



Comparación de determinación de propiedades mecánicas en barras de refuerzo para concreto con extensómetro axial convencional y extensómetro láser

Fecha de recepción: 12 de setiembre de 2013

Fecha de aceptación: 09 de octubre de 2013

Ing. Ana Monge Sandí, MSc.

Coordinadora del Laboratorio de Infraestructura Civil, LanammeUCR

Tel.: (506) 2511-2516 / E-mail: ana.mongesandí@ucr.ac.cr

Ing. Andrés Abarca Jiménez

Investigador de Laboratorios, LanammeUCR

Tel.: (506) 2511-4124 / E-mail: andres.abarcajimenez@ucr.ac.cr

Resumen

El presente artículo describe el proceso de ensayo y análisis de resultados de 40 barras de acero para refuerzo de concreto, las cuales fueron instrumentadas con un extensómetro axial convencional de puntas simultáneamente con un extensómetro láser con el fin de determinar estadísticamente la validez de los resultados obtenidos con el láser y posteriormente validar su utilización en la práctica normal del laboratorio para este tipo de ensayos. Los resultados encontrados determinan que el extensómetro láser registra diferentes valores en la determinación del módulo de elasticidad de las probetas pero no presenta diferencias significativas en la determinación de los valores de cumplimiento requerido por las normas ASTM para su uso en concreto.

Palabras clave: Extensómetro, láser, varilla, barras de refuerzo.

Abstract

The current article describes the testing process and analysis of 40 deformed steel bars for concrete reinforcement, which were instrumented with a conventional extensometer and a laser extensometer simultaneously. A statistical analysis was used to determine the accuracy of the measurements and data calculated from the laser extensometer's output information in comparison with that of the conventional extensometer. The observed behavior determines that the laser extensometer indicates different results when used to determine the elasticity modulus, however, it does not lead to significant differences for the determination of all the mechanical properties required by the ASTM standards A615 and A706.

Key words: Laser, extensometer, steel reinforcement, deformed bars.

1. Introducción

1.1. Importancia

Los extensómetros axiales convencionales de puntas se utilizan comúnmente en ensayos para medir deformaciones unitarias en especímenes de ensayo para determinar sus propiedades mecánicas, especialmente la curva de esfuerzo-deformación del material. Estos equipos se colocan en el espécimen de ensayo y mide el desplazamiento relativo entre dos puntos separados una distancia de control. Este contacto físico, sumado a la sensibilidad del equipo, implica que en la mayoría de las ocasiones el extensómetro se debe remover antes que el espécimen se fracture, por lo que no se obtiene el registro completo del comportamiento del material hasta la falla.

Debido a este faltante, han surgido en el mercado extensómetros láser que permiten que la toma de datos se realice mediante la medición del rebote de un haz de luz por lo que no existe contacto físico entre el aparato de medición y el espécimen, de tal manera que la adquisición de datos se realiza a lo largo de toda la prueba, registrando la variación en la separación de dos puntos fijos en el espécimen hasta la falla.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta investigación es implementar el funcionamiento del extensómetro láser adquirido por el LanammeUCR y determinar estadísticamente si existe diferencia significativa entre la medición de deformaciones unitarias en especímenes de acero de refuerzo para concreto mediante la instrumentación simultánea del extensómetro axial convencional de puntas y el extensómetro láser.

2. Descripción del Equipo

2.1 Extensómetro axial convencional de puntas

Se utiliza un extensómetro axial dinámico de puntas producido por la empresa MTS Systems Corporation modelo 634.25F-24, el cual posee una longitud de galga interna de 50 mm y se encuentra adecuada para llevar a cabo una medición dinámica en un rango de +25 mm (en tensión) y -5 mm (en compresión), con una precisión que excede los requisitos de la norma ASTM E83 Clase B1.

Con el fin de mantener una misma longitud de control dentro de los especímenes, se incluyó una adaptación al extensómetro para extender su brazo hasta 200 mm, de manera que se utilice la misma distancia con el láser como se muestra en la figura 1.

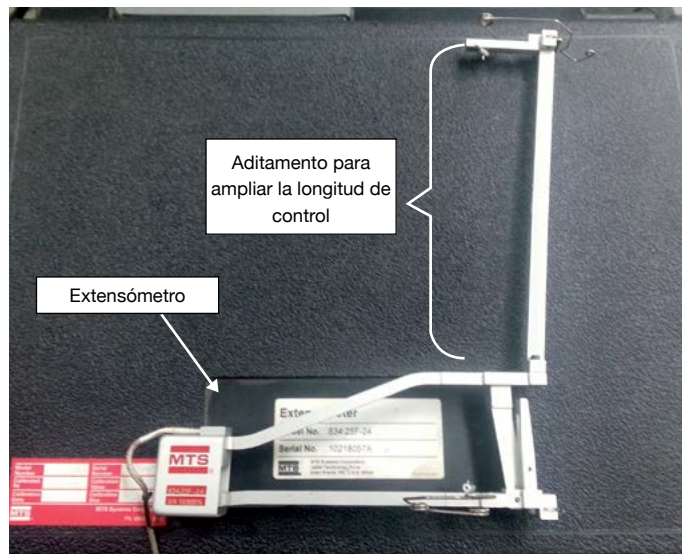


Figura 1: Extensómetro axial dinámico de puntas con extensión de galga modelo MTS – 634.25F-24, utilizado en las pruebas

2.2 Extensómetro láser

Se utiliza un extensómetro láser producido por la empresa MTS Systems Corporation modelo LX-1500, el cual posee una amplitud de medición de hasta 381 mm y una resolución de $\pm 0,01$ mm, lo cual cumple con los requisitos de la norma ASTM E83 Clase B1 (para mediciones de longitud de control de más de 25 mm). La longitud de control se define colocando dos cintas retro-reflectivas, que especifican los puntos de registro de desplazamiento por parte del láser.

Debido a la amplia gama de configuraciones posibles del laser (distancia al objetivo, tipo de medición, longitud de control, etc), se debe llevar a cabo inicialmente una validación de datos para determinar el arreglo de disposiciones a utilizar durante la medición para que se obtengan los registros deseados para las pruebas a realizar. Además se determina una posición adecuada para su ubicación de manera que se minimice el riesgo de daño a la vista del operario por el funcionamiento del laser.

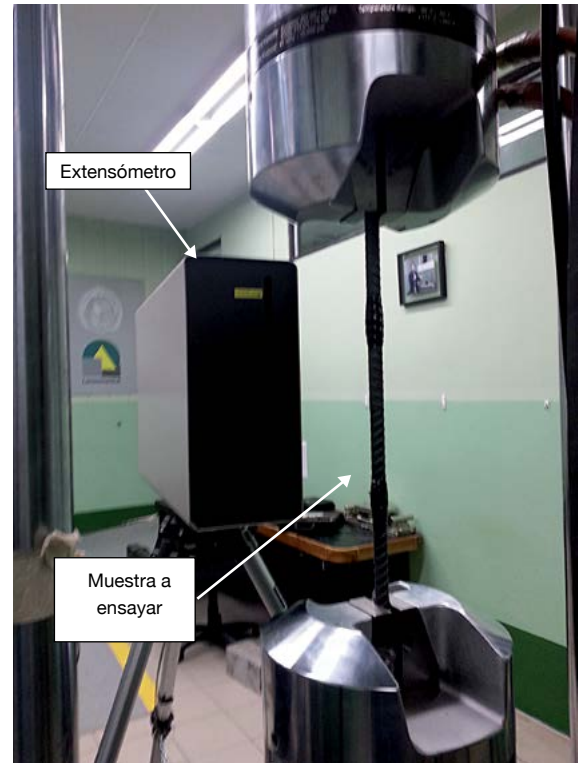


Figura 2: a) Panel posterior del extensómetro láser utilizado en la investigación. Modelo MTS - LX1500, b) Vista frontal de extensómetro alineado con muestra a ensayar.

3. Descripción de los Especímenes

Los especímenes ensayados constituyen cuatro muestras de 10 varillas de diferentes diámetros y grados de acero para refuerzo de concreto de diversos tipos comercialmente accesibles en el mercado nacional (total 40 especímenes).

La elección de esta población de muestra se lleva a cabo considerando que este tipo de varillas constituyen la mayor cantidad de los ensayos realizados actualmente por el Laboratorio de Metales y Materiales Alternativos del LanammeUCR, por lo cual su validación es de mayor utilidad.

Los datos nominales de las muestras se indican a continuación en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros nominales de especímenes ensayados

Muestra	Cantidad	Diámetro nominal	Norma ASTM	Grado
1745-13	10	9,5 mm (3/8")	A-615	40
1746-13	10	12,7 mm (4/8")	A-615	40
1747-13	10	15,9 mm (5/8")	A-615	60
1748-13	10	19,1 mm (6/8")	A-615	60

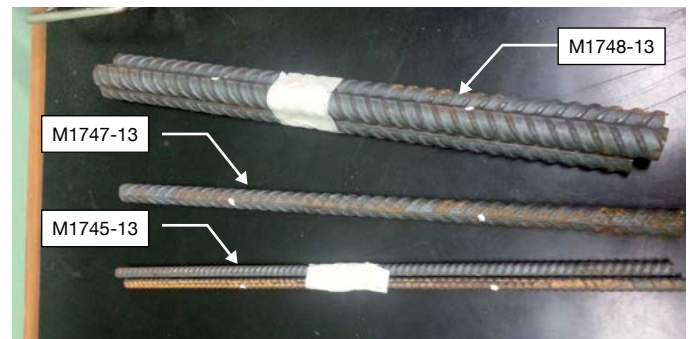


Figura 3: Ejemplo de especímenes ensayados (varillas de acero para refuerzo concreto)

4. Configuración de Ensayos e Instrumentación

Debido a los objetivos definidos para la presente investigación, se implementó inicialmente un sistema sencillo de adquisición de datos sin requerir de la falla de un espécimen para definir las configuraciones del extensómetro láser y verificar su funcionamiento. Posteriormente se replicó el sistema de instrumentación y adquisición para llevar a cabo los ensayos de los especímenes, los cuales

se fallaron según las indicaciones de la norma ASTM A370. Específicamente, se utilizó una velocidad de carga controlada por desplazamiento, considerando 2 mm/min para la primera etapa de carga hasta el punto de cedencia y posteriormente 20 mm/min hasta la falla.

La adquisición de datos en todos los casos se lleva a cabo mediante la aplicación simultánea del extensómetro axial convencional y el extensómetro láser en la misma longitud de control del espécimen. Para esto, las bandas de cintas retro-reflectivas se ubican aproximadamente en los mismos puntos de contacto del extensómetro convencional, tomando cuidado que los accesorios de adhesión no intervengan con el haz de luz del láser, como se muestra en la figura 4.

Tabla 2: Parámetros de configuración utilizados en láser

Parámetro	Valor utilizado	Descripción
Unidades	mm	Unidades para tomar los registros
Salida análoga	200 mm - 10 V	Longitud de control (sólo para aplicaciones donde se requiera una retroalimentación de deformación unitaria)
Distancia al objetivo	381 mm	Distancia entre el panel frontal y la cara del espécimen
Datos promediados	16	Define la cantidad de datos sobre los cuales se calcula el promedio de elongación
Tipo de medición	T1 - T2	Distancia entre las dos cintas retro-reflectivas

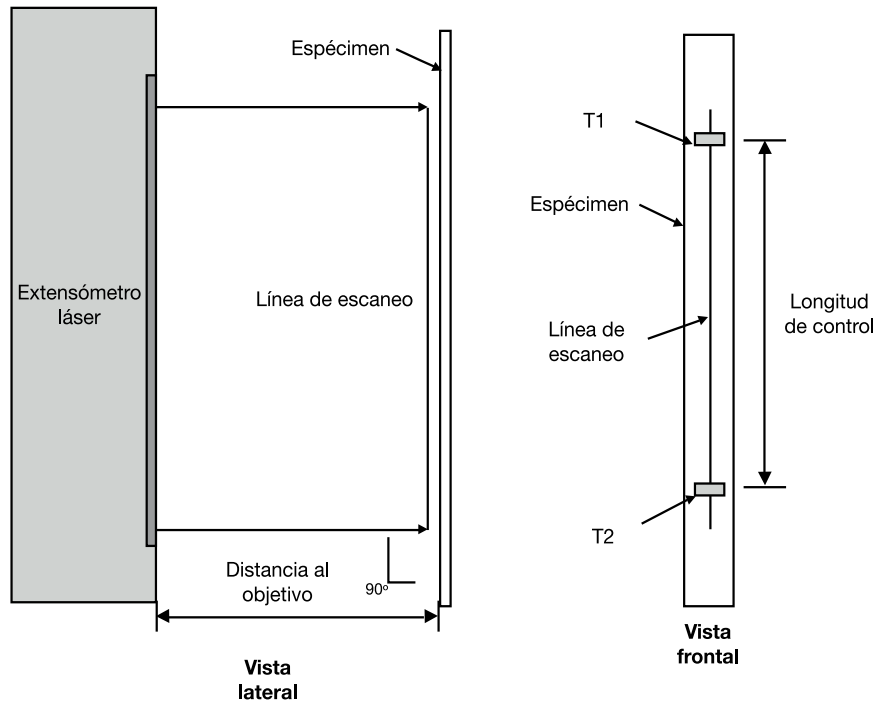


Figura 4: Esquema de montaje de extensómetro láser

Específicamente, se tomaron registros a cada 0.5 segundos donde se obtiene información de carga total aplicada, deformación unitaria medida con la galga axial convencional, la medición del desplazamiento entre las cintas retro-reflectivas y el desplazamiento total entre cabezas.

Debido a la limitación física del extensómetro axial convencional, se obtienen datos de deformación con el mismo hasta un valor de deformación unitaria de 0,1 mm/mm y posteriormente se remueve para evitar que se dañe durante el proceso de falla.

Inicialmente para la implementación y determinación de configuraciones se plantea la aplicación de un desplazamiento dinámico de velocidad y amplitud controlado por la máquina universal, se toman registros de cada uno de los instrumentos de medición adecuados para el ensayo (con una frecuencia de medición de 0,2 segundos para este ejercicio), con el fin de llevar a cabo una correlación de los valores y evaluar su efectividad en un estado sin la aplicación de carga.

Los parámetros utilizados en el extensómetro láser se indican en la tabla 2 y se presenta un esquema de los parámetros en la figura 4.

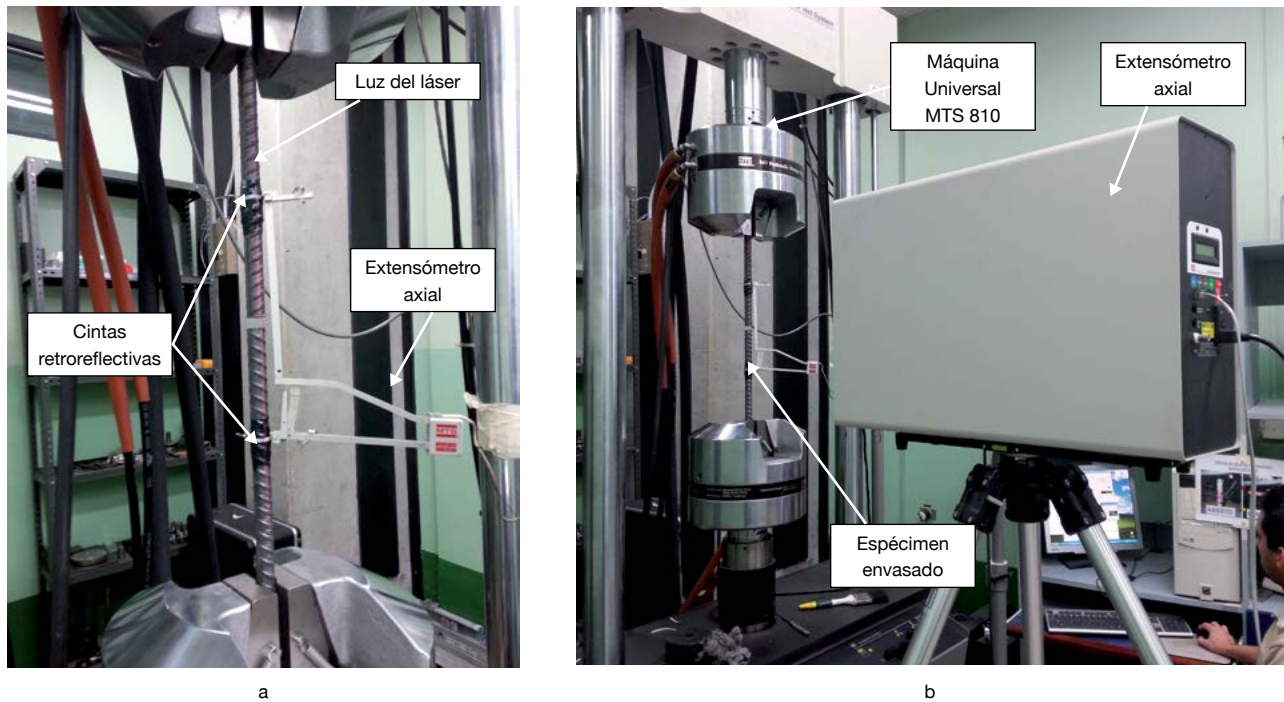


Figura 5: a) Instrumentación simultánea sobre espécimen, b) Configuración de sistema adquisición

5. Resultados

5.1 Implementación y Configuración Láser

Se observa preliminarmente que las mediciones del láser son sensibles a las variaciones de la velocidad del ensayo, debido a un proceso interno de procesamiento de datos en

los cuales varios datos son promediados. Esto genera un desfase en las mediciones.

A partir de la utilización de la configuración indicada anteriormente, se obtienen los resultados observados en las figuras 6 y 7.

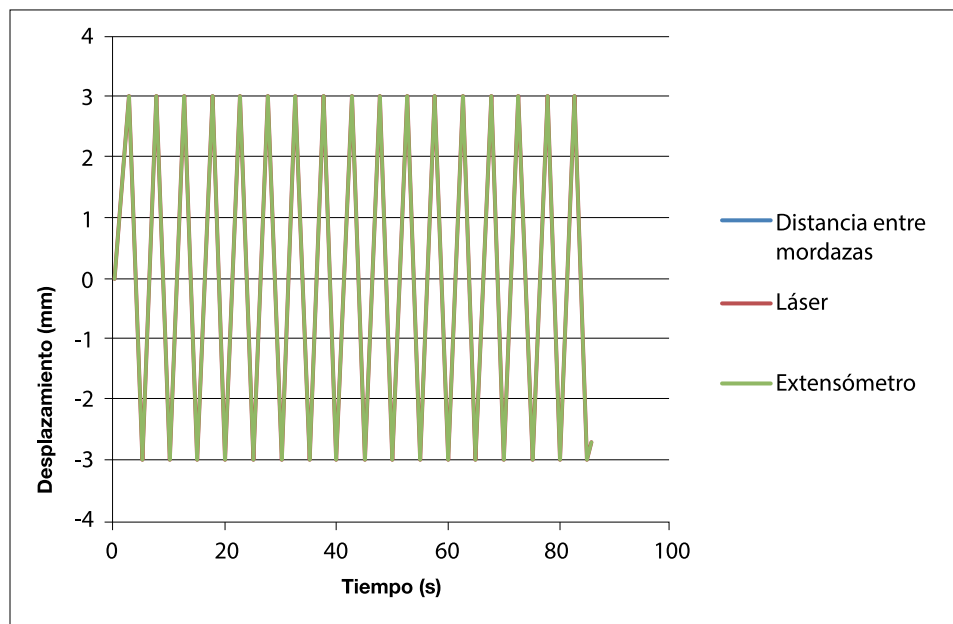


Figura 6: Gráfico de medición de deformaciones con respecto al tiempo

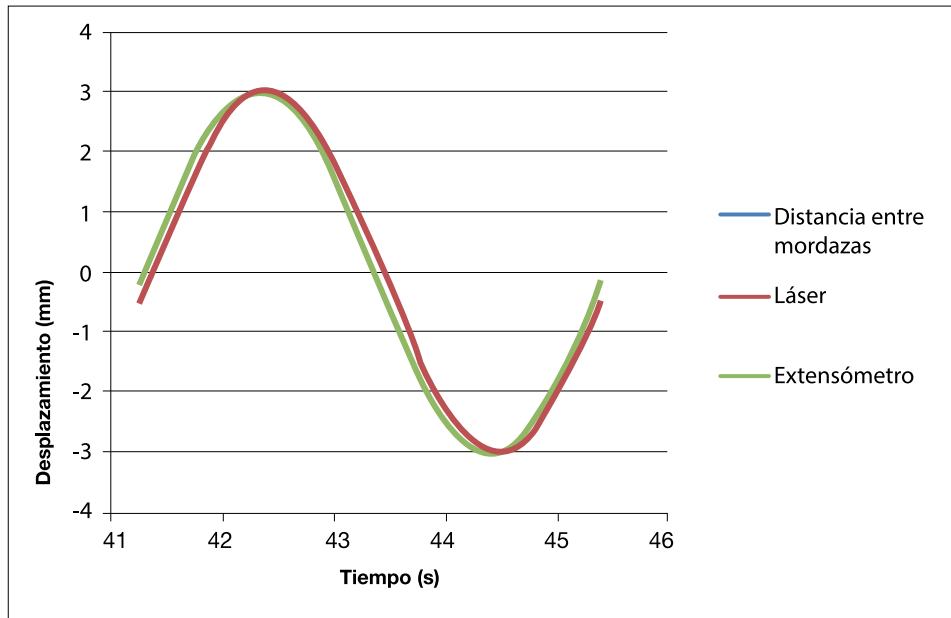


Figura 7: Gráfico de detalle de onda típica de medición de deformaciones con respecto al tiempo

5.2 Propiedades de Barras de Refuerzo

5.2.1 Gráficos esfuerzo-deformación

A partir de la generación de las gráficas de esfuerzo-deformación de los registros simultáneos de extensómetro axial, así como extensómetro láser se observan resultados como los mostrados en la figura 8. Cabe destacar que algunos de los registros tuvieron que ser corregidos debido a un deslizamiento del extensómetro axial durante la prueba.

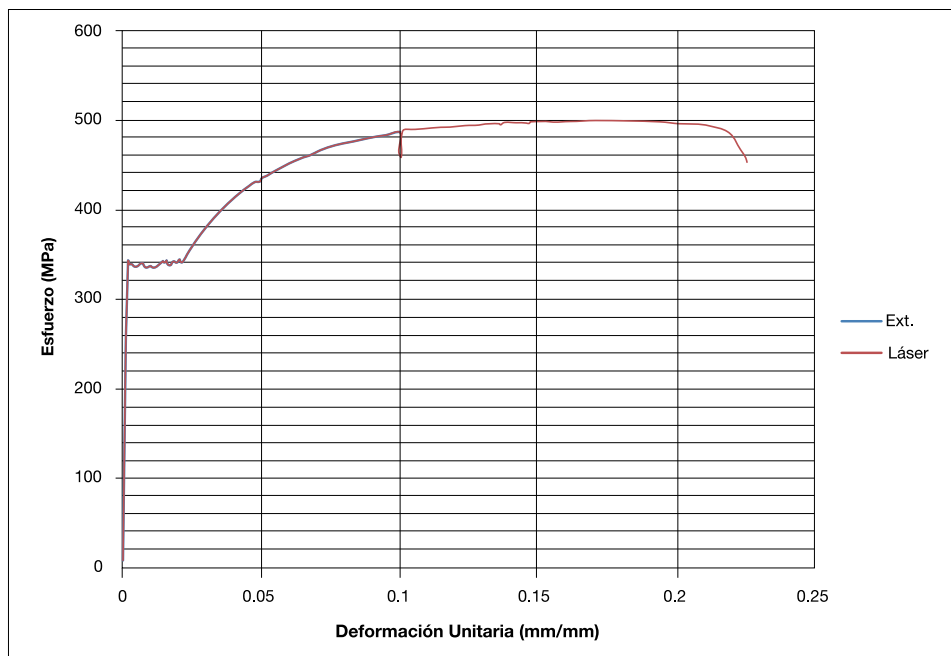


Figura 8: Gráfico típico de esfuerzo-deformación para probetas ensayadas. (mostrada M1745-10)

5.2.2 Esfuerzos de cedencia y máximo

Siguiendo las indicaciones de la norma ASTM A370, se determina el punto de cedencia fácilmente debido a la presencia de una plataforma de fluencia en los datos obtenidos, lo cual permite que se defina el esfuerzo de cedencia al promedio de carga en esta plataforma dividido entre el área nominal del espécimen. Por otro lado, se toma el valor de esfuerzo máximo como el mayor valor de fuerza registrado por la máquina universal durante la prueba dividido entre el área nominal del espécimen.

Tabla 3: Resultados de esfuerzos de cedencia y máximos para varillas # 3

Varilla	Ensayo	F _y (MPa)	F _{máx} (MPa)
1745 (#3)	1	374,56	538,92
	2	324,42	489,63
	3	359,49	526,55
	4	340,13	505,81
	5	351,92	517,52
	6	344,92	509,98
	7	423,23	590,28
	8	341,40	506,90
	9	376,97	544,24
	10	334,56	499,41
	11	338,28	501,70
Promedio (MPa)		355,44	520,99
D.E. (MPa)		27,73	28,42

Nota:

F_y: Esfuerzo de cedencia

F_{máx}: Esfuerzo máximo

D.E.: Desviación estándar

Tabla 5: Resultados de esfuerzos de cedencia y máximos para varillas # 5

Varilla	Ensayo	F _y (MPa)	F _{máx} (MPa)
1747 (#5)	1	422,70	680,88
	2	395,83	657,00
	3	396,28	659,50
	4	407,15	669,51
	5	354,80	617,34
	7	380,57	639,49
	8	394,82	653,69
	9	403,62	663,99
	10	390,74	651,35
	Promedio (MPa)		394,06
D.E. (MPa)		18,79	18,23

Cabe resaltar que debido a que el comportamiento de las muestras es cualitativamente el mismo registrado por el extensómetro convencional y el extensómetro láser, y además debido a la presencia de una zona de fluencia claramente definida, no existe diferencia alguna entre los valores determinados con ambos instrumentos por lo que únicamente se reporta un valor por cada muestra.

Los resultados para todos los especímenes se muestran en las tablas 3 a 6.

Tabla 4: Resultados de esfuerzos de cedencia y máximos para varillas # 4

Varilla	Ensayo	F _y (MPa)	F _{máx} (MPa)	
1746 (#4)	3	315,41	488,94	
	4	327,15	502,95	
	5	332,99	504,28	
	6	335,85	506,27	
	7	332,03	505,12	
	8	357,57	527,25	
	9	338,57	512,50	
	10	326,78	497,28	
	12	322,86	496,60	
	13	345,59	514,52	
	Promedio (MPa)		333,48	505,57
	D.E. (MPa)		11,95	10,71

Tabla 6: Resultados de esfuerzos de cedencia y máximos para varillas # 6

Varilla	Ensayo	F _y (MPa)	F _{máx} (MPa)
1748 (#6)	1	460,10	728,87
	2	457,25	728,90
	3	460,35	728,49
	4	461,29	735,43
	5	458,43	730,45
	6	460,67	731,01
	7	460,70	732,81
	8	458,48	733,24
	9	463,64	732,78
	10	457,69	730,20
Promedio (MPa)		459,86	731,22
D.E. (MPa)		1,93	2,28

5.2.3 Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad se determina simultáneamente para los datos del extensómetro axial convencional como para el extensómetro láser, y se calcula como la pendiente de la recta de tendencia generada a partir de los datos ubicados entre un 10% y un 40% del valor determinado de cedencia. La figura 9 muestra un ejemplo de la determinación de este parámetro.

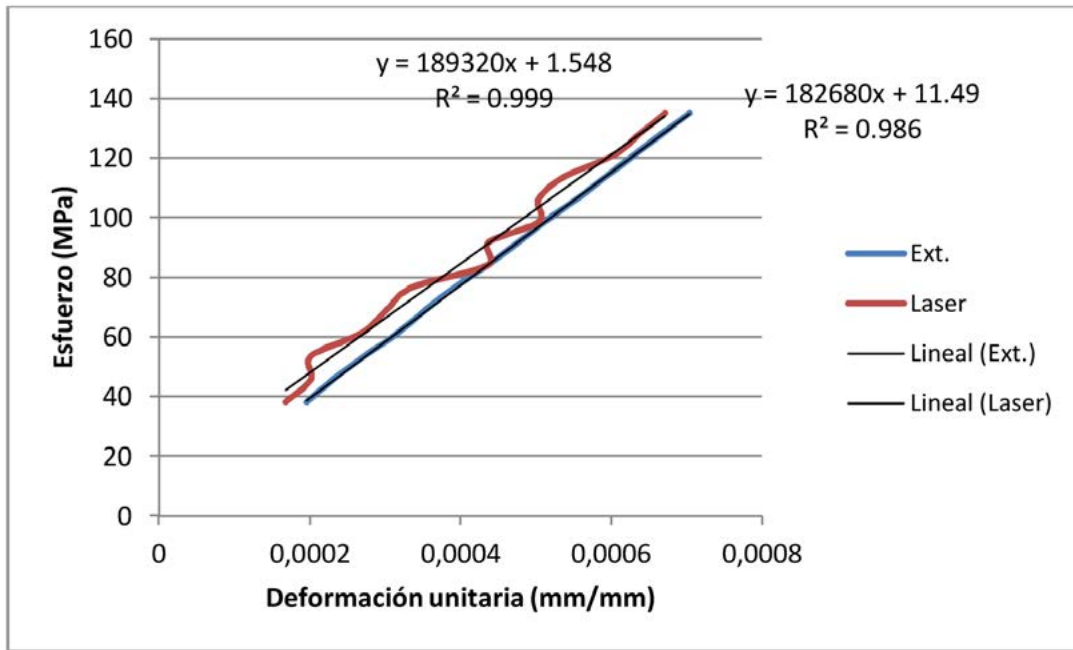


Figura 9: Ejemplo de determinación de módulo de elasticidad (mostrado M1746-9)

Las tablas 7 a 10 que se muestran a continuación, muestran los resultados de la determinación del módulo de elasticidad para cada espécimen.

Tabla 7: Resultados de módulo de elasticidad para varillas # 3

Varilla	Ensayo	E (GPa)	
		Ext.	Láser
1745 (# 3)	1	183,30	205,60
	2	195,34	153,55
	3	187,43	226,04
	4	190,53	187,28
	5	198,56	187,47
	6	189,08	194,33
	7	*	205,54
	8	198,06	190,56
	9	*	233,33
	10	198,10	207,04
	11	198,87	183,71
Promedio (GPa)		193,25	197,68
D.E. (MPa)		5,79	21,69

(*) No se calcula por errores en la medición del extensómetro

Tabla 8: Resultados de módulo de elasticidad para varillas # 4

Varilla	Ensayo	E (GPa)	
		Ext.	Láser
1746 (#4)	3	186,61	188,07
	4	190,51	176,66
	5	189,37	185,48
	6	191,94	166,33
	7	193,63	136,40
	8	189,77	167,37
	9	189,33	182,68
	10	189,40	167,46
	12	180,92	189,67
	13	190,03	166,64
	Promedio (GPa)		189,15
D.E. (MPa)		3,42	15,82

Tabla 9: Resultados de módulo de elasticidad para varillas # 5

Varilla	Ensayo	E (GPa)	
		Ext.	Láser
1747 (# 5)	1	193,86	191,85
	2	200,09	209,84
	3	201,06	173,10
	4	198,35	215,03
	5	165,73	188,95
	7	163,04	191,62
	8	190,04	221,44
	9	191,17	247,75
	10	183,31	220,08
	Promedio (GPa)		190,74
D.E. (MPa)		11,78	22,51

Tabla 10: Resultados de módulo de elasticidad para varillas # 6

Varilla	Ensayo	E (GPa)	
		Ext.	Láser
1748 (#6)	1	190,36	178,27
	2	194,46	182,02
	3	230,23	206,49
	4	201,39	211,57
	5	152,05	194,77
	6	195,82	204,75
	7	202,46	216,81
	8	204,77	194,53
	9	194,92	214,50
	10	198,96	209,68
Promedio (GPa)		196,54	201,34
D.E. (MPa)		19,12	13,42

5.2.4 Deformación unitaria de cedencia

La deformación de cedencia se determina bajo dos criterios (directa e indirectamente), para cada uno de los registros tomados con el extensómetro axial y con el extensómetro láser.

El valor de deformación de cedencia calculada se determina a partir de los datos de módulo de elasticidad y de esfuerzo de cedencia, previamente encontrados con los registros del

extensómetro axial convencional y del extensómetro láser, con la siguiente ecuación:

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad [1]$$

Por otro lado, el valor de cedencia determinado directamente se toma como el valor de deformación unitaria donde se genera un máximo de esfuerzo justo antes de que se presente la plataforma de cedencia tal y como se muestra en la figura 10.

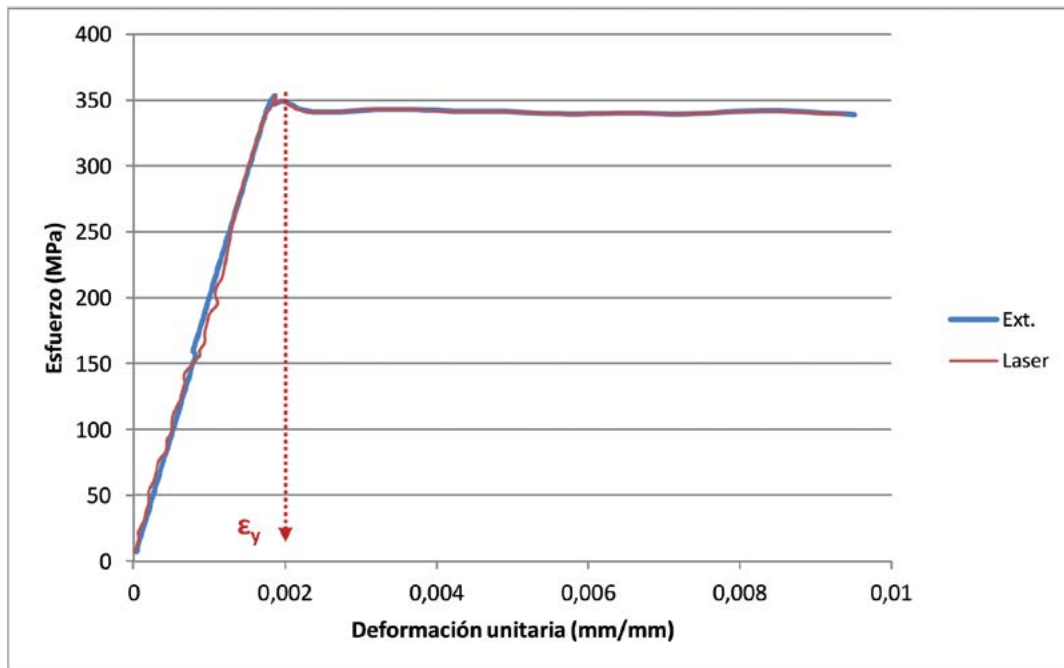


Figura 10: Ejemplo de determinación directa de deformación unitaria de cedencia (mostrada M1745-6)

Las Tablas 11 a 14 que se muestra a continuación, muestran los resultados de la determinación de la deformación unitaria de cedencia calculadas, mientras que en las tablas 15 a 19 se muestran los valores determinados directamente de la lectura de la gráfica.

Tabla 11: Resultados de deformación unitaria de cedencia calculada para varillas # 3

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)	
		Ext.	Láser
1745 (#3)	1	0,19	0,19
	2	0,16	0,19
	3	0,18	0,19
	4	0,18	0,19
	5	0,18	0,19
	6	0,18	0,19
	7	*	0,22
	8	0,18	0,19
	9	*	0,21
	10	0,17	0,17
	11	0,18	0,18
Promedio (%)		0,18	0,19
D.E. (%)		0,01	0,01

(*) No se calcula por errores en la medición del extensómetro

Tabla 12: Resultados de deformación unitaria de cedencia calculada para varillas # 4

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)	
		Ext.	Láser
1746 (#4)	3	0,17	0,19
	4	0,17	0,20
	5	0,18	0,17
	6	0,18	0,20
	7	0,17	0,19
	8	0,19	0,20
	9	0,16	0,21
	10	0,17	0,18
	12	0,17	0,18
	13	0,18	0,18
	Promedio (%)		0,17
D.E. (%)		0,01	0,01

Tabla 13: Resultados de deformación unitaria de cedencia calculada para varillas # 5

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)	
		Ext.	Láser
1747 (#5)	1	0,22	0,22
	2	0,20	0,18
	3	0,17	0,23
	4	0,21	0,25
	5	0,18	0,17
	7	0,22	0,19
	8	0,20	0,20
	9	0,19	0,18
	10	0,20	0,20
	Promedio (%)		0,20
Desviación (%)		0,02	0,03

Tabla 14: Resultados de deformación unitaria de cedencia calculada para varillas # 6

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)	
		Ext.	Láser
1748 (#6)	1	0,24	0,22
	2	0,23	0,23
	3	0,23	0,25
	4	0,27	0,23
	5	0,23	0,22
	6	0,24	0,22
	7	0,22	0,20
	8	0,25	0,24
	9	0,24	0,21
	10	0,23	0,22
Promedio (%)		0,24	0,22
D.E. (%)		0,01	0,01

Tabla 15: Resultados de deformación unitaria de cedencia de gráfica para varillas # 3

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)	
		Ext.	Láser
1745 (#3)	1	0,21	0,21
	2	0,18	0,19
	3	0,19	0,19
	4	0,18	0,19
	5	0,19	0,19
	6	0,19	0,20
	7	*	0,23
	8	0,18	0,19
	9	*	0,21
	10	0,18	0,18
	11	0,18	0,18
Promedio (%)		0,19	0,20
Desviación (%)		0,01	0,02

(*) No se calcula por errores en la medición del extensómetro

Tabla 17: Resultados de deformación unitaria de cedencia de gráfica para varillas # 5

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)	
		Ext.	Láser
1747 (#5)	1	0,23	0,21
	2	0,21	0,20
	3	0,21	0,21
	4	0,25	0,22
	5	0,22	0,17
	7	0,21	0,20
	8	0,21	0,21
	9	0,17	0,22
	10	0,18	0,20
	Promedio (%)		0,21
D.E. (%)		0,03	0,02

Tabla 16: Resultados de deformación unitaria de cedencia de gráfica para varillas # 4

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)		
		Ext.	Láser	
1746 (#4)	3	0,15	0,18	
	4	0,22	0,23	
	5	0,18	0,18	
	6	0,18	0,17	
	7	0,16	0,21	
	8	0,18	0,20	
	9	0,19	0,19	
	10	0,18	0,18	
	12	0,19	0,18	
	13	0,18	0,16	
	Promedio (%)		0,18	0,19
	D.E. (%)		0,02	0,02

Tabla 18: Resultados de deformación unitaria de cedencia de gráfica para varillas # 6

Varilla	Ensayo	ϵ_y (%)	
		Ext.	Láser
1748 (#6)	1	0,24	0,24
	2	0,19	0,23
	3	0,24	0,25
	4	0,26	0,23
	5	0,27	0,23
	6	0,27	0,23
	7	*	0,23
	8	0,25	0,24
	9	0,19	0,23
	10	0,23	0,22
Promedio (%)		0,24	0,23
D.E. (%)		0,03	0,01

(*) No se calcula por errores en la medición del extensómetro

5.2.5 Deformación unitaria última

Debido a que el rango de medición del extensómetro axial convencional se remueve antes de que se presente la falla del espécimen, no hay un valor de deformación unitaria última que se pueda asignar a estos registros. Sin embargo, la norma ASTM A370 indica que se utilice una medición directa a partir de la unión de las dos porciones del espécimen posterior a su falla y determinar la elongación total medida en la longitud de control como se muestra en

la figura 11. Por otro lado, el extensómetro láser posee un rango completo de medición por lo que la elongación total se determina directamente de la última medición registrada previa a la falla (ver figura 8).

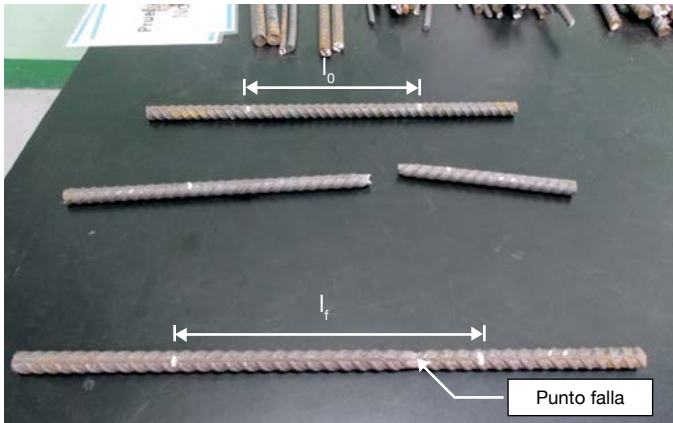


Figura 11: Ejemplo de determinación de deformación unitaria última mediante la unión de ambas partes del espécimen fallado

Las tablas 19 a 22 que se muestra a continuación, muestran los resultados de la determinación de la deformación unitaria última para cada espécimen.

$$\epsilon_u = \frac{l_f - l_0}{l_0} * 100 (\%) \quad [2]$$

Tabla 19: Resultados de deformación unitaria última para varillas # 3

Varilla	Ensayo	ϵ_u (%)	
		Medida	Láser
1745 (#3)	1	21	21
	2	24	24
	3	22	23
	4	22	23
	5	21	21
	6	19	20
	7	22	23
	8	23	23
	9	21	22
	10	23	23
	11	22	21
Promedio (%)		22	22
D.E. (%)		1,28	1,23

Tabla 20: Resultados de deformación unitaria última para varillas # 4

Varilla	Ensayo	ϵ_u (%)		
		Medida	Láser	
1746 (#4)	3	23	23	
	4	22	22	
	5	23	23	
	6	24	24	
	7	22	23	
	8	23	23	
	9	23	23	
	10	23	23	
	12	23	23	
	13	22	22	
	Promedio (%)		23	23
	D.E. (%)		0,70	0,69

Tabla 21: Resultados de deformación unitaria última para varillas # 5

Varilla	Ensayo	ϵ_u (%)	
		Medida	Láser
1747 (#5)	1	18	18
	2	18	18
	3	17	18
	4	16	17
	5	18	19
	7	19	20
	8	17	18
	9	18	19
	10	17	17
	Promedio (%)		18
D.E. (%)		0,85	0,97

Tabla 22: Resultados de deformación unitaria última para varillas # 6

Varilla	Ensayo	ϵ_u (%)	
		Medida	Láser
1748 (#6)	1	14	14
	2	14	14
	3	14	14
	4	15	15
	5	14	14
	6	15	14
	7	14	14
	8	14	13
	9	14	14
	10	14	14
Promedio (%)		14	14
D.E. (%)		0,43	0,48

6. Análisis de Resultados

6.1 Implementación y Configuración Láser

Como se puede observar en la figura 5, el comportamiento registrado por el extensómetro láser es idéntico al que se presenta con los datos del extensómetro convencional para el movimiento dinámico sin carga, al cual se sometió la medición en términos de amplitud y frecuencia. Sin embargo, como se observa en la figura 8, existe un desfase en el registro del láser que demostró agravarse cuando se aumenta la cantidad de datos a promediar y la velocidad de movimiento.

Para el caso específico del movimiento sometido (velocidad de desplazamiento de 2,4 mm/segundo), se obtuvo un desfase de medición de 0,1 segundos, lo cual representa el 50% del valor típico de adquisición de datos de 0,2 segundos que se utiliza normalmente en los ensayos. A partir de estos resultados se incurre que, a pesar que este desfase podría implicar un problema en la medición de registros dinámicos de altas velocidades, dado que su valor se encuentra adecuadamente por debajo de la frecuencia de medición de ensayos típicos (como el llevado a cabo para tensión de varillas), no se considera que se genere ningún error en el registro de deformaciones para este tipo de pruebas.

6.2 Propiedades de Barras de Refuerzo

6.2.1 Curvas esfuerzo-deformación

Inicialmente se compara el comportamiento general de las muestras ensayadas bajo los registros del extensómetro axial convencional y el extensómetro láser, para lo cual se observa que cualitativamente poseen las mismas tendencias al ser graficadas simultáneamente.

Cada una de las muestras ensayadas (con excepción de casos puntuales donde el extensómetro convencional presentó un deslizamiento), presenta un comportamiento de acero de refuerzo dúctil típico de probetas de la norma ASTM A615, el cual posee un incremento lineal elástico, seguido de una plataforma de cedencia claramente definida, el posterior endurecimiento y la falla del espécimen.

Se determina que a pesar de que la gran cantidad de puntos contenidos en los registros generan diferencias entre las lecturas en puntos específicos, los mismos son únicamente distinguibles ante la revisión sobre una escala muy ampliada de los gráficos, por lo que el comportamiento cualitativo de los materiales demostrado para ambos extensómetros es esencialmente el mismo.

6.2.2 Esfuerzos de cedencia y máximo

Como se comenta en la sección de resultados, debido a que las probetas muestreadas presentaron fluencia mediante un quiebre agudo y una plataforma elástica claramente definida, lo cual se observa en los registros de extensómetro axial convencional y láser, los valores relacionados con la determinación de esfuerzos estuvieron determinados por las mismas mediciones registradas por la celda de carga, por lo que no hay valores distintos de esfuerzos de cedencia y máximo, y por lo tanto no se realiza análisis estadístico para estas propiedades.

Cabe resaltar que esta situación se repetirá siempre que se ensayen materiales que presenten este comportamiento de punto de fluencia definido, por lo que los valores obtenidos mediante la utilización del extensómetro láser siempre serán válidos para este tipo de materiales. Esta observación es de suma importancia puesto que ambos valores (cedencia y máximo) representan criterios de aceptación o rechazo según la especificación ASTM A615, con la cual se evaluarían los resultados obtenidos en estos ensayos.

6.2.3 Módulo de Elasticidad

Como se observa en la figura 8, a pesar de que el comportamiento general de los datos registrados por el extensómetro axial convencional y el extensómetro láser poseen las mismas tendencias a nivel global, cuando se lleva a cabo un análisis específico de un tramo de las curvas (para este caso entre 10%-40% de σ_y), se observan diferencias que incurren en la determinación de valores distintos para parámetros que dependan de las mediciones de deformación unitaria.

Con el fin de determinar si existe una diferencia significativa entre los valores, se llevó a cabo un análisis estadístico de varianza de un grado de libertad, aplicando el siguiente procedimiento general:

- Se identifica el parámetro de interés como el valor del módulo de elasticidad E (un solo factor estadístico) calculado según los datos del extensómetro convencional y el láser (dos muestras estadísticas).

- Se establece la hipótesis nula de que $E_{ext} = E_{láser}$, la cual implica que no hay diferencia significativa entre los valores medidos bajo ambos instrumentos.
- Se elige un nivel de confiabilidad del 95% lo cual implica un valor de $\alpha = 0,05$.
- Se aplica un estadístico de prueba F.
- Se define la sección de rechazo según valores teóricos de tablas en literatura estadística para los datos tomados.
- Se calcula el estadístico de la prueba.
- Se comparan ambos valores estadísticos F (de tabla y calculado) y se contextualiza el resultado a nivel del rechazo o no rechazo de la hipótesis.

A partir de esto se obtienen los resultados presentados en la tabla 23.

Tabla 23: Resultados de análisis estadístico para comparación de valores de módulo elasticidad

Varilla	Hipótesis nula H_0	Confianza (%)	Estadístico F $\alpha=0,05$ tabla	Estadístico f_0 calculado	Comparación	Interpretación
1745 (#3)	$E_{ext} = E_{láser}$	95,0	4,41	0,35	$F_{\alpha=0,05} > F_c$	No se rechaza H_0
1746 (#4)		95,0	4,41	10,35	$F_{\alpha=0,05} > F_c$	Se rechaza H_0
1747 (#5)		95,0	4,49	3,52	$F_{\alpha=0,05} > F_c$	No se rechaza H_0
1748 (#6)		95,0	4,41	0,42	$F_{\alpha=0,05} > F_c$	No se rechaza H_0

Debido a que los resultados obtenidos no muestran una tendencia claramente definida en comparación con los datos del extensómetro axial y además que los registros del láser demuestran ser muy dispersos para el rango de medición, se procede a interpretar que el rechazo de la hipótesis de las varillas #4 en el análisis estadístico es suficiente para indicar que en general, no se posee suficiente información para concluir que no existe una diferencia significativa entre los valores de módulo de elasticidad calculados entre ambos extensómetros.

6.2.4 Deformación unitaria de cedencia

De la misma manera que se realizó para el módulo de elasticidad, cada uno de los valores determinados para la deformación unitaria de cedencia se analiza estadísticamente para tomar una decisión objetiva en cuanto a su representatividad. En este caso se modifican los siguientes parámetros con respecto al análisis anterior:

- Se identifica el parámetro de interés como el valor de deformación unitaria de cedencia ϵ_y (un solo factor estadístico) calculado según los datos del extensómetro convencional y el láser (dos muestras estadísticas) para cada caso, el calculado y el determinado gráficamente.
- Se establece la hipótesis nula de que $\epsilon_{y(ext)} = \epsilon_{y(láser)}$, la cual implica que no hay diferencia significativa entre los valores medidos bajo ambos instrumentos.

A partir de esto, se obtienen los resultados estadísticos mostrados a continuación en la tabla 24 para los valores calculados, y en la tabla 25 para los determinados de la gráfica.

Como se observa en los datos de la tabla 24, al igual que para el módulo de elasticidad, debido a los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico aplicado, además de la observación y análisis de los datos experimentales procesados, se procede a interpretar que el rechazo de

Tabla 24: Resultados de análisis estadístico para comparación de valores de deformación unitaria de cedencia, calculados a través de la determinación del módulo elasticidad

Varilla	Hipótesis nula H_0	Confianza (%)	Estadístico F de tabla	Estadístico f_0 calculado	Comparación	Interpretación
1745 (#3)	$\epsilon_{y (ext)} = \epsilon_{y (láser)}$	95,0	4,41	0,09	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1746 (#4)		95,0	4,41	6,27	$F_t < F_c$	Se rechaza H_0
1747 (#5)		95,0	4,49	3,00	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1748 (#6)		95,0	4,41	0,53	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0

Tabla 25: Resultados de análisis estadístico para comparación de valores de deformación unitaria de cedencia, determinados del gráfico esfuerzo-deformación

Varilla	Hipótesis nula H_0	Confianza (%)	Estadístico F de tabla	Estadístico f_0 calculado	Comparación	Interpretación
1745 (#3)	$\epsilon_{y (ext)} = \epsilon_{y (láser)}$	95,0	4,41	2,69	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1746 (#4)		95,0	4,41	0,58	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1747 (#5)		95,0	4,49	0,45	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1748 (#6)		95,0	4,41	0,27	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0

la hipótesis de las varillas #4 en el análisis estadístico es suficiente para indicar que en general, no se posee suficiente información para concluir que no existe diferencia significativa entre los valores de deformación unitaria de cedencia calculados. Cabe mencionar que esta situación era previsible, debido a que el análisis anterior indicó diferencias entre los valores del módulo de elasticidad por lo que un valor dependiente de este debe demostrar el mismo comportamiento.

Por otro lado, cuando se consideran los valores determinados directamente de la interpretación del gráfico, los resultados estadísticos indican que no hay información para rechazar la hipótesis de igualdad por lo que no existe una diferencia significativa entre los valores determinados de la gráfica.

6.2.5 Deformación unitaria última

De igual manera que para los datos presentados anteriormente, se lleva a cabo un análisis estadístico de los datos determinados para la deformación unitaria última registrada por el láser en comparación con los medidos mediante la unión del espécimen fallado según lo permite la norma ASTM A370 en su sección 14.4. En este caso se toman las siguientes variaciones a las consideraciones indicadas anteriormente para el análisis del módulo de elasticidad:

- Se identifica el parámetro de interés como el valor de deformación unitaria última ϵ_u (un solo factor estadístico) determinado según los datos del extensómetro láser y la medición del espécimen fallado (dos muestras estadísticas).

Tabla 26: Resultados de análisis estadístico para comparación de valores de deformación unitaria última

Varilla	Hipótesis nula H_0	Confianza (%)	Estadístico F de tabla	Estadístico f_0 calculado	Comparación	Interpretación
1745 (#3)	$\epsilon_{u(med)} = \epsilon_{u(láser)}$	95,0	4,35	0,32	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1746 (#4)		95,0	4,41	0,59	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1747 (#5)		95,0	4,49	1,26	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0
1748 (#6)		95,0	4,41	0,00	$F_t > F_c$	No se rechaza H_0

- Se establece la hipótesis nula de que $\epsilon_u(\text{medido}) = \epsilon_u(\text{láser})$, la cual implica que no hay diferencia significativa entre los valores medidos bajo ambos métodos.

Los resultados se muestran en la tabla 26.

De tal manera, se puede observar del resultado del análisis estadístico que para ninguno de los casos en las muestras ensayadas se genera un rechazo de la hipótesis de igualdad por lo que se interpreta que no existe una diferencia significativa entre los valores de deformación unitaria última determinados con el extensómetro láser y mediante medición de especímenes fallados.

7 Conclusiones

- La implementación de las configuraciones del uso del extensómetro láser para la medición axial de deformaciones es satisfactoria puesto que se registran comportamientos equivalentes y el desfase en la medición producto del promedio interno de los datos del láser es mucho menor que la frecuencia de toma de datos de ensayos normales.
- Se establece que para el desarrollo de pruebas axiales en tensión de probetas de acero de refuerzo, el uso del extensómetro láser genera una gráfica de esfuerzo-deformación correcta conforme al comportamiento teórico del material ensayado y es además cualitativamente idéntica a la encontrada por el extensómetro axial convencional.
- La utilización del extensómetro láser no genera ninguna diferencia en comparación con el extensómetro axial en la determinación de los valores de esfuerzo de cedencia debido a las propiedades de cedencia claramente definida del material.
- La determinación del esfuerzo último es independiente del instrumento de medición de deformación por lo que el uso del extensómetro láser no representa ningún error.
- Se comprueba que hay posibilidades de que exista una diferencia significativa calculada estadísticamente con el 95% de confianza entre los valores de módulo de elasticidad encontrados con el extensómetro láser en comparación a los determinados por el extensómetro convencional, determinado a partir de la interpretación de la dispersión de los datos y al rechazo de la hipótesis estadística en las varillas #4.
- Se determina que no existe una diferencia significativa calculada estadísticamente con el 95% de confianza entre los valores de deformación unitaria de cedencia obtenidos gráficamente a partir de los registros del extensómetro láser en comparación con el extensómetro convencional.
- Se determina que no existe una diferencia significativa calculada estadísticamente con el 95% de confianza entre los valores de deformación unitaria última obtenidos directamente de los registros del extensómetro láser, en comparación con los medidos de los especímenes fallados.
- El uso del extensómetro láser para la realización de ensayos según los requisitos de la ASTM A615 es válido, debido a que no se presenta una diferencia significativa entre ninguno de los valores de aceptación o rechazo requeridos por la norma.

8 Recomendaciones

- Realizar un estudio específico para determinar la utilización del extensómetro láser en materiales que no presenten un comportamiento de cedencia claramente definido como el acero A615 o A706.
- No utilizar el extensómetro láser en aplicaciones con altas velocidades de carga hasta que se valide su uso para estas aplicaciones, debido al desfase mostrado en las mediciones durante la etapa de implementación.
- A la hora de llevar a cabo el programa experimental, las pruebas de laboratorio se realicen según un esquema aleatorio de selección entre las muestras (sin ordenar por tipo o designación) para mejorar la calidad de la base estadística.

9 Aclaraciones:

- Este artículo tiene validez únicamente en su forma íntegra y original.

Esta investigación fue desarrollada para la validación y uso de equipo interno propiedad del LanammeUCR y no se deben de interpretar para el uso general de equipos similares.

10 Referencias

1. *American Standard for Testing and Materials. ASTM A 370-12a: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 48 páginas. Estados Unidos.*
2. *American Standard for Testing and Materials. ASTM A 615/A615M -12: Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. 6 páginas. Estados Unidos.*
3. *American Standard for Testing and Materials. ASTM A 706/A706M -09b: Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement. 6 páginas. Estados Unidos.*
4. *American Standard for Testing and Materials. ASTM E83 -10a: Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems. 14 páginas. Estados Unidos.*
5. *Montgomery, C & Runger, G. Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. 2da Edición. Limusa Wiley, Estados Unidos, 2007.*
6. *MTS Systems Corporation. Series LX Laser Extensometer Product Information. Manual usuario: 015-207-801 F, Estados Unidos, Agosto 2009.*
7. *MTS Systems Corporation. Services and Accessories Catalog. Estados Unidos, 2013.*