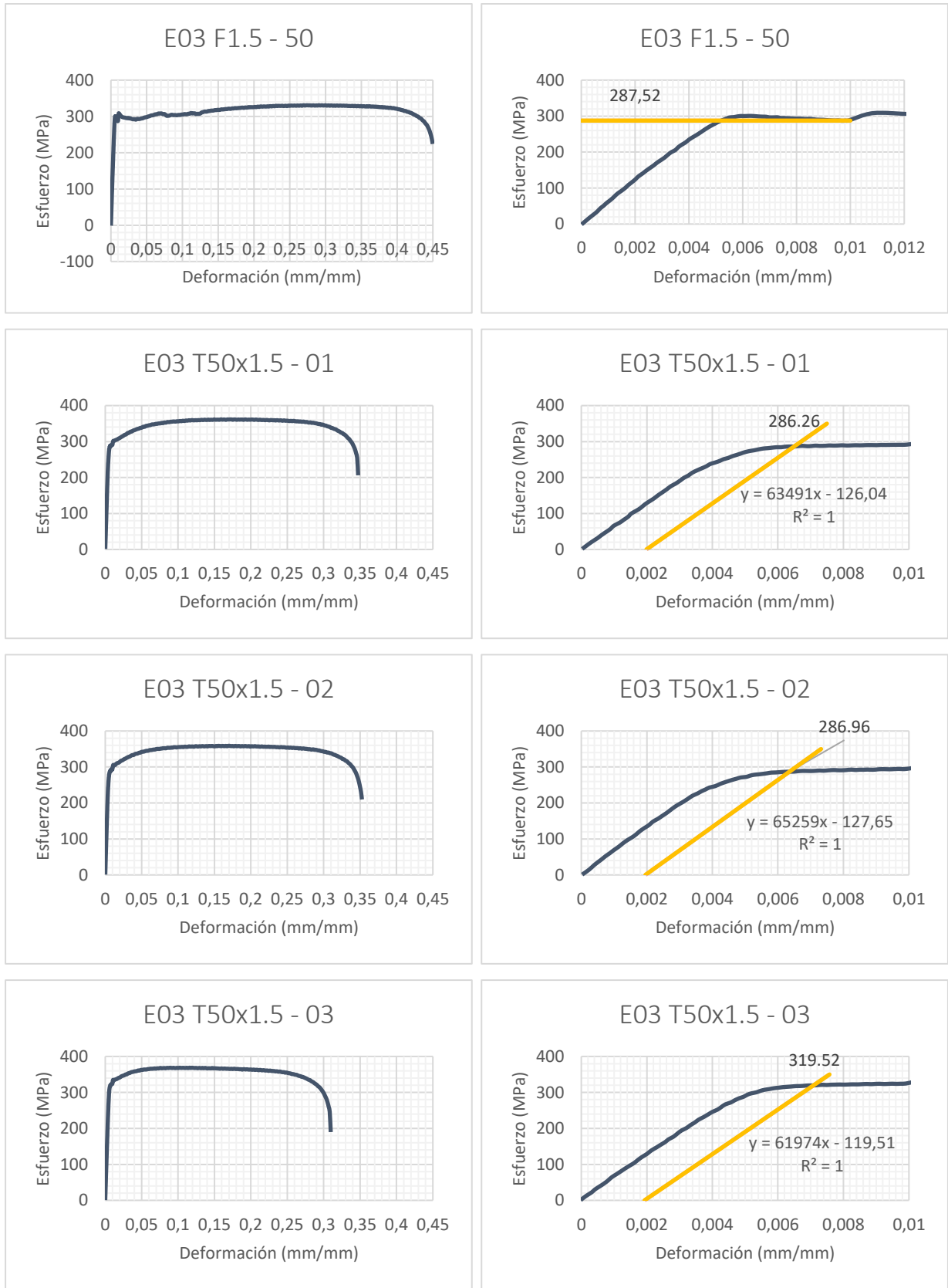
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 3.17 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 3.17 mm de espesor.



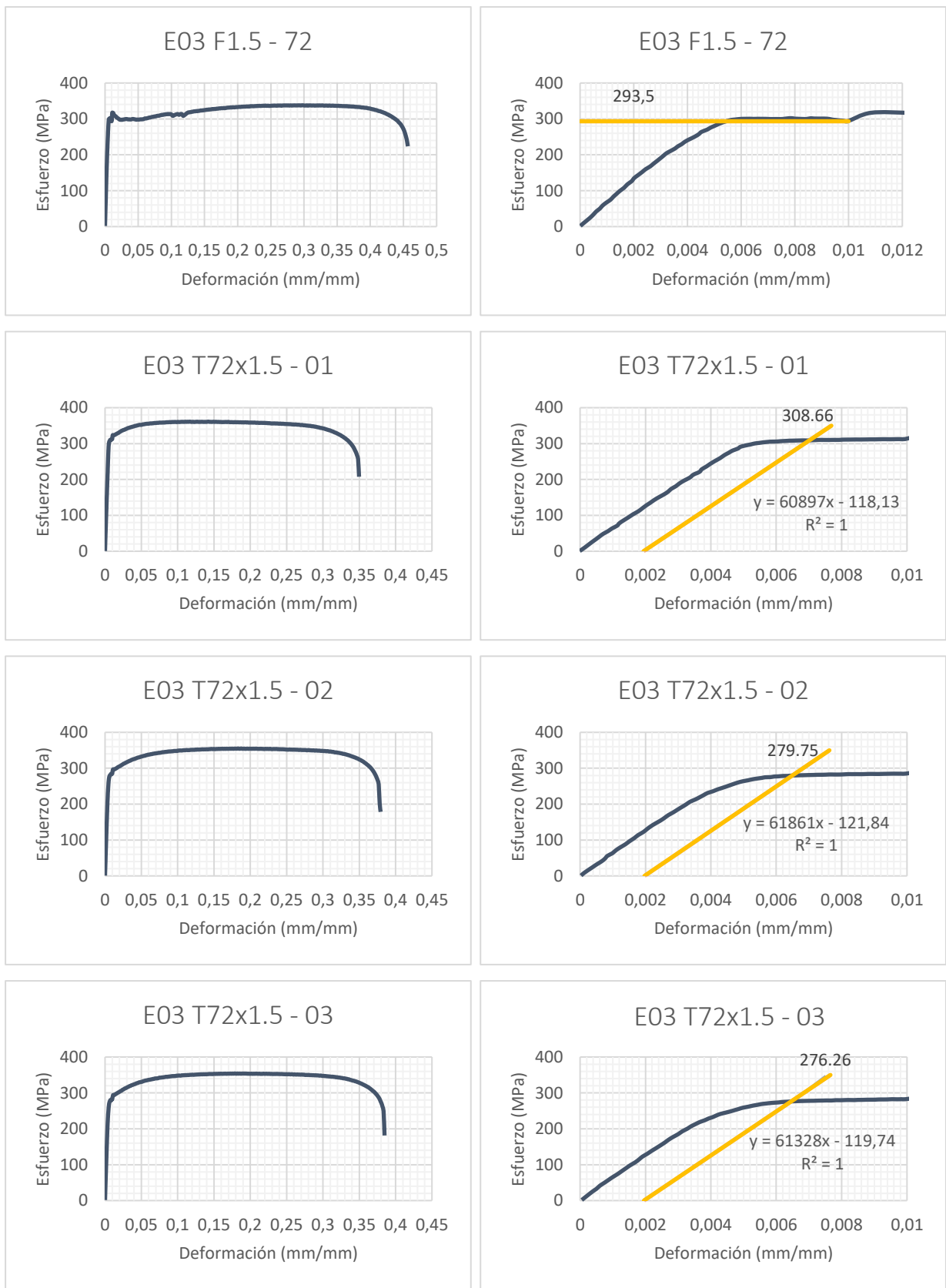
Probetas de Empresa 02. Sección de fleje de 3.17 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 3.17 mm de espesor.



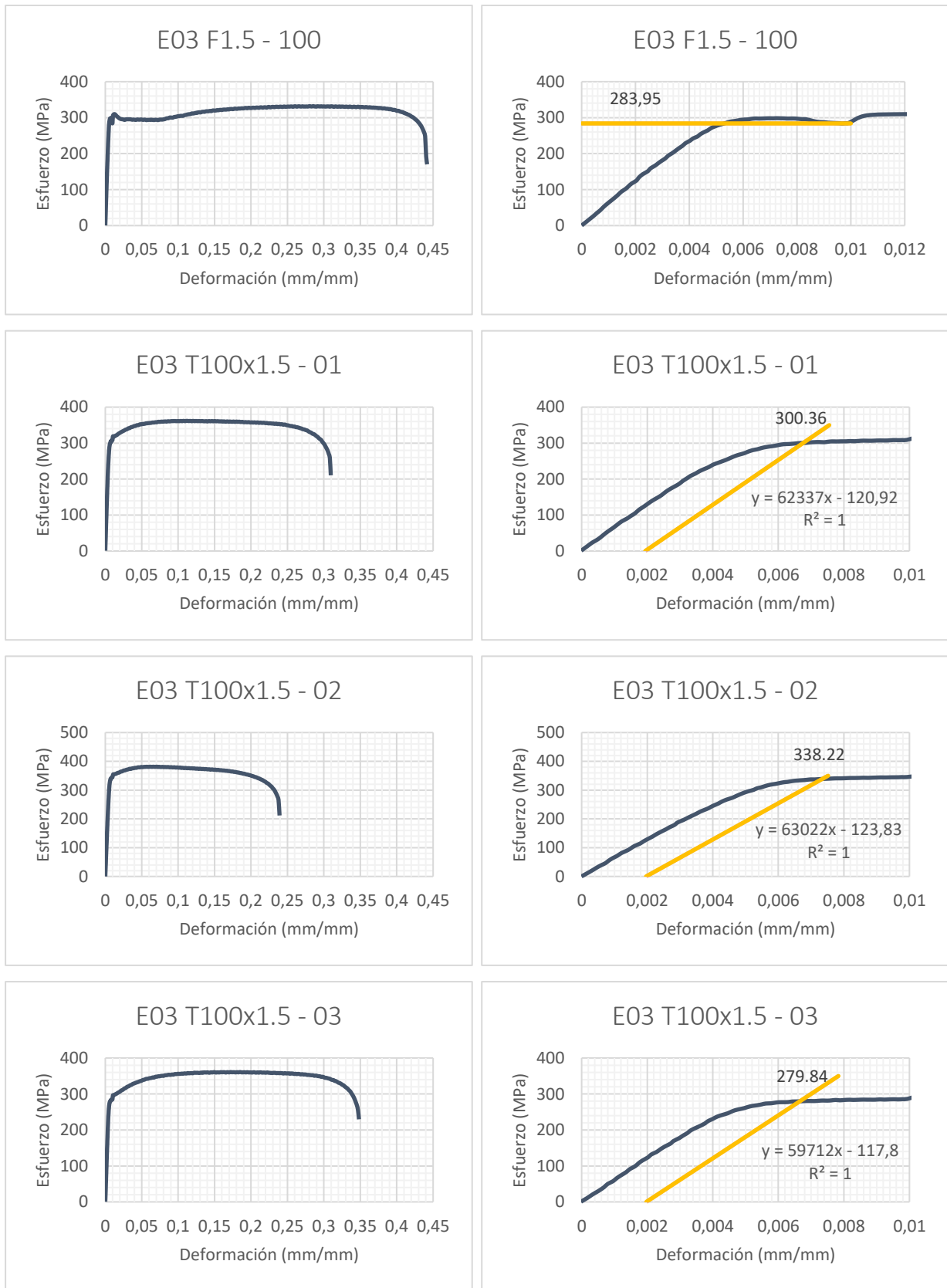
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 1.5 mm de espesor.



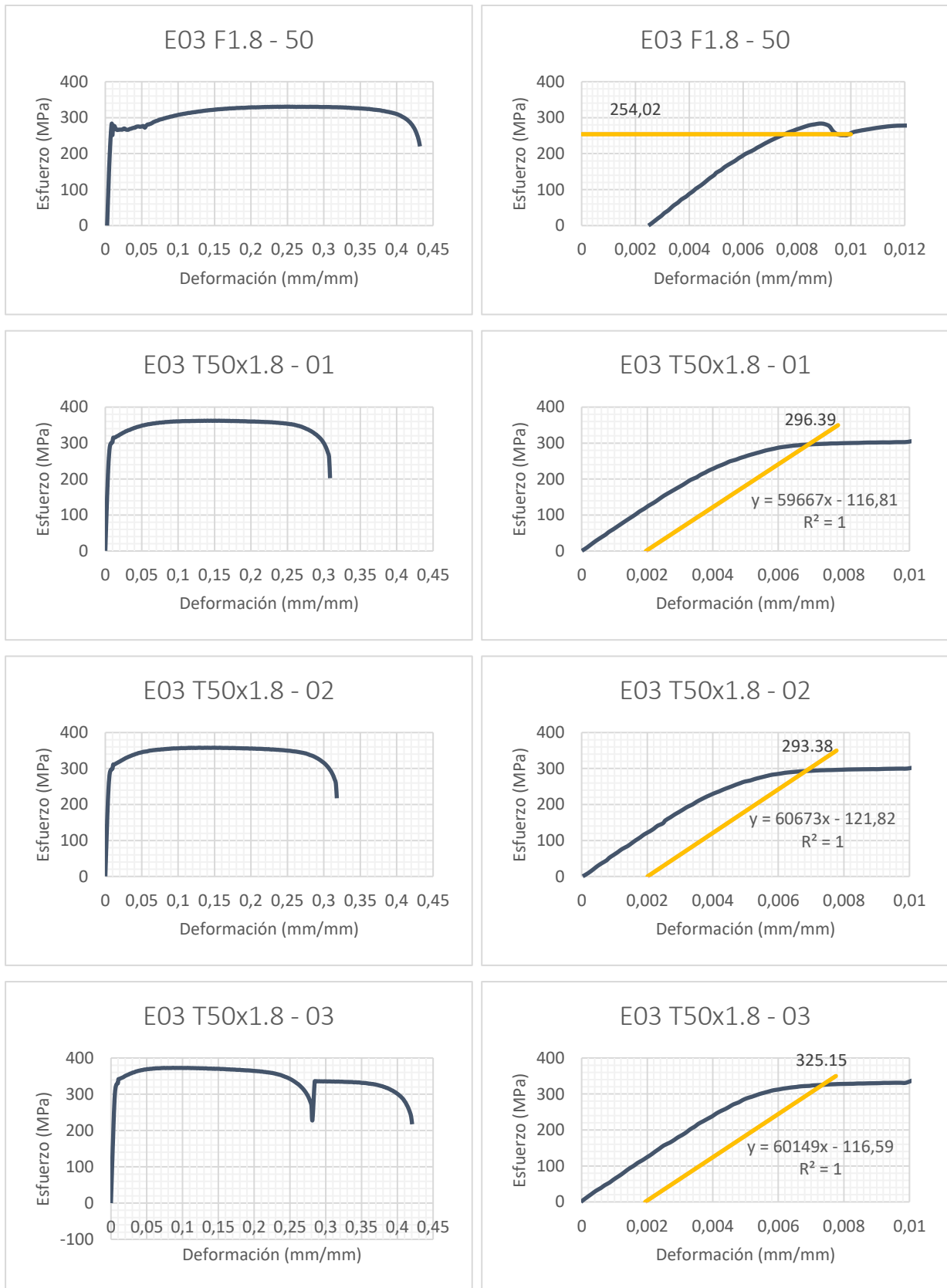
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 1.5 mm de espesor.



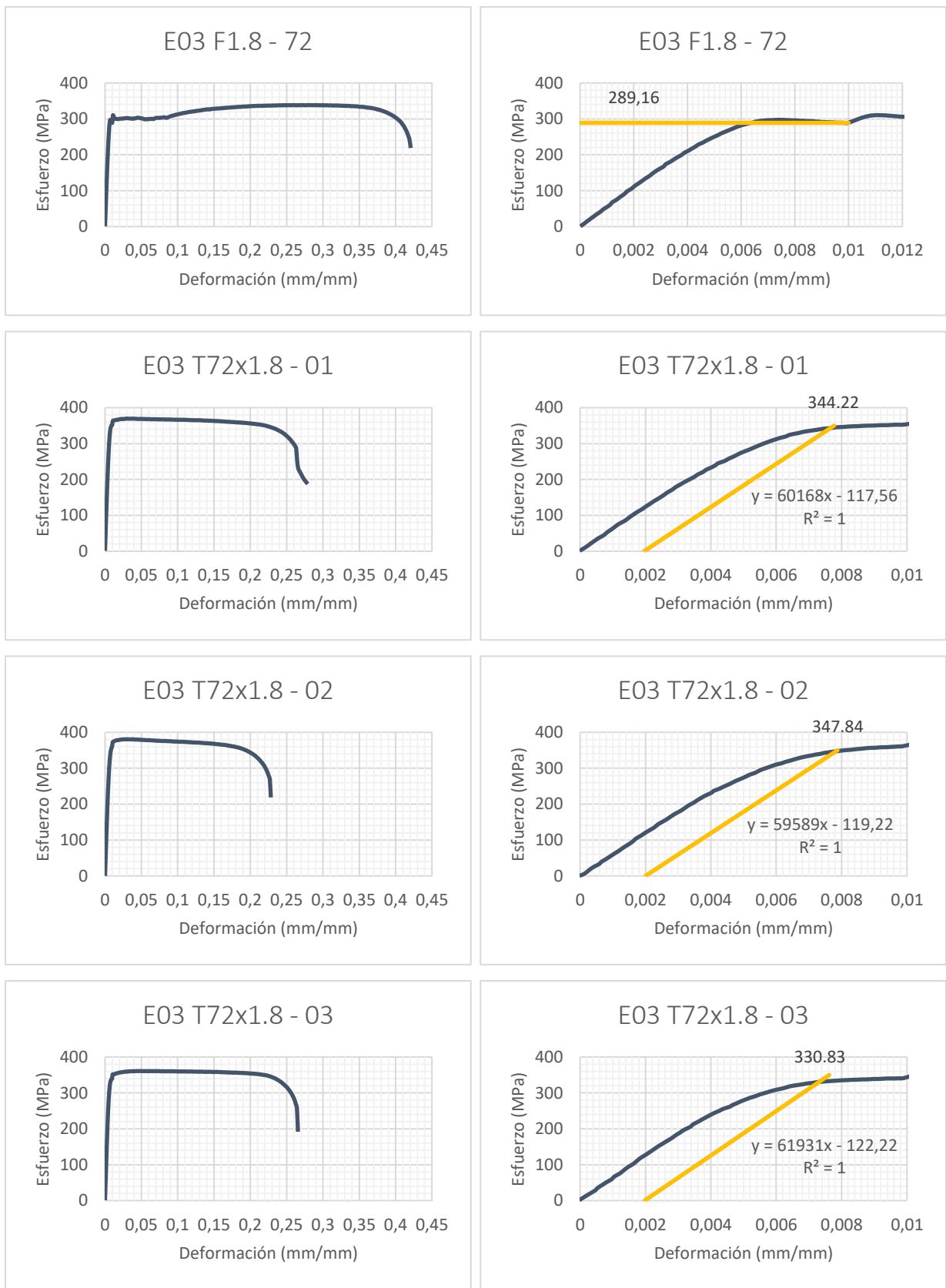
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 1.5 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 1.5 mm de espesor.



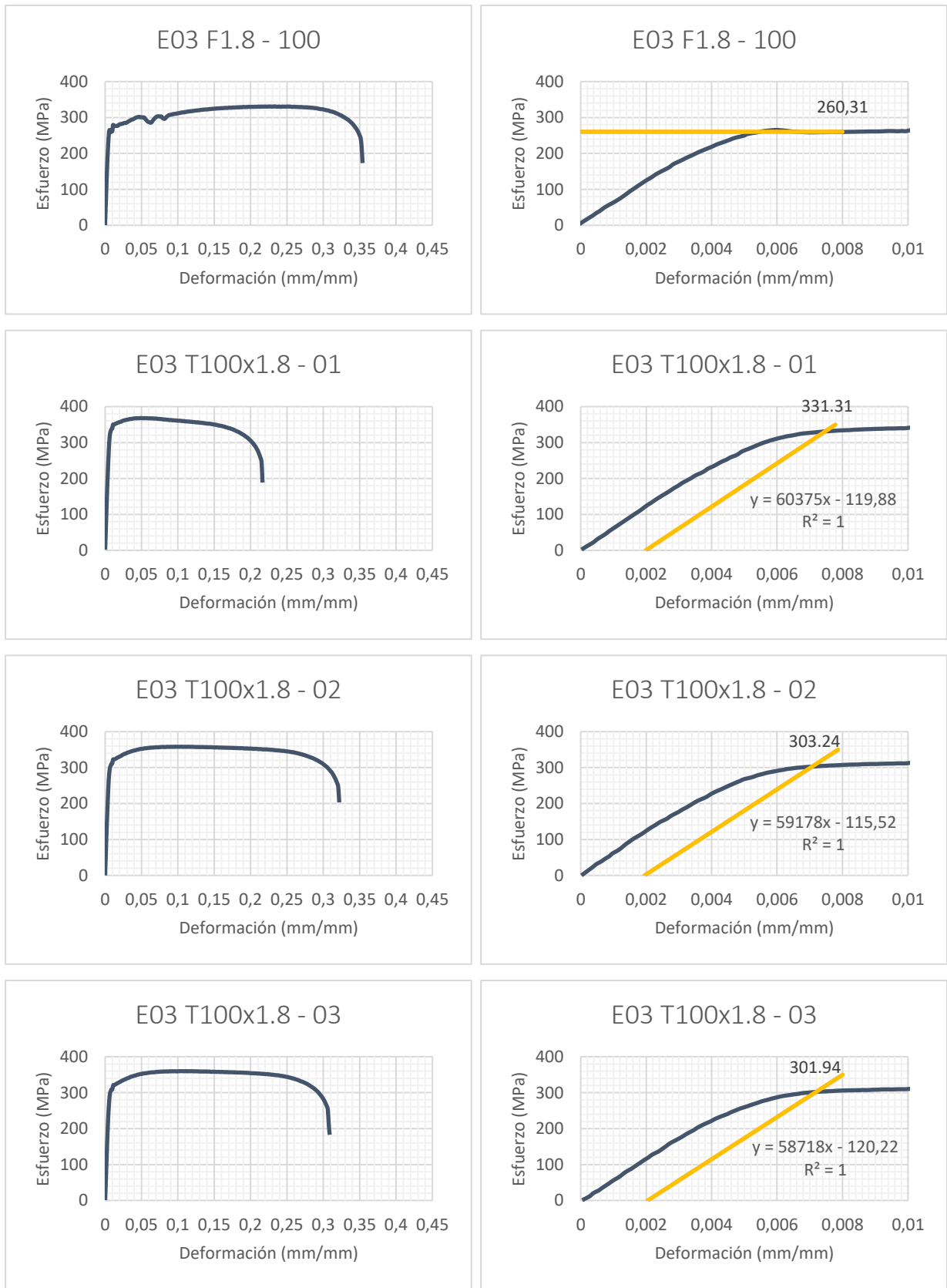
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 1.8 mm de espesor.



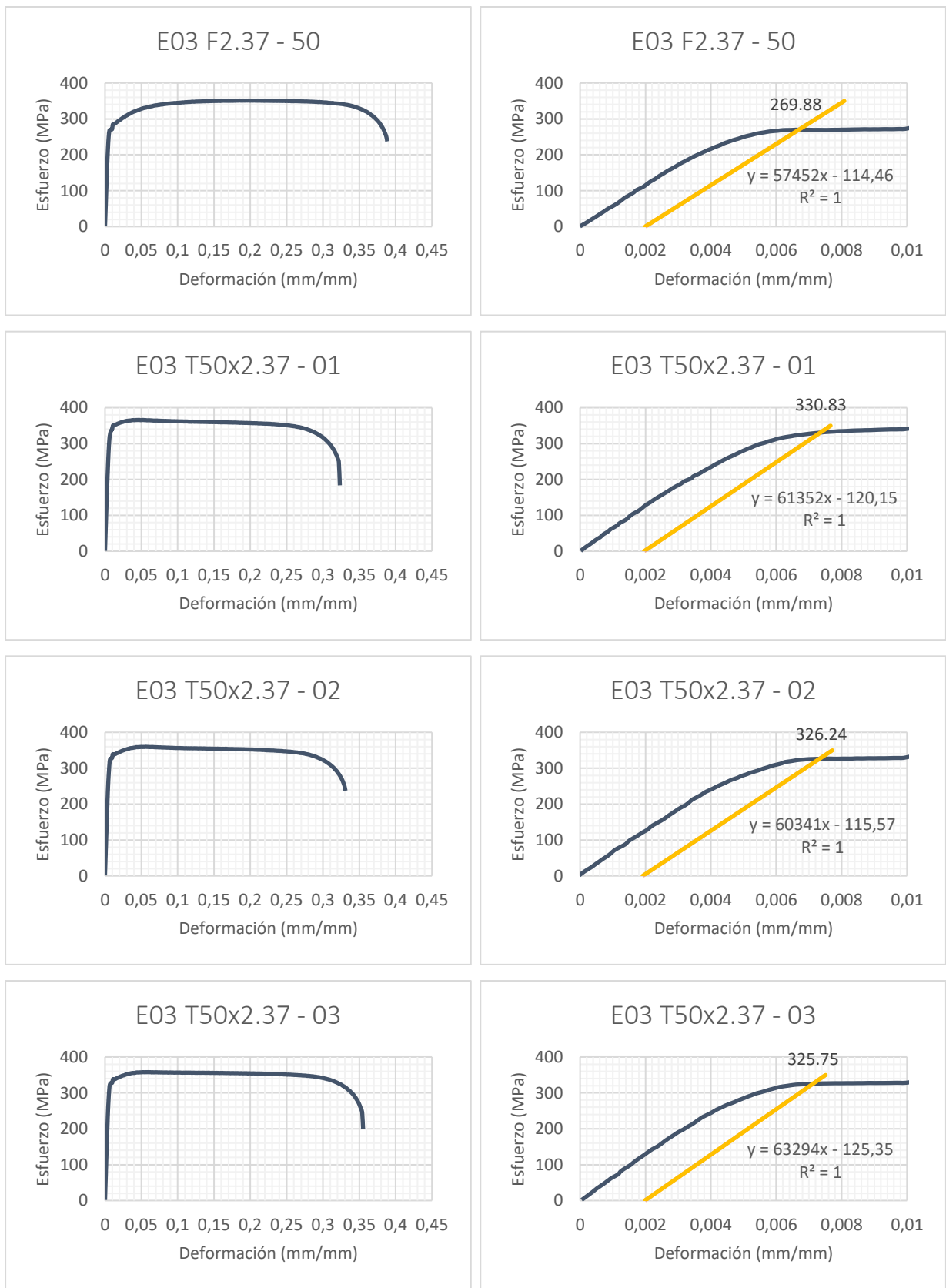
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 1.8 mm de espesor.



Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 1.8 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 1.8 mm de espesor.



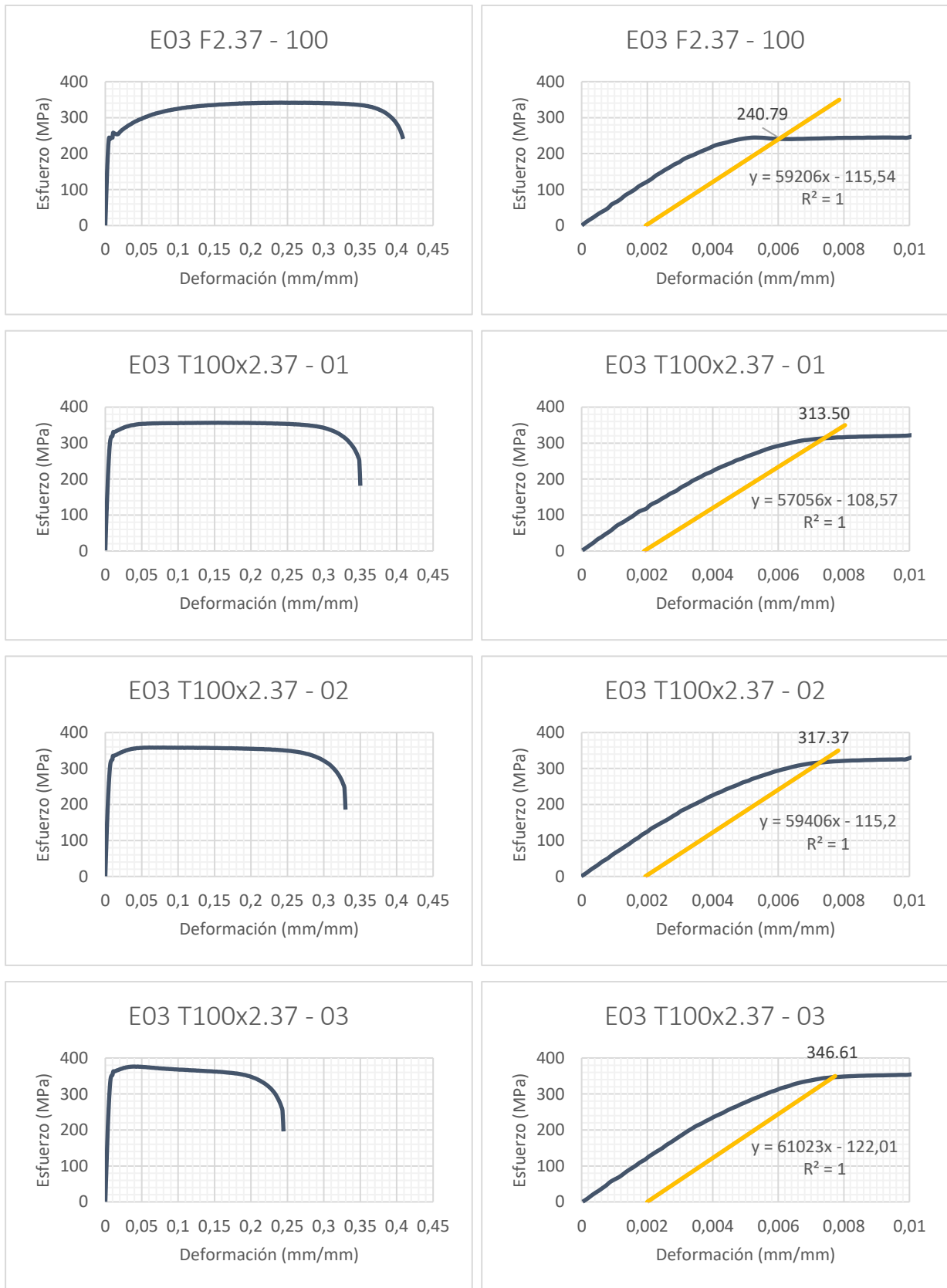
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 2.37 mm de espesor.



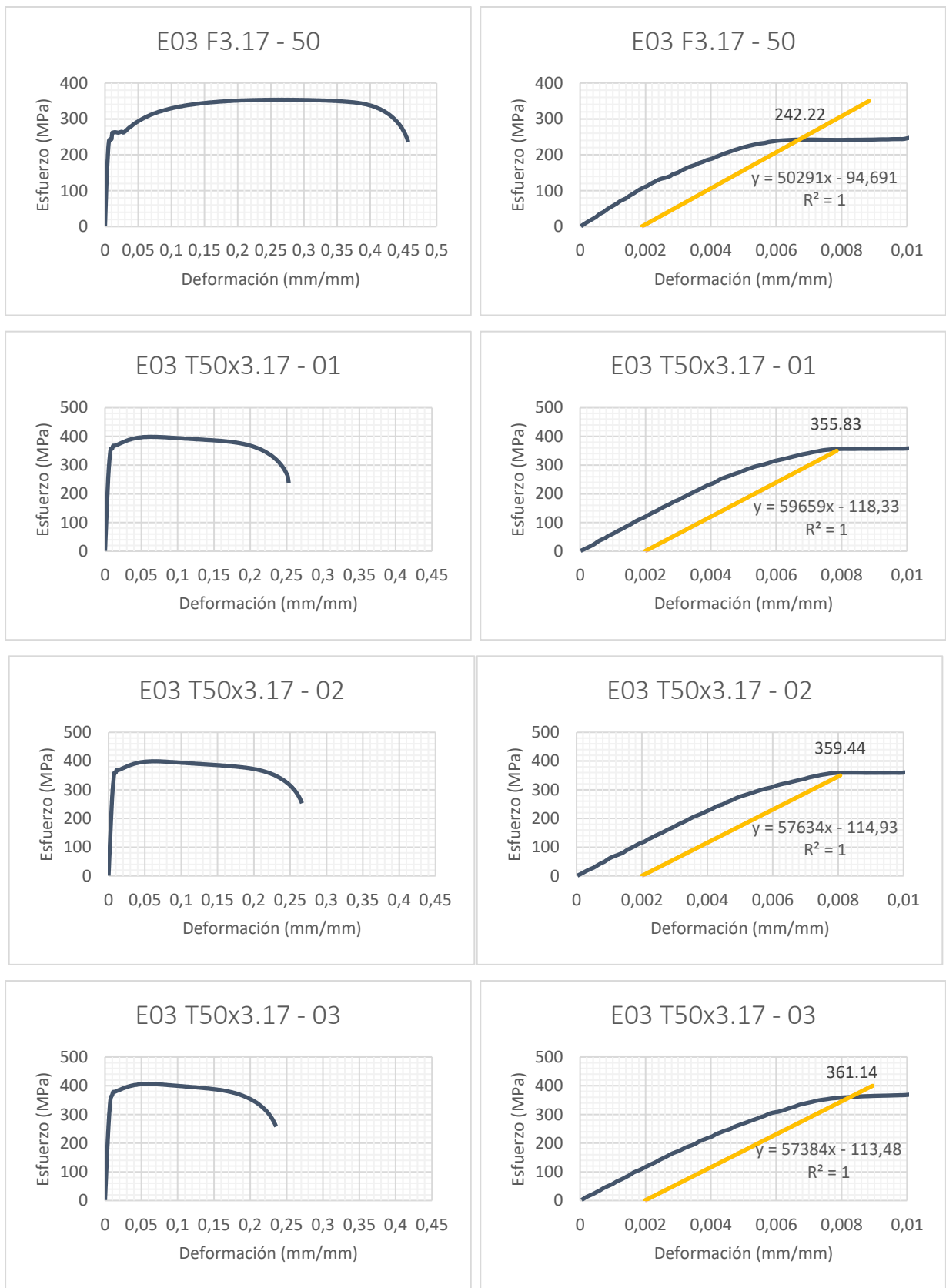
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 2.37 mm de espesor.



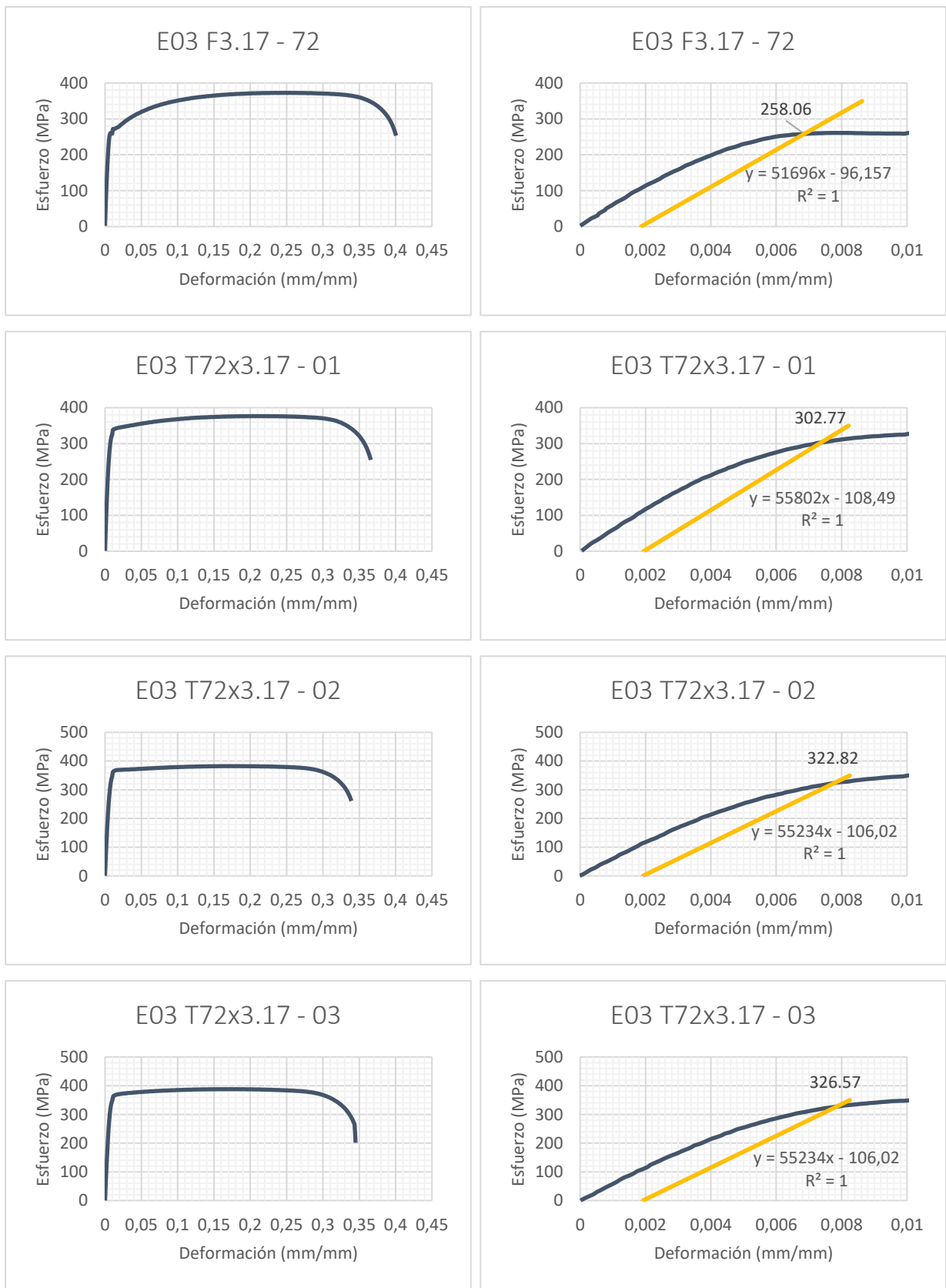
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 2.37 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 2.37 mm de espesor.



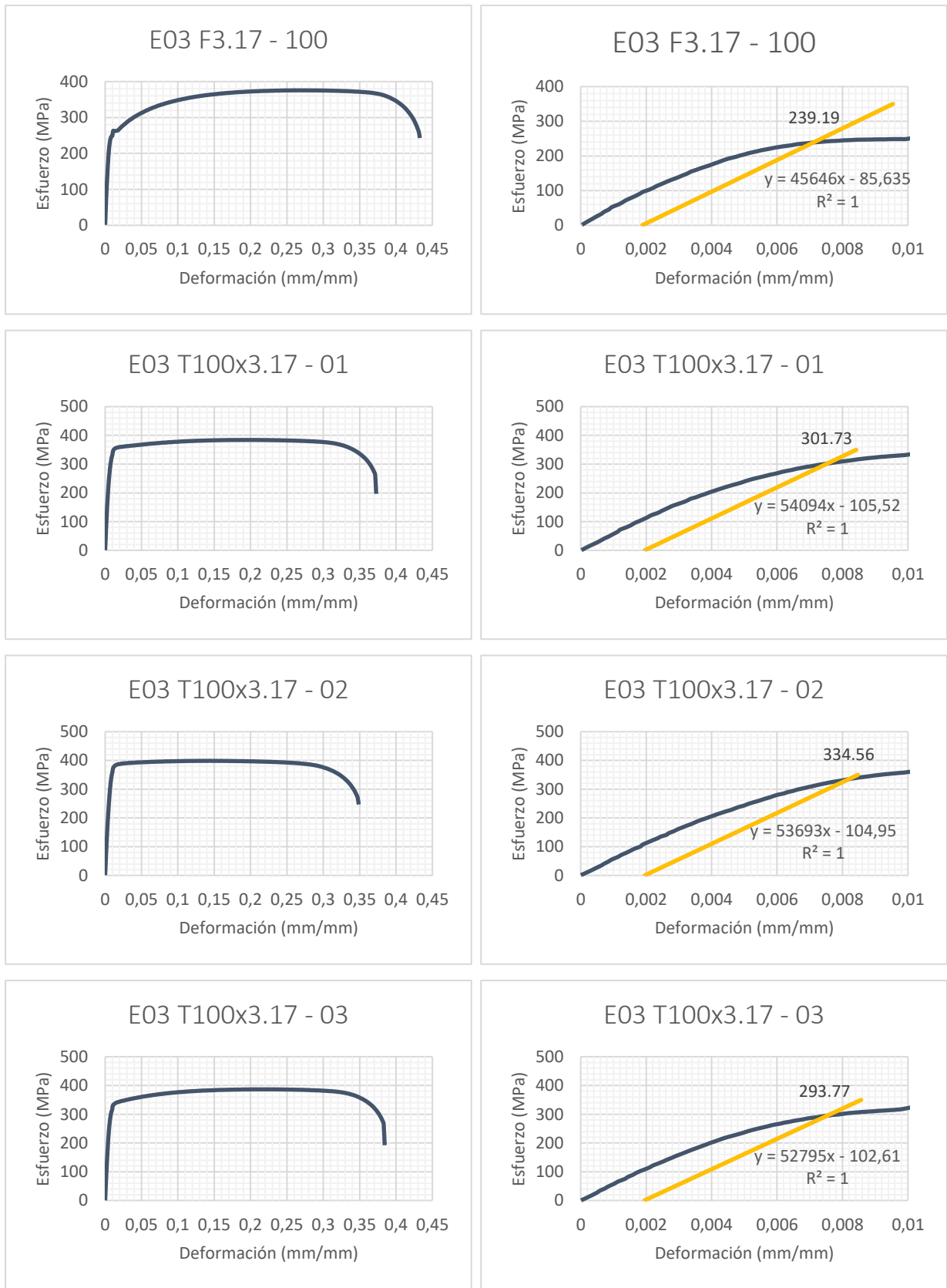
Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 3.17 mm de espesor y sección de tubo 50 mm x 50 mm de 3.17 mm de espesor.



Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 3.17 mm de espesor y sección de tubo 72 mm x 72 mm de 3.17 mm de espesor.



Probetas de Empresa 03. Sección de fleje de 3.17 mm de espesor y sección de tubo 100 mm x 100 mm de 3.17 mm de espesor.



Anexo 5. Resultados experimentales del esfuerzo de fluencia y esfuerzo último

Cuadro A5. Resultados de F_y , F_u obtenidos de las curvas esfuerzo-deformación, porcentaje de elongación y promedios de F_y y F_u .

Código de probeta	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Elongación	F_y (MPa)	F_u (MPa)	$F_u/F_y > 1,08$
E01 F1.5 - 50	50,07	66,81	33%	260,98	357,52	1,37
E01 T50x1.5 - 01	50,10	67,23	34%	306,91	370,38	1,21
E01 T50x1.5 - 02	49,92	66,86	34%	302,54	370,62	1,23
E01 T50x1.5 - 03	49,95	66,28	33%	308,61	374,47	1,21
E01 F1.5 - 72	50,08	67,73	35%	255,67	358,87	1,40
E01 T72x1.5 - 01	50,05	65,70	31%	301,69	379,42	1,26
E01 T72x1.5 - 02	50,08	66,79	33%	327,76	390,11	1,19
E01 T72x1.5 - 03	49,92	65,29	31%	288,36	370,70	1,29
E01 F1.5 - 100	49,91	69,76	40%	219,44	341,35	1,56
E01 T100x1.5 - 01	49,94	69,57	39%	247,63	345,28	1,39
E01 T100x1.5 - 02	50,09	69,56	39%	243,98	339,10	1,39
E01 T100x1.5 - 03	50,09	70,19	40%	258,39	338,07	1,31
E01 F1.8 - 50	50,07	67,98	36%	234,89	343,10	1,46
E01 T50x1.8 - 01	49,94	69,09	38%	288,93	358,58	1,24
E01 T50x1.8 - 02	50,10	67,37	34%	296,27	360,52	1,22
E01 T50x1.8 - 03	49,93	68,07	36%	303,32	371,29	1,22
E01 F1.8 - 72	50,06	66,33	33%	258,76	350,84	1,36
E01 T72x1.8 - 01	50,07	63,74	27%	316,43	364,18	1,15
E01 T72x1.8 - 02	49,94	66,01	32%	318,79	364,75	1,14
E01 T72x1.8 - 03	50,10	66,52	33%	309,36	358,68	1,16
E01 F1.8 - 100	49,95	66,42	33%	236,33	350,66	1,48
E01 T100x1.8 - 01	50,04	66,41	33%	287,55	358,02	1,25
E01 T100x1.8 - 02	50,03	66,81	34%	288,65	358,36	1,24
E01 T100x1.8 - 03	50,00	66,91	34%	298,99	360,85	1,21
E01 F2.37 - 50	50,02	70,83	42%	227,85	333,29	1,46
E01 T50x2.37 - 01	50,09	68,19	36%	294,90	346,41	1,17
E01 T50x2.37 - 02	50,10	68,24	36%	302,34	349,69	1,16
E01 T50x2.37 - 03	50,09	68,15	36%	298,62	349,98	1,17
E01 F2.37 - 72	50,07	67,16	34%	273,06	363,72	1,33
E01 T72x2.37 - 01	50,07	65,39	31%	340,95	380,83	1,12
E01 T72x2.37 - 02	50,09	63,15	26%	352,81	389,58	1,10
E01 T72x2.37 - 03	50,03	63,80	28%	350,43	389,80	1,11

Cuadro A5. Resultados de F_y , F_u obtenidos de las curvas esfuerzo-deformación, porcentaje de elongación y promedios de F_y y F_u . (Cont.)

Código de probeta	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Elongación	F_y (MPa)	F_u (MPa)	$F_u/F_y > 1,08$
E01 F2.37 - 100	50,09	69,50	39%	240,55	348,16	1,45
E01 T100x2.37 - 01	50,10	67,42	35%	306,44	356,15	1,16
E01 T100x2.37 - 02	49,95	67,19	35%	294,08	355,19	1,21
E01 T100x2.37 - 03	50,09	67,44	35%	294,88	352,73	1,20
E02 F1.5 - 50	49,94	67,17	35%	322,90	426,23	1,32
E02 T50x1.5 - 01	50,10	65,38	31%	337,69	428,61	1,27
E02 T50x1.5 - 02	49,92	65,32	31%	332,72	433,95	1,30
E02 T50x1.5 - 03	50,08	65,34	30%	348,82	434,56	1,25
E02 F1.5 - 72	49,95	66,08	32%	296,20	405,74	1,37
E02 T72x1.5 - 01	50,18	65,11	30%	337,73	414,91	1,23
E02 T72x1.5 - 02	50,04	65,28	30%	327,23	410,93	1,26
E02 T72x1.5 - 03	50,10	64,84	29%	339,87	411,57	1,21
E02 F1.5 - 100	50,03	67,43	35%	284,53	385,50	1,35
E02 T100x1.5 - 01	50,10	66,66	33%	317,15	399,32	1,26
E02 T100x1.5 - 02	50,10	67,52	35%	309,31	399,20	1,29
E02 T100x1.5 - 03	50,03	66,94	34%	318,66	400,45	1,26
E02 F1.8 - 50	50,03	67,51	35%	261,80	387,31	1,48
E02 T50x1.8 - 01	50,08	66,46	33%	334,43	401,40	1,20
E02 T50x1.8 - 02	50,02	66,23	32%	336,79	399,31	1,19
E02 T50x1.8 - 03	50,02	65,95	32%	343,71	428,84	1,25
E02 F1.8 - 72	50,10	67,28	34%	292,10	402,43	1,38
E02 T72x1.8 - 01	49,96	62,71	26%	359,13	426,49	1,19
E02 T72x1.8 - 02	50,04	61,07	22%	367,62	431,96	1,18
E02 T72x1.8 - 03	50,02	62,11	24%	367,29	428,84	1,17
E02 F1.8 - 100	49,95	67,39	35%	271,62	397,81	1,46
E02 T100x1.8 - 01	50,00	66,35	33%	320,23	409,32	1,28
E02 T100x1.8 - 02	50,04	66,20	32%	310,40	405,60	1,31
E02 T100x1.8 - 03	49,99	65,61	31%	318,78	409,83	1,29
E02 F2.37 - 50	50,00	65,59	31%	288,88	406,78	1,41
E02 T50x2.37 - 01	50,01	64,05	28%	364,66	425,28	1,17
E02 T50x2.37 - 02	50,07	63,61	27%	358,37	410,61	1,15
E02 T50x2.37 - 03	49,92	61,58	23%	359,91	421,43	1,17
E02 F2.37 - 72	49,97	67,60	35%	265,19	380,72	1,44
E02 T72x2.37 - 01	50,00	65,52	31%	335,74	396,39	1,18
E02 T72x2.37 - 02	50,03	65,67	31%	328,82	397,05	1,21
E02 T72x2.37 - 03	50,00	65,43	31%	331,01	395,04	1,19

Cuadro A5. Resultados de F_y , F_u obtenidos de las curvas esfuerzo-deformación, porcentaje de elongación y promedios de F_y y F_u . (Cont.)

Código de probeta	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Elongación	F_y (MPa)	F_u (MPa)	$F_u/F_y > 1,08$
E02 F2.37 - 100	50,00	67,45	35%	275,51	383,39	1,39
E02 T100x2.37 - 01	50,00	66,13	32%	299,64	389,86	1,30
E02 T100x2.37 - 02	50,00	66,76	34%	302,30	391,97	1,30
E02 T100x2.37 - 03	50,00	65,62	31%	331,60	398,68	1,20
E02 F3.17 - 50	50,09	68,81	37%	239,67	367,64	1,53
E02 T50x3.17 - 01	50,05	66,79	33%	330,97	379,65	1,15
E02 T50x3.17- 02	50,06	67,29	34%	323,85	375,74	1,16
E02 T50x3.17- 03	49,99	67,46	35%	309,88	369,89	1,19
E02 F3.17 - 72	50,01	69,17	38%	252,26	372,47	1,48
E02 T72x3.17 - 01	50,02	67,53	35%	327,39	387,53	1,18
E02 T72x3.17- 02	50,01	67,04	34%	328,64	387,02	1,18
E02 T72x3.17 - 03	50,02	67,11	34%	326,26	385,19	1,18
E02 F3.17 - 100	50,00	67,96	36%	265,92	386,28	1,45
E02 T100x3.17 - 01	49,99	65,83	32%	333,39	393,31	1,18
E02 T100x3.7 - 02	49,99	66,53	33%	339,42	392,05	1,16
E02 T100x3.7 - 03	50,07	67,49	35%	327,82	388,94	1,19
E03 F1.5 - 50	50,03	69,39	39%	287,52	330,83	1,15
E03 T50x1.5 - 01	50,00	65,99	32%	286,26	361,72	1,26
E03 T50x1.5 - 02	50,00	66,02	32%	286,96	358,92	1,25
E03 T50x1.5 - 03	50,00	64,98	30%	319,52	368,84	1,15
E03 F1.5 - 72	50,00	69,62	39%	293,50	337,95	1,15
E03 T72x1.5 - 01	50,00	65,55	31%	308,66	361,06	1,17
E03 T72x1.5 - 02	50,00	66,68	33%	279,75	355,06	1,27
E03 T72x1.5 - 03	50,00	66,96	34%	276,26	354,16	1,28
E03 F1.5 - 100	50,00	69,09	38%	283,95	332,03	1,17
E03 T100x1.5 - 01	50,00	65,49	31%	300,36	361,74	1,20
E03 T100x1.5 - 02	50,00	62,06	24%	338,22	381,38	1,13
E03 T100x1.5 - 03	50,00	66,47	33%	279,84	361,01	1,29
E03 F1.8 - 50	50,00	68,26	37%	254,02	330,59	1,30
E03 T50x1.8 - 01	50,02	63,77	27%	296,39	362,32	1,22
E03 T50x1.8 - 02	50,01	64,29	29%	293,38	357,99	1,22
E03 T50x1.8 - 03	50,00	62,87	26%	325,15	372,84	1,15
E03 F1.8 -72	50,00	67,82	36%	289,16	338,60	1,17
E03 T72x1.8 - 01	50,01	62,76	25%	344,22	369,66	1,07
E03 T72x1.8 - 02	50,02	60,82	22%	347,84	380,84	1,09
E03 T72x1.8 - 03	50,00	61,77	24%	330,83	361,08	1,09
E03 F1.8 - 100	50,01	65,01	30%	260,31	330,98	1,27
E03 T100x1.8 - 01	50,01	59,99	20%	331,31	368,16	1,11
E03 T100x1.8 - 02	50,00	64,53	29%	303,24	368,28	1,21
E03 T100x1.8 - 03	50,00	64,21	28%	301,94	360,00	1,19

Cuadro A5. Resultados de F_y , F_u obtenidos de las curvas esfuerzo-deformación, porcentaje de elongación y promedios de F_y y F_u . (Cont.)

Código de probeta	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Elongación	F_y (MPa)	F_u (MPa)	$F_u/F_y > 1,08$
E03 F2.37 - 50	50,00	66,82	34%	269,88	351,25	1,30
E03 T72x2.37 - 01	50,01	64,79	30%	330,83	366,00	1,11
E03 T72x2.37 - 02	50,01	65,28	31%	326,24	359,82	1,10
E03 T72x2.37 - 03	50,01	66,27	33%	325,75	359,88	1,10
E03 F2.37 - 72	50,02	66,82	34%	247,77	342,71	1,38
E03 T72x2.37 - 01	50,00	67,60	35%	311,01	346,73	1,11
E03 T72x2.37 - 02	50,04	66,78	33%	322,89	352,29	1,09
E03 T72x2.37 - 03	50,05	67,94	36%	307,28	344,08	1,12
E03 F2.37 - 100	49,95	66,57	33%	240,79	341,75	1,42
E03 T100x2.37 - 01	50,00	65,17	30%	313,50	356,69	1,14
E03 T100x2.37 - 02	49,96	64,65	29%	317,38	358,40	1,13
E03 T100x2.37 - 03	50,02	61,16	22%	346,61	379,22	1,09
E03 F3.17 - 50	50,08	69,16	38%	242,22	353,67	1,46
E03 T50x3.17 - 01	50,00	61,93	24%	355,83	398,57	1,12
E03 T50x3.17 - 02	49,96	61,99	24%	359,44	399,24	1,11
E03 T50x3.17 - 03	49,98	60,57	21%	361,14	406,27	1,12
E03 F3.17 - 72	50,00	66,34	33%	258,06	372,78	1,44
E03 T72x3.17 - 01	50,01	65,46	31%	302,77	376,64	1,24
E03 T72x3.17 - 02	50,01	64,07	28%	322,82	382,54	1,18
E03 T72x3.17 - 03	50,01	64,77	30%	326,57	388,04	1,19
E03 F3.17 - 100	50,01	67,13	34%	239,19	375,76	1,57
E03 T100x3.17 - 01	50,01	65,71	31%	301,73	384,18	1,27
E03 T100x3.17 - 02	50,01	65,19	30%	334,56	398,74	1,19
E03 T100x3.17 - 03	50,01	66,31	33%	293,77	386,67	1,32

Anexo 6. Factor de relación FR

Cuadro A6. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} y las distintas variables que influyen en el FR.

Probeta	F_{ys} (MPa)	F_{us} (MPa)	F_{us}/F_{ys}	$F_{us}-F_{ys}$ (MPa)	Probeta	r (mm)	L (mm)	t (mm)	r/t	L/t	$F_{ys}^2/(F_{us} \cdot t)$	F_{yt} (MPa)	FR
E01 F1.5-50	260,98	357,52	1,37	96,54	E01 T50x1.5 - 01	2,31	51,00	1,53	1,51	0,03	124,24	306,91	1,18
					E01 T50x1.5 - 02							302,54	1,16
					E01 T50x1.5 - 03							308,61	1,18
E01 F1.5-72	255,67	358,87	1,40	103,20	E01 T72x1.5 - 01	2,00	72,63	1,46	1,37	0,02	124,40	301,69	1,18
					E01 T72x1.5 - 02							327,76	1,28
					E01 T72x1.5 - 03							288,36	1,13
E01 F1.5-100	219,44	341,35	1,56	121,91	E01 T100x1.5 - 01	1,31	99,13	1,47	0,89	0,01	96,03	247,63	1,13
					E01 T100x1.5 - 02							243,98	1,11
					E01 T100x1.5 - 03							258,39	1,18
E01 F1.8-50	234,89	343,10	1,46	108,21	E01 T50x1.8 - 01	2,69	50,88	1,77	1,52	0,03	90,76	288,93	1,23
					E01 T50x1.8 - 02							296,27	1,26
					E01 T50x1.8 - 03							303,32	1,29
E01 F1.8-72	258,76	350,84	1,36	92,08	E01 T72x1.8 - 01	2,63	72,75	1,76	1,49	0,02	108,40	316,43	1,22
					E01 T72x1.8 - 02							318,79	1,23
					E01 T72x1.8 - 03							309,36	1,20
E01 F1.8-100	236,33	350,66	1,48	114,33	E01 T100x1.8 - 01	1,38	99,63	1,78	0,77	0,02	89,27	287,55	1,22
					E01 T100x1.8 - 02							288,65	1,22
					E01 T100x1.8 - 03							298,99	1,27
E01 F2.37-50	227,85	333,29	1,46	105,44	E01 T50x2.37 - 01	3,13	50,88	2,20	1,42	0,04	70,70	294,90	1,29
					E01 T50x2.37 - 02							302,34	1,33
					E01 T50x2.37 - 03							298,62	1,31
E01 F2.37-72	273,06	363,72	1,33	90,66	E01 T72x2.37 - 01	3,13	73,00	2,29	1,37	0,03	89,69	340,95	1,25
					E01 T72x2.37 - 02							352,81	1,29
					E01 T72x2.37 - 03							350,43	1,28

Cuadro A6. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} y las distintas variables que influyen en el FR. (Cont.)

Probeta	F_{ys} (MPa)	F_{us} (MPa)	F_{us}/F_{ys}	$F_{us}-F_{ys}$ (MPa)	Probeta	r (mm)	L (mm)	t (mm)	r/t	L/t	$F_{ys}^2/(F_{us} \cdot t)$	F_{yt} (MPa)	FR
E01 F2.37-100	240,55	348,16	1,45	107,61	E01 T100x2.37- 01	2,06	99,38	2,29	0,90	0,02	72,69	306,44	1,27
					E01 T100x2.37 - 02							294,08	1,22
					E01 T100x2.37 - 03							294,88	1,23
E02 F1.5-50	322,90	426,23	1,32	103,33	E02 T50x1.5 - 01	2,13	50,75	1,50	1,41	0,03	162,70	337,69	1,05
					E02 T50x1.5 - 02							332,72	1,03
					E02 T50x1.5 - 03							348,82	1,08
E02 F1.5-72	296,20	405,74	1,37	109,54	E02 T72x1.5 - 01	2,81	72,50	1,50	1,87	0,02	144,04	337,73	1,14
					E02 T72x1.5 - 02							327,23	1,10
					E02 T72x1.5 - 03							339,87	1,15
E02 F1.5-100	284,53	385,50	1,35	100,97	E02 T100x1.5 - 01	3,25	99,88	1,50	2,17	0,01	140,46	317,15	1,11
					E02 T100x1.5 - 02							309,31	1,09
					E02 T100x1.5 - 03							318,66	1,12
E02 F1.8-50	261,80	387,31	1,48	125,51	E02 T50x1.8 - 01	2,50	51,13	1,85	1,35	0,04	95,75	334,43	1,28
					E02 T50x1.8 - 02							336,79	1,29
					E02 T50x1.8 - 03							343,71	1,31
E02 F1.8-72	292,10	402,43	1,38	110,33	E02 T72x1.8 - 01	2,94	72,63	1,81	1,62	0,02	117,22	359,13	1,23
					E02 T72x1.8 - 02							367,62	1,26
					E02 T72x1.8 - 03							367,29	1,26
E02 F1.8-100	271,62	397,81	1,46	126,19	E02 T100x1.8 - 01	2,94	99,88	1,82	1,62	0,02	102,13	320,23	1,18
					E02 T100x1.8 - 02							310,40	1,14
					E02 T100x1.8 - 03							318,78	1,17
E02 F2.37-50	288,88	406,78	1,41	117,90	E02 T50x2.37 - 01	2,56	51,50	2,39	1,07	0,05	85,90	364,66	1,26
					E02 T50x2.37- 02							358,37	1,24
					E02 T50x2.37 - 03							359,91	1,25

Cuadro A6. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} y las distintas variables que influyen en el FR. (Cont.)

Probeta	F_{ys} (MPa)	F_{us} (MPa)	F_{us}/F_{ys}	$F_{us}-F_{ys}$ (MPa)	Probeta	r (mm)	L (mm)	t (mm)	r/t	L/t	$F_{ys}^2/(F_{us} \cdot t)$	F_{yt} (MPa)	FR
E02 F2.37-72	265,19	380,72	1,44	115,53	E02 T72x2.37 - 01	2,31	72,25	2,43	0,95	0,03	75,99	335,74	1,27
					E02 T72x2.37- 02							328,82	1,24
					E02 T72x2.37 - 03							331,01	1,25
E02 F2.37-100	275,51	383,39	1,39	107,88	E02 T100x2.37 - 01	3,88	100,17	2,46	1,58	0,02	80,56	299,64	1,09
					E02 T100x2.37- 02							302,30	1,10
					E02 T100x2.37 - 03							331,60	1,20
E02 F3.17-50	239,67	367,64	1,53	127,97	E02 T50x3.17 - 01	1,81	51,00	3,24	0,56	0,06	48,21	330,97	1,38
					E02 T50x3.17- 02							323,85	1,35
					E02 T50x3.17- 03							309,88	1,29
E02 F3.17-72	252,26	372,47	1,48	120,21	E02 T72x3.17 - 01	2,31	72,63	3,26	0,71	0,04	52,37	327,39	1,30
					E02 T72x3.17- 02							328,64	1,30
					E02 T72x3.17- 03							326,26	1,29
E02 F3.17-100	265,92	386,28	1,45	120,36	E02 T100x3.17 - 01	3,50	100,50	3,24	1,08	0,03	56,57	333,39	1,25
					E02 T100x3.17- 02							339,42	1,28
					E02 T100x3.17- 03							327,82	1,23
E03 F1.5 - 50	287,52	330,83	1,15	43,31	E03 T50x1.5 - 01	1,81	50,50	1,50	1,21	0,03	166,72	286,26	1,00
					E03 T50x1.5 - 02							286,96	1,00
					E03 T50x1.5 - 03							319,52	1,11
E03 F1.5 - 72	293,50	337,95	1,15	44,45	E03 T72x1.5 - 01	1,19	72,50	1,49	0,80	0,02	170,67	308,66	1,05
					E03 T72x1.5 - 02							279,75	0,95
					E03 T72x1.5 - 03							276,26	0,94
E03 F1.5 - 100	283,95	332,03	1,17	48,08	E03 T100x1.5 - 01	1,31	100,25	1,52	0,86	0,02	159,51	300,36	1,06
					E03 T100x1.5 - 02							338,22	1,19
					E03 T100x1.5 - 03							279,84	0,99

Cuadro A6. Factor de relación FR entre el esfuerzo de fluencia del tubo F_{yt} y el esfuerzo de fluencia del fleje F_{yf} y las distintas variables que influyen en el FR. (Cont.)

Probeta	F_{ys} (MPa)	F_{us} (MPa)	F_{us}/F_{ys}	$F_{us}-F_{ys}$ (MPa)	Probeta	r (mm)	L (mm)	t (mm)	r/t	L/t	$F_{ys}^2/(F_{us} \cdot t)$	F_{yt} (MPa)	FR
E03 F1.8 - 50	254,02	330,59	1,30	76,57	E03 T50x1.8 - 01	1,81	50,13	1,78	1,02	0,04	109,59	296,39	1,17
					E03 T50x1.8 - 02							293,38	1,15
					E03 T50x1.8 - 03							325,15	1,28
E03 F1.8 - 72	289,16	338,60	1,17	49,44	E03 T72x1.8 - 01	1,75	70,25	1,84	0,95	0,03	133,94	344,22	1,19
					E03 T72x1.8 - 02							347,84	1,20
					E03 T72x1.8 - 03							330,83	1,14
E03 F1.8 - 100	260,31	330,98	1,27	70,67	E03 T100x1.8 - 01	2,56	99,88	1,81	1,41	0,02	112,84	331,31	1,27
					E03 T100x1.8 - 02							303,24	1,16
					E03 T100x1.8 - 03							301,94	1,16
E03 F2.37 - 50	269,88	351,25	1,30	81,37	E03 T50x2.37 - 01	2,06	50,63	2,31	0,89	0,05	89,96	330,83	1,23
					E03 T50x2.37 - 02							326,24	1,21
					E03 T50x2.37 - 03							325,75	1,21
E03 F2.37 - 72	247,77	342,71	1,38	94,94	E03 T72x2.37 - 01	1,13	72,75	2,36	0,48	0,03	75,89	311,01	1,26
					E03 T72x2.37 - 02							322,89	1,30
					E03 T72x2.37 - 03							307,28	1,24
E03 F2.37 - 100	240,79	341,75	1,42	100,96	E03 T100x2.37 - 01	1,31	100,63	2,38	0,55	0,02	71,39	313,50	1,30
					E03 T100x2.37 - 02							317,38	1,32
					E03 T100x2.37 - 03							346,61	1,44
E03 F3.17 - 50	242,22	353,67	1,46	111,45	E03 T50x3.17 - 01	2,25	50,88	3,06	0,74	0,06	54,22	355,83	1,47
					E03 T50x3.17 - 02							359,44	1,48
					E03 T50x3.17 - 03							361,14	1,49
E03 F3.17 - 72	258,06	372,78	1,44	114,72	E03 T72x3.17 - 01	1,50	73,00	2,92	0,51	0,04	61,12	302,77	1,17
					E03 T72x3.17 - 02							322,82	1,25
					E03 T72x3.17 - 03							326,57	1,27
E03 F3.17 - 100	239,19	375,76	1,57	136,57	E03 T100x3.17 - 01	2,63	101,13	2,99	0,88	0,03	50,96	301,73	1,26
					E03 T100x3.17 - 02							334,56	1,40
					E03 T100x3.17 - 03							293,77	1,23

Anexo 7. Análisis de valores atípicos

Para determinar los valores atípicos se utilizó el método de los cuartiles. Se calculó el primer y tercer cuartil. Para obtener el límite superior se le suma al tercer cuartil el rango entre los cuartiles mencionados multiplicado por un factor de 1,5. Por su parte, el límite inferior se obtiene de restarle al primer cuartil el rango entre los cuartiles, multiplicado por un factor de 1,5.

Todos los valores que se encuentre por encima del límite superior y por debajo del límite inferior se consideran como valores atípicos.

Es importante mencionar que se realizó el análisis dos veces. La primera se encontraron cinco valores atípicos. La segunda ocasión, se realizó nuevamente el proceso sin los datos encontrados en primer análisis, solo hubo un valor atípico. Al realizarlo una tercera ocasión, no se encontraron valores por fuera de los límites propuestos. Los siguientes Cuadros muestran los resultados obtenidos.

Cuadro A7. 1. Primer análisis de valores atípicos en la diferencia $F_{ye}-F_{yt}$

Primer análisis - Valores atípicos	
Tercer cuartil ($Q3$)	10,7
Primer cuartil ($Q1$)	-8,34
$Q3-Q1$	19,1
factor g	1,50
$g' = g \cdot (Q3-Q1)$	28,6
Límite superior = $Q3 + g'$	39,4
Límite inferior = $Q3 - g'$	-37,0

Cuadro A7. 2. Primer análisis de valores atípicos en la diferencia $F_{ye}-F_{yt}$

Segundo análisis - Valores atípicos	
Tercer cuartil ($Q3$)	10,6
Primer cuartil ($Q1$)	-7,16
$Q3-Q1$	17,8
factor g	1,50
$g' = g \cdot (Q3-Q1)$	26,7
Límite superior = $Q3 + g'$	37,3
Límite inferior = $Q3 - g'$	-33,9

El siguiente cuadro muestra la diferencia utilizada $F_{ye}-F_{yt}$ y se destacan las probetas de los valores atípicos.

Cuadro A7. 3. Resultados de la diferencia $F_{ye}-F_{yt}$ utilizado para el análisis de valores atípicos

Probeta	F_{yt} (MPa)	$F_{ye}=\beta \cdot F_{yf}$ (MPa)	$F_{ye}-F_{yt}$ (MPa)
E01 T50x1.5 - 01	306,91	303,43	-3,48
E01 T50x1.5 - 02	302,54	303,43	0,89
E01 T50x1.5 - 03	308,61	303,43	-5,18
E01 T72x1.5 - 01	301,69	297,16	-4,53
E01 T72x1.5 - 02	327,76	297,16	-30,60
E01 T72x1.5 - 03	288,36	297,16	8,80
E01 T100x1.5 - 01	247,63	269,37	21,74
E01 T100x1.5 - 02	243,98	269,37	25,39
E01 T100x1.5 - 03	258,39	269,37	10,98
E01 T50x1.8 - 01	288,93	291,18	2,25
E01 T50x1.8 - 02	296,27	291,18	-5,09
E01 T50x1.8 - 03	303,32	291,18	-12,14
E01 T72x1.8 - 01	316,43	310,27	-6,16
E01 T72x1.8 - 02	318,79	310,27	-8,52
E01 T72x1.8 - 03	309,36	310,27	0,91
E01 T100x1.8 - 01	287,55	293,78	6,23
E01 T100x1.8 - 02	288,65	293,78	5,13
E01 T100x1.8 - 03	298,99	293,78	-5,21
E01 T50x2.37 - 01	294,90	292,97	-1,93
E01 T50x2.37 - 02	302,34	292,97	-9,37
E01 T50x2.37 - 03	298,62	292,97	-5,65
E01 T72x2.37 - 01	340,95	339,17	-1,78
E01 T72x2.37 - 02	352,81	339,17	-13,64
E01 T72x2.37 - 03	350,43	339,17	-11,26
E01 T100x2.37 - 01	306,44	308,19	1,75
E01 T100x2.37 - 02	294,08	308,19	14,11
E01 T100x2.37 - 03	294,88	308,19	13,31
E02 T50x1.5 - 01	337,69	346,86	9,17
E02 T50x1.5 - 02	332,72	346,86	14,14
E02 T50x1.5 - 03	348,82	346,86	-1,96
E02 T72x1.5 - 01	337,73	330,89	-6,84
E02 T72x1.5 - 02	327,23	330,89	3,66
E02 T72x1.5 - 03	339,87	330,89	-8,98
E02 T100x1.5 - 01	317,15	320,20	3,05
E02 T100x1.5 - 02	309,31	320,20	10,89
E02 T100x1.5 - 03	318,66	320,20	1,54
E02 T50x1.8 - 01	334,43	321,54	-12,89
E02 T50x1.8 - 02	336,79	321,54	-15,25
E02 T50x1.8 - 03	343,71	321,54	-22,17
E02 T72x1.8 - 01	359,13	344,32	-14,81
E02 T72x1.8 - 02	367,62	344,32	-23,30
E02 T72x1.8 - 03	367,29	344,32	-22,97

Cuadro A7. 4. Resultados de la diferencia $F_{ye}-F_{yt}$ utilizado para el análisis de valores atípicos. (Cont.)

Probeta	F_{yt} (MPa)	$F_{ye}=\beta \cdot F_{yf}$ (MPa)	$F_{ye}-F_{yt}$ (MPa)
E02 T100x1.8 - 01	320,23	329,61	9,38
E02 T100x1.8 - 02	310,40	329,61	19,21
E02 T100x1.8 - 03	318,78	329,61	10,83
E02 T50x2.37 - 01	364,66	361,34	-3,32
E02 T50x2.37- 02	358,37	361,34	2,97
E02 T50x2.37 - 03	359,91	361,34	1,43
E02 T72x2.37 - 01	335,74	337,75	2,01
E02 T72x2.37- 02	328,82	337,75	8,93
E02 T72x2.37 - 03	331,01	337,75	6,74
E02 T100x2.37 - 01	299,64	348,00	48,36
E02 T100x2.37- 02	302,30	348,00	45,70
E02 T100x2.37 - 03	331,60	348,00	16,40
E02 T50x3.17 - 01	330,97	320,56	-10,41
E02 T50x3.17- 02	323,85	320,56	-3,29
E02 T50x3.17- 03	309,88	320,56	10,68
E02 T72x3.17 - 01	327,39	334,99	7,60
E02 T72x3.17- 02	328,64	334,99	6,35
E02 T72x3.17- 03	326,26	334,99	8,73
E02 T100x3.17 - 01	333,39	350,56	17,17
E02 T100x3.17- 02	339,42	350,56	11,14
E02 T100x3.17- 03	327,82	350,56	22,74
E03 T50x1.5 - 01	286,26	306,20	19,94
E03 T50x1.5 - 02	286,96	306,20	19,24
E03 T50x1.5 - 03	319,52	306,20	-13,32
E03 T72x1.5 - 01	308,66	309,89	1,23
E03 T72x1.5 - 02	279,75	309,89	30,14
E03 T72x1.5 - 03	276,26	309,89	33,63
E03 T100x1.5 - 01	300,36	307,10	6,74
E03 T100x1.5 - 02	338,22	307,10	-31,12
E03 T100x1.5 - 03	279,84	307,10	27,26
E03 T50x1.8 - 01	296,39	303,89	7,50
E03 T50x1.8 - 02	293,38	303,89	10,51
E03 T50x1.8 - 03	325,15	303,89	-21,26
E03 T72x1.8 - 01	344,22	329,74	-14,48
E03 T72x1.8 - 02	347,84	329,74	-18,10
E03 T72x1.8 - 03	330,83	329,74	-1,09
E03 T100x1.8 - 01	331,31	309,47	-21,84
E03 T100x1.8 - 02	303,24	309,47	6,23
E03 T100x1.8 - 03	301,94	309,47	7,53
E03 T50x2.37 - 01	330,83	335,05	4,22
E03 T50x2.37 - 02	326,24	335,05	8,81
E03 T50x2.37 - 03	325,75	335,05	9,30

Cuadro A7. 5. Resultados de la diferencia $F_{ye}-F_{yt}$ utilizado para el análisis de valores atípicos. (Cont.)

Probeta	F_{yt} (MPa)	$F_{ye}=\beta \cdot F_{yf}$ (MPa)	$F_{ye}-F_{yt}$ (MPa)
E03 T72x2.37 - 01	311,01	315,62	4,61
E03 T72x2.37 - 02	322,89	315,62	-7,27
E03 T72x2.37 - 03	307,28	315,62	8,34
E03 T100x2.37 - 01	313,50	309,22	-4,28
E03 T100x2.37 - 02	317,38	309,22	-8,16
E03 T100x2.37 - 03	346,61	309,22	-37,39
E03 T50x3.17 - 01	355,83	320,62	-35,21
E03 T50x3.17 - 02	359,44	320,62	-38,82
E03 T50x3.17 - 03	361,14	320,62	-40,52
E03 T72x3.17 - 01	302,77	337,49	34,72
E03 T72x3.17 - 02	322,82	337,49	14,67
E03 T72x3.17 - 03	326,57	337,49	10,92
E03 T100x3.17 - 01	301,73	318,41	16,68
E03 T100x3.17 - 02	334,56	318,41	-16,15
E03 T100x3.17 - 03	293,77	318,41	24,64

Anexo 8. Resultados de esfuerzo de fluencia esperado F_{ye}

Cuadro A8. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ye} , utilizando el factor β propuesto

Probeta de fleje	F_{ys} (MPa)	F_{us} (MPa)	Probeta de tubo	t (mm)	α	β	$F_{ye}=\beta \cdot F_{ys}$ (MPa)
E01 F1.5-50	261	358	E01 T50x1.5	1,53	125	1,08	281
E01 F1.5-72	256	359	E01 T72x1.5	1,46	125	1,07	275
E01 F1.5-100	219	341	E01 T100x1.5	1,47	96,0	1,14	249
E01 F1.8-50	235	343	E01 T50x1.8	1,77	90,9	1,15	269
E01 F1.8-72	259	351	E01 T72x1.8	1,76	108	1,11	287
E01 F1.8-100	236	351	E01 T100x1.8	1,78	89,5	1,15	272
E01 F2.37-50	228	333	E01 T50x2.37	2,20	70,8	1,19	271
E01 F2.37-72	273	364	E01 T72x2.37	2,29	89,5	1,15	314
E01 F2.37-100	240	348	E01 T100x2.37	2,29	72,6	1,18	285
E02 F1.5-50	323	426	E02 T50x1.5	1,50	163	1,00	323
E02 F1.5-72	296	406	E02 T72x1.5	1,50	144	1,03	306
E02 F1.5-100	284	386	E02 T100x1.5	1,50	140	1,04	297
E02 F1.8-50	262	387	E02 T50x1.8	1,85	95,7	1,14	297
E02 F1.8-72	292	402	E02 T72x1.8	1,81	117	1,09	319
E02 F1.8-100	272	398	E02 T100x1.8	1,82	102	1,12	305
E02 F2.37-50	289	407	E02 T50x2.37	2,39	85,8	1,16	334
E02 F2.37-72	265	381	E02 T72x2.37	2,43	76,0	1,18	312
E02 F2.37-100	276	383	E02 T100x2.37	2,46	80,5	1,17	322
E02 F3.17-50	240	368	E02 T50x3.17	3,24	48,2	1,24	296
E02 F3.17-72	252	372	E02 T72x3.17	3,26	52,4	1,23	309
E02 F3.17-100	266	386	E02 T100x3.17	3,24	56,5	1,22	324
E03 F1.5 - 50	288	331	E03 T50x1.5	2,50	100	1,13	324
E03 F1.5 - 72	294	338	E03 T72x1.5	1,49	171	1,00	294
E03 F1.5 - 100	284	332	E03 T100x1.5	1,52	160	1,00	284
E03 F1.8 - 50	254	331	E03 T50x1.8	1,78	110	1,11	281
E03 F1.8 - 72	289	339	E03 T72x1.8	1,84	134	1,05	305
E03 F1.8 - 100	260	331	E03 T100x1.8	1,81	113	1,10	286
E03 F2.37 - 50	270	351	E03 T50x2.37	2,31	89,8	1,15	310
E03 F2.37 - 72	248	343	E03 T72x2.37	2,36	75,9	1,18	292
E03 F2.37 - 100	241	342	E03 T100x2.37	2,38	71,3	1,19	286
E03 F3.17 - 72	258	373	E03 T72x3.17	2,92	61,2	1,21	312
E03 F3.17 - 100	239	376	E03 T100x3.17	2,99	50,9	1,23	294

Anexo 9. Resultados de esfuerzo de fluencia esperado F_{ya}

Cuadro A9. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ya} utilizando la Eq. A3.3.2-1 del AISI S100-16.

Probeta	F_{yf} (MPa)	F_{uf} (MPa)	Probeta	F_{yt} (MPa)	L (mm)	r (mm)	t (mm)	l (mm)	a_e	a_t	C	$r/t < 7$	$F_{uf}/F_{yf} \geq 1,2$	m	B_c	F_{yc}	F_{ya} (MPa)
E01 F1.5-01	261	358	E01 T50x1.5	306	51,0	2,31	1,53	43,3	14,8	81,24	0,18	1,51	1,37	0,20	1,73	416	289
E01 F1.5-02	256	359	E01 T72x1.5	306	72,6	2,00	1,46	65,7	12,6	108,76	0,12	1,37	1,40	0,20	1,78	426	275
E01 F1.5-03	219	341	E01 T100x1.5	250	99,1	1,31	1,47	93,6	9,45	146,89	0,06	0,89	1,56	0,23	1,97	443	234
E01 F1.8-01	235	343	E01 T50x1.8	296	50,9	2,69	1,77	42,0	19,9	94,23	0,21	1,52	1,46	0,21	1,85	398	269
E01 F1.8-02	259	351	E01 T72x1.8	315	72,8	2,63	1,76	64,0	19,4	132,02	0,15	1,49	1,36	0,19	1,71	409	281
E01 F1.8-03	236	351	E01 T100x1.8	292	99,6	1,38	1,78	93,3	12,7	179,18	0,07	0,77	1,48	0,22	1,88	471	253
E01 F2.37-01	228	333	E01 T50x2.37	299	50,9	3,13	2,20	40,2	29,3	117,87	0,25	1,42	1,46	0,21	1,86	392	269
E01 F2.37-02	273	364	E01 T72x2.37	348	73,0	3,13	2,29	62,2	30,6	172,75	0,18	1,37	1,33	0,19	1,67	431	301
E01 F2.37-03	241	348	E01 T100x2.37	298	99,4	2,06	2,29	90,7	23,0	230,34	0,10	0,9	1,45	0,21	1,84	451	262
E02 F1.5-01	323	426	E02 T50x1.5	340	50,8	2,13	1,50	43,5	13,6	78,98	0,17	1,41	1,32	0,19	1,65	501	354
E02 F1.5-02	296	406	E02 T72x1.5	335	72,5	2,81	1,50	63,9	16,8	112,69	0,15	1,87	1,37	0,20	1,73	453	320
E02 F1.5-03	285	386	E02 T100x1.5	315	99,9	3,25	1,50	90,4	18,8	153,92	0,12	2,17	1,35	0,19	1,71	418	301
E02 F1.8-01	262	387	E02 T50x1.8	338	51,1	2,50	1,85	42,4	19,9	98,3	0,20	1,35	1,48	0,22	1,88	460	302
E02 F1.8-02	292	402	E02 T72x1.8	365	72,6	2,94	1,81	63,1	21,8	136,02	0,16	1,62	1,38	0,20	1,74	462	319
E02 F1.8-03	272	398	E02 T100x1.8	316	99,9	2,94	1,82	90,4	21,9	186,03	0,12	1,62	1,46	0,21	1,86	455	293
E02 F2.37-01	289	407	E02 T50x2.37	361	51,5	2,56	2,39	41,6	28,2	127,53	0,22	1,07	1,41	0,20	1,78	508	337
E02 F2.37-02	265	381	E02 T72x2.37	332	72,3	2,31	2,43	62,8	26,9	179,51	0,15	0,95	1,44	0,21	1,82	488	299
E02 F2.37-03	276	383	E02 T100x2.37	311	100	3,88	2,46	87,5	39,4	254,44	0,15	1,58	1,39	0,20	1,76	443	301
E02 F3.17-01	240	368	E02 T50x3.17	322	51,0	1,81	3,24	40,9	35,0	167,47	0,21	0,56	1,53	0,23	1,94	531	301
E02 F3.17-02	252	372	E02 T72x3.17	327	72,6	2,31	3,26	61,5	40,4	240,95	0,17	0,71	1,48	0,22	1,87	509	295
E02 F3.17-03	266	386	E02 T100x3.17	334	101	3,50	3,24	87,0	52,0	333,64	0,16	1,08	1,45	0,21	1,84	482	300
E03 F1.5 - 01	288	331	E03 T50x1.5	298	50,5	1,81	1,50	43,9	12,1	77,83	0,15	1,21	1,15	-	-	-	-
E03 F1.5 - 02	294	338	E03 T72x1.5	288	72,5	1,19	1,49	67,1	9,08	109,35	0,08	0,80	1,15	-	-	-	-
E03 F1.5 - 03	284	332	E03 T100x1.5	306	100	1,31	1,52	94,6	9,92	153,9	0,06	0,86	1,17	-	-	-	-

Cuadro A9. Esfuerzo de fluencia esperado F_{ya} utilizando la Eq. A3.3.2-1 del AISI S100-16. (Cont.)

Probeta	F_{yf} (MPa)	F_{uf} (MPa)	Probeta	F_{yt} (MPa)	L (mm)	r (mm)	t (mm)	I (mm)	a_e	a_t	C	r/t < 7	F_{uf}/F_{yf} $\geq 1,2$	m	Bc	F_{yc}	F_{ya} (MPa)
E03 F1.8 - 01	254	331	E03 T50x1.8	305	50,1	1,81	1,78	42,9	15,1	91,1	0,17	1,02	1,3	0,18	1,63	412	280
E03 F1.8 - 02	289	339	E03 T72x1.8	339	70,3	1,75	1,84	63,1	15,5	132	0,12	0,95	1,17	-	-	-	-
E03 F1.8 - 03	260	331	E03 T100x1.8	312	99,9	2,56	1,81	91,1	19,8	185	0,11	1,41	1,27	0,18	1,58	386	274
E03 F2.37 - 01	270	351	E03 T50x2.37	328	50,6	2,06	2,31	41,9	23,3	120	0,19	0,89	1,3	0,18	1,63	448	304
E03 F2.37 - 02	248	343	E03 T72x2.37	314	72,8	1,13	2,36	65,8	17,1	172	0,1	0,48	1,38	0,20	1,75	501	273
E03 F2.37 - 03	241	342	E03 T100x2.37	326	101	1,31	2,38	93,3	18,7	240	0,08	0,55	1,42	0,20	1,80	489	260
E03 F3.17 - 01	242	354	E03 T50x3.17	359	50,9	2,25	3,06	40,3	36,3	159	0,23	0,74	1,46	0,21	1,85	479	296
E03 F3.17 - 02	258	373	E03 T72x3.17	317	73,0	1,50	2,92	64,2	27,2	215	0,13	0,51	1,44	0,21	1,83	543	294
E03 F3.17 - 03	239	376	E03 T100x3.17	310	101	2,63	2,99	89,9	38,7	307	0,13	0,88	1,57	0,23	1,99	490	271

0

Anexo 10. Resultados de esfuerzo de fluencia esperado F_y'

Cuadro A10. Esfuerzo de fluencia esperado F_y' utilizando la ecuación presentada en la especificación canadiense CSA S136-94.

Probeta	F_y (MPa)	F_u (MPa)	$F_u - F_y$ (MPa)	Probeta	F_{yt} (MPa)	L (mm)	r (mm)	t (mm)	I (mm)	W^*	F_y' (MPa)
E01 F1.5-01	261	358	96,5	E01 T50x1.5	306	51,0	2,31	1,53	43,3	34,6	289
E01 F1.5-02	256	359	103	E01 T72x1.5	306	72,6	2,00	1,46	65,7	50,7	276
E01 F1.5-03	219	341	122	E01 T100x1.5	250	99,1	1,31	1,47	93,6	68,1	237
E01 F1.8-01	235	343	108	E01 T50x1.8	296	50,9	2,69	1,77	42,0	30,0	271
E01 F1.8-02	259	351	92,1	E01 T72x1.8	315	72,8	2,63	1,76	64,0	42,6	280
E01 F1.8-03	236	351	114	E01 T100x1.8	292	99,6	1,38	1,78	93,3	56,3	257
E01 F2.37-01	228	333	105	E01 T50x2.37	299	50,9	3,13	2,20	40,2	24,3	271
E01 F2.37-02	273	364	90,7	E01 T72x2.37	348	73,0	3,13	2,29	62,2	33,1	300
E01 F2.37-03	241	348	108	E01 T100x2.37	298	99,4	2,06	2,29	90,7	44,1	265
E02 F1.5-01	323	426	103	E02 T50x1.5	340	50,8	2,13	1,50	43,5	34,9	352
E02 F1.5-02	296	406	110	E02 T72x1.5	335	72,5	2,81	1,50	63,9	50,0	318
E02 F1.5-03	285	386	101	E02 T100x1.5	315	99,9	3,25	1,50	90,4	68,9	299
E02 F1.8-01	262	387	126	E02 T50x1.8	338	51,1	2,50	1,85	42,4	28,8	305
E02 F1.8-02	292	402	110	E02 T72x1.8	365	72,6	2,94	1,81	63,1	41,6	319
E02 F1.8-03	272	398	126	E02 T100x1.8	316	99,9	2,94	1,82	90,4	56,4	294
E02 F2.37-01	289	407	118	E02 T50x2.37	361	51,5	2,56	2,39	41,6	22,4	342
E02 F2.37-02	265	381	116	E02 T72x2.37	332	72,3	2,31	2,43	62,8	30,4	303
E02 F2.37-03	276	383	108	E02 T100x2.37	311	100	3,88	2,46	87,5	42,1	301
E02 F3.17-01	240	368	128	E02 T50x3.17	322	51,0	1,81	3,24	40,9	16,0	320
E02 F3.17-02	252	372	120	E02 T72x3.17	327	72,6	2,31	3,26	61,5	22,6	305
E02 F3.17-03	266	386	120	E02 T100x3.17	334	100,5	3,50	3,24	87,0	31,9	304
E03 F1.5 - 01	288	331	43,3	E03 T50x1.5	298	50,5	1,81	1,50	43,9	34,6	300
E03 F1.5 - 02	294	338	44,5	E03 T72x1.5	288	72,5	1,19	1,49	67,1	49,0	303
E03 F1.5 - 03	284	332	48,1	E03 T100x1.5	306	100,3	1,31	1,52	94,6	66,4	291
E03 F1.8 - 01	254	331	76,6	E03 T50x1.8	305	50,1	1,81	1,78	42,9	28,9	281
E03 F1.8 - 02	289	339	49,4	E03 T72x1.8	339	70,3	1,75	1,84	63,1	38,8	302
E03 F1.8 - 03	260	331	70,7	E03 T100x1.8	312	99,9	2,56	1,81	91,1	56,2	273

Cuadro A10. Esfuerzo de fluencia esperado F_y' utilizando la ecuación presentada en la especificación canadiense CSA S136-94. (Cont.)

Probeta	F_y (MPa)	F_u (MPa)	$F_u - F_y$ (MPa)	Probeta	F_{yt} (MPa)	L (mm)	r (mm)	t (mm)	I (mm)	W^*	F_y' (MPa)
E03 F2.37 - 01	270	351	81,4	E03 T50x2.37	328	50,6	2,06	2,31	41,9	22,6	306
E03 F2.37 - 02	248	343	94,9	E03 T72x2.37	314	72,8	1,13	2,36	65,8	30,9	278
E03 F2.37 - 03	241	342	101	E03 T100x2.37	326	101	1,31	2,38	93,3	42,6	265
E03 F3.17 - 01	242	354	111	E03 T50x3.17	359	50,9	2,25	3,06	40,3	17,0	308
E03 F3.17 - 02	258	373	115	E03 T72x3.17	317	73,0	1,50	2,92	64,2	25,1	304
E03 F3.17 - 03	239	376	137	E03 T100x3.17	310	101	2,63	2,99	89,9	34,4	279