

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO PSEUDOESTÁTICO DE
EMPALMES SOLDADOS A TOPE CON CAMISA DE REFUERZO PARA BARRAS
N6

CRISTHIAN CAMILO ROMERO MOJICA
JHEISSON ANDRÉS RODRÍGUEZ ZAMBRANO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, COLOMBIA
2018

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO PSEUDOESTÁTICO DE
EMPALMES SOLDADOS A TOPE CON CAMISA DE REFUERZO PARA BARRAS
N6

CRISTHIAN CAMILO ROMERO MOJICA
JHEISSON ANDRÉS RODRÍGUEZ ZAMBRANO

Proyecto de grado para optar el título de:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Director del proyecto
I.C., DR. FABIÁN AUGUSTO LAMUS BÁEZ

Pontificia Universidad Javeriana
Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 13 de noviembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a nuestros viejos y familiares, ya que fueron los seres que vivieron su sueño a través de nosotros, que con sus palabras nos llenaron de alegría y motivación cuando más se necesitó.

Al Ingeniero Fabián Augusto Lamus Báez por el apoyo y la motivación ofrecida, puesto que él fue de vital importancia para la elaboración y culminación de nuestro trabajo de grado; al Ingeniero Federico Alejandro Núñez Moreno por sus recomendaciones y sugerencias durante el desarrollo de este proyecto; al Ingeniero Luis Felipe Prada Sarmiento por su direccionamiento metodológico, por último, a la Pontificia Universidad Javeriana.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
JUSTIFICACIÓN.....	16
HIPÓTESIS.....	18
1 MARCO DE REFERENCIA.....	19
1.1 ESTADO DEL ARTE	19
1.2 TIPOS DE EMPALMES EN COLOMBIA.....	20
1.2.1 EMPALMES POR TRASLAPO.....	20
1.2.2 EMPALMES MECÁNICOS	21
1.2.3 EMPALMES SOLDADOS.....	22
1.3 LIMITANTES DEL USO DE EMPALMES EN COLOMBIA.....	23
1.3.1 EMPALMES MECÁNICOS	23
1.3.2 EMPALMES SOLDADOS.....	23
2 MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 ACERO ESTRUCTURAL	24
2.2 SOLDADURA.....	27
2.2.1 PROCESO DE SOLDADURA.....	27
2.3 FLEXIÓN PURA.....	27
2.4 CARGAS CÍCLICAS.....	29
3 MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	33
3.1.1 CONCRETO	33
3.1.2 BARRAS DE REFUERZO	33
3.1.3 SOLDADURA	34
3.1.4 TUBERÍA DE REFUERZO.....	35
3.1.5 TERMINAL ROSCADO	35
3.1.6 EMPALME MECÁNICO.....	36
3.1.7 STRAIN GAUGE.....	36
3.1.8 LDVT	37

3.1.9	CANTIDADES.....	38
3.2	DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	39
3.2.1	PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE EMPALMES SOLDADOS.....	39
3.2.2	PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE EMPALMES MECÁNICOS.....	43
3.2.3	ENSAYO A TRACCIÓN DE EMPALMES SOLDADOS.....	44
3.2.4	PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE VIGAS.....	48
3.2.5	ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS.....	52
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
4.1	FALLA DE BARRAS A TRACCIÓN.....	57
4.2	TIPO DE FALLA.....	58
4.3	ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	59
4.4	ENSAYOS A FLEXIÓN DE VIGAS.....	78
4.4.1	ENSAYOS ESTÁTICOS.....	80
4.4.2	ENSAYOS PSEUDOESTÁTICOS.....	84
5	ANÁLISIS ECONÓMICO TIPOS DE EMPALMES.....	90
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES.....	94
	BIBLIOGRAFÍA.....	95
	ANEXOS.....	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Longitudes comerciales acero de refuerzo NTC 2289.....	14
Figura 2 Requisitos de tracción.....	15
Figura 3. Longitud de desarrollo barras de refuerzo	21
Figura 4. Tipos de empalmes mecánicos	22
Figura 5. Composición química del acero estructural	23
Figura 6. Curva esfuerzo – deformación unitaria	24
Figura 7. Propiedades mecánicas del acero	25
Figura 8: Falla dúctiles en el acero).....	26
Figura 9. Carbono equivalente.....	27
Figura 10. Curva Carga vs Deflexión de viga con carga en el centro de la luz.	28
Figura 11. Ensayo de flexión pura	29
Figura 12. Curvas típicas de histéresis.	30
Figura 13. Ciclo de histerésis en un sistema.	31
Figura 14. Ciclos de carga y descarga.....	32
Figura 15. Curva de skeleton típica	32
Figura 16. Terminal roscado.	35
Figura 17. Empalmes mecánicos.....	36
Figura 18. Especificaciones LVDT.	37
Figura 19. Especificaciones LVDT, proceso cíclico.	38
Figura 20. Esquema doble bisel a 45°.	39
Figura 21. Mecanizado de barra con doble bisel a 45°.	39
Figura 22. Mecanizado de tubo de refuerzo realizado	40
Figura 23. Esquema de mecanizado tubo de refuerzo	40
Figura 24. Soldadura en ranura en bisel doble para barras corrugadas.	41
Figura 25. Soldadura realizada en las probetas de acuerdo con la NTC4040	41
Figura 26. Unión barras de refuerzo con camisa perimetral	42
Figura 27. Roscado de barras corrugadas.....	43
Figura 28. Ajuste de empalme mecánicos.	43
Figura 29 Montaje de probetas para ensayos a tracción.	45
Figura 30. Desarrollo de ensayo a tracción de probetas.....	46
Figura 31. Finalización del ensayo a tracción.	47
Figura 32. Curva esfuerzo deformación unitaria obtenida para una de las probetas.	47
Figura 33. Plano de despiece viga patrón (sin empalmes).	48
Figura 34. Plano de despiece viga con empalmes soldados y estribos a 0.14 cm en el centro de la luz.....	48
Figura 35. Plano de despiece viga con empalmes soldados y estribos a 0.07 en el centro de la luz.....	49
Figura 36. Armado de formaleta y acero de refuerzo.....	49
Figura 37. Proceso de instalación strain gauge.	50
Figura 38. Proceso de vaciado de concreto de probetas tipo viga.....	51
Figura 39. Recubrimiento de probetas.	52
Figura 40. Montaje probetas tipo viga.....	53

Figura 41. Protocolo de carga ensayos pseudoestáticos.....	54
Figura 42. Instrumentación de ensayo a flexión de vigas.	55
Figura 43. Finalización ensayo de flexión en vigas.....	56
Figura 44. Falla obtenida en la totalidad de las probetas.....	57
Figura 45. Tipo de falla obtenida en las probetas.	58
Figura 46. Patología de falla en probetas.	58
Figura 47. Curva esfuerzo deformación unitaria barras de control.	59
Figura 48. Curva esfuerzo deformación unitaria empalmes soldados.	60
Figura 49. Curva esfuerzo deformación unitaria empalmes mecánicos.....	60
Figura 50. Diagrama de barras esfuerzo de fluencia.	64
Figura 51. Distribución normal esfuerzo de fluencia	65
Figura 52. Distribuciones normales de esfuerzo de fluencia para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.....	66
Figura 53. Diagrama de barras deformación de fluencia.	66
Figura 54. Distribución normal deformación de fluencia.	67
Figura 55. Distribuciones normales de deformación de fluencia para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.....	67
Figura 56. Diagrama de barras índice de ductilidad.....	68
Figura 57. Diagrama de barras módulo de elasticidad.....	69
Figura 58. Distribución normal módulo de elasticidad.....	70
Figura 59. Distribuciones normales para módulo de elasticidad de empalmes soldados, mecánicos y barras de control.....	70
Figura 60. Diagrama de barras resistencia a la tracción mínima.	71
Figura 61. Distribuciones normales de esfuerzo mínimo de tracción para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.....	72
Figura 62. Diagrama de barras deformación última.	73
Figura 63. Distribución normal deformación última.....	73
Figura 64. Distribuciones normales para deformación última de empalmes soldados, mecánicos y barras de control.	74
Figura 65. Diagrama de barras tenacidad.....	75
Figura 66. Distribuciones normales de tenacidad para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.	75
Figura 67. Diagrama de barras 1.25 fu/fy.	76
Figura 68. Distribución normal 1.25 Fu/fy.	77
Figura 69. Pérdida de recubrimiento.....	79
Figura 70. Falla en probeta tipo D6S14E1.....	79
Figura 71. Fisuración típica en vigas.	80
Figura 72. Curva momento flector vs deflexión ensayos a flexión estáticos.	81
Figura 73. Diagrama de barras, momento de fluencia de ensayos a flexión estáticos.	82
Figura 74. Diagrama de barras momento 1.25 Fy vs deflexión ensayos a flexión estáticos.....	82
Figura 75. Diagrama de barras deflexión en etapa de fluencia ensayos a flexión estáticos.....	83
Figura 76. Diagrama de barras energía disipada en ensayos a flexión estáticos.	84

Figura 77. Curva momento flector vs deflexión ensayos a flexión estáticos y pseudoestáticos D6S7	85
Figura 78. Curva momento flector vs deflexión ensayos a flexión estáticos y pseudoestáticos D6S14	85
Figura 79. Área considerada en cada ciclo ensayos a flexión pseudoestáticos.....	86
Figura 80. Curva energía disipa vs deflexión ensayos a flexión pseudoestáticos.	87
Figura 81. Energía disipada por las probetas bajo ensayos estáticos y pseudoestáticos.	88
Figura 82. Curva momento flector vs deformación unitaria strain gauges.	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones de diseño del concreto estructural premezclado	33
Tabla 2. Composición química del acero	33
Tabla 3. Requisitos de resistencia acero.	34
Tabla 4. Especificaciones tubo de refuerzo.	35
Tabla 5. Especificaciones Strain gauge	36
Tabla 6. Cantidades totales de la investigación	38
Tabla 7. Cantidad de probetas analizadas.....	44
Tabla 8. Probetas fabricadas.	44
Tabla 9. Parámetros de entrada.	45
Tabla 10. Especificaciones de probetas tipo viga.	52
Tabla 11. Parámetros de caracterización de probetas.....	62
Tabla 12. Análisis estadístico.....	63
Tabla 13. Resultados obtenidos ensayos de flexión estáticos	81
Tabla 14. Resultados obtenidos ensayos a flexión pseudoestáticos	84
Tabla 15. Área por ciclos ensayos a flexión pseudoestáticos.....	86
Tabla 16. Tenacidad vigas con empalme soldados respecto a viga patrón.....	88
Tabla 17. Análisis de costo empalme soldado con camisa perimetral.....	90
Tabla 18. Costos de empalmes mecánicos en la primera etapa de construcción T7 y T8.....	91
Tabla 19. Costos de empalmes por traslape en la primera etapa de construcción.....	91
Tabla 20. Comparativo económicos tipos de empalme con Alvis y Guerra (2017).	91

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Curvas esfuerzo deformación unitaria de probeta.	98
Anexo 2. Falla en empalmes soldados, mecánicos y barras de control.....	140
Anexo 3. Análisis estadístico.	150
Anexo 4. Cálculo de momento nominal elementos tipo viga.....	175
Anexo 5. Cálculo de deflexión de elemento tipo viga.....	178
Anexo 6. Registro fotográfico.....	182
Anexo 7. Certificados de calidad de materiales.	200

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de grado corresponde a una fracción del proyecto de investigación “evaluación del desempeño de un tipo de empalme soldado para barras de acero longitudinales N6, N7 y N8 en elementos solicitados a flexión” desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, el cual partiendo de estudios previos y las incidencias que tiene el uso de empalmes mecánicos y de traslapo, se centró en el estudio experimental del uso de empalmes soldados contruidos mediante un doble bisel en el acero y el uso de un tubo metálico como camisa perimetral de refuerzo, para conexiones de barras corrugadas N6 en elementos tipo viga bajo efectos de cargas estáticas y pseudoestáticas, evaluando su capacidad estructural y comportamiento bajo ciclos de carga y descarga. Los empalmes cumplieron la norma NTC-2289, sin embargo, presentaron una reducción mínima en el índice de ductilidad y tenacidad respecto al acero estructural corrugado continuo. Es importante mencionar que, en la construcción de estos empalmes se utilizó un soldador no calificado, por lo tanto, cualquier soldador empírico puede realizar este proceso, siempre y cuando cumpla con algunas especificaciones mínimas en la elaboración de la soldadura, de manera que, no represente un incremento considerable de los costos en la construcción de un proyecto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar experimentalmente el comportamiento pseudoestático de un tipo de empalme soldado a tope con camisa de refuerzo para barras de acero longitudinal corrugado NTC2289 de diámetros N6 en elementos estructurales solicitados a flexión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el comportamiento mecánico de un tipo de empalme soldado para barras de acero NTC2289 de diámetro N6, a partir de la relación carga contra elongación obtenida mediante ensayos experimentales de tracción.
- Determinar la influencia del uso de un tipo de empalme soldado para barras de acero NTC2289 en el comportamiento estructural de elementos reforzados con barras longitudinales corrugadas N6 solicitados a flexión, a partir de ensayos monotónicos en vigas cargadas transversalmente en el centro de la luz.
- Determinar la influencia del uso de un tipo de empalme soldado para barras de acero NTC2289 en el comportamiento estructural de elementos reforzados con barras longitudinales corrugadas N6 solicitados a flexión, a partir de ensayos pseudoestáticos en vigas cargadas transversalmente en el centro de la luz.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En una estructura de concreto reforzado es común que los elementos presenten dimensiones mayores a la longitud de las barras de refuerzo, que está limitada por su producción y transporte como se muestra en la Figura 1, por lo que resulta indispensable usar empalmes. El reglamento NSR-10 en el numeral C.12.14 indica que solo se pueden empalmar las barras de tres maneras:

- Empalmes por traslapo (C.12.14.2)
- Empalmes mecánicos (C.12.14.3)
- Empalmes soldados (C.12.14.3)

Siendo los dos primeros métodos los más comunes en Colombia.

Figura 1. Longitudes comerciales acero de refuerzo NTC 2289

	<h3>BARRAS CORRUGADAS</h3>	Actualización 30/03/2015
		
DESCRIPCIÓN Y USOS	Barras de acero transversales distribuidos uniformemente en sección circular con resaltes para mayor adherencia al concreto, fabricada bajo la norma NTC 2289. Utilizada en el sector de la construcción para refuerzo de concreto en estructuras con diseño sismorresistente.	
EMPAQUE Y ROTULADO	Paquetes con peso máximo de 2 toneladas y longitud a 6, 9 y 12 metros. Conformados con única colada, sujetos con amarres metálicos. Tienen una (1) etiqueta de identificación ubicada en uno de los extremos del paquete que contiene la siguiente información: Nombre por marca del productor Numero de designación de la barra Grado o especificación Nº de colada o lote Cantidad (unidad) por paquete Longitud País de origen	

Fuente: Acería Sidenal

En la actualidad el uso de conectores mecánicos se prescribe con mayor frecuencia y fiabilidad en conexiones de barras mecánicas en lugar de solapes; dado que la capacidad de un empalme mecánico es típicamente del 125% al 150% mayor de la de un solape tradicional (nVent Lenton 2018).

Los empalmes por traslapo resultan inadecuados en elementos con cuantías de refuerzo elevadas, especialmente en proyectos donde el tamaño de la sección transversal de los elementos es limitado o en sistemas industrializados donde los muros presentan espesores menores, presentándose dificultades en el vaciado del concreto por la concentración de refuerzo, lo que eleva la probabilidad de que se presenten hormigueros y se disminuya la compacidad del concreto. Por otro lado, los empalmes por traslapo tienen un comportamiento ineficiente en zonas de plastificación debido a que la transferencia de esfuerzos se realiza a través del concreto y en estas zonas durante los ciclos de histéresis, se presenta fisuración del hormigón.

El uso de empalmes mecánicos y soldados permite tener cuantías mayores de refuerzo, sin embargo, cuando la estructura debe tener una capacidad de disipación moderada o especial, estos dispositivos deben ser capaces de desarrollar hasta 1.25 veces el esfuerzo de fluencia del acero en las barras y cumplir las especificaciones adicionales requeridas por la NTC2289 como se muestra en la Figura 2; lo cual en ocasiones hace complicado cumplir su uso puesto que es difícil encontrar dispositivos que cumplan con todas las especificaciones, y cuando las cumplen, su costo es un factor de rechazo por parte del constructor. Por su parte, los empalmes soldados requieren mano de obra calificada y una inspección costosa, en general, dado a que el proceso de soldadura de barras de refuerzo se realiza en el lugar donde se desarrolla la obra, cuando se tiene una supervisión deficiente para el proceso y una baja calificación de los soldadores se producen empalmes defectuosos que no cumplen con las condiciones bajo las cuales fueron diseñados.

Figura 2 Requisitos de tracción

	MPa
Resistencia a la tracción mínima	550
Resistencia a la fluencia mínima	420
Resistencia a la fluencia máxima	540
Porcentaje (%) de alargamiento mínimo con distancia entre marcas de 200 mm	
Número de designación	%
Entre 6.0 M y 19 M	14
Entre 22 M y 36 M	12
Entre 43 M y 57 M	
La resistencia la tracción debe ser igual o mayor a 1.25 veces el punto de fluencia.	

Fuente: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2289 (Décima actualización)

JUSTIFICACIÓN

La NTC4040 rige el proceso de soldado de barras estructurales corrugadas en Colombia, sin embargo, el uso de soldadura en barras corrugadas de refuerzo se debe evitar en zonas de amenaza sísmica alta en México (Rodríguez & Rodríguez Asabay, 2006), debido a que se evaluó este proceso en condiciones de campo y se detectó que no se cumplen los procesos de precalentamiento, resecado del electrodo y esmerilado de las superficies a unir, lo que conllevó a no cumplir los requisitos de resistencia (1.25 Esfuerzo de fluencia) para los empalmes soldados en esta investigación. Las condiciones de ejecución del proceso de construcción de empalmes soldados en Colombia son muy similares a los desarrollados en México, por lo anterior Rodríguez y Asabay (2006) proponen que los desempeños de las barras de refuerzo soldadas serían más efectivos si se utilizaran conectores mecánicos aleatorios a la soldadura, teniendo claridad y garantizando cada una de las capacidades resistentes y de deformación de estos elementos, mitigando la influencia de los efectos de la mano de obra no calificada en la construcción de los empalmes soldados. De acuerdo con Castillo y Velásquez (2016) es posible realizar empalmes soldados tope a tope con una camisa de acero estructural que contrarreste el efecto de la mano de obra no calificada, garantizando que su resistencia sea 1.25 el esfuerzo de fluencia, que la falla presentada sea dúctil y se presente fuera del empalme. Estos resultados se obtuvieron al ensayar los empalmes soldados en diversos diámetros de barras (#3 a #8), mostrando que el empalme puede comportarse de manera satisfactoria, sin embargo, el número de especímenes que fueron ensayados resulta insuficiente para determinar la confiabilidad del empalme. Adicional, se desconocía el comportamiento del empalme dentro de elementos de concreto reforzado en los cuales puede ser implementado. Así mismo, el efecto de cargas pseudoestáticas sobre el empalme es desconocido, el cual es muy importante ya que se asemeja a un sismo en una estructura y dan indicio del comportamiento de formación de rótula plástica.

Por otro lado, Issa y Nasr (2006) realizaron ensayos a tracción en empalmes soldados con barras de 12, 14 y 16 mm de diámetro, obteniendo como conclusión que los empalmes soldados pueden desarrollar de 1.25 veces el esfuerzo de fluencia independiente de si estos trabajan en conjunto con la mezcla de concreto estructural, adicional a esto reducen el costo de los materiales en la construcción de los mismos, ya que se utiliza menos cantidad de acero lo cual es más notable en barras de diámetros grandes, ya que las longitudes de desarrollo son considerablemente mayores.

En la Universidad de Chile, Quezada y Rivera (2010) realizó 21 ensayos a tracción en empalmes soldados con barras de diámetros entre 6 mm y 12 mm bajo cargas monotónicas, variando la resistencia de la soldadura y el tipo unión, obteniendo fallas en las probetas fuera de la unión soldada y cumpliendo con resistencias de fluencia y de rotura según normativas chilenas. Estos resultados fueron obtenidos sin importar el tipo de unión o la resistencia específica de la soldadura para el 99%

de las probetas fabricadas. De esta investigación se concluyó que no hay grandes diferencias entre una unión soldada y una unión no soldada en términos de ductilidad y resistencia. Análogamente a lo mencionado es importante resaltar que algunas de las barras ensayadas no cumplieron con el mínimo alargamiento porcentual requerido por las normativas chilenas. Por otra parte, Quezada y Rivera (2010) asegura que en la medida que las barras sean de menor diámetro la pérdida de ductilidad y endurecimiento prematuro será más notoria producto de una unión más difícil y complicada de realizar entre soldadura y barra. Como recomendación de esta investigación, se sugiere realizar el análisis de un empalme soldado en barras de diámetros más grandes bajo cargas estáticas y pseudoestáticas. Desde otro punto de vista y particularmente este trabajo se enfocó en la prueba de barras de 19.1 mm de diámetro embebidas en vigas de 0.25 m por 0.35 m por 2 m; dado su alto uso en la construcción colombiana. En otro orden de ideas, cabe mencionar que el estudio de barras superiores a la barra número seis no fue posible llevarse a cabo dado las limitaciones en el banco de prueba de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá).

Es importante acotar que el uso de este tipo de empalmes presenta ciertos lineamientos dados por el reglamento NSR-10 en el numeral C.21.1.7.1, que indica que no deben usarse dentro de una distancia igual al doble de la altura del elemento, medida desde la cara de la viga o columna para pórticos resistentes a momento especiales (DMO, DES), o de donde sea probable que se produzca la fluencia del refuerzo como resultado de desplazamientos laterales inelásticos.

Con la investigación presentada en esta propuesta se busca calificar un nuevo tipo de empalme soldado, con barras de diámetro N6 de manera que se determine su comportamiento al ser usado en el refuerzo de elementos estructurales solicitados ante cargas estáticas y pseudoestáticas. Esta calificación del empalme permitirá conocer la confiabilidad de este para ser usado en condiciones reales de funcionamiento, incluso en las secciones críticas de los elementos estructurales, donde se requiere que el mismo sea capaz de desarrollar hasta 1.25 veces el esfuerzo de fluencia del acero de la barra. Así mismo, con el fin de comprobar la eficiencia y la confiabilidad del empalme, es necesario verificar su comportamiento ante cargas cíclicas en zonas de formación de rotulas plásticas donde los empalmes soldados normalmente no pueden usarse debido a su característica falla frágil.

Finalmente, el uso generalizado de un tipo de empalme soldado que sea económico, fácil de realizar en obra, que no requiera procedimientos que deban ser realizados por personal altamente calificado y que además presente un comportamiento dúctil que garantice un buen desempeño sísmico, permitiría reemplazar algunas prácticas inadecuadas en construcción de estructuras de concreto reforzado sin que el presupuesto de obra se vea afectado considerablemente como sucede con los empalmes mecánicos.

HIPÓTESIS

La capacidad de disipación de energía, obtenida a partir de ciclos de carga-des-carga, para un elemento solicitado a flexión bajo cargas estáticas y pseudoestáticas usando empalmes soldados en la zona de momento máximo, será equivalente al en el uso barras continuas en elementos del mismo tipo.

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 ESTADO DEL ARTE

El uso de empalmes soldados tiene unos antecedentes importantes que brindan una noción de la factibilidad del uso de estos, producto de los diseños de mayor exigencia en concreto. Los avances en el desarrollo de nuevos materiales y de concreto estructural, han obligado a los diseñadores a considerar alternativas para el uso del acero de refuerzo, por lo que ha sido necesario considerar alternativas para las conexiones que se puedan presentar, donde los empalmes usados sean efectivos y económicos, por lo que se han implementado los empalmes soldados. (Issa y Nasr, 2006).

La soldadura es un procedimiento de alta complejidad, por lo que se debe tener precaución en esta para poder llegar a obtener unos resultados óptimos; Ahmed (2015), concluyo que uno de los factores más influyentes en el comportamiento de los empalmes soldados es el diámetro de la barra; para barras mayores a 16 mm que es nuestro caso, obtuvo incrementos en más del 10% en su resistencia y disminución en la elongación puede exceder los límites mínimos de las especificaciones (ASTM A615).

Dado que se presenten imprevistos en la fabricación de este tipo de empalmes, Ahmed (2015), basado en ensayos experimentales, propone que la soldadura para el empalme de una barra de refuerzo deformada se puede realizar de forma segura, sin pérdida de resistencia, permaneciendo dentro del límite de las especificaciones técnicas, siempre y cuando la longitud disponible para el empalme no sea inferior a veinte diámetros de la barra soldada.

Castillo y Velásquez (2016), obtuvieron mediante ensayos experimentales que las uniones previamente soldadas no fallaran al ser sometidas a condiciones de cargas pseudoestáticas en uniones empalmadas, ya que superaron por 1.25 veces el esfuerzo de fluencia del material en barras menores a la N6, lo que genera un buen precedente para los elementos a utilizar en esta propuesta.

Hlinkla (2014), hace la aclaración de que la consideración para la utilización de este tipo de empalmes está basada en AWS, NFPA, y la soldadura debe ser realizada por personal calificado, por dicha razón, se buscó evaluar el desempeño de este tipo de empalmes en condiciones cercanas a las de los procesos constructivos en nuestro país, mediante personal con experiencia superior a dos años, con el fin de dar un argumento válido para su implementación y poder aprovechar cada una de sus ventajas. De igual manera, Rodríguez y Rodríguez Asabay (2006), recomiendan que se hagan variaciones en la influencia de la mano de obra en la soldadura, dado que los resultados obtenidos pueden diferir al variar este parámetro.

Es importante tener noción acerca del comportamiento de este tipo de empalmes, durante el proceso constructivo del elemento del cual haga parte; Park y Choi (2005)

realizaron una evaluación global de daño no destructivo, junto con ensayos experimentales para medir la rigidez fraccional variando parámetros modales, inspecciones radiográficas y ensayos destructivos de tracción en estos elementos para predecir o estimar una resistencia de la soldadura, obteniendo como resultado que el rendimiento de la soldadura en el rango elástico está relacionado con la ubicación de la conexión, por lo que se debe comprobar la efectividad de estos empalmes en las zonas de más exigencia de cada una de las estructuras a analizar.

Desde otra perspectiva, Arriagada Meza (2007), menciona que un campo importante por explorar son los estudios experimentales en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, debido a que en el análisis hecho en su investigación y los antecedentes consultados se centran específicamente en barras de diámetros pequeños y las barras de diámetros grandes han sido investigadas, pero no de manera adecuada para calificar el comportamiento del empalme.

1.2 TIPOS DE EMPALMES EN COLOMBIA

Los empalmes de refuerzo son una necesidad generada en la construcción de estructuras de concreto reforzado, por la disposición de la materia prima en Colombia, las barras de refuerzo se encuentran comercialmente en longitudes de 6.00, 9.00 y 12.00 metros. Los reglamentos y códigos, en búsqueda de garantizar un comportamiento continuo del refuerzo en la estructura de concreto y evitar fallas por empalmes, promueven e incentivan ubicar dichos empalmes lejos de puntos de esfuerzo máximo a tracción.

El NSR-10. Título C.12.14.1, especifica que, en el refuerzo sólo se permite hacer empalmes cuando lo requieran o permitan los planos de diseño; las especificaciones, o si lo autoriza el profesional facultado para diseñar. Lo anterior resalta la importancia de tener empalmes bien diseñados, que garanticen el correcto funcionamiento de las estructuras. Actualmente existen tres tipos de empalmes contemplados en el NSR-10.

1.2.1 EMPALMES POR TRASLAPLO.

Un empalme por traslapo es la unión de dos barras de refuerzo en la cual se debe garantizar una longitud mínima (longitud de desarrollo l_d), de tal manera que se logre desarrollar el esfuerzo a tracción por adherencia al concreto.

Figura 3. Longitud de desarrollo barras de refuerzo

Espaciamiento y recubrimiento	Barra N° 6 o menores y alambres corrugados	Barras N° 7 y mayores
Espaciamiento libre entre barras o alambres que están siendo empalmadas o desarrolladas no menor que d_b , recubrimiento libre no menor que d_b , y estribos a lo largo de L_d no menos que el mín. del título C del reglamento NSR-10 o espaciamiento libre entre barras o alambres que están siendo desarrolladas o empalmadas no menor no menor de $2d_b$ y recubrimiento libre no menor a d_b	$\left(\frac{f_y \cdot \Psi_t \cdot \Psi_e}{2.1 \cdot \lambda \sqrt{f_c}} \right) d_b$	$\left(\frac{f_y \cdot \Psi_t \cdot \Psi_e}{1.7 \cdot \lambda \sqrt{f_c}} \right) d_b$
Otros casos	$\left(\frac{f_y \cdot \Psi_t \cdot \Psi_e}{1.4 \cdot \lambda \sqrt{f_c}} \right) d_b$	$\left(\frac{f_y \cdot \Psi_t \cdot \Psi_e}{1.7 \cdot \lambda \sqrt{f_c}} \right) d_b$

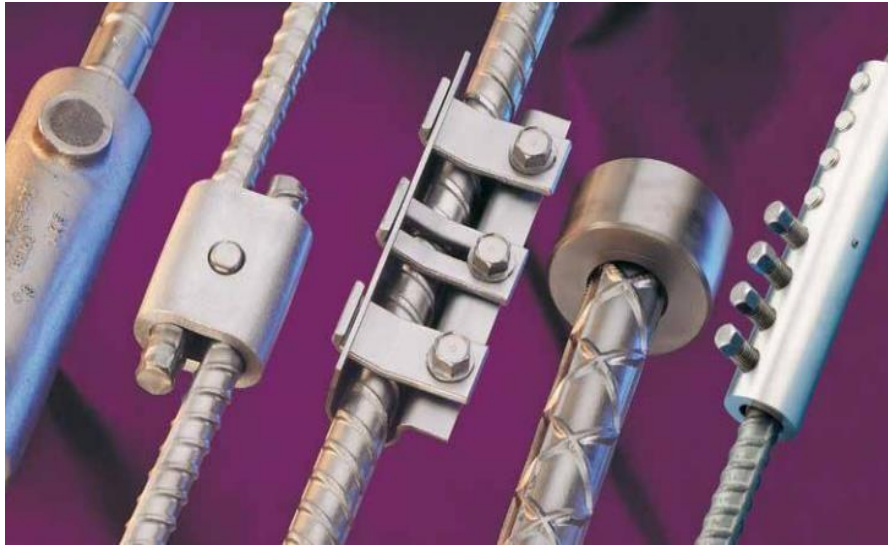
Fuente: NSR-10 C.12.2

El reglamento NSR-10- Título C.12.2, especifica el cálculo de la longitud de desarrollo de barras de acero estructural de acuerdo con lo mostrado en la Figura 3. Longitud de desarrollo barras de refuerzo. También se puede observar que una de las grandes limitantes de los empalmes por traslapo es el espaciamiento y el recubrimiento mínimo, los cuales de no cumplirse aumentan considerablemente la longitud de desarrollo. Esta es la principal desventaja de este tipo de empalme, debido a la gran congestión de refuerzo que genera este tipo de conexión en las zonas de traslapo.

1.2.2 EMPALMES MECÁNICOS

En la medida que edificios y proyectos de infraestructura demandan mayor capacidad en sus solicitudes de diseño, dado la altura y la relevancia, se ha creado la necesidad de limitar los empalmes por traslapo debido a las desventajas anteriormente expuestas.

Figura 4. Tipos de empalmes mecánicos



Fuente: Sistemas de empalmes mecánicos para barras de armaduras (Lenton 2018)

El empalme mecánico asegura el mantenimiento de la continua distribución de la carga en la barra, sin depender de la condición de la existencia del hormigón. En la Figura 4 se muestran algunos de los empalmes mecánicos en Colombia, los de mayor relevancia son empalmes de tipo roscado, extruido y de tornillo.

El reglamento NSR 10 Título C.12.14.3.2 especifica que un empalme mecánico completo debe desarrollar en tracción o compresión, según sea requerido, una resistencia de al menos 1.25 veces el esfuerzo de fluencia de la barra, para asegurar la suficiente resistencia de los empalmes de manera que se pueda producir la fluencia en el elemento y evitarse así la falla frágil.

Empalmes mecánicos roscados de uso comercial en Colombia suelen ser el mayor costo en el mercado (Alvis y Guerra 2017); esta investigación denominada “Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscado en edificaciones” analiza diversos diámetros de barras, cuyos elementos analizados fueron capaces de desarrollar una resistencia de 1.25 veces el esfuerzo de fluencia del material.

1.2.3 EMPALMES SOLDADOS

El reglamento NSR-10 Título. C.12.14.3.3-4 especifica que toda soldadura debe estar de acuerdo con la norma NTC 4040 (procedimiento de soldadura para acero de refuerzo) y un empalme totalmente soldado debe desarrollar una resistencia de por lo menos 1.25 veces el esfuerzo de fluencia del acero.

La soldabilidad del acero está basada en su composición química o equivalente de carbono, en general la norma NTC 2289 abarca barras de refuerzo de acero de baja

aleación, estas pueden ser soldadas teniendo en cuenta ciertas limitantes y controles respecto a su composición química de acuerdo con lo mostrado en Figura 5.

Figura 5. Composición química del acero estructural

<i>Composición química de colada</i>	
<i>Elemento</i>	<i>% máximo</i>
carbono	0.3
manganeso	1.5
fósforo	0.035
azufre	0.045
silicio	0.5

Fuente: NTC2289 Décima actualización)

El precalentamiento mínimo requerido para todos los tamaños de barras de refuerzo de acuerdo con la norma NTC 2289, es la temperatura dada en la tabla 5.2 de la norma NTC 4040. En general, la principal limitante de este tipo empalme es la calidad del soldador de acuerdo con los requerimientos exigidos en la norma NTC 4040.

1.3 LIMITANTES DEL USO DE EMPALMES EN COLOMBIA

1.3.1 EMPALMES MECÁNICOS

De acuerdo con el reglamento NSR-10 sección C.21.1.6.1, Los empalmes mecánicos Tipo 1 no deben usarse dentro de una distancia igual al doble de la altura del elemento, medida desde la cara de la viga o columna para pórticos resistentes a momento especiales, o donde sea probable que se produzca fluencia del refuerzo como resultado de desplazamientos laterales inelásticos. Se pueden usar empalmes mecánicos tipo 2 (roscados y extruidos) en cualquier localización.

1.3.2 EMPALMES SOLDADOS

Referente al reglamento NSR-10 sección C.21.1.6.2, Los empalmes soldados del refuerzo que resiste fuerzas inducidas por sismos no deben usarse dentro de una distancia igual al doble de la altura del elemento, medida desde la cara de la viga o columna para pórticos resistentes a momento especiales, o de donde sea probable que se produzca fluencia del refuerzo como resultado de desplazamientos laterales inelásticos.

Por otro lado, de acuerdo con la sección C.21.1.7, no se pueden soldar estribos, insertos, u otros elementos similares al refuerzo longitudinal requerido por el diseño.

2 MARCO TEÓRICO

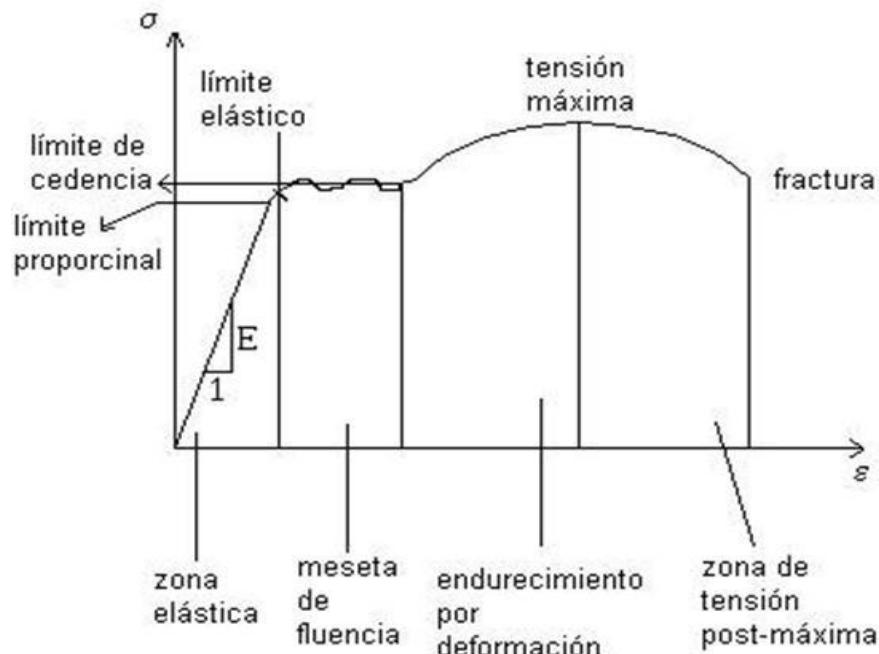
2.1 ACERO ESTRUCTURAL

De acuerdo con Herrera (2014), el comportamiento de acero corrugado normalmente utilizado como refuerzo del concreto estructural, está descrito por la curva monotónica esfuerzo-deformación, en la cual se deben considerar tres tramos:

- Tramo lineal elástico
- Tramo de fluencia
- Tramo de endurecimiento

El acero decrece en la tensión luego de obtener su esfuerzo último en tensión (UTS o máxima tensión desarrollada), producto de una degradación del material, lo cual lo lleva hasta la ruptura, ver Figura 6.

Figura 6. Curva esfuerzo – deformación unitaria

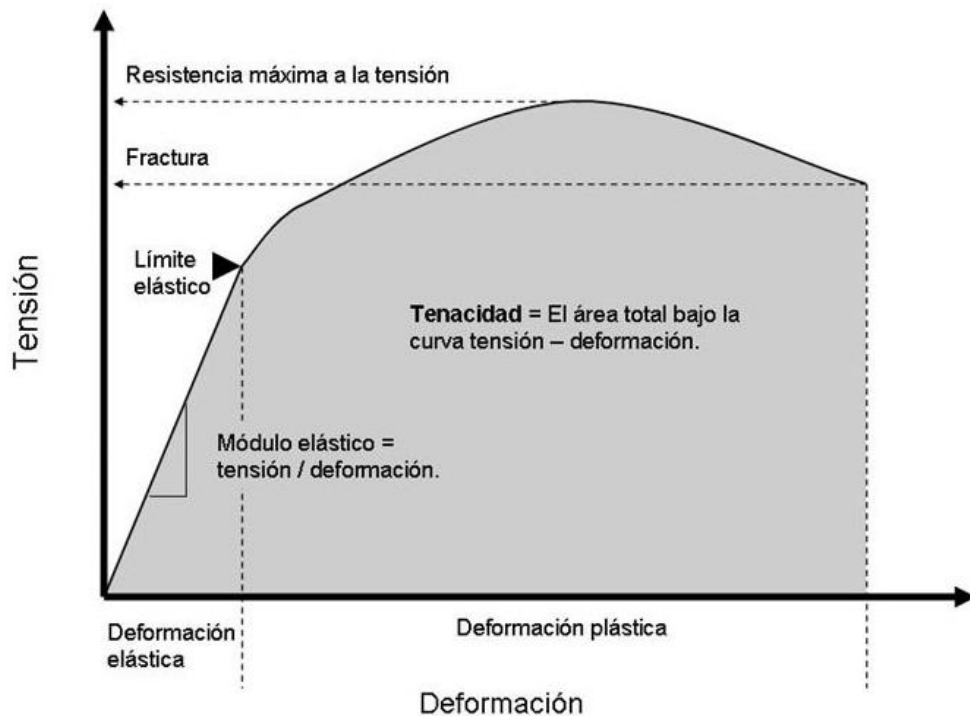


Fuente: <http://encabeceraformacion.blogspot.com/2015/09/analisis-de-materiales-diagramas.html>

Rodríguez y Botero (1995), indican que la curva esfuerzo deformación del acero, es una herramienta básica en el análisis de la capacidad resistente y de deformación de estructuras de concreto reforzado, debido a que se puede observar de manera adecuada el comportamiento elasto-plástico del material.

A partir de esta curva, se pueden obtener parámetros con los cuales se puede caracterizar el comportamiento mecánico del acero como se muestra en la Figura 7. Propiedades mecánicas del acero, por ejemplo, la pendiente del tramo elástico nos proporciona el módulo de elasticidad, el área total bajo la curva obtenida es la tenacidad, adicional a esto podemos medir la capacidad del acero a deformarse bajo diversas cargas aplicadas y podemos saber a partir de la relación entre la deformación del tramo de fluencia y del tramo de endurecimiento que tanta ductilidad puede brindar el material.

Figura 7. Propiedades mecánicas del acero



Fuente: <http://foro.latabernadelpuerto.com/printthread.php?t=139745>

Falla en el acero estructural: Producto de la aplicación de cargas el acero presenta una degradación en su integridad de acuerdo con la magnitud de estas, lo que conlleva a la fractura del material. Según Brick et al (1987), se pueden presentar dos tipos de falla, las cuales son:

Falla dúctil: Este tipo de falla se presenta cuando el material es sometido a deformación plástica excesiva, esto quiere decir que este tipo de fractura aparece en materiales que tienen una zona de deformación plástica considerable. Este tipo de falla se puede reconocer por las siguientes características: Formación cuello de botella en el área fracturada, deformación plástica permanente, elongación del material y reducción de área transversal de la sección. Es importante acotar que la carga

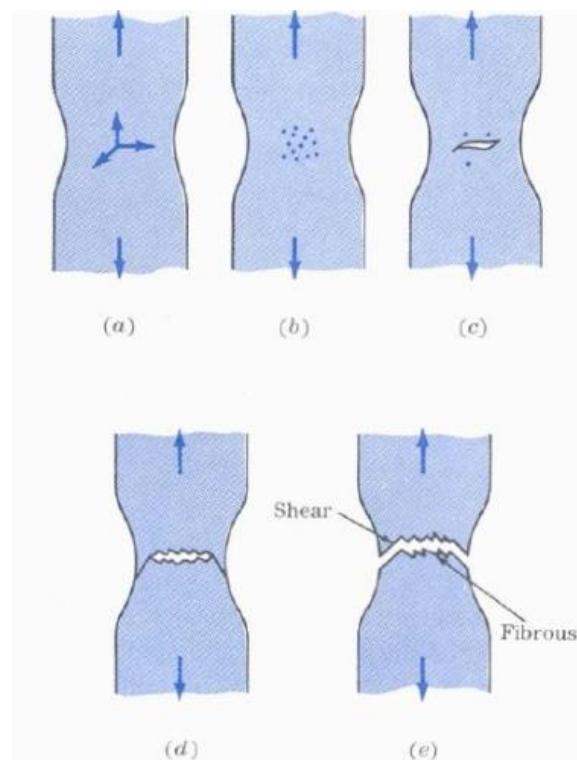
máxima y la carga de fractura no son iguales, debido a que el material presenta deformaciones plásticas, logrando su carga máxima y después pierde capacidad hasta el punto de fractura.

De acuerdo con Smith (1937), la formación de fractura puede definirse en tres pasos:

- Formación cuello de botella y concentración de esfuerzos en la parte central de la probeta (a) y (b).
- Los esfuerzos provocan que el material empiece a fracturarse y al mismo tiempo la fractura empieza a propagarse (c).
- La fractura llega a la superficie y aparece de forma total, provocando la falla de la probeta.

Cada uno de los pasos descritos anteriormente se muestran en la Figura 8.

Figura 8: Falla dúctiles en el acero)



Fuente: Principles of materials science and engineering – William F Smith (1937)

Falla frágil: Es aquella que ocurre antes o durante el momento en el que se presenta una deformación plástica. Este tipo de fractura se presenta principalmente en aquellos materiales no cristalinos en presencia de temperaturas muy bajas (Cuando las temperaturas son muy bajas no existe ningún movimiento atómico, esto evita que se presente una deformación plástica) y en la aplicación de esfuerzos muy elevados. Espinoza (2004)

La falla frágil se puede definir en dos pasos según Brick et al (1987):

- Inicio de la fractura a nivel intergranular
- Propagación de la fractura.

2.2 SOLDADURA

La sociedad americana de soldadura (AWS 3.0) define soldabilidad como la capacidad de un metal para ser soldado bajo las condiciones de fabricación impuestas en una estructura específica diseñada adecuadamente, la cual debe desempeñarse satisfactoriamente de acuerdo con la necesidad estipulada. Issa y Nasr (2006) especifican que el fabricante del material debe suministrar la composición química del material, enfatizando en el contenido de carbono equivalente.

De acuerdo con la NTC4040 para las barras de acero designadas bajo la NTC2289, el carbono equivalente se debe calcular usando la composición química, según se muestre en el análisis químico de la colada del fabricante mediante la fórmula mostrada en la Figura 9

Figura 9. Carbono equivalente

$$.E. = \%C + \% \frac{Mn}{6} + \% \frac{Cu}{40} + \% \frac{Ni}{20} + \% \frac{Cr}{10} - \% \frac{Mo}{50} - \% \frac{V}{10}$$

Fuente: NTC4040.

El carbono equivalente no debe ser mayor a 0.55%. Si no se dispone de los análisis químicos de la colada del fabricante, el análisis químico se puede hacer en barras representativas de las barras que se van a soldar. Si no se conoce ni se obtiene la composición química para barras N6 o de diámetro menor se utiliza un precalentamiento mínimo de 150 °C.

2.2.1 PROCESO DE SOLDADURA

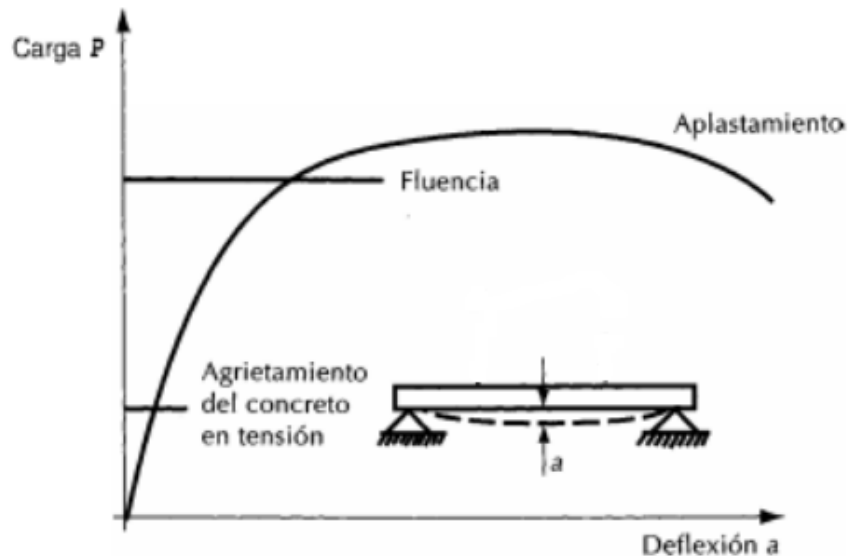
La NTC 4040 exige que la soldadura se debe efectuar por arco metálico protegido (SMAW), arco eléctrico con metal y gas (GMAW) o por arco eléctrico con fundente en el núcleo (FCAW).

2.3 FLEXIÓN PURA

McCormac (2011) afirma que, al colocar cargas transversales sobre una viga de concreto con aporte de refuerzo a tensión, incrementando las cargas gradualmente esta llega a la falla, enfatizando en que durante este proceso el elemento pasa por 3 etapas puntuales, la primera es la etapa de concreto agrietado, la segunda etapa

es la presencia de esfuerzos elásticos y la tercera es la etapa de resistencia última. El mecanismo de falla esperado del elemento al pasar por este proceso es el mostrado en la Figura 10, donde la viga tiene un comportamiento inicial netamente elástico y después de superar el aporte del concreto a esfuerzos de tensión la sección empieza a mostrar fisuras en su integridad.

Figura 10. Curva Carga vs Deflexión de viga con carga en el centro de la luz.



Fuente: Caracterización de fisuras en vigas de concreto reforzado con adición de fibras de polipropileno (Lievano y Gutierrez, 2011)

De acuerdo con González y Robles (2011), a partir de la aparición de las primeras fisuras el comportamiento del elemento ya no es elástico y las deflexiones no son proporcionales a las cargas. En las regiones fisuradas, el acero toma prácticamente toda la tensión. En esta etapa, el esfuerzo en el acero aumenta hasta que alcanza su valor de fluencia. Desde el momento en que el acero empieza a fluir, la deflexión crece en forma considerable, sin que aumente la carga. Los primeros síntomas de la fluencia del acero son un incremento notable en la abertura y longitud de las fisuras y una discontinuidad marcada en la curva de carga.

Los elementos tipo viga, durante su paso por las tres etapas antes del colapso presentan exigencias de tipo momento flector, siendo los puntos de partida del diseño de concreto reforzado, es importante tener claridad en los puntos de mayor momento flector en el elemento, ya que a partir de allí se plantea un ensayo de flexión pura como el mostrado en la Figura 11, para el alcance de esta propuesta. Cabe resaltar que se realiza este ensayo debido a que una viga simplemente apoyada presenta mayores magnitudes de momento al ser sometida a cargas verticales que una viga continua, siendo este el caso más desfavorable al que pueden estar sometidos este tipo de elementos.

Figura 11. Ensayo de flexión pura



Fuente: <http://matensayos.webcindario.com/ensayos/flexion>.

2.4 CARGAS CÍCLICAS

De acuerdo con Uribe y Valencia Clement (2016), la respuesta sísmica esperada de una estructura se logra con la aplicación y el cumplimiento de los requisitos y criterios básicos de diseño, muchos de ellos descritos en los códigos nacionales o internacionales, que incluyen el diseño de los miembros principales y sus conexiones. Dichos códigos, adicionalmente a la teoría tradicional, encuentran sus fundamentos en el estudio de las fallas que ocurren a nivel estructural durante eventos sísmicos severos. Los antecedentes sísmicos hoy se convirtieron en una voz de alerta, que puso en entredicho el comportamiento de las estructuras ante solicitaciones sísmicas, así como las bases del diseño, pues se estableció que estas presentaron niveles de esfuerzo y de deformación superiores a los esperados ante estos eventos, lo que sugería un replanteamiento de los requisitos para conexiones viga-columna de pórticos resistentes a momento (PRM).

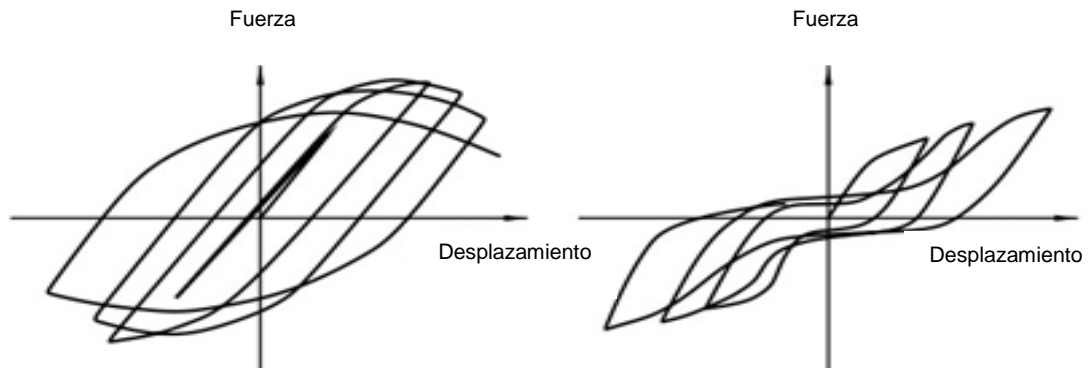
Con el fin de realizar un análisis más cercano a la realidad estructural, la cual es la aplicación de cargas tanto estáticas como pseudoestáticas que puedan simular el comportamiento al que va a estar sometida la estructura, se tomó como punto de partida el ensayo realizado por Parks, Papulak, & Pantelides (2016), donde las conexiones de los elementos se ensayaron ante fuerzas cíclicas, con el fin de obtener las curvas de histéresis, aplicando desplazamientos controlados por medio de un

actuador dinámico, lo cual permite simular efectos de sismo, partiendo de un protocolo de carga que busca someter la estructura a una condición de bajo número de ciclos y amplitudes grandes, teniendo como respuesta deformaciones plásticas lo que traduce en daños en la estructura.

A partir de este ensayo se puede analizar el comportamiento histerético de una estructura, donde, la histéresis es un fenómeno por medio del cual dos, o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo. El comportamiento de los materiales estructurales cuando se ven sometidos a deformaciones o esfuerzos alternantes que están fuera del rango de respuesta lineal, o elástica, ante una sollicitación, presentan deformaciones plásticas las cuales pueden generar daños en la estructura, a partir de allí, una gran parte de la energía que es capaz de disipar el material estructural en el rango inelástico de respuesta, se asocia con el área comprendida dentro de los ciclos de histéresis. (Mayorga Vela, 2011)

Se deben tener consideraciones para el diseño sísmico de estructuras, teniendo en cuenta los códigos de diseño pertinentes para poder desarrollar este tipo de análisis, de acuerdo con el FEMA P-750 las curvas de histéresis típicas que se pueden obtener para analizar el comportamiento de una estructura bajo sollicitaciones de cargas dinámicas son las mostradas en la Figura 12

Figura 12. Curvas típicas de histéresis.



Fuente: FEMA P-750 Pag 114.

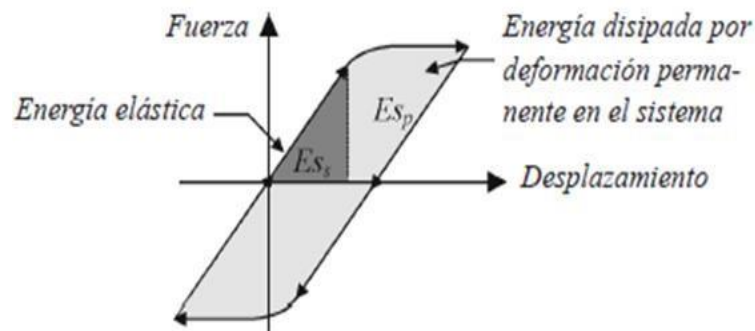
La sucesión de los efectos producidos por el fenómeno descrito, sumado a la incurción en el rango inelástico de la estructura, llevan a que las curvas de histéresis presenten un fenómeno conocido como estrechamiento como se observa en grafica del lado derecho de la Figura 12, en el cual los ciclos se estrechan y se acercan hacia el origen; esta es una característica muy importante dentro de la evaluación

de la capacidad de disipación de energía del elemento, pues mientras más pronunciado sea el estrechamiento, menos eficaz es para absorber la energía inducida por la carga cíclica. Uribe, Valencia Clement (2009).

Un factor determinante en el diseño es la redundancia de la estructura, de acuerdo con el FEMA P-750, con base en el control de este parámetro, un sistema puede tener la capacidad de soportar eventos sísmicos, por lo anterior una estructura que carezca de redundancia, los elementos estructurales, deberían tener la capacidad de disipar energía mediante la inmersión en el rango elástico.

Es importante aclarar y definir puntualmente el término de ciclo histerético, el cual se presenta cuando al material se le impone una serie de ciclos de carga, descarga, y carga en el sentido opuesto, en los cuales los esfuerzos sobrepasan el límite elástico del material, se obtiene este tipo de comportamiento y se conoce con el nombre de respuesta histerética de acuerdo con lo enunciado por Mayorga Vela (2011) y lo mostrado en la Figura 13, es importante acotar que el área bajo la curva de histéresis cuantifica la capacidad de disipación de energía de un elemento.

Figura 13. Ciclo de histéresis en un sistema.

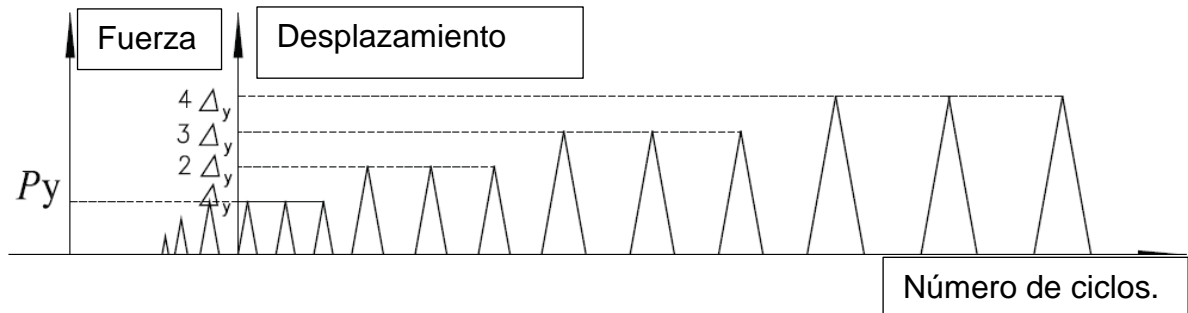


Ciclo de histéresis en un sistema estructural, energía elástica e inelástica

Fuente: Mayorga Vela (2011)

Zhang et al (2018) definen las curvas de histéresis como una relación de carga con desplazamiento bajo ciclos de carga y descarga, a partir de las cuales se puede analizar el comportamiento elasto plástico enfatizando en la respuesta sísmica de la estructura. La aplicación de carga se debe realizar de acuerdo con lo mostrado en la Figura 14, la cual relaciona el número de ciclos vs la fuerza aplicada a un elemento para obtener la curva de histéresis que lo identifica, a partir de la cual se puede cuantificar la capacidad de disipación de energía del elemento.

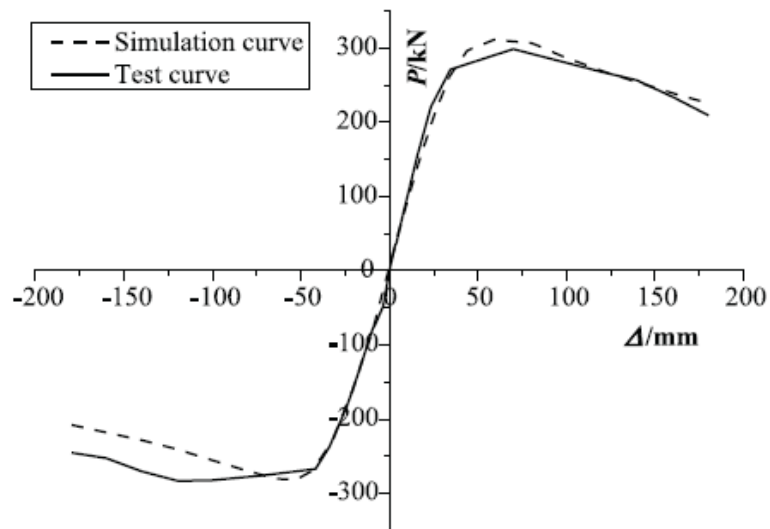
Figura 14. Ciclos de carga y descarga.



Fuente: Zhang et al (2018).

Posterior a la construcción de la curva de histéresis del elemento, se puede construir la curva de Skeleton. De acuerdo con Fa-Xing et al (2017), esta curva es de vital importancia ya que relaciona los picos de carga y el desplazamiento obtenido durante cada ciclo de carga, las curvas de Skeleton pueden ser obtenidas a partir de la unión de los puntos pico de carga en cada ciclo de histéresis. La curva típica obtenida en función de las dos variables anteriormente enunciadas se presenta en la *Figura 15*. Curva de skeleton típica .

Figura 15. Curva de skeleton típica



Fuente: Experimental study on a seismic performance of Steel reinforced recycled concrete frame structure under load cycling reversed loading, Fa-Xing et al (2017).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.1.1 CONCRETO

Se utilizó concreto estructural ARGOS para sistemas industrializados con la especificación que se presenta en la Tabla 1

Tabla 1. Especificaciones de diseño del concreto estructural premezclado

ESPECIFICACIÓN	VALOR	OBSERVACIONES
Asentamiento	6" +/- 1" (125 mm +/- 25 mm).	Evaluado de acuerdo con la NTC 396 (ASTM C 143).
Resistencia especificada a compresión (7 días).	De 21 MPa (3000 psi).	Evaluada de acuerdo con la NTC 673 (ASTM C 39).
Tamaño máximo nominal del agregado.	1/2", (12,5 mm).	Evaluado de acuerdo no la NTC 174
Fraguado inicial	6 h +/- 2 horas.	Evaluado de acuerdo con la NTC 890 (ASTM C 403).
Fraguado final	9 h +/- 2 horas	Evaluado de acuerdo con la NTC 890 (ASTM C 403)

3.1.2 BARRAS DE REFUERZO

El acero estructural utilizado en esta investigación cumple con los requerimientos estipulados por la NTC2289 de acuerdo con el fabricante. A continuación, se resumen los parámetros de composición química, elongación y resistencia a la tracción.

- **Composición:** La composición química debe limitarse a lo especificado en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química del acero

Composición química de la colada	
Elemento	%máximo
carbono	1.50
fósforo	0.035
azufre	0.045
silicio	0.50

Fuente: NTC2289 (DECIMA ACTUALIZACIÓN).

- **Requisitos de tracción:** Los requisitos de resistencia y elongación mínima estipulados por la NTC2289. Tabla 3.

Tabla 3. Requisitos de resistencia acero.

Resistencia a la tracción mínima psi (MPa)	80 000 (550) ^a
Resistencia a la fluencia mínima psi (MPa)	60 000 (420)
Resistencia a la fluencia máxima psi (MPa)	78 000 (540)
Alargamiento mínimo en 8 pulgadas para el sistema inglés o 200 mm para Sistema internacional (SI)	
Número de designación de las barras	%
2, 3, 4, 5, 6	14
7, 8, 9, 10, 11	12
14, 18	10
^a La resistencia a la tracción debe ser igual o mayor a 1.25 veces la resistencia a la fluencia.	

Fuente: NTC2289 (DECIMA ACTUALIZACIÓN).

3.1.3 SOLDADURA

La soldadura empleada en la fabricación de cada una de las probetas corresponde a **GRIDUCT-9 E9018-G**; soldadura que se caracteriza por su alta resistencia y fácil aplicación, de modo que se garantiza un comportamiento adecuado como mecanismo de enlace entre dos metales.

- **Características:** El electrodo de revestimiento básico con polvo de hierro de alto rendimiento que presenta arco estable de fácil encendido y escasa salpicadura. Para unir acero de baja y mediana aleación, en tuberías y construcciones de calderas, arco estable sin salpicaduras, fácil desprendimiento de escoria, cordones finos sin socavaciones.
 - Alargamiento (L=5d): (18 - 20) %.
 - Límite elástico: (700 - 750) N/mm² (101,61 - 108,87) ksi.
 - Resistencia a la tracción: (770 - 840) N/mm² (111,45 - 121,58) ksi.

Genera depósitos de muy buena apariencia con escoria de fácil remoción.

- **Datos técnicos:** Electrodo (SMAW), resistencia a la Tensión: 90,000 Lb/Pulg², tipo de corriente: CA - CD Electrodo Positivo (Polaridad Inversa).

- **Aplicaciones:** Electrodo bajo hidrogeno, todas posiciones, alta resistencia al calor y a la corrosión en ambientes sulfurosos, se puede aplicar en aceros de alta resistencia y tratados térmicamente (templados y revenidos).

3.1.4 TUBERÍA DE REFUERZO

Para la construcción del empalme, se utilizó tubería de acero al carbón SCH 160 de 1"; cumpliendo con la normatividad ASTM A500- ASTM A53- ASTM A106, las propiedades físicas de dicho material se presentan en la Tabla 4. La tubería de refuerzo tiene como objetivo aumentar el factor de seguridad en el empalme y en consecuencia mitigar el impacto de la mano de obra no calificada del soldador.

Tabla 4. Especificaciones tubo de refuerzo.

Diámetro nominal	Cédula ca-libre	Diámetro Ext.		Diámetro Int.		Espesor		Peso
		Pulg.	mm	Pulg.	mm	Pulg.	mm	Kg/m
1"	80	1.315"	33.4	0.957"	24.31	0.179	4.55	3.229

3.1.5 TERMINAL ROSCADO

Este sistema está basado en los principios de la teoría cónica de distribución de la carga, y cumplen con los requerimientos del reglamento NSR-10. C.12.6 (Desarrollo de las barras corrugadas con cabeza y ancladas mecánicamente en tracción).

El terminal roscado se utiliza para remplazar el gancho estándar cuando existen limitaciones constructivas. El terminal roscado utilizado se muestra en Figura 16.

Figura 16. Terminal roscado.



Fuente: www.ramalza.com

3.1.6 EMPALME MECÁNICO

Los empalmes mecánicos roscados deben cumplir con el reglamento NSR 2010, donde se especifica que su uso es permitido siempre y cuando sea capaz de desarrollar una resistencia de 1.25 veces el esfuerzo de fluencia del acero de acuerdo con la NTC 2289. El empalme mecánico utilizado se muestra en la Figura 17. Empalmes mecánicos.

Figura 17. Empalmes mecánicos.



Fuente: www.ramalza.com

3.1.7 STRAIN GAUGE

Es un sensor cuya resistividad varía de acuerdo con la carga aplicada convirtiendo ese valor en una variación de voltaje la cual puede ser medida para ser correlacionada con desplazamientos y deformaciones. A continuación, se muestran las especificaciones técnicas de los sensores utilizados. Las especificaciones de los elementos utilizados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones Strain gauge

MECHANICAL PROPERTIES	
Maximun Strain	3% or 30000 microstrain
Hysteresis	Negligible
Fatigue (at +/- 1500 microstrain)	>10000000 cycles
Smallest Bending Radius	3 mm
Transverse Sensitivity	--

Fuente: www.omega.com

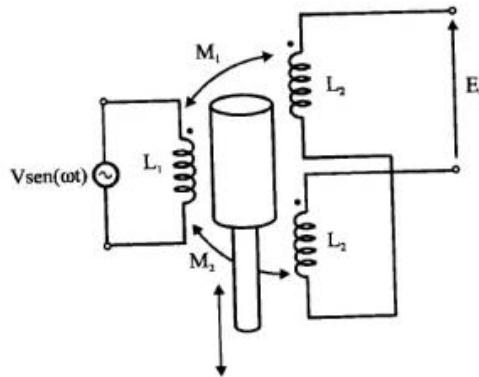
3.1.8 LDVT

Es un dispositivo de sensado de posición que provee una salida de C.A. proporcional al desplazamiento de núcleo que pasa a través de sus arrollamientos. Los sensores de distancia tipo LVDT son elementos de medida inductivos. Dichos elementos se basan en el principio inductivo de transformador de núcleo variable. Esto permite que un movimiento lineal del núcleo en el interior del cuerpo del sensor provoque una variación de inducción entre primario y secundario, lo que se traduce en un cambio de señal de salida, proporcional a ese desplazamiento (ingmecafenix 2019).

El transformador posee tres bobinas dispuestas extremo con extremo alrededor de una barra. La bobina central es el devanado primario y las externas son los secundarios. Un núcleo ferromagnético de forma cilíndrica, sujeto al objeto cuya posición desea ser medida, se desplaza respecto a las bobinas a lo largo del eje de la barra.

Cuando una corriente alterna circula a través del primario, causa un voltaje que es inducido a cada secundario proporcionalmente a la inductancia mutua con el primario. La frecuencia del oscilador que causa la corriente alterna está en el rango de 1 a 10 kHz.

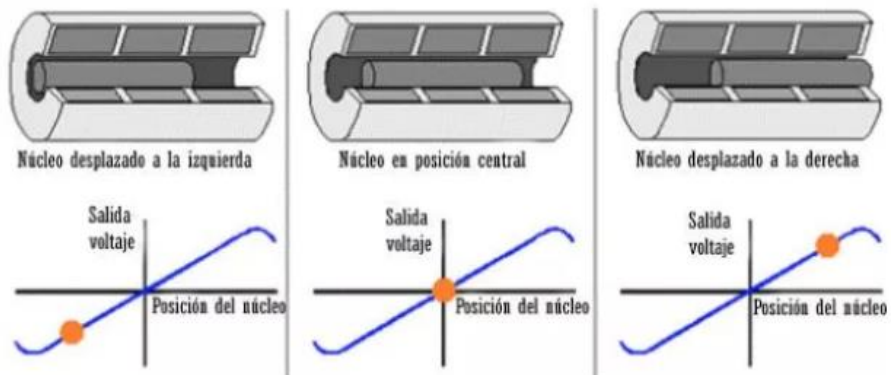
Figura 18. Especificaciones LVDT.



Fuente: Funcionamiento_www.ingmecafenix.com

A medida que el núcleo se mueve, la inductancia mutua cambia, causando que el voltaje inducido en el secundario cambie. Las bobinas están conectadas en serie, pero invertidas, así que el voltaje de salida es la diferencia (por eso es “diferencial”) entre los dos voltajes secundarios. Cuando el núcleo está en su posición central, se encuentra equidistante a los dos secundarios, los voltajes inducidos son iguales, pero de signo opuesto, así que el voltaje de salida es cero (ingmecafenix 2019).

Figura 19. Especificaciones LVDT, proceso cíclico.



Fuente: Funcionamiento_www.ingmecafenix.com

Final mente se resalta que se utilizó un OMEGA MODELO LD 620 con una precisión de 1 micrómetro 10^{-6} m.

3.1.9 CANTIDADES

En la Tabla 6 se especifican se realiza una descripción de los materiales utilizados junto con las cantidades utilizadas.

Tabla 6. Cantidades totales de la investigación

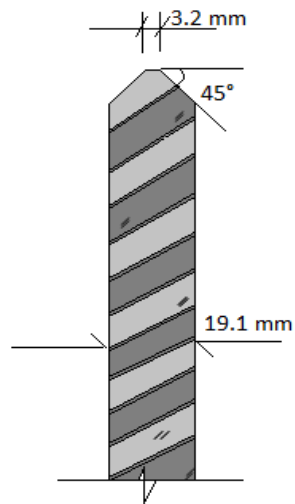
Rubro	Descripción	Longitud (m)	Volumen (m)	peso (kg)	Cantidad (Un)
Camisa de acero	SHC-160	6	-	19.37	-
Acero estructural	#6 NTC2289 $F_y=420$ Mpa	602	-	134.55	-
Acero estructural	#4 NTC2289 $F_y=420$ Mpa	164.6	-	148	-
Soldadura	90-18b Electrodo 1/8"	-	-	12	-
Concreto estructural	24 Mpa/6" Asentamiento/Grava1/2"	-	1.25	-	-
Cabezas Roscadas	Acople reemplazo gancho estándar #6	-	-	-	8
Empalme mecánico	#6 Roscado Ramalza SA	-	-	-	5
Strain gages	Omega	-	-	-	10
Resina Epódica	Epoximil	-	-	-	2
Limpiador	CRC	-	-	-	1
Formaleta	-	-	-	-	-
Alambre dulce	-	30	-	-	1

3.2 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

3.2.1 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE EMPALMES SOLDADOS

Paso 1: Biselado de barras: Se hizo un doble bisel a 45° en una de las barras a empalmar de acuerdo con las especificaciones en la NTC 4040 capítulo 3.5 (uniones a tope directas). Ver Figura 20.

Figura 20. Esquema doble bisel a 45°.



En la Figura 21 se muestra uno de los biseles fabricados; este mecanizado se realizó utilizando una tronzadora de disco.

Figura 21. Mecanizado de barra con doble bisel a 45°.



Paso 2: Mecanizado de la tubería de refuerzo: Se mecanizó la tubería de refuerzo SCH 160 con el fin de obtener secciones de 100 mm de largo, posterior a ello se realizaron 4 ranuras de 35 mm por 10 mm de ancho, finalmente se realizó un corte longitudinal dividiendo la sección en 2 mitades iguales; como se muestra en la Figura 23 y

Figura 23. Esquema de mecanizado tubo de refuerzo

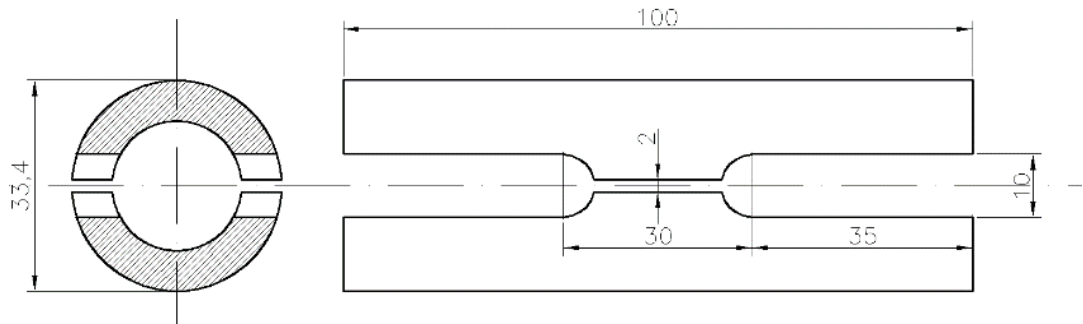
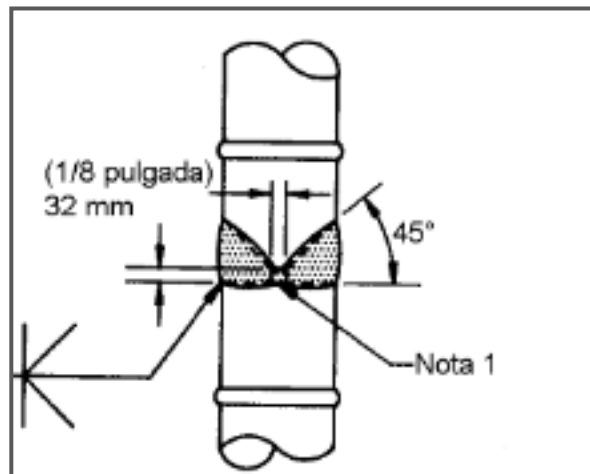


Figura 22. Mecanizado de tubo de refuerzo realizado



Paso 3: Soldadura en ranura en bisel doble: Como tercera medida se hizo un cordón de soldadura para uniones a tope indirectas como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, este procedimiento se encuentra estipulado en la NTC4040 Sección 3.5. Para llevar a cabo esta actividad se utilizó un electrodo revestido GRIDUCT-9 E9018-G con un equipo de 200 amperios.

Figura 24. Soldadura en ranura en bisel doble para barras corrugadas.



Fuente: NTC4040.

En la Figura 25. Soldadura realizada en las probetas de acuerdo con la NTC4040 se muestra la soldadura elaborada en las probetas de acuerdo con lo descrito anteriormente.

Figura 25. Soldadura realizada en las probetas de acuerdo con la NTC4040



Paso 4: Unión soldada de camisa de refuerzo: Se localizo de una manera equidistante las dos mitades de cada camisa de refuerzo, sobre la unión soldada a tope, posterior a ello, se realizaron cordones de soldadura en cada una de las 4 ranuras llenándolas en su totalidad (ver Figura 26).

Nota: Con la finalidad de prevenir porosidades y discontinuidades se debe remover la escoria generada cada vez que se realice un cordón de soldadura.

Es importante acotar que durante el proceso de soldadura no deben existir grietas ni en el material de aporte (soldadura), ni en el metal base en la zona afectada por el calor. Se debe llenar completamente las ranuras que existen, entre el tubo metálico y la barra, lo cual garantiza una fundición total del material de aporte, evitando cualquier tipo de porosidad que pueda generar una zona débil en el cuerpo de la soldadura.

Es importante dejar enfriar las barras completamente antes de realizar cualquier montaje o manipulación de la probeta, de no ser así, se puede afectar la integridad del elemento generando comportamientos atípicos.

Figura 26. Unión barras de refuerzo con camisa perimetral



3.2.2 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE EMPALMES MECÁNICOS

Paso 1: Roscado de barras: Se realizó el roscado de las barras en el extremo libre a empalmar, para lo cual se empleó una maquina roscadora del proveedor del empalme RAMALZA (ver Figura 27)

Figura 27. Roscado de barras corrugadas.



Paso 2: Roscado de barras: Se conecto el empalme mecánico en cada uno de los extremos roscados con ayuda de una llave de tubo. En función de lo anterior, es

Figura 28. Ajuste de empalme mecánicos.



importante recalcar y garantizar que el empalme abarque la totalidad del roscado cuando se realice el torque (ver Figura 28).

3.2.3 ENSAYO A TRACCIÓN DE EMPALMES SOLDADOS

Se realizaron 43 ensayos de tracción pura en el banco de prueba (maquina universal) de la Pontificia Universidad Javeriana; ver Tabla 7, descripción y cantidad de las probetas ensayadas

Tabla 7. Cantidad de probetas analizadas

<i>Tipo de probeta</i>	<i>Descripción</i>	<i>Longitud</i>	<i>Cantidad</i>
barra sin empalme	-	0.6	8
barra con empalme soldado	Soldadura 90-18	0.6	28
barra con empalme mecánico	Conector Roscado	0.6	5
			43

En la Tabla 8 se muestra la nomenclatura para cada una de las probetas.

Tabla 8. Probetas fabricadas.

<i>Nomenclatura de probetas</i>		<i>Probetas empalme soldado</i>	
ES	Empalme soldado (98-10)	ES-1	ES-16
EM	Empalme mecánico	ES-2	ES-17
BC	Barra control	ES-3	ES-18
IES	IES Empalme soldado (70-18)	ES-4	ES-19
		ES-5	ES-20
		ES-6	ES-21
		ES-7	ES-22
		ES-8	ES-23
		ES-9	ES-24
		ES-10	ES-25
		ES-11	ES-26
		ES-12	ES-27
		ES-13	ES-28

<i>Probetas empalme mecánica</i>	
EM-1	EM-4
EM-2	EM-5
EM-3	

<i>Barras de control</i>	
BC-1	BC-4
BC-1	BC-5
BC-3	BC-6

Paso 1: Datos de entrada a la máquina: Se configuró la maquina universal para cada uno de los ensayos realizados, de acuerdo con los parámetros mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de entrada.

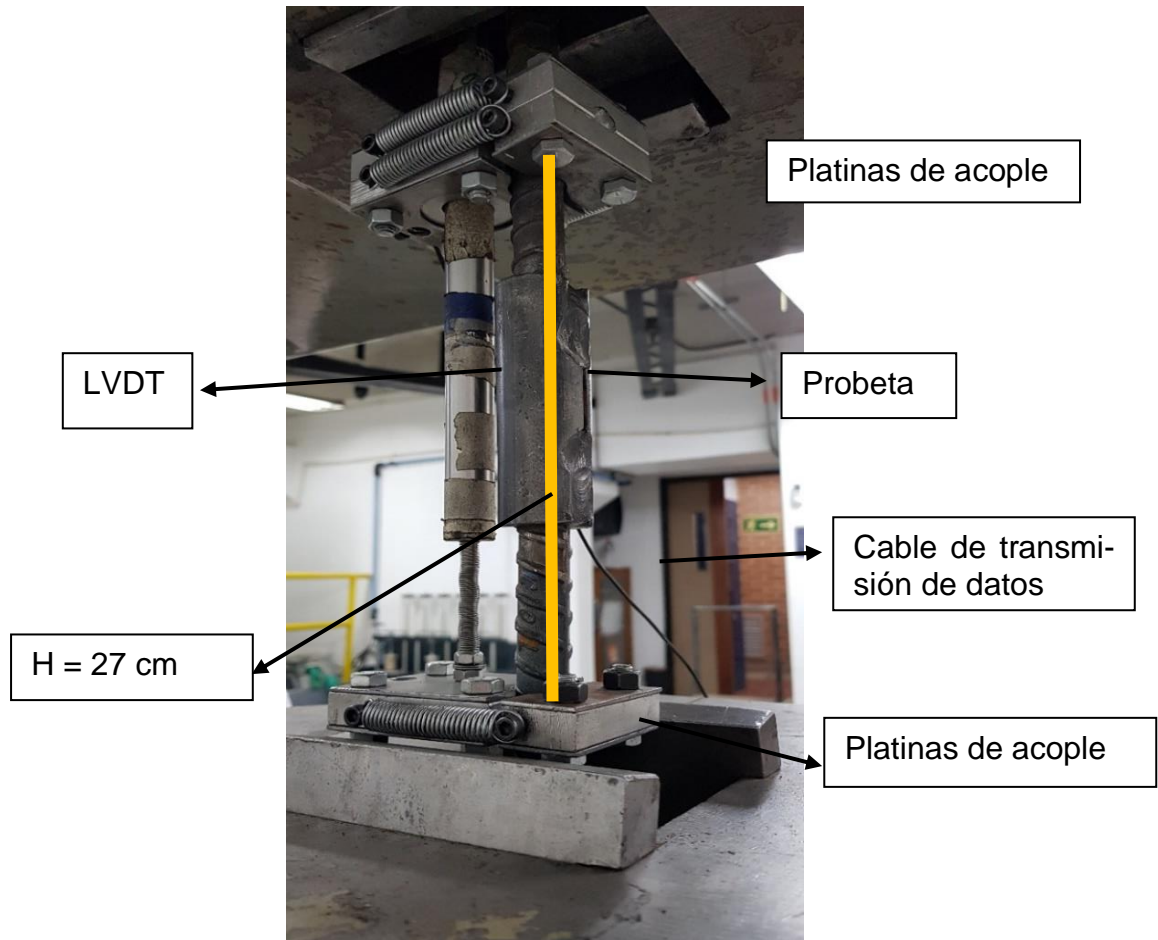
Parámetros		
Area barra	284	mm ²
Diametro barra	19.1	mm
Frecuencia	800	carga/800 mseg
Velocidad	20	mm/min

Paso 2: Medición de las dimensiones de probetas: Se midió la longitud total de cada probeta garantizando una medida de 0.60 m para un posicionamiento adecuado en el montaje.

Paso 3: Montaje de la probeta: Se generó una marca a 10 cm de los extremos libres de cada probeta, con el fin de garantizar una longitud libre de 40 cm entre las mordazas de fijación de la máquina. Posterior a ello, se posiciona la probeta en las mordazas con respetando la marca de 10 cm en cada extremo.

Se implementó un dispositivo de acople con el fin de posicionar paralelamente el sensor de distancia (LVDT) con cada probeta como se muestra en la Figura 29.

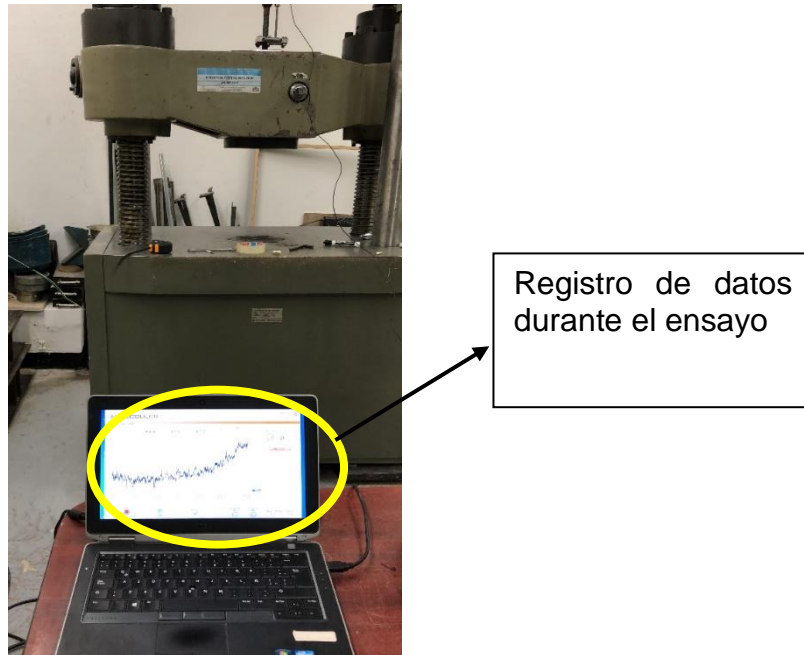
Figura 29 Montaje de probetas para ensayos a tracción.



Paso 4: Inicio del ensayo: Consecutivamente al montaje de la probeta, se debe revisar que el sensor de distancia (LVDT), y su funcionamiento adecuado; es decir, que reporte deformaciones en tiempo real, lo cual se puede constatar en la lectura de datos mostrada en el software INGEMODULER en este caso, luego se da inicio al ensayo.

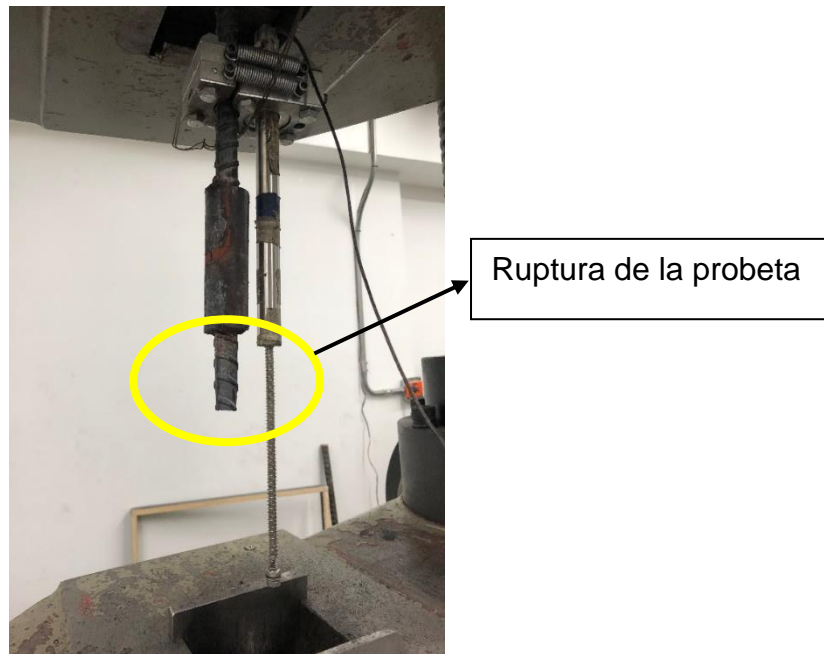
Nota: es importante señalar que el registro de datos de deformación se debe iniciar paralelamente con la aplicación de carga en la probeta, esto con el fin de que cada carga reportada tenga su respectiva deformación y no presente incoherencias en la toma de datos durante el desarrollo del ensayo. De acuerdo con los mostrado en la Figura 30

Figura 30. Desarrollo de ensayo a tracción de probetas.



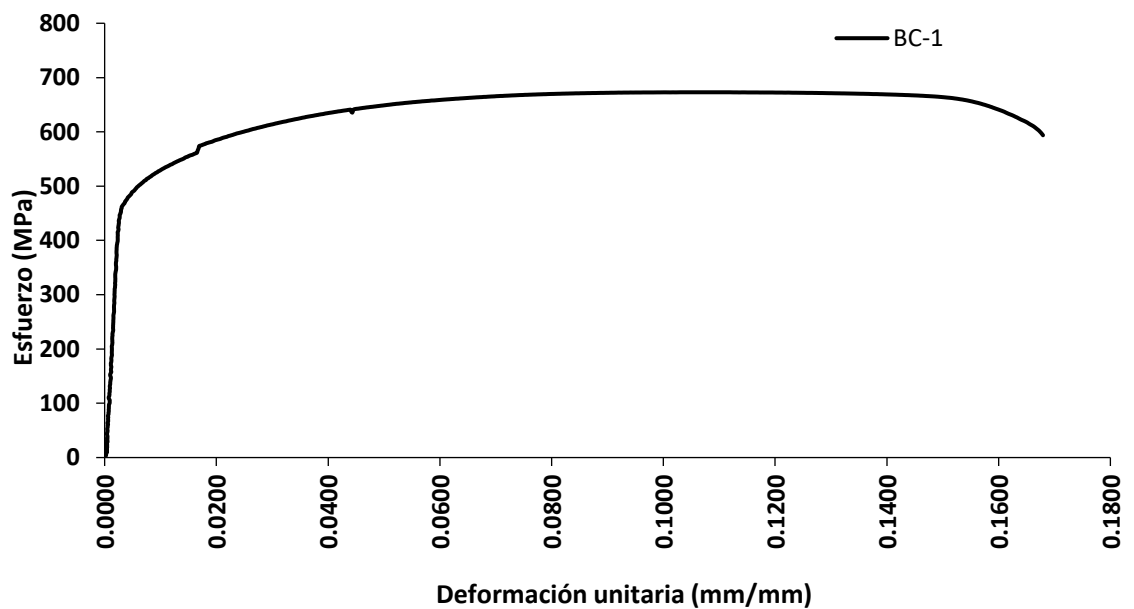
Paso 5: Fin del ensayo: En el momento justo que se genere la ruptura de la probeta se debe detener el ensayo, esto con el fin de evitar que se registren datos irrelevantes que generen inconsistencias en el procesamiento, posterior a ello, tanto el programa INGEMODULER como la maquina universal, generan un archivo de Excel y un archivo de texto donde se registran todas las deformaciones y cargas obtenidas durante el ensayo. En la Figura 31, se muestra la finalización de uno de los ensayos realizados.

Figura 31. Finalización del ensayo a tracción.



Paso 6: Procesamiento de datos: Finalizado el ensayo, se deben organizar los datos obtenidos empalmando las cargas reportadas por la maquina universal con su respectiva deformación, con el fin de generar una gráfica esfuerzo deformación que permita observar de una manera clara y adecuada el comportamiento de las probetas. En la Figura 32, se muestra una de las gráficas obtenidas.

Figura 32. Curva esfuerzo deformación unitaria obtenida para una de las probetas.



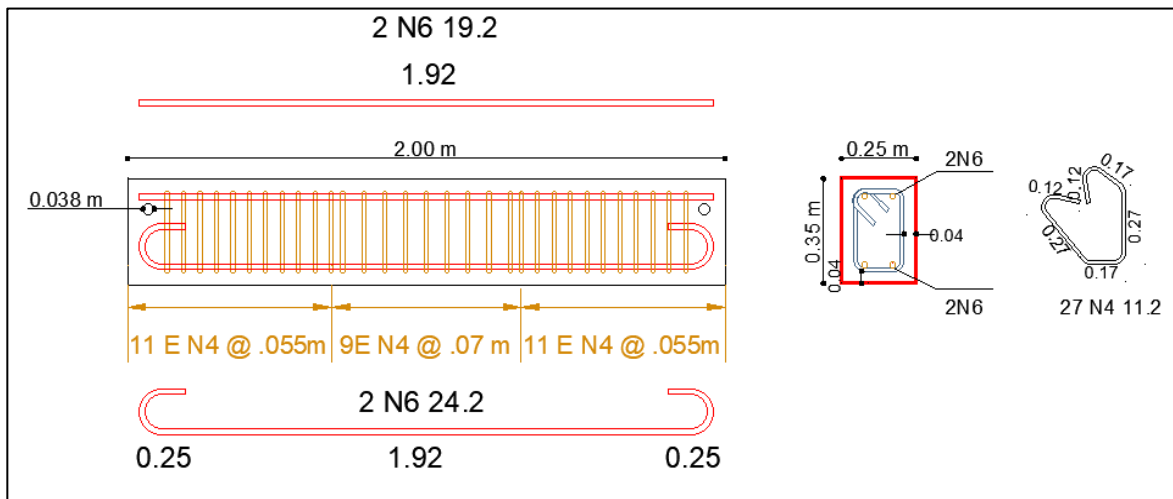
3.2.4 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE VIGAS

Se construyeron 5 elementos de concreto reforzado tipo viga con una longitud de 2.00 m de largo y una sección transversal de 0.25x0.35 m, la selección de estas medidas se realizó teniendo en cuenta las herramientas proporcionadas por la Pontificia Universidad Javeriana como el marco de carga y actuador pseudoestático para una óptima y adecuada ejecución de los ensayos.

Paso 1: Planos estructurales: Se elaboro el despiece de cada uno de los elementos tipo viga a experimentar o ensayar en AUTOCAD, los cuales se muestran en la Figura 33, Figura 34 y Figura 35.

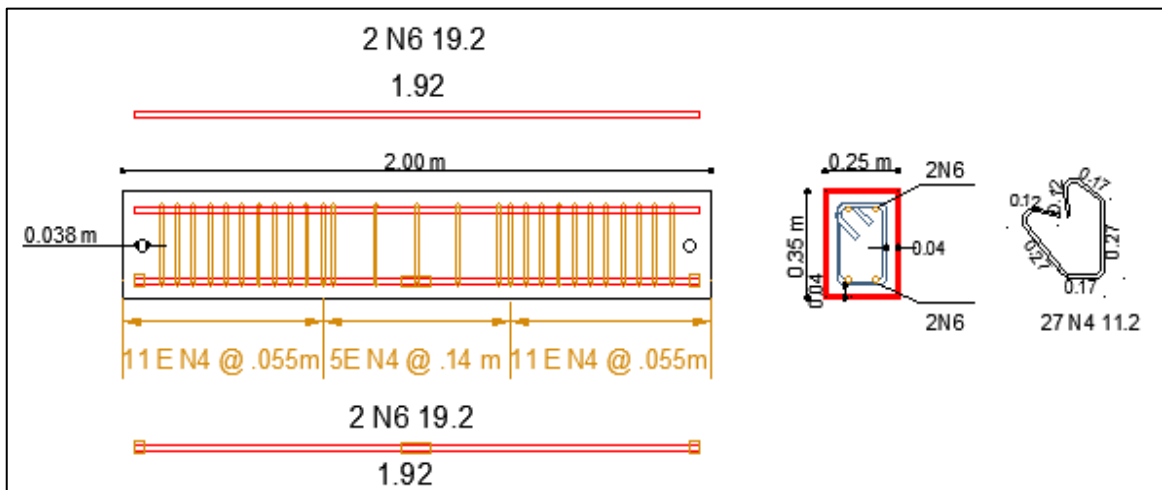
CANTIDAD = Una (1).

Figura 33. Plano de despiece viga patrón (sin empalmes).



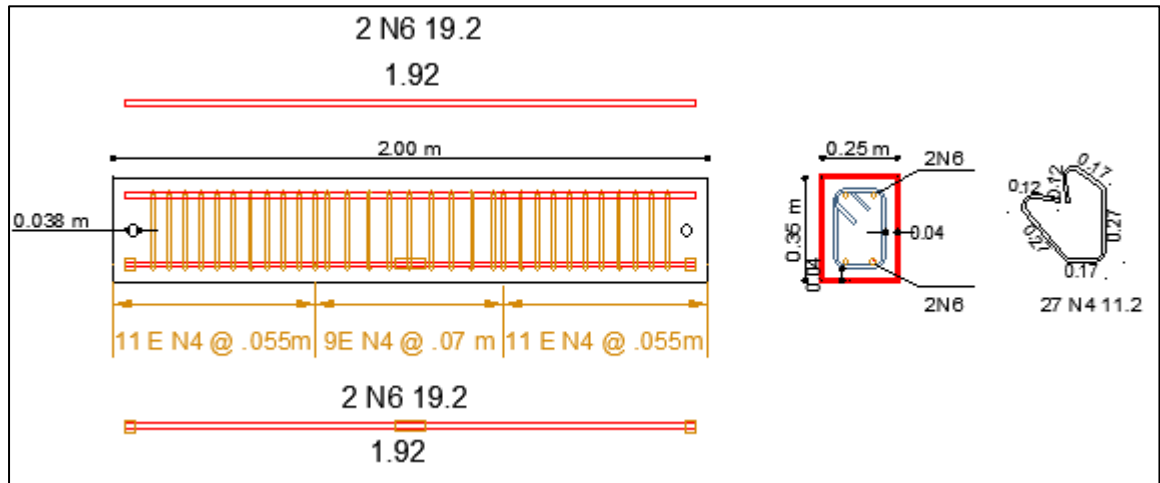
CANTIDAD = Dos (2).

Figura 34. Plano de despiece viga con empalmes soldados y estribos a 0.14 cm en el centro de la luz.



CANTIDAD = Dos (2).

Figura 35. Plano de despiece viga con empalmes soldados y estribos a 0.07 en el centro de la luz.



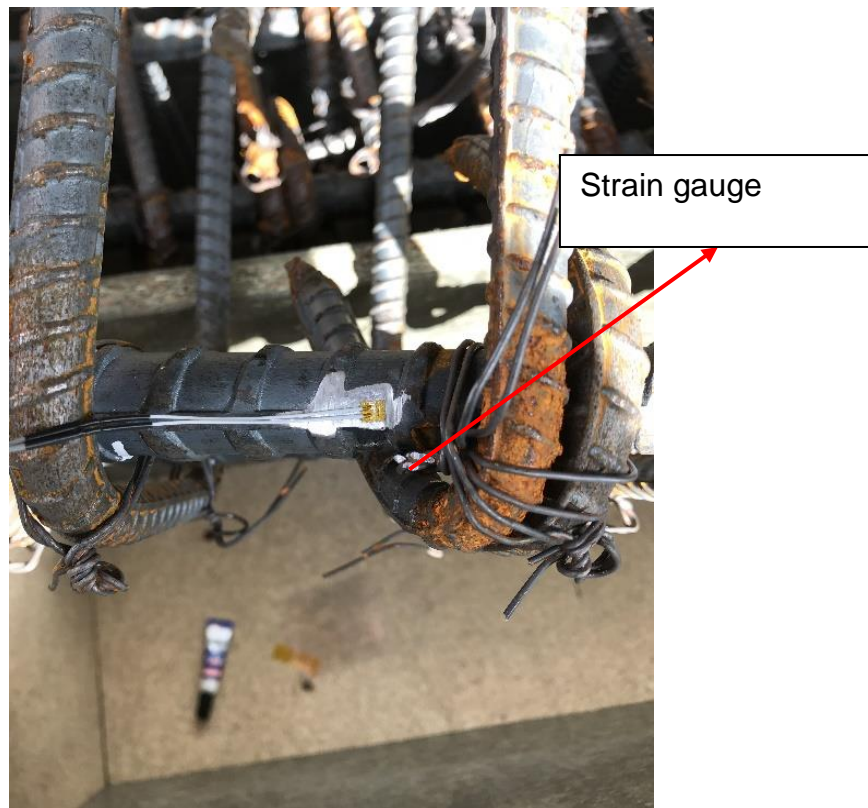
Paso 2: Formaleta y armado de acero estructural: Se utilizó una formaleta de madera proveída por la Pontificia Universidad Javeriana de acuerdo con las medidas consideradas, actividad que se realizó en el patio de mezclas de la universidad. Por otra parte, con la ayuda de una cuadrilla de obra, se realizó el armado de cada elemento de acuerdo con los planos estructurales elaborados previamente. En la Figura 36, se muestra la formaleta y el armado de cada uno de los elementos.

Figura 36. Armado de formaleta y acero de refuerzo.



Paso 3: Instrumentación: Se generó un proceso de instrumentación donde se localizaron 2 sensores tipo strain gauge a 5 cm de cada extremo de los empalmes soldados, con el fin de medir la deformación real de las barras de refuerzo en una zona colindante con cada unión. Para realizar este proceso se generó un limado manual de aproximadamente 2 cm con el fin de tener una superficie lisa y sin rugosidades garantizando el buen trabajo del sensor, luego de esto, se preparó la superficie con un limpiador PVC de acero para poder fijar cada uno de los elementos con un pegante de secado rápido y posterior a ello, se recubrió la unión con una resina epóxica que actúa como soldadura fría en metales, mitigando efectos como el paso de agua. Es importante dejar secar esta resina aproximadamente 2 días antes del vaciado de los elementos. En la Figura 37 se muestra la instalación de un strain gauge en una de las probetas construidas.

Figura 37. Proceso de instalación strain gauge.



Paso 4: Vaciado de concreto Para finalizar la construcción de las probetas, se realizó el vaciado de concreto de cada uno de los elementos con el concreto estructural enunciado en este capítulo. Se dispuso una cantidad de concreto estructural adicional para la elaboración de cilindros de prueba con el fin de realizar ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad para verificar las características del concreto premezclado emitido por ARGOS. En la Figura 38 se muestra el de vaciado de concreto de cada una de las probetas.

Durante el vaciado es importante dejar los cables de transmisión de datos de los strain gauges por fuera de la formaleta para evitar daños en estos elementos. Por otra parte, se debe tener especial cuidado en la etapa posterior al vaciado, ya que se debe generar el curado de concreto con el fin de finalizar el proceso de hidratación de las partículas de cemento, posterior a ello se debe recubrir cada una de las probetas con papel vinipel o cualquier otro material impermeable para evitar pérdida de agua evitando afectaciones en la resistencia final como se muestra en la Figura 38.

Figura 38. Proceso de vaciado de concreto de probetas tipo viga.



Paso 5: Desencofrado de probetas: Dependiendo el tiempo adquisición de resistencia final especificado del concreto estructural utilizado, se procede a desencofrar cada probeta, luego de esto, las probetas estarían listas para efectuar los ensayos respectivos.

Figura 39. Recubrimiento de probetas.



3.2.5 ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS

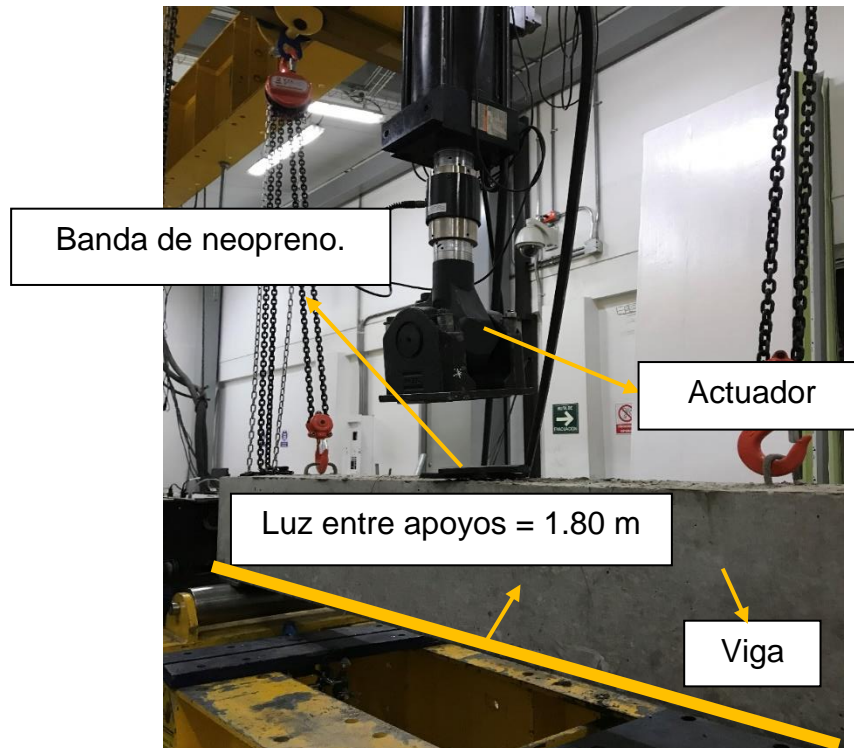
Se realizaron 5 ensayos de flexión pura sobre elementos tipo viga en el laboratorio de estructuras de La Pontificia Universidad Javeriana, donde una viga se denominó viga patrón, fabricada con barras que no tienen empalmes soldados. Por otro lado, las probetas restantes se denominaron muestras de prueba en las cuales se utilizaron empalmes soldados con el fin de comparar el comportamiento estático y Pseudoestático de las mismas. En la Tabla 10 se muestra las consideraciones y especificaciones constructivas de cada elemento.

Tabla 10. Especificaciones de probetas tipo viga.

<i>Nombre probeta</i>	<i>diámetro barra (n)</i>	<i>separación estribos (s)</i>	<i>tipo de armado</i>	<i>tipo de ensayo</i>	<i>instrumentación Strain gauge</i>
D6S7N1	6	7	Sin empalme	Estático	1 sensor a la mitad de la luz
D6S7E1	6	7	Con empalme	Estático	1 sensor a cada lado de un empalme
D6S14E1	6	14	Con empalme	Estático	"hubo falencias en la recopilación de datos; afectación del sensor"
D6S7E2	6	7	Con empalme	Pseudoestático	1 sensor a cada lado de un empalme
D6S14E2	6	14	Con empalme	Pseudoestático	hubo falencias en la recopilación de datos; afectación del sensor"

Paso 1: Montaje: Cada elemento se posicionó en el marco de carga del laboratorio, para lo cual se contó con una cuadrilla de obra para realizar un adecuado proceso de izaje debido al peso y a las dimensiones de cada elemento, posterior a ello, se ubicó el actuador pseudoestático en el centro de cada probeta con el fin de generar una aplicación de carga equidistante como se muestra en la Figura 40.

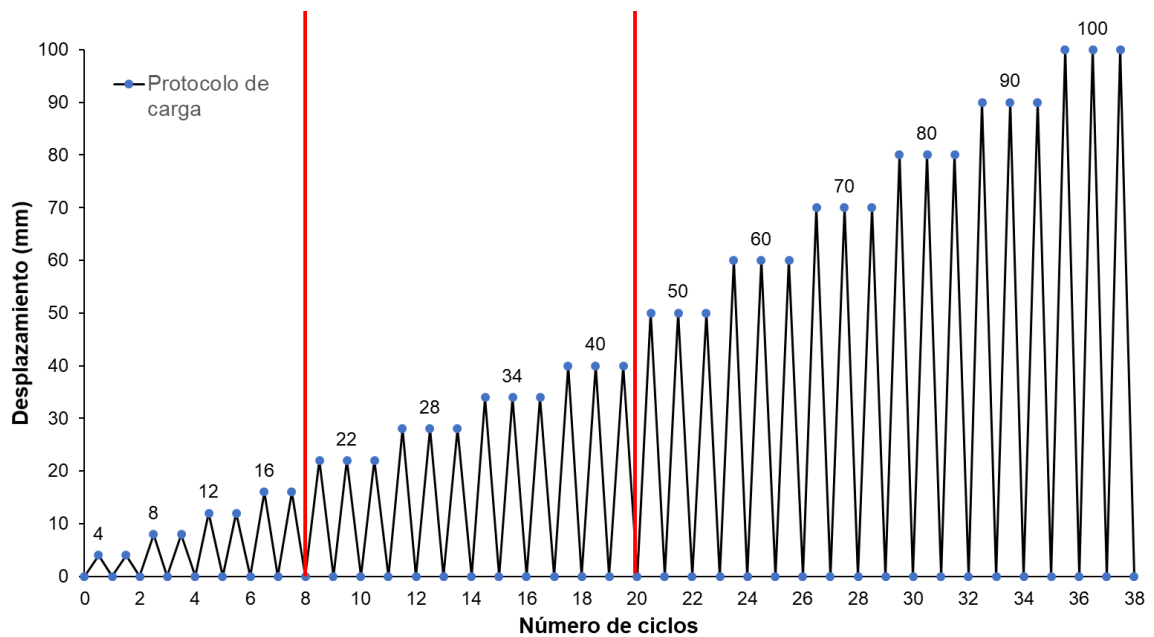
Figura 40. Montaje probetas tipo viga.



Durante el montaje se situó una banda de neopreno de 25x35 cm de neopreno con el fin garantizar una distribución adecuada de la carga y evitar posibles desplazamientos del actuador durante la ejecución del ensayo.

Paso 2: Protocolo de carga: El protocolo para los ensayos bajo cargas pseudoestática, se realizó por medio de aplicación de carga bajo desplazamientos controlados. Este procedimiento se definió a partir de un número bajo de ciclos para la zona de fluencia y al llegar a la deflexión que correspondiera al estado de plastificación del elemento se aumentó el número de ciclos. La velocidad de desplazamiento del actuador fue de 2 mm/min hasta 16 mm de desplazamiento, de ahí en adelante se aumentó a 10mm/min. El protocolo del ensayo se muestra en la Figura 41.

Figura 41. Protocolo de carga ensayos pseudoestáticos.

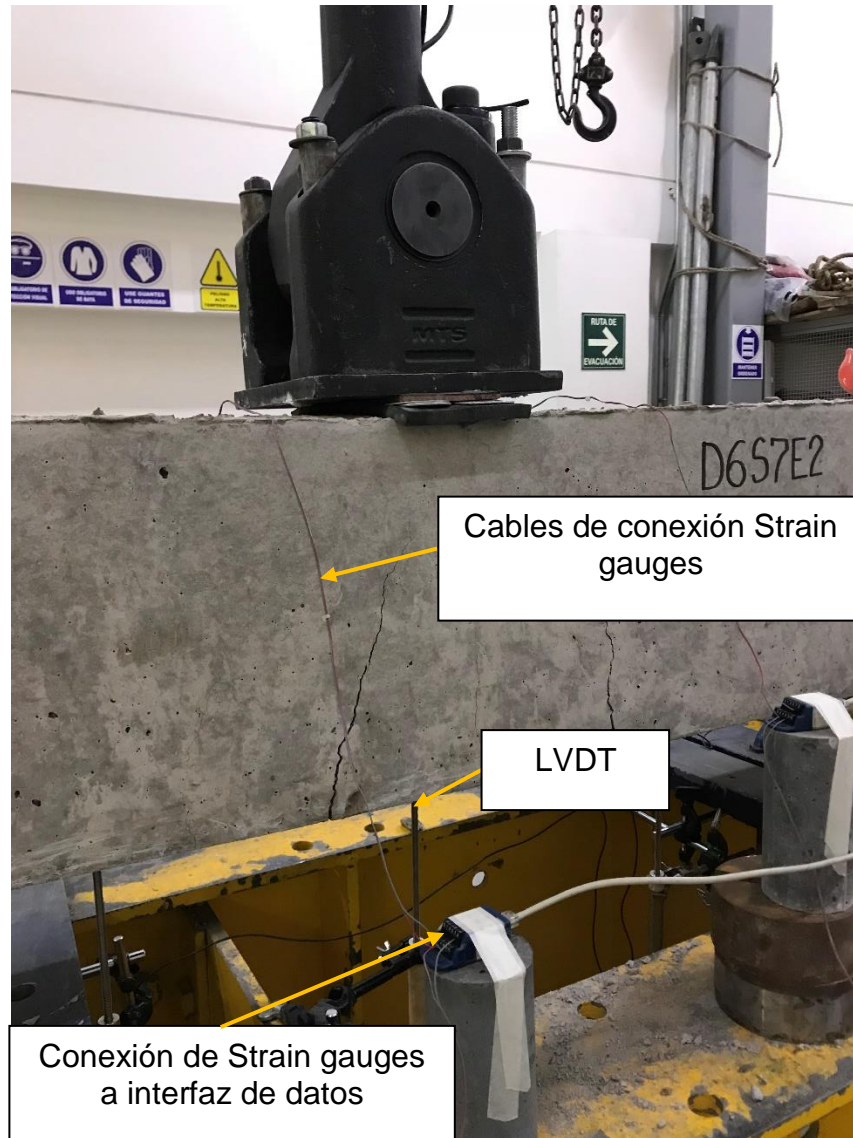


Paso 3: Interfaz de datos: Se generó una conexión entre los sensores de tipo Strain gauges a una interfaz de datos con el fin de registrar la deformación de cada zona aledaña a los empalmes soldados y así poder comparar la deformación obtenida en los ensayos de tracción pura realizados previamente con los obtenidos en la ejecución de estos ensayos. Adicional a esto, se posicionaron tres sensores de desplazamiento tipo LVDT en el tercio medio de la luz de cada elemento, con el fin de obtener la deflexión real producto de la carga aplicada durante la ejecución del ensayo. En la Figura 42, se muestra la configuración de la conexión realizada.

Paso 4: Calibración de actuador e Inicio de ensayo: Antes de iniciar el ensayo se realizó la calibración del actuador de acuerdo con el protocolo de carga bajo cargas estáticas y pseudoestáticas, esto con el fin de evitar datos atípicos en el registro de datos durante la ejecución del ensayo, luego se posicionó el actuador sobre la banda de neopreno mencionada anteriormente, generando una precarga sobre cada elemento.

Al finalizar este procedimiento, se da inicio al ensayo donde se reporta tanto la carga aplicada, la deflexión y la deformación en tiempo real generada a lo largo de todo el experimento, con el fin de analizar el comportamiento bajo cargas estáticas y pseudoestáticas de cada elemento.

Figura 42. Instrumentación de ensayo a flexión de vigas.



Paso 5: Fin del ensayo: Durante el ensayo se puede observar cualitativamente el estado de la probeta, donde al superarse la etapa de plastificación de esta, se genera descascaramiento de la capa de concreto estructural y/o ruptura del refuerzo principal del elemento, se procede a detener el ensayo y a revisar los datos obtenidos para evaluar su comportamiento y la veracidad del ensayo. En la Figura 43 se observa la finalización de uno de los ensayos realizados.

Figura 43. Finalización ensayo de flexión en vigas.



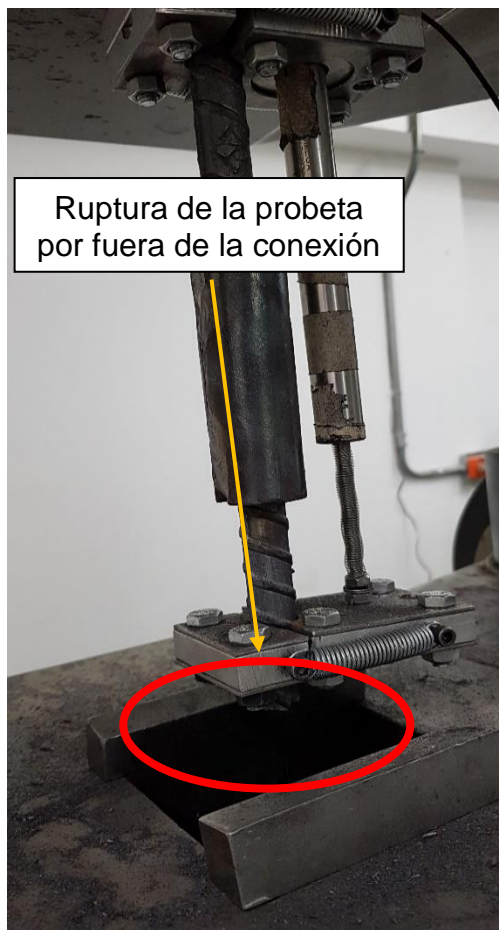
Paso 6: Procesamiento de datos: Los datos registrados se extraen de la computadora que dio seguimiento al ensayo, luego de esto, se generaron las curvas Carga – Deflexión, Momento – Deflexión, Fuerza – Deformación Unitaria; tanto de cargas estáticas como de cargas pseudoestáticas con la finalidad de analizar el comportamiento de cada elemento, y por medio del método de las sumatorias de ríman se calculó el área bajo la curva, cuantificando la capacidad de disipación de energía de cada elemento y de esta manera poder generar un adecuado escenario comparativo.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 FALLA DE BARRAS A TRACCIÓN

Las probetas con empalme soldado presentaron una falla a 6 cm aproximadamente de la conexión construida; dicho resultado estuvo acorde con las probetas con empalmes mecánicos y las barras sin empalme. Es muy importante este resultado debido a que se obtuvo la falla por fuera de la conexión, lo que preliminarmente indica la viabilidad de este tipo de empalme al presentar un comportamiento similar a los otros tipos de probetas. La falla obtenida se muestra en la Figura 44. **Ver anexo 2**

Figura 44. Falla obtenida en la totalidad de las probetas.



4.2 TIPO DE FALLA

De acuerdo con Smith (1937), el tipo de falla obtenida para las probetas de esta investigación es una falla dúctil, ya que todas las probetas presentaron formación de cuello de botella en el área fracturada, deformación plástica permanente, elongación del material y reducción de área transversal de la sección como se muestra en la Figura 45 y Figura 46

Figura 45. Tipo de falla obtenida en las probetas.



Figura 46. Patología de falla en probetas.

- Formación cuello de botella.
- Deformación plástica permanente.
- Reducción área transversal.
- Elongación del material.



4.3 ENSAYOS DE TRACCIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, se construyeron las gráficas esfuerzo deformación unitaria de cada una de las probetas, acotando en cada una de ellas los criterios mínimos de aceptación para el acero estructural en Colombia de acuerdo con la NTC-2289. Los parámetros acotados fueron:

- Esfuerzo de fluencia máximo
- Esfuerzo de fluencia mínimo
- Elongación mínima de las barras
- Esfuerzo de tracción

En la Figura 47, Figura 48 y Figura 49, se muestran las curvas esfuerzo deformación unitaria para cada tipo de probeta.

Figura 47. Curva esfuerzo deformación unitaria barras de control.

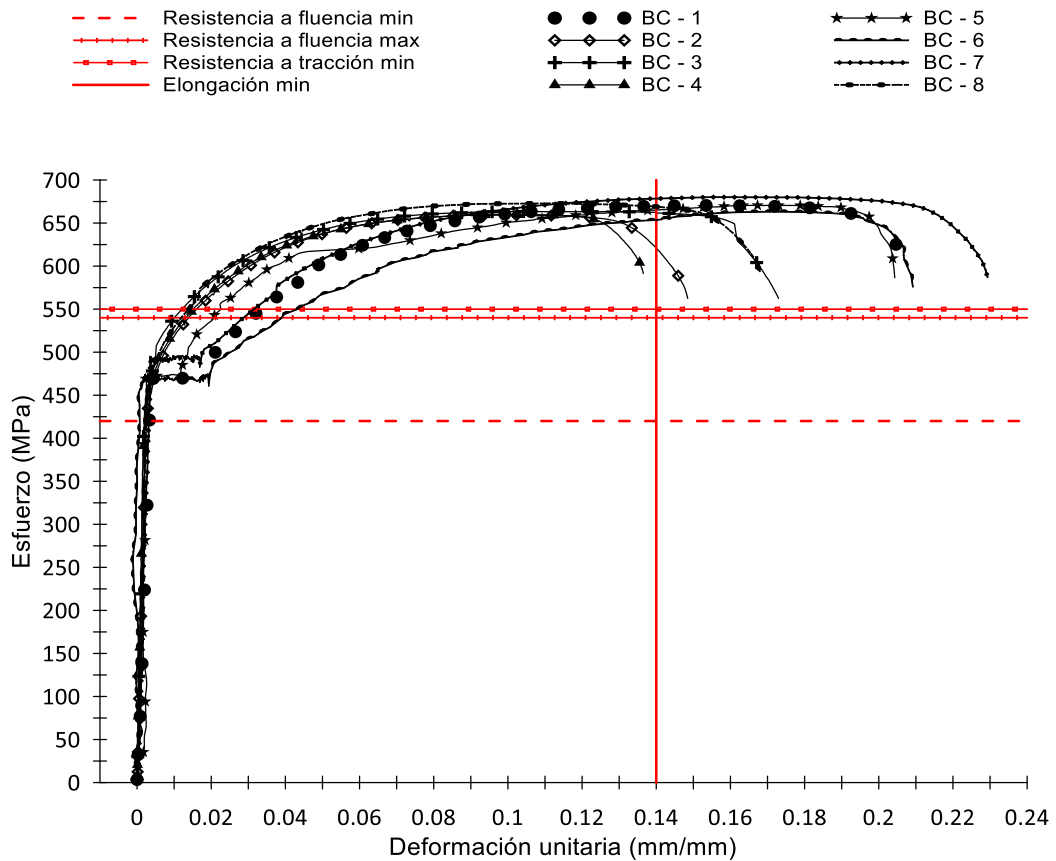


Figura 48. Curva esfuerzo deformación unitaria empalmes soldados.

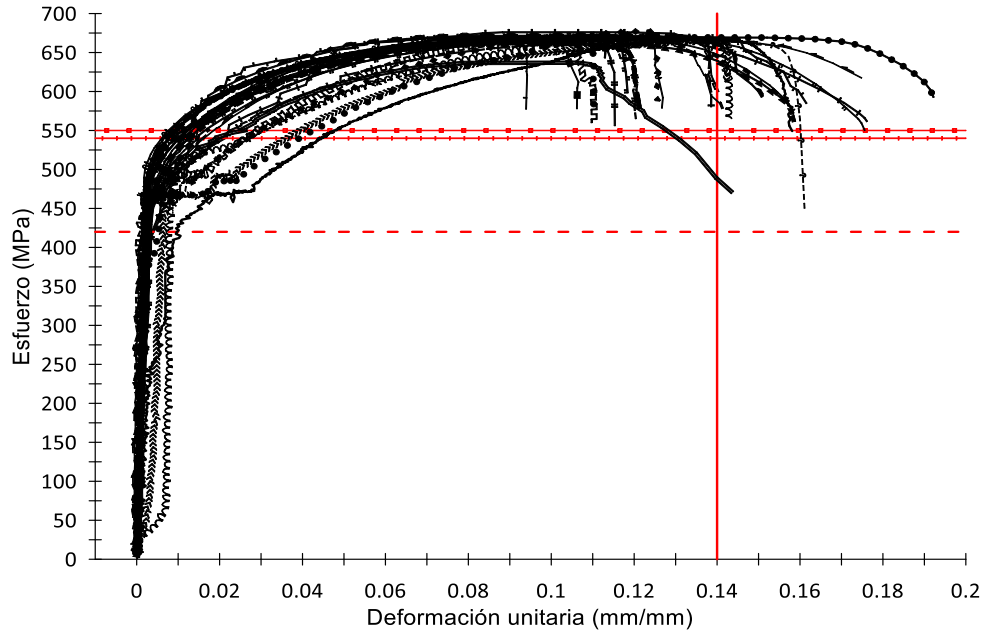
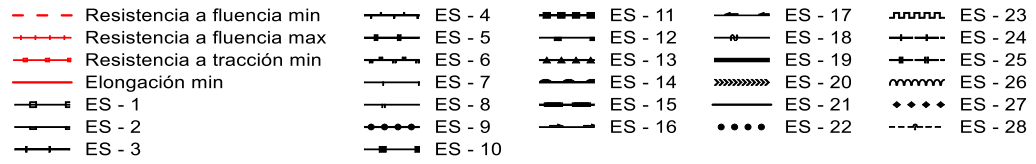
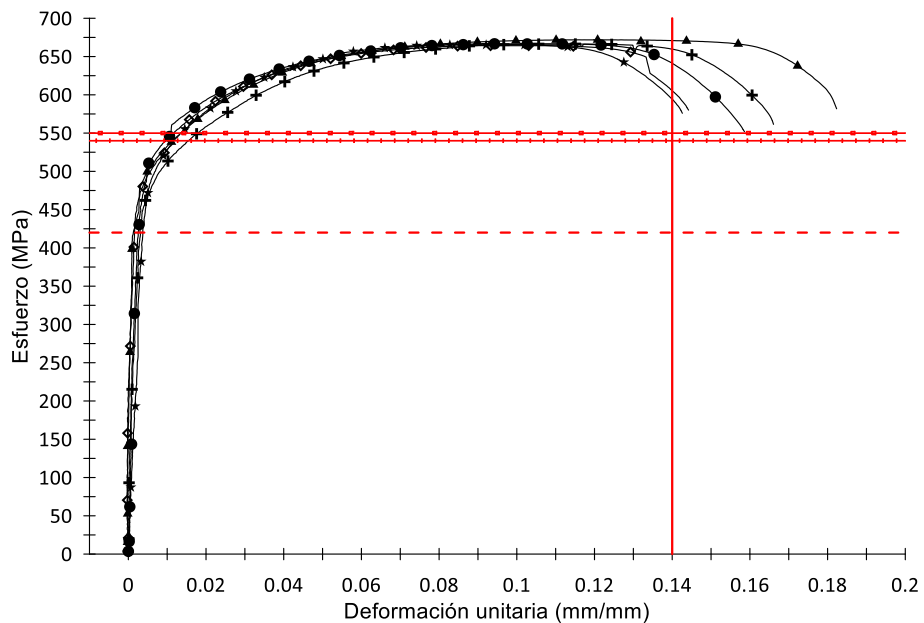
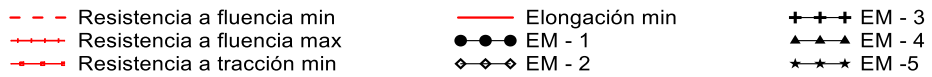


Figura 49. Curva esfuerzo deformación unitaria empalmes mecánicos.



Para el cálculo de los parámetros de caracterización de las probetas como el esfuerzo de fluencia, se recurrió al método del desplazamiento a 0.2%, donde se trazó una recta con la misma pendiente de la zona elástica, buscando la intersección gráfica obtenida y de este modo leer de una forma más precisa este valor. **Ver Anexo 1**

En las curvas esfuerzo deformación de cada tipo de probeta, las líneas negras demarcan el rango de aceptación para el esfuerzo de fluencia, y las líneas rojas denotan la deformación mínima para las barras corrugadas de diámetro N6; de acuerdo con lo especificado por la NTC2289 para el acero estructural en Colombia.

A partir de las gráficas obtenidas para cada tipo de probeta, se procedió a calcular esfuerzo de fluencia, deformación de fluencia, índice de ductilidad, módulo de elasticidad, esfuerzo mínimo de tracción, deformación última, tenacidad y 1.25 Esfuerzo de fluencia. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de caracterización de probetas.

PROBETA	ESFUERZO FLUENCIA (MPa)	DEFORMACIÓN FLUENCIA (mm/mm)	ÍNDICE DUCTILIDAD	MODULO DE ELASTICIDAD (MPa)	ESFUERZO MÁXIMO (MPa)	DEFORMACIÓN ULTIMA (mm)	TENACIDAD (MPa / mm/mm)	Fu / Fy
BC-1	481	0.00240	70.0	200417	672.9	0.1679	107.5	1.40
BC-2	466	0.00260	57.1	179231	659.3	0.1485	92.2	1.41
BC-3	477	0.00215	80.4	221860	663.5	0.1730	109.6	1.39
BC-4	466	0.00205	66.7	227317	659.76	0.1368	85.4	1.42
BC-5	472	0.00198	103.2	238384	670.58	0.2043	132.7	1.42
BC-6	468	0.00230	91.0	203478	663.2	0.2092	127.2	1.42
BC-7	485	0.00290	79.1	167241	680.14	0.2293	143.1	1.40
BC-8	450	0.00290	71.6	155172	670.47	0.2077	125.2	1.49
ES-1	442	0.00247	64.6	178947	674.22	0.1597	99.2	1.53
ES-2	463	0.00196	71.6	236224	670.26	0.1404	88.5	1.45
ES-3	431	0.00254	69.4	169685	675.97	0.1762	109.5	1.57
ES-4	503	0.00275	58.8	182909	670.26	0.1616	103.3	1.33
ES-5	424	0.00264	43.7	160606	669.29	0.1153	72.0	1.58
ES-6	454	0.00210	56.4	216190	672.93	0.1184	73.9	1.48
ES-7	496	0.00220	42.7	225455	668.14	0.0939	60.4	1.35
ES-8	488	0.00266	66.0	183459	668.14	0.1756	111.8	1.37
ES-9	510	0.00253	76.0	201581	669.77	0.1922	124.5	1.31
ES-10	472	0.00265	40.1	178113	668.74	0.1062	65.2	1.42
ES-11	480	0.00265	42.6	181132	668.05	0.1129	69.6	1.39
ES-12	500	0.00270	58.8	185185	665.97	0.1588	100.0	1.33
ES-13	522	0.00230	68.9	226957	662.18	0.1584	100.0	1.27
ES-14	508	0.00240	62.8	211667	671.92	0.1508	96.8	1.32
ES-15	519	0.00255	47.6	203529	662.18	0.1213	75.9	1.28
ES-16	500	0.00235	60.1	212766	669.66	0.1412	89.6	1.34
ES-17	452	0.00240	72.9	188333	666.39	0.1749	109.9	1.47
ES-18	526	0.00210	60.3	250476	667.72	0.1267	80.3	1.27
ES-19	466	0.00265	54.2	175849	637.30	0.1437	84.0	1.37
ES-20	456	0.00245	58.0	186122	665.97	0.1421	90.9	1.46
ES-21	440	0.00240	65.9	183333	666.67	0.1581	90.5	1.52
ES-22	466	0.00205	53.9	227317	665.97	0.1106	62.2	1.43
ES-23	462	0.00175	62.9	264000	668.74	0.1102	66.0	1.45
ES-24	466	0.00210	66.0	221905	667.36	0.1386	84.5	1.43
ES-25	496	0.00220	54.7	225455	665.63	0.1203	74.9	1.34
ES-26	512	0.00198	72.1	258586	665.63	0.1427	83.4	1.30
ES-27	468	0.00230	54.5	203478	677.03	0.1255	75.3	1.45
ES-28	464	0.00208	78.3	223077	663.90	0.1630	104.6	1.43
EM1	504	0.00289	54.9	174394	666.71	0.1586	99.9	1.32
EM2	484	0.00200	72.1	242000	664.27	0.1442	90.8	1.37
EM3	462	0.00275	60.4	168000	666.39	0.1661	103.4	1.44
EM4	490	0.00210	86.8	233333	671.87	0.1823	116.7	1.37
EM5	490	0.00395	36.1	124051	665.28	0.1426	88.8	1.36

A partir de los datos mostrados, se realizó un análisis estadístico en cual se buscó ajustar una distribución de probabilidad de acuerdo con el comportamiento de cada parámetro, para esto se construyó una gráfica de probabilidad con un nivel de confiabilidad de 95%, un nivel de significancia del 5% y un histograma con ajuste de distribución (**Anexo 3**). La búsqueda de la distribución más adecuada se obtuvo a partir del coeficiente de Anderson – Darling, el cual mide que tan bien se ajustan los datos a una distribución en particular, al obtener un valor más cercano a cero este indica que hay un mejor ajuste de datos. A partir de esto se obtuvo el valor p teniendo en cuenta que, para una adecuada distribución de probabilidad, este debería ser mayor que el nivel de significancia de 5% planteado y así poder rechazar o aprobar la hipótesis nula. A continuación, la Tabla 12, muestra los resultados del análisis estadístico para cada uno de los parámetros.

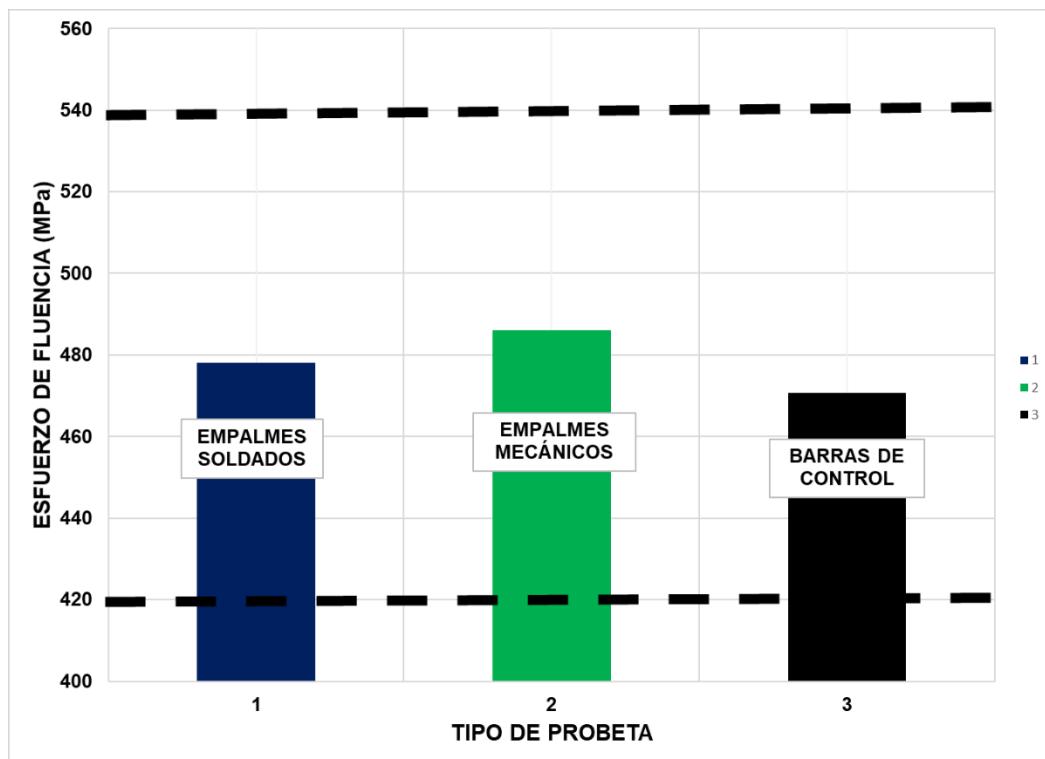
Tabla 12. Análisis estadístico.

Parametro	Tipo de Probeta	Distribución de probabilidad	Media	Desviación Estandar	Coefficiente de variación	AD	p
Esfuerzo de fluencia	Empalmes soldados	Normal	478.1	28.7	6.0	0.44	0.27
	Empalmes mecánicos	Normal	486.0	15.3	3.1	0.34	0.33
	Barras de control	Normal	470.6	10.9	2.3	0.26	0.61
Deformación de fluencia	Empalmes soldados	Normal	0.002354	0.0002668	11.3	0.37	0.40
	Empalmes mecánicos	Normal	0.002738	0.0007816	28.5	0.31	0.40
	Barras de control	Normal	0.002410	0.0003607	15.0	0.30	0.49
Indice de ductilidad	Empalmes soldados	Normal	60.1	10.4	17.3	0.29	0.58
	Empalmes mecánicos	Normal	62.1	19.0	30.6	0.15	0.91
	Barras de control	Normal	77.4	14.5	18.7	0.21	0.80
Módulo de elasticidad	Empalmes soldados	Normal	205798	27582	13.4	0.57	0.13
	Empalmes mecánicos	Normal	188356	49105	26.1	0.29	0.46
	Barras de control	Normal	199138	29804	15.0	0.21	0.79
Esfuerzo mínimo de tracción	Empalmes soldados	Normal	668.5	3.7	0.5	0.43	0.28
	Empalmes mecánicos	Normal	666.9	2.9	0.4	0.47	0.13
	Barras de control	Normal	667.5	7.3	1.1	0.32	0.45
Deformación última	Empalmes soldados	Normal	0.1407	0.03	17.8	0.59	0.11
	Empalmes mecánicos	Normal	0.1588	0.02	10.4	0.25	0.57
	Barras de control	Normal	0.1846	0.03	17.8	0.30	0.49
Tenacidad	Empalmes soldados	Normal	87.4	16.8	19.3	0.25	0.73
	Empalmes mecánicos	Normal	99.9	11.2	11.2	0.25	0.55
	Barras de control	Normal	115.4	20.2	17.5	0.22	0.75
fu/fy > 1.25	Empalmes soldados	Normal	1.40	0.0880	6.3	0.35	0.44
	Empalmes mecánicos	Normal	1.37	0.0435	3.2	0.36	0.28
	Barras de control	Normal	1.41	0.0112	0.8	0.41	0.24

Los resultados obtenidos deben ser comparados con los valores mínimos de aceptación del acero estructural en Colombia, los cuales son dados por la NTC2289. El primer parámetro para analizar es el esfuerzo de fluencia, el cual de acuerdo con la NTC-2289 (Tabla A.2) exige un valor mínimo de 420 MPa y un máximo de 540 MPa, de acuerdo con lo mostrado en la *Tabla 12*. Análisis estadístico., las probetas fabricadas con empalmes soldados desarrollaron una media para este parámetro de 478.1 MPa, el cual se encuentra dentro de los rangos exigidos por la normativa mencionada anteriormente, es importante acotar que respecto a la media de las probetas fabricadas con empalmes mecánicos y las barras de control, no se presentó una variación significativa, la cual osciló entre 1.5 y 3.0%, lo que indica que respecto al esfuerzo de fluencia, las probetas fabricadas con empalmes soldados tuvieron un comportamiento muy similar a pesar de ser sometidas a procesos de soldadura. En la *Figura 50*. Diagrama de barras esfuerzo de fluencia. se evidencia la simetría en el comportamiento descrito anteriormente.

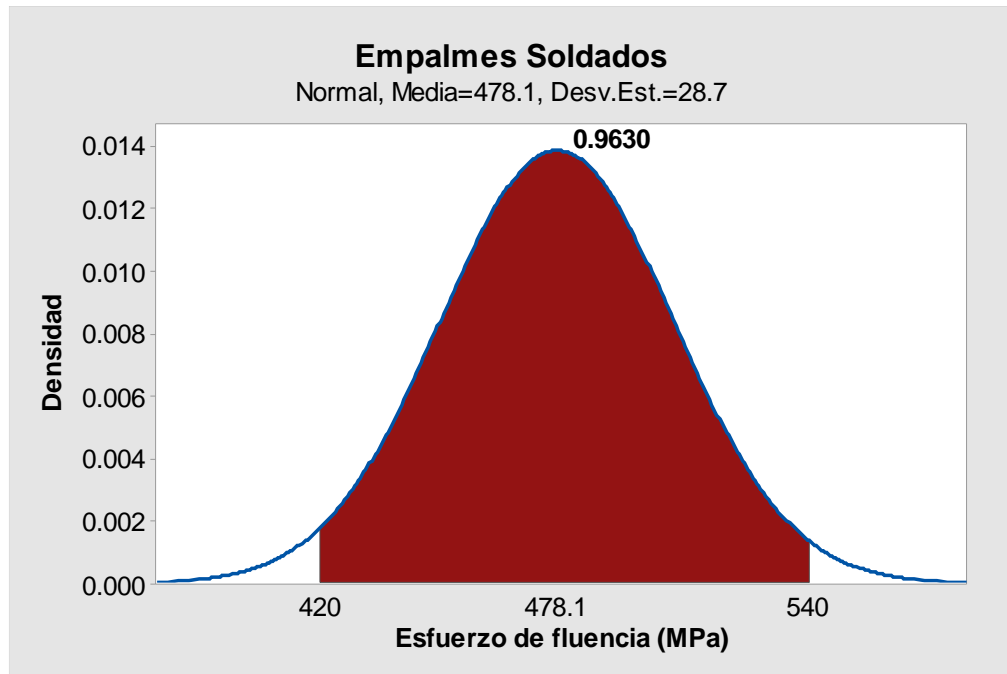
Las líneas negras punteadas mostradas en la Figura 50, acotan el rango dando por la NTC2289 para el esfuerzo de fluencia mínimo y máximo, por lo que se evidencia que se cumple la normativa para las barras fabricadas con empalmes soldados.

Figura 50. Diagrama de barras esfuerzo de fluencia.



Es importante cuantificar la probabilidad de que se cumpla este comportamiento, lo cual se constató partiendo del análisis estadístico realizado, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 51, la probabilidad de que las probetas con empalmes soldados cumplan con los valores exigidos por la NTC-2289 respecto a los límites de fluencia es de 96.30%.

Figura 51. Distribución normal esfuerzo de fluencia



Las probetas fabricadas tanto con empalmes soldados como con empalmes mecánicos fueron capaces de desarrollar un esfuerzo de fluencia mayor que las probetas sin empalme, sin embargo, como se mencionó anteriormente no fue significativo, lo cual se evidencia en la Figura 52.

La deformación producida por el esfuerzo de fluencia en cada elemento es otro parámetro por analizar, el valor mínimo exigido para la deformación de fluencia de acuerdo con la normativa colombiana es de 0.0021, de acuerdo con lo mostrado en la *Tabla 12*. Análisis estadístico. la deformación de fluencia media obtenida para las barras fabricadas con empalmes soldados es de 0.002354, lo que indica que estos elementos cumplen con los criterios de aceptación dados para este parámetro. Por otra parte, los empalmes soldados no lograron superar el valor de deformación de fluencia de las barras de control y las probetas con empalmes mecánicos, respecto a las probetas sin empalme soldado desarrollaron un 2.3% menos de deformación de fluencia. En la *Figura 53*. Diagrama de barras deformación de fluencia. se muestra el comportamiento de los empalmes soldados frente a los demás tipos de probetas, y la línea negra indica la deformación de fluencia de 0.0021, por lo que se

constata que las probetas fabricadas con empalmes soldados cumplen y superan el valor exigido por la normativa colombiana.

Figura 52. Distribuciones normales de esfuerzo de fluencia para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.

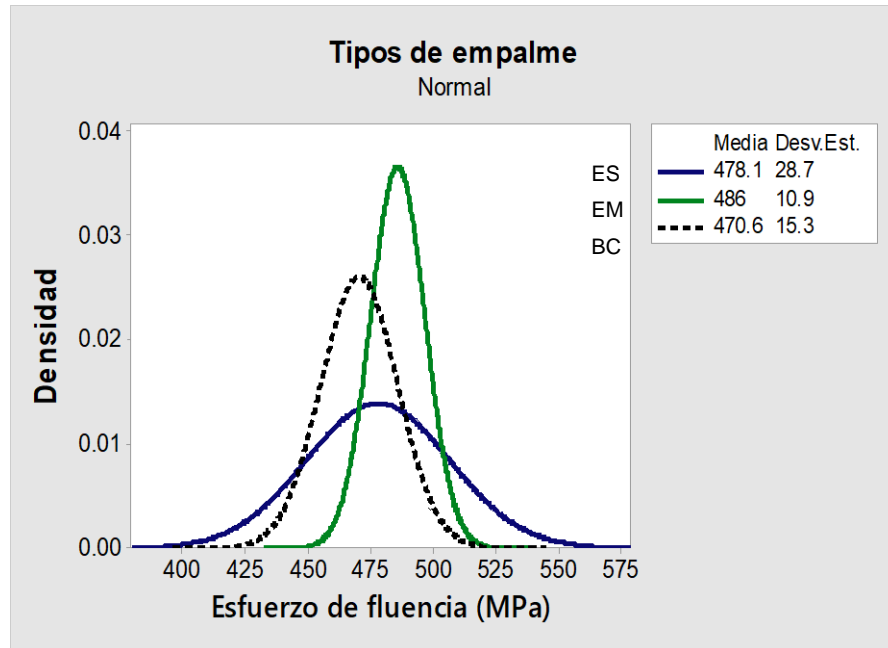
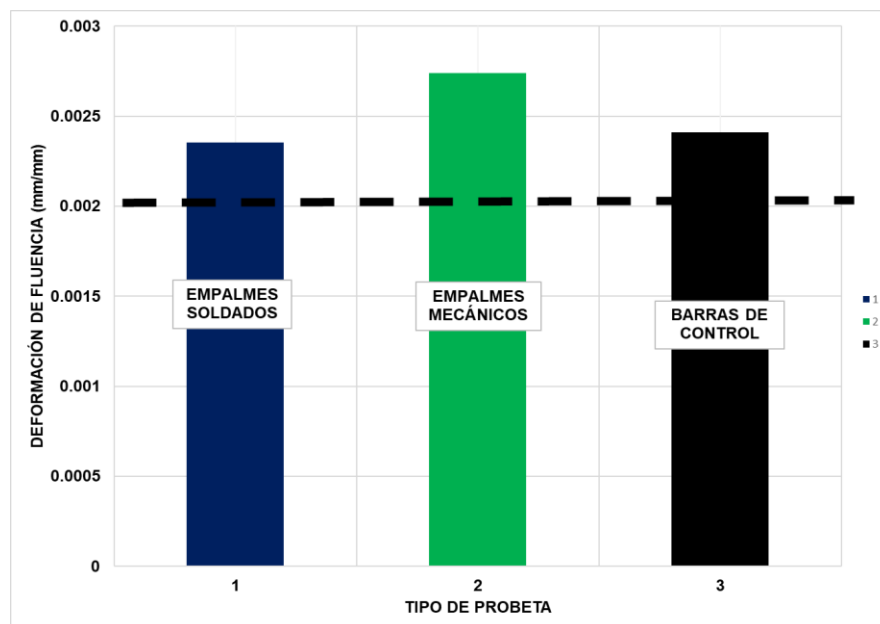
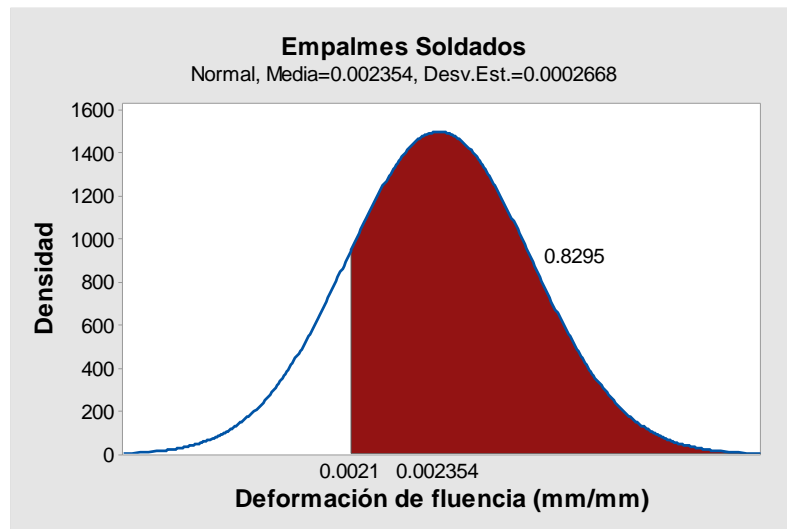


Figura 53. Diagrama de barras deformación de fluencia.



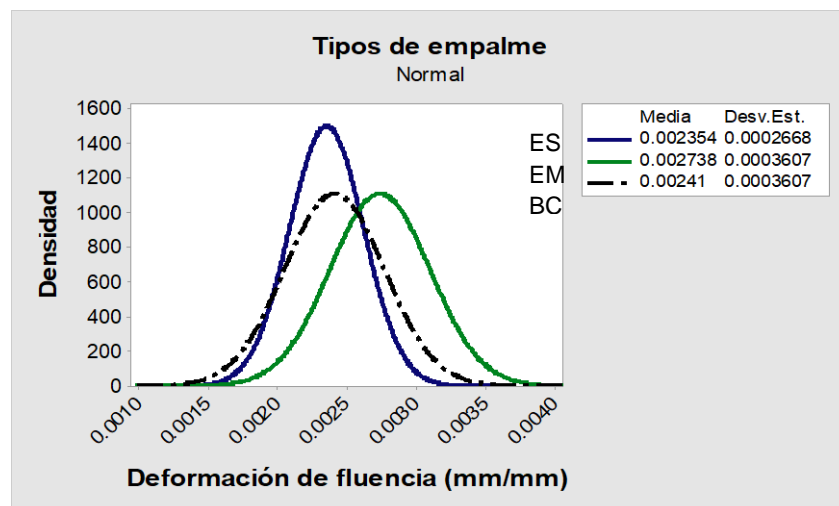
Por otra parte, de acuerdo con el análisis estadístico realizado, la probabilidad de que estos elementos tengan una deformación superior a 0.0021 es de 82.9% como se evidencia en la *Figura 54*. Distribución normal deformación de fluencia

Figura 54. Distribución normal deformación de fluencia.



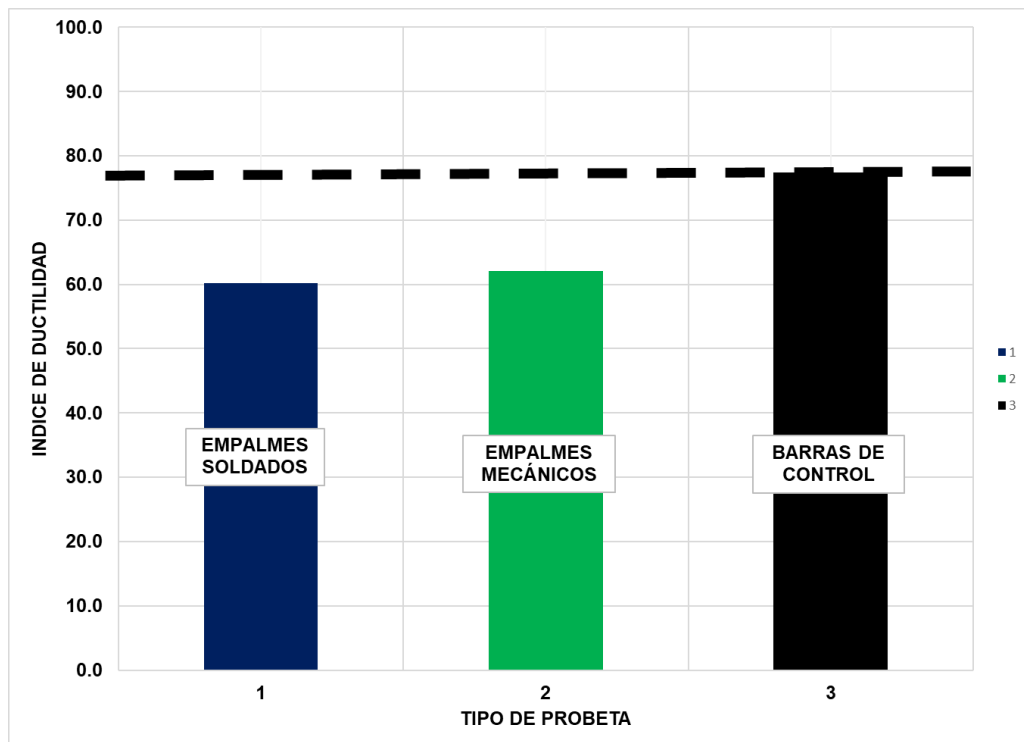
En la *Figura 55*. Distribuciones normales de deformación de fluencia para empalmes soldados, mecánicos y barras de control. se constata el comportamiento observado en este parámetro, donde se graficó cada una de las distribuciones normales obtenidas para cada tipo de probeta.

Figura 55. Distribuciones normales de deformación de fluencia para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.



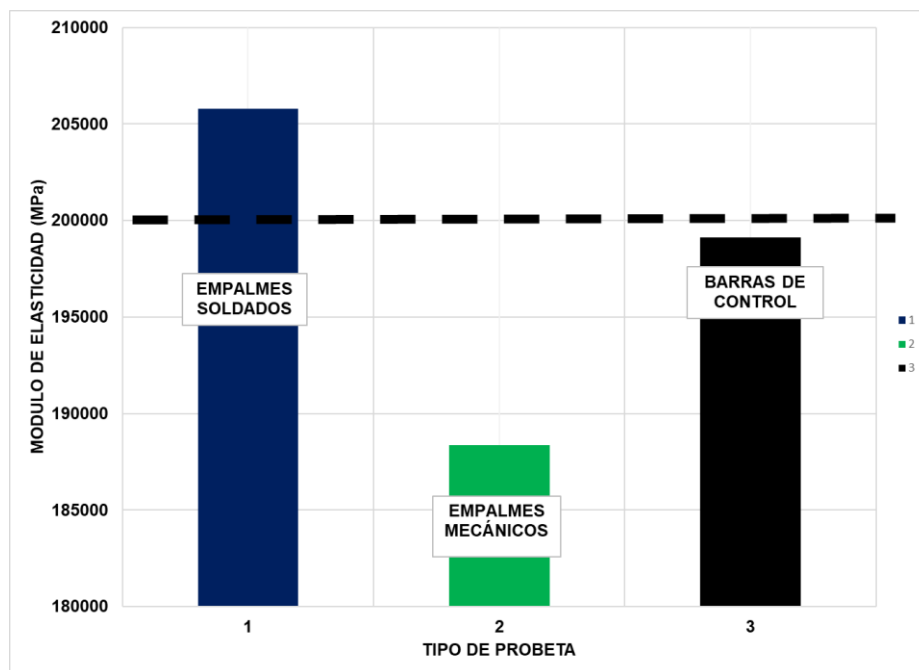
Respecto al índice de ductilidad, se calculó como la relación entre la deformación última y la deformación de fluencia de las gráficas esfuerzo – deformación unitaria de cada una de las probetas, respecto a las probetas fabricadas con empalmes soldados se obtuvo una media de 60.1 MPa (mm/mm). La NTC 2289 no da un valor puntual para este parámetro por lo que se comparó el comportamiento de estos elementos con las probetas que no fueron sometidas a procesos de soldadura ni mecanizados, en este caso, las probetas fabricadas con empalmes mecánicos y sin empalme. De acuerdo con la *Tabla 12. Análisis estadístico*. se observa que los empalmes soldados tienen índice de ductilidad considerablemente menor frente a las barras de control, puntualmente un 22.4% menos, sin embargo, las probetas con empalmes mecánicos desarrollaron un 19.1% menos frente a las barras de control, por lo que el uso de soldadura no genera una afectación significativa al utilizar empalmes diferentes al de traslape, cabe resaltar que el uso de empalmes bien sea mecánicos o soldados produce un comportamiento menos dúctil en el acero de refuerzo. En la *Figura 56. Diagrama de barras índice de ductilidad*. se muestra el comportamiento del índice de ductilidad frente a cada tipo de empalme, siendo la línea punteada negra el valor obtenido para las barras de control.

Figura 56. Diagrama de barras índice de ductilidad.



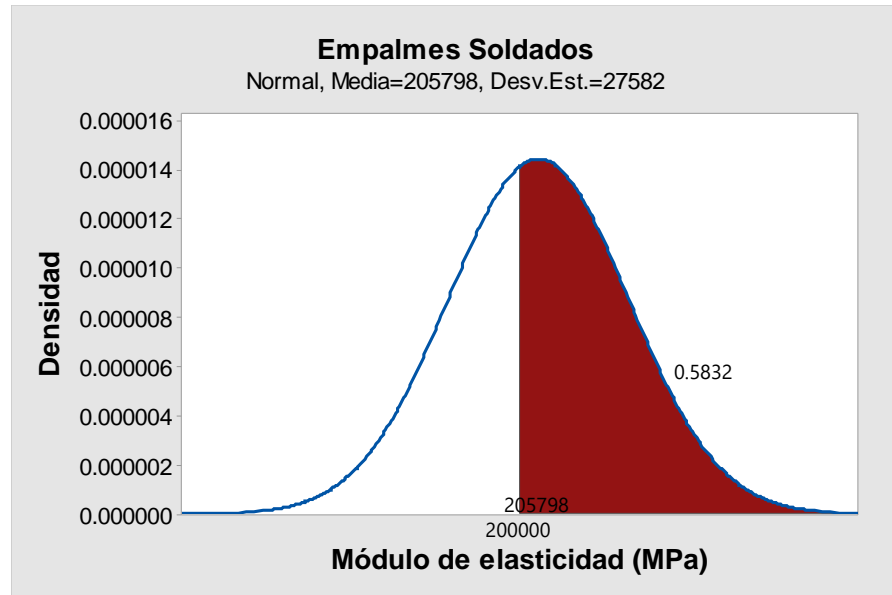
El módulo de elasticidad como parámetro fundamental del comportamiento del acero estructural, se calculó hallando la pendiente de la línea del tramo elástico de cada una de las curvas esfuerzo deformación unitaria. Según el reglamento NSR-10 (Titulo C) el acero de refuerzo tiene un valor aproximado de 200000 MPa, de acuerdo con los resultados mostrados en la *Tabla 12. Análisis estadístico.*, para las probetas fabricadas con empalmes soldados se obtuvo una media de 205798 MPa, lo cual evidencia que estos elementos presentan un valor superior al teórico, por lo que se cumple con lo estipulado por la normativa colombiana, sin embargo, desarrollaron un 3.3 % más que las barras de control, por lo que el uso de soldadura genera un aumento en el módulo de elasticidad. Las probetas fabricadas con empalme mecánico obtuvieron una media de 188356 MPa, este resultado se puede enlazar con las deformaciones de fluencia obtenidas las cuales fueron considerablemente más grandes para estas probetas, lo que indica que el enlace mecánico realizado en la construcción de este tipo de empalme genera una afectación importante en este parámetro. En la *Figura 57. Diagrama de barras módulo de elasticidad.* se muestra la variación del módulo de elasticidad de acuerdo con cada tipo de empalme, siendo la línea negra punteada el valor teórico del módulo de elasticidad del acero de refuerzo.

Figura 57. Diagrama de barras módulo de elasticidad.



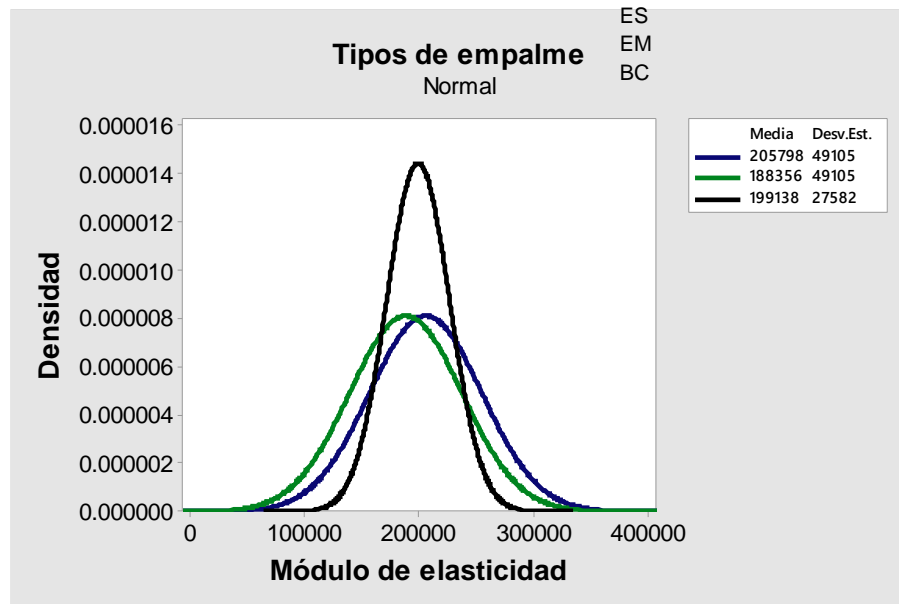
De acuerdo con el análisis estadístico realizado, la probabilidad de que las probetas con empalme soldado tengan un módulo de elasticidad mayor a 200000 MPa es de 58.3% como se muestra en la Figura 58.

Figura 58. Distribución normal módulo de elasticidad.



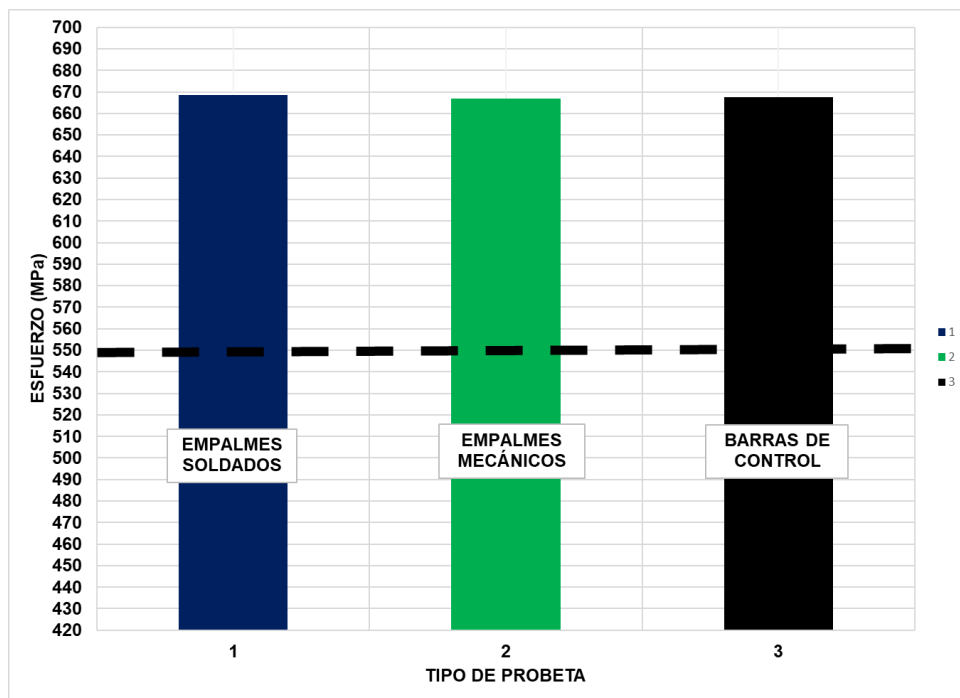
Las distribuciones normales obtenidas para las probetas respecto al módulo de elasticidad evidencian el comportamiento anteriormente descrito, el cual se muestra en la Figura 59.

Figura 59. Distribuciones normales para módulo de elasticidad de empalmes soldados, mecánicos y barras de control.



Como requerimiento mínimo de tracción, la NTC2289 indica una resistencia a la tracción mínima de 550 MPa, respecto a las probetas fabricadas con empalmes soldados en la *Tabla 12. Análisis estadístico*. se muestra que estos elementos desarrollaron un esfuerzo máximo medio de 668.5 MPa, lo que es un valor significativamente superior frente a los mínimos exigidos. También es importante resaltar que estos elementos desarrollaron un valor de esfuerzo máximo muy similar tanto para las barras de control como para las probetas fabricadas con empalmes mecánicos, no se obtuvo una diferencia significativa respecto a este parámetro. En la *Figura 60*, se muestra la variación de los resultados obtenidos para cada tipo de probeta.

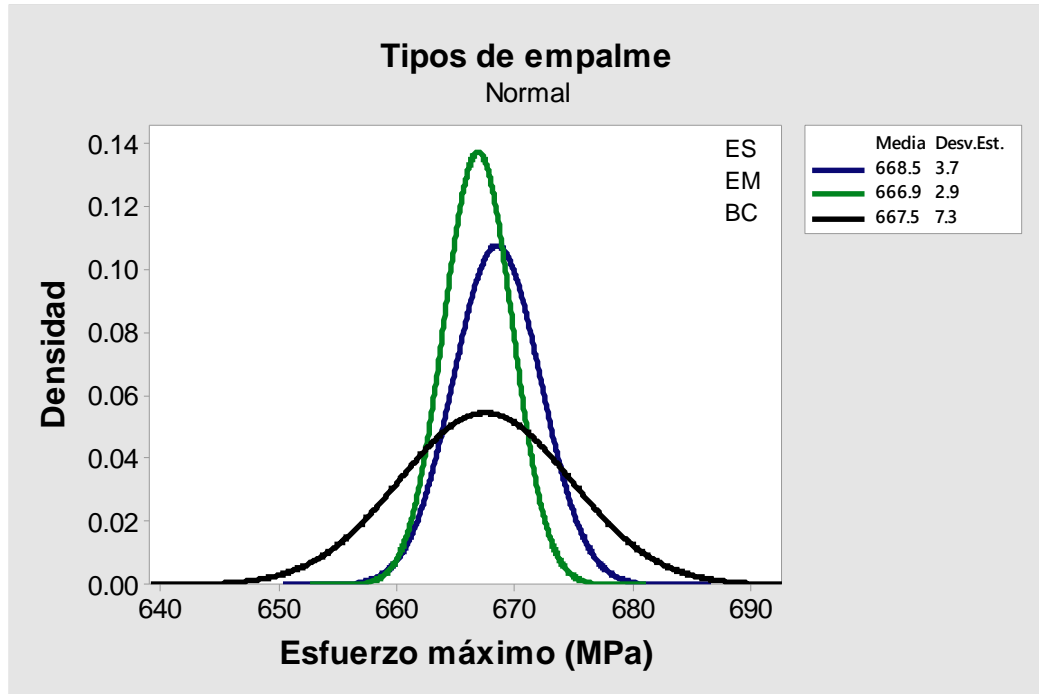
Figura 60. Diagrama de barras resistencia a la tracción mínima.



La línea negra punteada mostrada en la *Figura 60*. Diagrama de barras resistencia a la tracción mínima indica el esfuerzo mínimo exigido por la NTC2289, indicando que tanto las probetas fabricadas con empalmes soldados como los demás tipos de elementos superaron significativamente el mínimo valor de esfuerzo requerido para este parámetro.

Partiendo del análisis estadístico la variación de este parámetro a partir de las distribuciones normales obtenidas se muestra en la *Figura 61*. Distribuciones normales de esfuerzo mínimo de tracción para empalmes soldados, mecánicos y barras de control

Figura 61. Distribuciones normales de esfuerzo mínimo de tracción para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.



El alargamiento mínimo de acuerdo con la NTC2289 es de 0.14 para barras de diámetro N6 en una longitud de 200 mm, los empalmes soldados obtuvieron una media de 0.1407 como se evidencia en la *Tabla 12. Análisis estadístico.*, lo cual muestra que estos elementos cumplen de acuerdo con esta normativa, sin embargo, se debe resaltar que no lograron superar la deformación última de las probetas fabricadas con empalmes mecánicos y barras sin empalme, lo que evidencia que el uso de la soldadura genera una reducción en la capacidad de elongación de la barra generando una conexión más rígida, a pesar de esto la diferencia obtenida no muestra una importante variación en este parámetro. En la Figura 62, se muestra la variación entre los valores obtenidos. La línea negra punteada mostrada en esta figura acota la elongación mínima requerida por la NTC2289, mostrando que los empalmes soldados lograron superar este requerimiento mínimo, lo cual es uno de los parámetros más importantes en el comportamiento mecánico del acero estructural.

Figura 62. Diagrama de barras deformación última.

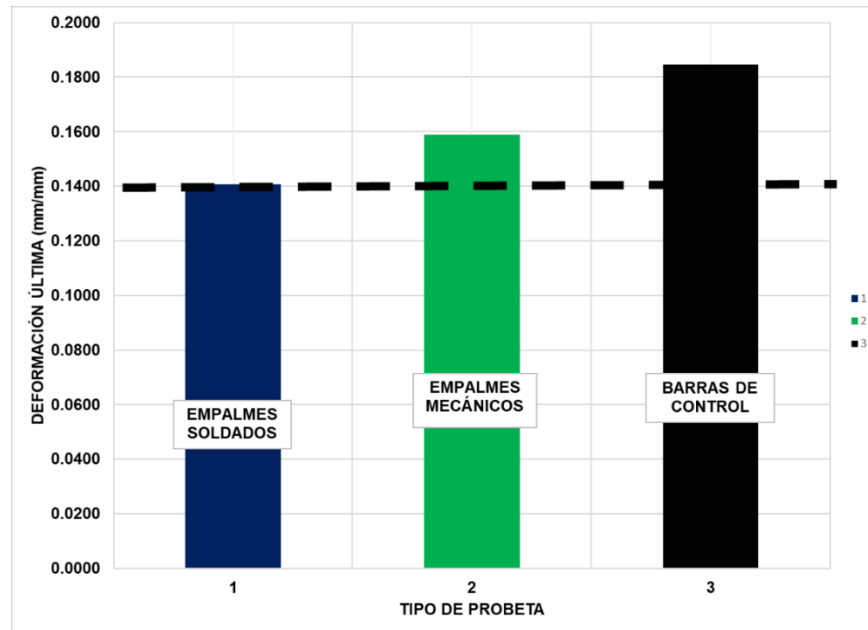
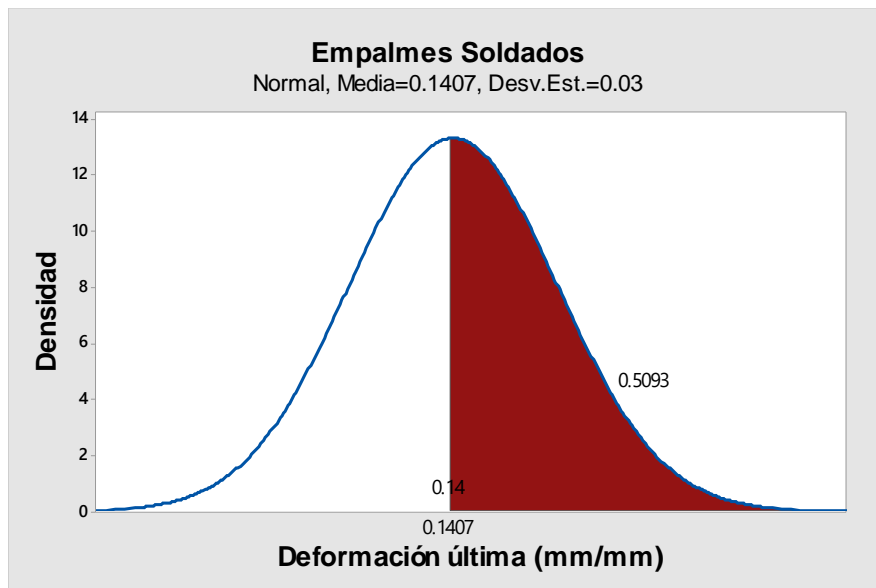


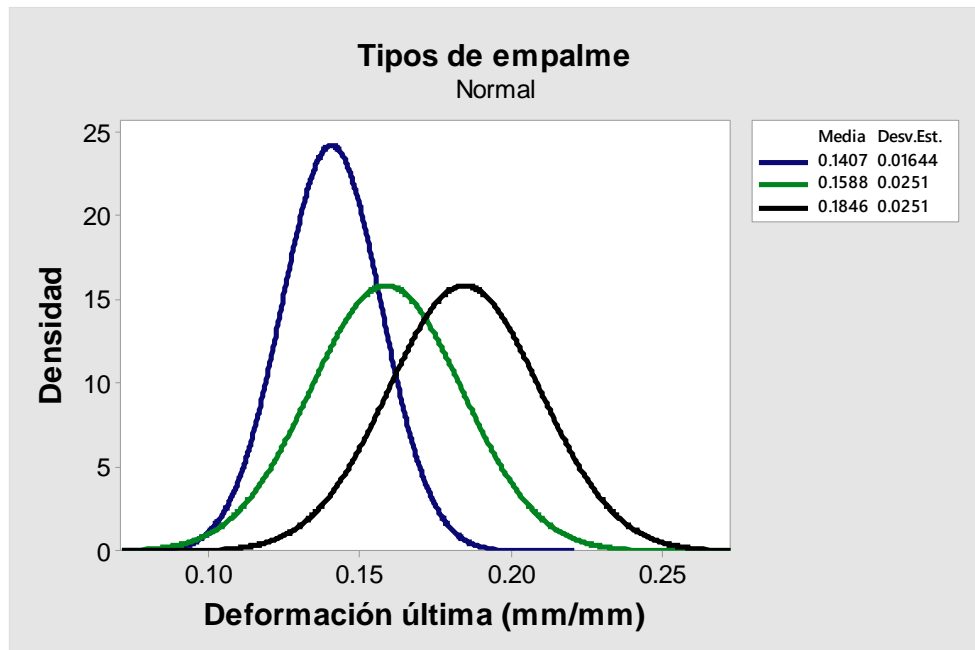
Figura 63. Distribución normal deformación última.



De acuerdo con lo obtenido en el análisis estadístico realizado la probabilidad de que las probetas fabricadas con empalmes soldados desarrollen una elongación de más de 0.14 es de 50.93% como se muestra en la *Figura 63*. Distribución normal deformación última.

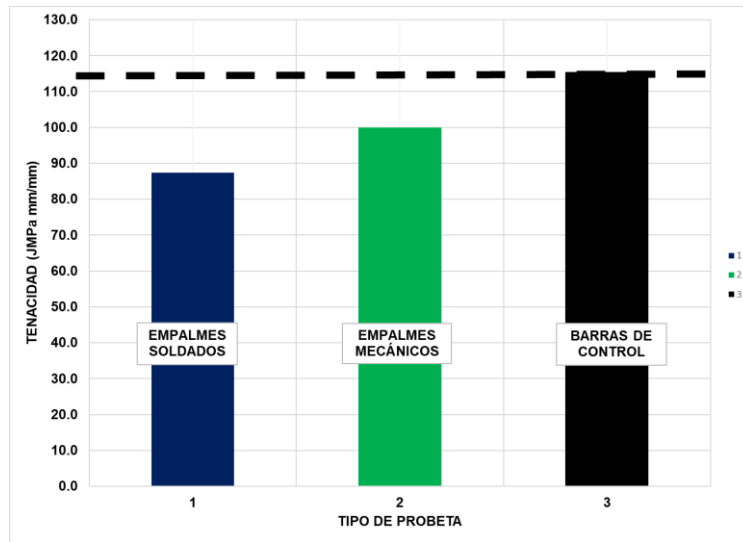
A partir de las distribuciones normales obtenidas, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar el comportamiento la disminución de la capacidad de elongación de los empalmes soldados frente a los otros tipos de probetas fabricadas.

Figura 64. Distribuciones normales para deformación última de empalmes soldados, mecánicos y barras de control.



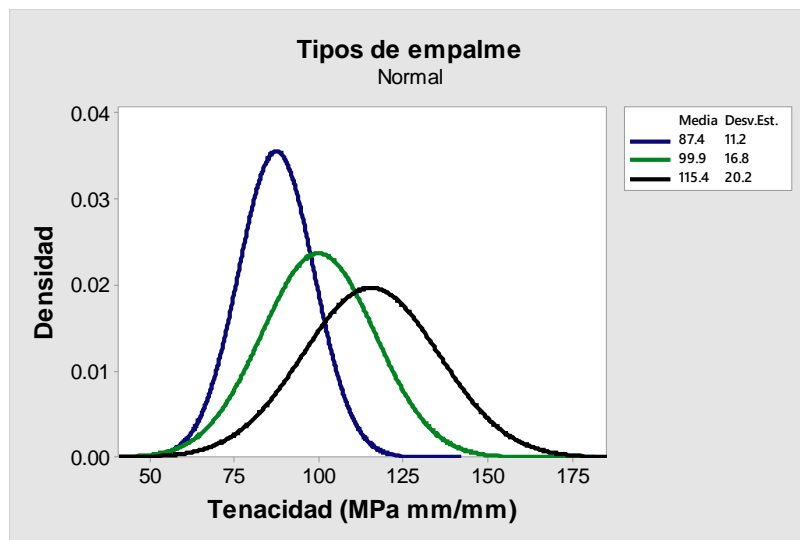
La tenacidad como medida de absorción de energía en el tramo plástico de cada una de las probetas analizadas, se calculó como el área total de la curva esfuerzo - deformación unitaria. De acuerdo con lo mostrado en la *Tabla 12. Análisis estadístico.*, para las probetas fabricadas con empalmes soldados se obtuvo una media de 87.40 MPa mm/mm, este valor no logró superar lo obtenido para los otros tipos de probetas, mostrando una menor capacidad de disipación de energía para los empalmes soldados, respecto a las probetas fabricadas con empalmes mecánicos estos elementos desarrollaron un 12.5% menos de capacidad y si lo comparamos con las barras de control estuvieron un 24.3% menos que lo obtenido para estos elementos, lo cual traduce en que el uso de la soldadura disminuye la capacidad de absorción de energía en estos elementos. En la *Figura 65. Diagrama de barras tenacidad.* se muestra el comportamiento que tuvieron las probetas fabricadas con empalmes soldados frente a los otros tipos de probetas.

Figura 65. Diagrama de barras tenacidad.



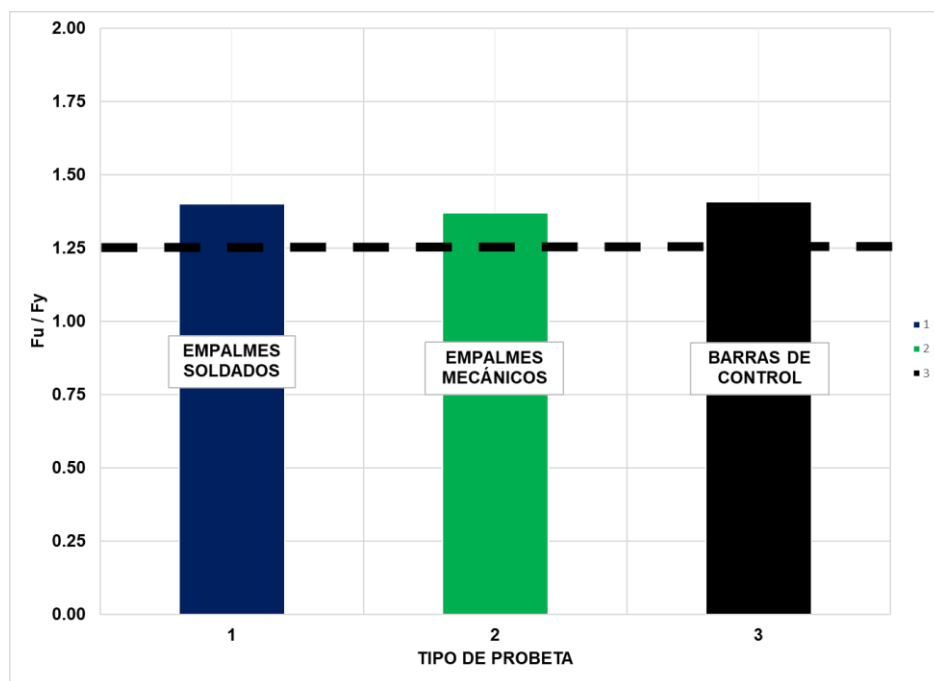
La línea punteada negra indica el valor de tenacidad obtenido para las barras de control, evidenciando que los empalmes soldados no lograron absorber la misma energía en el tramo plástico, de igual manera ocurrió con las probetas fabricadas con empalmes mecánicos, cabe resaltar que al utilizar empalmes sea de tipo mecánico o soldado hay una pérdida de capacidad de absorción de energía ya que ninguno de los dos tipos de empalmes logró igualar a las barras de control. Este comportamiento se evidencia en la *Figura 66*. Distribuciones normales de tenacidad para empalmes soldados, mecánicos y barras de control., se muestran las distribuciones normales obtenidas para cada tipo de probeta.

Figura 66. Distribuciones normales de tenacidad para empalmes soldados, mecánicos y barras de control.



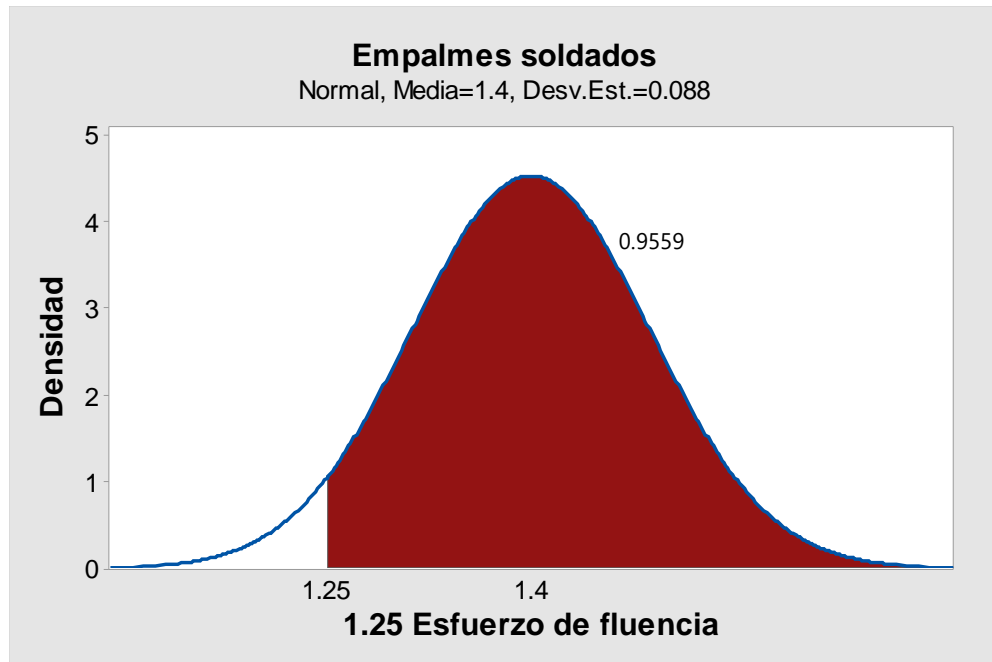
Uno de los requerimientos más importantes requeridos por la NTC2289 es que las barras corrugadas desarrollen una resistencia de 1.25 veces el esfuerzo de fluencia como criterio de aceptación, esto concuerda con lo exigido por el reglamento NSR10 donde tiene que cumplirse este requerimiento en los elementos de armado en zonas de disipación de energía moderada y alta en estructuras de concreto reforzado. De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 12. Análisis estadístico. las probetas fabricadas con empalmes soldados desarrollaron 1.40 veces el esfuerzo de fluencia y tuvieron un comportamiento casi idéntico con las barras de control, por lo que este parámetro no se ve afectado si somete el acero de refuerzo a procesos de soldadura. En la *Figura 67*. Diagrama de barras 1.25 fu/fy. se muestra el comportamiento que tuvieron los empalmes soldados frente a los otros tipos de probetas.

Figura 67. Diagrama de barras 1.25 fu/fy.



La línea punteada negra indica el desarrollo de 1.25 veces del esfuerzo de fluencia que requiere la NTC2289, de igual manera se constata el comportamiento anteriormente descrito. Teniendo en cuenta el análisis estadístico realizado la probabilidad de que las probetas fabricadas con empalmes soldados desarrollen 1.25 veces el esfuerzo de fluencia es de 95.5% como se muestra en la *Figura 68*. Distribución normal 1.25 Fu/fy.

Figura 68. Distribución normal 1.25 Fu/fy.



Remitiéndonos a investigaciones previas, de acuerdo con la investigación realizada por Botero y González (2005) denominada “Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia”, en la cual desarrollaron 477 ensayos de tracción pura en barras de diámetro #3 a #8, respecto al esfuerzo de fluencia obtuvieron una media de 470.3 MPa, las probetas con empalmes soldados fabricadas en esta investigación desarrollaron un esfuerzo de fluencia aproximadamente 1.7% mayor, lo cual no es un valor significativo, sin embargo, estos elementos se comportaron de una manera similar a las probetas sin empalme analizadas por Botero y González (2005). En esta investigación se analizaron más parámetros, respecto a la deformación de fluencia las probetas analizadas desarrollaron una media de 0.0024, para las probetas con empalmes soldados fabricadas en este caso se obtuvo una media de 0.002354 por lo que claramente este parámetro tuvo un comportamiento casi idéntico. La deformación última arrojó una media de 0.0138 para la investigación anteriormente citada, al comparar este parámetro con el obtenido en esta investigación el cual fue de 0.01403, indica un comportamiento de igual manera muy similar a los parámetros anteriormente analizados, es importante acotar que el uso de soldadura en la fabricación de la conexión planteada en esta investigación no afecta de manera significativa el comportamiento mecánico del acero estructural.

Rodríguez y Asabay (2006), realizaron 54 ensayos de tracción en barras soldadas de diámetros N8, N10 y N12 variando el tipo de soldadura, el precalentamiento y el

tipo de bisel, los resultados obtenidos para barras de diámetro N8 utilizando soldadura 90-18, respecto al esfuerzo de fluencia fueron de 434.1 MPa, las probetas fabricadas en esta investigación desarrollaron un 10.90% más en dicho parámetro, adicional a esto, Rodríguez y Asabay (2006) reportaron que sus conexiones no lograron una resistencia de 1.25 veces el esfuerzo de fluencia, limitando su uso ante sollicitaciones sísmicas, lo cual es totalmente contrario a las probetas con empalmes soldados de esta investigación.

Respecto al módulo de elasticidad, Rodríguez y Asabay (2006) obtuvieron un valor de 201482 MPa, el cual es 2.09% más bajo que el desarrollado por los empalmes soldados con camisa perimetral fabricados en este caso. Cabe resaltar que en las recomendaciones de Rodríguez y Asabay (2016) se enuncia que no se debe utilizar soldadura 70-18 y que se debe acoplar una camisa de refuerzo perimetral a la conexión, lo cual fue tenido en cuenta en esta investigación, obteniendo mejores resultados respecto al comportamiento mecánico de este tipo de conexiones.

Castillo y Velázquez (2016), en su investigación denominada “Precalificación de un empalme soldado para barras de refuerzo que cumplen con la norma NTC2289”, obtuvieron que los empalmes soldados con camisas perimetrales son capaces de desarrollar 1.25 el esfuerzo de fluencia, lo cual se contrastó en esta investigación, ya que la totalidad de las probetas fabricadas con empalmes soldados lograron superar este parámetro exigido tanto por la NTC2289 como por el reglamento NSR-10.

Respecto al comportamiento de los empalmes soldados frente a los empalmes mecánicos, se analizaron los resultados obtenidos por parte de Alvis y Guerra (2017) y la presente investigación, en la cual realizando ensayos de tracción en probetas fabricadas con empalmes mecánicos de diámetro número 5, obtuvieron una media del esfuerzo de fluencia de 476.3 MPa en sus conexiones, por parte de los empalmes soldados se obtuvo una media de 478.1 MPa, lo que traduce en un comportamiento muy similar frente a este parámetro. Por otra parte, las probetas fabricadas con empalmes mecánicos desarrolladas por Alvis y Guerra (2017) desarrollaron una resistencia de 1.25 veces el esfuerzo de fluencia, por lo que se demuestra los empalmes soldados propuestos en esta investigación tienen el mismo comportamiento a pesar de ser sometidos a procesos de soldado.

4.4 ENSAYOS A FLEXIÓN DE VIGAS

Después de realizar los 5 ensayos a flexión en las 5 probetas tipo viga en el marco de carga de la Pontificia Universidad Javeriana, es importante enunciar los siguientes puntos:

- Se presentó desprendimiento del recubrimiento durante los ensayos realizados, dicho desprendimiento impidió continuar con el ensayo hasta la rotura del refuerzo a tracción como se muestra en la Figura 69.

Figura 69. Pérdida de recubrimiento.



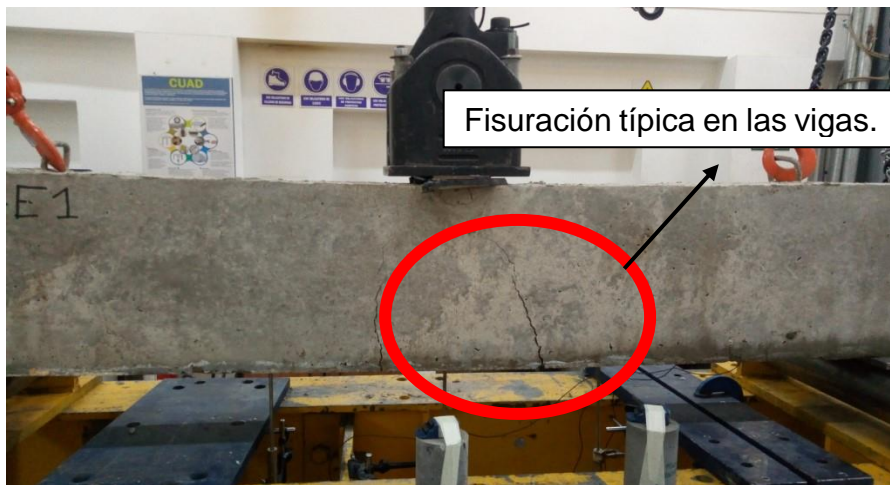
- En el ensayo de la probeta D6S14E1 (Viga 4), fue posible continuar con el ensayo hasta la rotura del refuerzo a tracción, como se muestra en la Figura 70. Falla en probeta tipo D6S14E1. la localización de la falla se presentó por fuera del empalme soldado, puntualmente a una distancia de 7 cm.

Figura 70. Falla en probeta tipo D6S14E1.



- En la totalidad de los ensayos realizados se observó que el inicio de la fisuración no se presentó en la mitad de la luz como se esperaba, este comportamiento atípico se explica con el aumento de resistencia en la zona del empalme soldado, obligando al desarrollo del esfuerzo de fluencia de las barras por fuera de la conexión, lo que concuerda con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción pura realizados en estos elementos. La fisuración típica presentada se muestra en la Figura 71.

Figura 71. Fisuración típica en vigas.



4.4.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

En la Tabla 13 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión pura bajo cargas estáticas en los elementos tipo viga. Con el fin de realizar una comparación precisa se calcularon los valores teóricos de resistencia de los elementos, utilizando los valores obtenidos de esfuerzo de fluencia del refuerzo a tracción promedio (478.1 MPa), resistencia a compresión del concreto (28.2 MPa) y módulo de elasticidad del concreto (27000 MPa). El cálculo analítico de las resistencias se puede ver en el **Anexo 4**.

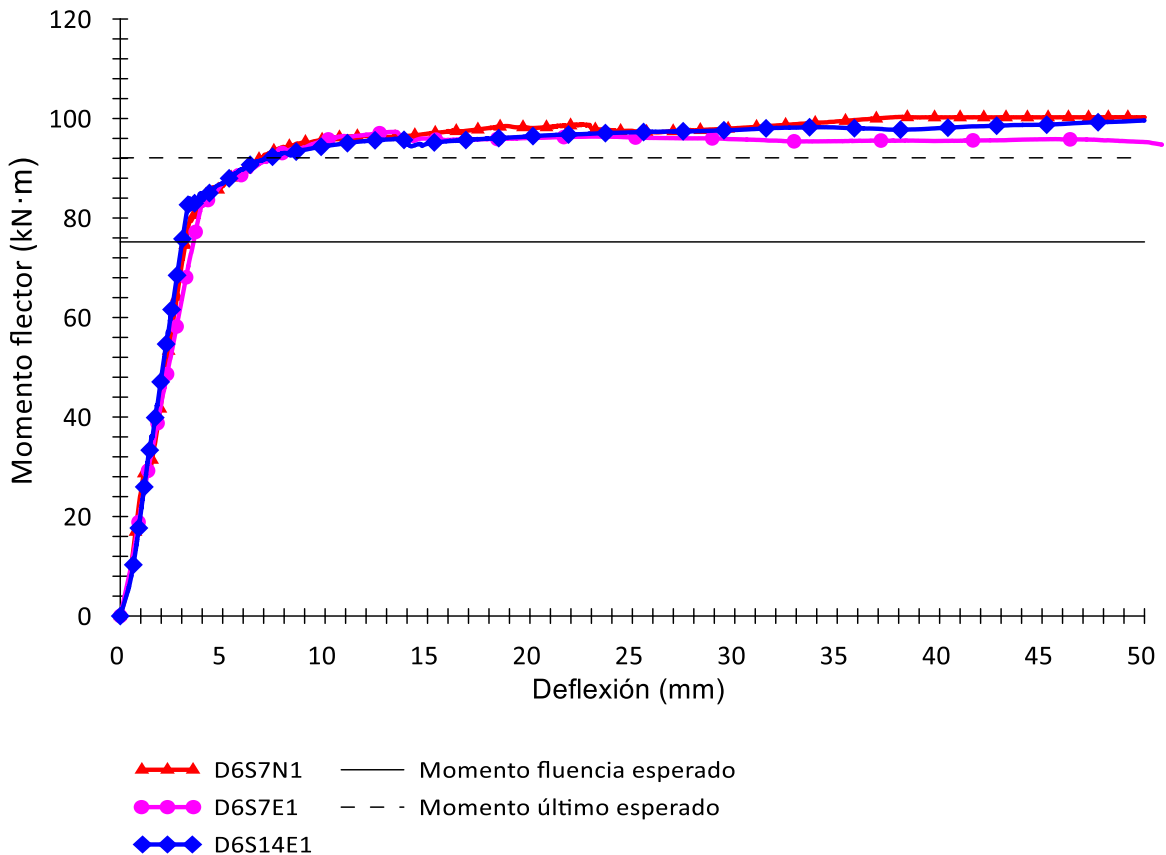
PROBETA	CARGA (kN)		MOMENTO (kN)		DEFLEXIÓN (mm)
	ETAPA DE FLUENCIA	1.25 ESFUERZO DE FLUENCIA	ETAPA DE FLUENCIA	1.25 ESFUERZO DE FLUENCIA	ETAPA DE FLUENCIA
VALORES ESPERADOS	159.97	195.69	71.98	88.03	2.7
D6S7N1	179	220	80.6	99	3.5
D6S7E1	183	211.4	82.4	95.1	4
D6S14E1	182	222.5	81.9	100.1	3.1
PROMEDIO	181.3	218.0	81.6	98.1	3.5

Tabla 13. Resultados obtenidos ensayos de flexión estáticos

Se resalta que las vigas ensayadas alcanzaron los límites de resistencia calculados analíticamente de acuerdo con la Tabla 13. Lo que nos permite comparar directamente los resultados obtenidos de la viga patrón D5S7N1, contra las vigas con empalme D6S7E1 y D6S14E1.

A partir de los resultados obtenidos se construyeron las curvas momento flector versus deflexión para cada elemento (ver Figura 72). Las líneas negras horizontales mostradas demarcan la resistencia esperada calculada para los elementos.

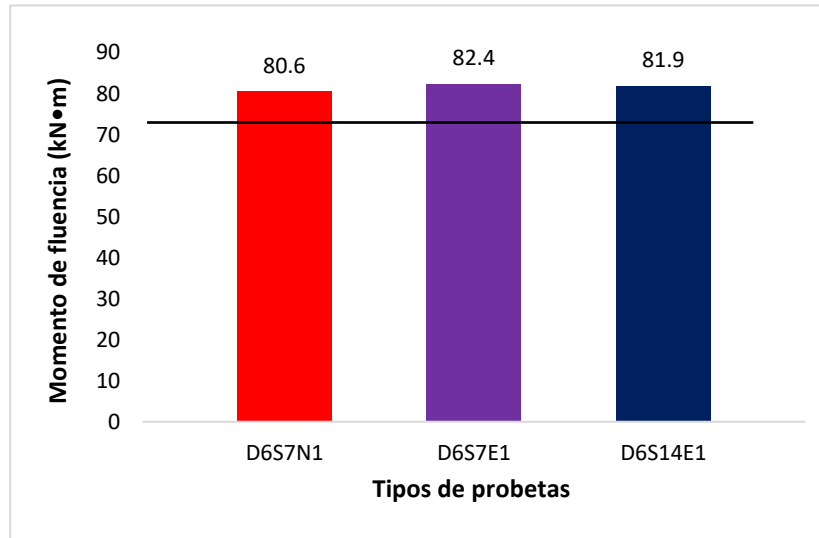
Figura 72. Curva momento flector vs deflexión ensayos a flexión estáticos.



PROBETA	CARGA (kN)		MOMENTO (kN)		DEFLEXIÓN (mm)
	ETAPA DE FLUENCIA	1.25 ESFUERZO DE FLUENCIA	ETAPA DE FLUENCIA	1.25 ESFUERZO DE FLUENCIA	ETAPA DE FLUENCIA
VALORES ESPERADOS	159.97	195.69	71.98	88.03	2.7
D6S7N1	179	220	80.6	99	3.5
D6S7E1	183	211.4	82.4	95.1	4
D6S14E1	182	222.5	81.9	100.1	3.1
PROMEDIO	181.3	218.0	81.6	98.1	3.5

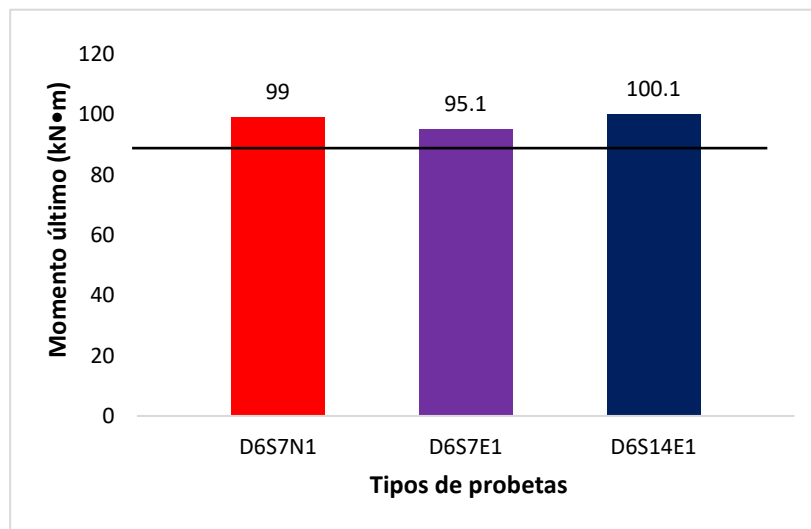
Las probetas fabricadas con empalmes soldados presentaron un valor de momento flector máximo promedio de 82.1 kN.m; obteniendo un 1.9% adicional respecto al obtenido para la probeta D6S7N1 (viga patrón), en la etapa de fluencia como se muestra en la Figura 73.

Figura 73. Diagrama de barras, momento de fluencia de ensayos a flexión estáticos.



Respecto a la etapa de resistencia última, se obtuvo un valor de momento flector máximo promedio de 97.6 kN.m, obteniendo una disminución de 1.4% respecto a la probeta D6S7N1 (viga patrón) como se muestra en la Figura 74. Diagrama de barras momento 1.25 Fy vs deflexión ensayos a flexión estáticos.

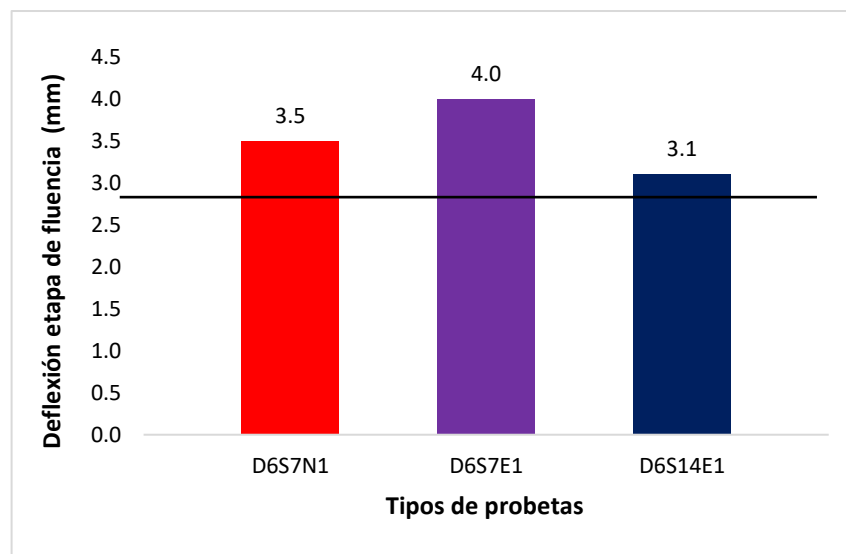
Figura 74. Diagrama de barras momento 1.25 Fy vs deflexión ensayos a flexión estáticos.



De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la variación de resistencia de una viga en concreto reforzado utilizando empalmes soldados, desarrolla una resistencia muy similar desde la etapa de concreto agrietado hasta la etapa de resistencia última, frente a una viga armada con acero estructural continuo, en función de las cargas transversales estáticas, lo que indica que respecto a estos parámetros no se genera un efecto negativo al utilizar este tipo de conexión.

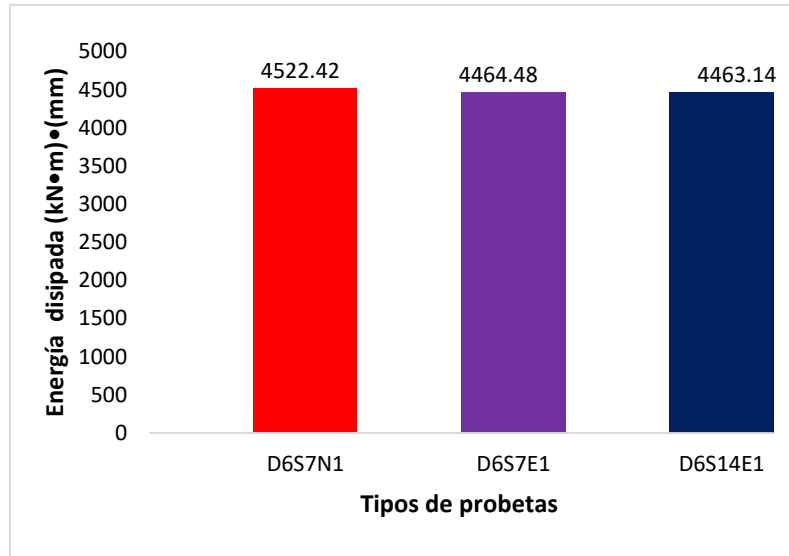
Respecto a la deflexión reportada por el actuador, las probetas fabricadas con empalmes soldados presentaron una diferencia absoluta entre (-0.4 a 0.5) mm respecto al ensayo D6S7N1 (viga patrón), como se observa en la Figura 75, lo que indica que los elementos fabricados con empalme soldados no sufrieron una disminución considerable en la capacidad de elongación del acero de refuerzo antes de alcanzar su límite elástico, coherente con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados en esta investigación.

Figura 75. Diagrama de barras deflexión en etapa de fluencia ensayos a flexión estáticos.



Adicional esto, se calculó el área bajo la curva momento vs deflexión con el fin de analizar la capacidad de absorción de energía de cada elemento, es decir la tenacidad del material. Los elementos fabricados con empalmes soldados proyectaron un valor de tenacidad promedio de 4483,35 kN.m-mm, respecto a la probeta D6S7N1 (viga patrón) desarrollaron una capacidad de absorción de energía adicional de 0.9%; análogamente a lo mencionado y dado el orden de magnitud de este resultado las probetas con empalmes soldados tuvieron un comportamiento idéntico frente a este parámetro. En la Figura 76, se muestra el comportamiento desarrollado por cada una de las probetas.

Figura 76. Diagrama de barras energía disipada en ensayos a flexión estáticos.



4.4.2 ENSAYOS PSEUDOESTÁTICOS

En la *Tabla 14*, se presenta el resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión pura bajo cargas pseudoestáticas en los elementos tipo viga. Con el fin de realizar una comparación precisa se calcularon los valores teóricos de resistencia de los elementos, utilizando los valores obtenidos de esfuerzo de fluencia del refuerzo a tracción promedio (478.1 MPa), resistencia a compresión del concreto (28.2 MPa) y módulo de elasticidad del concreto (27000 MPa). El cálculo analítico de las resistencias se puede ver en el **Anexo 4**.

Tabla 14. Resultados obtenidos ensayos a flexión pseudoestáticos

PROBETA	CARGA (kN)		MOMENTO (kN)		DEFLEXIÓN (mm)
	ETAPA DE FLUENCIA	1.25 ESFUERZO DE FLUENCIA	ETAPA DE FLUENCIA	1.25 ESFUERZO DE FLUENCIA	ETAPA DE FLUENCIA
VALORES ESPERADOS	159.97	195.69	71.98	88.03	2.7
D6S7E2	185.1	213.4	83.3	96	3.9
D6S14E2	179.3	215.7	80.7	97.1	4.1
PROMEDIO	182.2	214.6	82.0	96.6	4.0

Las probetas fabricadas con empalmes soldados bajo efectos de cargas pseudoestáticas alcanzaron los límites de resistencia calculados analíticamente de acuerdo con la *Tabla 14*. Para los ensayos a flexión bajo cargas pseudoestáticas se obtuvieron las curvas de carga-descarga y se compararon con los ensayos bajo cargas

estáticas. En la *Figura 77* y *Figura 78* se puede apreciar claramente que la resistencia máxima para cada ciclo es equivalente a la resistencia desarrollada por la probeta D6S7N1 (viga patrón) bajo efectos de cargas monotónicas.

Figura 77. Curva momento flector vs deflexión ensayos a flexión estáticos y pseudoestáticos D6S7

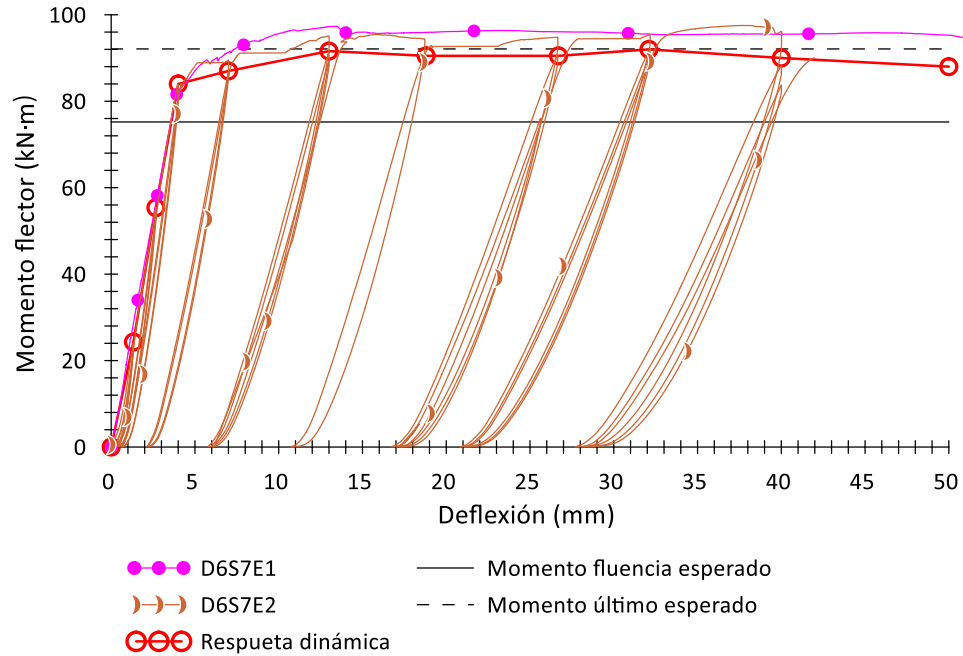
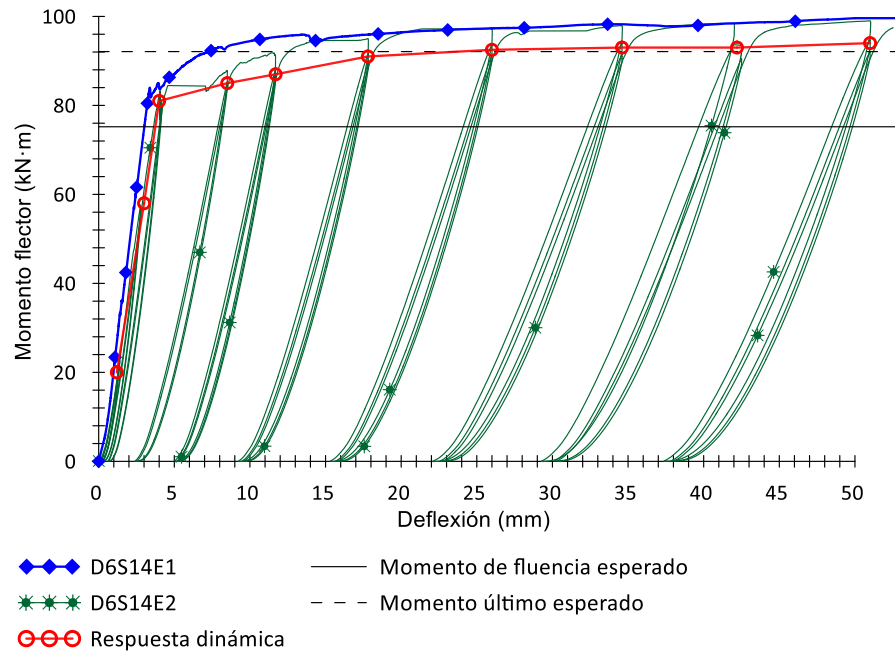


Figura 78. Curva momento flector vs deflexión ensayos a flexión estáticos y pseudoestáticos D6S14



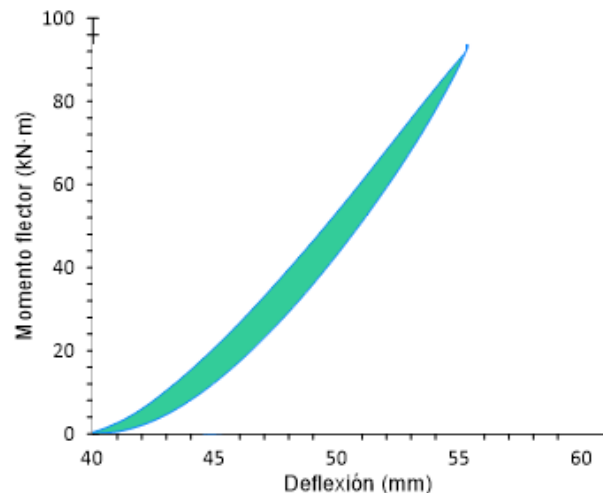
De acuerdo con el objetivo general de esta investigación, para analizar el comportamiento pseudoestático producto de los ciclos regidos por el protocolo de carga aplicado en los elementos planteados, se deben ubicar puntos clave en las curvas construidas. En la *Figura 77* y la *Figura 78* los círculos rojos denotan el cambio de ciclo a largo del desarrollo del ensayo, lo cual nos muestra la respuesta pseudoestático de cada una de las probetas. Con el fin de cuantificar la capacidad de disipación de energía de cada elemento, se calculó el área dentro de la curva de cada uno de los ciclos obtenidos, ver *Tabla 15*.

Tabla 15. Área por ciclos ensayos a flexión pseudoestáticos.

Deflexión (mm)	PROBETA	
	D6S7E2 (kN·m)-(mm)	D6S14E2 (kN·m)-(mm)
0	0	0
4	3	3
8	13	13
12	30	28
16	47	31
22	56	42
28	79	67
34	95	82
40	114	101

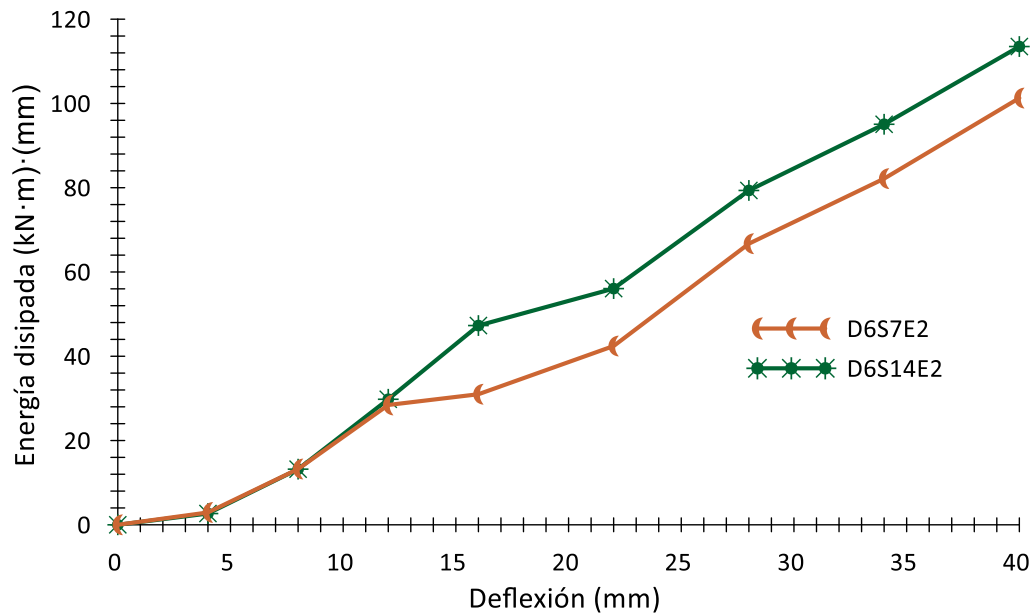
El área tenida en cuenta en cada uno de los ciclos desarrollados a lo largo de los dos ensayos bajo cargas pseudoestáticas es la mostrada en la *Figura 79*. Área considerada en cada ciclo ensayos a flexión pseudoestáticos.

Figura 79. Área considerada en cada ciclo ensayos a flexión pseudoestáticos.



A partir de este cálculo, se pudo construir la curva de energía disipada versus deflexión, la cual muestra el trabajo que debe desempeñar el elemento en función de la carga; es decir, que el elemento con menor confinamiento en función al trabajo sufrió mayores deflexiones, y a su vez mayor daño, en relación con el elemento de mayor confinamiento. Cabe resaltar que se limitó el procesamiento de datos hasta una deflexión de 40 mm puesto que en el elemento D6S7E2, el actuador no tuvo la capacidad necesaria para continuar dicho ensayo. En la *Figura 80*. Curva energía disipa vs deflexión ensayos a flexión pseudoestáticos. se puede evidenciar el aumento de la capacidad de disipación de energía a lo largo del desarrollo de todo el ensayo.

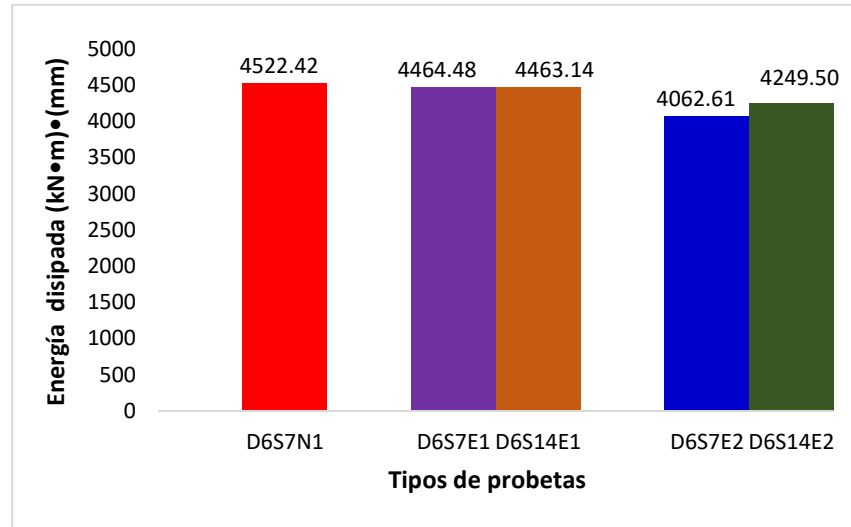
Figura 80. Curva energía disipa vs deflexión ensayos a flexión pseudoestáticos.



Como se muestra en la *Figura 80*. Curva energía disipa vs deflexión ensayos a flexión pseudoestáticos. las vigas disipan mayor cantidad de energía a medida que aumenta la deflexión en el elemento, de igual manera los valores obtenidos para ambos ensayos evidencian un comportamiento similar.

Es importante comparar los resultados obtenidos con los desarrollados por las probetas sometidas a cargas estáticas, al calcular el área total bajo la curva de cada uno de los ensayos realizados, se pudo construir la gráfica mostrada en la *Figura 81*, en la cual se muestra la capacidad de absorción de energía para los 5 ensayos realizados.

Figura 81. Energía disipada por las probetas bajo ensayos estáticos y pseudoestáticos.



De acuerdo con los valores obtenidos, en Tabla 16, se cuantificó la variación de la tenacidad en los elementos respecto a la probeta D6S7N1 (viga patrón).

Tabla 16. Tenacidad vigas con empalme soldados respecto a viga patrón.

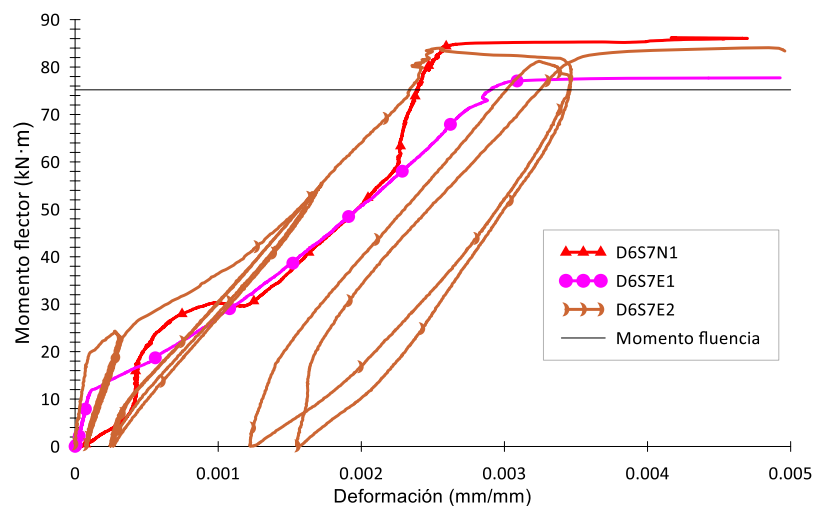
ENERGÍA DISIPADA RESPECTO A LA PROBETA D6S7N1	
PROBETA	(%)
D6S7E1	98.72%
D6S14E1	98.69%
D6S7E2	89.83%
D6S14E2	93.97%

Se evidencia que los elementos fabricados con empalmes soldados desarrollaron entre un (6.03 a 10.17) % menos de tenacidad al ser sometidos a efectos de cargas pseudoestáticas respecto a la probeta D6S7N1 (viga patrón). Al comparar las probetas D6S7E1 y D6S7E2, en la cual la única diferencia que hubo fue el tipo de carga aplicadas, la probeta D6S7E2 desarrolló un 8.89% menos tenacidad al ser sometida a efectos de cargas pseudoestáticas. De igual manera se comparó la tenacidad desarrollada por las probetas D6S14E1 Y D6S14E2, donde se constataron los resultados obtenidos ya que la probeta sometida bajo cargas pseudoestáticas desarrolló un 4.72% menos de tenacidad.

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, el orden de magnitud mostrado no genera una pérdida de capacidad estructural importante por lo que el comportamiento de los elementos fabricados con empalme soldado frente a la probeta D6S7N1 (viga patrón) es muy similar.

En Figura 82, se puede observar las deformaciones unitarias registradas por los strain gauge contra el momento desarrollado, no fue posible registrar por completo la meseta de fluencia con las bandas debido a que estas se dañaban, sin embargo, se puede observar que la fluencia en el refuerzo inició para un momento superior al momento de fluencia calculado analíticamente.

Figura 82. Curva momento flector vs deformación unitaria strain gauges.



Para la viga D6S7E2, se resalta que el strain gauge reportó los primeros ciclos de histéresis y no se observa pérdida de rigidez pues las pendientes de que cada ciclo se encuentran paralelas.

5 ANÁLISIS ECONÓMICO TIPOS DE EMPALMES

Se cuantificó mediante un análisis de precio unitario el costo de la construcción de un empalme soldado con camisa de refuerzo para barras de número 6 (3/4”), con el fin de comparar el costo obtenido respecto a los empalmes mecánicos y por traslape, ver Tabla 17. Análisis de costo empalme soldado con camisa perimetral

Tabla 17. Análisis de costo empalme soldado con camisa perimetral.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
PROYECTO: ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO PSEUDOESTÁTICO DE EMPALMES SOLDADOS A TOPE CON CAMISA DE REFUERZO PARA BARRAS N6						
						Fecha: 16 - Oct - 2018
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	VALOR	REND.	PRECIO UNITARIO
EQUIPOS						
	Moto soldador (1 empalme cada 1/2 hora)	Mes	1.00	\$ 1,720,000	3072	\$ 560
	Tronzadora (1 empalme cada 1/2 hora)	Mes	1.00	\$ 200,000	3072	\$ 65
						\$ 625
MATERIALES						
	Soldadura 90-18 Lincoln	kg	1.00	\$ 14,580	4.45	\$ 3,280
	Camisa perimetral SCH 160 1"	kg/m	1.00	\$ 24,000	10	\$ 2,400
	Disco de tronzadora 1/8" Dewalt	Un	1.00	\$ 26,000	100	\$ 260
						\$ 5,940
SUBCONTRATOS						
	Soldador (1 empalme cada 1/2 hora)	Mes	1.00	\$ 3,000,000	3072	\$ 977
	Mecanizado camisa perimetral (1 empalme cada 1/2 hora)	Mes	1.00	\$ 1,200,000	3072	\$ 391
						\$ 1,367
Valor del empalme soldado						\$ 7,932

De acuerdo con la investigación realizada por Alvis y Guerra (2017), denominada “Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos rosca-dos en edificaciones” donde se cuantificó el costo de la construcción de empalmes mecánicos y por traslape, para el caso de estudio Edificio T7 T8 - Ciudad Empresarial Luis Carlos Sarmiento Ángulo, Ciudad: Bogotá D.C se reportó los siguientes análisis de costo mostrados en la Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 18. Costos de empalmes mecánicos en la primera etapa de construcción T7 y T8.

COSTOS DE EMPALMES MECÁNICOS UTILIZADOS				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Empalme roscado #5 (5/8")	Un	4234	\$ 7,021	\$ 29,726,914
Empalme roscado #6 (3/4")	Un	2934	\$ 8,806	\$ 25,836,804
Empalme roscado #7 (7/8")	Un	1348	\$ 10,115	\$ 13,635,020
Empalme roscado #8 (1")	Un	2456	\$ 11,662	\$ 28,641,872
Empalme roscado #10 (1 1/4")	Un	1886	\$ 18,921	\$ 35,685,006

Fuente: Alvis y Guerra (2017).

Tabla 19. Costos de empalmes por traslape en la primera etapa de construcción.

COSTOS DE EMPALMES TRASLAPADOS BASADOS EN LAS CANTIDADES DE EMPALMES MECÁNICOS UTILIZADOS					
DESCRIPCIÓN	LONGITUD (m)	PESO POR UNIDAD DE TRASLAPO (kg)	CANTIDAD TOTAL DE EMPALMES	VALOR UNITARIO COMERCIAL DEL KILOGRAMO DE ACERO ²⁶	VALOR TOTAL
Empalme roscado #5 (5/8")	0.70	1.552	4234	\$ 2,167	\$ 9,967,805
Empalme roscado #6 (3/4")	0.90	2.235	2934	\$ 2,167	\$ 12,789,073
Empalme roscado #7 (7/8")	1.20	3.042	1348	\$ 2,167	\$ 10,663,242
Empalme roscado #8 (1")	1.40	3.973	2456	\$ 2,167	\$ 29,602,874
Empalme roscado #10 (1 1/4")	1.70	6.404	1886	\$ 2,230	\$ 45,787,486

Fuente: Alvis y Guerra (2017).

Se ajustaron los precios obtenidos por Alvis y Guerra (2017) al (2018), teniendo en cuenta el índice de precio al consumidor (IPC) de 5.9%. En la Tabla 20, se muestra la comparación del costo de los tipos de empalme.

Tabla 20. Comparativo económicos tipos de empalme con Alvis y Guerra (2017).

COMPARATIVO ECONÓMICO DE LOS TIPOS DE EMPALME			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Empalme soldado con camisa. #6 - (3/4")	2934	\$ 7,932	\$ 23,272,488
Empalme roscado. #6 - (3/4")	2934	\$ 9,326	\$ 27,362,484
Empalme por traslape. #6 - (3/4")	2934	\$ 2,295	\$ 6,733,530
			"SIN IVA"

La cantidad de empalmes para diámetro número 6 (2934 unidades) se tomó del mismo caso de estudio reportado por Alvis y Guerra (2017), donde se evidencia que hay una disminución en costo de un 15% al utilizar empalmes soldados frente a el uso de empalmes mecánicos roscados, qué es equivalente a un ahorro de \$4,087,062 para este caso de estudio. Respecto a los empalmes por traslape, hay un aumento de costo de 345%. Cabe resaltar que, de acuerdo con la justificación de esta investigación, el uso de empalmes por traslape no es recomendable para elementos sometidos a altas sollicitaciones sísmicas.

CONCLUSIONES

- El empalme soldado fabricado con camisas perimetrales de refuerzo y soldadura 90-18, es capaz de desarrollar una resistencia de 1.25 veces el esfuerzo de fluencia requerido por el reglamento NSR-10 y por la NTC2289, por lo cual no limita su uso en zonas de amenaza sísmica alta, que requieren una disipación especial de energía (DES - DMO).
- El uso de empalmes soldados con camisa perimetral de refuerzo no genera ningún comportamiento atípico en la construcción de estructuras en concreto reforzado, ya que cumple con los mínimos requerimientos exigidos para los otros tipos de empalme.
- Los empalmes soldados al tener el mismo comportamiento mecánico que los demás tipos de empalmes, son una alternativa viable para la construcción de estructuras en concreto reforzado, solucionando posibles congestiones de refuerzo presentadas debido al uso de empalmes por traslapo.
- Al presentarse la fluencia y la falla del acero estructural por fuera del empalme soldado con camisa perimetral de refuerzo, este puede ser aprovechado como elemento constructivo localizado en zonas de plastificación, atendiendo los efectos sísmicos en zonas de amenaza sísmica alta que requieren una disipación especial de energía (DES-DMO).
- El empalme soldado con camisa perimetral de refuerzo tiene mayor resistencia que la barra corrugada, obligando así la fluencia y la falla fuera de este, por lo tanto, la disipación de energía lograda mediante el sostenimiento del momento flector después de la fluencia es equivalente al elemento sin empalme.
- Los empalmes soldados con camisa perimetral de refuerzo trabajando en conjunto con el concreto reforzado, tienen una disminución despreciable en la capacidad de disipación de energía respecto a elementos en concreto reforzado armados sin ningún tipo de empalme.
- Los empalmes soldados con camisa perimetral de refuerzo resultan competitivos en cuestión de costos, puesto que son más económicos frente a los empalmes mecánicos que se encuentran actualmente en el mercado.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Evaluar el comportamiento del empalme soldado en conexiones viga columna (RC), al ser solicitados a cargas pseudoestáticas, estando inmerso en ciclos tracción y compresión.
- Determinar la influencia del empalme en la evolución de fracturas sometidas a flexión pseudoestática.
- Se debe extender la investigación para diferentes diámetros de barras, siendo recomendadas las barras N7 en adelante, debido a la congestión que se presentan al utilizar empalmes por traslapo.
- Al realizar pruebas de tracción típicas en este tipo de elementos, se recomienda utilizar barras de 0.80 m, ya que la longitud de 0.60 m planteada en esta investigación dificultó un poco el montaje.
- Se recomienda para futuras investigaciones realizar inspecciones radiográficas en las conexiones soldadas, con el fin de analizar la zona afectada por el calor (ZAC) producto del proceso de soldado.

Se invita a futuros aspirantes de maestría en Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana y demás investigadores, continuar la presente investigación aprovechando al máximo los servicios que prestará la nueva sede de la facultad de ingeniería civil, evaluando el empalme en estructuras más complejas, por ejemplo, pórticos tridimensionales.

BIBLIOGRAFÍA

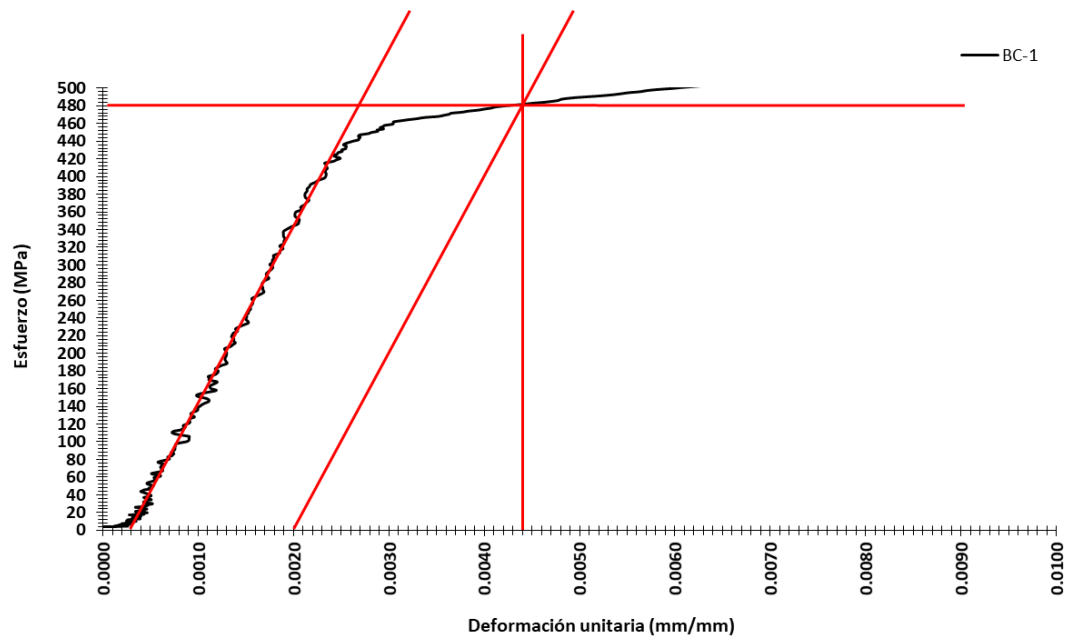
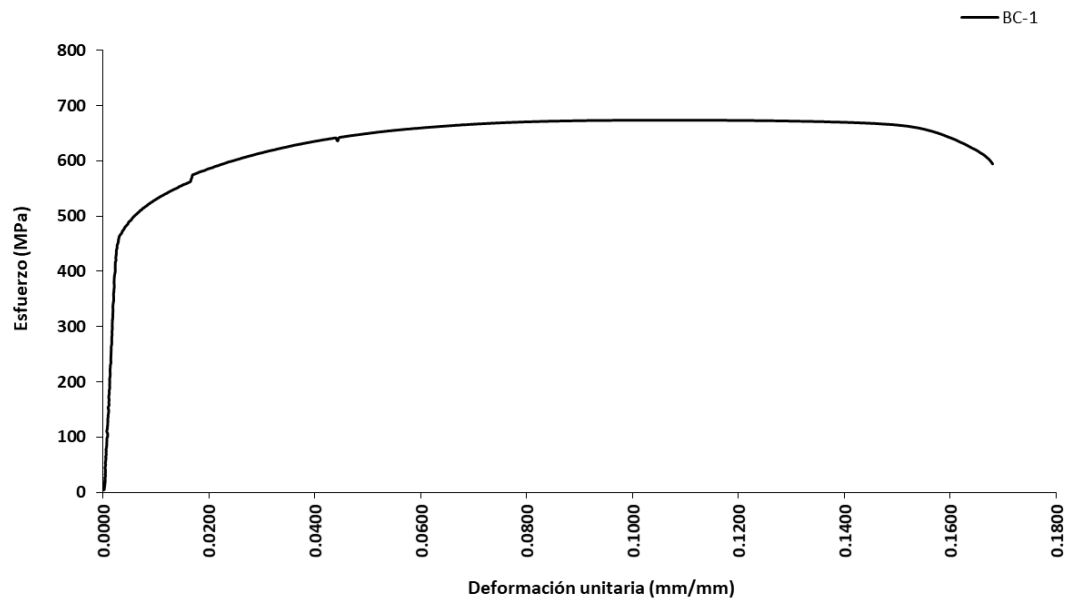
- Ahmed, Ghafur H. (2015). Mechanical Properties of Welded Deformed Reinforcing Steel Bars. Koya University.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. Structural Welding Code - Reinforcing Steel. Miami: AWS, 1992, 39 p. (AWS/AWS D1.4-92)
- Arriagada, Rodrigo Andrés Meza. (2007). Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción.
- Castillo, C., Velásquez, H. (2016). Precalificación de un empalme soldado para barras de refuerzo que cumplen la norma NTC-2289. “Universidad de la Salle”, Bogotá D.C.
- Ding, F. Liu, J. Liu, X. (2018). Experimental investigation on hysteretic behavior of simply supported Steel-concrete composite beam. Journal of Constructional Steel Research.
- Espinosa, Villela. (2004). Evaluación a la Microestructura y a las Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable 316LS y del Titanio Ti-6Al-4V como Biomateriales. Tesis Licenciatura. Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Mayo.
- Fonseca, A. Guerra, B. (2017). Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones. Universidad Distrital. Bogotá D.C
- González, V. Botero, J. Rochel, R. (2005). Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia. Ingeniería y Ciencia. Universidad EAFIT.
- Herrera, R. Bonelli, P. (2014). Estudio experimental del comportamiento de barras de refuerzo en muros de hormigón armado pertenecientes a un edificio dañado durante el terremoto del 2010. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago de Chile.
- Hlinka, J. (2014). Welding Reinforcing Steel. STRUCTURE Magazine, 23-24.
- Issa, Camille A., y Antoine Nasr. (2005). An experimental study of welded
- Jianyang, X. Xing, Z. Rui, R. (2018) Experimental and numerical study on seismic performance of Steel reinforced recycled concrete frame structure under low-cyclic reversed loading. Advances in Structural Engineering.
- Liévano, M. Gutiérrez, A. (2011). Caracterización de fisura en vigas de concreto reforzado con adición de fibras de polipropileno sometidas a flexión pseudoestática. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Mayorga Vela, Carlos A. (2011). Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un dissipador pasivo de energía de tipo arriostamiento de pandeo restringido “Universidad Nacional”, Bogotá D.C.
- McCormac, J. C. (2018). Diseño de concreto reforzado. México: Alfaomega, Décima edición.
- NEHRP RECOMMENDED SEISMIC PROVISIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES – FEMA P – 750. Edición (2009).

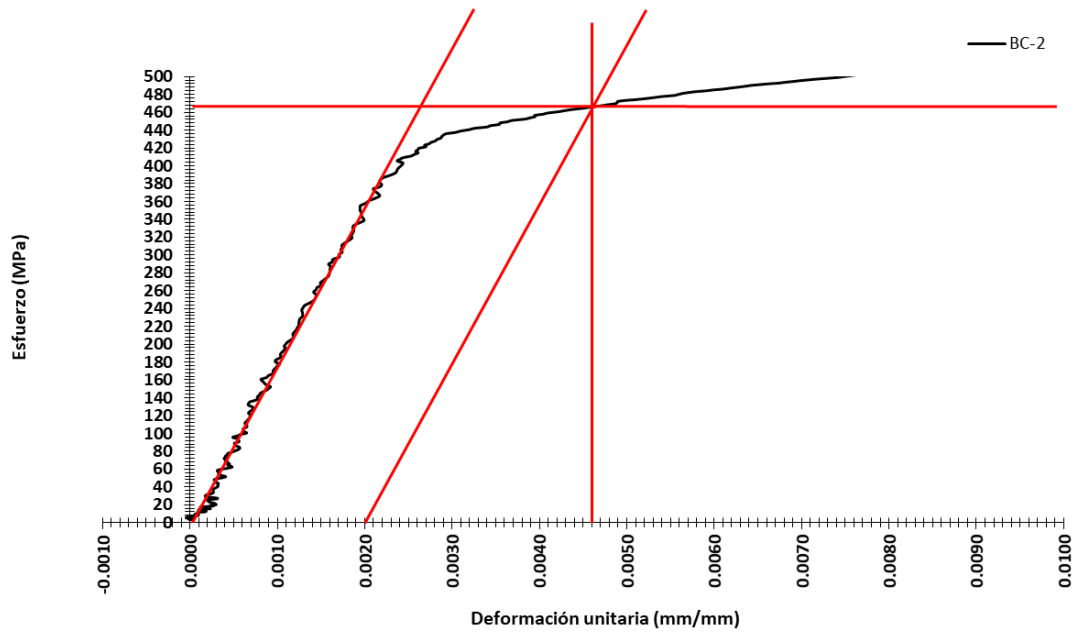
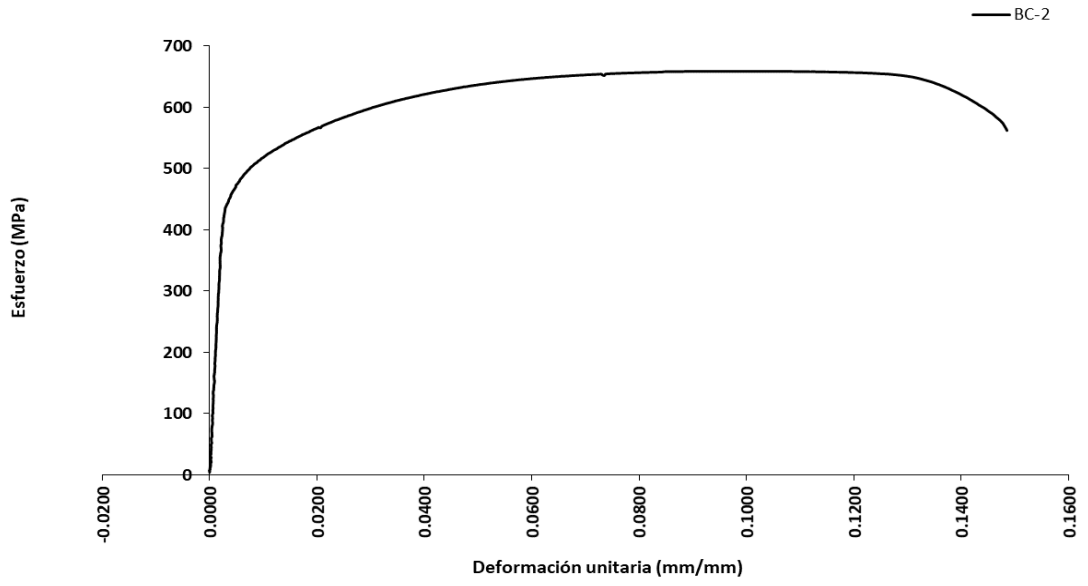
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA -NTC 2289. Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto. Decima actualización (2015).
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA -NTC 4040. Soldadura. Procedimientos de soldadura para el acero de refuerzo. (1997).
- Parks, J. Papulak, T. Pantelides, C. (2016). Acoustic emission monitoring of grouted splice sleeve connectors and reinforced precast concrete bridge assemblies “University of Utah”, Salt Lake City.
- REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES NSR-10, Decretos 2525 del 2010, 092 del 2011, 340 del 2012 y 945 del 2017.
- Rivera, Ariel Felipe Quezada. (2010). «Efectos de la Soldadura en Empalmes de Acero de Refuerzo, para Hormigón Armado». MyScienceWork.
- Robert M. Brick, Alan W. Pense B. Gordon. (1987) Structure and Properties of Engineering Materials, McGraw-Hill Publishing Company, Fourth Edition.
- Rodríguez, M. Botero, J. (1995). Comportamiento sísmico de estructuras considerando propiedades mecánicas de acero de refuerzo mexicanos. Revista de ingeniería sísmica, N° 49, 39 – 50.
- Rodríguez, Mario, Rodríguez Asabay, Javier. (2006). Se debe evitar la soldadura de barras de refuerzo en estructuras de concreto reforzado en zonas sísmicas de México - ci_25_soldadura_de_cabillas.pdf». 2017.
- Smith, William. (1931). Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill Publishing Company, Second Edition.
- Sooyong P, Sanghyun C. (2005) A modal parameter-based technique to inspect welded reinforcement splices. Engineering Structures 28, 453–465
- Uribe Vallejo, Maritza, Valencia Clement, Gabriel. (2009). Calificación de una conexión rígida de una viga I y una columna tubular rellena de concreto bajo la acción de cargas pseudoestáticas “Universidad Nacional”, Bogotá D.C.
- Xide, Z. Zhiheng, D. Xiao fang, D. (2018). Experimental study on seismic behaviors of beam with concrete-encased Steel truss. Advances in Structural Engineering.

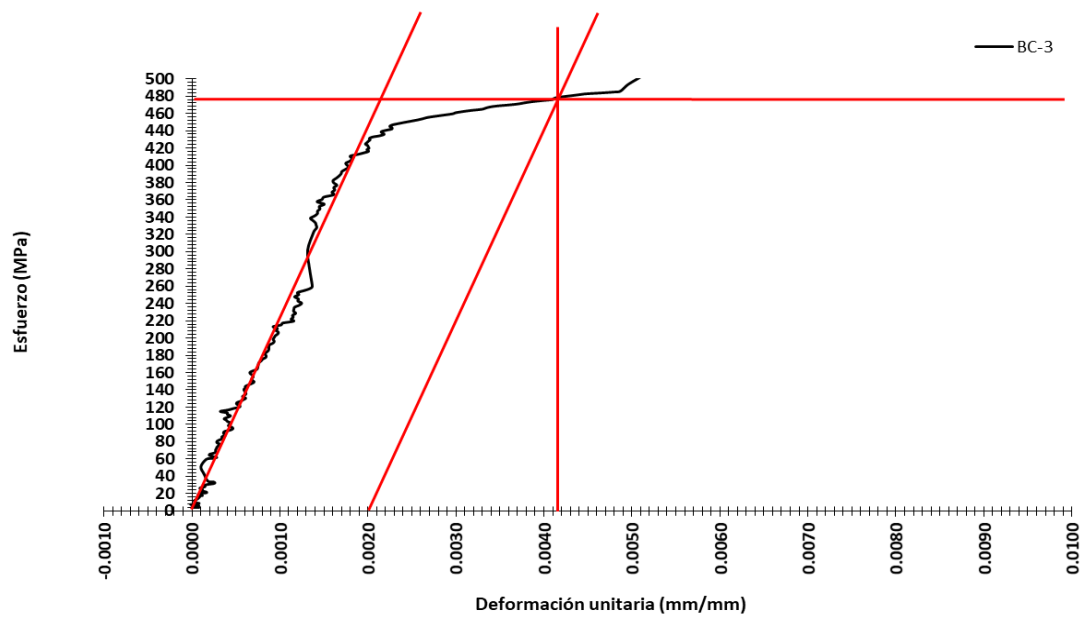
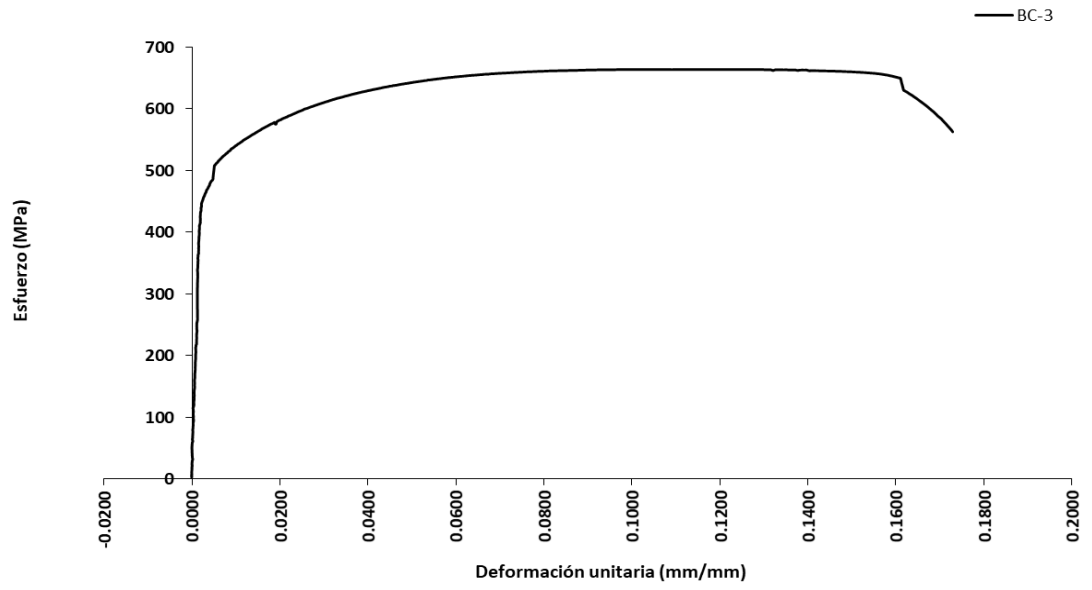
ANEXOS

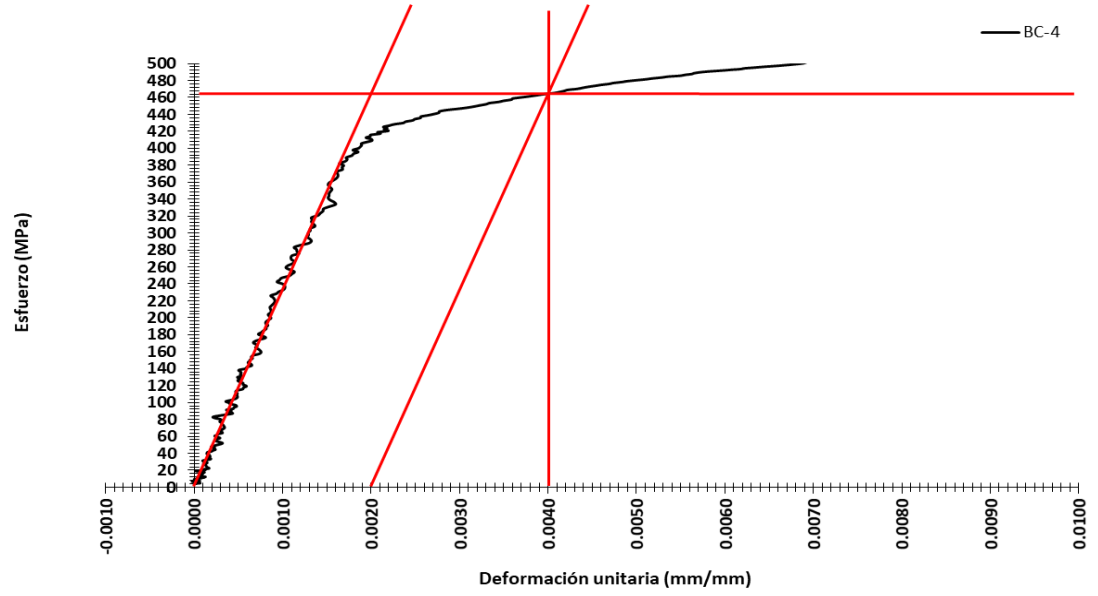
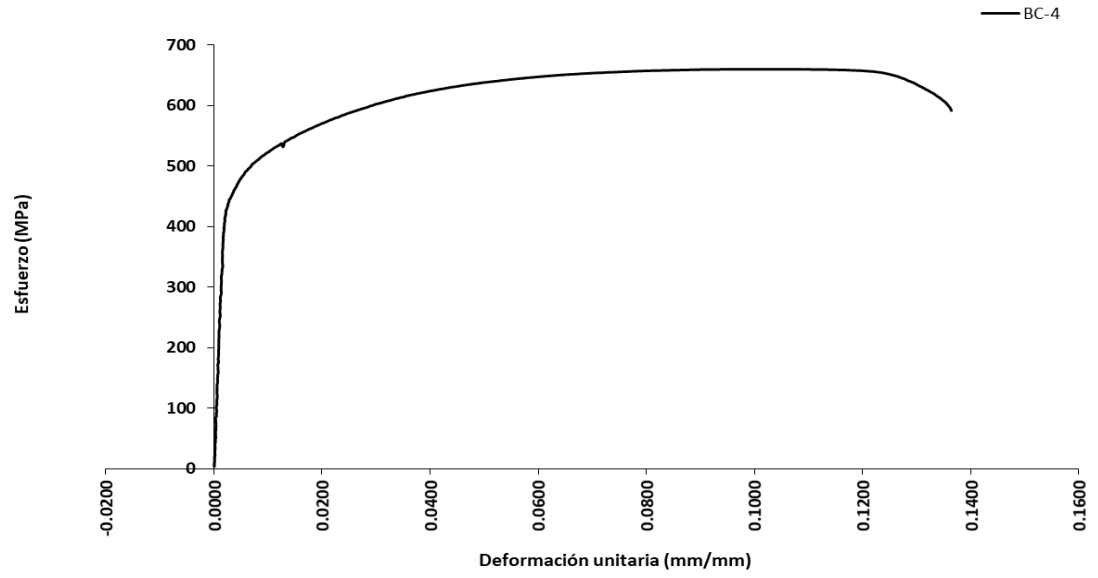
ANEXO 1

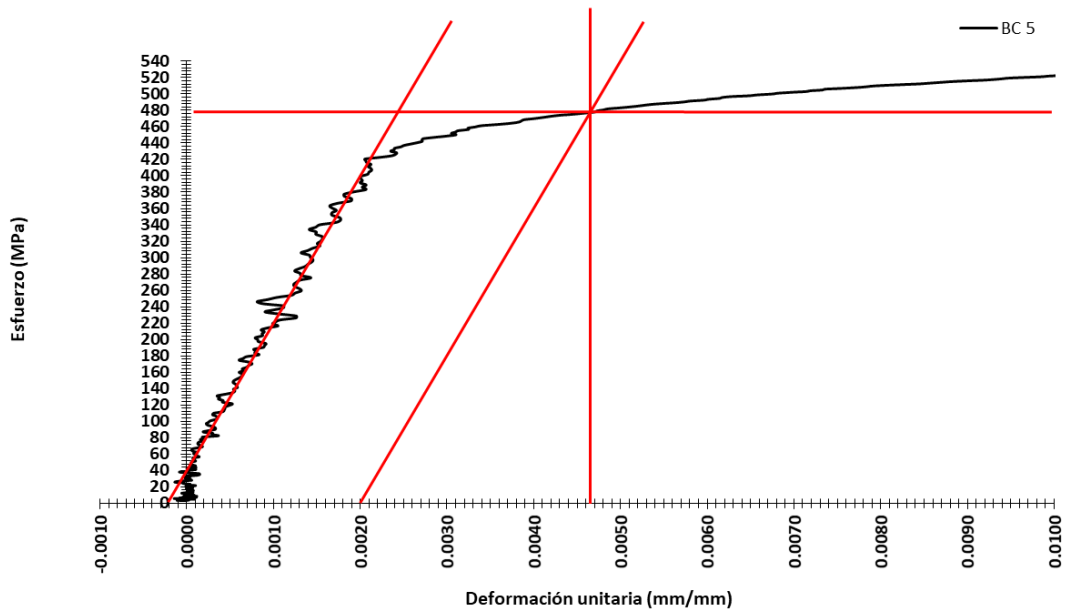
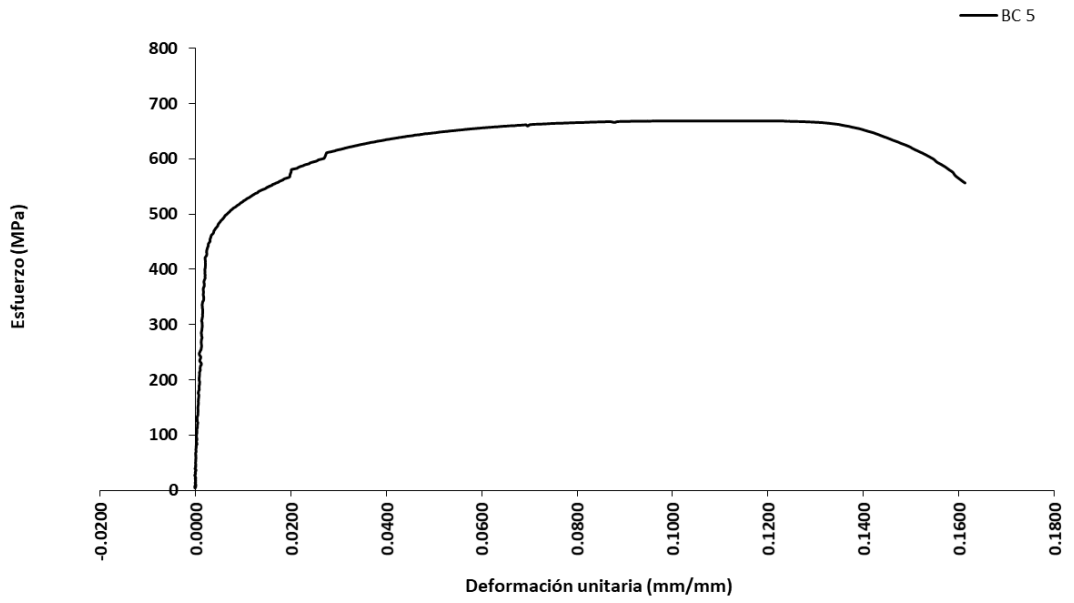
CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN UNITARIA DE EMPALMES

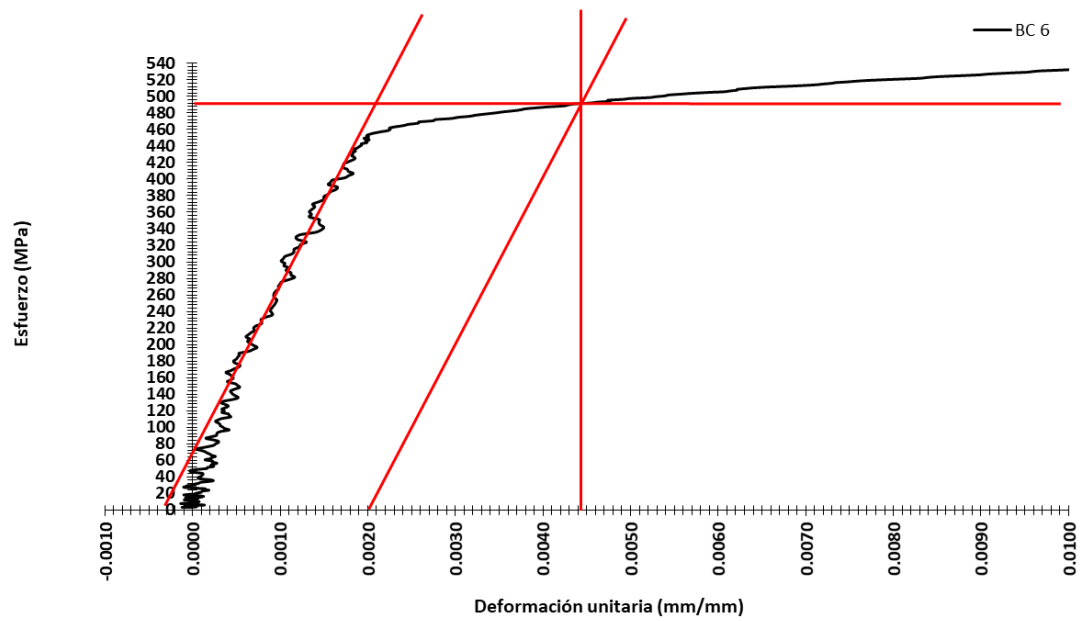
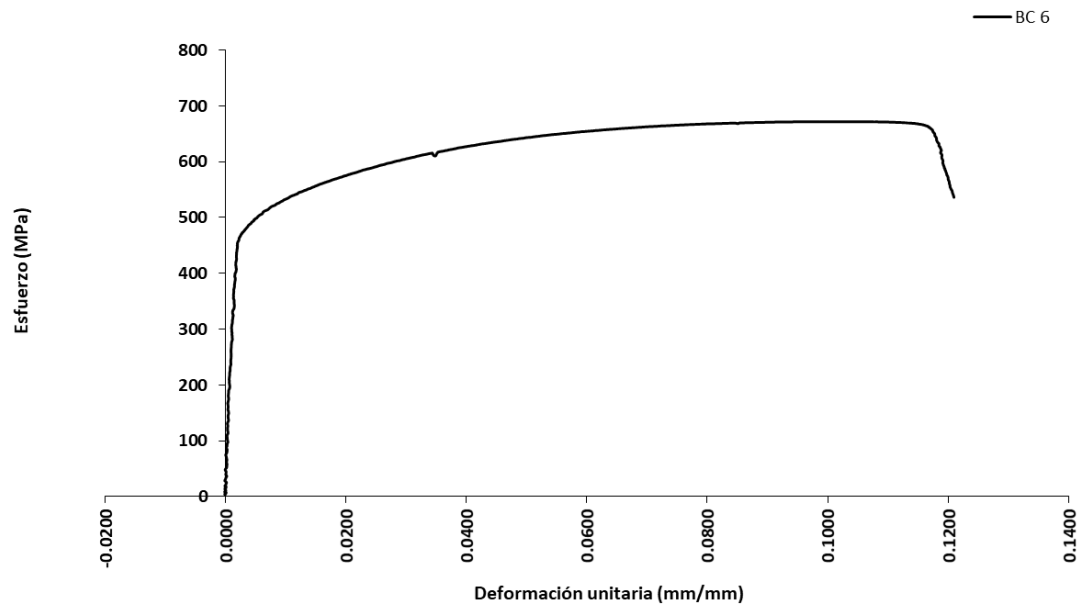


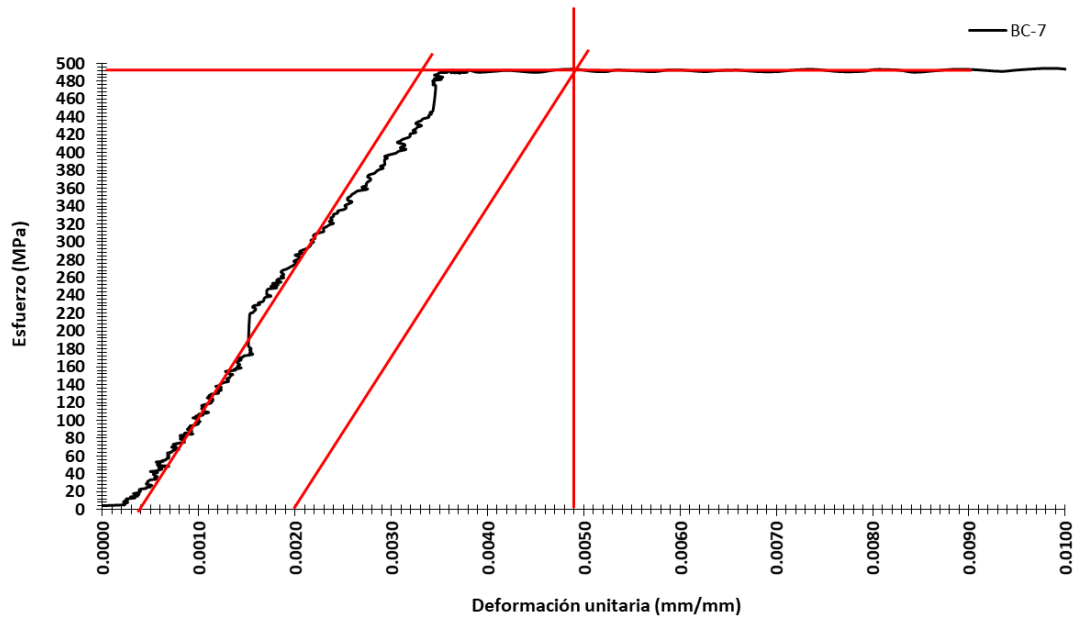
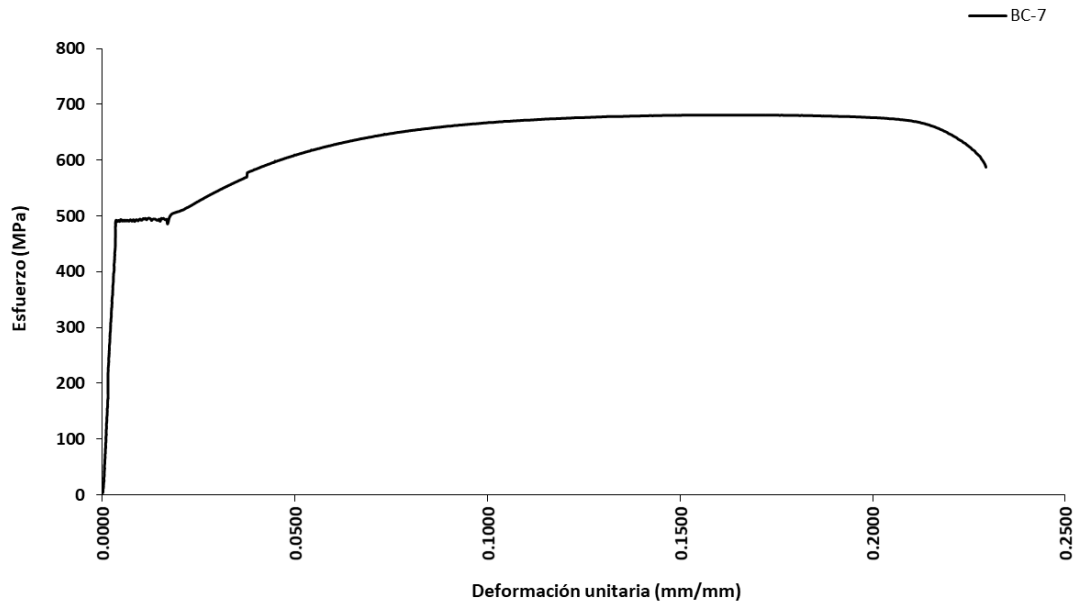


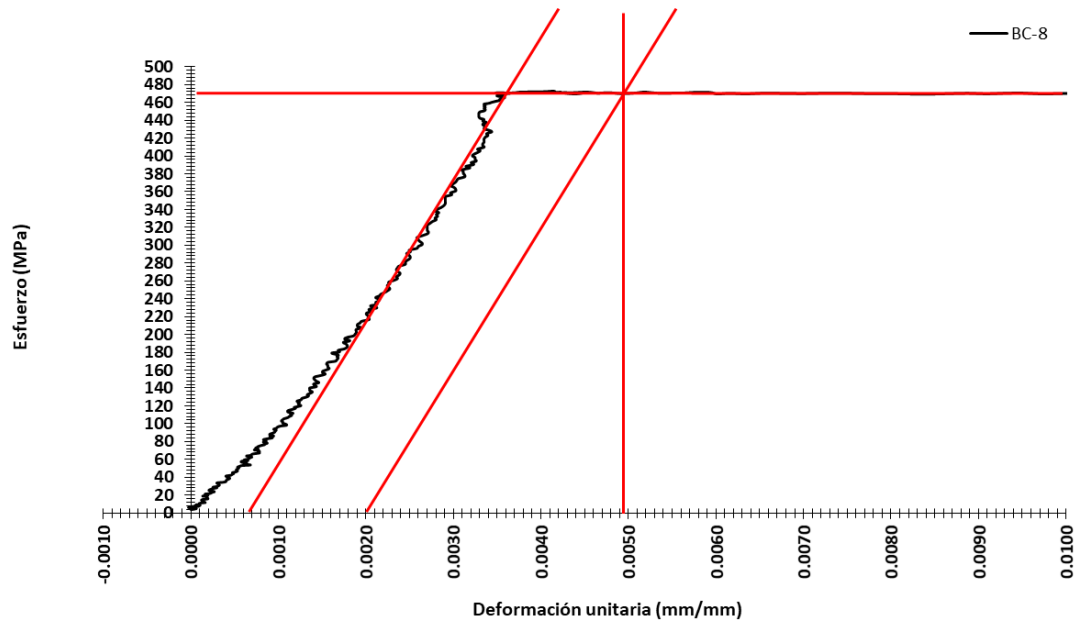
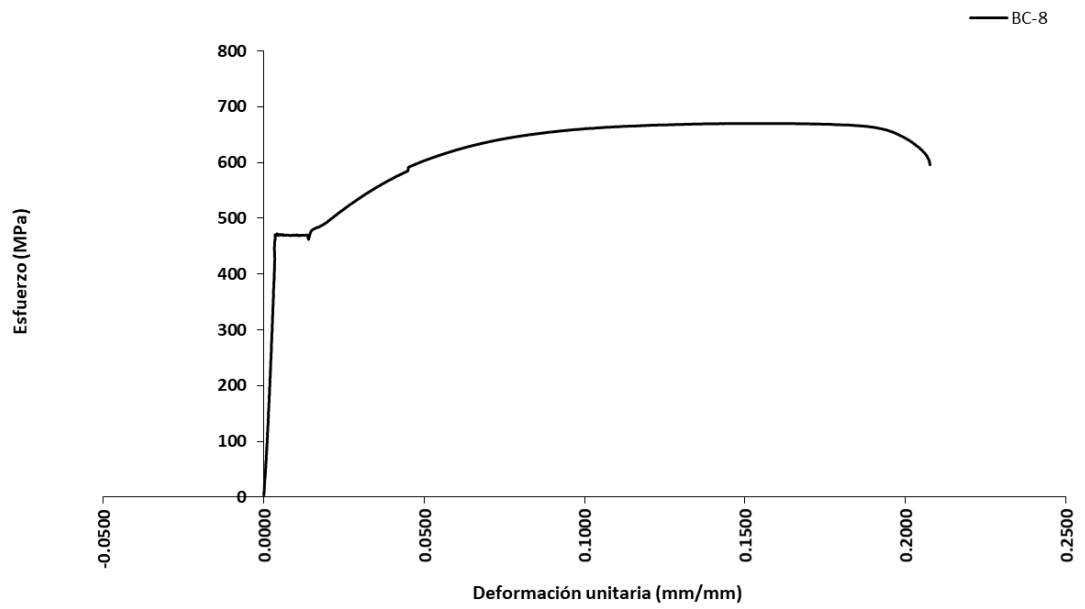


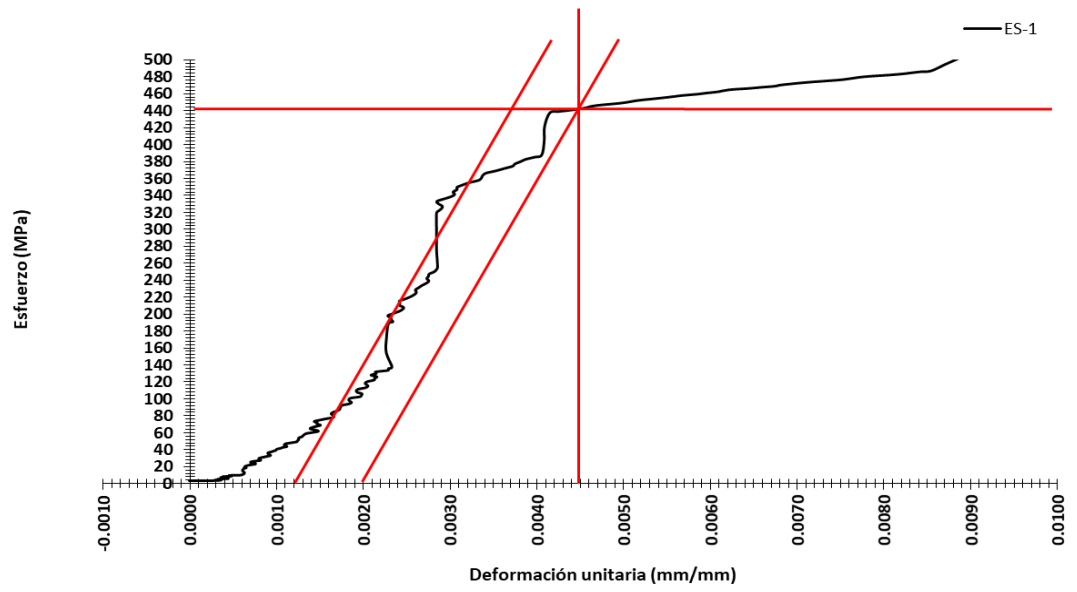
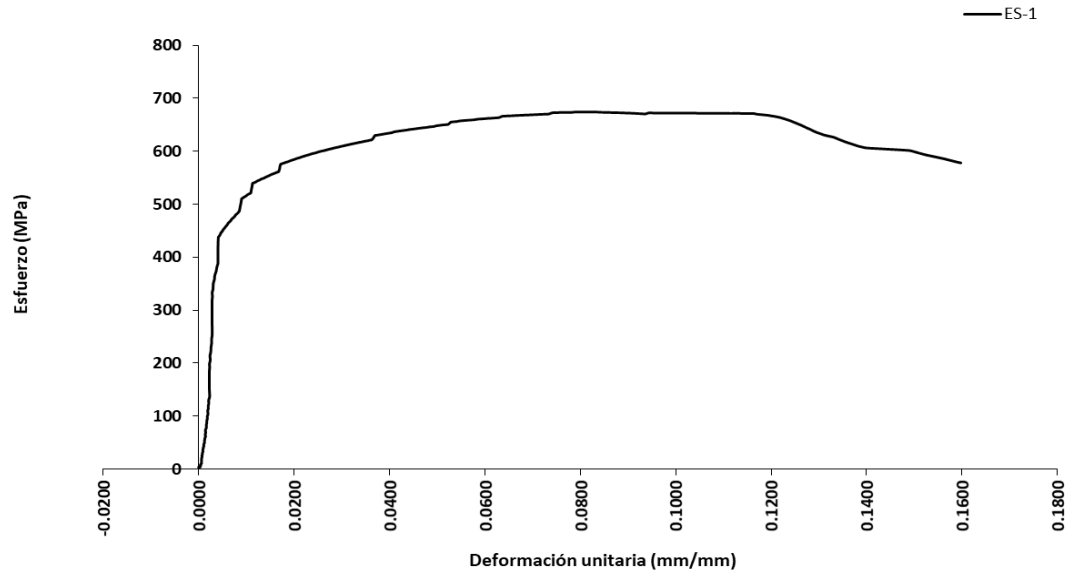


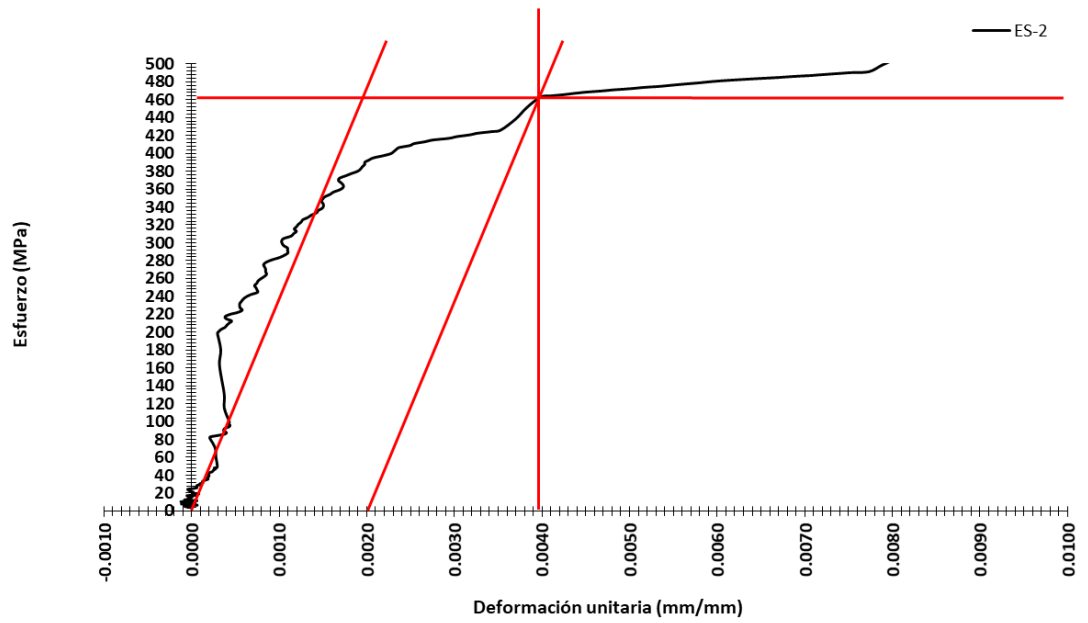
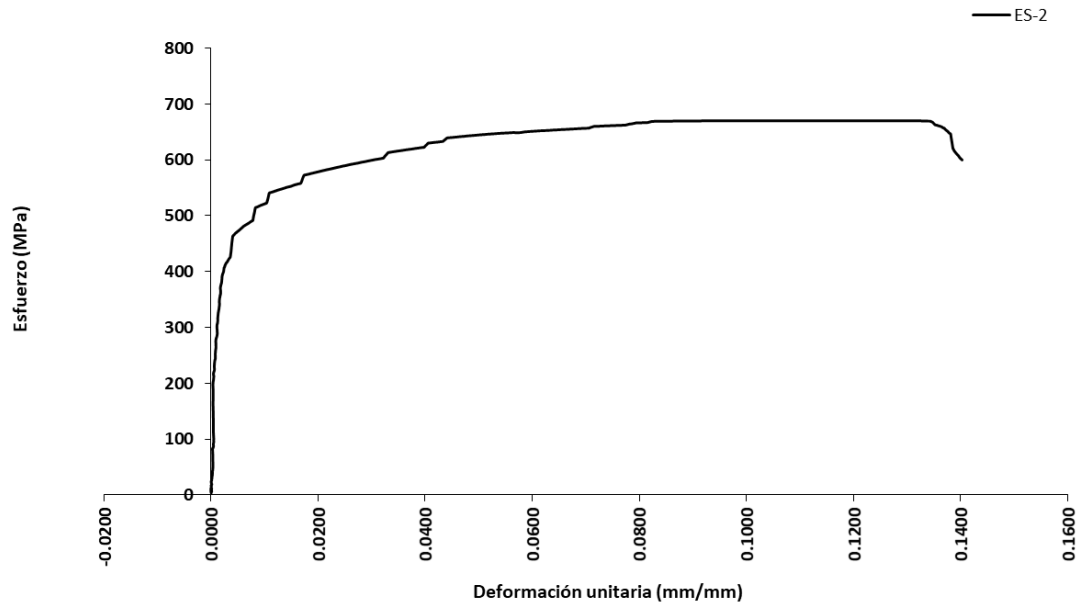


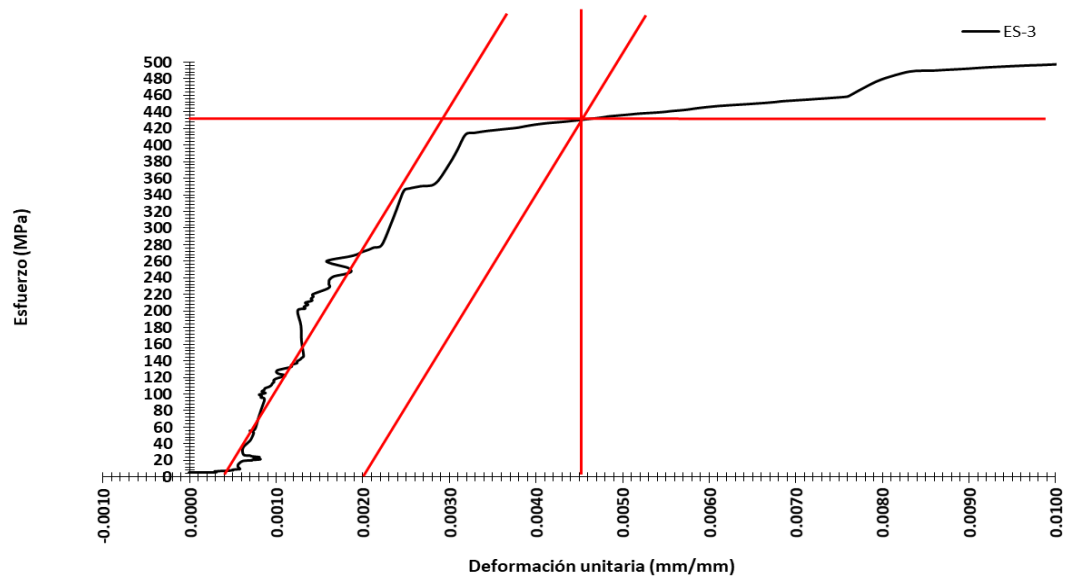
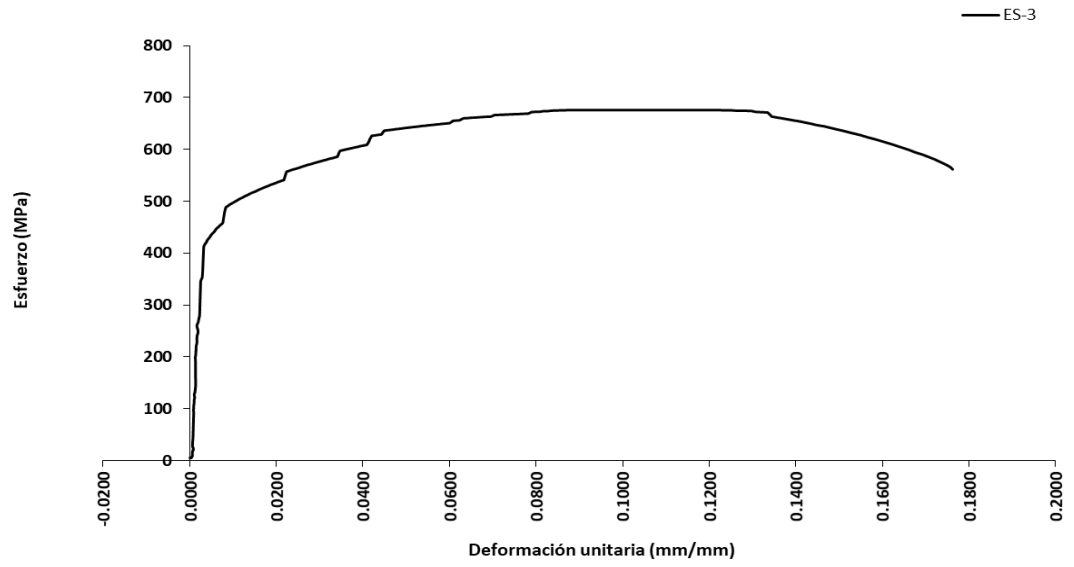


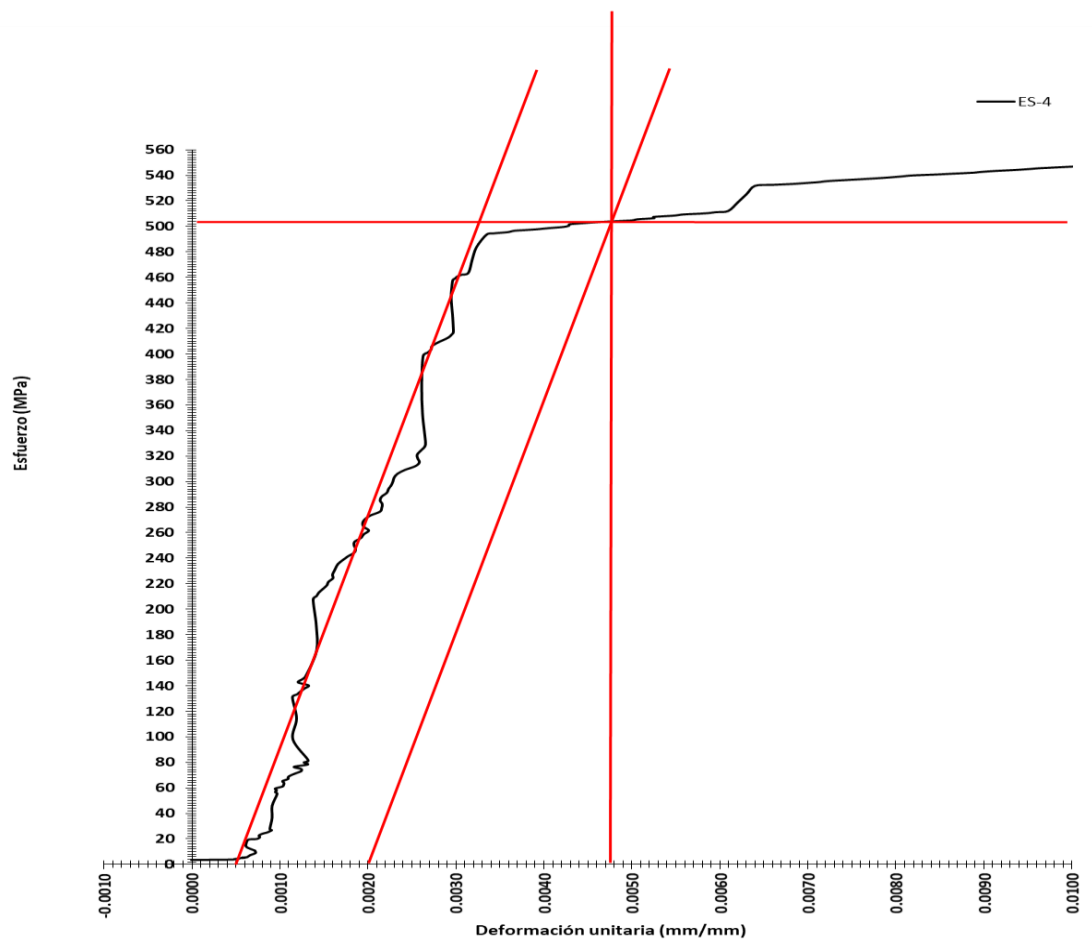
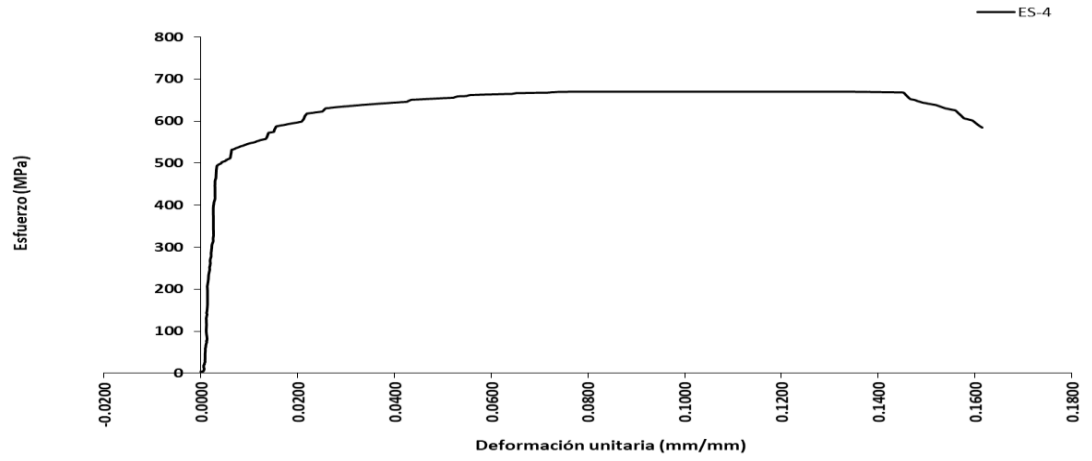


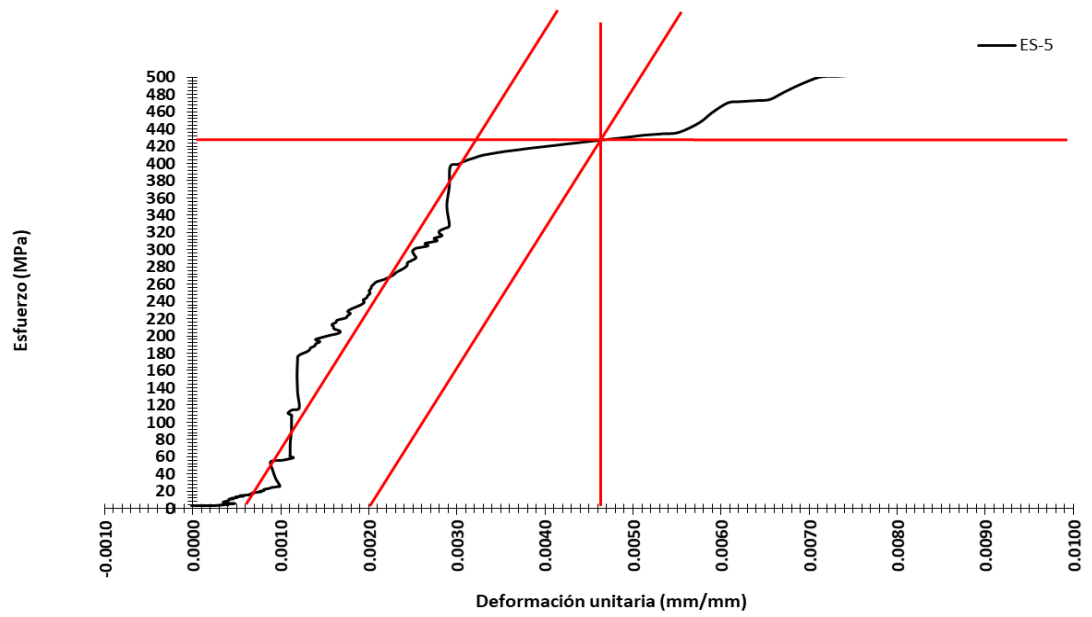
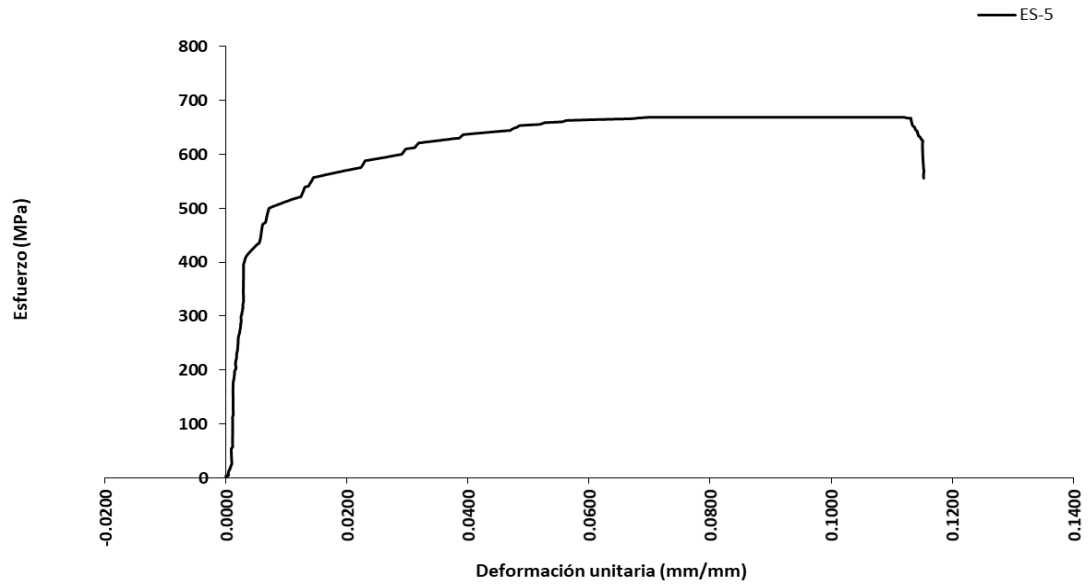


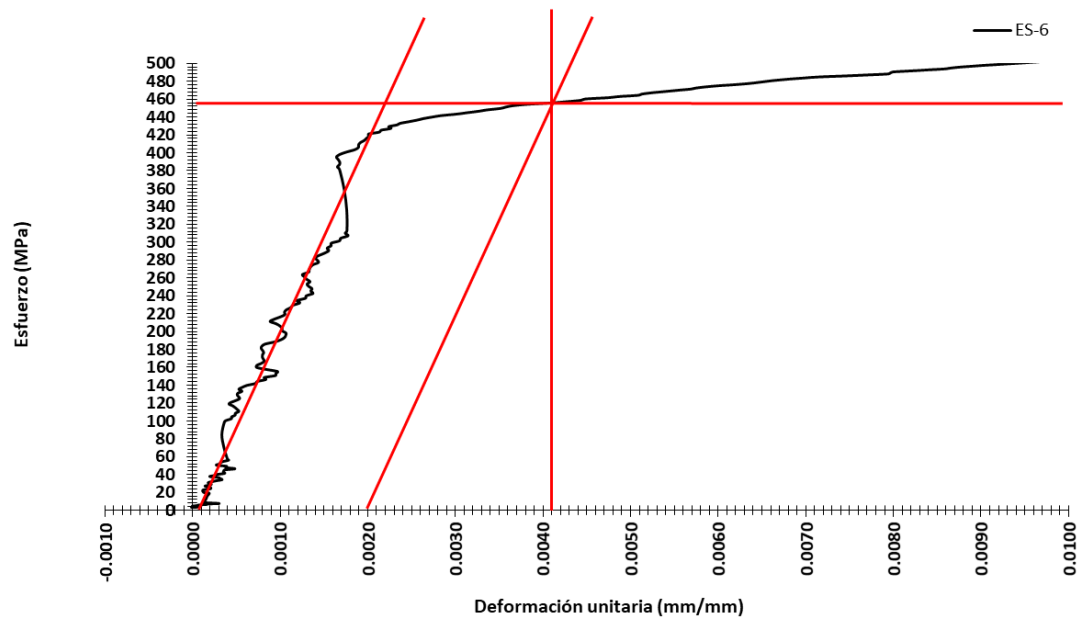
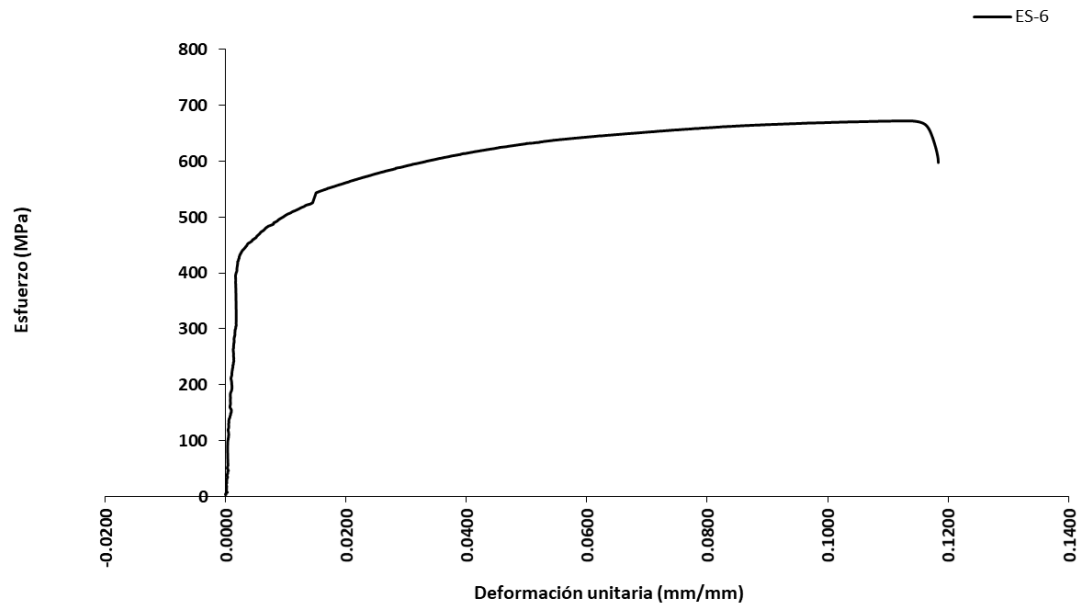


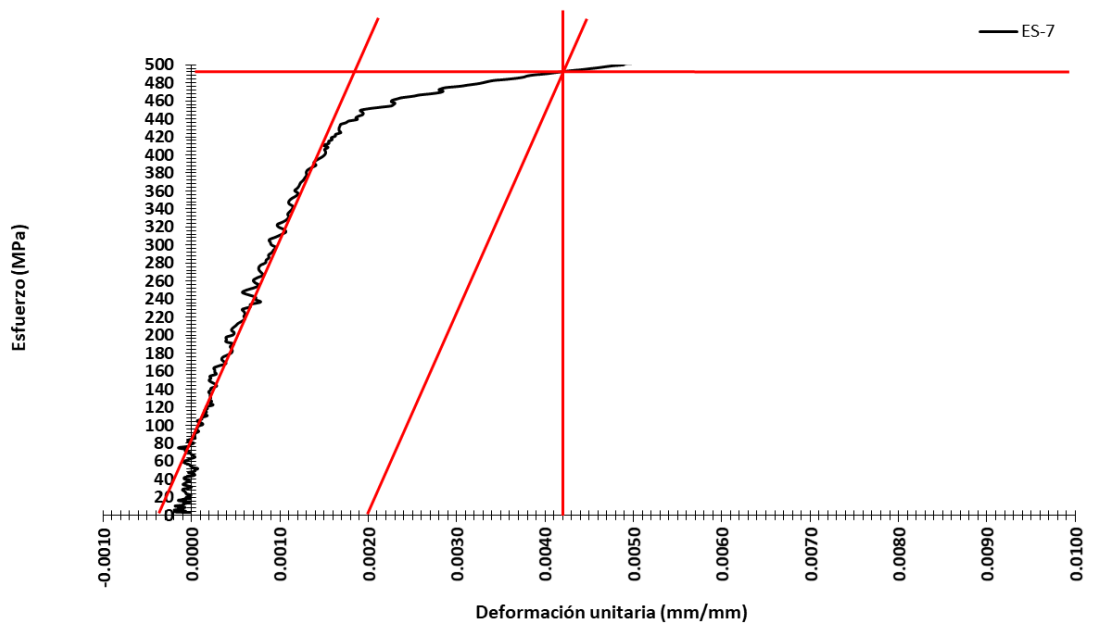
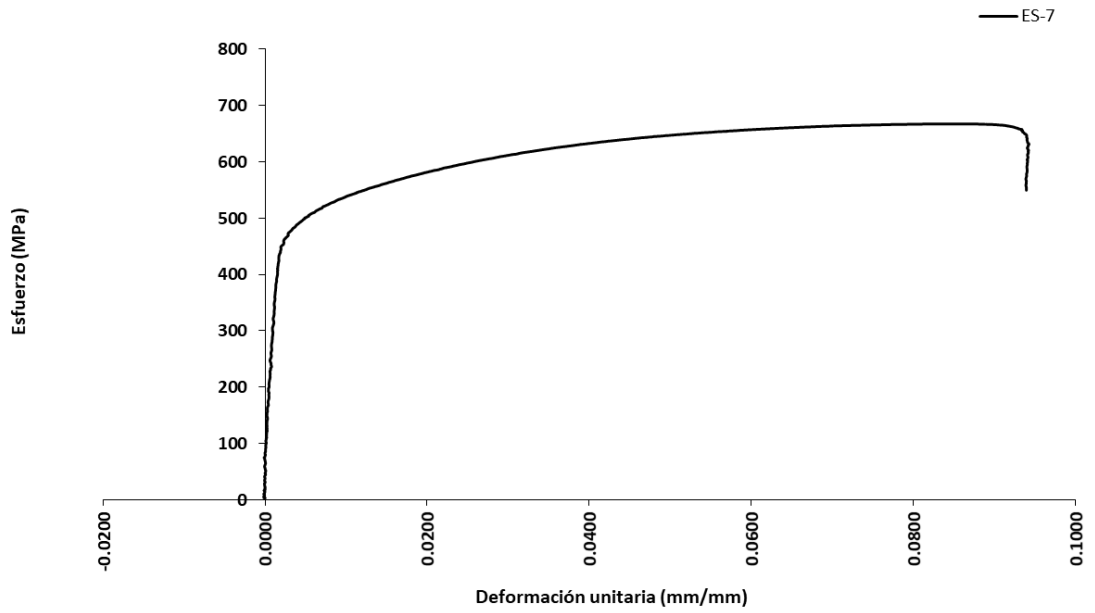


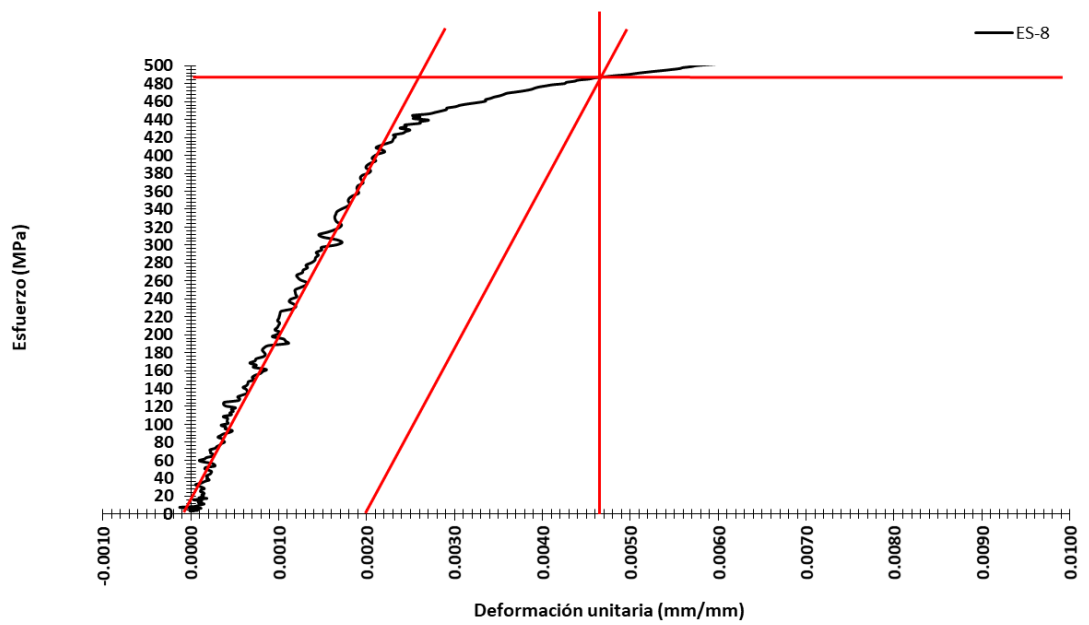
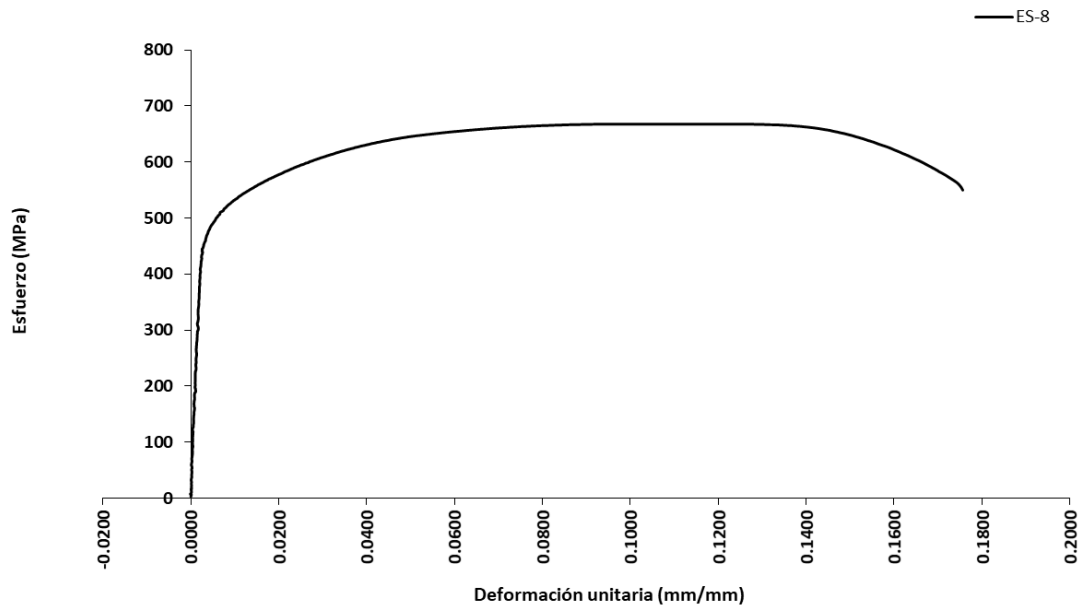


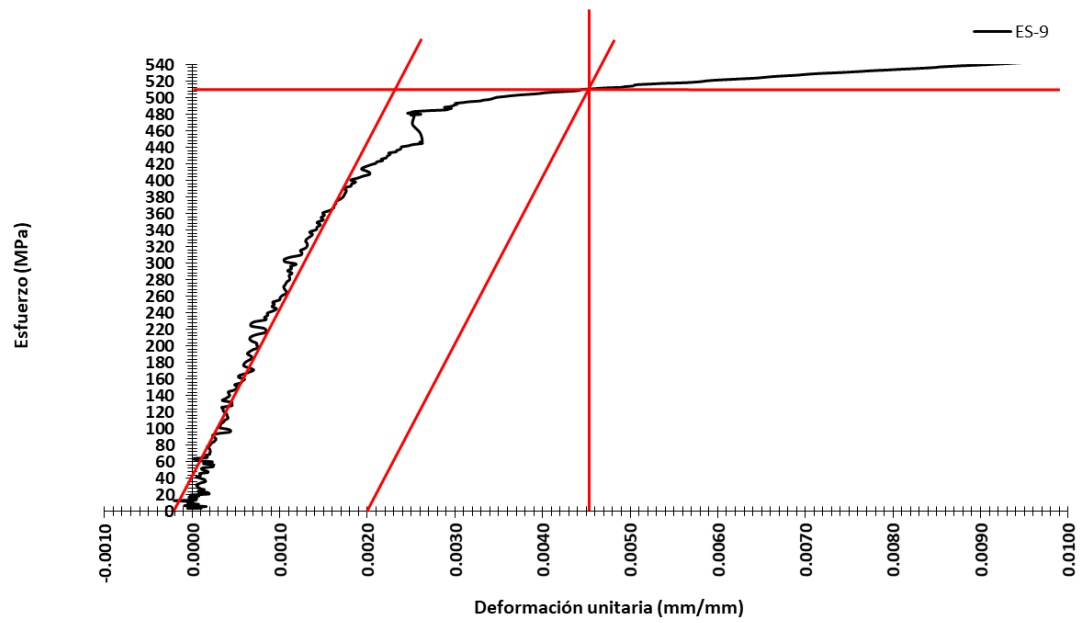
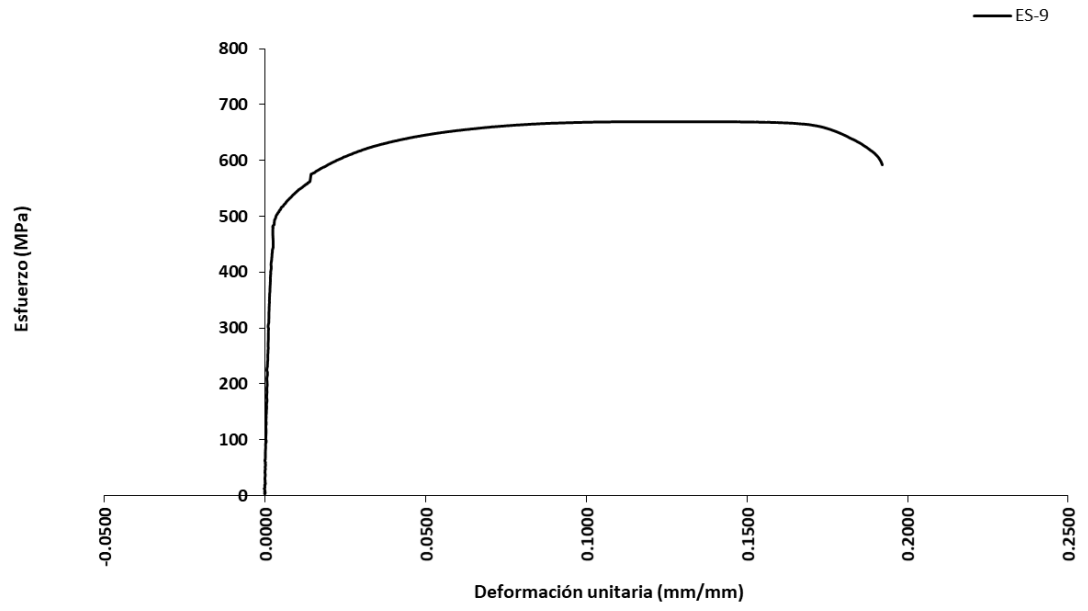


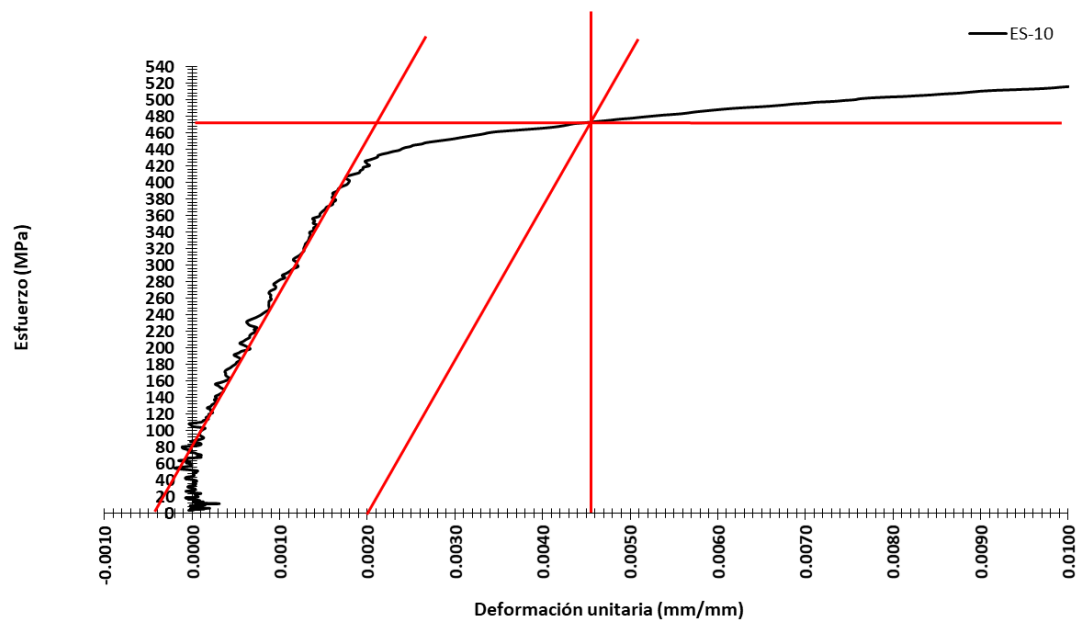
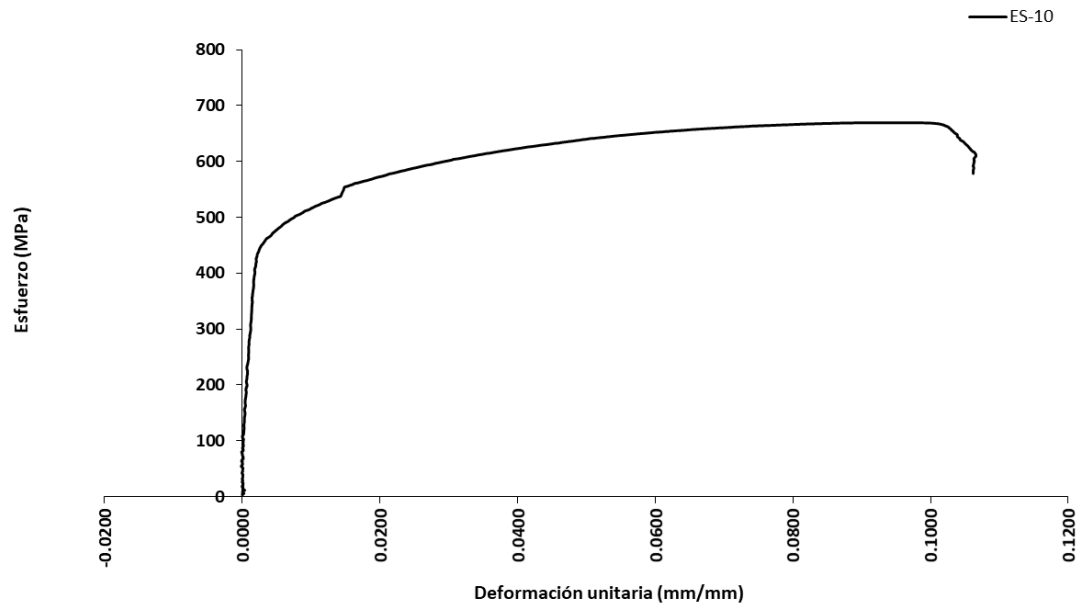


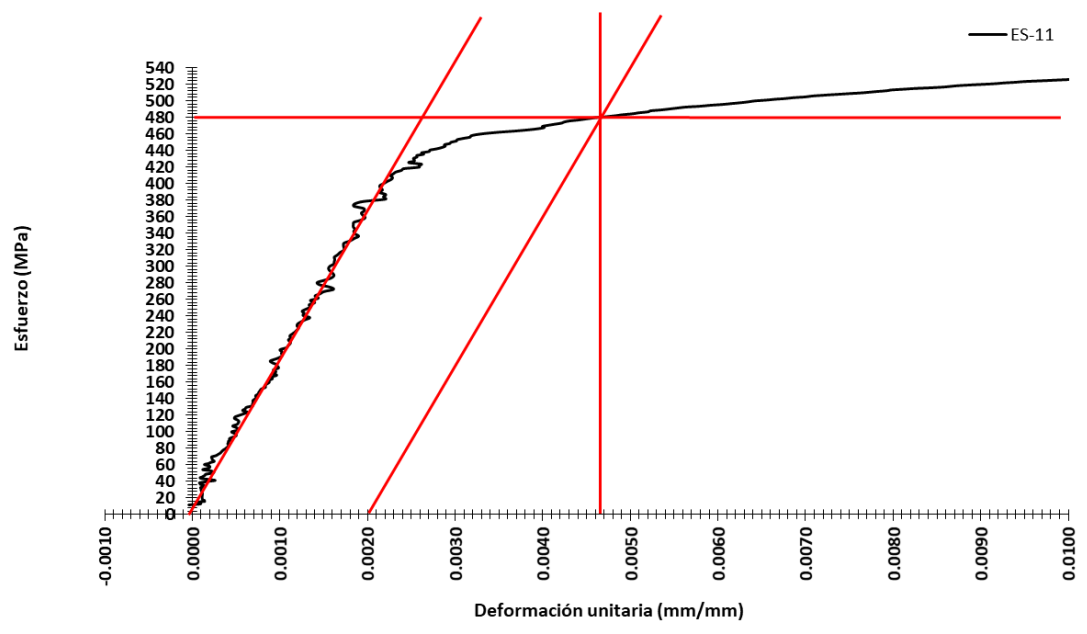
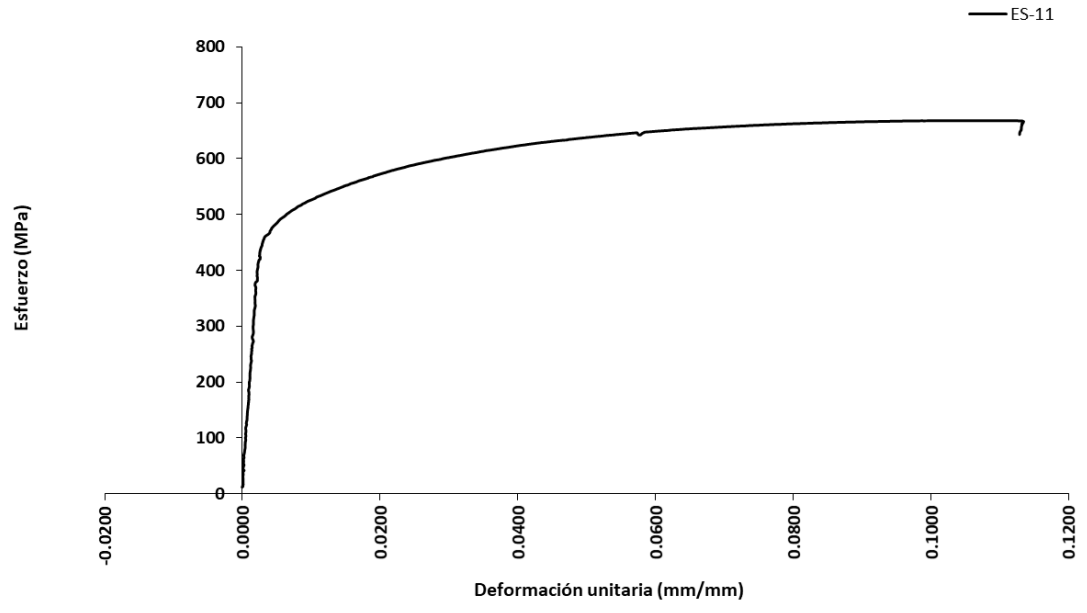


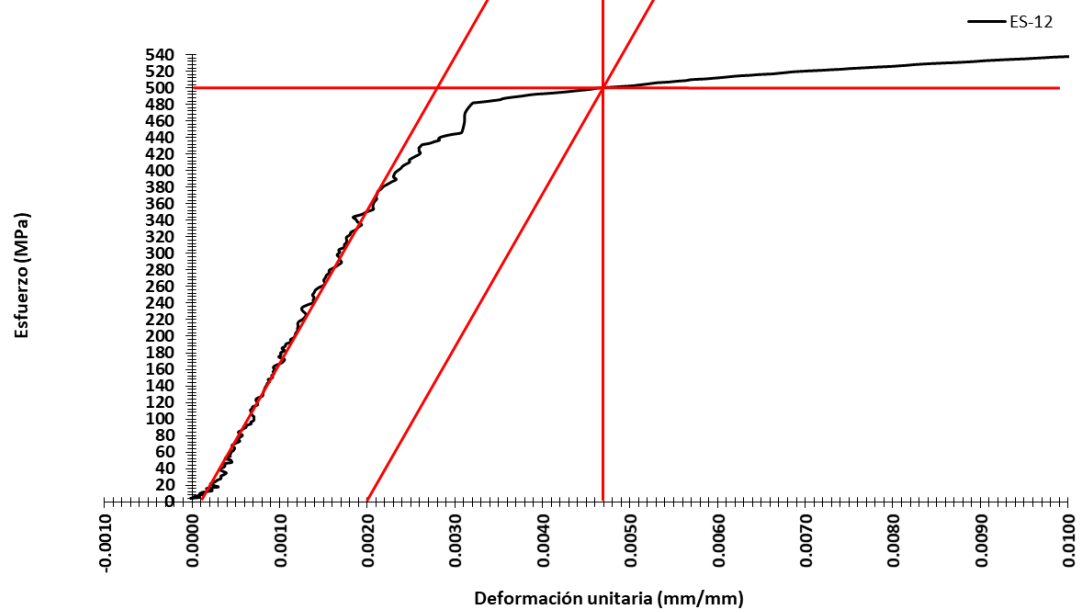
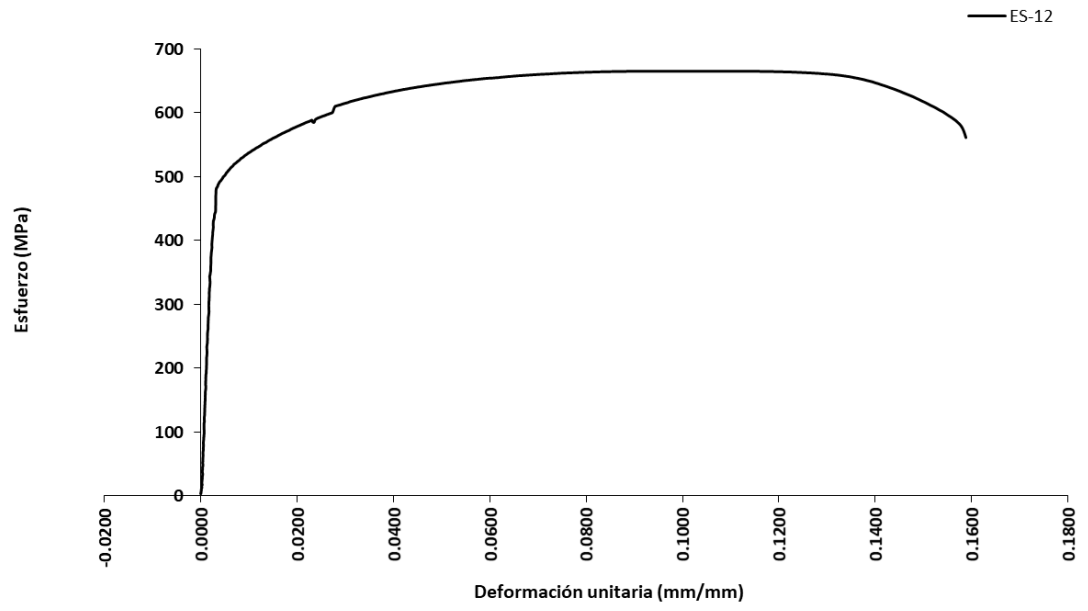


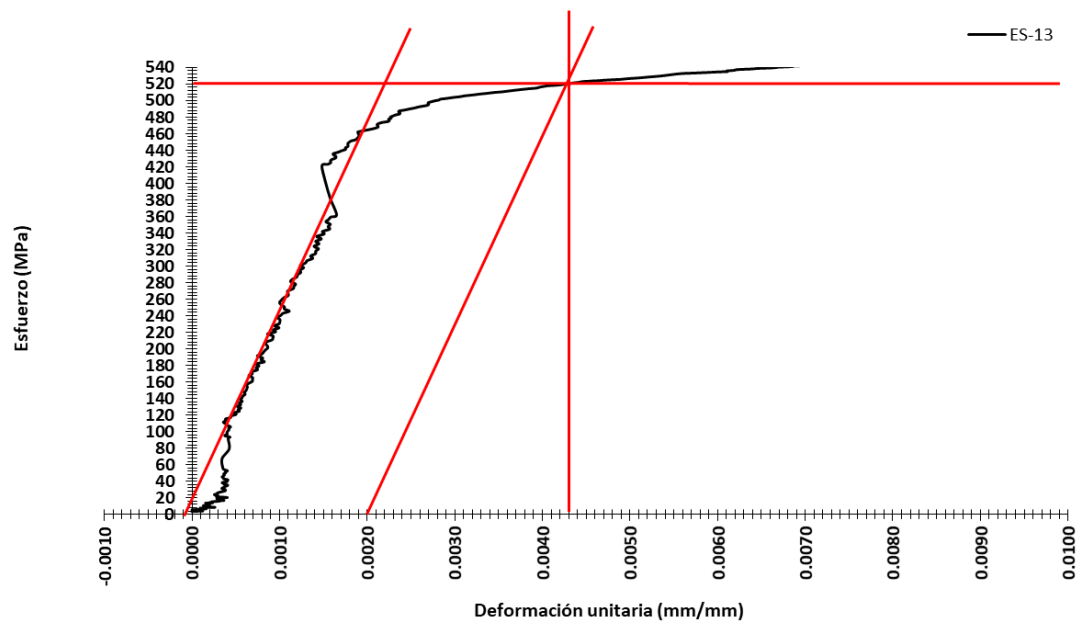
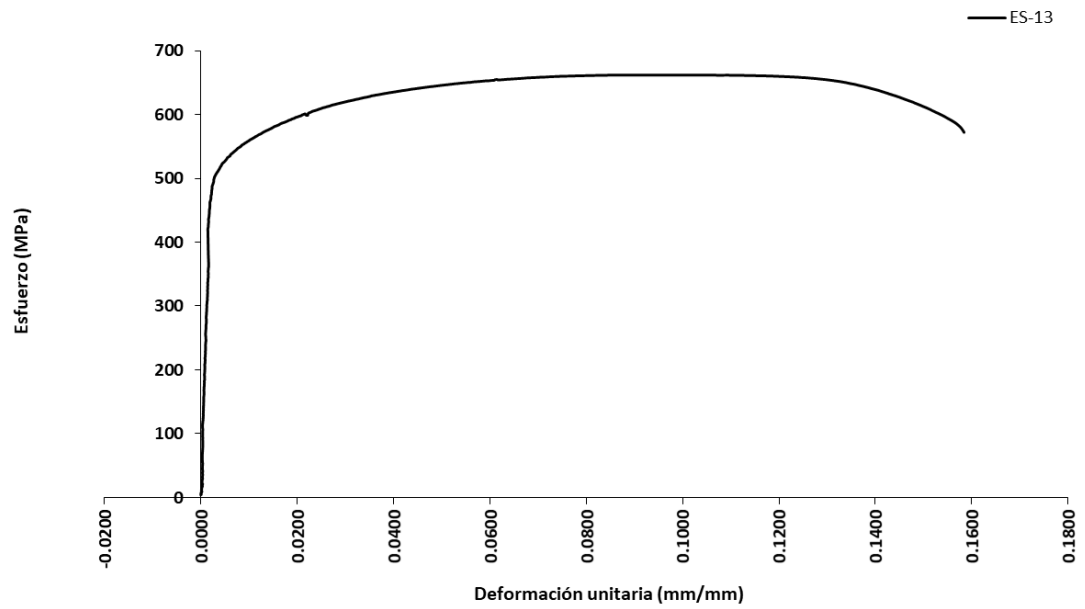


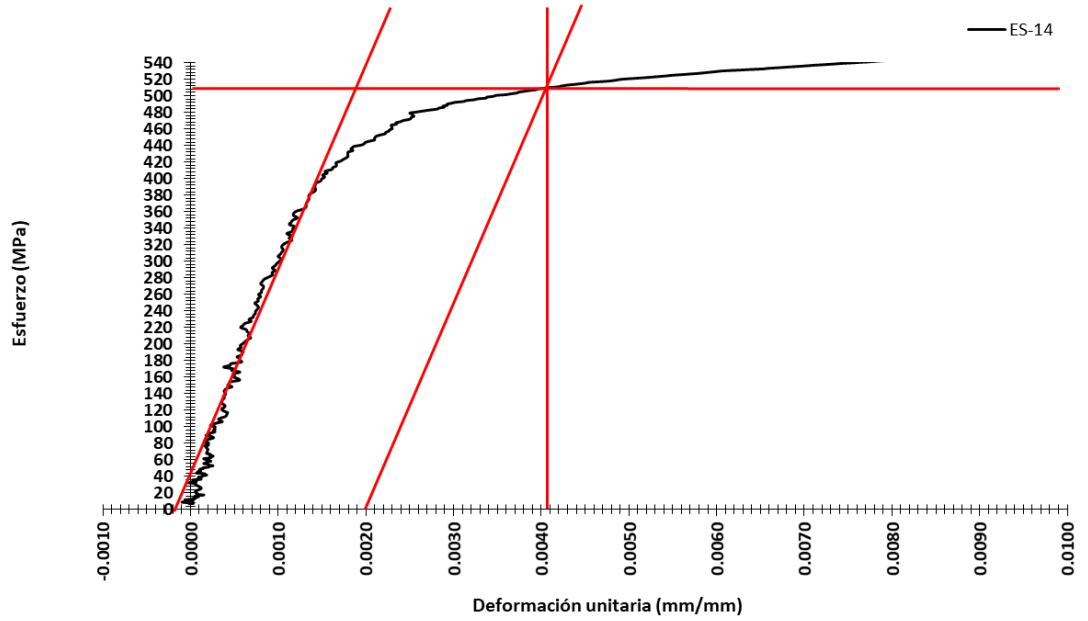
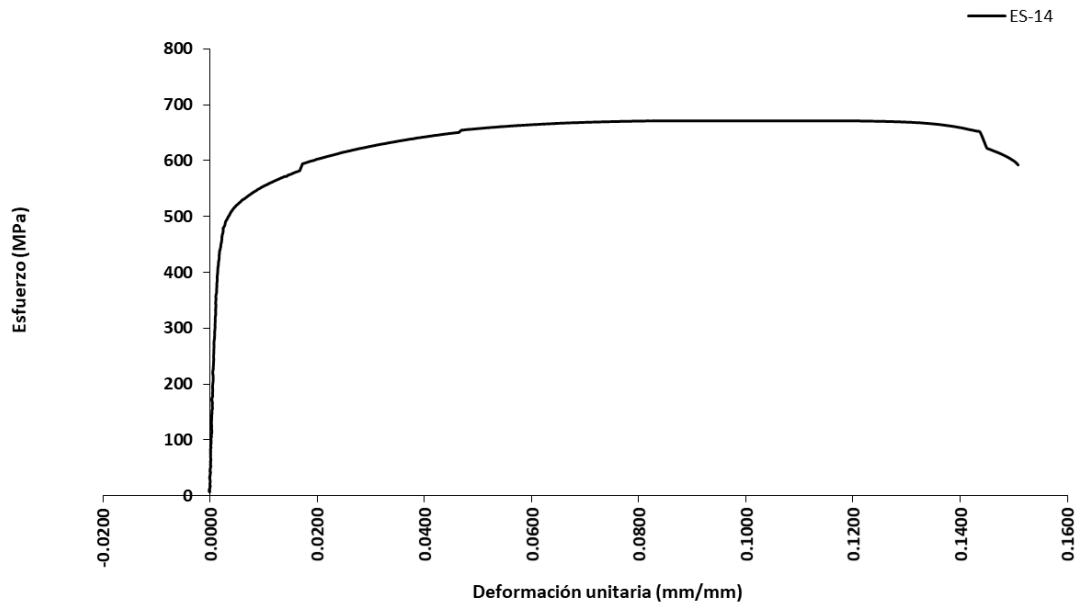


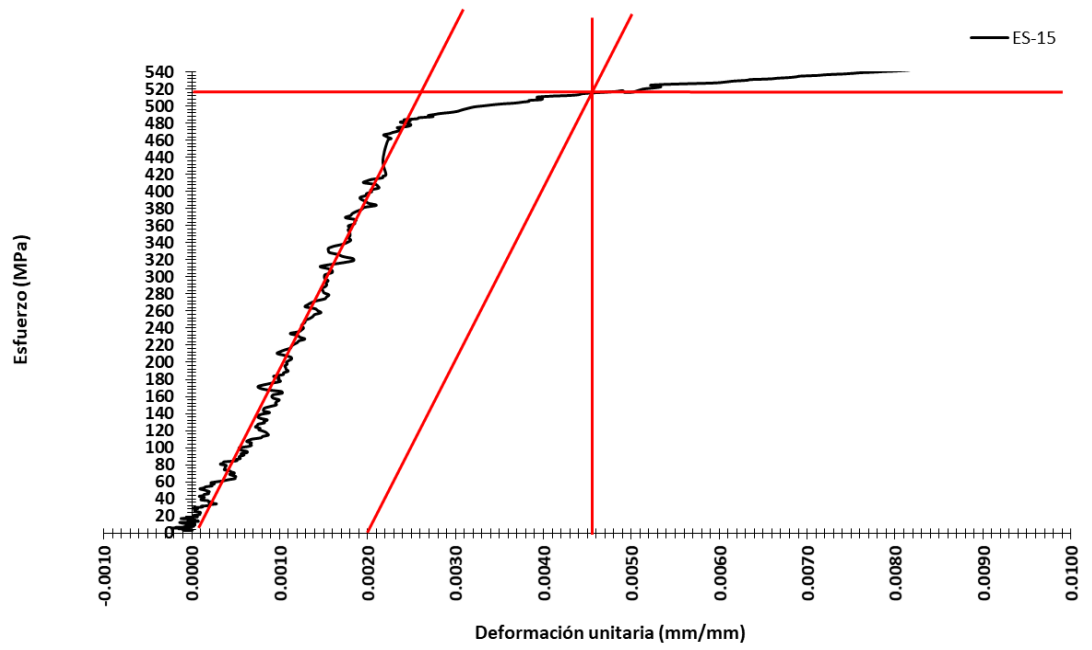
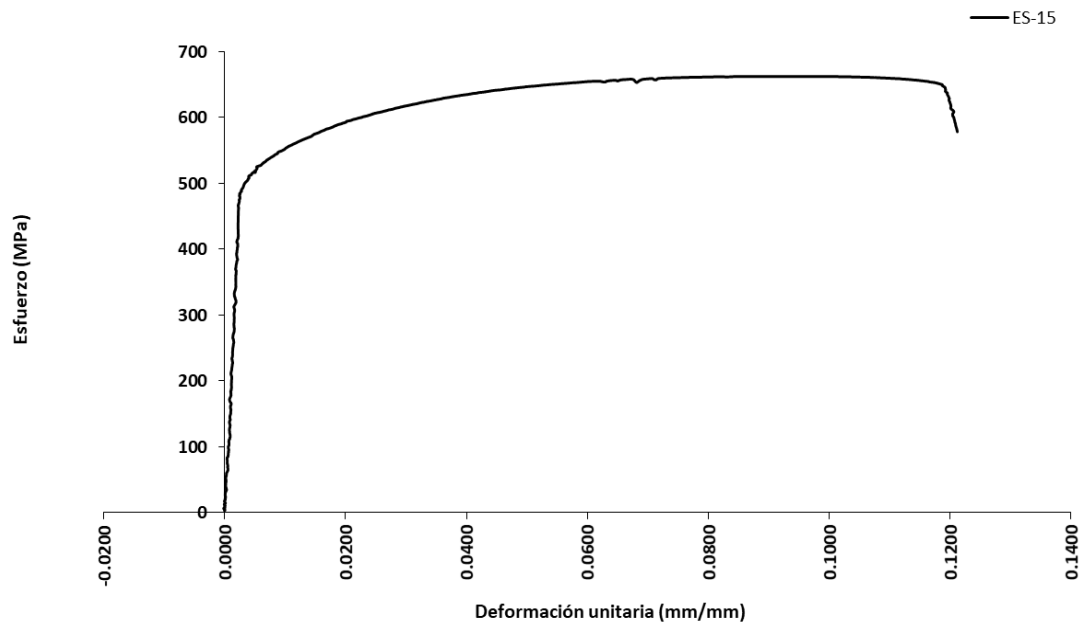


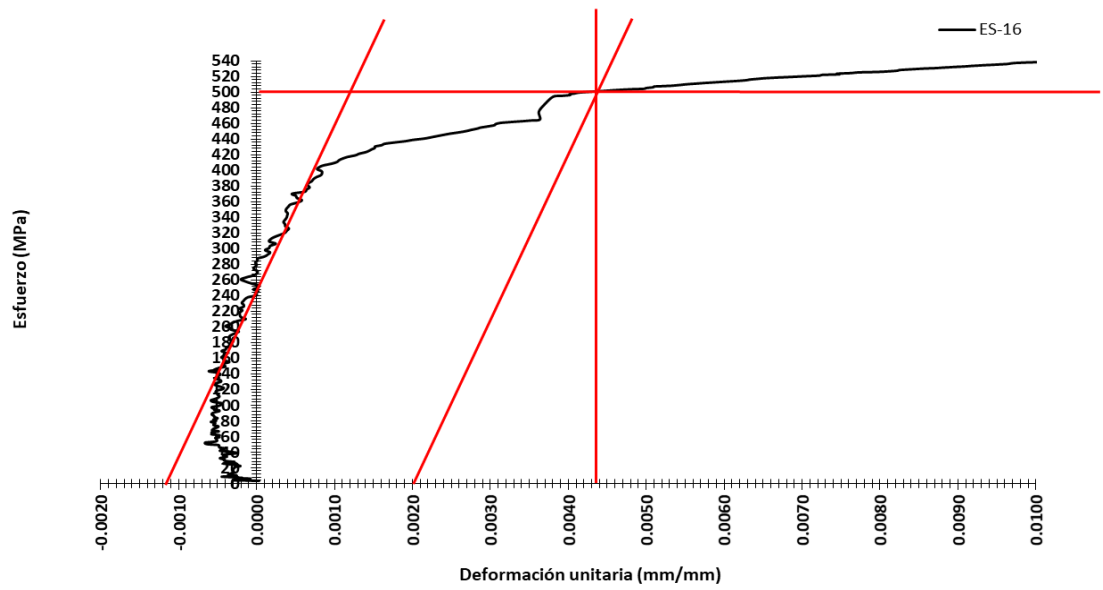
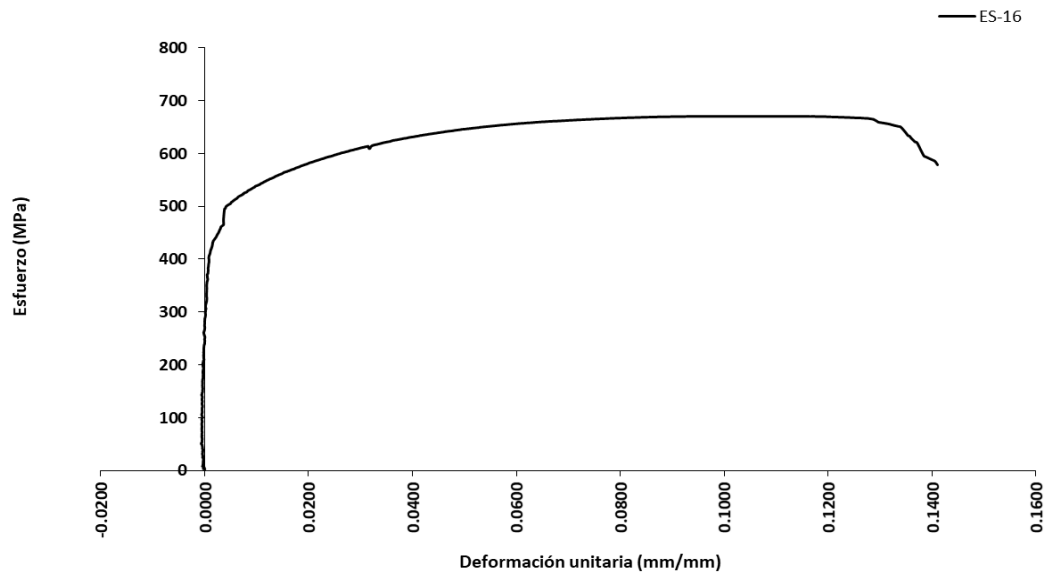


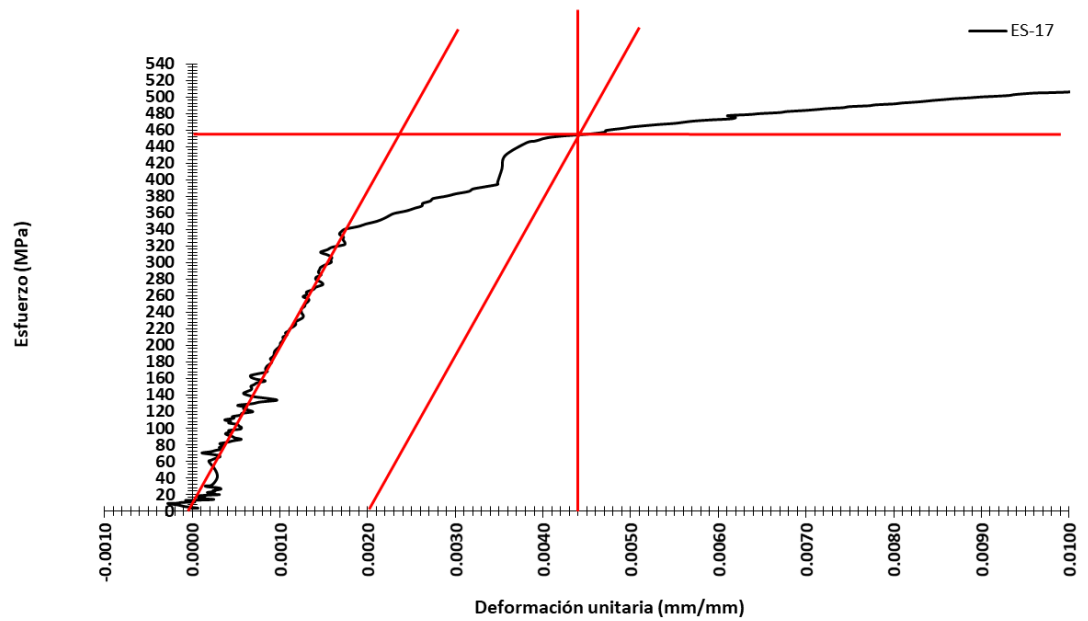
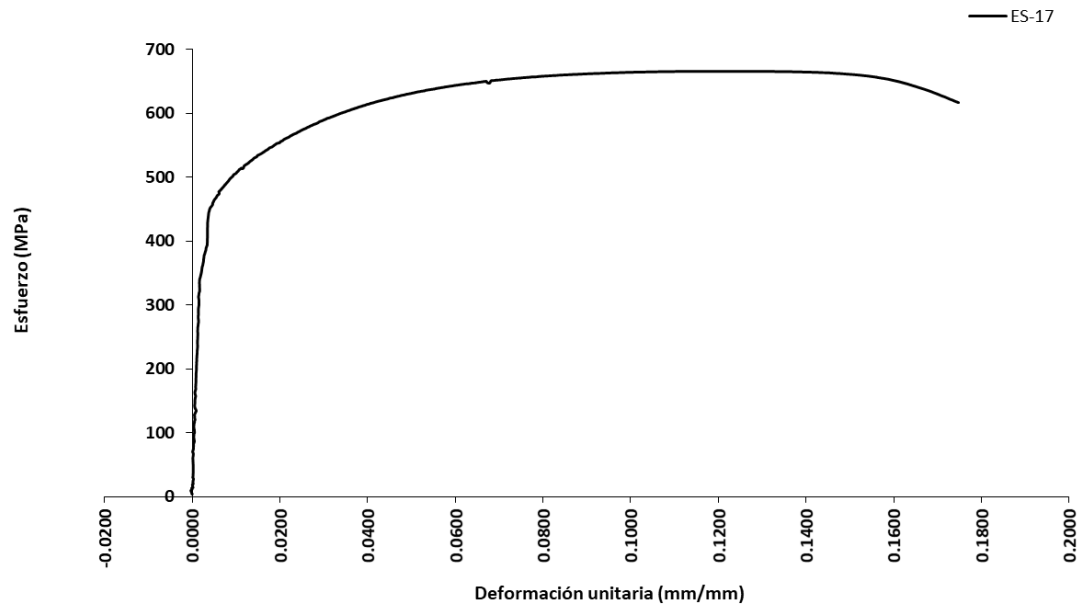


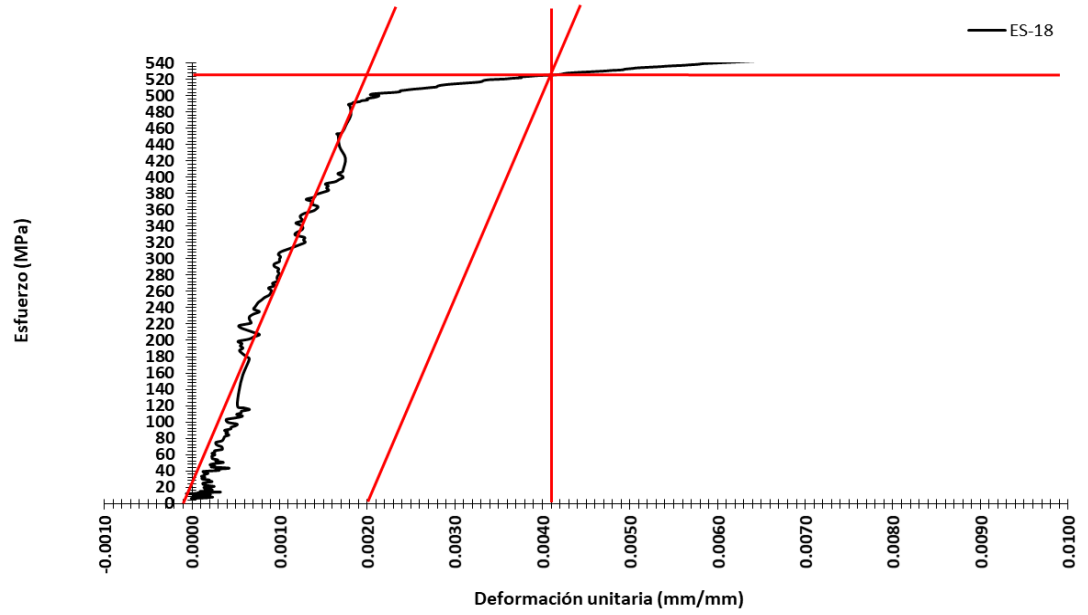
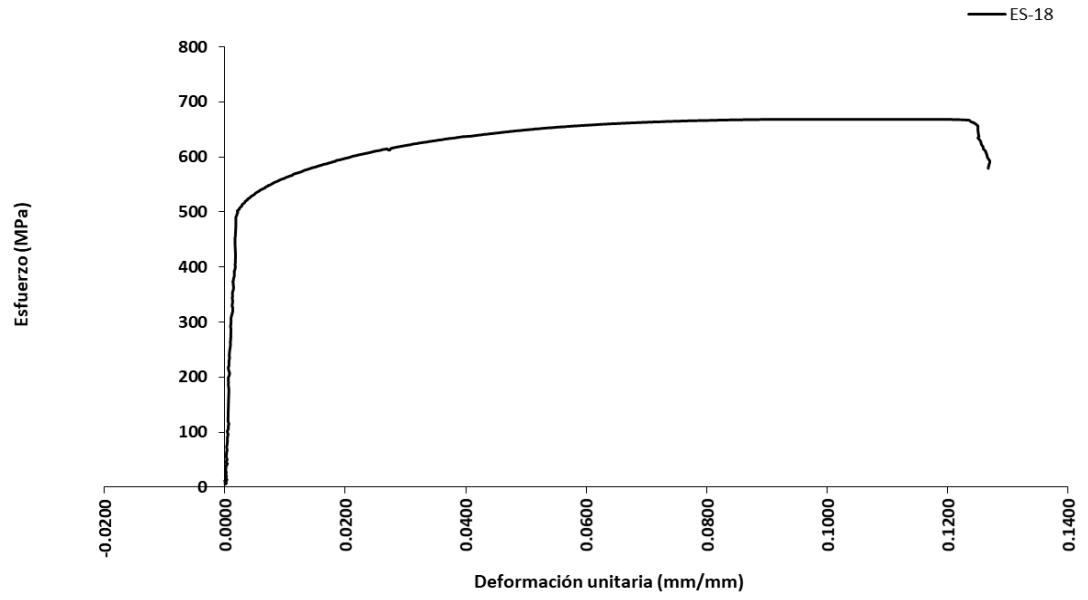


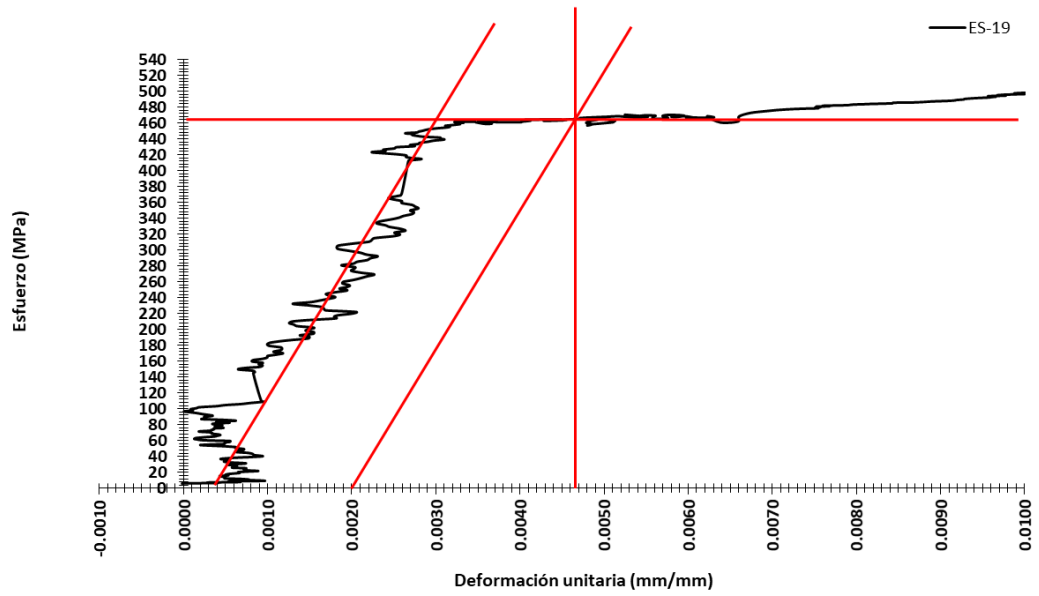
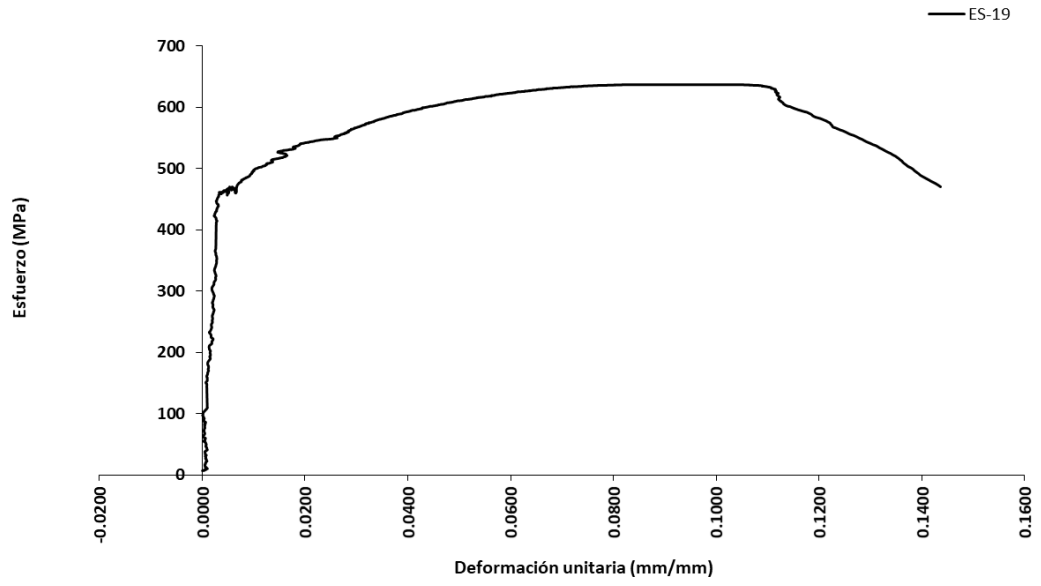


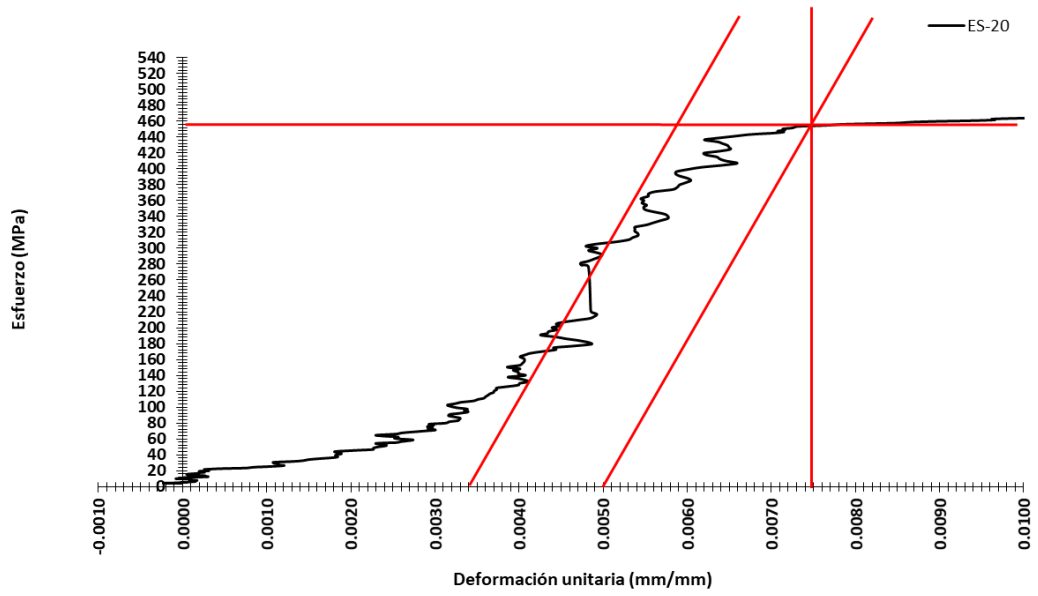
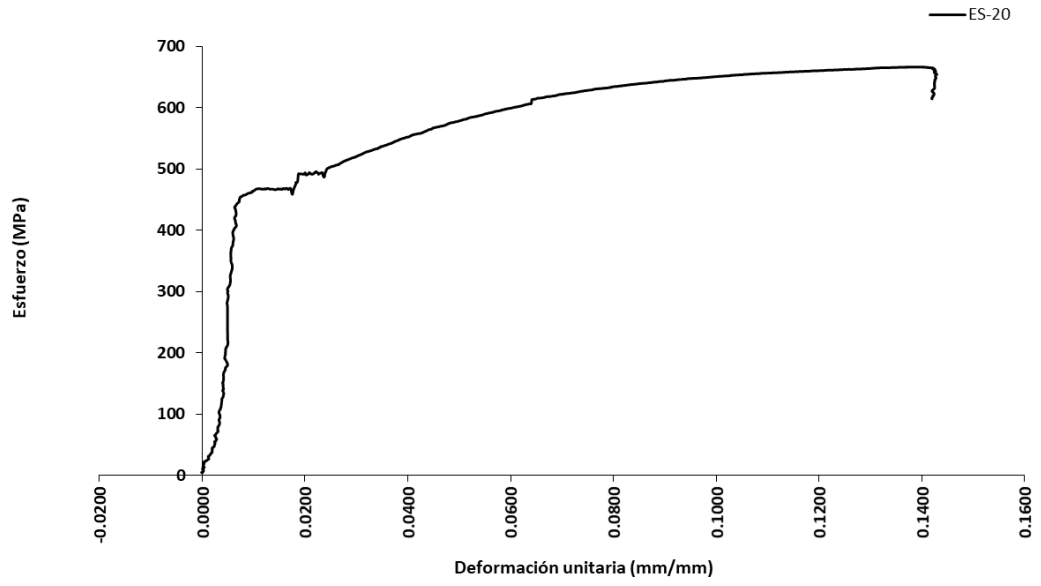


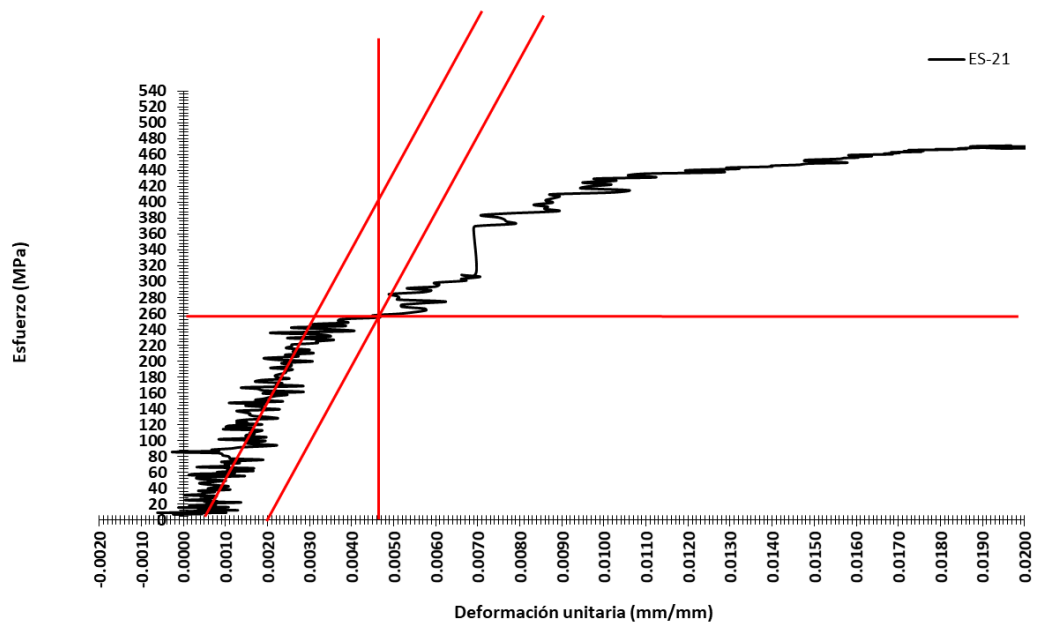
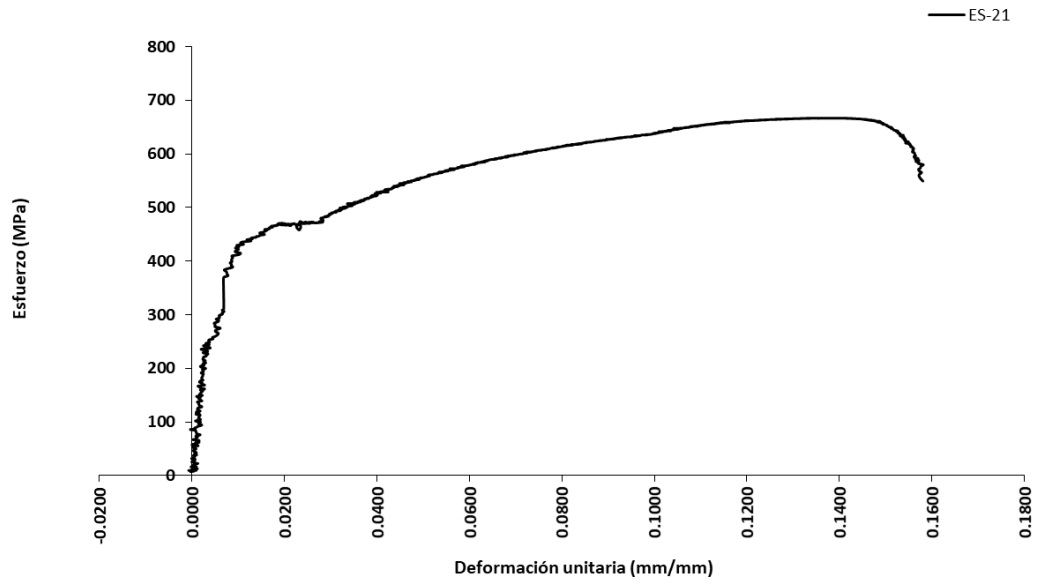


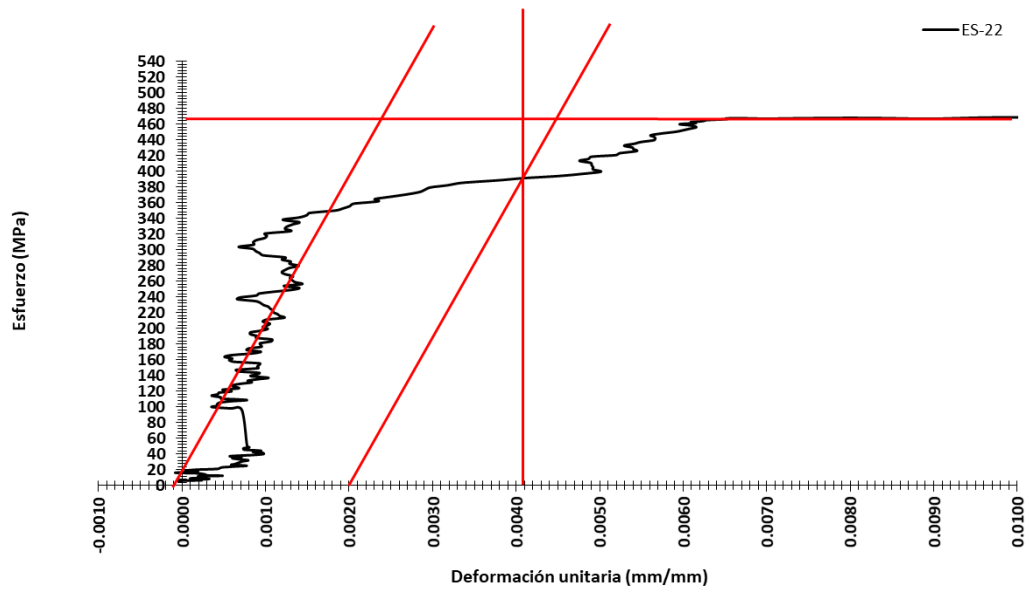
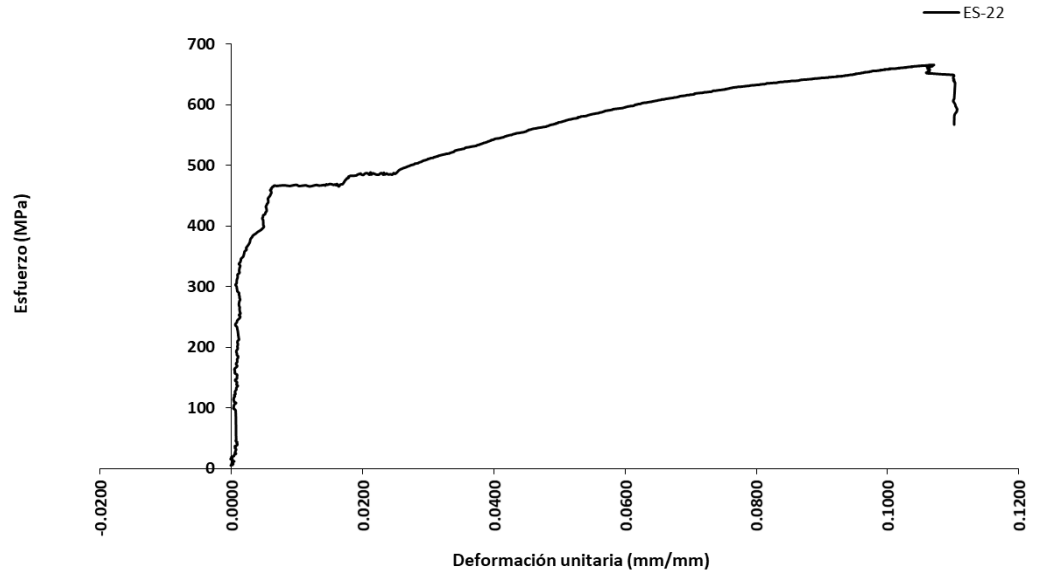


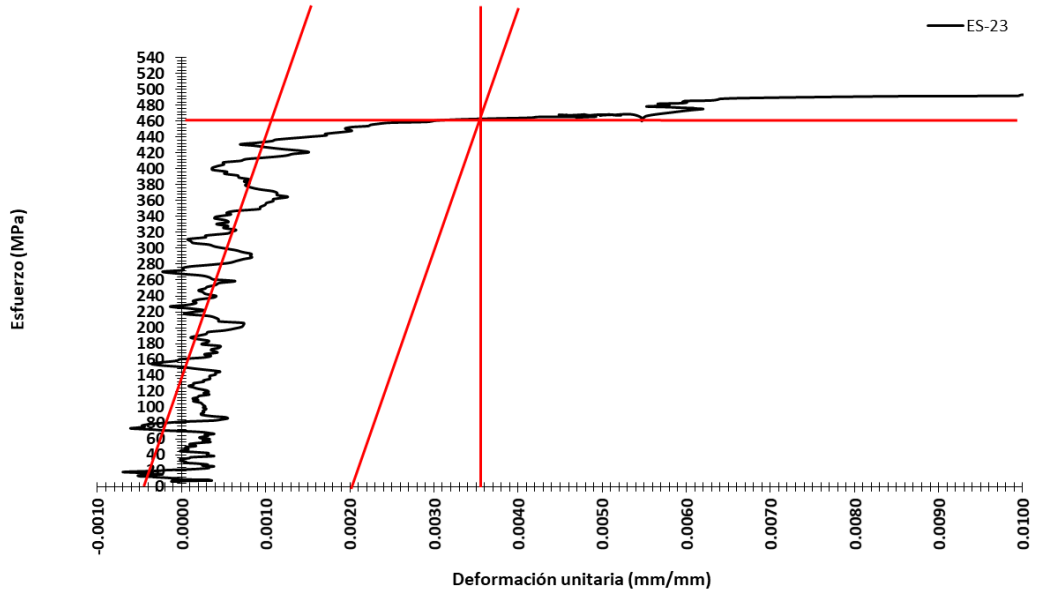
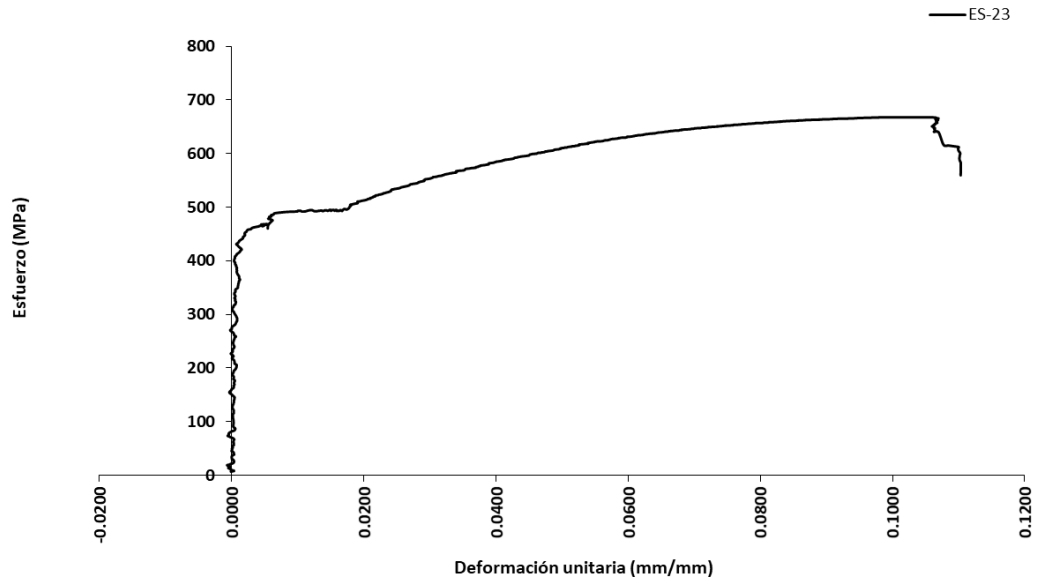


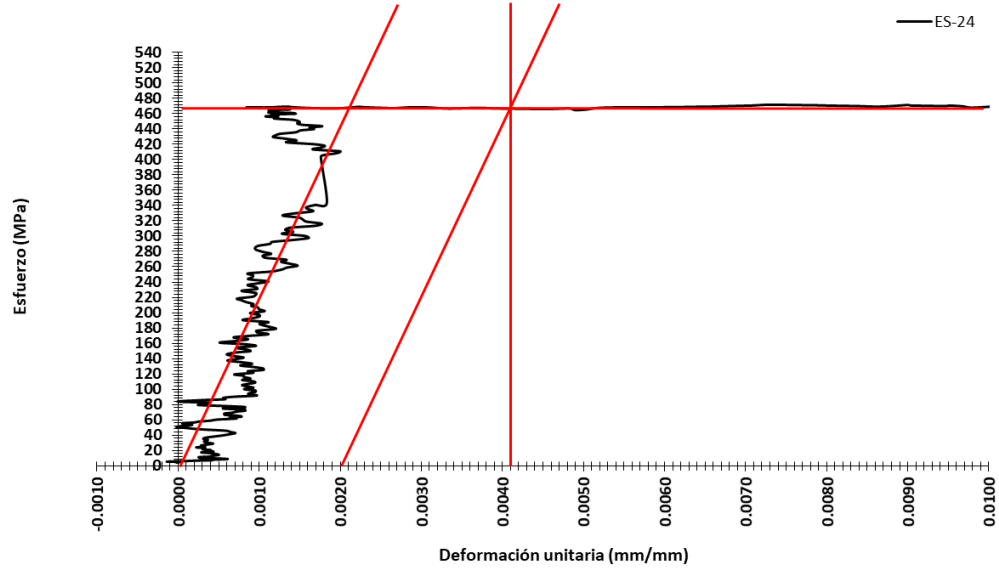
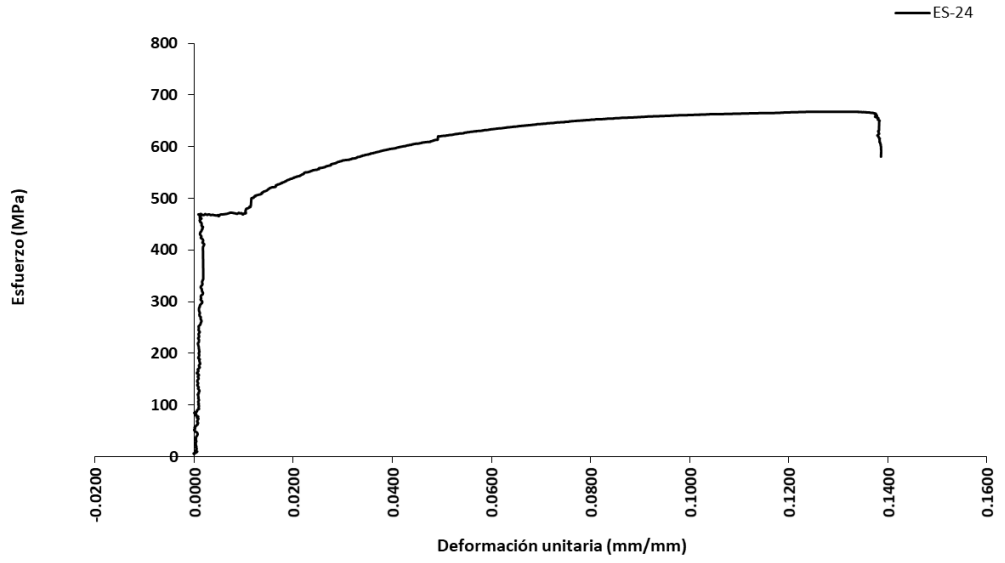


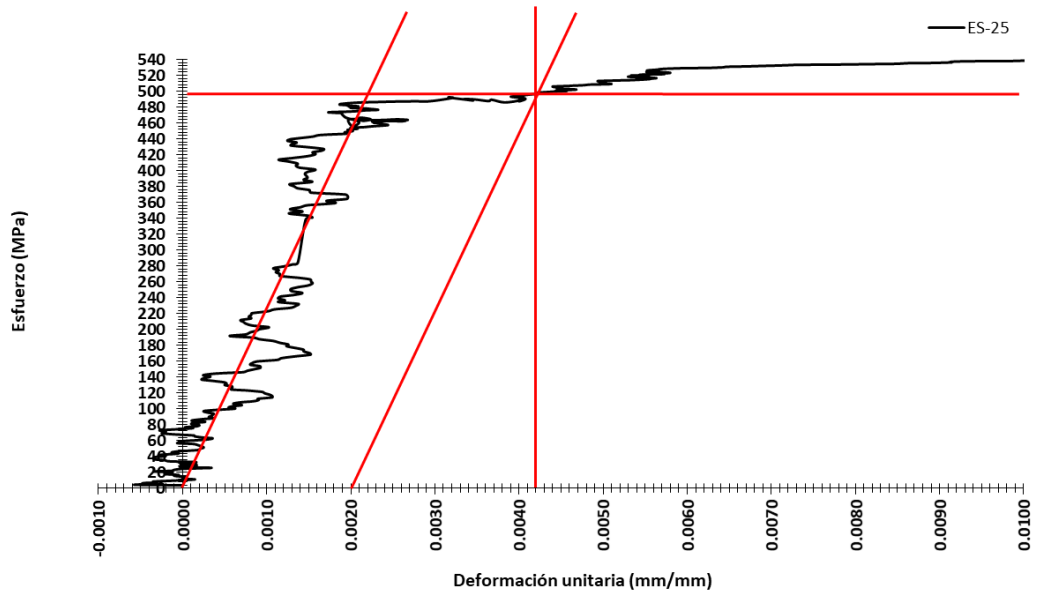
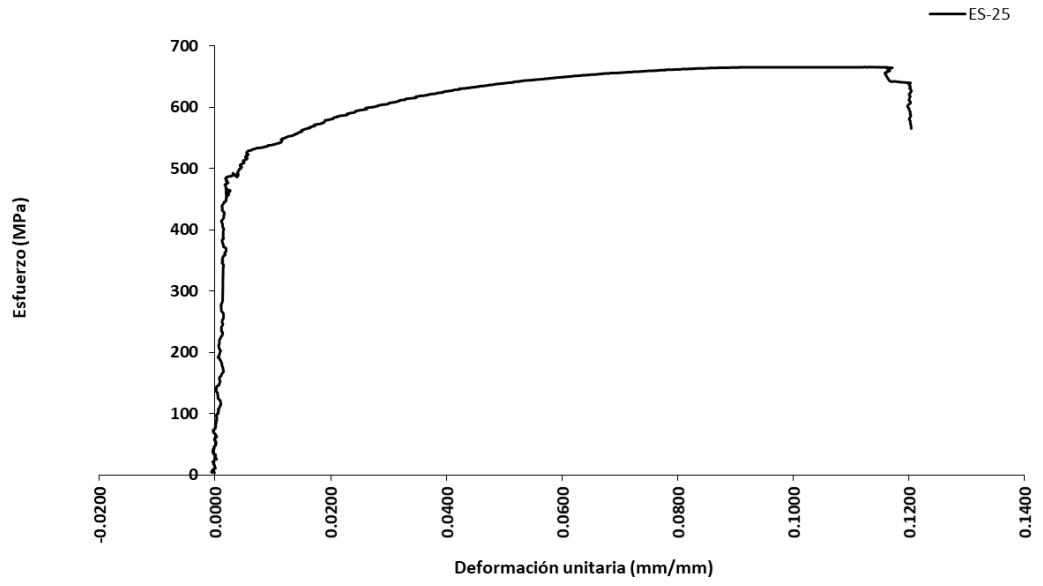


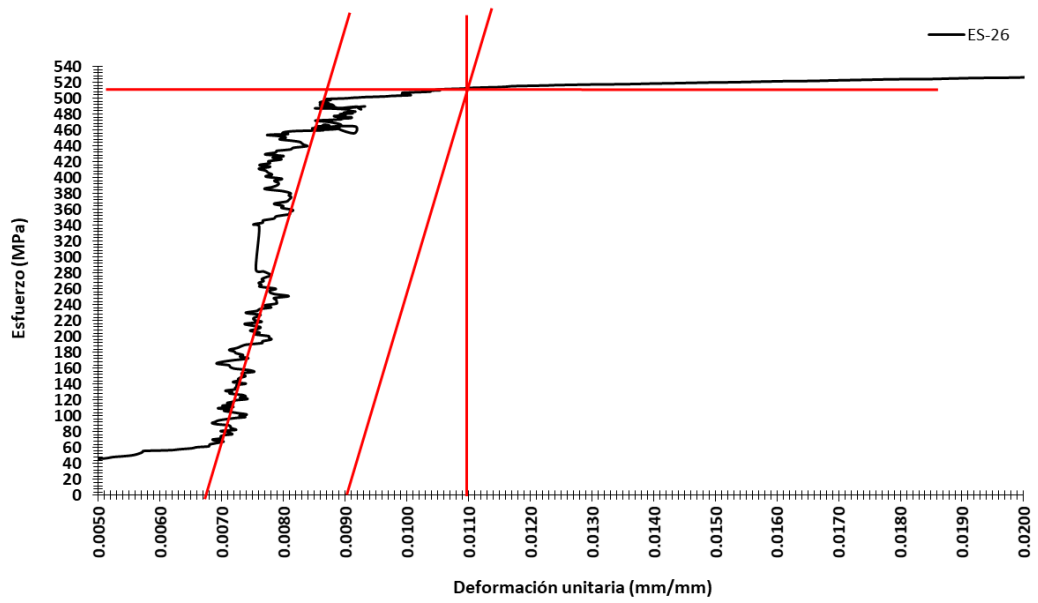
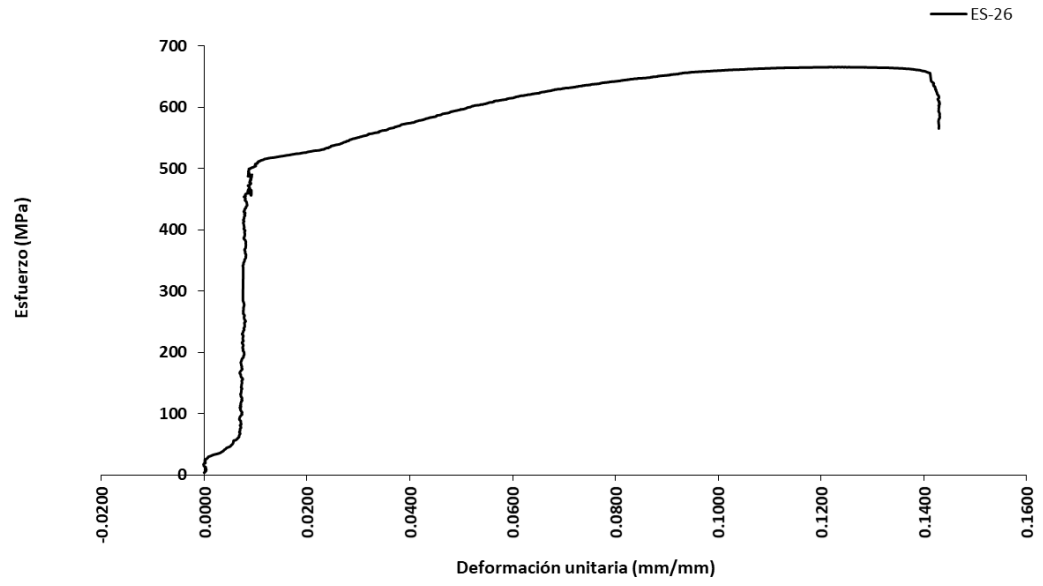


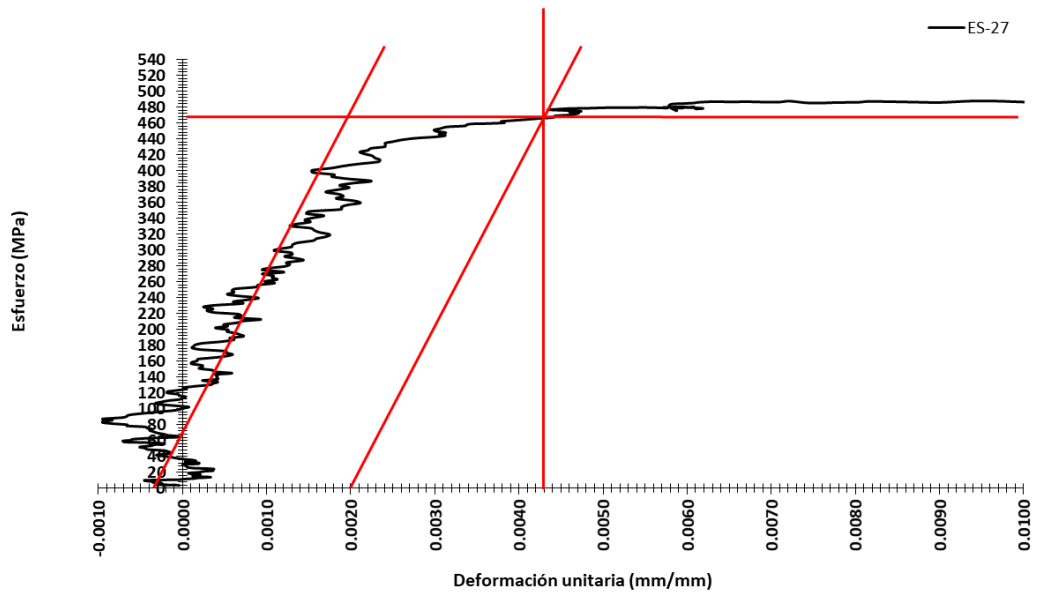
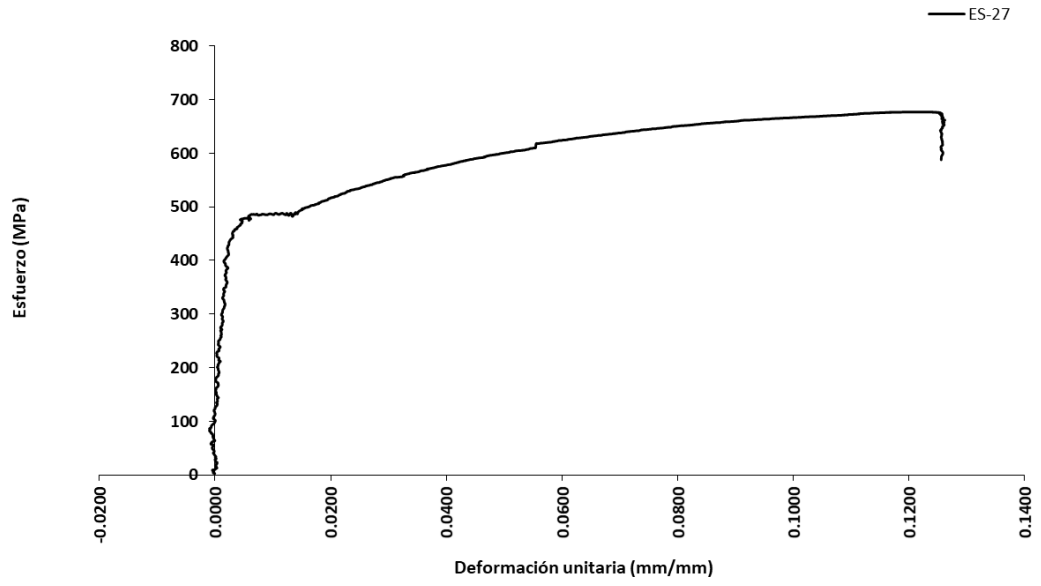


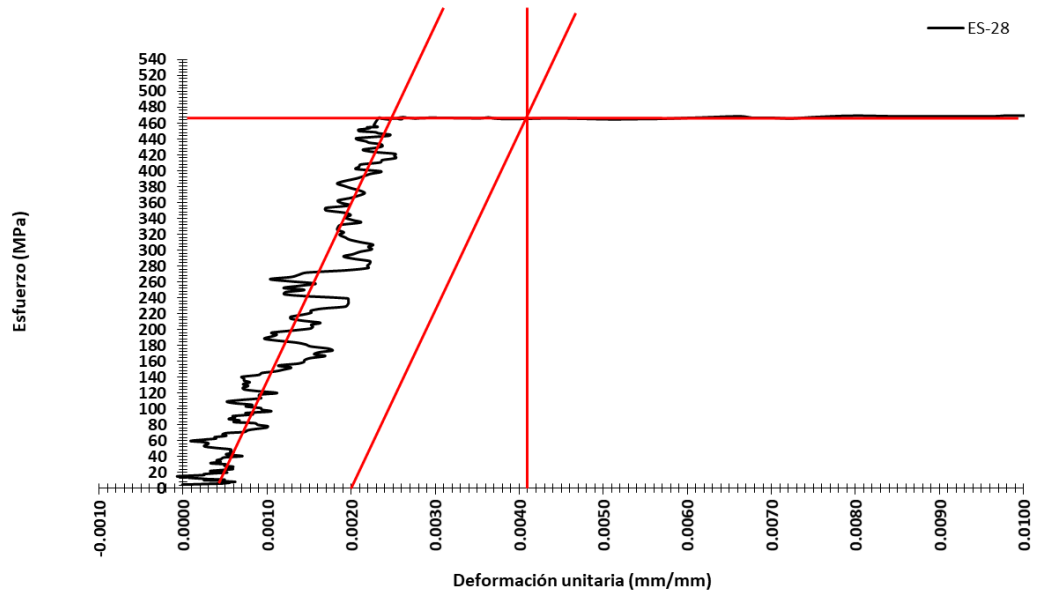
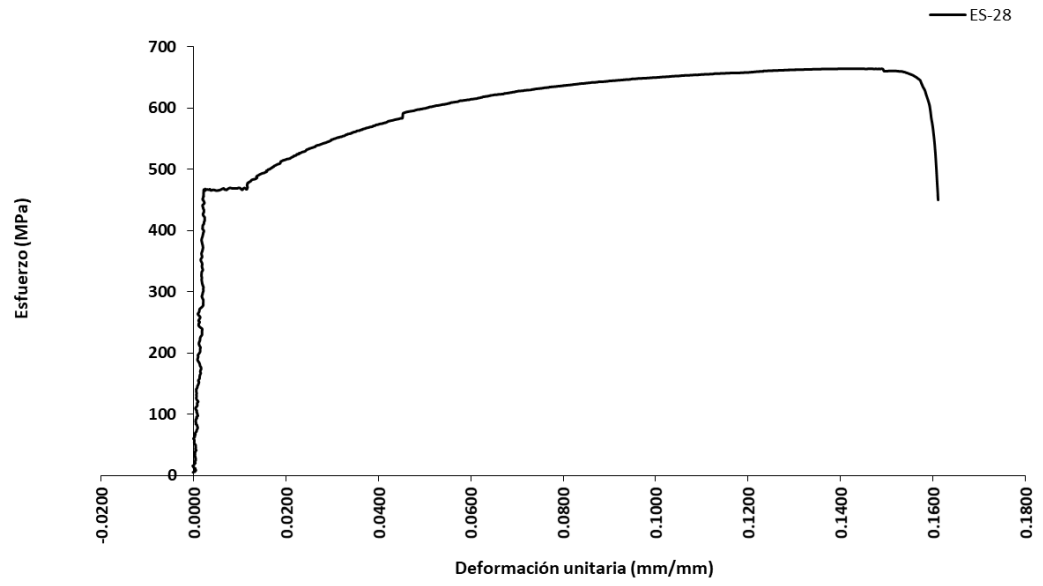


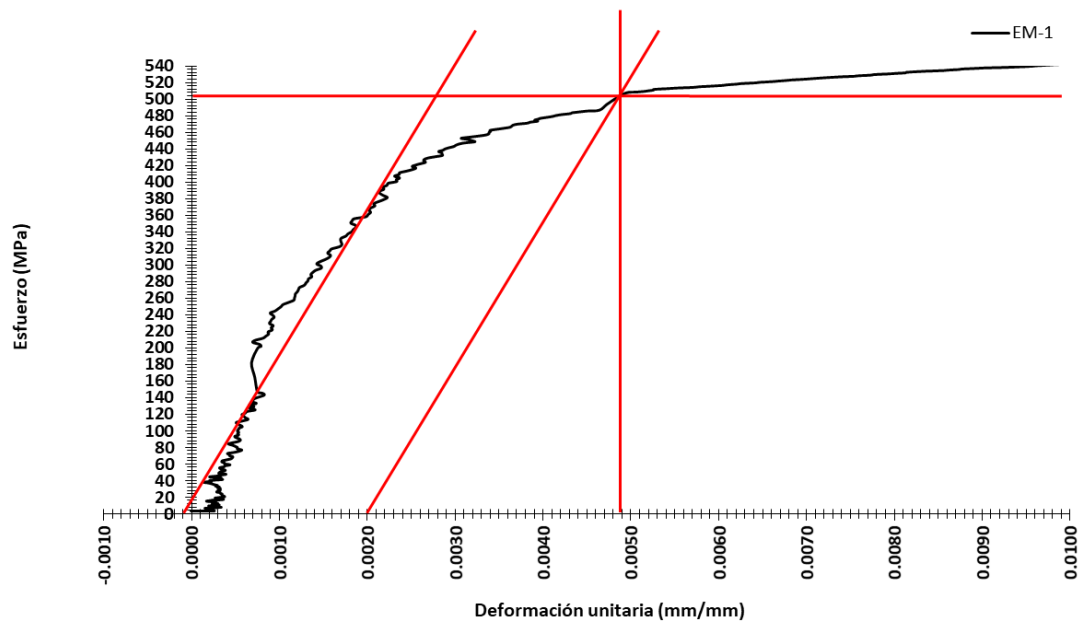
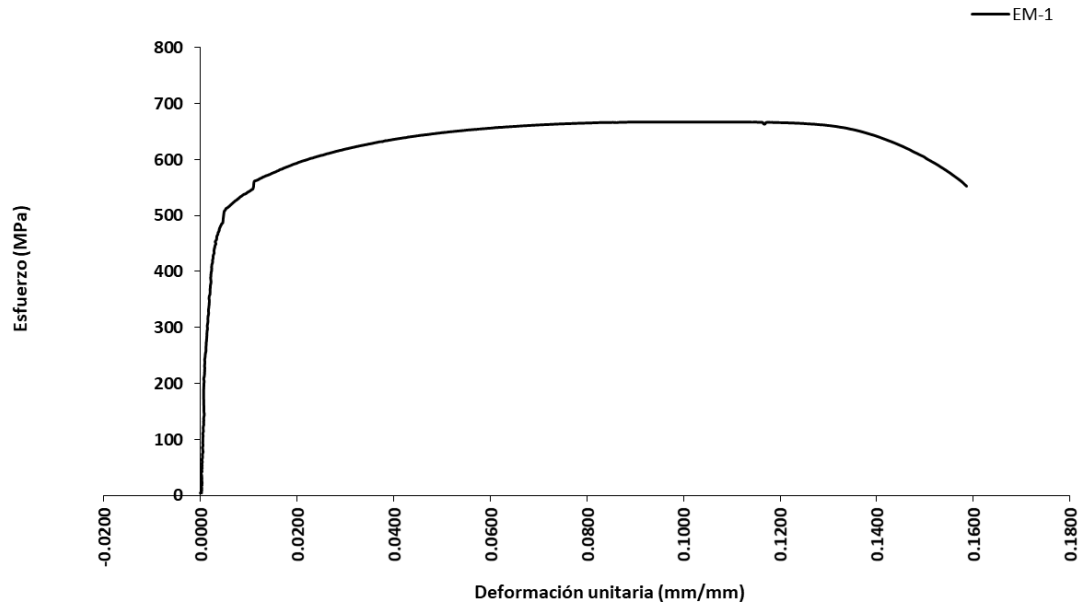


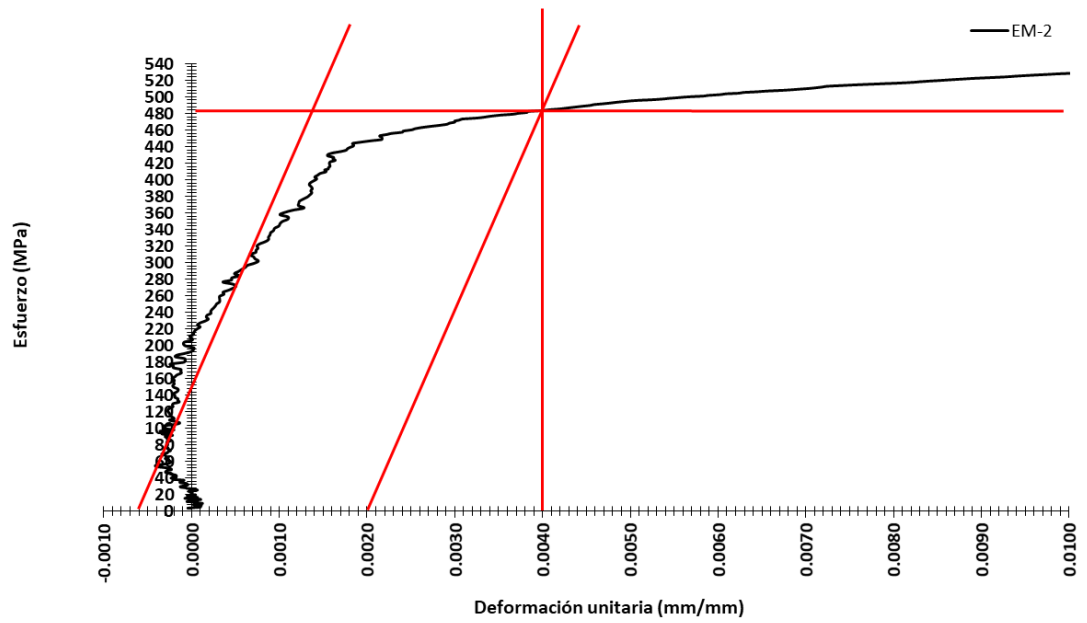
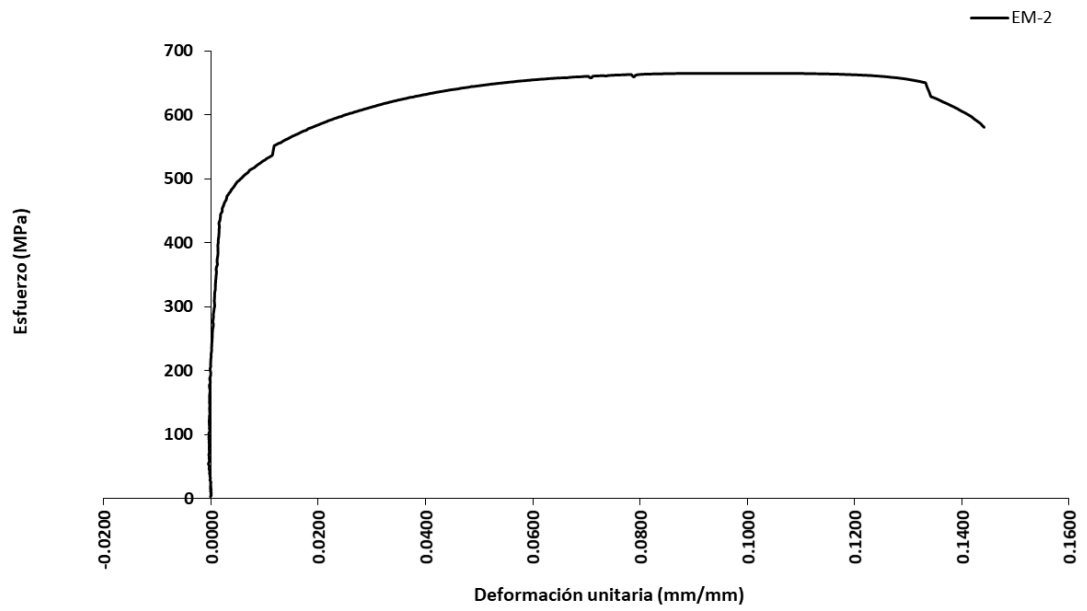


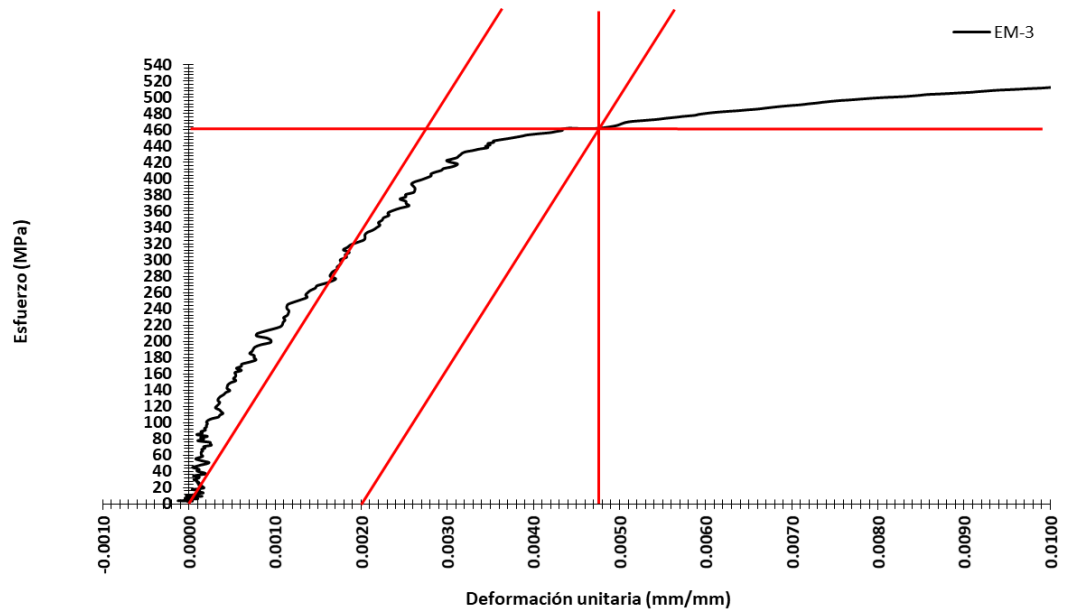
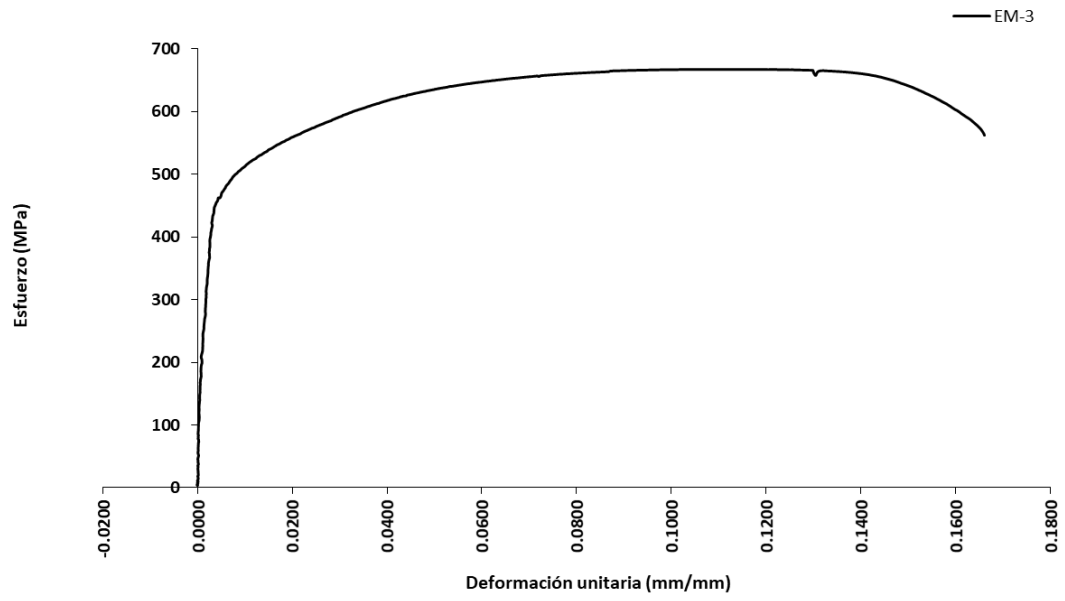


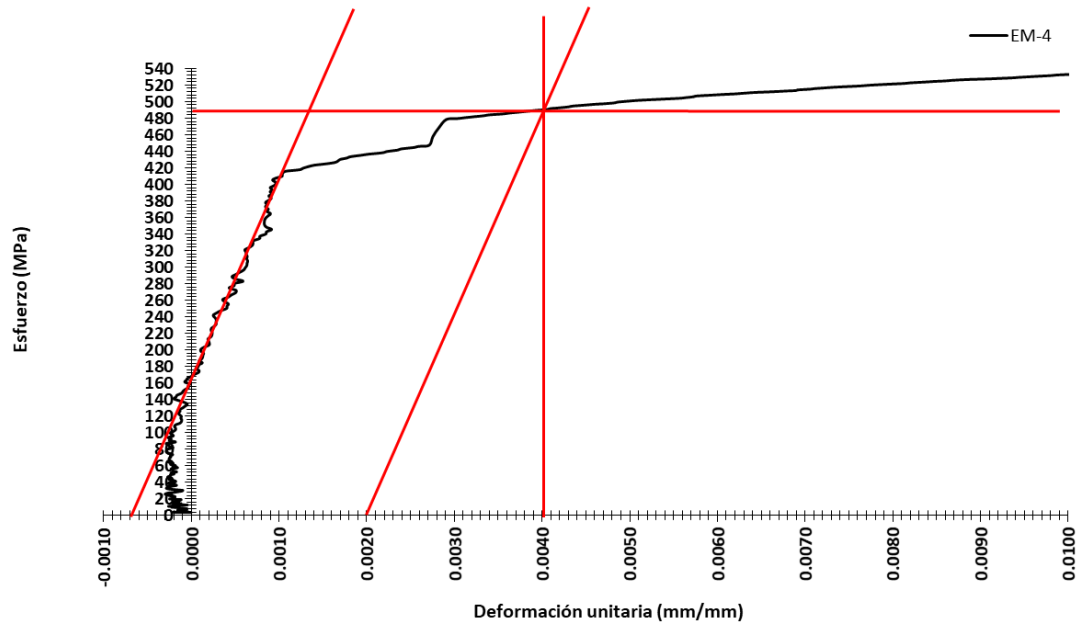
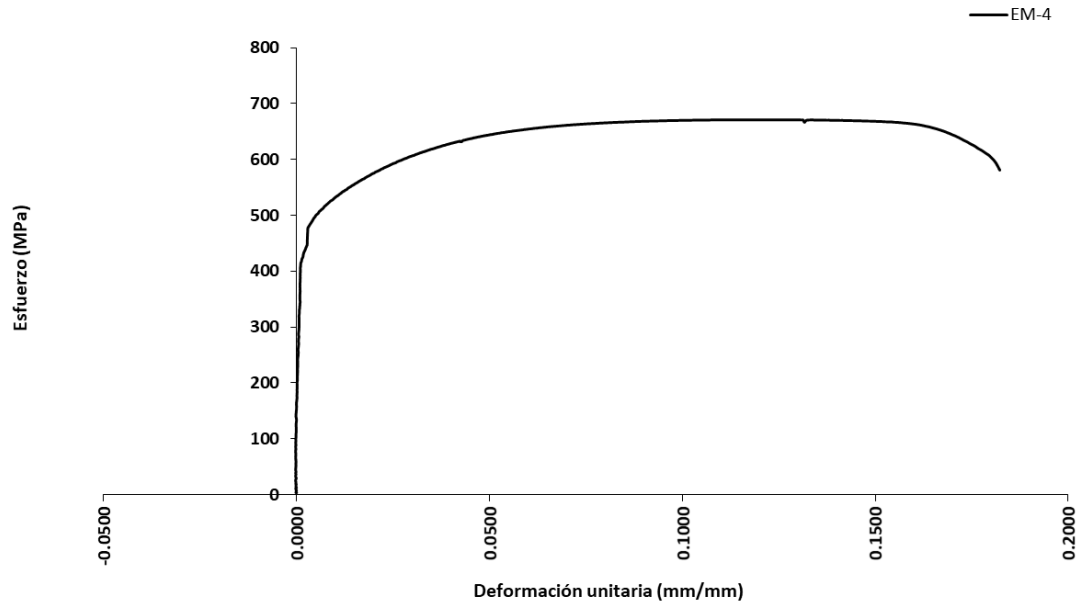


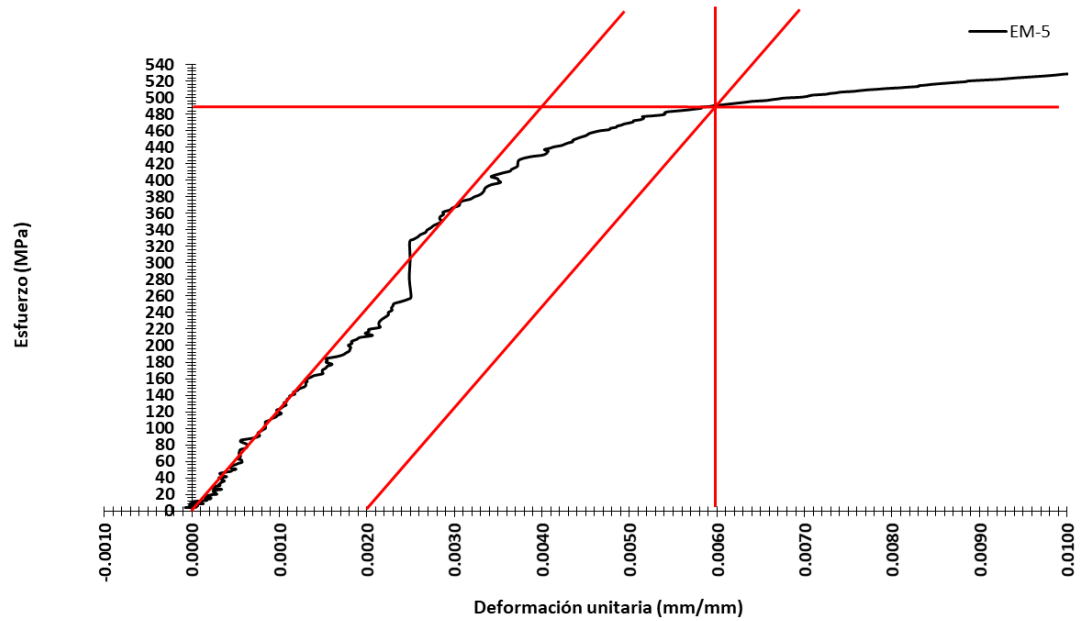
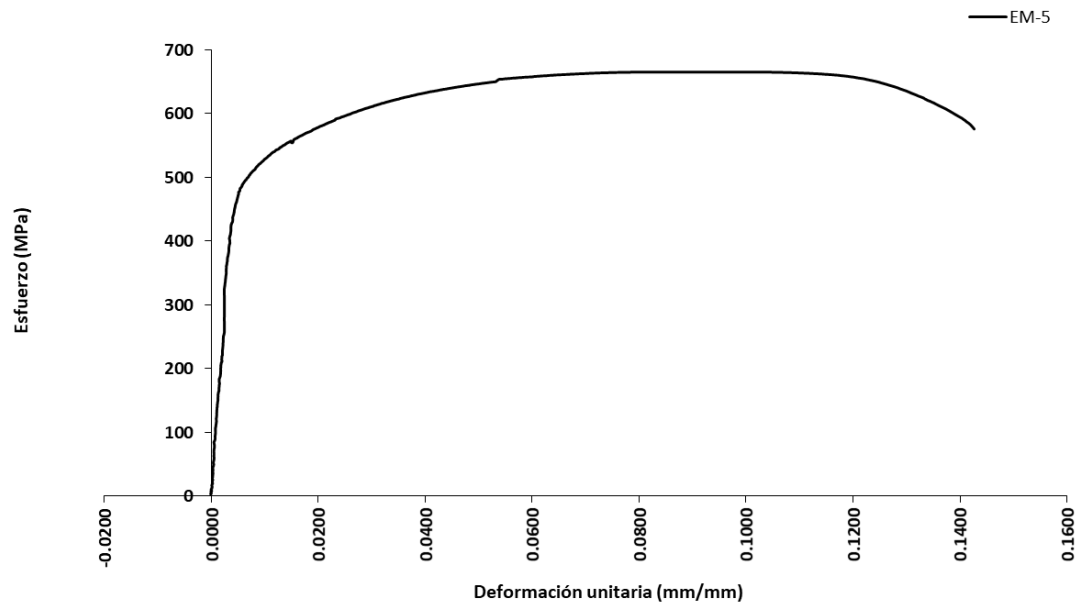












ANEXO 2

FALLA EN EMPALMES SOLDADOS, MECÁNICOS Y BARRAS DE CONTROL











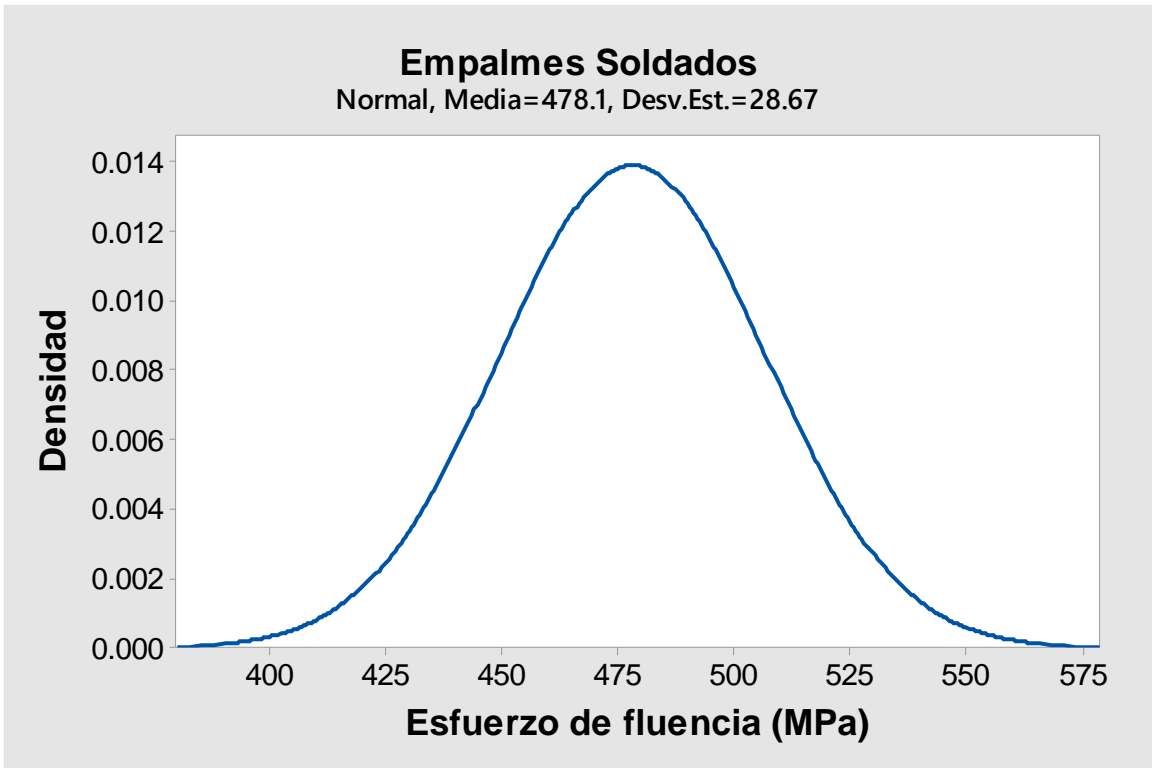
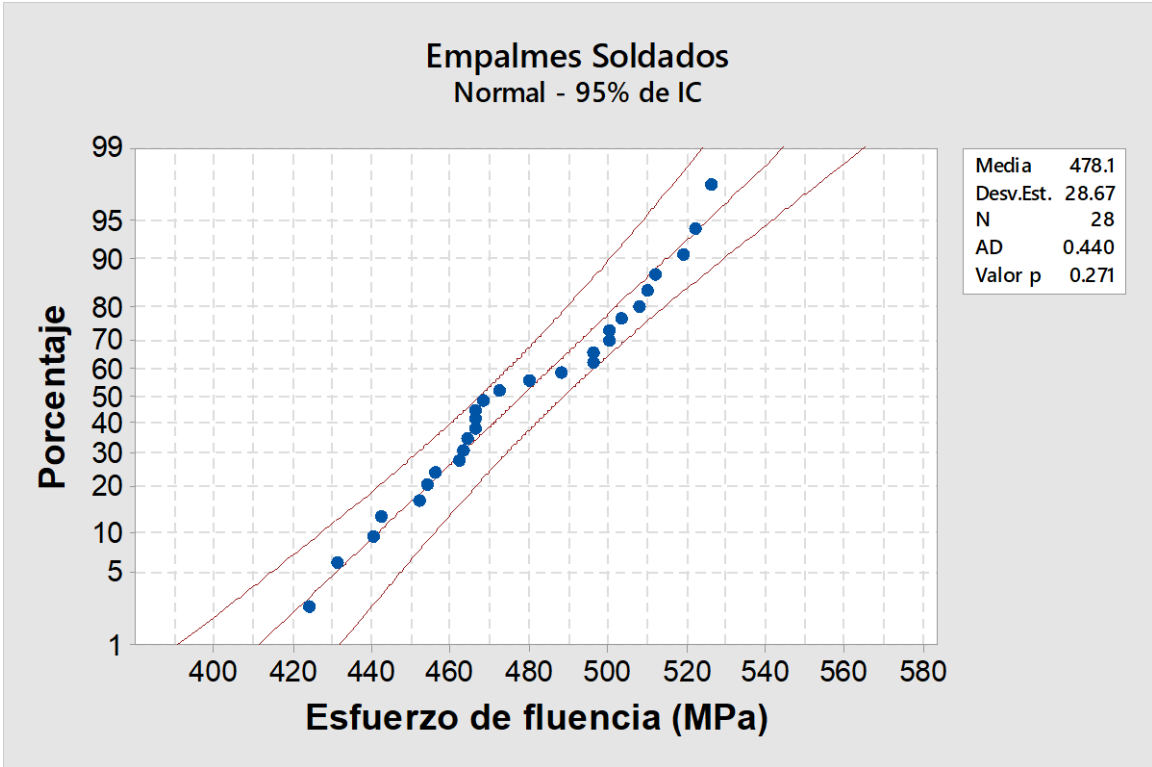


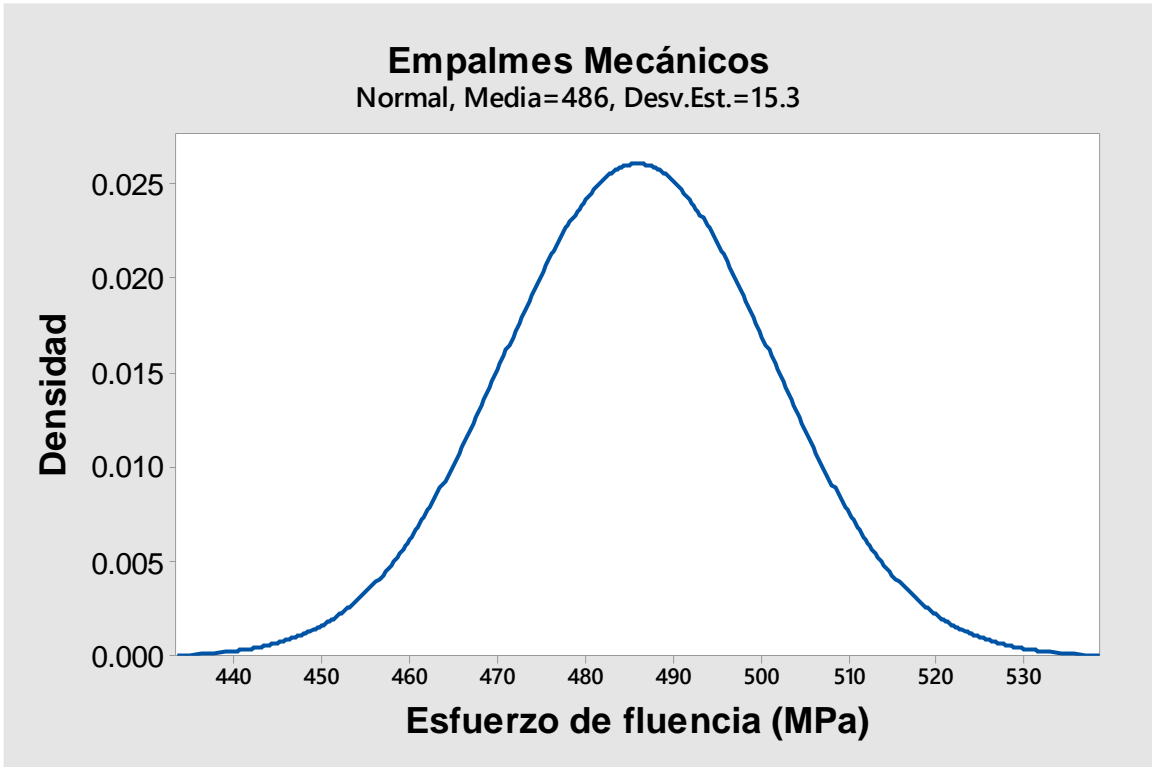
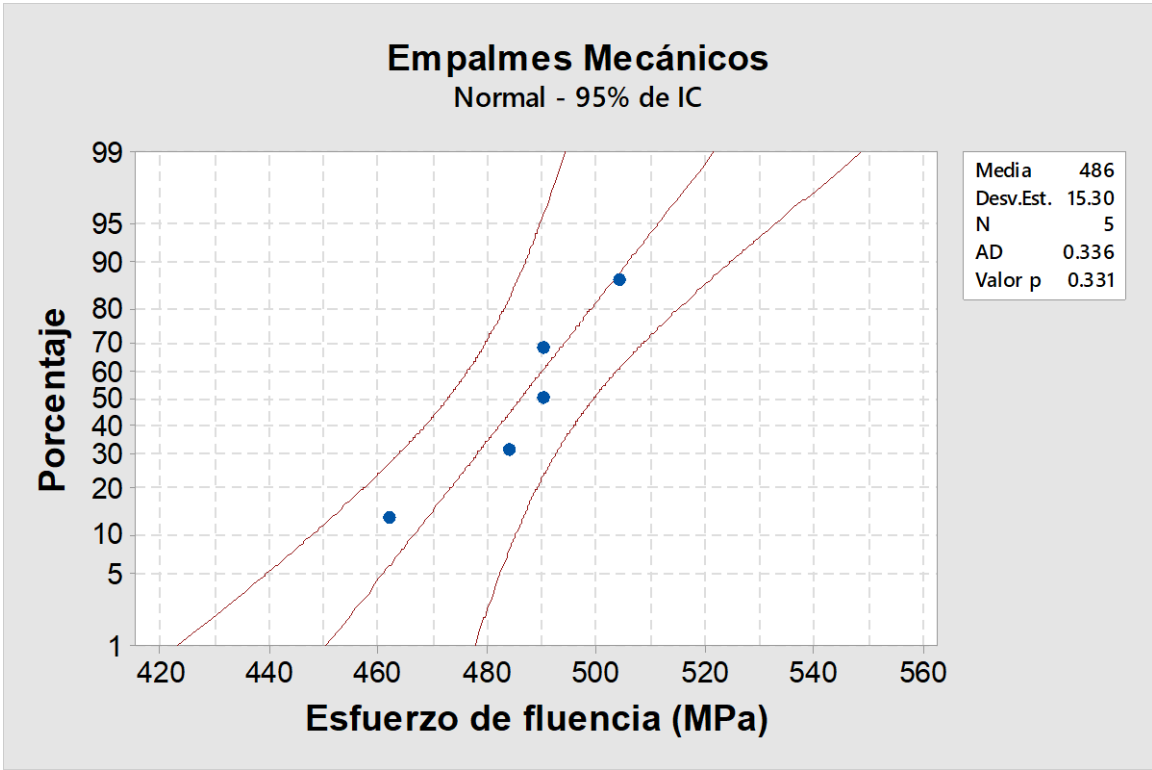


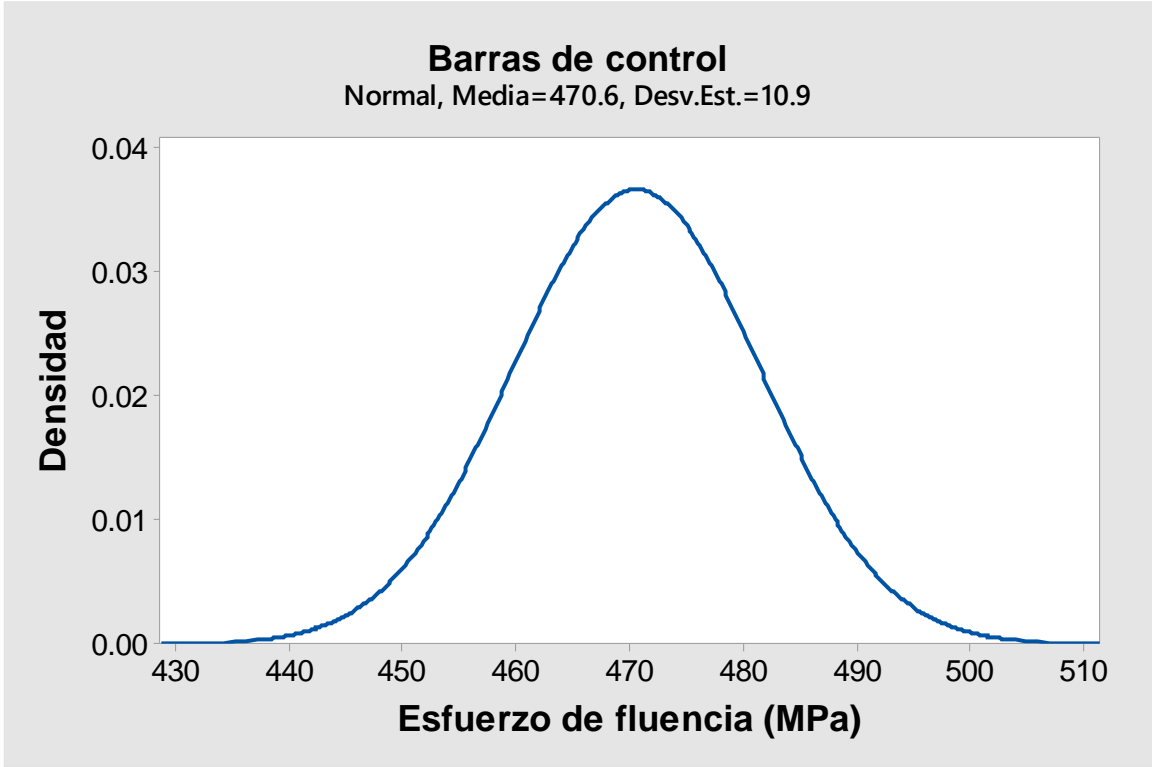
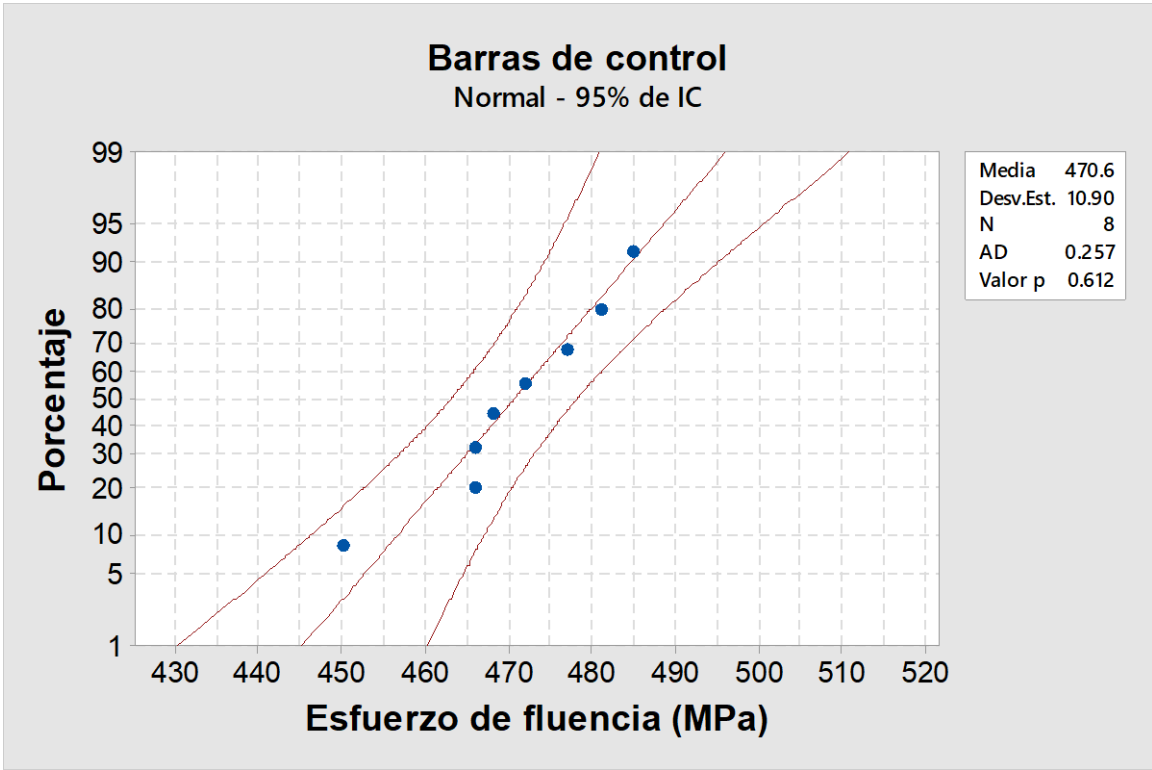


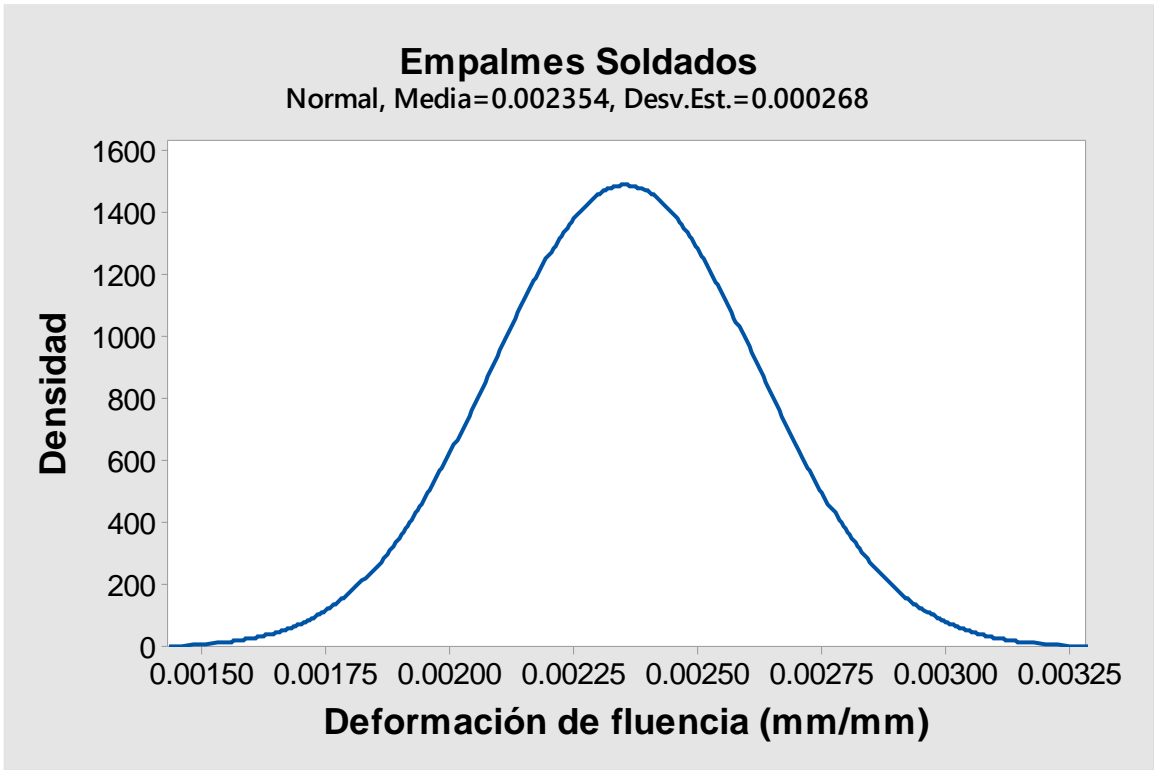
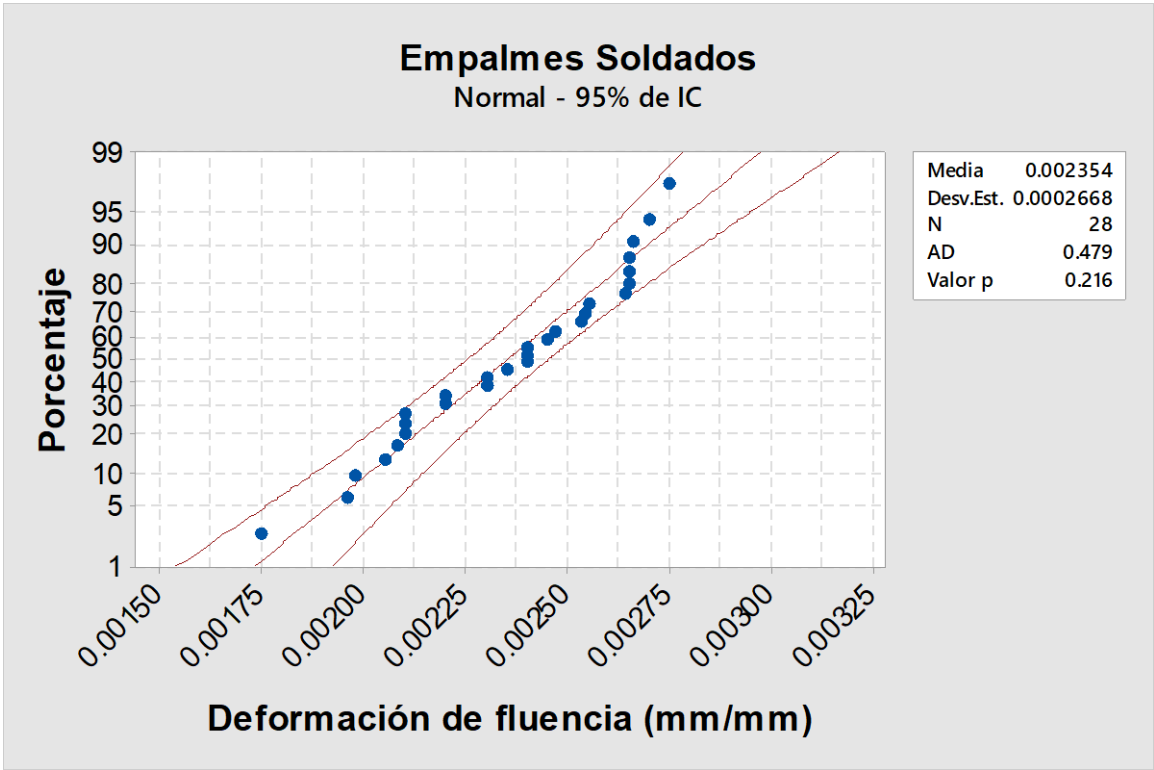


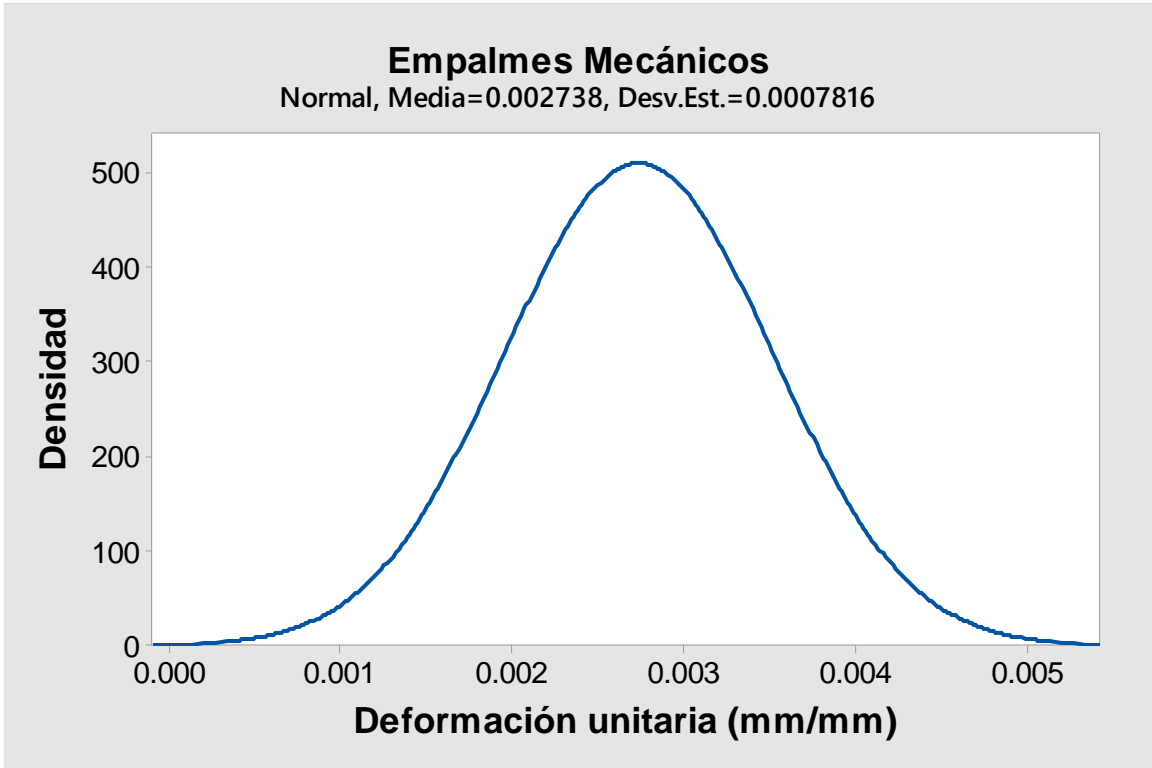
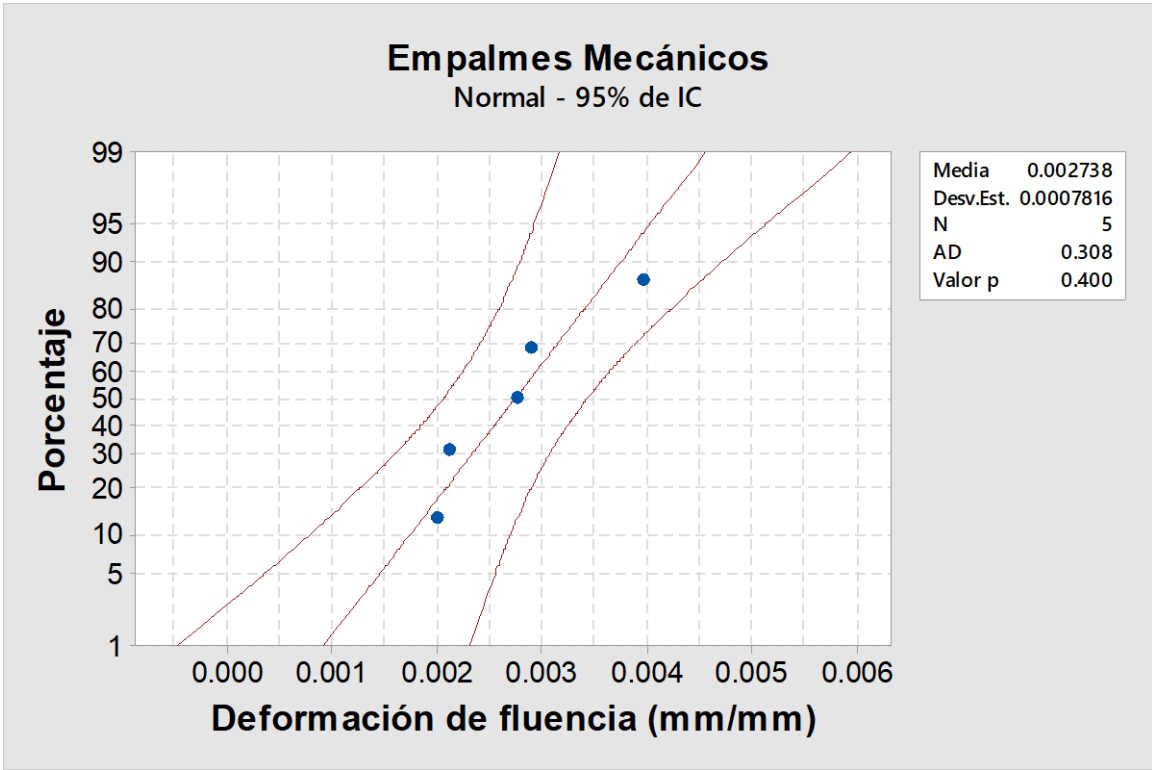
ANEXO 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

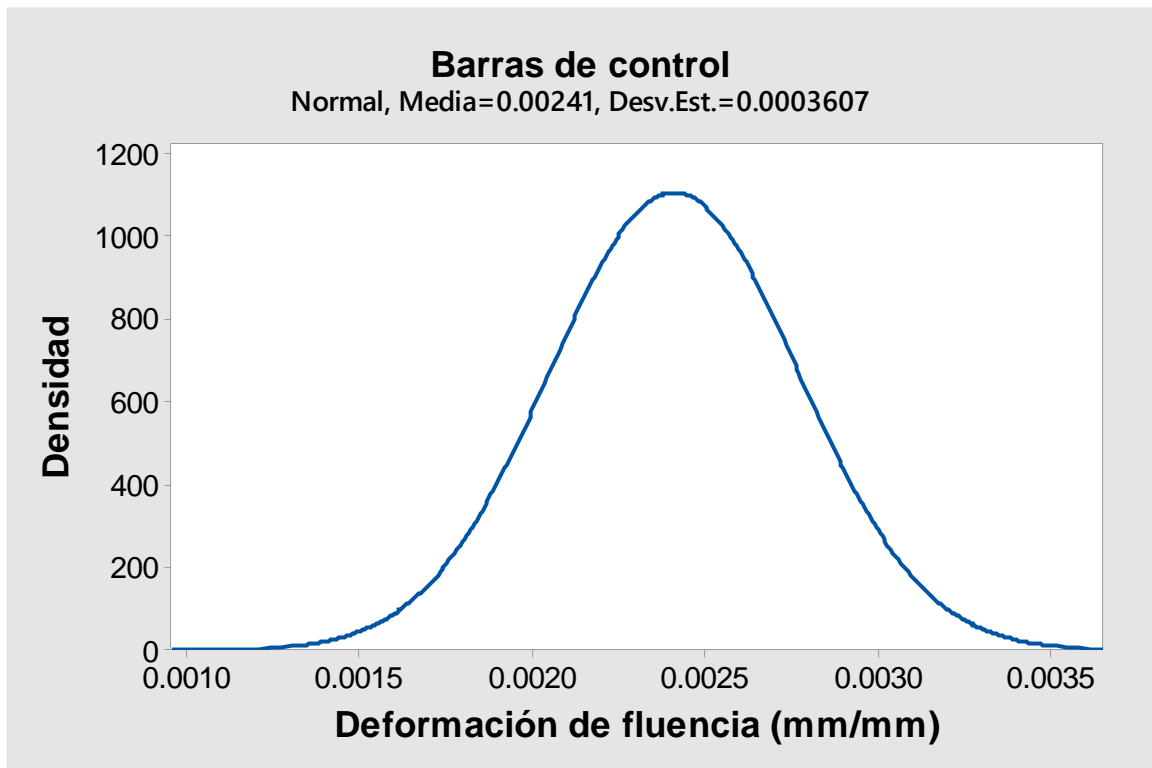
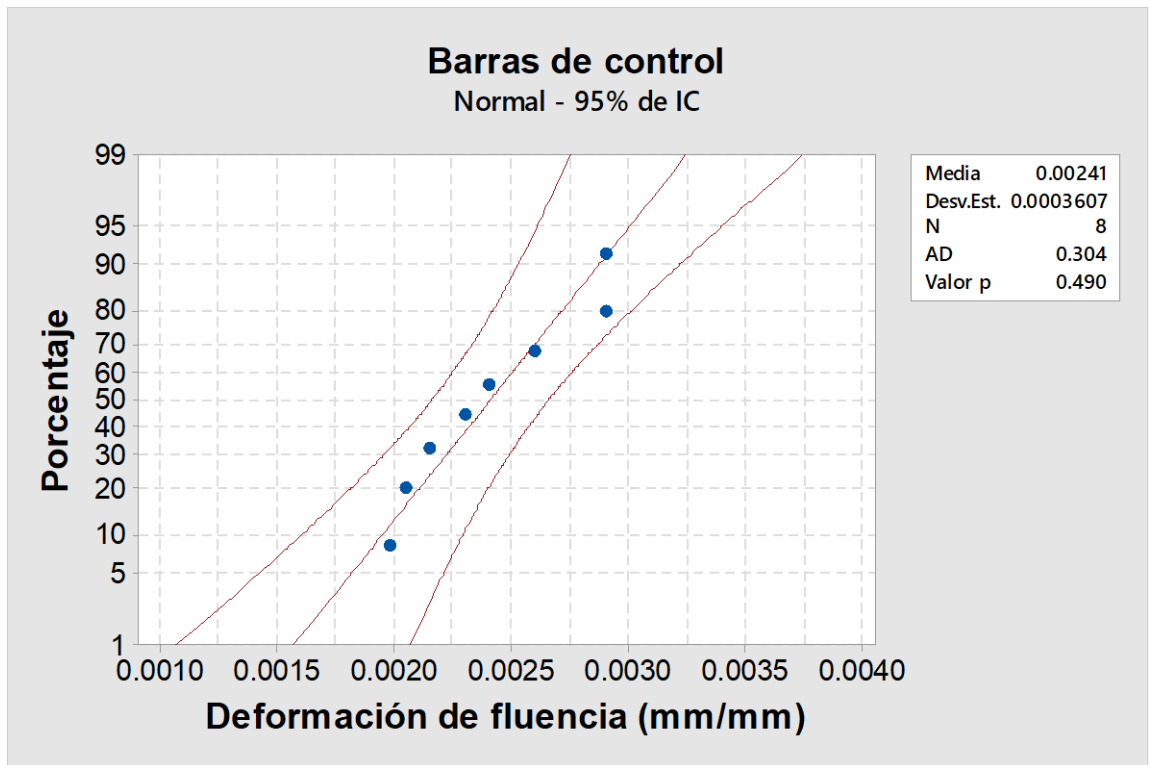


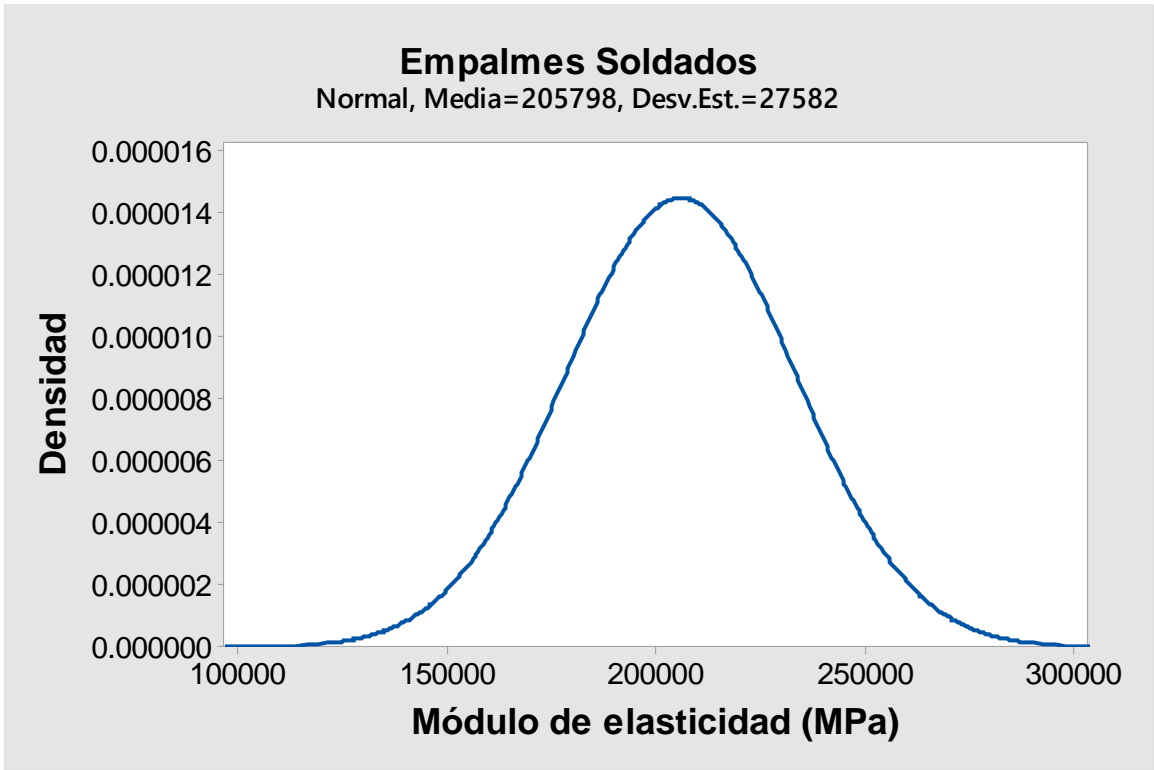
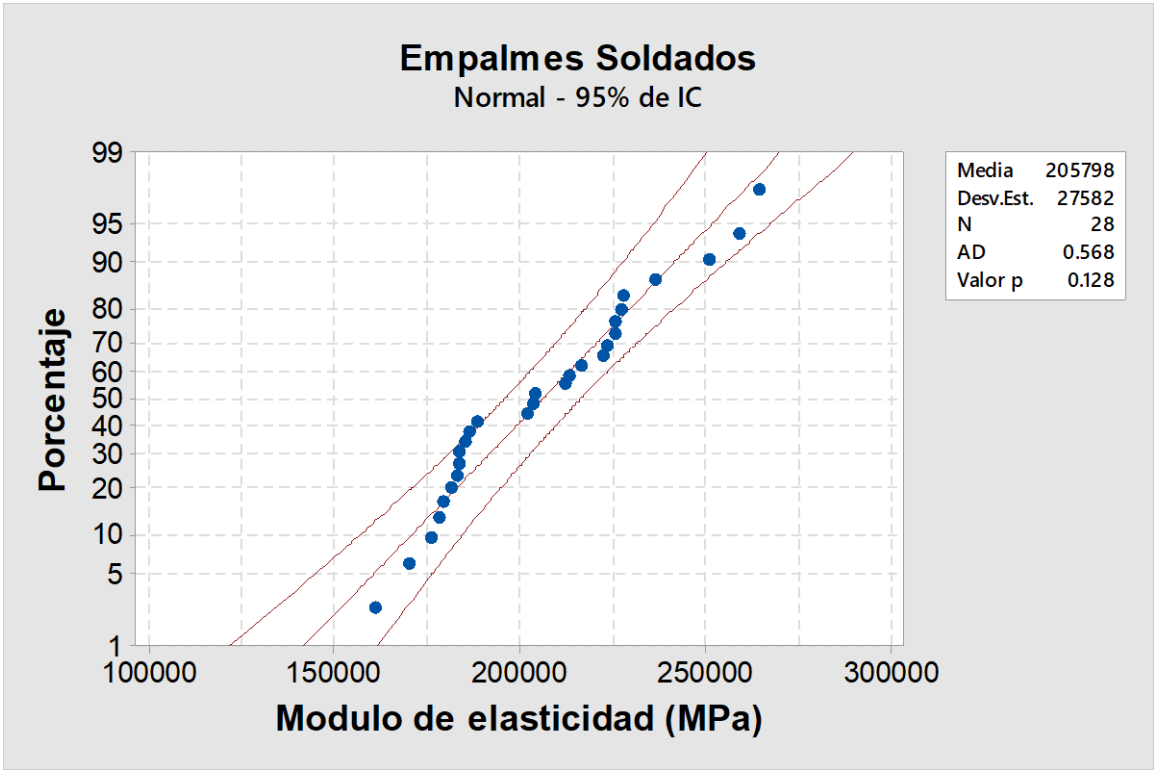


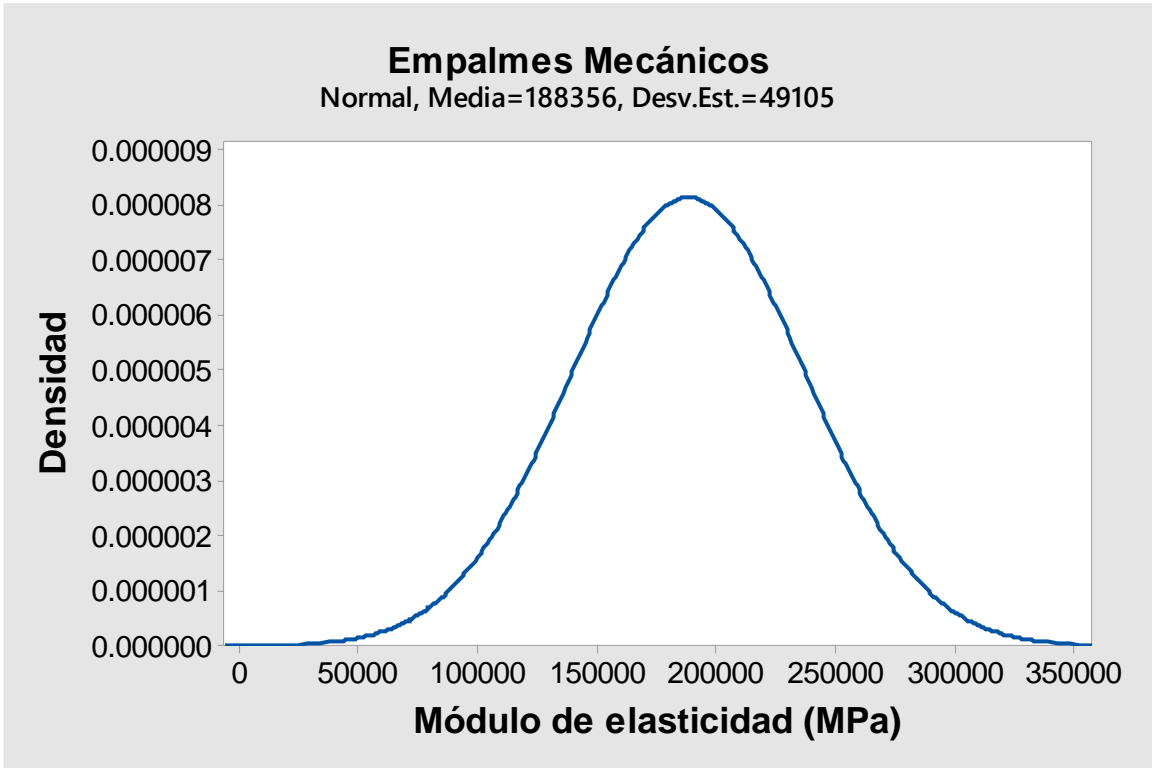
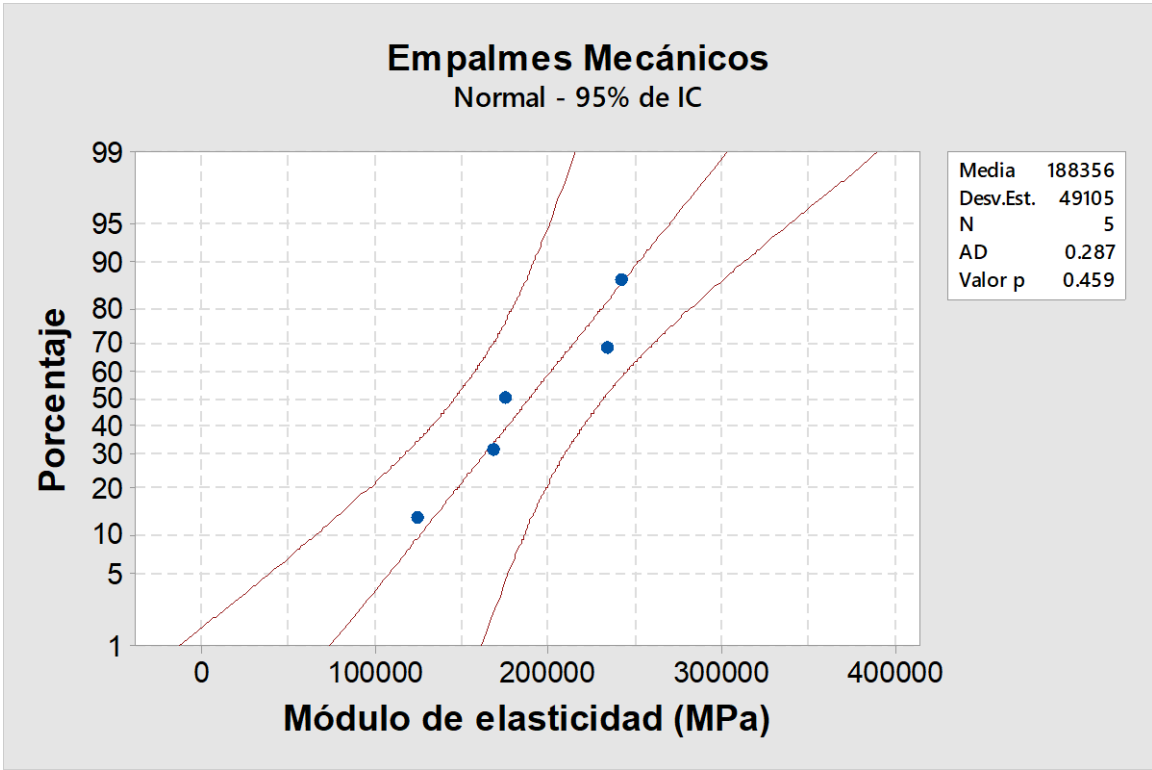


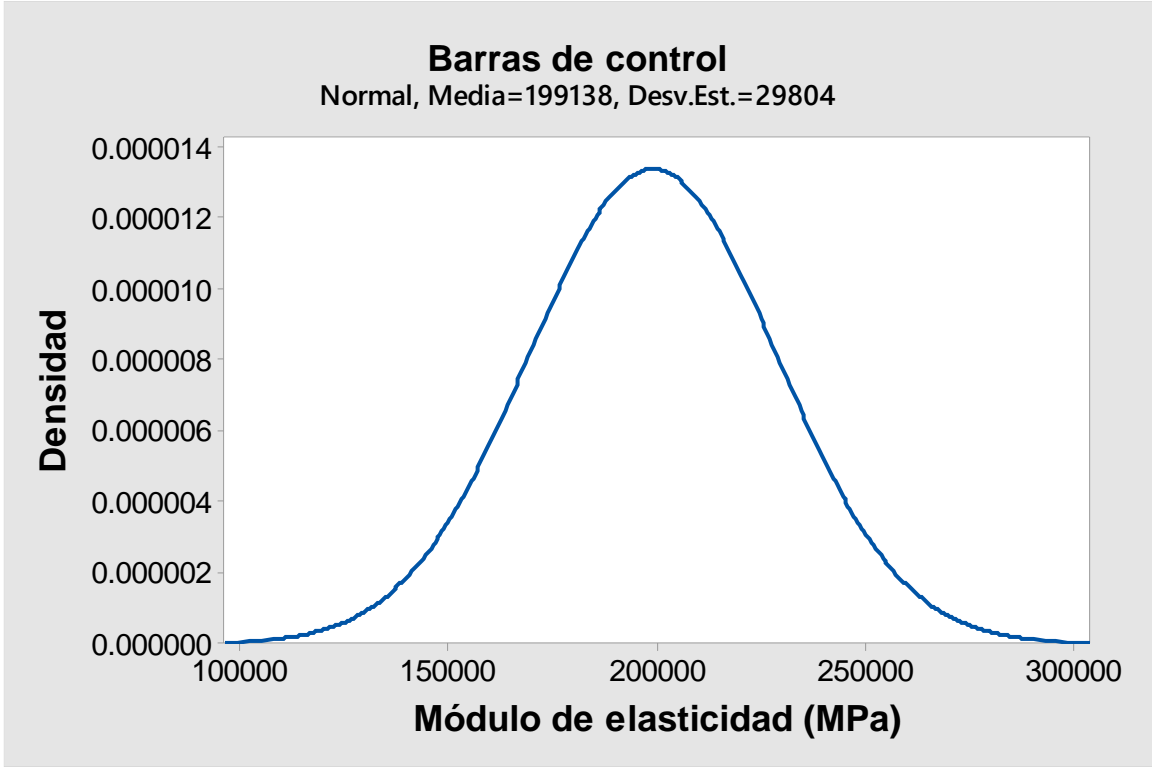
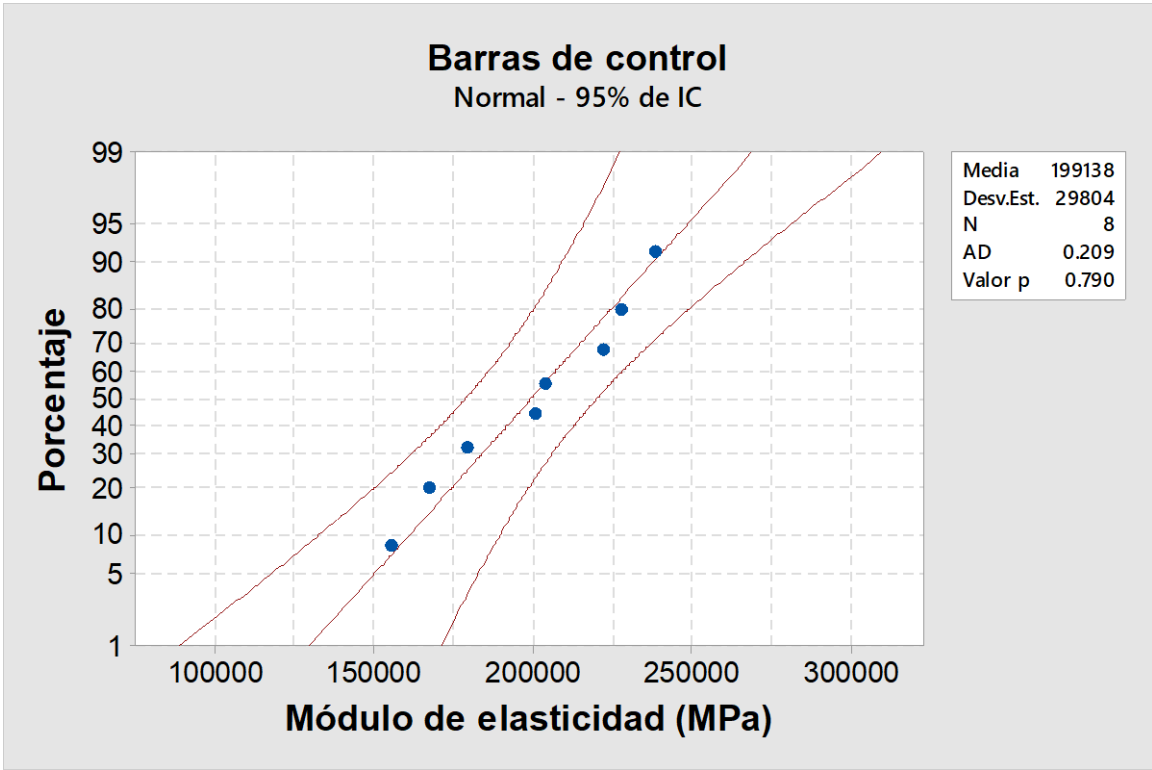


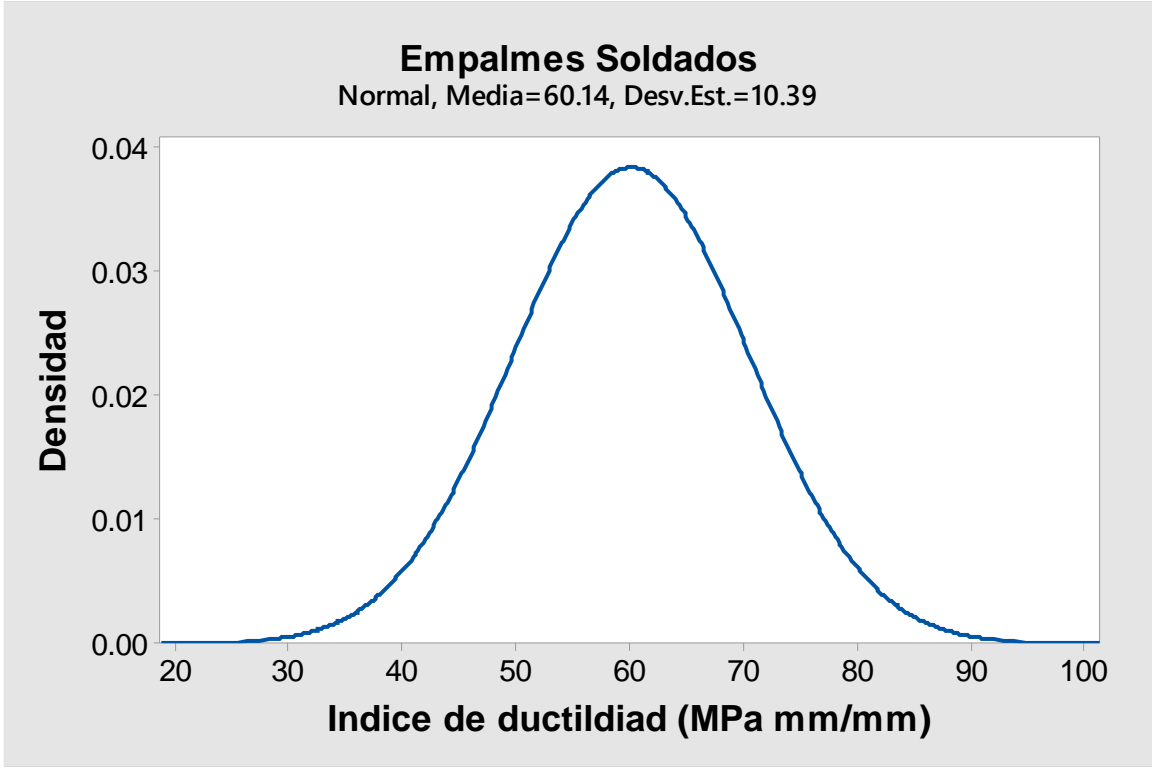
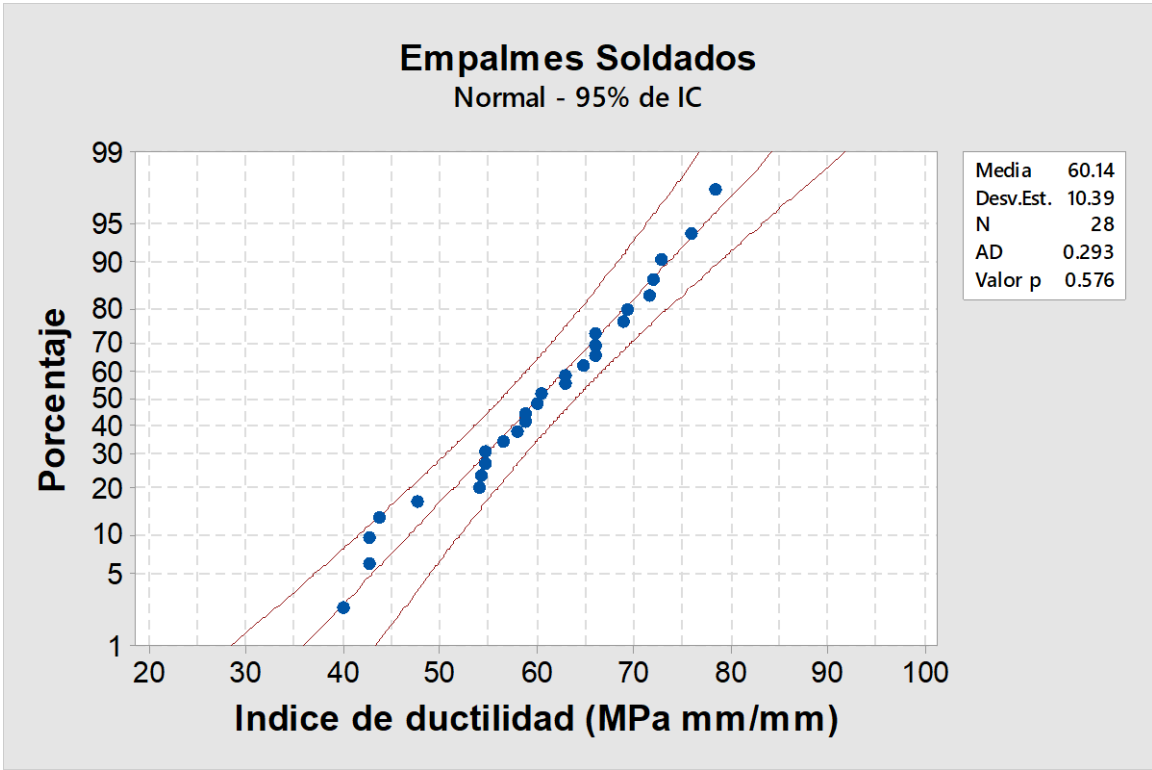


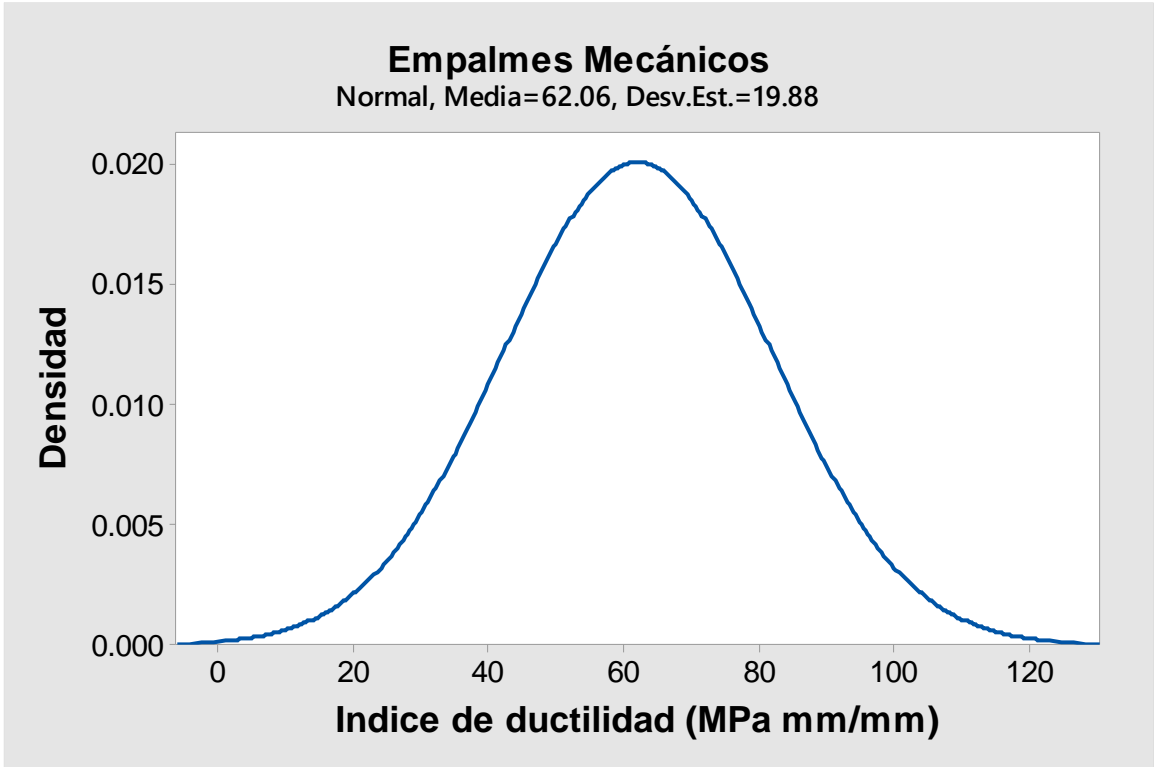
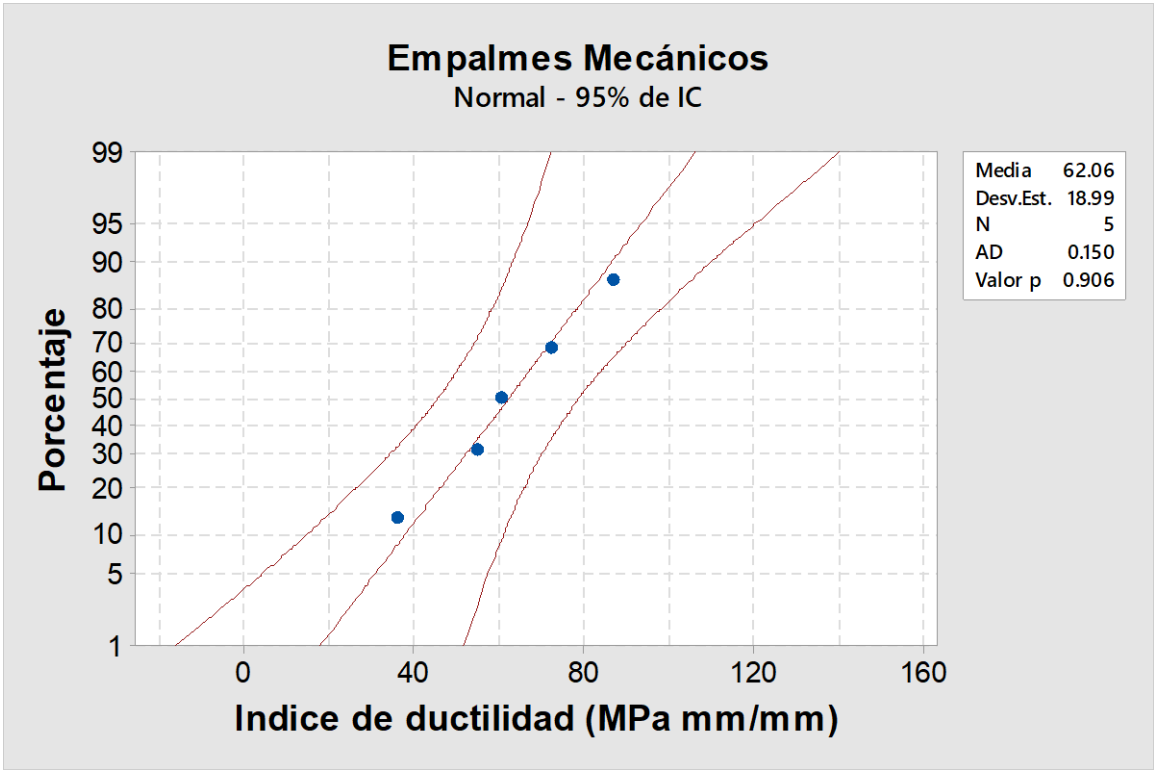


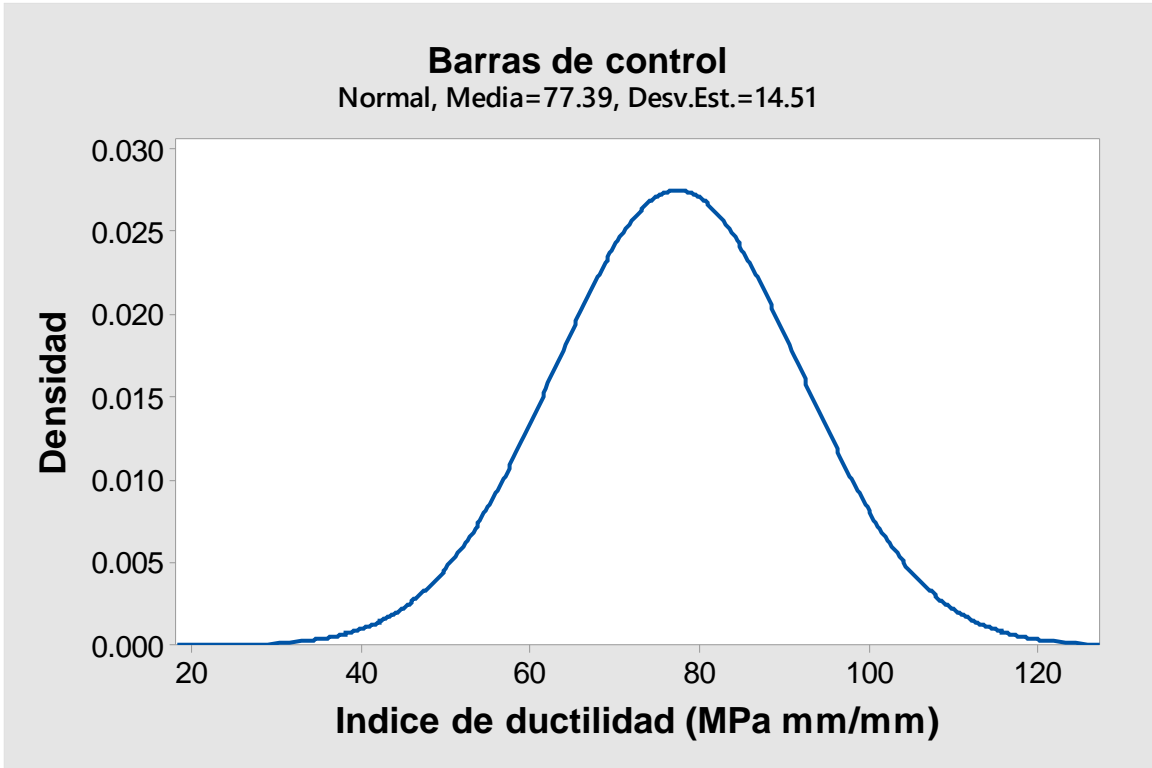
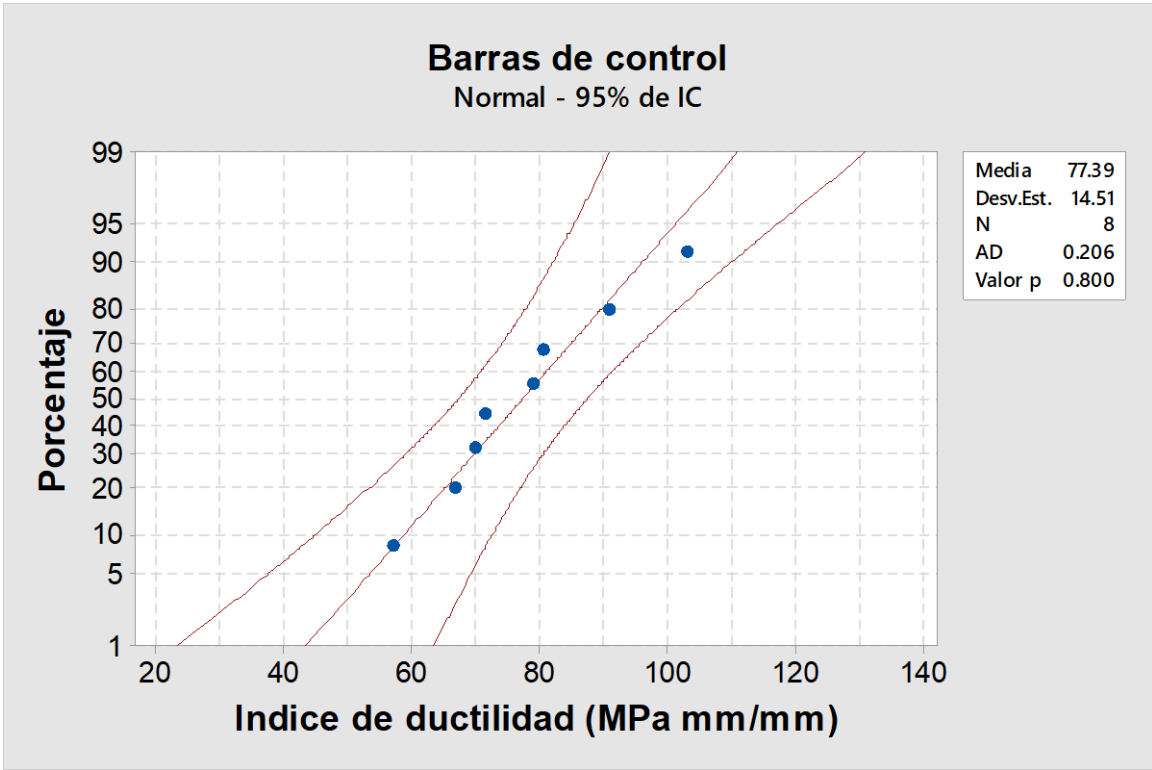


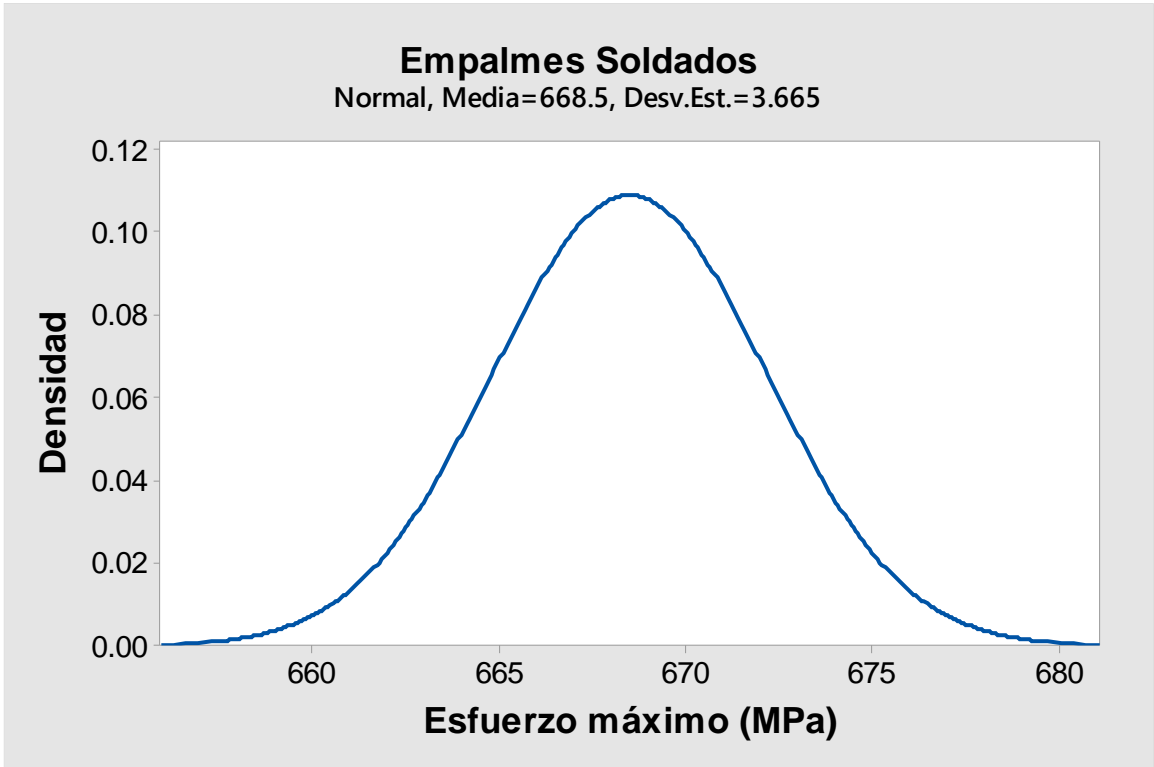
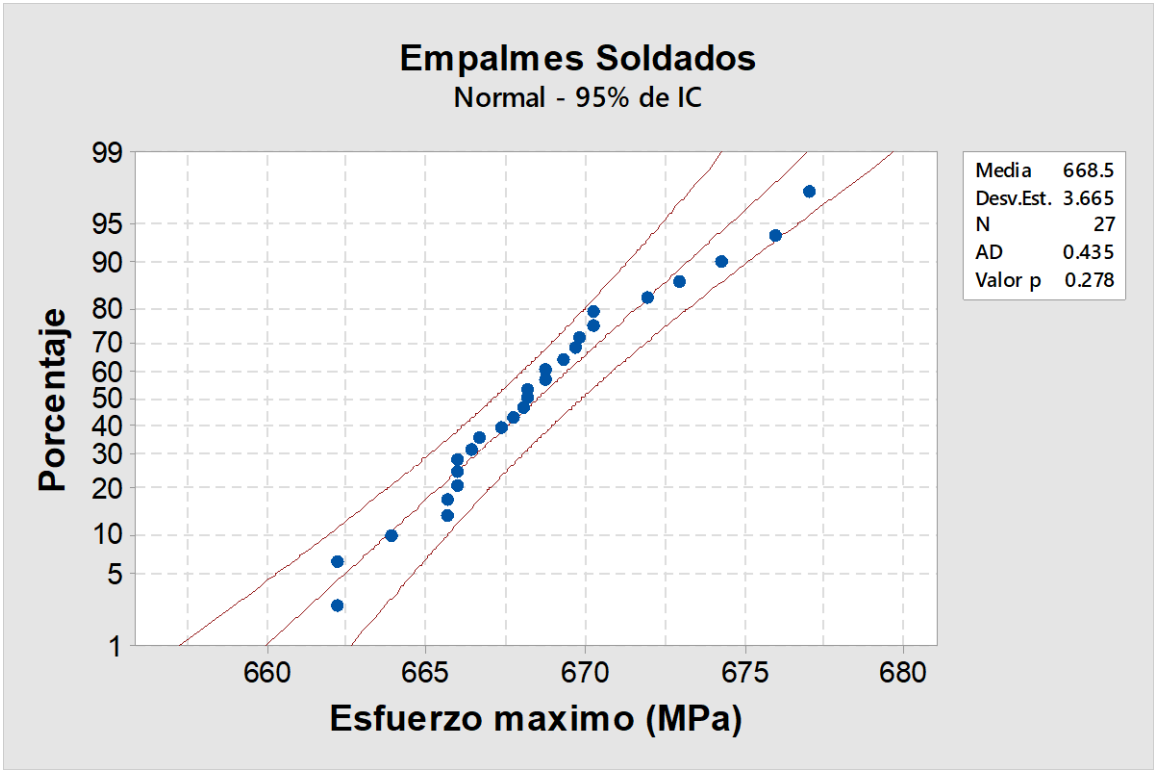


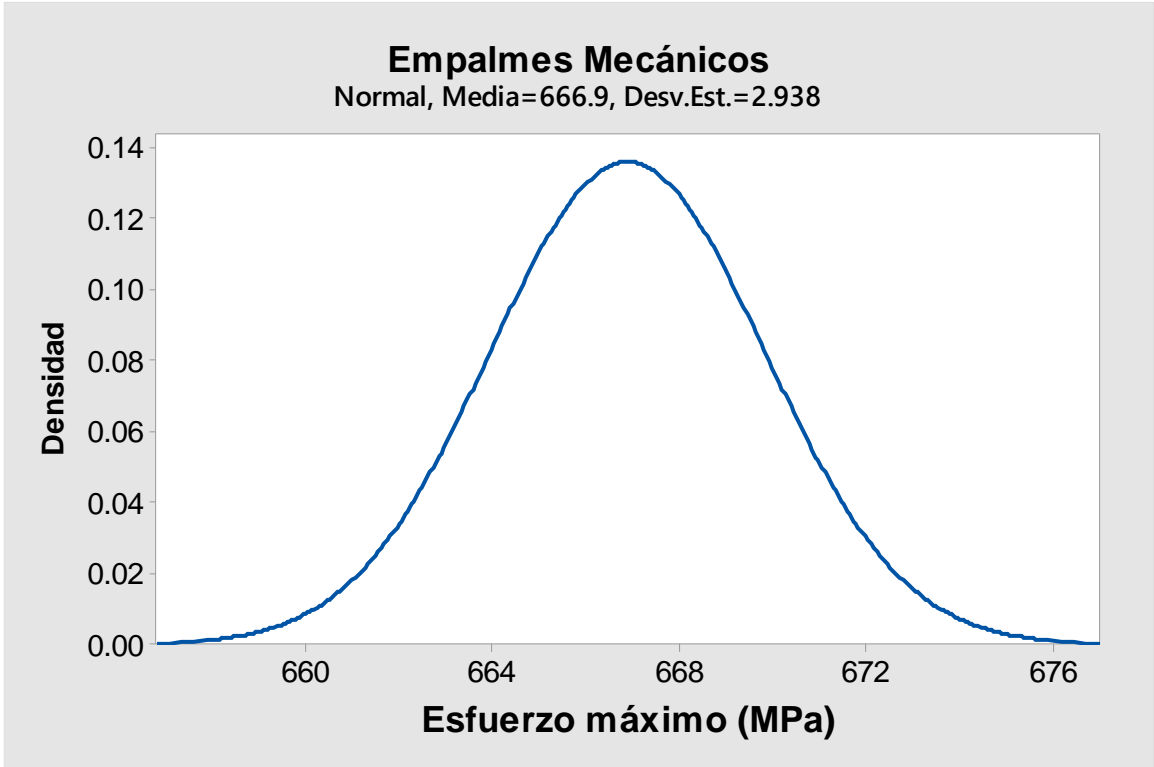
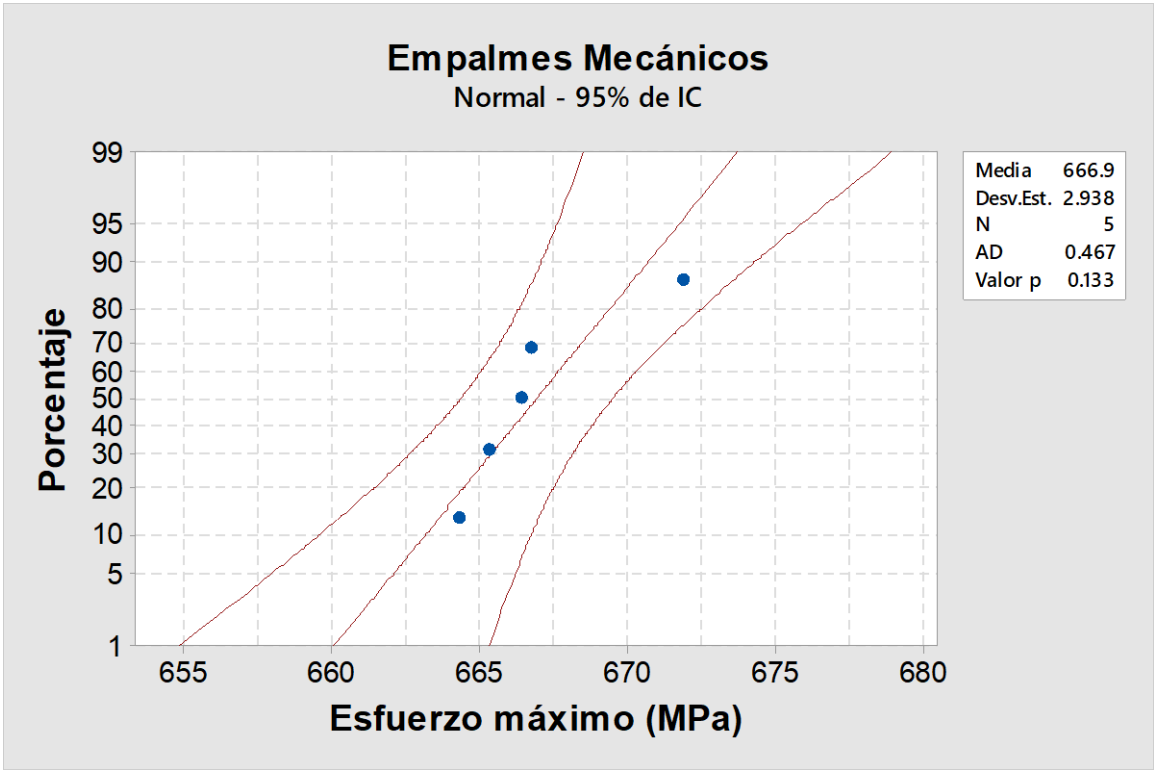


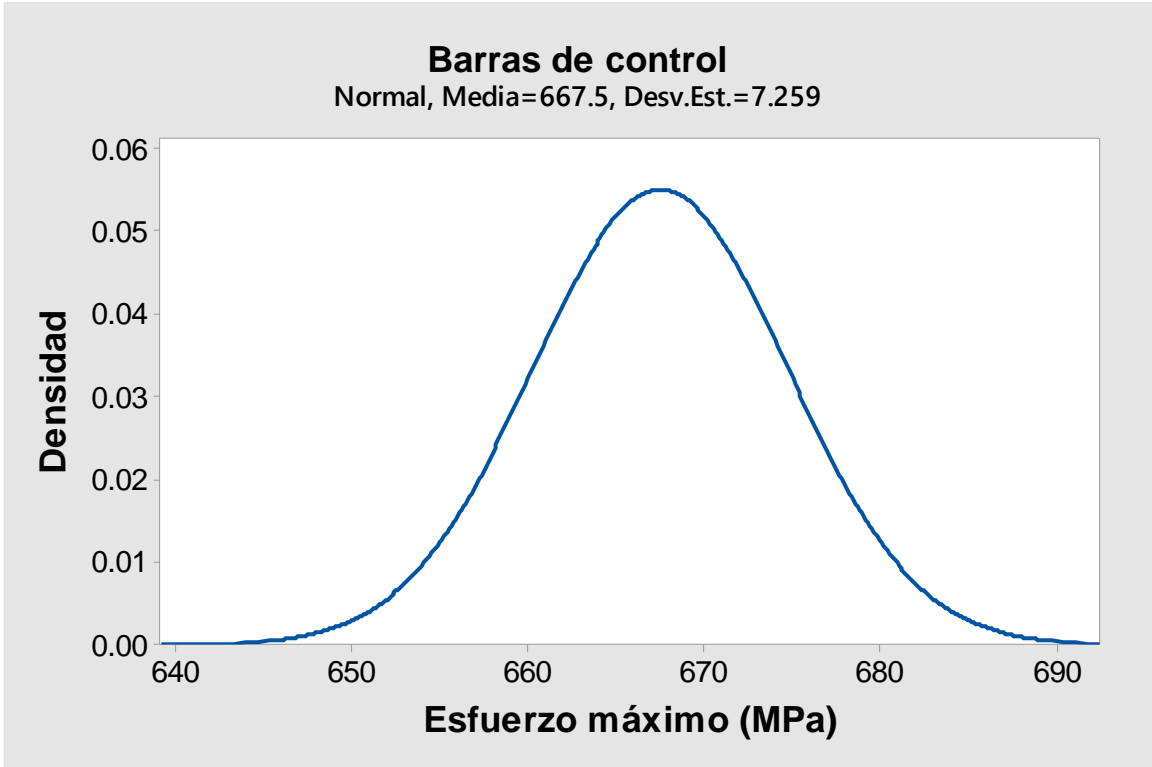
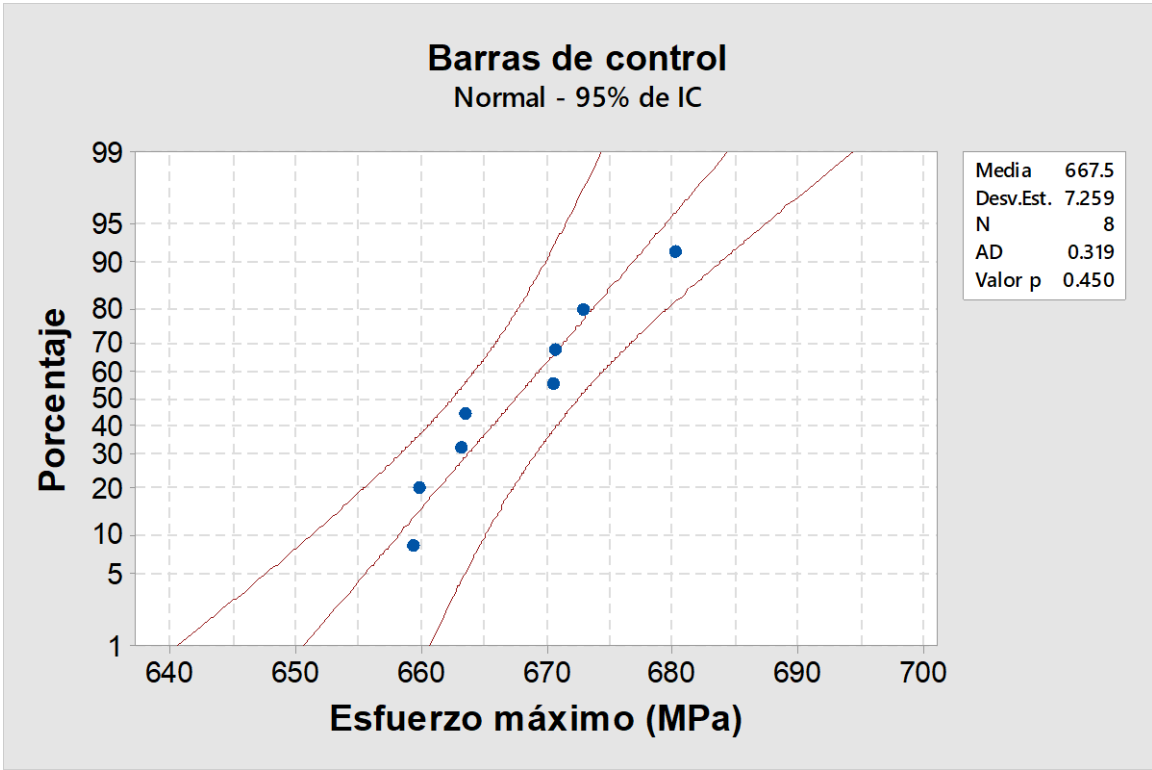


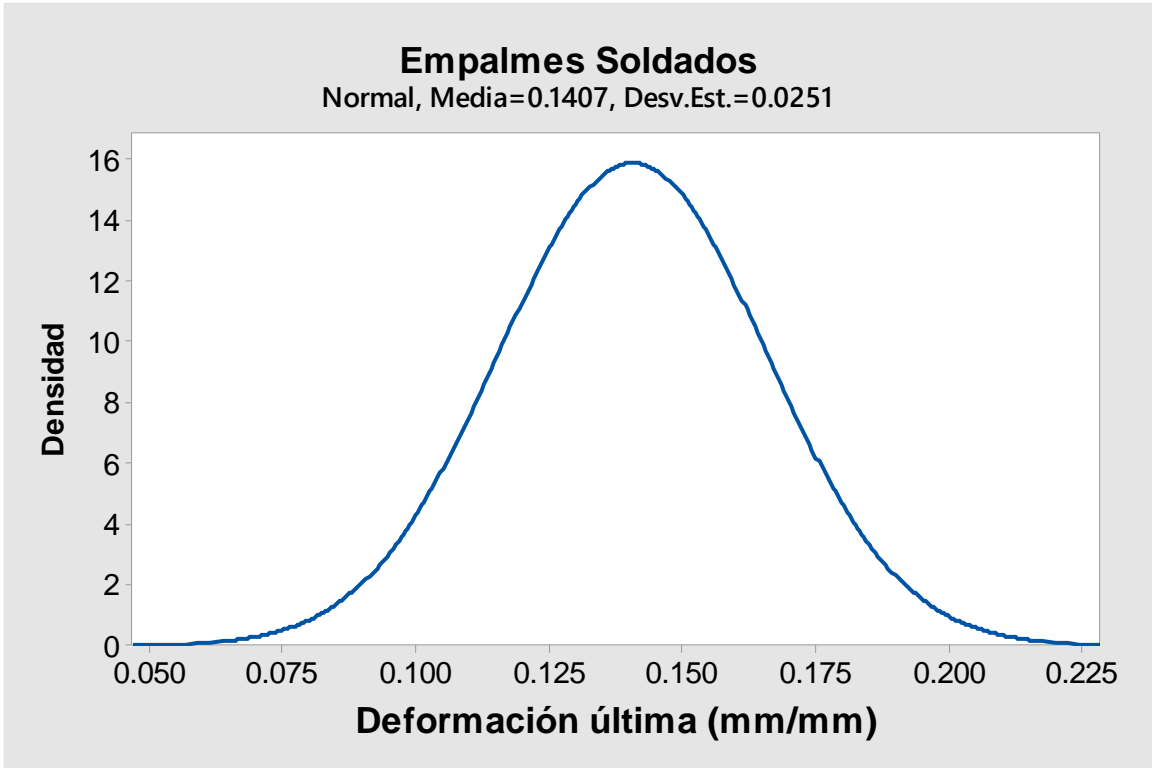
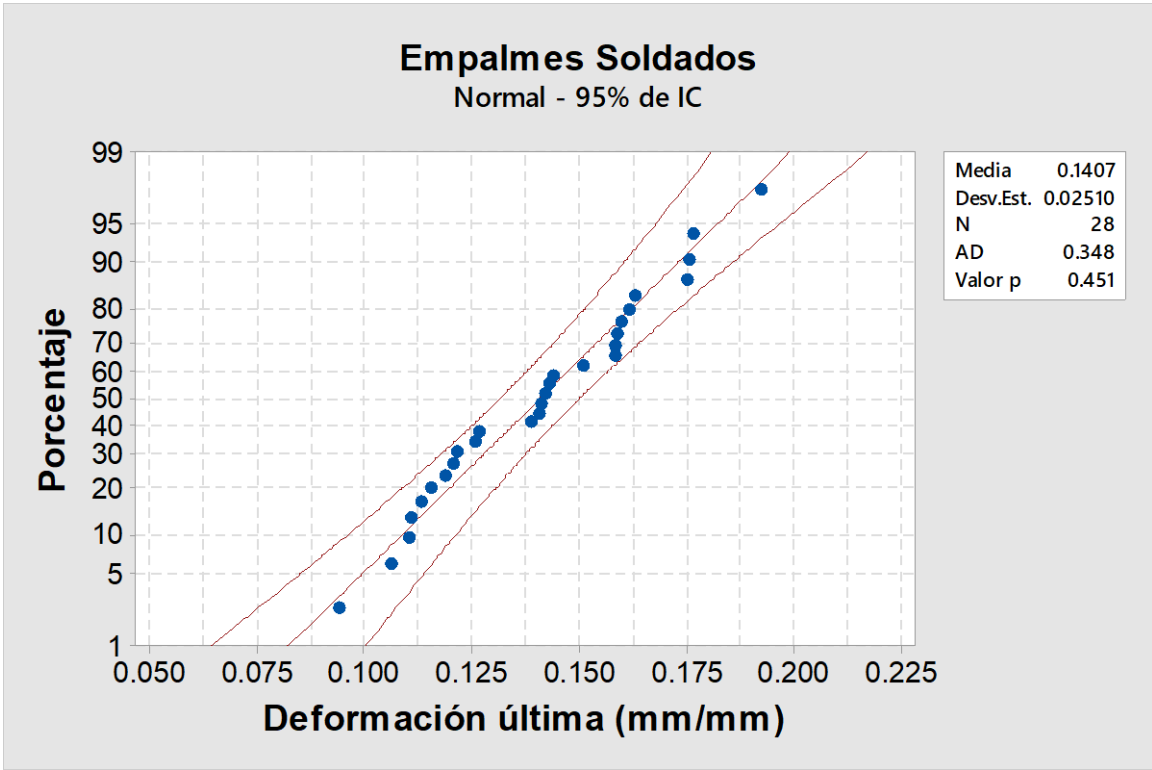


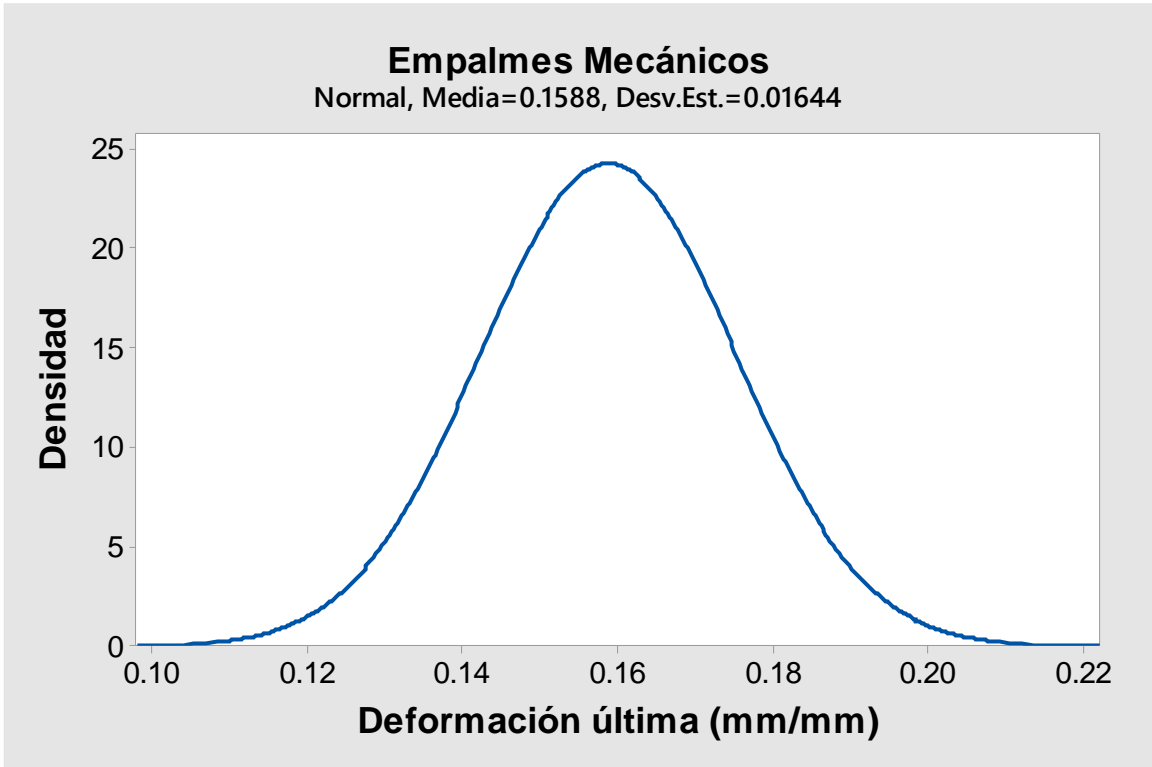
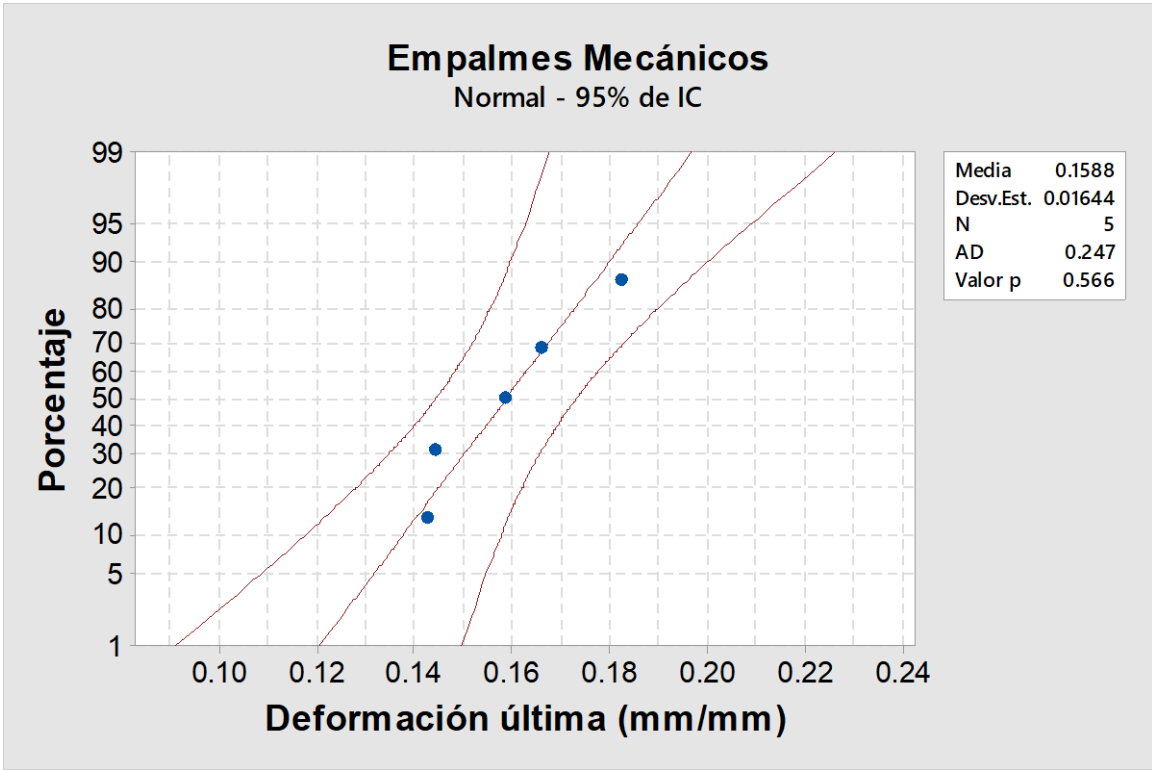


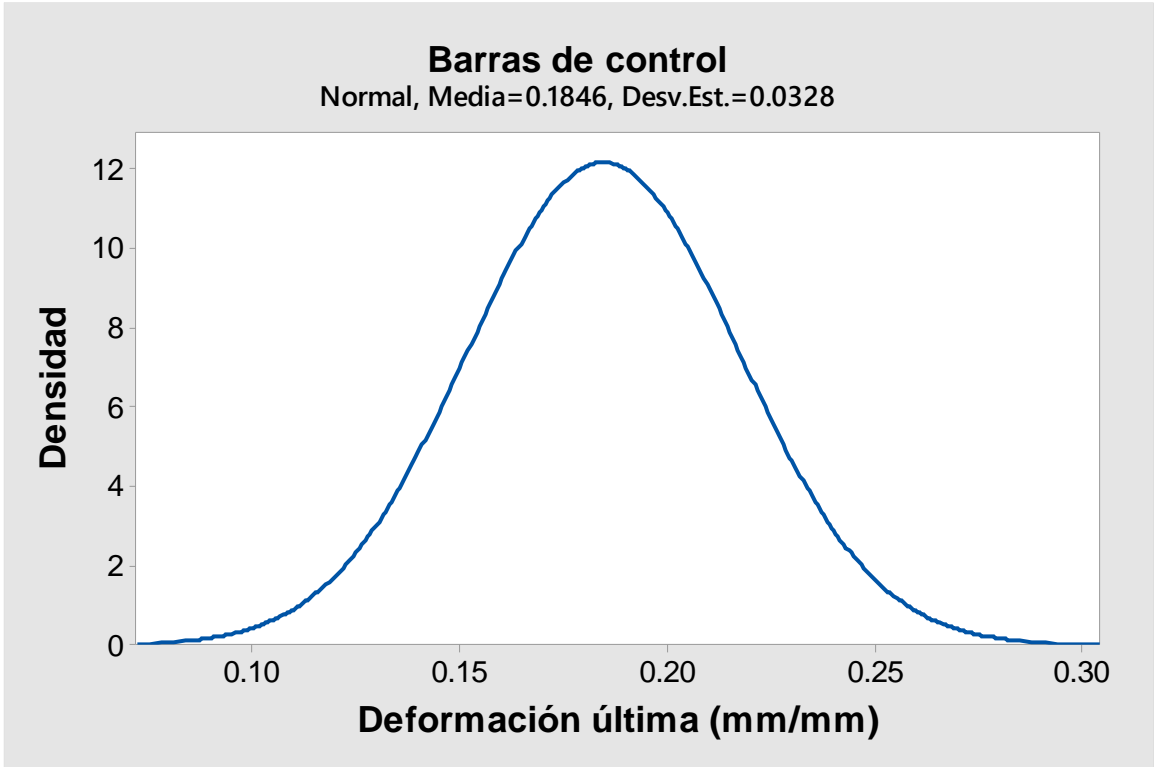
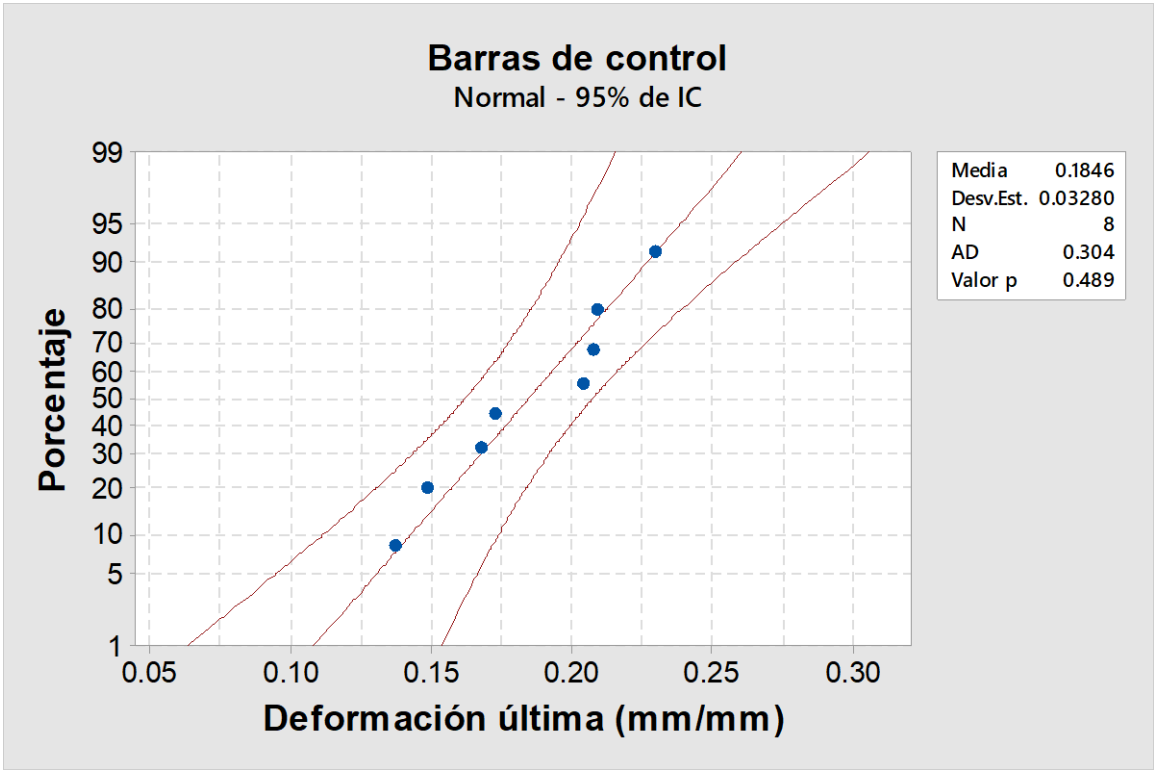


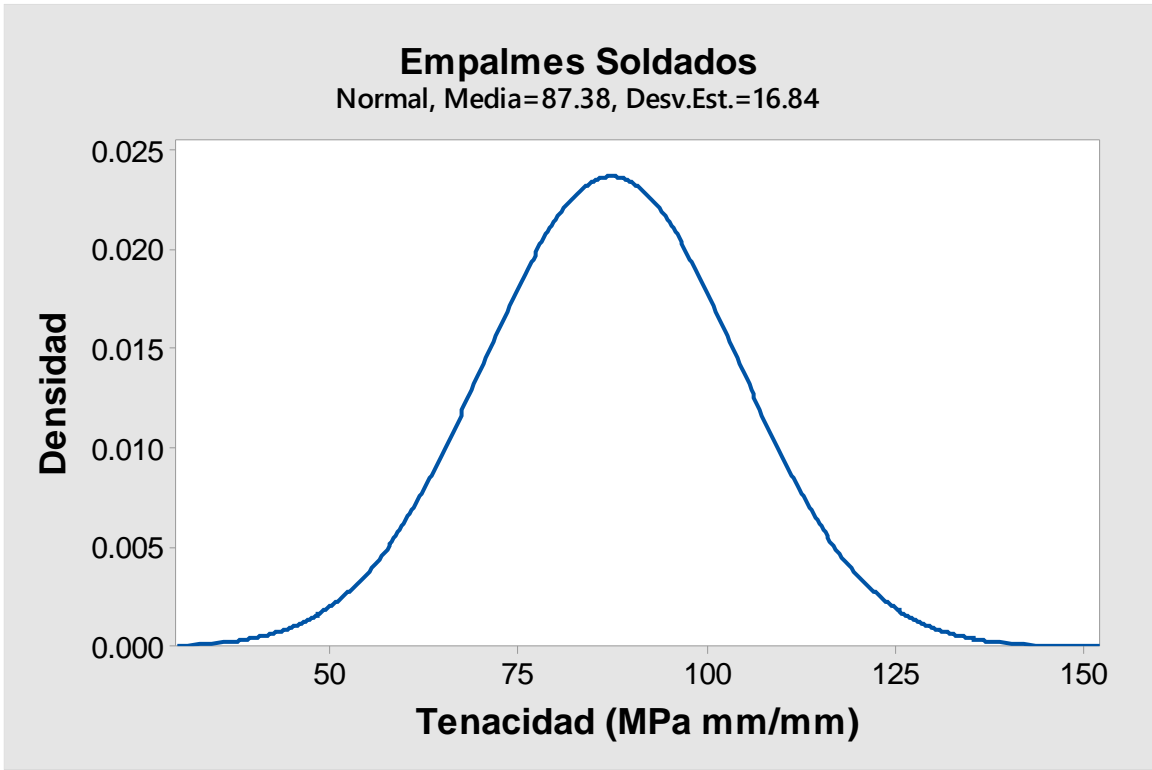
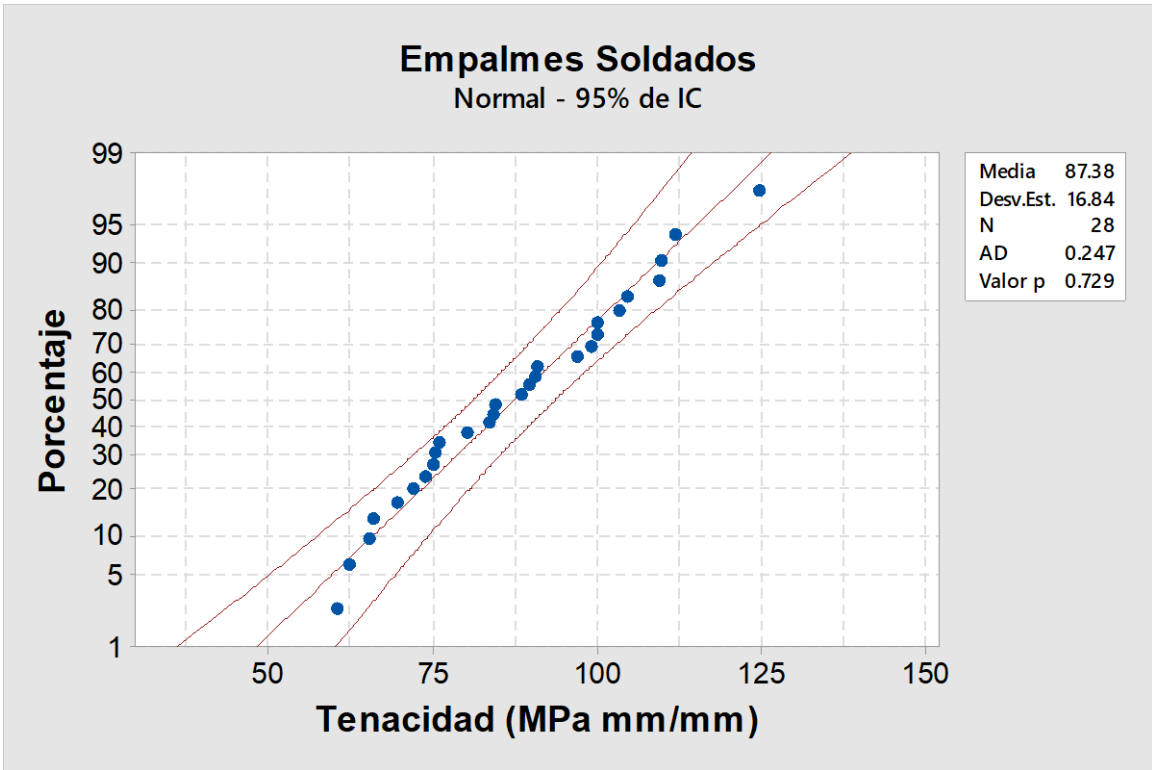


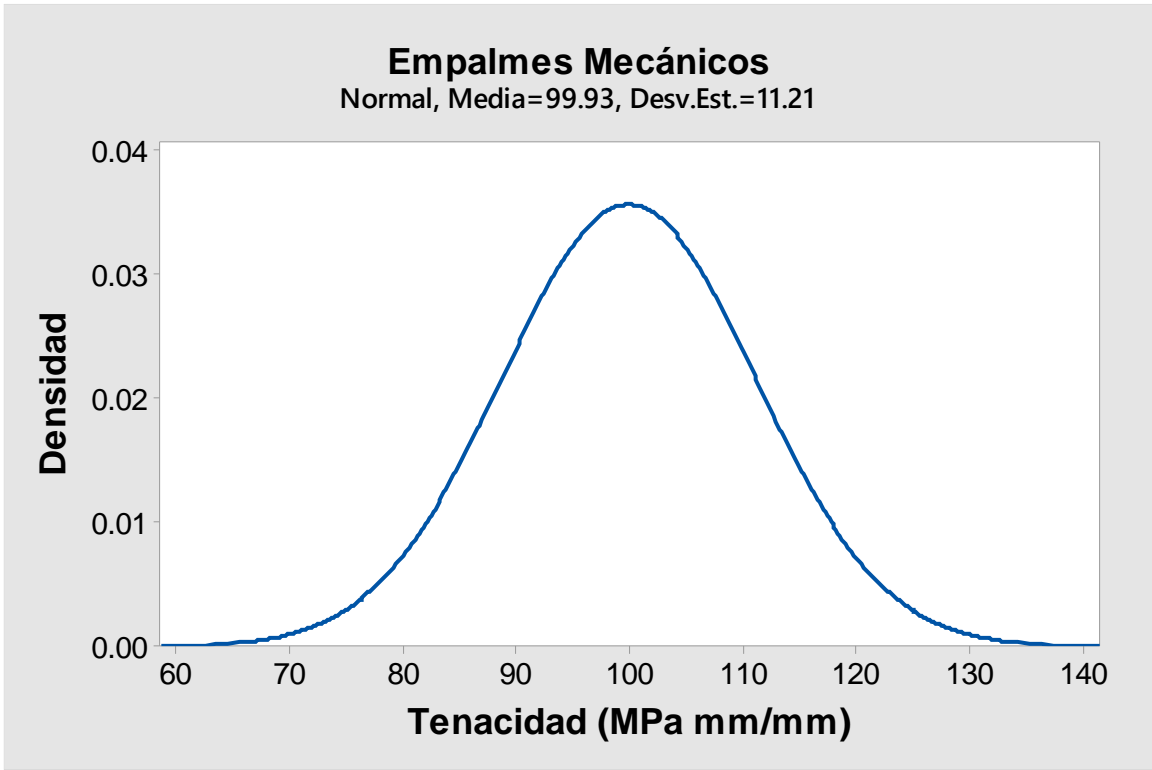
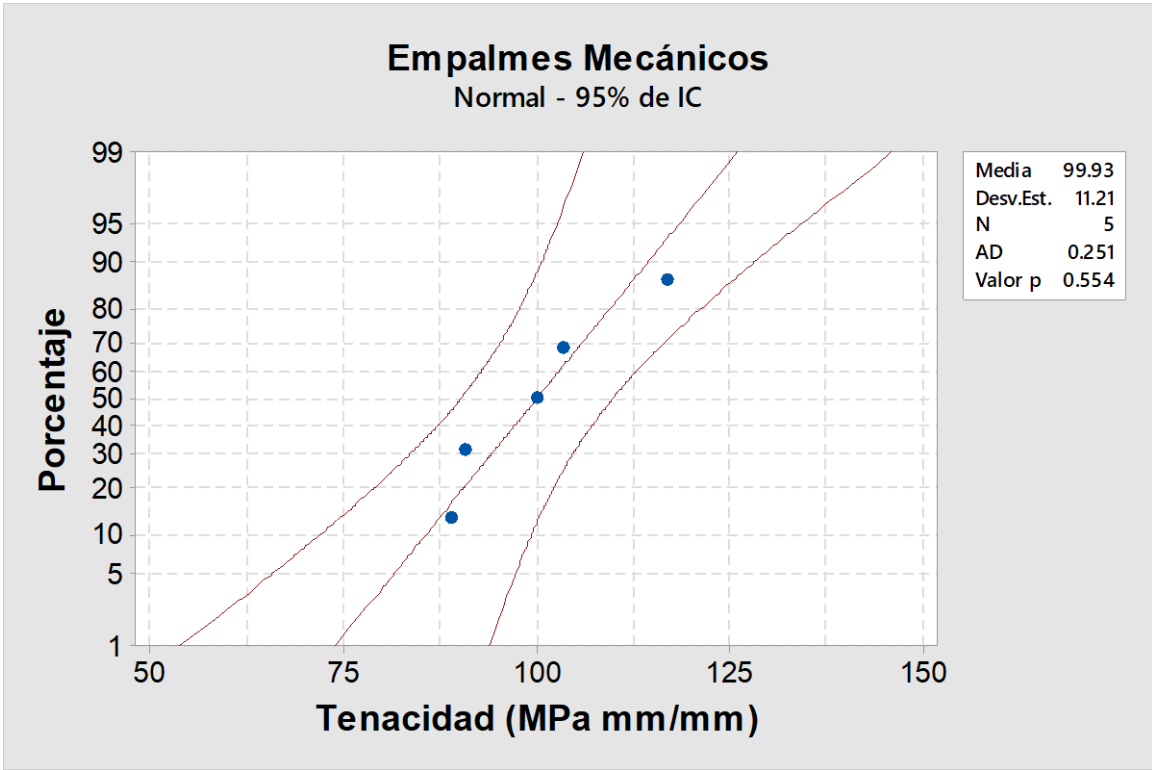


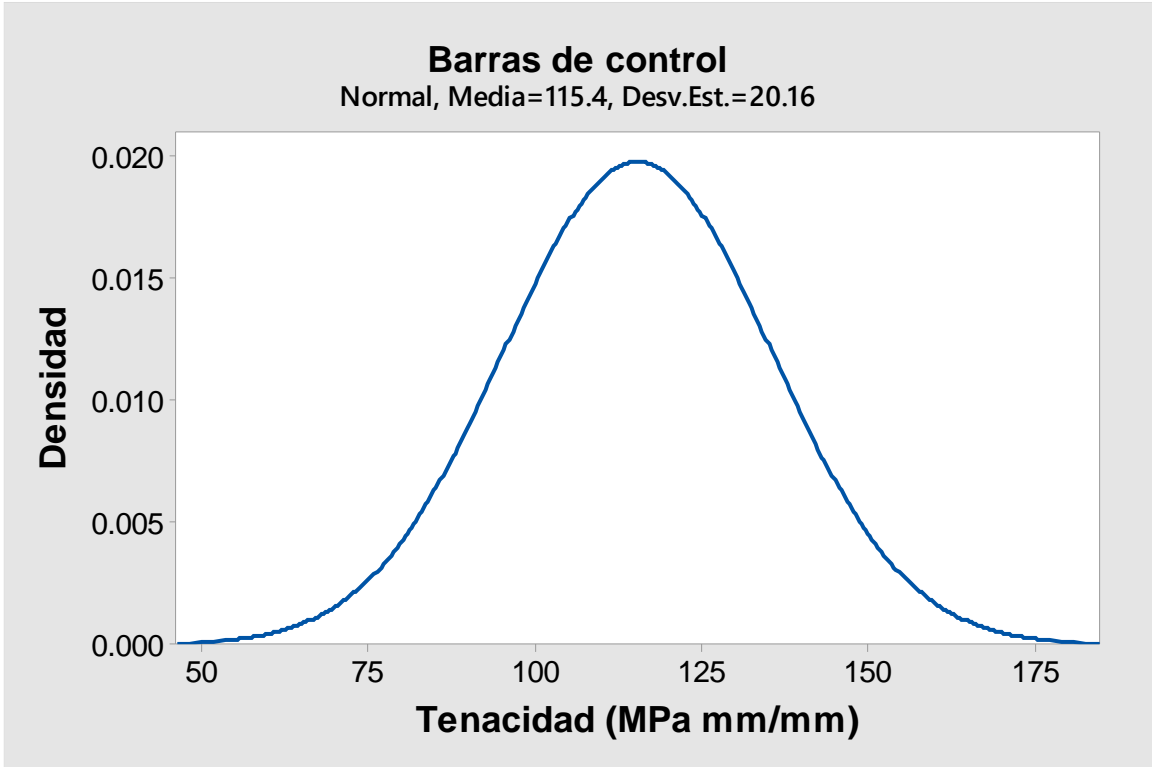
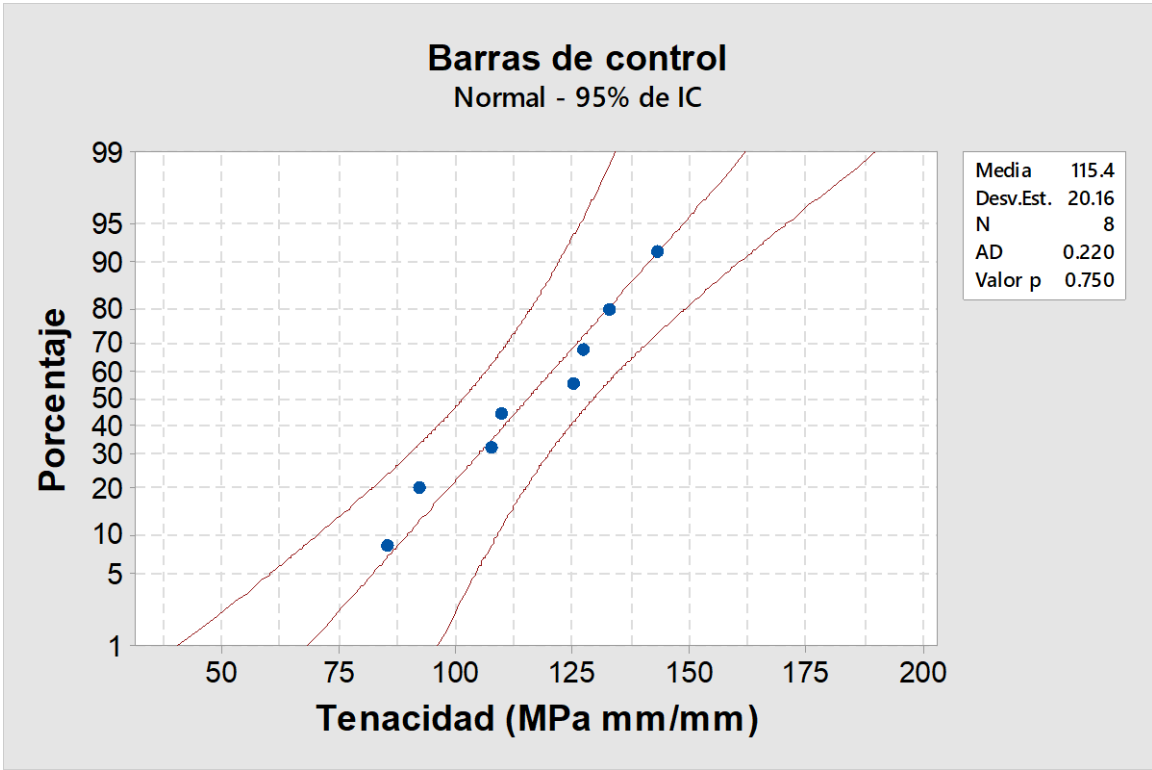


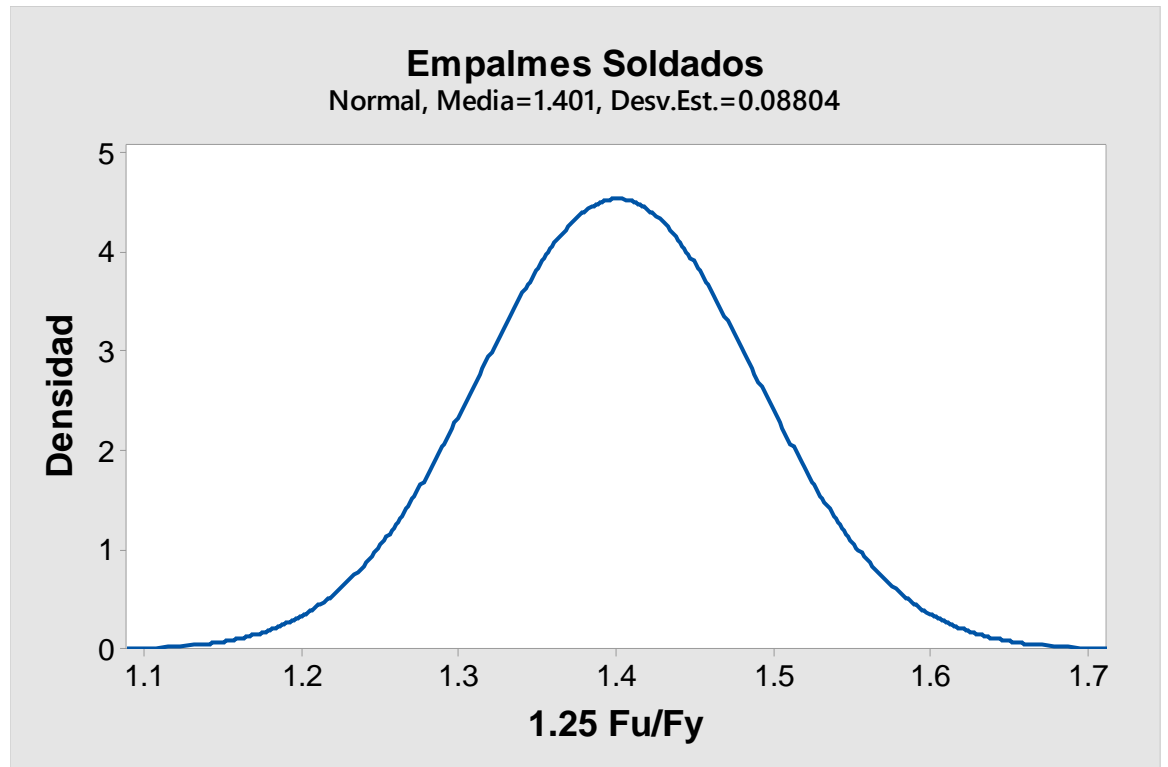
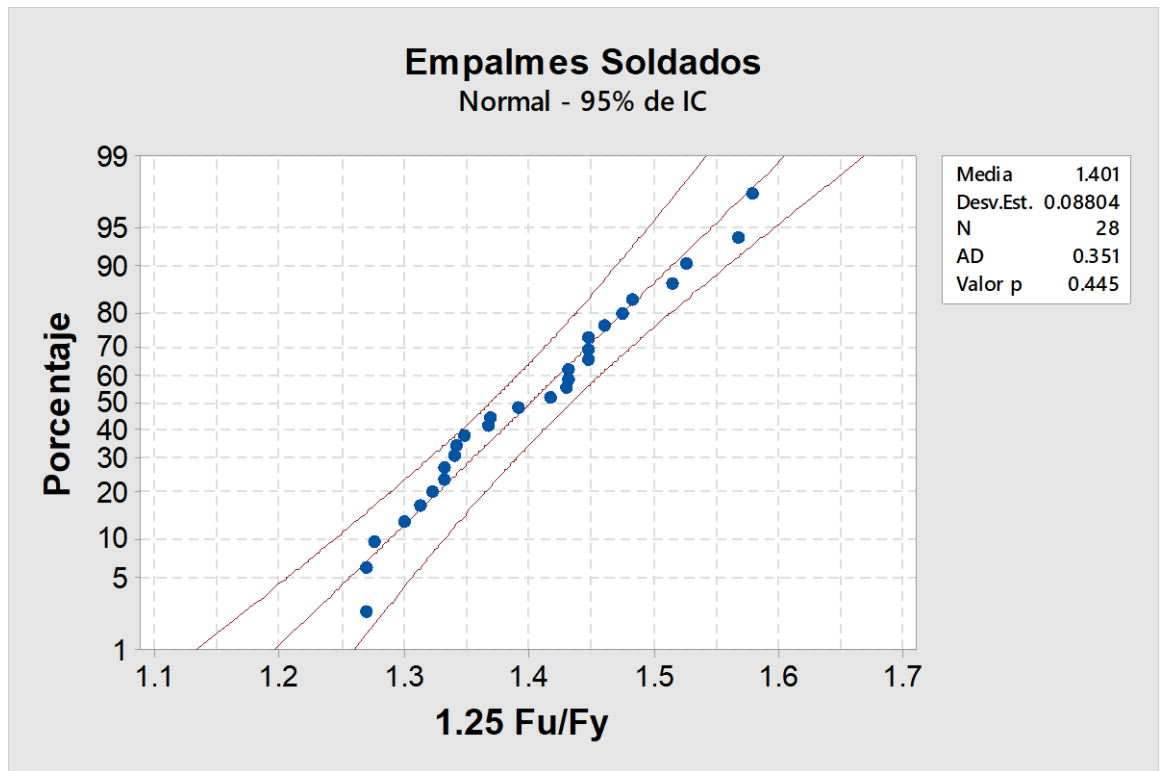


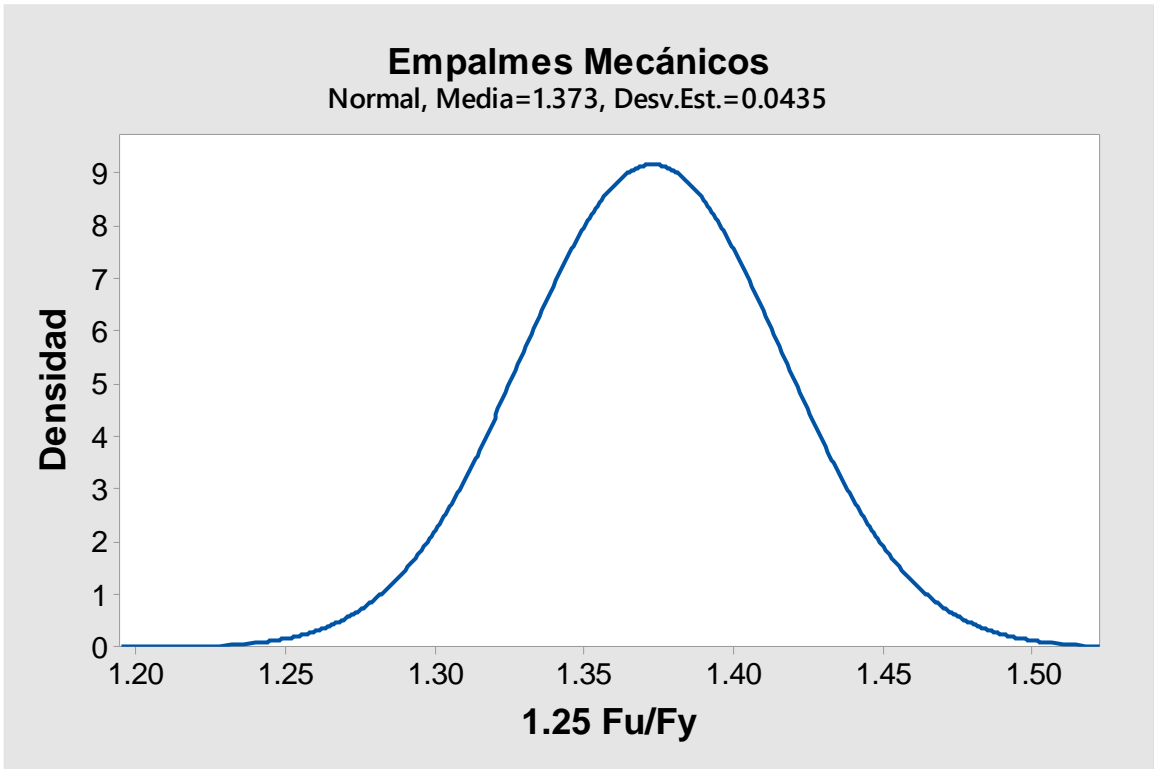
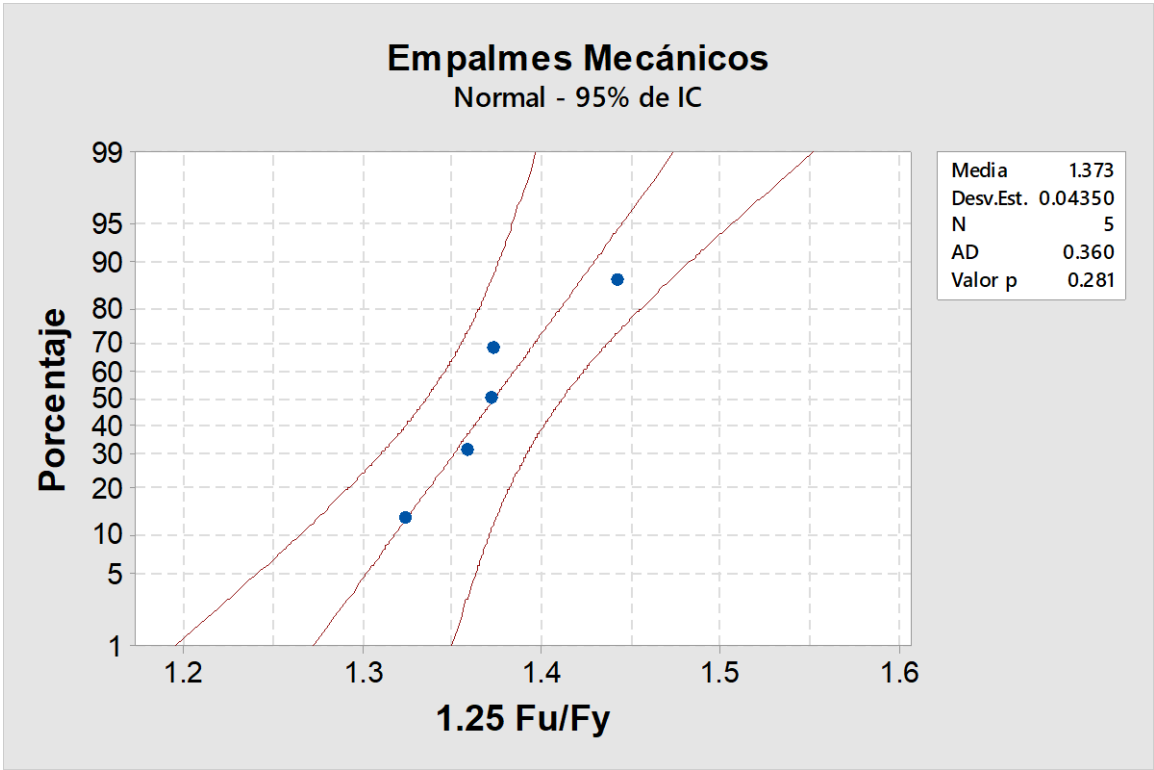


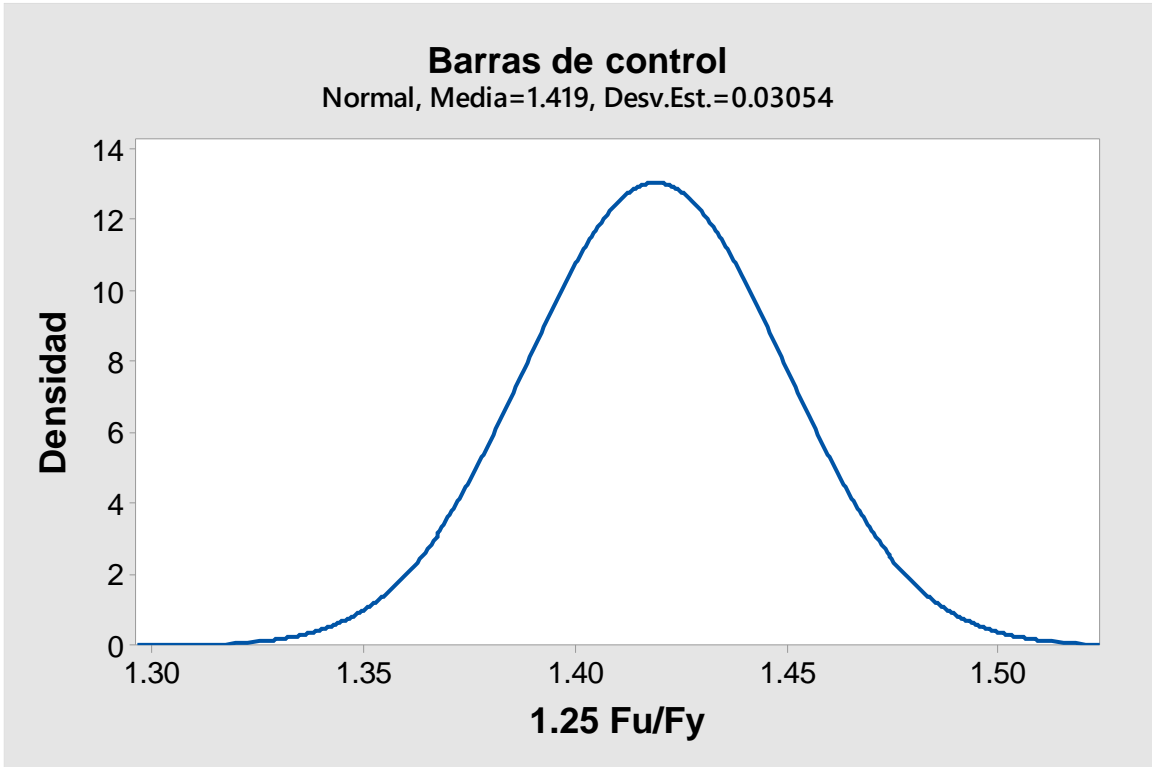
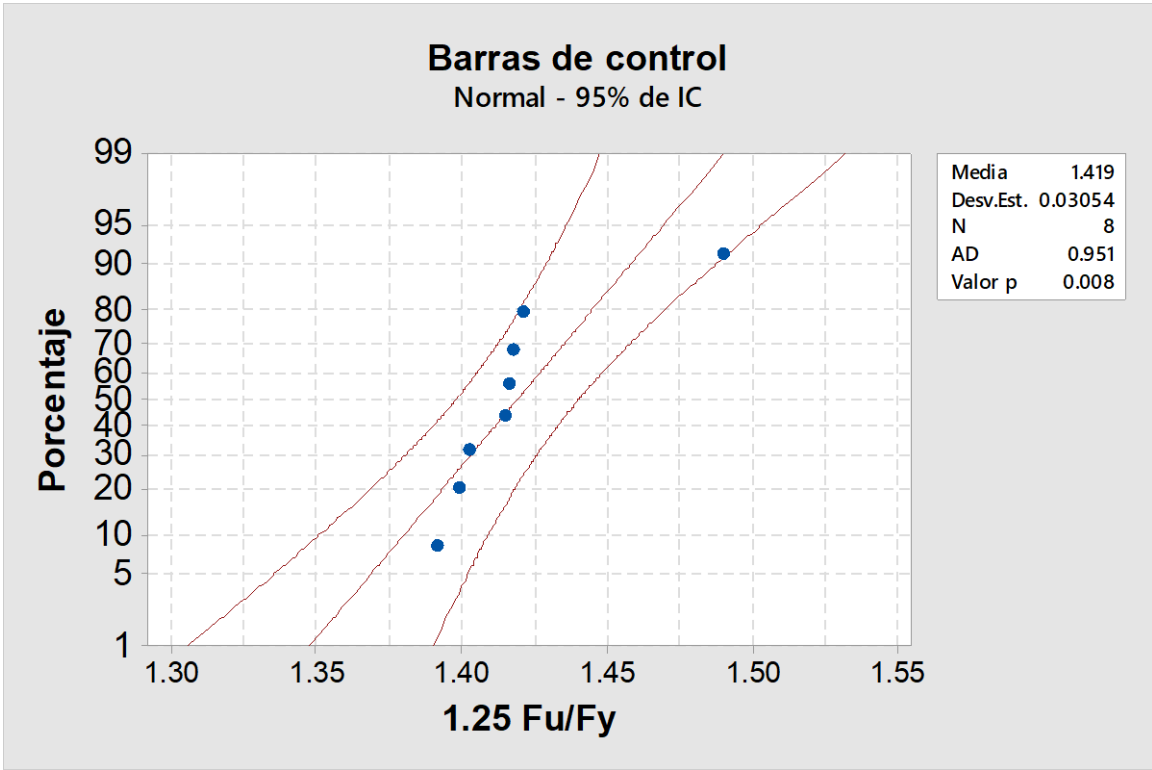












ANEXO 4
CÁLCULO DE MOMENTO NOMINAL
ELEMENTO TIPO VIGA

MATERIALES

Resistencia compresión concreto: $f_c := 28.2 \text{ MPa}$

Esfuerzo de fluencia promedio para refuerzo tomado de los ensayos a tracción

$$f_y := 478.1 \text{ MPa}$$

Diámetro refuerzo de estribos $de := 12.7 \text{ mm}$

Diámetro refuerzo a flexión $db := 19.1 \text{ mm}$

GEOMETRÍA

Altura de la viga $h := 35 \text{ cm}$

Base de la viga $b := 25 \text{ cm}$

Longitud de viga entre rodillos $L := 1.8 \text{ m}$

Recubrimiento inferior $r := 40 \text{ mm}$

CACULO TEÓRICO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN

Fibra extrema tracción a eje refuerzo a tracción

$$r' := r + \frac{db}{2} + de = 62.25 \text{ mm}$$

Altura efectiva de la viga

$$d := h - r' = 287.75 \text{ mm}$$

Refuerzo a flexión 2# 6

$$As := 284 \text{ mm}^2 \cdot 2 = 568 \text{ mm}^2$$

Cuantía

$$\rho := \frac{A_s}{b \cdot d} = 0.008$$

Momento de fluencia

$$M_n := \rho \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y}{1.7 f_c}\right) \cdot b \cdot d^2 = 71.988 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Momento último

$$M_u := \rho \cdot 1.25 f_y \cdot \left(1 - \frac{\rho \cdot 1.25 f_y}{1.7 f_c}\right) \cdot b \cdot d^2 = 88.063 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Carga de fluencia

$$P_f := \frac{4 \cdot M_n}{L} = 159.974 \text{ kN}$$

Carga última

$$P_u := \frac{4 \cdot M_u}{L} = 195.695 \text{ kN}$$

ANEXO 5
CÁLCULO DE DEFLEXIÓN DE
ELEMENTO TIPO VIGA

CALCULO DEFLEXIÓN

Longitud de la viga:

$$L := 2 \cdot m$$

Base de la viga:

$$b := 0.25 \cdot m$$

Altura de la viga:

$$h := 0.35 \cdot m$$

Altura efectiva de la viga:

$$d := 0.288 \cdot m$$

Centroide:

$$yt := \frac{h}{2} = 0.175 \cdot m$$

Resistencia a la compresión:

$$fc := 28.2 \cdot MPa$$

Refuerzo a flexión :

$$As := 284 \cdot mm^2 \cdot 2 = 568 \cdot mm^2$$

Carga de fluencia:

$$P := 160 \cdot kN$$

Módulo de elasticidad del concreto:

$$Ec := 3900 \cdot \sqrt{\frac{fc}{MPa}} \cdot MPa = (2.071 \cdot 10^4) \cdot MPa$$

Módulo de elasticidad del acero:

$$Es := 200000 \cdot MPa$$

Relación modular:

$$n := \frac{E_s}{E_c} = 9.657$$

Módulo de ruptura del concreto:

$$f_r := 0.62 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \text{ MPa} = 3.292 \text{ MPa}$$

Momento de inercia de la sección bruta:

$$I_g := \frac{b \cdot h^3}{12} = (8.932 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Momento actuante:

$$M_a := \frac{P \cdot L}{4} = 80 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Momento crítico de fisuración:

$$M_{cr} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 16.805 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Cálculo de factor B:

$$B := \frac{b}{n \cdot A_s} = 0.046 \frac{1}{\text{mm}}$$

Altura fibra neutra a compresión al eje neutro fisurado:

$$k_d := \frac{\sqrt{2 \cdot B \cdot d + 1} - 1}{B} = 0.093 \text{ m}$$

Inercia crítica de fisuración:

$$I_{cr} := \frac{b \cdot kd^3}{3} + n \cdot A_s \cdot (d - kd)^2 + (n - 1) \cdot A_s \cdot (kd - d)^2 = (4.633 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^4$$

Inercia efectiva:

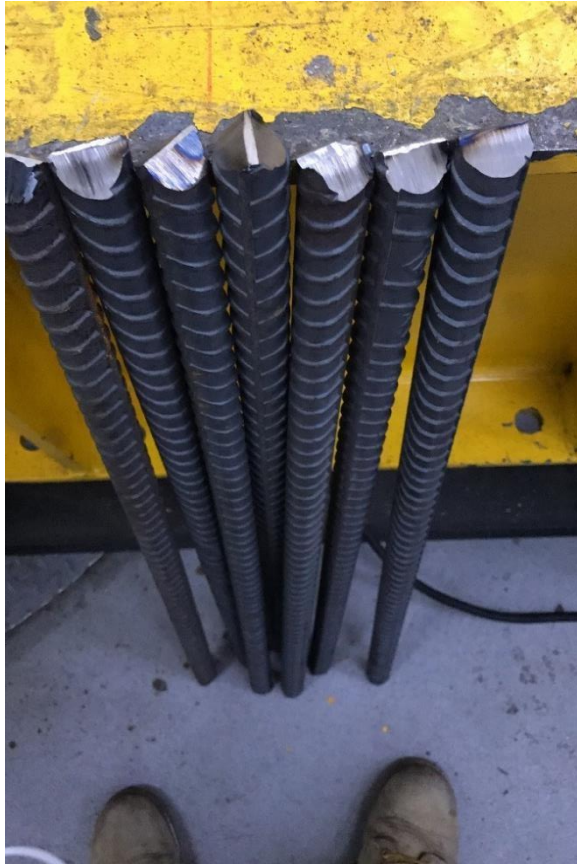
$$I_e := \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \cdot I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \cdot I_{cr} = (4.673 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Deflexión esperada:

$$\Delta := \frac{P \cdot L^3}{48 E_c \cdot I_e} = 2.755 \text{ mm}$$

ANEXO 6
REGISTRO FOTOGRÁFICO



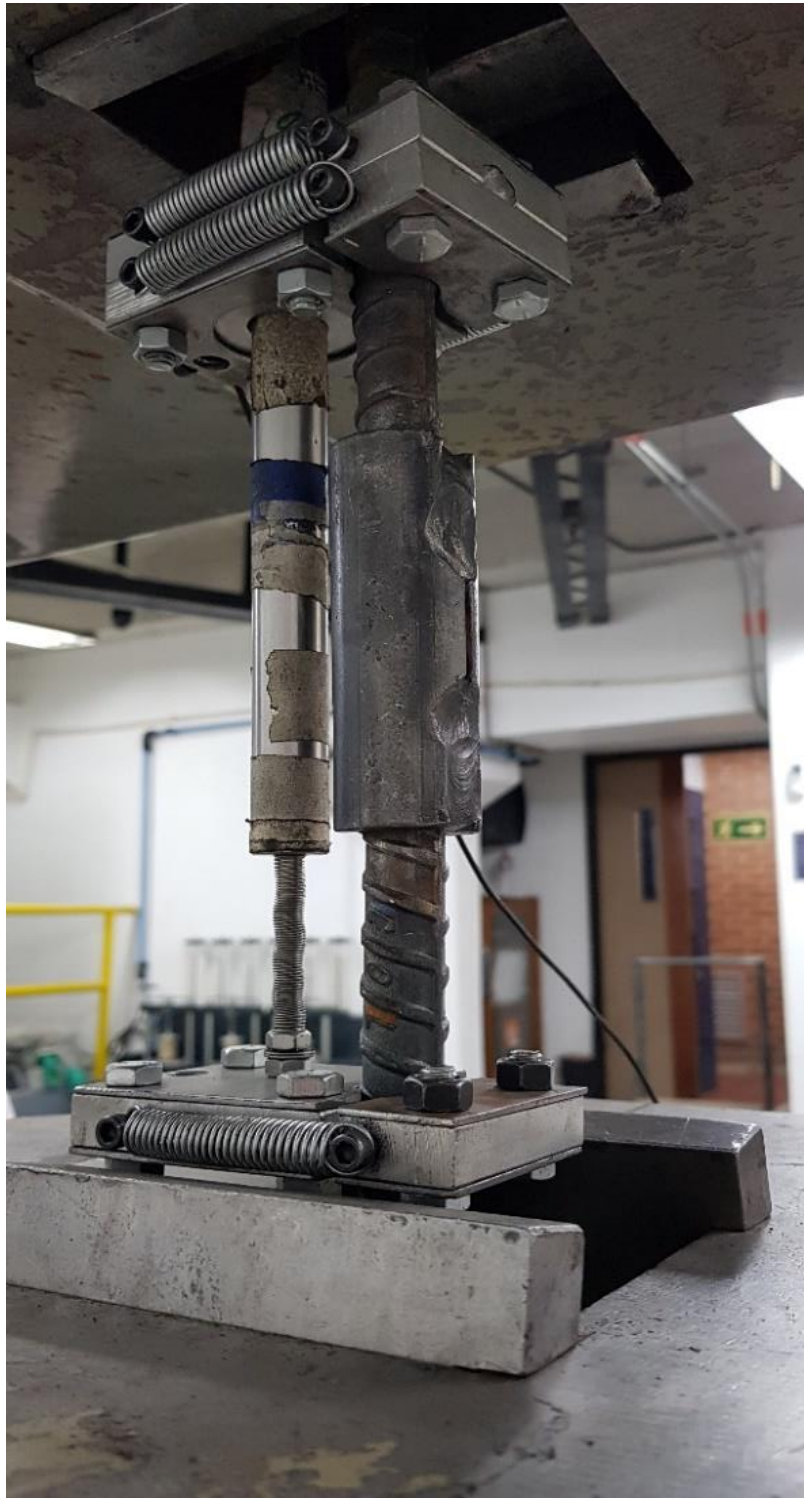
































ANEXO 7
CERTIFICADOS DE CALIDAD
DE MATERIALES



NIT 830.043.252-5

**DECLARACION DE CONFORMIDAD DE CALIDAD
BARRAS PARA REFUERZO DE CONCRETO**

NUESTRO ACERO SISMORESISTENTE CUMPLE CON LA NORMA TECNICA COLOMBIA NTC 2289



Decreto 1813 - 2012
Barras corrugadas
para refuerzo de
concreto

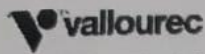


NTC 2289 - 2016
Barras corrugadas
para refuerzo de
concreto

No. **TOC-11098**

FECHA: DD/MM/AA
14/07/2018

CLIENTE					DESTINO					PEDIDO No.					REMISION No.									
DISHIERROS E.U.					BOGOTA					6672					7831									
					VEHICULO No.					FACTURA No.														
					SGB 024					44444														
PRODUCTO	LONGITUD (metros)	COLADA	PAQUETES	UNIDADES	ENSAYOS FISICOS			COMPOSICION QUIMICA % Max.										DIMENSIONES DE PROCESO						
					FLUENCIA (Mpa)	RESISTENCIA (Mpa)	ELONGACION en 200 mm	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Nb (%)	V (%)	CE (%)	PESO METRO (kg/m)	ALTURA RESALTE (mm)	ESPACIAMIENTO (mm)	ANCHO DE VENAS (mm)	
SISMO R - No. 6	12	20182182	5	1292	✓	478.0	680.0	15.50	0.30	1.23	0.012	0.037	0.26	0.14	0.09	0.13	0.03	0.03150	0.00	0.52	2.146	1.260	12.730	2.160
		20182168	6		✓	467.0	666.0	15.60	0.30	1.26	0.014	0.037	0.26	0.12	0.07	0.09	0.02	0.03170	0.00	0.52	2.156	1.300	12.730	2.210
		20182189	5		✓	469.0	663.0	14.70	0.30	1.28	0.018	0.034	0.26	0.15	0.07	0.11	0.02	0.03130	0.00	0.52	2.140	1.100	12.650	2.030
		20182188	1		✓	484.0	683.0	14.70	0.29	1.27	0.016	0.029	0.25	0.14	0.08	0.13	0.02	0.02980	0.00	0.53	2.154	1.150	12.650	2.270
ESPECIFICACIONES DE NORMA																								
SISMO R - No. 6					(420 - 540)	Min: 550	Min: 14	Max: 0.30	Max: 1.50	Max: 0.035	Max: 0.045	Max: 0.50							Max: 0.55	(2.100 - 2.235)	Min: 0.97	Max: 13.3	Max: 7.3	
OBSERVACIONES																								
ANALISIS DE COMPOSICION QUIMICA DE COLADA																								
CE: CARBONO EQUIVALENTE																								
"EL MATERIAL DESPACHADO SE ENCUENTRA LIBRE DE CONTAMINACION RADIATIVA-EXTRAPOLARIUM SRPM -210"																								
Enviado: dishierros_eu@hotmail.com; dishierroseu@yahoo.es																								
																				DIRECTOR GESTION Y CONTROL CALIDAD				
																				20/02/2016 Ver. 07 CCA-FOR-011				



Vallourec Tubos do Brasil S.A.
 BARREIRO PLANT - Belo Horizonte - MG - Brazil
 CEP: 30161-970 - PO BOX 1453



ISO 9001
 ISO 14001
 ISO/TS 16949
 ONVAS 10001
 BUREAU VERITAS
 Certification
 Nº 00000111 / 01/01/2008
 Nº 00000100 / 01/01/2008
 Nº 00000100 / 01/01/2008
 Nº 00000100 / 01/01/2008



Inspection Certificate 1st Sch 160
 (According to DIN EN 10204.3.1)
 N°.: 0030028645 Sheet: 1 / 2

Country: Colombia

Material Number: 389577
 Work Order: 351155 / 170
 Customer Order: 40.988

Inspection: Vallourec Tubos do Brasil S.A.

PRODUCT: SEAMLESS STEEL PIPE, HOT FINISHED , PLAIN ENDS , NORMALIZED
 DIMENSIONS: 33,40 mm X 6,40 mm GRADE: GR X42N # GR BN # GR B
 STANDARD: API SPEC 5L, 12.2012, 45TH EDITION - PSL 2
 IN ACCORDANCE ALSO TO THE STANDARDS: ASTM A 106M - 11 ASTM A 530M - 10 # ASTM A 53M - 12
 SURFACE PROTECTION: EXTERNAL: LACQUER PIPE ENDS PROTECTOR: NO PROTECTOR
 TOLERANCES: OUTSIDE DIAMETER (PIPE BODY): -0,400 mm / +0,400 mm WALL THICKNESS: -0,800 mm / +0,960 mm
 LENGTH: FIXED 6000,00 mm TOLERANCES: -100,00 mm \ +100,00 mm
 STANDARD MARKING: Paint stenciled in the pipe body: VMB API SPEC 5L ASTM A 53M/106M 33,40 X 6,40 X42N BN/B PSL2 SMLS HEAT NUMBER 20590 KPA NDE SCH 160 S
 SHIPPING MARKING: MADE IN BRAZIL * VALLOUREC * O/C 0192013 * COLOMBIA * NACE MR 01.75
 TOLERANCES(PIPE ENDS): OUTSIDE DIAMETER: -0,400 mm / +0,400 mm

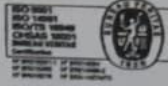
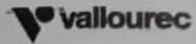
Heat	Pieces
126443	724
Total	724

THE PRODUCT IS SATISFACTORY IN THE FOLLOWING TESTS / INSPECTIONS: DIMENSIONAL # VISUAL # BENDING TEST # EDDY-CURRENT TEST ACC. E309 : EDDY-CURRENT ACC. ASTM E 309
 # HYDROSTATIC TEST: 20590,0 KPA 5 S # RESIDUAL MAGNETISM: MAX 30 GAUSS #

Chemical Composition (%)		Process: Basic Oxygen Furnace, heats fully killed																			
Req: C+Mn/5+(Cr+Mo+V)/5 +(Ni+Cu)/15		PCM: COMPLETE									CE1: Nb + V				CE2: Cr + Cu + Mo + Ni + V						
		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V	Nb	B	Ti	Ca	Ceq	Pcm	CE1	CE2	
Heat Analyses	Min		0,290			0,100															
	Max	0,220	1,200	0,025	0,015	0,400	0,300	0,300	0,150		0,300	0,060	0,050	0,0010	0,040		0,430	0,25	0,06	1,00	
Product Analyses	Min		0,290			0,100															
	Max	0,220	1,200	0,025	0,015	0,400	0,300	0,300	0,150		0,300	0,060	0,050	0,0010	0,040		0,430	0,25	0,06	1,00	
Heat	Control Lot																				
126443	030002319234	0,18	0,97	0,014	0,003	0,20	0,01	0,03	0,01	0,027	0,020	0,007	0,001	0,0001	0,001	0,0018	0,353	0,24	0,01	0,08	
	Check 1	0,19	0,97	0,014	0,003	0,21	0,01	0,03	0,01	0,030	0,015	0,008	0,001	0,0002	0,001	0,0020	0,360	0,24	0,01	0,08	
	Check 2	0,19	0,96	0,014	0,004	0,21	0,01	0,03	0,01	0,029	0,018	0,007	0,001	0,0002	0,001	0,0020	0,359	0,24	0,01	0,08	

Req: Carbon Equivalent; PCM: Parameter for crack mean; CE: Combined Elements;

Activar Windows
 Ir a Configuración de PC



Inspection Certificate
 (According to DIN EN 10204.3.1)
 N°.: 0030028645 Sheet: 2 / 2

Tensile Test

Specimen Direction

Temperature: Room Temperature

Type of Specimen

Gage Length: 1.0-2"

YS Method: 0.50 %

Required: Min
Max

Area (MM ²)	YS (MPA)	TS (MPA)	E (%)
	280	415	26
	495	655	

Heat	Control Lot
126443	030002319334

FULL SECTION

635,0	373	526	46
-------	-----	-----	----

YS-Yield Strength; TS-Tensile Strength; E-Elongation;

Hardness Test

Scale: HV

Required: Min
Max 248,0

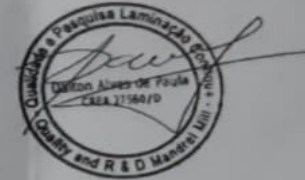
Heat	Control Lot
126443	030002319334

156,0

Remarks:

MATERIAL SEGÚN MR 0175/2003 DE LA NORMA NACE.

The data presented was converted from SI measurement system, used for the original inspection.



We hereby certify that this product has been manufactured and examined in accordance with all requirements of the standards and specifications and all the results are found to be satisfactory. This testimonial and certificate respectively is recorded by a computer system and is valid without signature. Alteration or use for others products are regarded as fabrication of documents and will be subject to criminal jurisdiction.

QUALITY CONTROL DEPARTMENT
 FAX: (55-31) 3328-1987

e-mail: hain.silva@vallourec.com

ENR. LEUZ FERREIRO DA SILVA
 TECHNICAL RESPONSIBLE

DATE
 12.11.2013

ECO TUBES: The tubes from Vallourec do Brasil S.A. are manufactured with steel which uses charcoal as a source of energy in its production. This steel comes from more than 100,000 ha of forest planted by Vallourec Florestal Ltda.. With the acquisition of 18,8 ton(s) of steel tubes from Vallourec do Brasil S.A., your company contributed to the reduction of the greenhouse effect, avoiding the accumulation of 33,8 ton(s) of Carbon Dioxide CO2 in the atmosphere.