



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN CURVAS DE CAPACIDAD DE  
CABLES: ANÁLISIS EXPERIMENTAL**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**FERNANDA PAZ CORINA NÚÑEZ JORQUERA**

**PROFESOR GUÍA:**

**JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**EDUARDO NÚÑEZ CASTELLANOS**

**RICARDO HERRERA MARDONES**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2018**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: FERNANDA NÚÑEZ JORQUERA  
FECHA: ENERO 2018  
PROFESOR GUÍA: J. FELIPE BELTRÁN

## “INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN CURVAS DE CAPACIDAD DE CABLES: ANÁLISIS EXPERIMENTAL”

El comportamiento de los cables ha sido estudiado por décadas dado su amplio uso en diferentes estructuras y como parte de sistemas de alzamiento. A partir de los estudios realizados sobre el daño de éstos como consecuencia del desgaste natural que sufren por el uso se ha querido ahondar en este tema.

El objetivo de la memoria es analizar los efectos de daños ocasionados superficialmente en cables de acero y aluminio de modo de determinar cómo afecta en la distribución de deformaciones y la relación del daño del cable con el diámetro de éste.

La metodología empleada se basa en la confección e instrumentación con strain gauges, extensómetros y LVDT de cables de acero y aluminio de diferentes diámetros y la posterior evaluación de la deformación y capacidad de éstos, sometidos a ensayos de tracción.

Los resultados obtenidos de esta investigación tienen que ver con el comportamiento de los cables ante los daños realizados, es así como se logró determinar el desempeño de los cables estudiados, como consecuencia su módulo de elasticidad. Además se determinó cualitativa y cuantitativamente un gradiente de deformaciones en donde los alambres más próximos a los daños poseen mayores deformaciones que los que se encuentran opuestos a éste; y una disminución de las deformaciones del cable de manera global en función del aumento de los daños realizados. Conjuntamente, se encontró una relación de no linealidad entre el porcentaje de pérdida de área y de la capacidad en función de los daños realizados a los cables, siendo ésta última menor a la esperada según el modelo biela.

Con respecto a la instrumentación utilizada, el uso de strain gauges es acertado como instrumento para medir las deformaciones locales de los cables en cada hebra analizada ya que es bastante sensible, de tamaño suficientemente pequeño para ser colocado en alambres finos y de alta confiabilidad, pero que al mismo tiempo no logra medir las deformaciones hasta el momento de la rotura debido a que antes se despega por falta de adherencia o se corta. El extensómetro no se recomienda como instrumento para el caso de los cables en los cuales fue utilizado, por el mal agarre que éste posee dada la disposición helicoidal de los cables y por consecuencia del gradiente de deformaciones que presentaba. Con respecto al uso de LVDT, este es confiable al momento de determinar los valores de las cargas máximas y niveles de deformación globales, además de ser el único instrumento capaz de resistir las deformaciones propias del acomodamiento de los cables debido a los daños a lo largo de todo el ensayo.

La evaluación de los daños en cables al momento de realizar criterios de descarte es relevante para analizar la posibilidad de reforzar o reemplazar una pieza, en este punto la investigación realizada establece una averiguación necesaria del comportamiento de los cables con respecto a la variación de las deformaciones y en la capacidad que sufren por causa del uso.

*A la Gloria.*

## *Agradecimientos*

Se agrade a FONDECYT proyecto N° 1150409 por el financiamiento otorgado a esta investigación.

De manera encarecida agradezco a los profesores J.Felipe Beltrán y Eduardo Núñez por ser tan partícipes de esta investigación, por mostrar gran preocupación, compromiso, por sus grandes aportes con sus conocimientos, por guiarme y apoyarme de manera tan entregada siempre. Gracias al profesor Pedro Soto y a Víctor por toda la ayuda recibida en el laboratorio durante todo el año y su gran disposición. Y también agradezco al profesor Ricardo Herrera por sus aportes en la investigación a pesar de la distancia.

Quisiera dar gracias a mi familia por el apoyo incondicional que me han otorgado no sólo en el proceso de realización de la memoria sino que en todo el transcurso de mi formación como profesional. Han sido un pilar fundamental, sin ellos nada de los que soy ni mis logros habrían sido posibles. No puedo dejar atrás a los que se han ido, sobre todo a mi padre Hugo y mi abuela Rebeca, los angelitos que siempre me han protegido desde el cielo.

Gracias a Dios por poner en mi vida a todos mis amigos, sobre todo a Katy, Dámaris, Magdalena, Daniel y Macarena, fundamentales en todo este proceso, además por permitir ser educada en la mejor universidad de éste país y poder adquirir conocimientos de parte de grandes profesionales de los que estoy muy agradecida de haber conocido.

# Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.2.1. General.....	1
1.2.2. Específicos .....	1
1.3. Metodología .....	2
1.4. Alcance y limitaciones .....	3
Capítulo 2. Revisión Bibliográfica.....	4
2.1. Estudios Previos .....	4
2.2. Normativa, Ensayos y Mediciones .....	8
Capítulo 3. Montaje Experimental de Cables .....	11
3.1. Cantidad, tipo y largos de los cables.....	11
3.2. Daños.....	13
3.3. Instrumentación: Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	13
3.4. Pegado de Strain Gauges.....	15
Capítulo 4. Análisis Experimental de Cables de Acero .....	16
4.1. Desempeño de los cables de Acero de diámetros 9.5 mm y 12.7 mm .....	16
4.2. Gráficos de Deformación vs Carga .....	19
4.3. Efecto Daño .....	27
4.3.1. LVDT.....	27
4.4. Efecto Diámetro .....	30
Capítulo 5. Análisis Experimental de Cables de Aluminio .....	34
5.1. Desempeño de los Cables de Aluminio de diámetros 10.1 mm, 14.3 mm y 19.9 mm .....	34
5.2. Gráficos de Deformación vs Carga .....	38
5.3. Efecto Daño .....	49
5.3.1. LVDT.....	49
5.4. Efecto Diámetro .....	53
Capítulo 6. Estudio del efecto diámetro y carga máxima .....	57
6.1. Evolución de la carga máxima .....	57
6.2. Efecto Diámetro .....	58

Capítulo 7. Conclusiones .....	69
Bibliografía .....	72
Anexos .....	74

## Índice de figuras

Figura 1: Localización de los cortes en el cable y variación en las mediciones de los strain gauges según su ubicación con respecto a los daños [7].	5
Figura 2: Ley Constitutiva para cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro [13].	7
Figura 3: Ley Constitutiva para cables de aluminio de 14.4 mm y 25.3 mm de diámetro [13].	7
Figura 4: Wire Rope Socket y su eficiencia [16].	8
Figura 5: A la izquierda, como realizar la correcta medida del diámetro del cable, y a la derecha, como se mide de manera incorrecta [2].	9
Figura 6: Índice de Asimetría (I.A.) (datos obtenidos de [15]) para cada una de las configuraciones de cables (elaboración propia).	10
Figura 7: Tipos de cables ensayados con sus respectivas terminales de vaciado (elaboración propia)	11
Figura 8: Montaje Experimental (elaboración propia)	12
Figura 9: Distribución de daños para las distintas configuraciones de cables (elaboración propia)	13
Figura 10: Extensómetro y Strain Gauge	14
Figura 11: A la izquierda Strain Gauges FLA-5-23-5LT pegado en cable de aluminio de 19.9 mm de diámetro, corresponden al grupo de strain gauges más grandes. A la derecha, Strain Gauges FLA-1-11-5LT pegado en cable de acero de 9.5 mm de diámetro, corresponde al grupo de strain gauges más pequeños.	15
Figura 12: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 9.5 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges y dos Extensómetros	16
Figura 13: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 12.7 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, dos Extensómetros y LVDT	18
Figura 14: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros	19
Figura 15: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros	20
Figura 16: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros	20
Figura 17: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros	21
Figura 18: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT	23

Figura 19: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	23
Figura 20: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	24
Figura 21: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	24
Figura 22: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Acero de 9.5 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño .....	27
Figura 23: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Acero de 12.7 mm con el uso de LVDT para diferentes .....	28
Figura 24: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro en función del tipo de daño. ....	31
Figura 25: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro en función del tipo de daño e índice de asimetría. ....	32
Figura 26: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro en función del diámetro e I.A. ....	33
Figura 27: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 10.1 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, dos Extensómetros y LVDT .....	34
Figura 28: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 14.3 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	35
Figura 29: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 19.9 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	37
Figura 30: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	38
Figura 31: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	39
Figura 32: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	39
Figura 33: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	40
Figura 34: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	42
Figura 35: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	42
Figura 36: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	43



Figura 37: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT.....	43
Figura 38: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT.....	45
Figura 39: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT.....	45
Figura 40: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 4 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT.....	46
Figura 41: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 6 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT.....	46
Figura 42: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Aluminio de 10.1 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño.....	50
Figura 43: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Aluminio de 14.3 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño.....	50
Figura 44: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Aluminio de 19.9 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño.....	51
Figura 45: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro en función del tipo de daño. ....	54
Figura 46: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro en función del tipo de daño. ....	55
Figura 47: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro en función del tipo del diámetro e índice de asimetría. ....	56
Figura 48: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero y Aluminio en función del tipo del diámetro e índice de asimetría.....	56
Figura 49: Gráfico de Carga máxima Normalizada por la Carga máxima del Cable Sin Daño en función del Área Remanente del cable. ....	57
Figura 50: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable Sin Daño .....	58
Figura 51: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable Sin Daño .....	59
Figura 52: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable Sin Daño .....	59

Figura 53: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable con Un Daño.....	60
Figura 54: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable con Un Daño.....	61
Figura 55: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable con Un Daño.....	61
Figura 56: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable con Dos Daños.....	62
Figura 57: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable con Dos Daños.....	63
Figura 58: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable con Dos Daños.....	63
Figura 59: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable con Tres Daños.....	64
Figura 60: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable con Tres Daños.....	65
Figura 61: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable con Tres Daños.....	65
Figura 62: Gráfico de Factores de Amplificación de Deformaciones para el Strain Gauge SG0 en todos los cables según sus diámetros equivalentes de acero para ensayos de 1 y 2 daños.....	67
Figura 63: Gráfico de Factores de Amplificación de Deformaciones para el Strain Gauge SG2 en todos los cables según sus diámetros equivalentes de acero para ensayos de 1 y 2 daños.....	68
Figura 64: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros.....	75
Figura 65: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros .....	75
Figura 66: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros .....	76
Figura 67: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros .....	76

Figura 68: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	77
Figura 69: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	77
Figura 70: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT .....	78
Figura 71: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	78
Figura 72: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT.....	79
Figura 73: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	79
Figura 74: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	80
Figura 75: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT .....	80
Figura 76: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT.....	81
Figura 77: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT.....	81
Figura 78: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	82
Figura 79: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	82
Figura 80: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT.....	83
Figura 81: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT .....	83
Figura 82: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 4 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT .....	84
Figura 83: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 6 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT .....	84

## Índice de tablas

Tabla 1: Deformación y esfuerzo de rotura para los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro y el cable de Aluminio 14.3 mm de diámetro [13].	6
Tabla 2: Ensayos a realizar y configuración de los cables.	11
Tabla 3: Dimensiones de los cables	13
<i>Tabla 4: Módulos de Elasticidad para el Cable de Acero de 9.5 mm de diámetro</i>	<i>17</i>
Tabla 5: Módulos de Elasticidad para el Cable de Acero de 12.7 mm de diámetro	18
Tabla 6: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Acero de 9.5 mm de diámetro	22
Tabla 7: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Acero de 12.7 mm de diámetro	25
Tabla 8: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Acero de 9.5mm de diámetro, realizados con uso de extensómetro y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica	29
Tabla 9: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Acero de 12.7mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica	30
Tabla 10: Promedio de los Factores de Amplificación de Deformaciones para los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7mm de diámetro	30
Tabla 11: Módulos de Elasticidad para el Cable de Aluminio de 10.1 mm de diámetro	35
Tabla 12: Módulos de Elasticidad para el Cable de Acero de 14.3 mm de diámetro	36
Tabla 13: Módulos de Elasticidad para el Cable de Aluminio de 19.9 mm de diámetro	37
Tabla 14: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Aluminio de 10.1 mm de diámetro	41
Tabla 15: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Aluminio de 14.3 mm de diámetro	44
Tabla 16: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Aluminio de 19.9 mm de diámetro	47
Tabla 17: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Aluminio de 10.1 mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica	52
Tabla 18: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Aluminio de 14.3 mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica	52
Tabla 19: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Aluminio de 19.9 mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica	53

Tabla 20: Promedio de los Factores de Amplificación de Deformaciones para los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro .....53

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

Los cables tienen una gran importancia como elementos estructurales dada su gran aplicabilidad en estructuras como puentes, estructuras industriales como pesca industrial o para trasladar maquinaria pesada en minería, ascensores, conductores eléctricos, sistemas de anclajes, entre otros. Es por esto, que se han creado diversos tipos de cables según su materialidad, dimensiones y disposición.

Por su uso en puentes o estructuras industriales, los cables son elementos que poseen una alta demanda mecánica debida a las tensiones y deformaciones a las que se ven sometido, además de abrasión producto de su interacción con el medio ambiente. Un importante tema a estudiar es conocer cuándo se hace necesario el reemplazo de los cables. Para esto se debe determinar su vida útil, la que puede ser prolongada siguiendo una programación, inspección, manipulación y mantención de éstos.

Una forma de simular los daños que los cables sufren es a través de la ruptura de uno o más componentes de la sección transversal. La manera de cuantificar el efecto del tipo de daño superficial asimétrico en la respuesta estática de un cable, es a través de la obtención de las curvas de capacidad y distribución de tensiones y de las deformaciones en la sección transversal de manera experimental.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. General

Estudiar la influencia de la distribución del daño en curvas de capacidad de cables a través de un análisis experimental.

### 1.2.2. Específicos

- Determinar las condiciones apropiadas del montaje experimental: largo de los cables según el diámetro de éstos, dimensiones de los terminales de vaciados a utilizar, correcta colocación de extensómetros, LVDT y strain gauges y distribución de daños.
- Establecer el proceso óptimo de ensayo según el apoyo que ofrecen las normas ASTM International y Norma Europea ISO, para eso se requiere de la recopilación de datos de ensayos experimentales de capacidad residual de cables en la literatura.
- Elaborar el ensayo: se debe inducir daño a alambres que pertenecen a la capa exterior de la sección transversal del cable según patrones determinados y colocar los instrumentos de medición mencionados según lo indicado en la investigación recopilada por normas y estudios previos.

- Ejecutar el ensayo: se debe ensayar siguiendo los protocolos descritos por las normas y según los resultados de prueba realizados.
- Realizar un tratamiento de datos post resultados como forma de eliminar los valores que tengan que ver con el acomodamiento de las probetas en la máquina y a los resultados que están fuera del rango de interés, posteriores a la rotura.
- A partir de lo anterior, determinar experimentalmente las curvas de capacidad de cables dañados en forma asimétrica y las deformaciones de los alambres. En función de esos resultados analizar la relación que existe con respecto a su posición, diámetro y daño.
- Verificar si el diámetro del cable tiene un impacto en la curva de capacidad de un cable dañado para similares distribuciones de daño y estudiar el impacto del daño en la resistencia residual.
- Analizar la utilidad de los instrumentos usados y el proceso de ensayo como manera de plantear mejorar para futuras investigaciones.

### **1.3. Metodología**

El presente trabajo contempla las siguientes actividades:

- Reunir información del montaje experimental, para eso se debe determinar los largos de los cables según el diámetro de cada uno; dimensiones de los terminales de vaciado según especificaciones técnicas de los contratistas.
- Recopilación bibliográfica para determinar el proceso óptimo de ensayo según el apoyo que ofrecen las normas ASTM International, Norma Europea y de estudios previos de ensayos a tracción en cables, con el fin de obtener resultados lo más confiable posible, es decir, se requiere de la recopilación de datos de ensayos experimentales de capacidad residual de cables en la literatura .
- Inducir daño a alambres que pertenecen a la capa exterior de la sección transversal del cable según patrones determinados, para asegurar distintos tipos de distribuciones de daño asimétrico.
- Colocación de los dispositivos de medición: extensómetros, LVDT y strain gauges.
- Realización del ensayo a tracción, partiendo desde la colocación de las mordazas hasta obtener la fractura del cable.
- Obtener las curvas de capacidad de cables dañados para estudiar el impacto del tipo de distribución de daño asimétrico en la resistencia, capacidad de deformación y rigidez de éstos.
- Conclusiones: discutir los resultados obtenidos.

## 1.4. Alcance y limitaciones

Se busca obtener las curvas de capacidad de tensión-deformación de cables de acero y aluminio dañados, la distribución de deformaciones y la relación del daño del cable con su diámetro e índice de asimetría, para así determinar el impacto según el tipo de distribución de daño asimétrico. Además, describir el método experimental desarrollado para obtención de los datos.

El presente estudio obtiene los resultados mencionados del ensayo de 24 cables de acero de dos diámetros distintos y 36 cables de aluminio de tres diámetros diferentes. Estos últimos fueron utilizados porque no se lograron conseguir cables de acero de otros diámetros y ante esta imposibilidad se recurrió a los cables de aluminio.

- Capítulo 3: describe el montaje experimental utilizado como forma de considerar la manera en la que fueron obtenidos los datos. Para esto se detalla la cantidad y características de los cables utilizados, los terminales de vaciado, los instrumentos usados para la medición de los datos con sus respectivas características y modo de empleo, el detallamiento de la máquina y la distribución de daños.
- Capítulos 4 y 5: a partir de las curvas de capacidad de tensión-deformación de cables de acero y aluminio dañados, la distribución de deformaciones, la relación del daño del cable con su diámetro e índice de asimetría y la resistencia residual en función del incremento del daño, se busca determinar el impacto según el tipo de distribución de daño que poseen los cables. Para esto se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo detallado de los resultados obtenidos.
- Capítulo 6: utilizando todos los resultados obtenidos tanto para los cables de acero como los de aluminio se busca analizar el efecto que tiene el daño en la resistencia residual del cable. Además, se analiza un posible efecto que tenga el diámetro en las deformaciones de los alambres, independiente del material del cual se esté analizando.



## Capítulo 2. Revisión Bibliográfica

### 2.1. Estudios Previos

Dada la importancia que poseen los cables como elementos estructurales, se desea estudiar el comportamiento que éstos poseen ante daños producidos por su alta demanda mecánica y por la abrasión generada ante tensiones y deformaciones.

La norma <<Cranes - Wire ropes - Care and maintenance, inspection and discard>> [9] habla en el capítulo 6 de los criterios de descarte, en los que considera el descarte de un cable cuando se tiene entre un 5% y 10 % de la pérdida del diámetro, o cuando ocurre la rotura de alambre en el punto de contacto entre hebras de la misma capa. La tesis a tratar considera daños mayores a un 10% con el fin de estudiar el comportamiento que poseen los cables ante diferentes distribuciones de daños.

En el artículo <<Wire failures in ropes and their influence on local wire strain behaviour in tension–tension fatigue>> [7] se investigó con respecto al efecto de las roturas de alambres en cables de sección transversal como la mostrada en la Figura 1. Se encontró que el principal aumento está en las deformaciones de alambres del mismo grupo de filamentos de donde se encuentra el daño, aunque las deformaciones de alambres en hebras adyacentes también aumentan hasta cierto punto. Además, se halló que los alambres del lado opuesto a los daños realizados a los cables muestran una disminución en la tensión superficial después de la ruptura, lo que puede atribuirse a los efectos de flexión locales. Cabe destacar, que a diferencia de los ensayos reportados en este informe, estos fueron realizados a fatiga y con cargas cíclicas.

Los resultados del artículo reflejan que a baja carga hay un gradiente de deformación muy bajo con un gradiente negativo de deformaciones que responde a compresiones locales. A medida que la carga aumenta, el gradiente se vuelve muy similar al observado antes de generar los cortes en el cable. Los cortes en los cables pueden causar una disminución en la tensión de los cables en el lado opuesto de este, lo que puede ser causado por la flexión localizada resultante de la rotura, siendo probable que este efecto sea más significativo en los cables externos (Figura 1). Sin embargo, estos estudios hechos con cables de gran cantidad de alambres y poco uso de strain gauges indican simplemente las tensiones de un lado del cable, oscureciendo la influencia de la flexión local del cable.

El aporte que genera el presente trabajo, es que se analizan una gran cantidad de hebras superficiales de los cables estudiados, pudiendo así generar un análisis cualitativo y cuantitativo de los efectos mencionados en el artículo de manera más detallada y con un mayor número de ensayos y resultados a exponer.

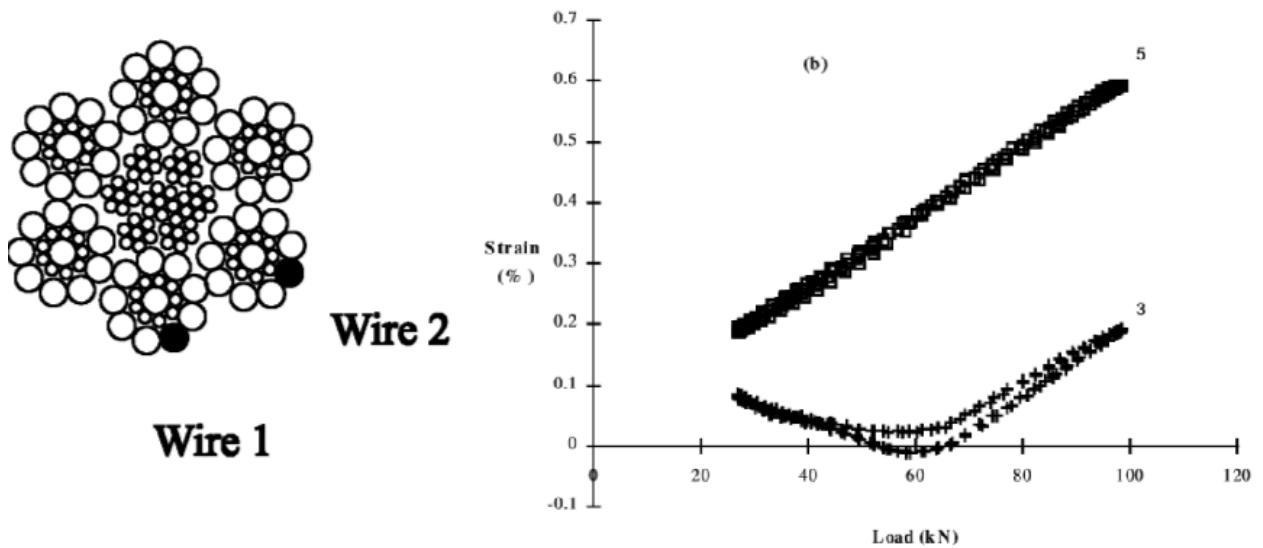


Figura 1: Localización de los cortes en el cable y variación en las mediciones de los strain gauges según su ubicación con respecto a los daños [7].

El artículo también menciona que el efecto de las roturas de cables en la resistencia de cables en tracción no siempre es directamente proporcional a la pérdida equivalente de área transversal pero que al mismo tiempo es dependiente de la concentración de roturas de alambre en la sección transversal (asimetría), si la rotura del cable ocurre ante una carga aplicada de manera axial y de la lubricación de los cables.

Esta aseveración se ve reafirmada con los estudios analíticos de cables presentados por Ramírez [11], como continuación de los estudios de un modelo mecánico generados por De Vico [6] donde concluye que el efecto de localización de deformación induce una reducción porcentual en resistencia residual y capacidad de deformación cercana al porcentaje de área dañada con respecto a los valores de cable intacto. Sin embargo, la distribución asimétrica tiene un mayor impacto en la reducción de la capacidad residual del cable dañado: esta reducción es mayor porcentualmente que el área dañada llegando hasta un 25 % para el caso de una sección dañada en un 15% para el caso de uno de los ensayos realizados.

La publicación <<Relation between Number and Distribution of Wire Breaks and the Residual Breaking Force>> [8] también realiza una investigación sobre esta no-linealidad. Mencionan un factor  $k$  que es definido como la medida de la reducción de la fuerza de rotura, y los estudios muestran que este factor se ve incrementado por una configuración asimétrica del daño donde el mayor valor medido no excede 0.5. De este modo la fuerza residual de rotura queda definida como:

$$S = S_0 * \frac{A}{A_0} * (1 - k)$$

En donde:

$S_0$ : fuerza residual del cable sin daño

$A_0$ : sección transversal del cable sin daño

$A$ : sección transversal del cable justo antes de la rotura accidental

El factor de reducción  $k$  no decrece linealmente con la sección transversal y no existe dependencia de este entre el caso con daño simétrico y el asimétrico.

Con respecto a la influencia del factor  $A/A_0$  en el factor de reducción, la fuerza residual disminuye linealmente con la pérdida de sección transversal, para el caso de daños simétricos. Esto puede deberse a la distribución desigual de la fuerza de tracción en los alambres no dañados. Ellos se rompen solos, uno después del otro, es decir se desarrolla un “efecto cremallera”.

La publicación <<Estimated loss of residual strength of a flexible metal lifting wire rope: Case of artificial damage>> [4] muestra resultados relativos a cables de acero de 19\*7 (conjunto de 19 cables de 1+6) que dan cuenta de que para daños menores al 50% del área neta la resistencia residual se reduce en un mismo porcentaje con respecto al cable sin daño, pero para daños mayores hay una pequeña desviación que tiende a obtener porcentajes de pérdida de resistencias residuales menores.

El artículo <<Test of Unbounded Seven-Wire Tendon with Broken Outer Wires>> [5] analiza cables de dos capas como los analizados por la propia investigación y 7 hebras igualmente, una central y 6 externas dispuesta de manera helicoidal. Del estudio se logra observar que: las deformaciones en los cables rotos aumentan con la distancia a la rotura; deformaciones en los alambres intactos en cables con dos alambres rotos opuestos diametralmente, son iguales en cada alambre de la sección transversal y decrecen a lo largo del cable con la distancia a la rotura; deformaciones en alambres no dañados de cables con daño no son iguales en cada sección transversal, con deformaciones máximas en los dos alambres adyacentes al daño y que poseen un incremento de hasta un 34% con respecto al cable no dañado. Además para este último caso, el alambre roto está sujeto a momentos de flexión que causan tracción en la superficie del cable. También se determina que debido a la fricción al interior del cable, la deformación en los alambres rotos de los cables investigados se incrementa con la distancia a la fractura.

La tesis en elaboración del alumno Tomás Bravo Tetlak [13] determinó la Ley Constitutiva para cables de acero y aluminio, varios de estos corresponden a los mismos que fueron utilizados en la presente investigación. El desempeño que obtuvieron al ser ensayados se muestra en las Figura 2 y Figura 3 y se obtienen los datos de deformaciones y esfuerzos de rotura de la Tabla 1, datos que fueron usados como referencia del comportamiento y para el cálculo de los factores de amplificación de deformaciones. Este último corresponde al valor de la deformación de un alambre para una cierta carga normalizada por la deformación de rotura del cable sin daño. Fueron determinados para distintos niveles de carga que también fueron normalizados por los valores de carga máxima obtenidos de la tesis mencionada.

*Tabla 1: Deformación y esfuerzo de rotura para los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro y el cable de Aluminio 14.3 mm de diámetro [13].*

<b>Rotura</b>		
<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>
Acero 12.7	7.13%	1316.4
Acero 9.5	9.27%	1569.6
Aluminio 14.3	6.44%	323.97

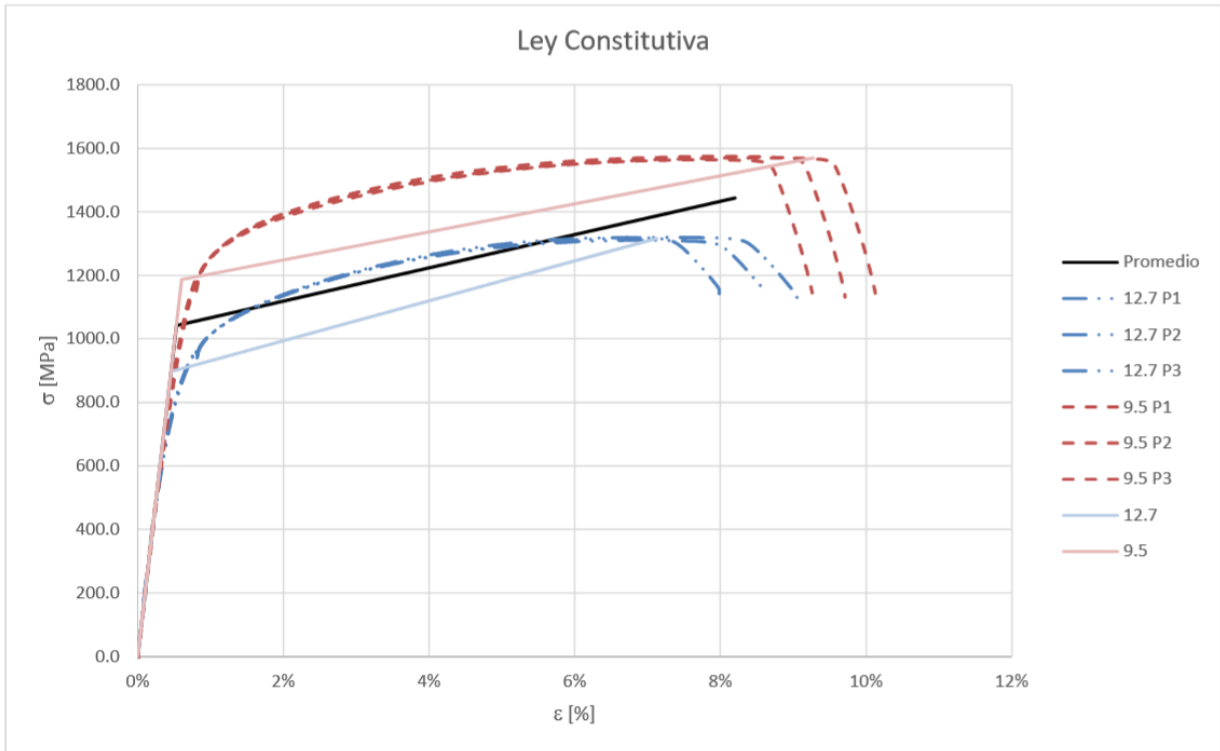


Figura 2: Ley Constitutiva para cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro [13].

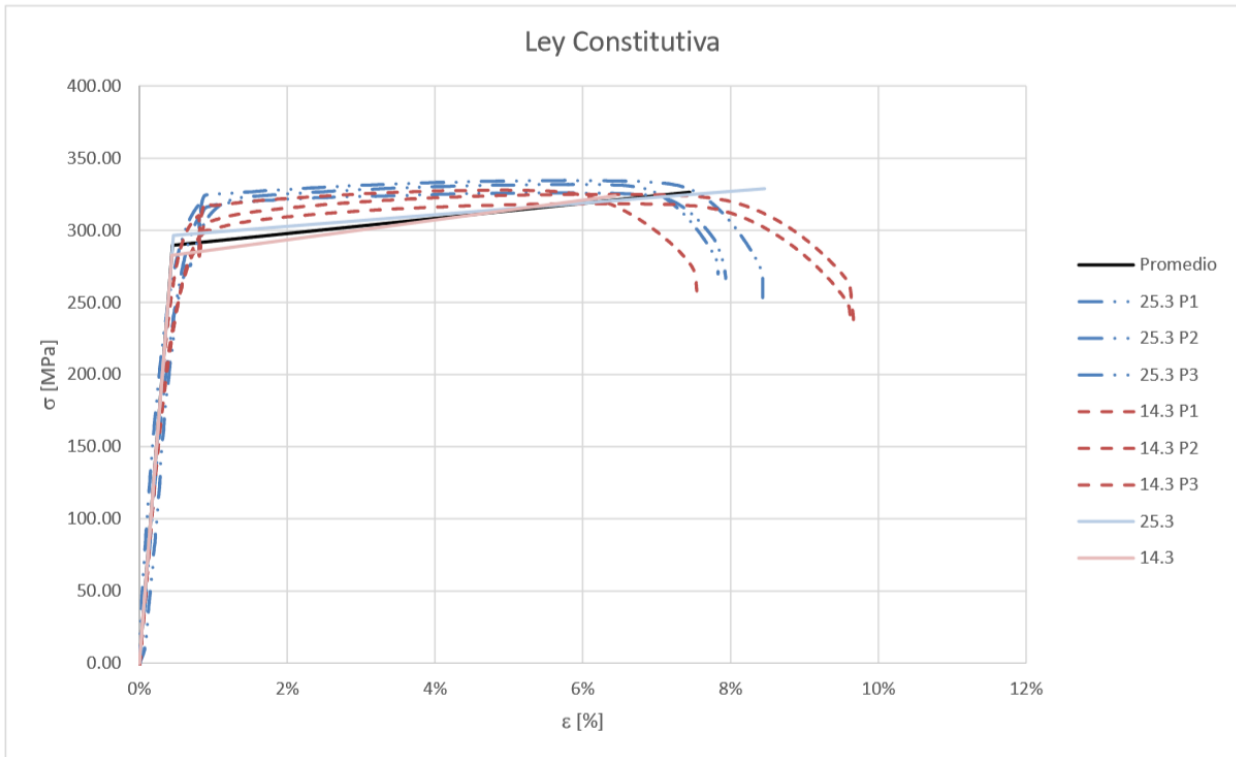


Figura 3: Ley Constitutiva para cables de aluminio de 14.4 mm y 25.3 mm de diámetro [13].

El artículo <<Mechanical Model for Unbonded Seven-Wire Tendon with Single Broken Wire>> [10] presenta la derivación y la validación experimental de un modelo mecánico para tendones de pretensado no adheridos de siete alambres con un solo alambre exterior roto. Después de que un cable externo se rompe, las fuerzas de contacto interno se redistribuyen y el tendón se desvía perpendicularmente a su eje hacia el cable roto. Estas deflexiones causan una redistribución de las fuerzas de contacto externas entre el tendón y el hormigón circundante, aumentan las fuerzas de tracción en los dos alambres exteriores adyacentes al alambre roto, y reducen las fuerzas de tracción en los otros tres alambres exteriores ininterrumpidos.

## 2.2. Normativa, Ensayos y Mediciones

Si bien el ensayo a tracción de los cables en específico que se utilizaron no se encuentra normado, existe una serie de documentos que entregan herramientas útiles a considerar. Es el caso del anexo 4 de la norma ASTM A370 [1] que trata sobre dispositivos de agarre de los cables como las mordazas y terminales de vaciado a utilizar que son recomendados ya que reducen el deslizamiento de los cables y roturas en los bordes. También menciona que la rotura del cable no debe generarse fuera del tercio medio de la longitud de referencia para que así los valores obtenidos sean representativos del material.

La publicación <<WIRE ROPE USERS MANUAL>> [16] hace alusión al tipo de terminal de vaciado utilizado en los ensayos el cual corresponde al Wire Rope Socket que ocupa como adhesivo a una resina que como muestra la Figura 4 posee un 100% de eficiencia, lo que nos dice que no permite el deslizamiento de los cables y roturas en los bordes como se mencionó en el párrafo anterior. Éstos son sistemas de acople entre las mordazas y el cable se realizan a través de un dispositivo que posee un perno del que va sujeto el socket y el que al mismo tiempo va unido a una cuña plana a la mordaza.

**TABLE 5 TERMINAL EFFICIENCIES (APPROXIMATE)**  
Efficiencies are applicable to the rope's minimum breaking force

Type of Termination	Efficiency	
	Rope with IWRC*	Rope with FC**
Wire Rope Socket (Spelter or Resin)	100%	100%



WIRE ROPE SOCKET - POURED SPECTER OR RESIN

Figura 4: Wire Rope Socket y su eficiencia [16].

Con respecto a los largos de los cables, la norma ASTM A931-08 [2] especifica que no debe ser menor a 91 mm entre sockets para un cable de no más de 25.4 mm de diámetro, inclusive, lo cual se cumple ya que el cable de mayor diámetro corresponde al de aluminio de 19.9 mm con un largo de 328 mm.

La misma norma hace hincapié en el uso de dispositivos de agarre mencionando que se pueden usar de varios tipos para transmitir la carga medida aplicada por la máquina a las muestras. Para garantizar la tensión de tracción axial dentro de la longitud del instrumento, el eje de la muestra de prueba debe coincidir con la línea central de las cabezas de la máquina. Cualquier desviación de este requisito puede introducir tensiones de flexión que no están incluidas en el cálculo de tensión habitual.

También se mencionan aspectos sobre la velocidad máxima de aplicación de la carga, la cual debe ser de 0.032 pulgadas por minuto por cada pulgada de longitud del medidor de prueba cuando la velocidad está bajo el control del operador, lo que es bastante mayor a la velocidad de 5 mm/min utilizada. Cabe destacar que la velocidad utilizada se estimó de acuerdo a una serie de ensayos de prueba realizados. Dicha velocidad mostró buenos resultados en términos de fluencia del elemento y no hubo deslizamientos de los cables, mostrándose un comportamiento aparentemente correcto, dentro de lo esperable.

Cabe destacar, que la norma además indica cómo realizar la medición del diámetro del cable, lo que se debe hacer antes de que se cargue (Figura 5). El diámetro del cable debe medirse adecuadamente para determinar el diámetro real.

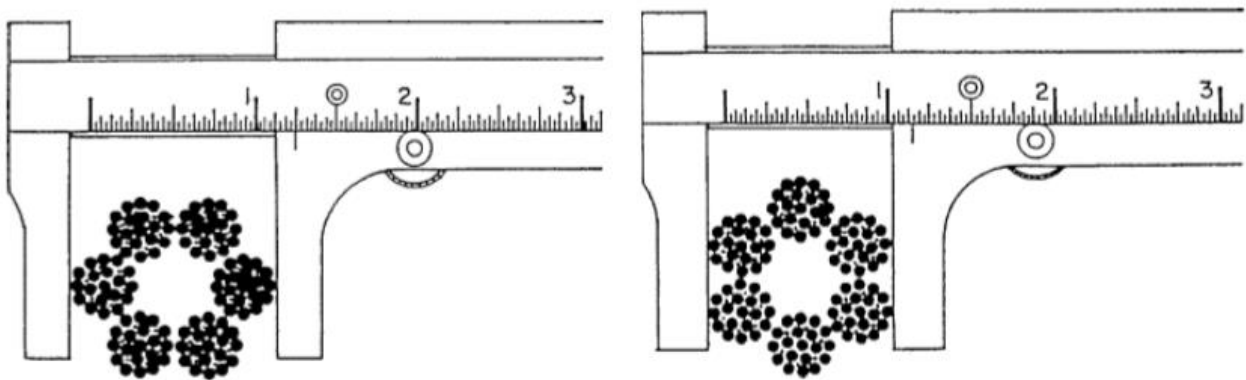


Figura 5: A la izquierda, como realizar la correcta medida del diámetro del cable, y a la derecha, como se mide de manera incorrecta [2].

La norma ASTM E8/E8M – 09 [3] también reafirma el uso de dispositivos de agarre y menciona el uso de extensómetro como manera de medir deformaciones, los cuales se deben usar y verificar para incluir las deformaciones correspondientes al límite elástico y la elongación a la fractura. Los extensómetros con longitudes de calibre iguales o menores que la longitud efectiva de la muestra se pueden usar para determinar el comportamiento de rendimiento. Para medir el alargamiento en la fractura con un extensómetro apropiado, la longitud del instrumento del extensómetro debe ser igual a la longitud nominal del instrumento requerido para la muestra que se está probando, de modo de asegurar la toma de datos al momento de realizar el ensayo completo.

Valores relevantes son los índices de asimetría, que según los estudios realizados por Vargas [15] corresponden a un indicador que refleja el grado de daño asimétrico que se tiene en el cable, el cual sirve para comparar entre resultados de una misma configuración con diferente daño. Los valores fueron utilizados al momento de decidir la distribución de los daños a utilizar, su cálculo se presenta a continuación y los valores obtenidos según tipo de cable se muestran en la Figura 6:

$$IA = 1 - \frac{R_o - d}{R_o + d}$$

En donde:

IA: índice de asimetría del cable dañado

R<sub>o</sub>: radio del cable

d: distancia entre el CG de la sección no dañada y el CG de la sección dañada

ÍNDICE DE ASIMETRÍA CABLE 1+6		ÍNDICE DE ASIMETRÍA CABLE 1+6+12	
SIN DAÑO		SIN DAÑO	
	0		0
1 DAÑO		2 DAÑOS	
	0,2		0,167
2 DAÑOS		4 DAÑOS	
	0,375		0,303
3 DAÑOS		6 DAÑOS	
	0,5		0,213

Figura 6: Índice de Asimetría (I.A.) (datos obtenidos de [15]) para cada una de las configuraciones de cables (elaboración propia).

## Capítulo 3. Montaje Experimental de Cables

### 3.1. Cantidad, tipo y largos de los cables

Se ensayaron 60 cables de aluminio y acero. La Tabla 2 muestra la cantidad de ensayos que se realizaron para cada uno de los cables, el tipo de configuración que poseen y el ángulo de la hélice de los filamentos externos que están dispuestos de manera helicoidal. Se encuentran dos tipos de cables: uno de dos capas con un alambre en el núcleo y 6 externos (configuración 1+6) y otro de tres capas con 1 alambre central, 6 hebras que lo siguen y 12 filamentos externos (configuración 1+6+12). En la Figura 7 se muestran los cables ensayados con sus respectivos terminales de vaciado.

Tabla 2: Ensayos a realizar y configuración de los cables.

Tipo de cable	$\Phi$ cable [mm]	$\Phi$ hebra [mm]	Número de ensayos a realizar	Configuración de los cables	Ángulo de la hélice [°]
Acero galvanizado	9,5	3,15	12	1+6	7,5
Acero galvanizado	12,7	4,2	12	1+6	7,9
Aluminio	10,1	3,34	12	1+6	8
Aluminio	14,3	4,74	12	1+6	7,12
Aluminio	19,9	3,9	12	1+6+12	12

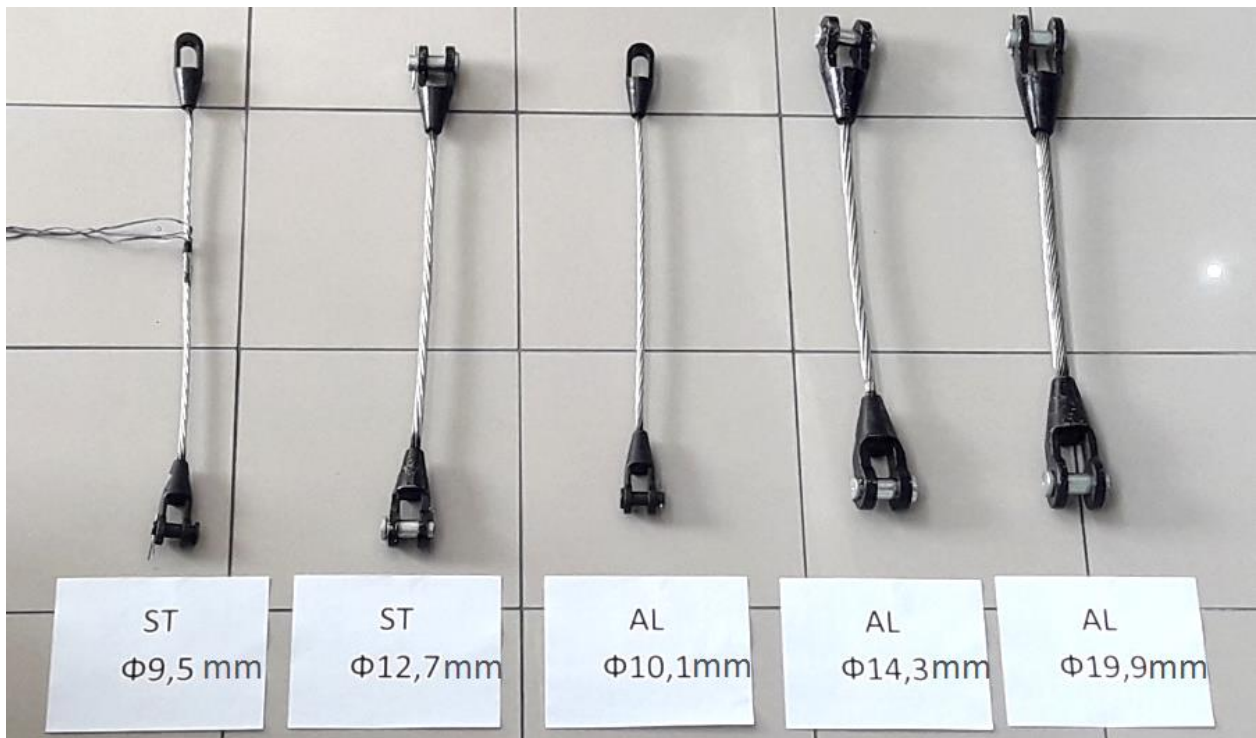


Figura 7: Tipos de cables ensayados con sus respectivas terminales de vaciado (elaboración propia)



El montaje experimental corresponde al de la Figura 8. La máquina de ensayo universal corresponde al modelo INSTRON 600 LX largo extendido/ opción manual, con capacidad de hasta 60 Ton. Posee unas mordazas en las cuales se insertan unos dispositivos de acople entre las mordazas y el socket. Éste último corresponde a unos terminales de vaciado adquiridos con la empresa Tecnicables, según las especificaciones mostradas en el capítulo anterior. Dependiendo del diámetro del cable son las dimensiones del terminal de vaciado necesario.

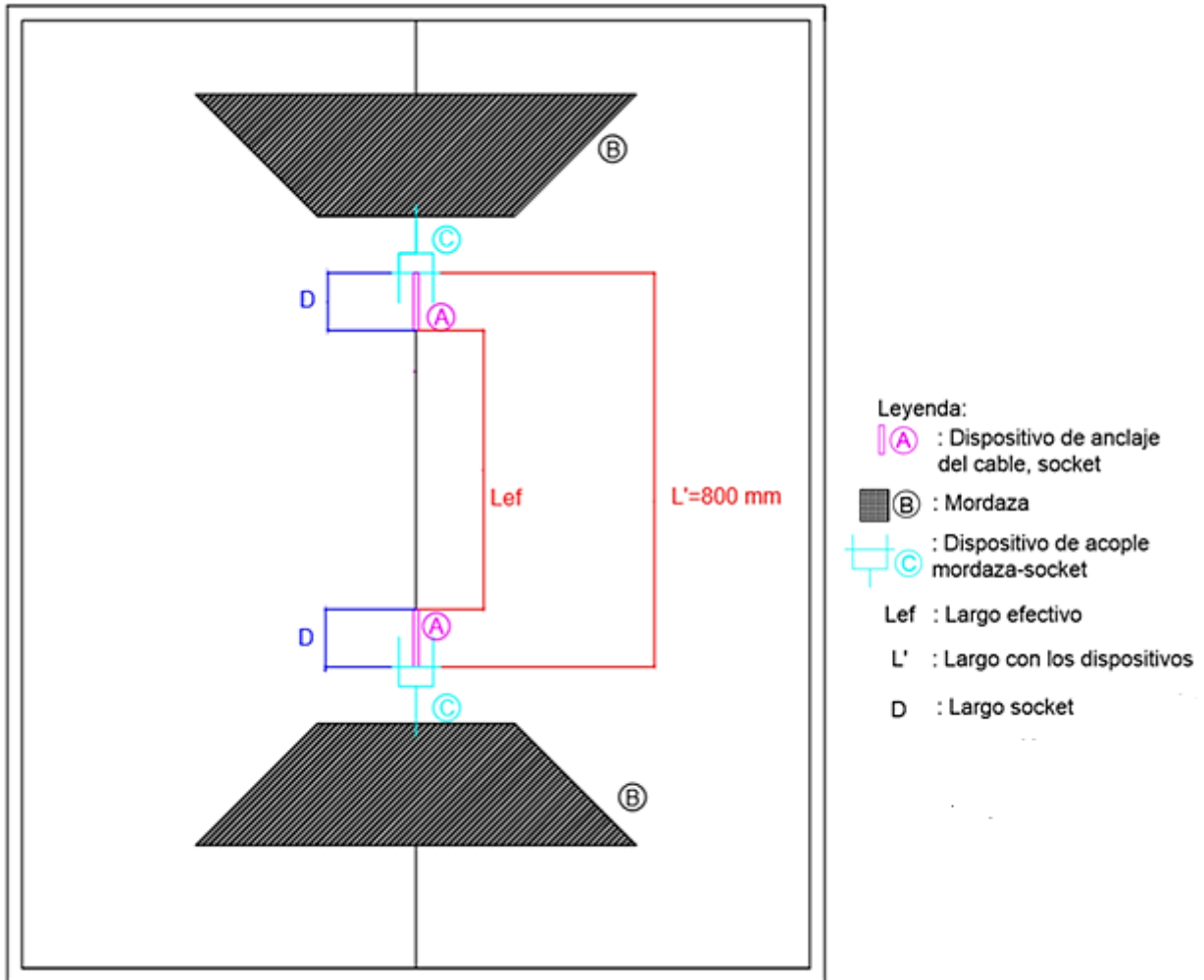


Figura 8: Montaje Experimental (elaboración propia)

Considerando un largo de 800 mm entre los dispositivos y el largo efectivo del cable ( $L'$  como se aprecia en la Figura 8), se obtiene un recorrido de 300 mm de la máquina. Teniendo en cuenta las dimensiones de las terminales de vaciado y el largo de la pieza mecánica C, el largo efectivo de los cables es el que se detalla en la Tabla 3. Considerando un 10% de deformación, con los 300 mm de recorrido que se tiene de la máquina se logra una máxima deformación del cable.

Tabla 3: Dimensiones de los cables

Tipo de cable	Φ cable [mm]	Terminal A (largo D) [mm]	Pieza mecánica C [mm]	Lef [mm]
Acero galvanizado	9,5	117	170,0	563
Acero galvanizado	12,7	141	170,0	515
Aluminio	10,1	141	170,0	515
Aluminio	14,3	171	170,0	455
Aluminio	19,9	235	170,0	328

### 3.2. Daños

Los cables que se ensayaron tienen la distribución de daños señalada en la Figura 9. Ésta fue escogida de modo de obtener un mayor grado de asimetría al momento de generar los daños. De cada tipo de daño se ensayaron 3 cables, de ahí que se realizaron 12 ensayos por cada diámetro de cable.

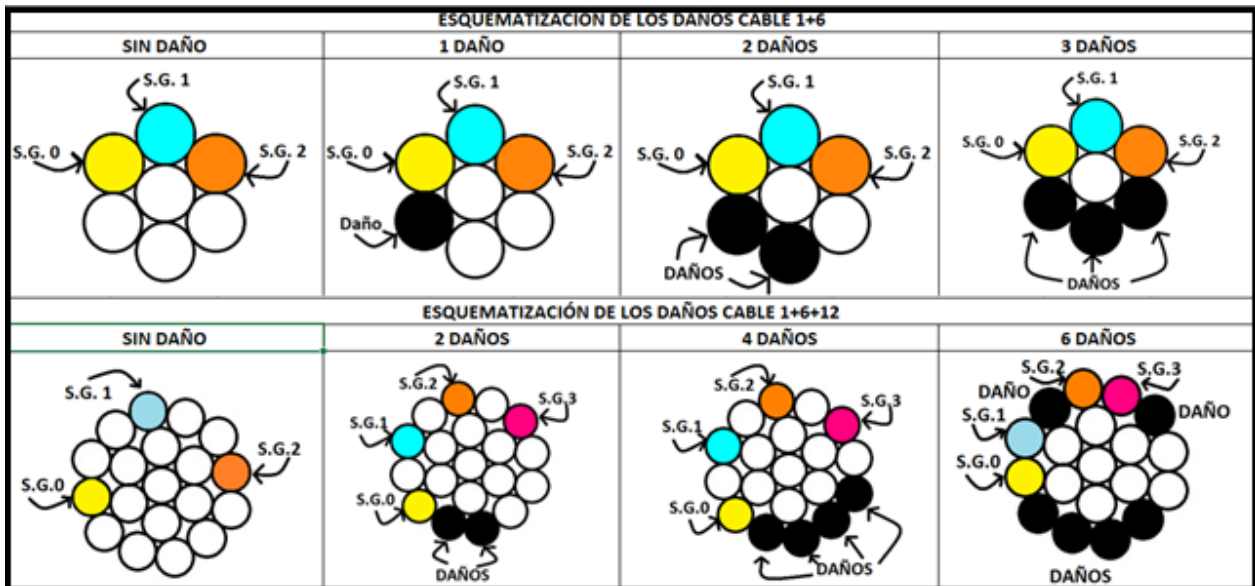


Figura 9: Distribución de daños para las distintas configuraciones de cables (elaboración propia)

### 3.3. Instrumentación: Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

Los Strain Gauges utilizados fueron *Tokyo Sokki Kenkyujo Co.* de los tipos FLA-5-23-5LT y FLA-1-23-5LT para aluminio y FLA-1-11-5LT y FLA-5-11-5LT para acero. Se diferencian en el tipo de material en el que pueden ser adheridos y en las dimensiones, siendo los más pequeños utilizados en los cables cuyas hebras poseen menor diámetro. Los extensómetros son los *Axial Extensometer*, modelo 3543-050M-050M-ST de la marca *Epsilon technology Corp.* de 50 mm de largo.

Las ventajas en la utilización de strain gauges radica en que se pueden obtener sensores de éste tipo de dimensiones bastantes pequeñas y una gran sensibilidad, por

lo tanto los datos de deformación que se obtiene son certeros. Los que se usaron en estos experimentos son los más pequeños de tal forma que logran medir las deformaciones en una sola hebra del cable.

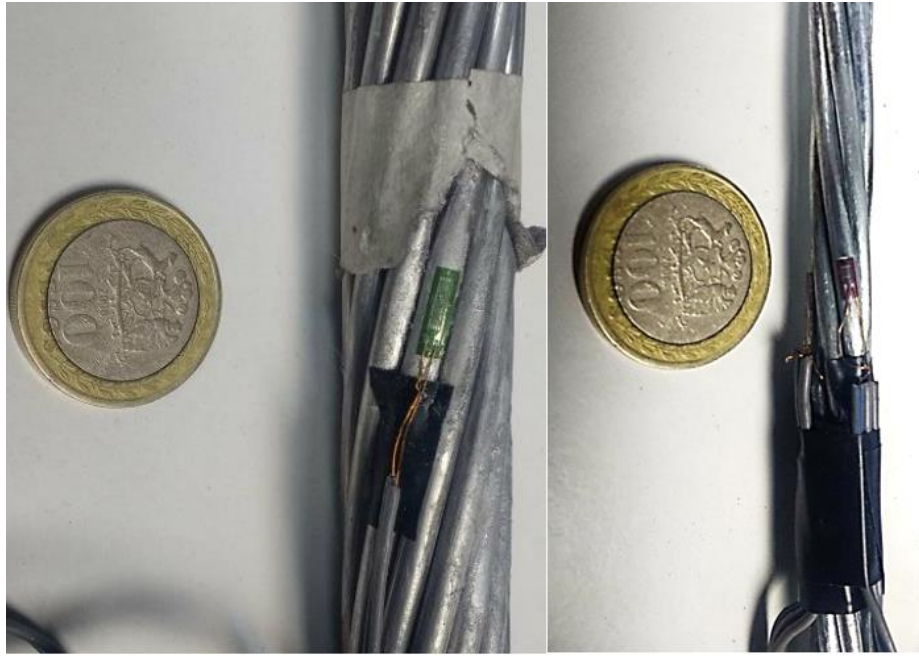
La distribución de los strain gauges en los cables fue de tal forma que todos se colocaran en el centro de la longitud efectiva del cable y en alambres distintos, asumiendo una cierta simetría en las deformaciones, de modo de poder captar éstas en las hebras contiguas a los daños, en las próximas y en las lejanas.

El uso de extensómetros y LVDT fue escogido para determinar el comportamiento global del cable, ya que el extensómetro va situado a un tercio o tres cuartos del cable (Figura 10) y el LVDT va sujeto a las mordazas por medio de un dispositivo anclado manualmente. El problema que posee el extensómetro es que, como tiene un sistema de agarre en base a pinzas, éstas no se adhieren a todas las hebras sino a algunas, por lo tanto, el comportamiento si bien es más global que el de un strain gauge no mide el comportamiento de todas las hebras sino de algunas. Al mismo tiempo, el sistema de agarre es bastante rígido y como no se acomoda bien al cable está propenso a acomodarse bastante, sobre todo cuando el daño de las hebras es mayor. En consecuencia, existen casos en que no es representativo ya que no capta bien las deformaciones sino que permanece en un constante acomodo.

A continuación, se muestran imágenes de los instrumentos utilizados y de cómo quedan los strain gauges pegados:



Figura 10: Extensómetro y Strain Gauge



*Figura 11: A la izquierda Strain Gauges FLA-5-23-5LT pegado en cable de aluminio de 19.9 mm de diámetro, corresponden al grupo de strain gauges más grandes. A la derecha, Strain Gauges FLA-1-11-5LT pegado en cable de acero de 9.5 mm de diámetro, corresponde al grupo de strain gauges más pequeños.*

### **3.4. Pegado de Strain Gauges**

El pegado de los Strain Gauges es bastante engorroso ya que busca una adherencia entre el instrumento y la superficie, para esto se deben seguir los siguientes pasos:

- Se debe lijar la superficie que tendrá contacto con el Strain Gauge, para eso se comienza con lijas de distinto número de granos en la dirección del alambre partiendo por las que poseen menor cantidad de granos a unas con mayor cantidad: 120, 240, 320 y 400, es decir, de grano medio a fino y muy fino.
- Una vez pulida la superficie, de tal modo que parezca un espejo, se debe limpiar la zona para eliminar cualquier impureza o resto del material lijado con la utilización de alcohol primero con un algodón y luego con gaza, ya que esta última no deja restos del mismo material suelto. Cabe destacar que se debe procurar el pasar sólo una vez cada algodón o gaza con alcohol utilizado, ya que una vez que se utiliza éste ya se encuentra contaminado. Se debe repetir éste proceso hasta que la gaza no presente impurezas al momento de pasarla por la zona de pegado del strain gauges.
- Luego, con el uso de un soplete se procede a calentar la zona para así asegurar una mejor adherencia.
- Se coloca una capa delgada de cyanoacrylato en el strain gauges para luego ponerlo en donde quiere ser pegado. Se mantiene presionada la zona hasta que el pegamento se encuentre completamente seco.

## Capítulo 4. Análisis Experimental de Cables de Acero

Luego de realizar ensayos a tracción de los cables de acero y aluminio descritos, y con el uso de instrumentos para captar las deformaciones locales y globales de éstos, se obtuvo una serie de gráficos con sus respectivos análisis tanto cuantitativo como cualitativo.

### 4.1. Desempeño de los cables de Acero de diámetros 9.5 mm y 12.7 mm

De los ensayos realizados a los cables que se encontraban sin daño alguno se obtuvo la relación entre la tensión y la deformación, tanto de tres hebras del cable con el uso de strain gauges para determinar el comportamiento local como del global con el uso de extensómetro y LVDT.

Para el cable de 9.5 mm de diámetro, se realizaron tres ensayos, de éstos se obtuvo la curva tensión-deformación que incorpora la información de tres Strain Gauges (según la disposición mostrada) y dos extensómetros (representados por los colores azul y rojo), la que se aprecia en la Figura 12. De los datos mostrados en el gráfico se desprenden los valores de los módulos de elasticidad conseguidos a partir de los datos registrados por cada uno de los strain gauges y extensómetros, los que se muestran en la Tabla 4, obteniéndose un valor del módulo de elasticidad de 186.556 [MPa] para el caso de los datos adquiridos con uso de strain gauges y valores menores con uso de extensómetros.

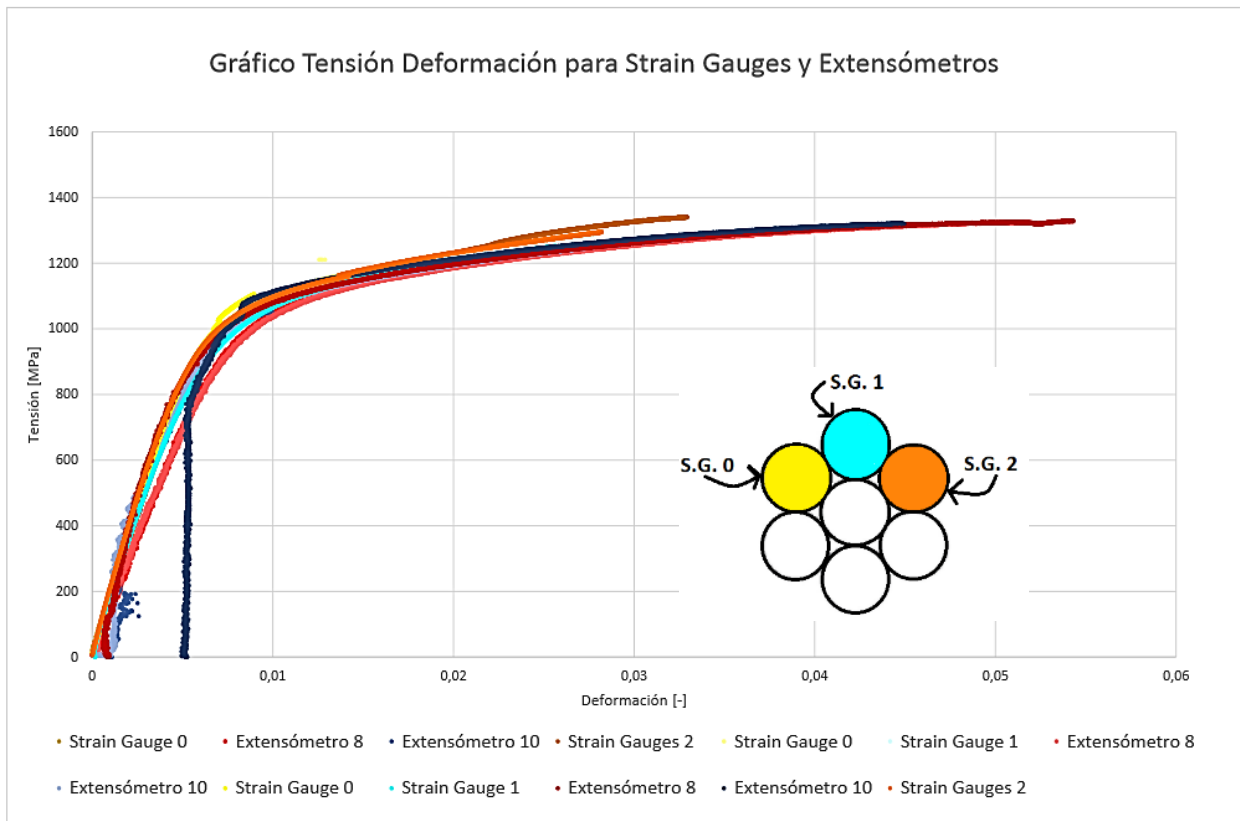


Figura 12: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 9.5 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges y dos Extensómetros

Tabla 4: Módulos de Elasticidad para el Cable de Acero de 9.5 mm de diámetro

Módulo de Elasticidad [MPa]				
Ensayo	Strain Gauges		Extensómetro 8	Extensómetro 10
AC1	Strain Gauge 0	180.980	148.109	175.092
	Strain Gauge 1	-		
	Strain Gauge 2	168.832		
AC2	Strain Gauge 0	186.556	141.714	195.103
	Strain Gauge 1	189.782		
	Strain Gauge 2	-		
AC3	Strain Gauge 0	186.932	195.084	-
	Strain Gauge 1	175.966		
	Strain Gauge 2	198.437		
	<b>Mediana</b>	<b>186.556</b>	<b>148.109</b>	<b>185.098</b>

De manera análoga, para el cable de acero de 12.7 mm de diámetro, se realizó dos ensayos, de éstos se obtuvo la curva tensión-deformación que incorpora la información de tres Strain Gauges (según la disposición mostrada), dos extensómetros y LVDT (representados por los colores azul, rojo y verde, respectivamente), la que se aprecia en la Figura 13. De los datos mostrados en el gráfico se desprenden los valores de los módulos de elasticidad conseguidos a partir de los datos registrados por cada uno de los strain gauges, extensómetros y LVDT, los que se muestran en la Tabla 5, obteniéndose un valor del módulo de elasticidad de 198.578 [MPa] para el caso de los datos adquiridos con uso de strain gauges y valores menores con uso de extensómetros y LVDT.

Los valores más bajos de módulo de elasticidad obtenidos con el uso de extensómetros y LVDT se deben a que corresponden a módulos “efectivos” que representa el comportamiento global del cable, considerando la interacción de los alambres y la disposición helicoidal que éstos poseen. Por lo tanto, tiene sentido que sean menores a los obtenidos con los strain gauges ya que éstos a diferencia del otro instrumento estudian el comportamiento local en el alambre. Cabe destacar que los valores obtenidos de los extensómetros son bastante variados, no así los determinados por los LVDT, esto se puede deber a que los primeros no poseen un buen agarre al cable siendo este muy inestable.

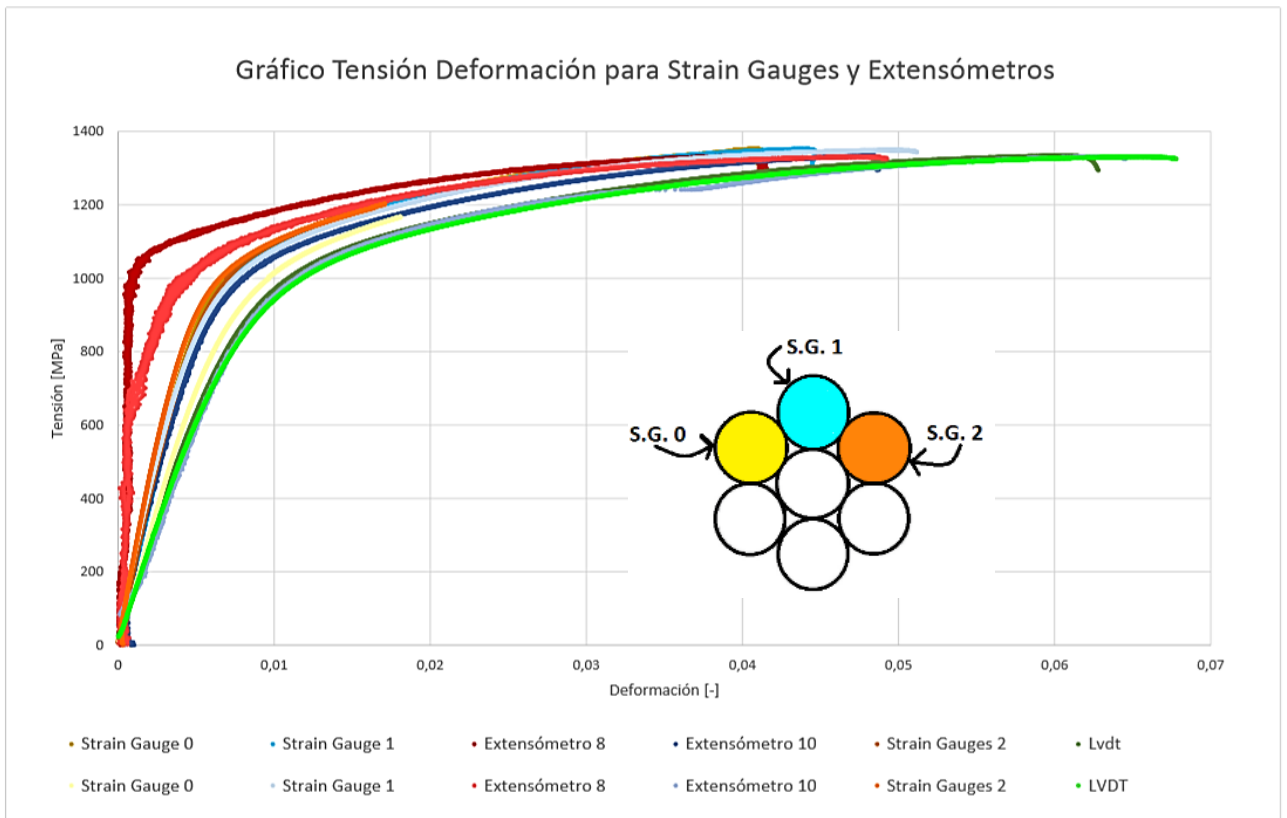


Figura 13: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 12.7 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, dos Extensómetros y LVDT

Tabla 5: Módulos de Elasticidad para el Cable de Acero de 12.7 mm de diámetro

<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>					
<b>Ensayo</b>	<b>Strain Gauges</b>	<b>Extensómetro 8</b>	<b>Extensómetro 10</b>	<b>LVDT</b>	
<b>AC1</b>	<b>Strain Gauge 0</b>	205.510	-	196.129	131.703
	<b>Strain Gauge 1</b>	181.251			
	<b>Strain Gauge 2</b>	198.220			
<b>AC2</b>	<b>Strain Gauge 0</b>	151.036	200.677	119.003	129.250
	<b>Strain Gauge 1</b>	198.935			
	<b>Strain Gauge 2</b>	204.023			
	<b>Mediana</b>	<b>198.578</b>	<b>200.677</b>	<b>157.566</b>	<b>130.477</b>

## 4.2. Gráficos de Deformación vs Carga

Siguiendo el patrón de daños y la ubicación de los strain gauges señalada en la Figura 9, se obtuvo una serie de gráficos de deformación en función de la carga de la máquina tanto para los cables de 9.5 mm de diámetro como los de 12.7 mm. Las curvas se presentan de esta manera como forma de replicar los estudios generados en el artículo <<Wire failures in ropes and their influence on local wire strain behaviour in tension-tension fatigue>> [7] descrito en la revisión bibliográfica, y se utilizará para todos los cables ensayados. Además, se mostrarán los datos para un cierto rango de cargas de modo de apreciar la variación en las deformaciones en cada uno de los instrumentos. En los anexos se muestran las curvas completas.

Luego de mostrar los gráficos, para cada diámetro del cable analizado, se muestran tablas con los factores de deformación determinados a partir de estos mismos. De los gráficos se desprende un análisis cualitativo determinado a partir de las deformaciones de cada strain gauges representadas por cada color, según su posición y nivel de daño; y de las tablas se logra determinar un análisis cuantitativo del comportamiento encontrado.

Cabe destacar, que para todos los gráficos mostrados se mantiene uno de los ensayos realizados en los cables sin daño de modo de ir comparando las deformaciones y cargas conseguidas por la inducción de los daños.

### 4.2.1. Gráficos de Deformación vs Carga para Cables de 9.5 mm de diámetro

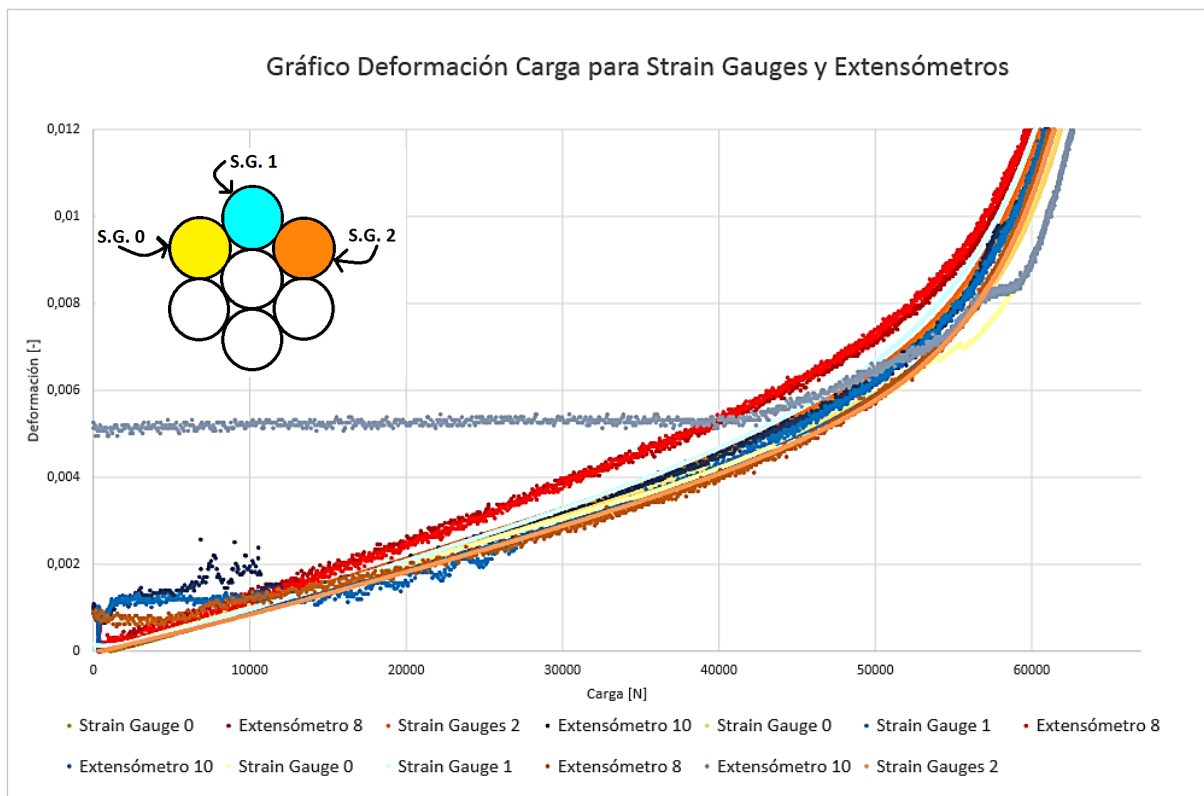


Figura 14: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros



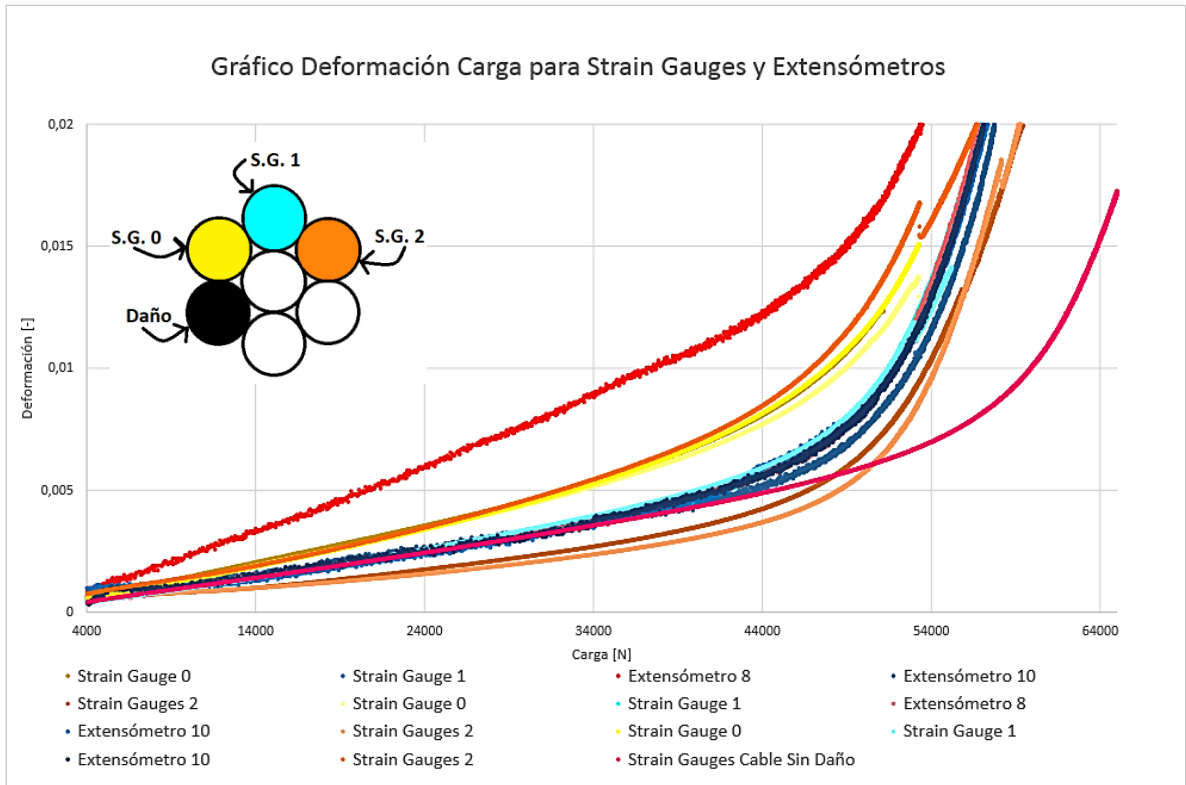


Figura 15: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros

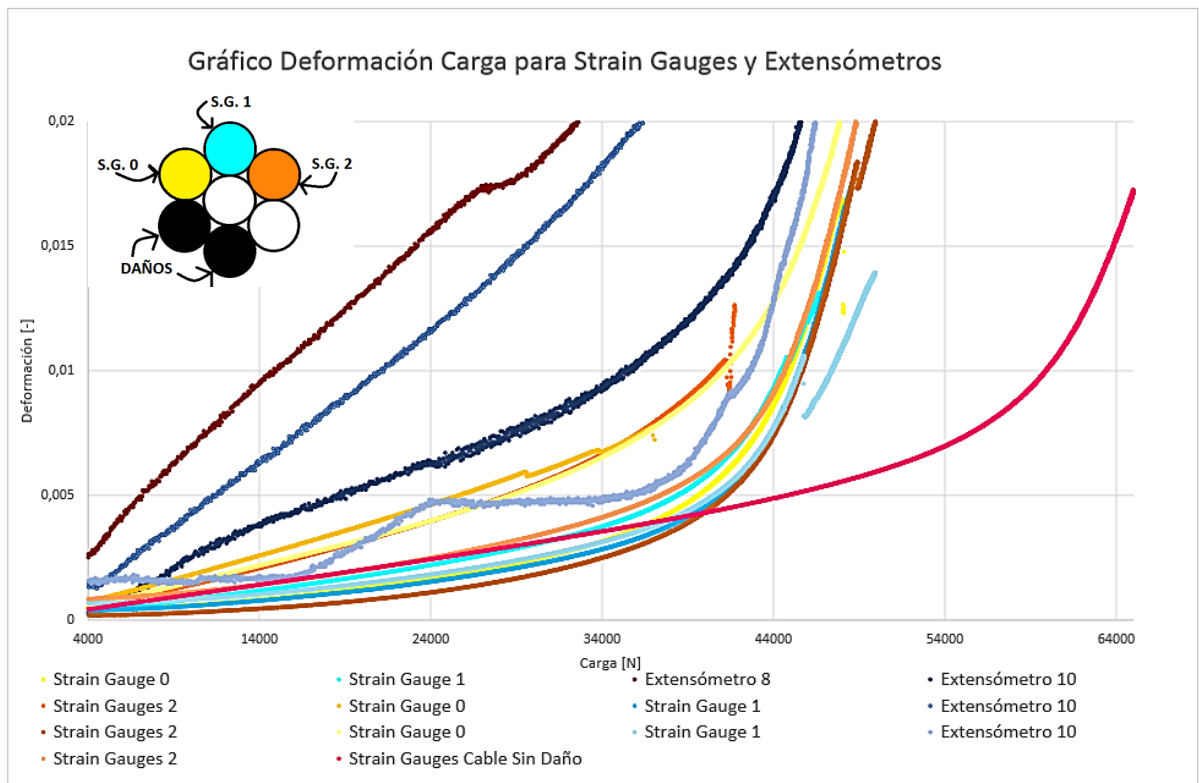


Figura 16: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros

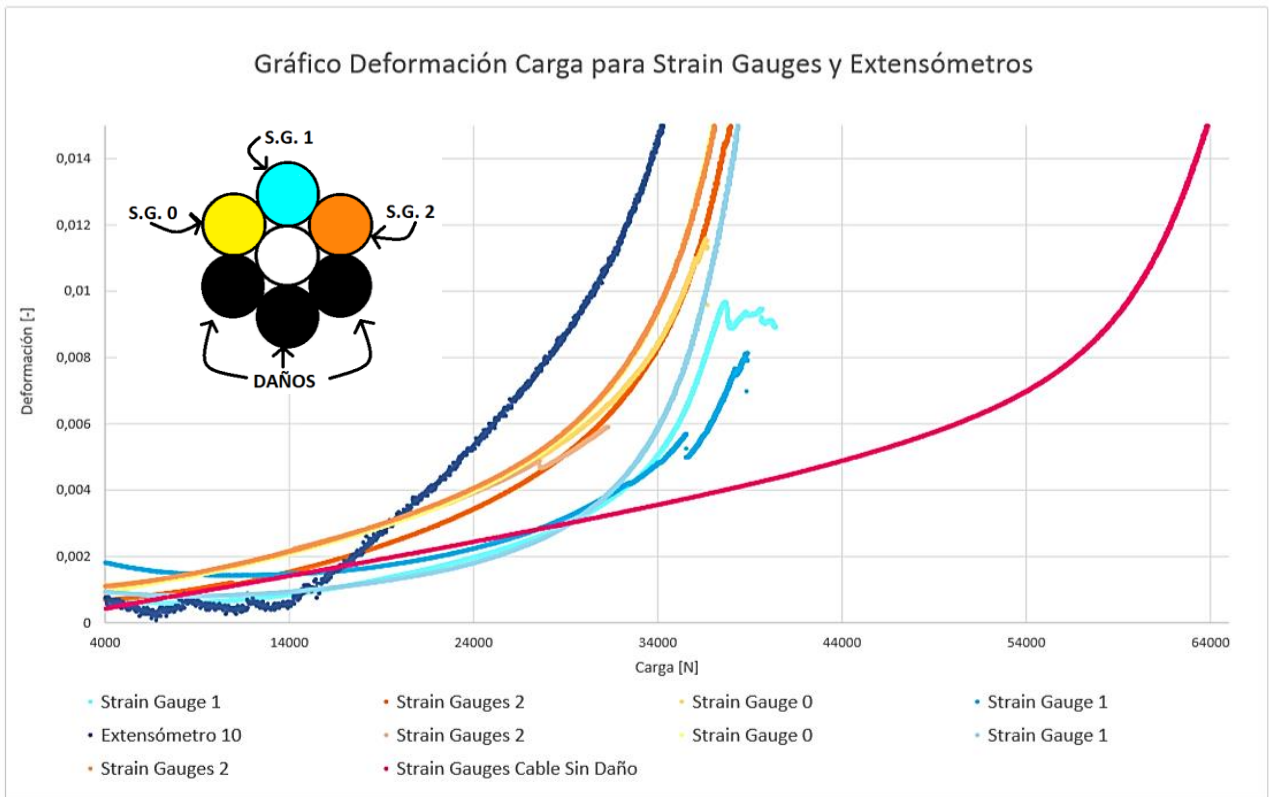


Figura 17: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros

De los valores de las deformaciones obtenidos de cada uno de los strain gauges utilizados para mismos niveles de carga, se rescataron deformaciones dentro del rango lineal las cuales fueron normalizadas junto con las cargas en función de valores obtenidos de los strain gauges de los ensayos de cable no dañados, desprendiéndose así los factores de amplificación de las deformaciones mostrados en las Tabla 6. Cabe destacar que se escogió trabajar con las deformaciones en el rango lineal, porque es el nivel en donde los cables trabajan y además porque cuando se analizan las curvas para cargas cercanas a las máximas éstas tienden a juntarse, con lo cual no se puede generar una diferenciación en los comportamientos.

De las tablas es importante analizar cómo los valores se ven modificados para un mismo strain gauge con el aumento de los daños, ya que representan una misma posición dentro del cable. Además, se puede distinguir si se encuentran en compresión o tracción con respecto al comportamiento del cable sin daño dependiendo si el factor es menor o mayor a 1, respectivamente.

Tabla 6: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Acero de 9.5 mm de diámetro

<b>Acero 9.5 mm de diámetro</b>									
<b>Factor de Amplificación de Deformaciones [-]</b>									
Carga/Carga max [-]	<b>Acero 9.5 mm 1-D AC4</b>			<b>Acero 9.5 mm 1-D AC5</b>			<b>Acero 9.5 mm 1-D AC6</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,165	1,417	1,000	0,745	1,368	0,972	0,745	1,296	0,964	1,296
0,247	1,504	1,000	0,729	1,464	1,054	0,684	1,462	1,066	1,462
0,329	1,459	1,007	0,724	1,382	0,984	0,638	1,443	1,049	1,443
0,411	1,471	1,048	0,727	1,408	0,965	0,643	1,505	1,093	1,505
0,494	1,507	1,092	0,777	1,470	1,004	0,685	1,575	1,131	1,575
0,576	1,566	1,133	0,826	1,505	1,086	0,727	1,656	1,178	1,505
<b>Factor de Amplificación de Deformaciones [-]</b>									
Carga/Carga max [-]	<b>Acero 9.5 mm 2-D AC7</b>			<b>Acero 9.5 mm 2-D AC8</b>			<b>Acero 9.5 mm 2-D AC9</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,165	0,565	0,810	1,433	1,781	0,551	0,313	1,538	0,751	1,000
0,206	0,590	0,836	1,494	1,824	0,556	0,329	1,554	0,724	1,000
0,247	0,627	0,866	1,635	1,937	0,570	0,382	1,630	0,750	1,000
0,329	0,687	0,911	1,614	1,870	0,610	0,447	1,626	0,748	1,000
0,370	0,717	0,942	1,667	1,967	0,674	0,525	1,681	0,725	1,063
0,411	0,772	1,013	1,736	1,886	0,707	0,579	1,732	0,820	1,061
<b>Factor de Amplificación de Deformaciones [-]</b>									
Carga/Carga max [-]	<b>Acero 9.5 mm 3-D AC10</b>			<b>Acero 9.5 mm 3-D AC11</b>			<b>Acero 9.5 mm 3-D AC12</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,165	0,000	0,579	0,992	1,554	1,157	1,554	1,542	0,709	1,542
0,192	0,000	0,603	1,020	1,553	1,006	1,553	1,532	0,669	1,532
0,219	0,000	0,638	1,126	1,534	0,920	1,534	1,525	0,626	1,525
0,260	0,000	0,709	1,233	1,556	0,915	1,556	1,582	0,660	1,582
0,302	0,000	0,750	1,337	1,565	0,886	1,565	1,588	0,698	1,588

## 4.2.2. Gráficos de Deformación vs Carga para Cables de 12.7 mm de diámetro

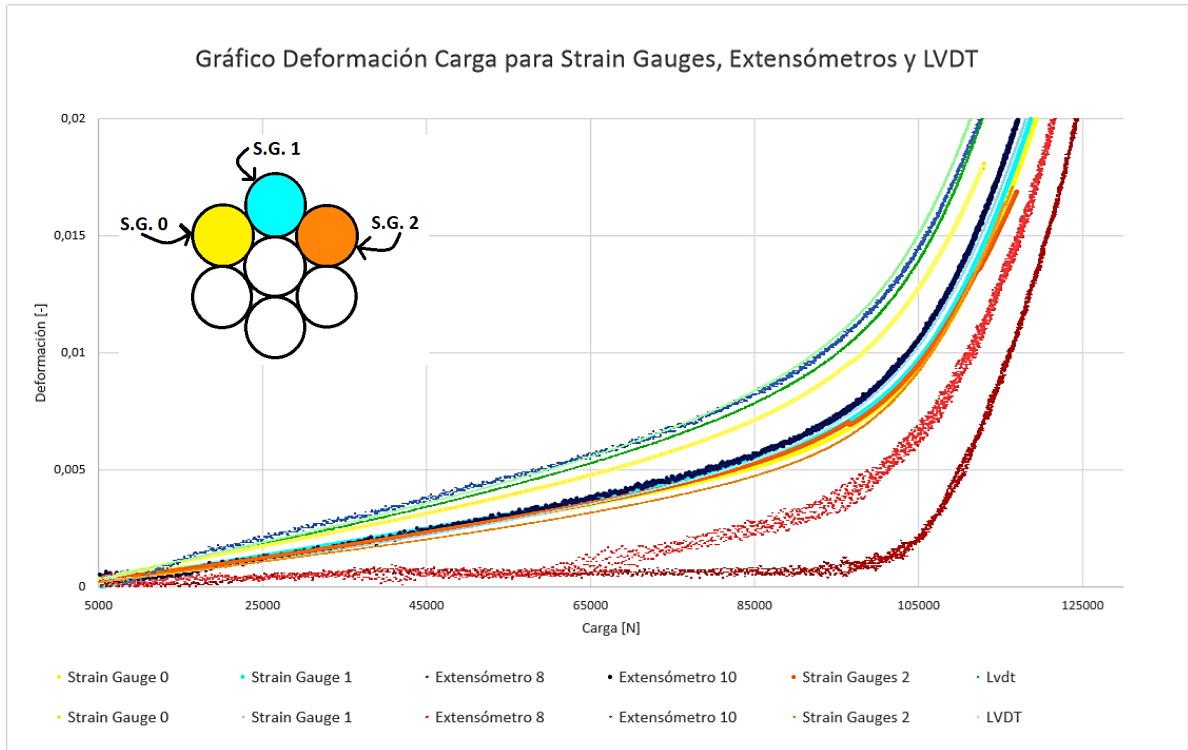


Figura 18: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

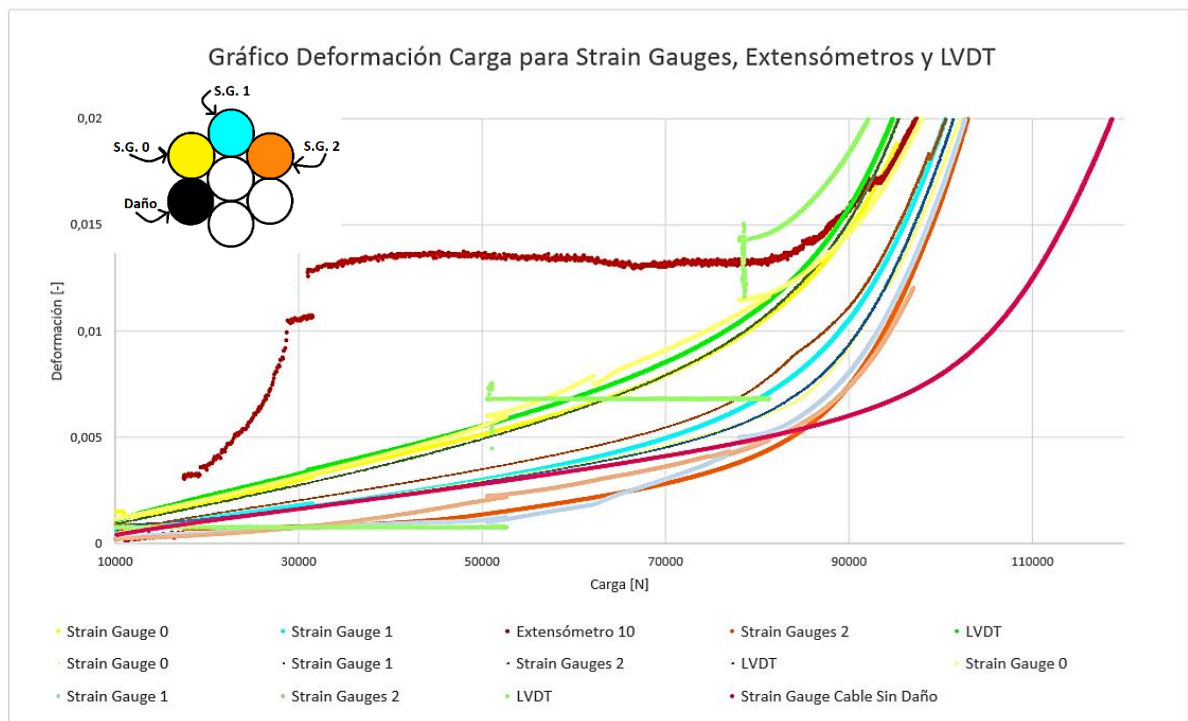


Figura 19: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

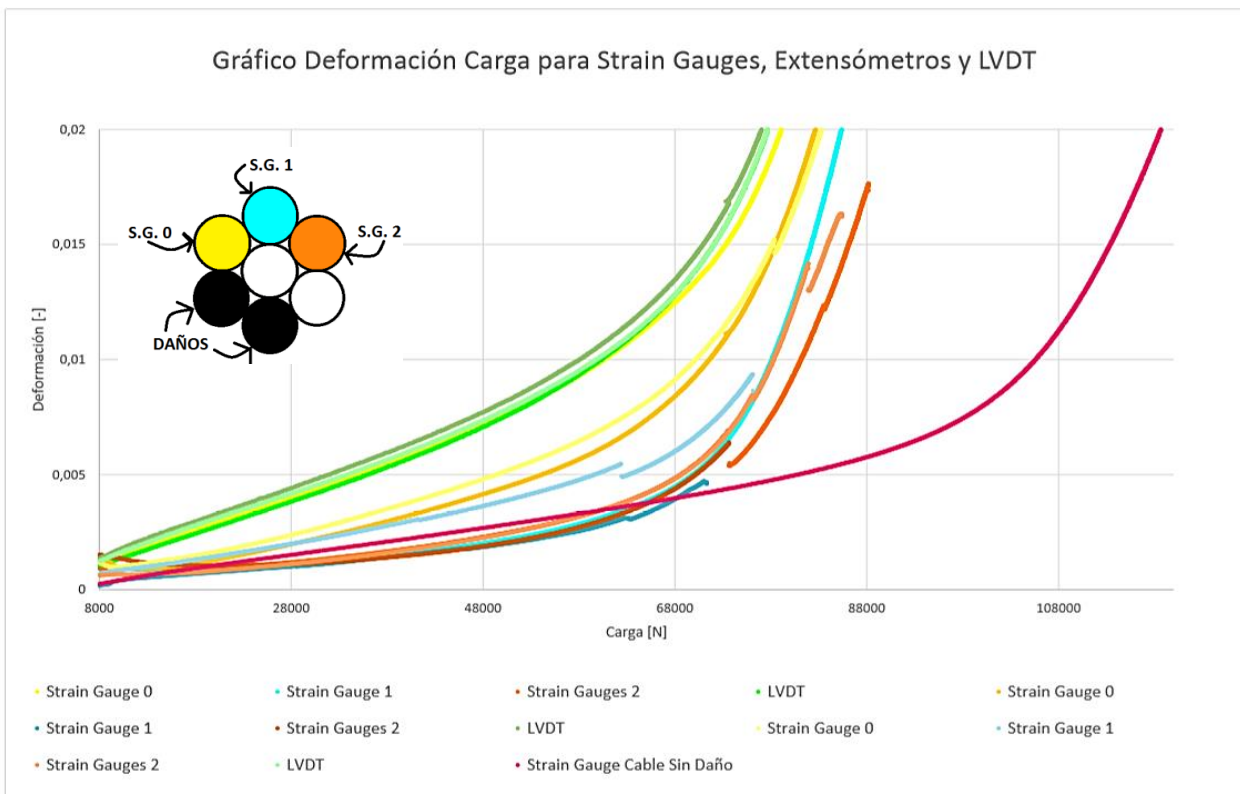


Figura 20: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

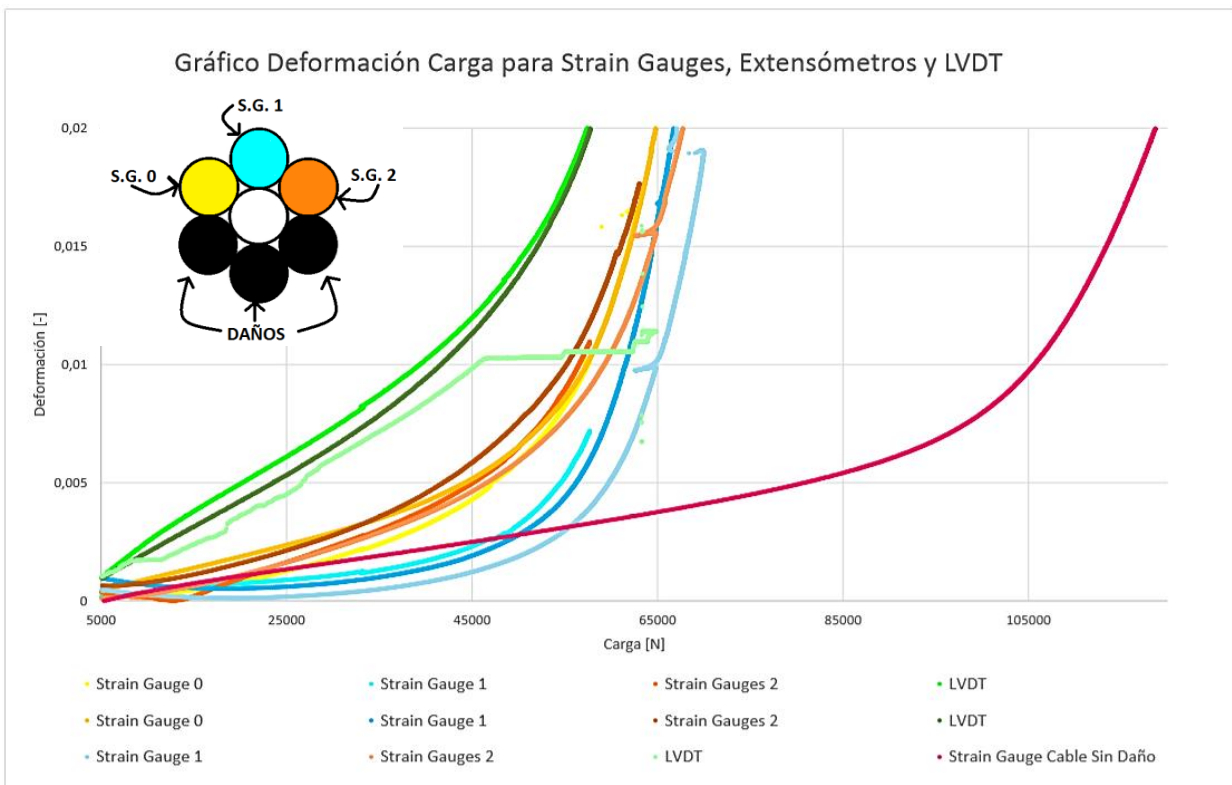


Figura 21: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

Análogamente a los datos obtenidos de la Tabla 8, la Tabla 9 muestra los factores de amplificación de deformaciones los cables de 12.7 mm de diámetro.

Tabla 7: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Acero de 12.7 mm de diámetro

<b>Acero 12.7 mm de diámetro</b>									
	<b>Factor de Amplificación de Deformaciones [-]</b>								
Carga/Carga max [-]	<b>Acero 12.7 mm 1-D AC3</b>			<b>Acero 12.7 mm 1-D AC4</b>			<b>Acero 12.7 mm 1-D AC5</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,153	1,785	1,000	0,963	0,951	1,042	1,252	1,993	0,366	0,366
0,230	1,839	1,000	0,448	0,994	0,994	1,273	1,939	0,458	0,458
0,306	1,872	1,000	0,445	1,005	1,005	1,233	1,963	0,426	0,594
0,383	1,830	1,074	0,493	1,018	1,018	1,252	1,950	0,402	0,706
0,459	1,875	1,087	0,583	1,064	1,064	1,262	2,128	0,496	0,816
0,536	1,912	1,208	0,689	1,104	1,104	1,342	2,243	0,752	0,874
0,612	2,077	1,371	0,847	1,202	1,202	1,466	2,347	0,927	0,927
0,689	2,500	1,767	1,210	1,567	1,567	1,864	0,242	1,333	1,245
	<b>Factor de Amplificación de Deformaciones [-]</b>								
Carga/Carga max [-]	<b>Acero 12.7 mm 2-D AC6</b>			<b>Acero 12.7 mm 2-D AC7</b>			<b>Acero 12.7 mm 2-D AC8</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,153	2,724	1,000	1,000	1,188	0,676	0,969	1,435	1,325	0,750
0,230	2,606	0,773	0,773	1,309	0,691	0,691	1,291	1,212	0,715
0,306	2,662	0,708	0,708	1,461	0,671	0,671	1,717	1,352	0,776
0,383	2,649	0,851	0,851	1,574	0,709	0,709	1,809	1,348	0,851
0,459	2,915	0,904	1,000	1,808	0,664	0,871	2,012	1,487	1,003
0,536	3,155	1,311	1,311	2,306	1,068	1,214	2,420	1,578	1,286
	<b>Factor de Amplificación de Deformaciones [-]</b>								
Carga/Carga max [-]	<b>Acero 12.7 mm 3-D AC9</b>			<b>Acero 12.7 mm 3-D AC10</b>			<b>Acero 12.7 mm 3-D AC11</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,191	0,994	0,659	1,226	1,786	0,462	1,608	0,000	0,136	1,178
0,222	1,090	0,641	1,396	1,713	0,467	1,710	0,000	0,172	1,360
0,252	1,180	0,642	1,513	1,774	0,491	1,774	0,000	0,220	1,430
0,268	1,241	0,665	1,541	1,853	0,517	1,853	0,000	0,259	1,505
0,298	1,425	0,743	1,752	1,900	0,587	2,023	0,000	0,339	1,636
0,344	1,600	1,000	1,960	2,063	0,776	2,378	0,000	0,470	1,832

Para los ensayos realizados sin daño alguno en los cables, de las Figura 14 y Figura 18 se aprecia una superposición de las curvas de strain gauges, lo que muestra que todas las hebras de cada uno de los cables poseen un mismo comportamiento en cuanto a la deformación de éstos, tanto local como global, lo que se observa en las curvas de LVDT. Para el caso de los extensómetros en los cables de 12.7 mm, estos presentaron un mal agarre, observándose curvas con deformaciones más pequeñas que las del resto de los instrumentos.

Cuando se realiza el daño de una de las hebras en el cable el comportamiento varía, lo que se observa en las Figura 15 y Figura 19, donde las curvas de color amarillo que representan al strain gauges contiguo al daño (Strain Gauge 0, SG0) poseen mayor deformaciones con respecto a los otros strain gauges y con respecto a la curva del que no presenta daño. En el rango lineal, las curvas de color celeste (Strain Gauges 1, SG1) poseen un nivel de deformación parecido al de la curva sin daño, y para las curvas de color naranja (Strain Gauges 2, SG2), que miden la deformación de la hebra opuesta al daño ésta es mucho menor a todas las otras hebras e incluso con respecto a la hebra del cable que no posee daño alguno. Éste análisis cualitativo se ve confirmado con los datos de las Tabla 6 y Tabla 7 donde los valores de los factores de amplificación son mayores que 1 para los SG0, parecidos a 1 para los SG1 y menores a 1 para los SG2, aunque hay curvas que se escapan de este comportamiento como lo son el SG2 en AC6 del cable de 9.5 mm de diámetro y los SG2 y SG1 de los ensayos AC4 y AC5 respectivamente del cable de 12.7 mm de diámetro.

Para los especímenes con dos daños (ver Figura 16 y Figura 20), la hebra contigua al daño presenta deformaciones notoriamente mayores, las hebras representadas por el color celeste y naranja son opuestas a los daños y poseen deformaciones parecidas entre sí y con deformaciones menores o iguales a la de la curva del cable sin daño. Respaldando este comportamiento con las tablas ya mencionadas, los SG0 presenta factores de amplificación sobre 1 y los SG1 y SG2 factores iguales o menores que 1, excepto para el ensayo del cable AC7 de 9.5 mm de diámetro y el SG1 del cable AC8 de 12.7 mm de diámetro.

Cuando el daño es mayor, ya con la mitad de las hebras de la última capa dañadas (ver Figura 17 y Figura 21), las hebras representadas por los colores amarillo y naranja son contiguas a los daños y la celeste opuesta. Las primeras poseen grandes deformaciones, notoriamente mayores a la del cable sin presencia del daño, y la hebra opuesta a los daños se deforma menos inclusive en comparación al cable sin daño. En las tablas este comportamiento se representa por valores de factores de amplificación para los SG0 y SG2 mayores que 1 y los del SG1 menores o iguales a 1.

### 4.3. Efecto Daño

#### 4.3.1. LVDT

Para los diferentes niveles de daños se determinó la curva de carga versus deformación con uso de LVDT, las que se muestran en las Figura 22 y Figura 23 para los cables de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro, respectivamente. Estas gráficas exponen una disminución de la resistencia residual y una variación en las deformaciones con el aumento de los daños y del nivel de asimetría que éste provoca en los cables. Más adelante, se analizan los valores las capacidades máximas obtenidas en cada uno de los ensayos y a las deformaciones alcanzadas en esos puntos.

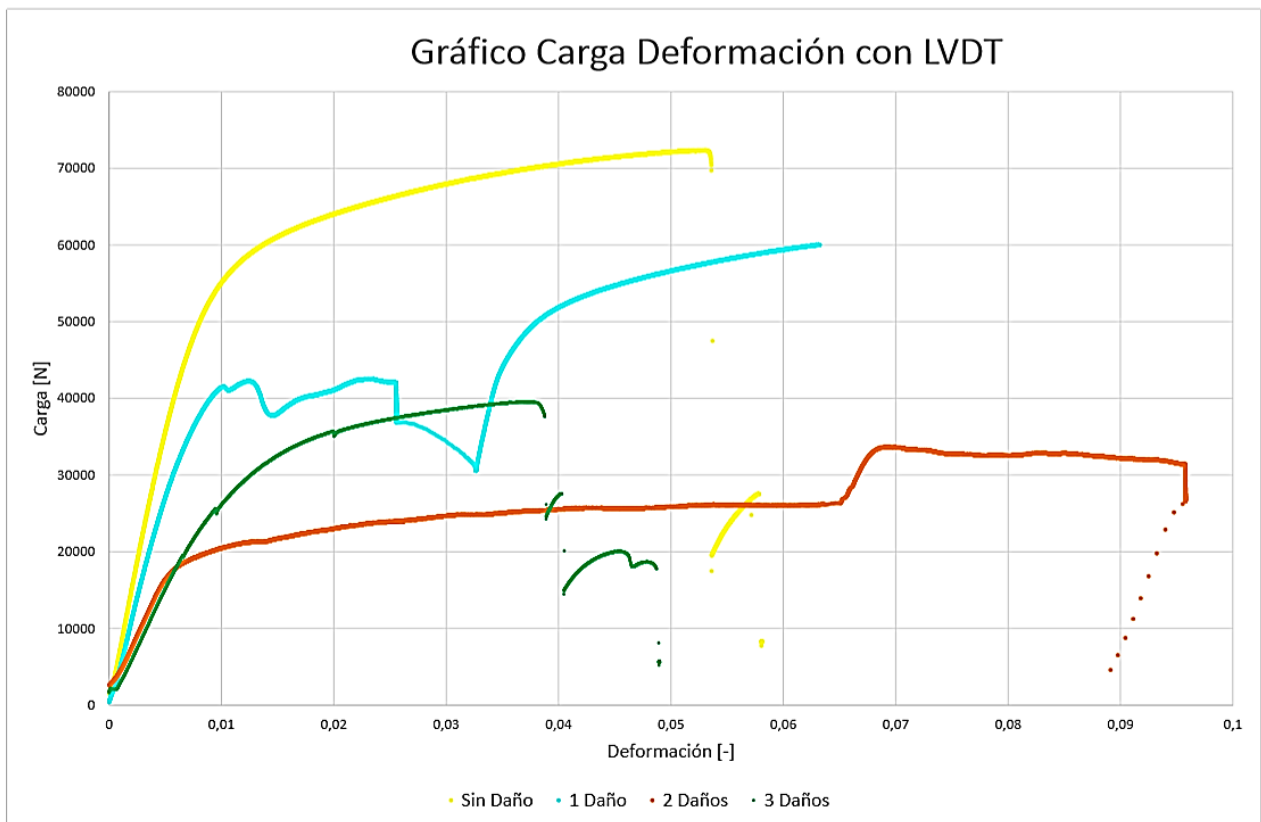


Figura 22: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Acero de 9.5 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño



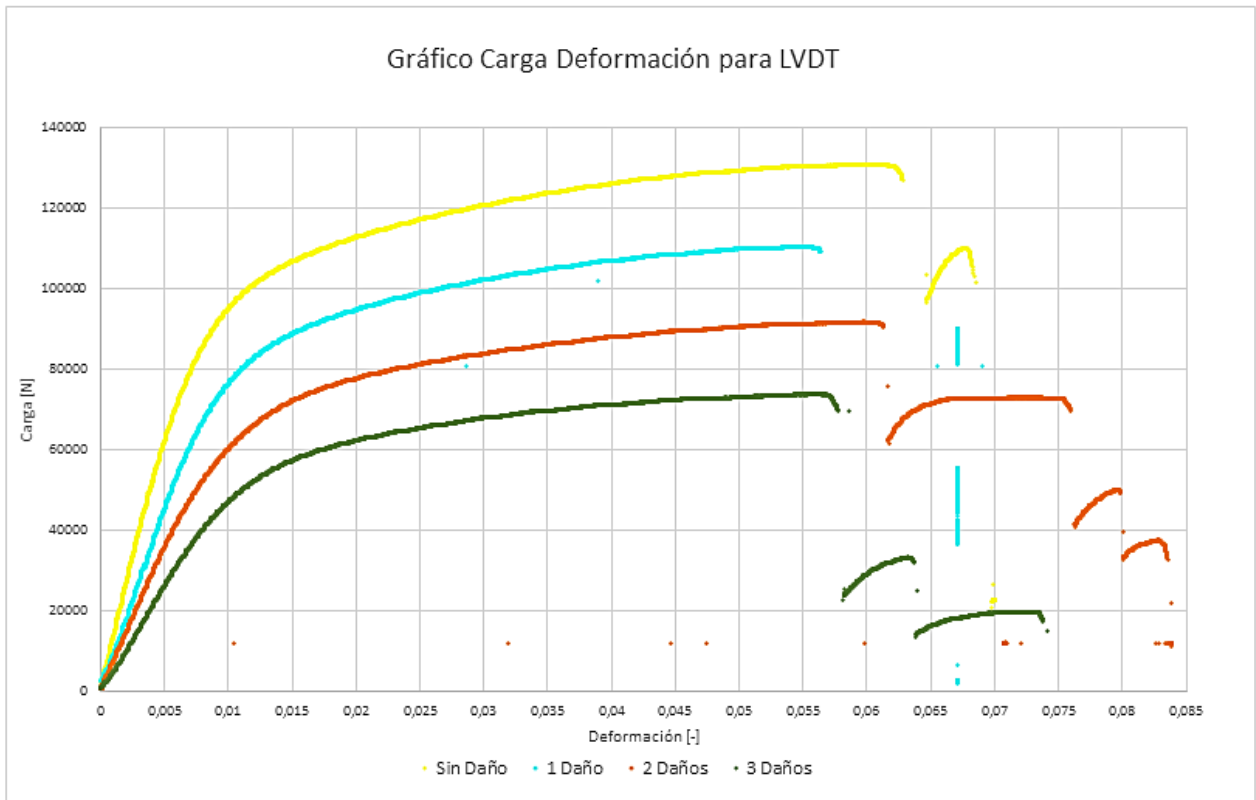


Figura 23: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Acero de 12.7 mm con el uso de LVDT para diferentes

Para el caso de la Figura 22 se observa una gran distorsión para los ensayos de uno y dos daños debido a que los cables deslizaron. En cambio en la Figura 23 se aprecia el comportamiento esperado, disminución de la resistencia residual a medida que aumenta la cantidad de daños realizados en los cables. Con respecto a las deformaciones, no se aprecia un comportamiento en particular, considerando las que se obtienen al final del ensayo. Cabe destacar que las bajas en las curvas con respecto a la carga se deben a que la rotura de los cables no se realiza de manera abrupta, sino que muchas veces es de a pocas hebras.

El hecho de que deslizaran algunos de los cables de 9.5 mm en los ensayos realizados muestra que la eficiencia de las terminales de vaciado del 100% descrita de la Figura 4 no es tal. Existen variables que influyen, sobre todo en las condiciones de borde de los cables que pueden estar ceñidas al bajo espesor de estos, lo que produce una baja superficie de adherencia entre los cables y la resina con la que se confeccionan los dispositivos, lo que puede generar que éstos deslicen. También pueden influir que la aplicación de la carga no sea perfectamente axial al cable, produciendo pequeñas flexiones adicionales que no son parte del comportamiento esperado del cable.

Con respecto a las resistencias residuales obtenidas en cada uno de los ensayos y a las deformaciones alcanzadas en esos puntos, se tienen las Tabla 8 y Tabla 9 que muestran estos valores que fueron conseguidos con el uso de extensómetro y LVDT respectivamente. Si bien los valores de las deformaciones no son representativos ya que no coinciden la deformaciones máximas con los puntos de carga máxima, si se aprecia el mismo fenómeno de los gráficos anteriores que corresponde a la de disminución de la

resistencia residual obtenida ante un aumento en los daños realizados en los cables, valores cercanos a los esperados en términos teóricos aunque la mayoría de las veces son menores a los esperados (como es analizado en el capítulo 6.1. Evolución de la carga máxima).

Con respecto a la rigideces, en ambos cables se observan valores reales menores a las esperadas de los cálculos teóricos. Los datos reales fueron obtenido de los gráficos de fuerza versus deformación unitaria con uso de LVDT donde la pendiente del rango lineal corresponde a la rigidez elástica. Para el valor teórico se ocupa una de las fórmulas propuestas en la publicación <<Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model>> [12], la que se muestra a continuación:

$$K_{\varepsilon\varepsilon} = (AE)_{alambre} + n * (AE)_{alambre} * (\cos \alpha)^3$$

En donde:

A: Área transversal del alambre

E: Módulo de Young del material

n: número de alambres no dañados en la capa exterior

$\alpha$ : ángulo del paso de alambres exteriores

Tabla 8: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Acero de 9.5mm de diámetro, realizados con uso de extensómetro y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica

CABLE	DAÑO	Extensómetro		Rigidez Elástica [N/m]	Teórico	
		Deformación en el punto de Carga Max [-]	Resistencia Residual [N]		Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]
AC1	S-D	0,044	72.264	7.000.000	72.946	9.945.855
AC2		0,051	72.748		72.946	
AC3		0,054	72.946		72.946	
AC4	1-D	0,08566	63.169	5.000.000	62.525	8.530.299
AC5		0,059	62.953		62.525	
AC6		0,045	62.577		62.525	
AC7	2-D	0,101	52.781	3.000.000	52.104	7.114.743
AC8		0,022	51.041		52.104	
AC9		0,063	53.319		52.104	
AC10	3-D	0,0165	38.752	3.000.000	41.684	5.699.187
AC11		0,035	42.770		41.684	
AC12		0,028	41.174		41.684	

Tabla 9: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Acero de 12.7mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica

CABLE	DAÑO	LVDT			Teórico	
		Deformación en el punto de Carga Max [-]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]
AC1	S-D	0,0612	130.718	10.000.000	130.718	18.850.591
AC2		0,0656	130.570	10.000.000	130.718	
AC3	1-D	0,0482	109.312	9.000.000	112.044	16.168.768
AC4		0,0602	111.196	10.000.000	112.044	
AC5		0,0771	111.913	1.000.000	112.044	
AC6	2-D	0,06021	91.694	7.000.000	93.370	13.486.944
AC7		0,07638	92.699	6.000.000	93.370	
AC8		0,06396	92.430	7.000.000	93.370	
AC9	3-D	0,02944	62.756	7.000.000	74.696	10.805.121
AC10		0,05979	70.417	5.000.000	74.696	
AC11		0,03838	69.968	4.000.000	74.696	

#### 4.4. Efecto Diámetro

A partir de las Tabla 6 y Tabla 7 se desprenden los valores promedios de los factores de deformación para cada strain gauges según tipo de daño, los que se muestran en la Tabla 10 y que están asociados a distintos índices de asimetría. De esos datos se obtienen los gráficos de las Figura 24, Figura 25 y Figura 26 que muestran de distinta perspectiva los valores obtenidos.

Tabla 10: Promedio de los Factores de Amplificación de Deformaciones para los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7mm de diámetro

Strain Gauge	PROMEDIO DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE DEFORMACIONES [-]					
	Acero 9.5 mm			Acero 12.7 mm		
	1-D	2-D	3-D	1-D	2-D	3-D
SG0	1,47	1,75	1,57	1,98	2,71	1,56
SG1	1,05	0,74	0,66	1,06	1,02	0,44
SG2	0,72	0,43	1,42	0,90	0,82	1,59
I.A.	0,20	0,38	0,50	0,20	0,38	0,50

Del gráfico de la Figura 24, se desprende que un aumento en el diámetro del cable produce un incremento del promedio del factor de amplificación de deformaciones, lo cual sucede en 7 de los 9 casos que se presentan, y se traduce en que los valores asociados a los puntos amarillos, verde y rojo (relacionados al cable de 12.7 mm, de mayor diámetro) se encuentran por encima de los otros puntos.

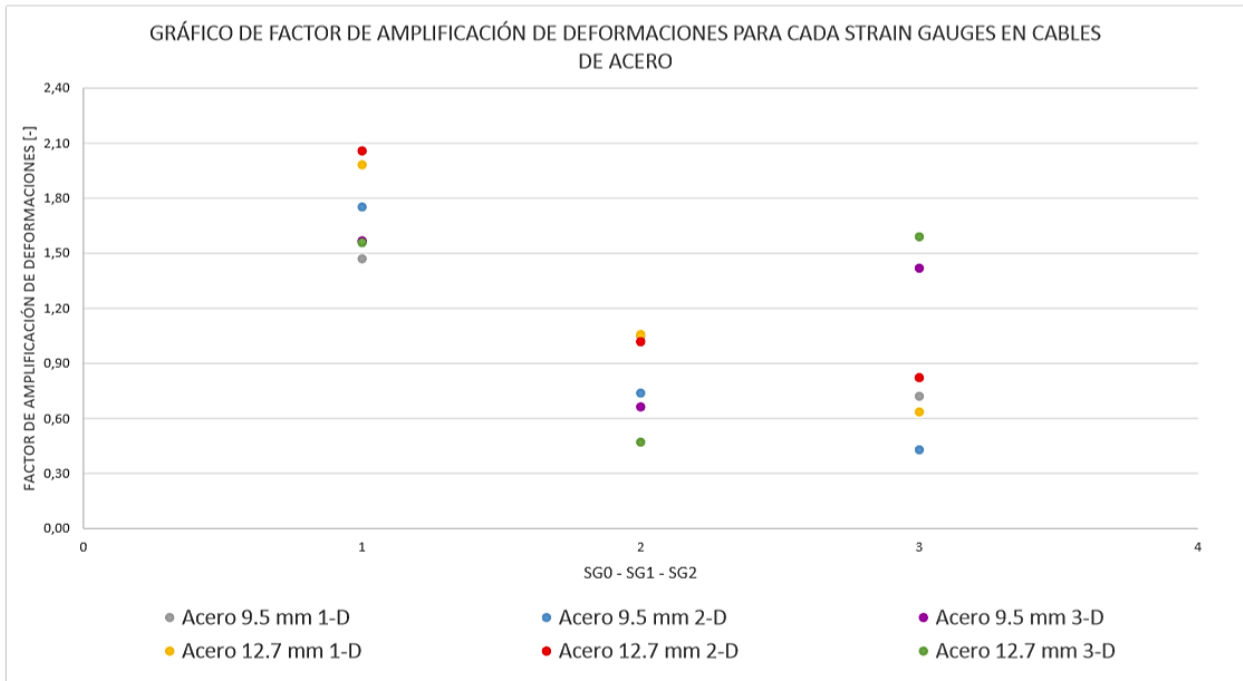


Figura 24: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro en función del tipo de daño.

En la Figura 25, se observa que el strain gauges SG1 siempre muestra los menores valores. Tiene que ver con que éste corresponde al sensor opuesto al daño, por lo que se aprecian compresiones. Además, se ve un leve aumento en los promedios de factores de deformaciones para un mismo nivel de daño con el incremento del diámetro del cable para todos los strain gauges que se utilizaron. Esto se traduce en que el rango de colores para los diferentes tipos de daño pasan de menores a mayores con el aumento del diámetro de 9.5 mm a 12.7 mm, por ejemplo, para tres daños pasa de tonos amarillos, marrón y gris a azul gris y amarillo, respectivamente. Cabe destacar que el incremento no es lineal ya que depende de la ubicación del strain gauges, donde el SG2 para un y dos daños es opuesto al daño pero para tres daños es adyacente.

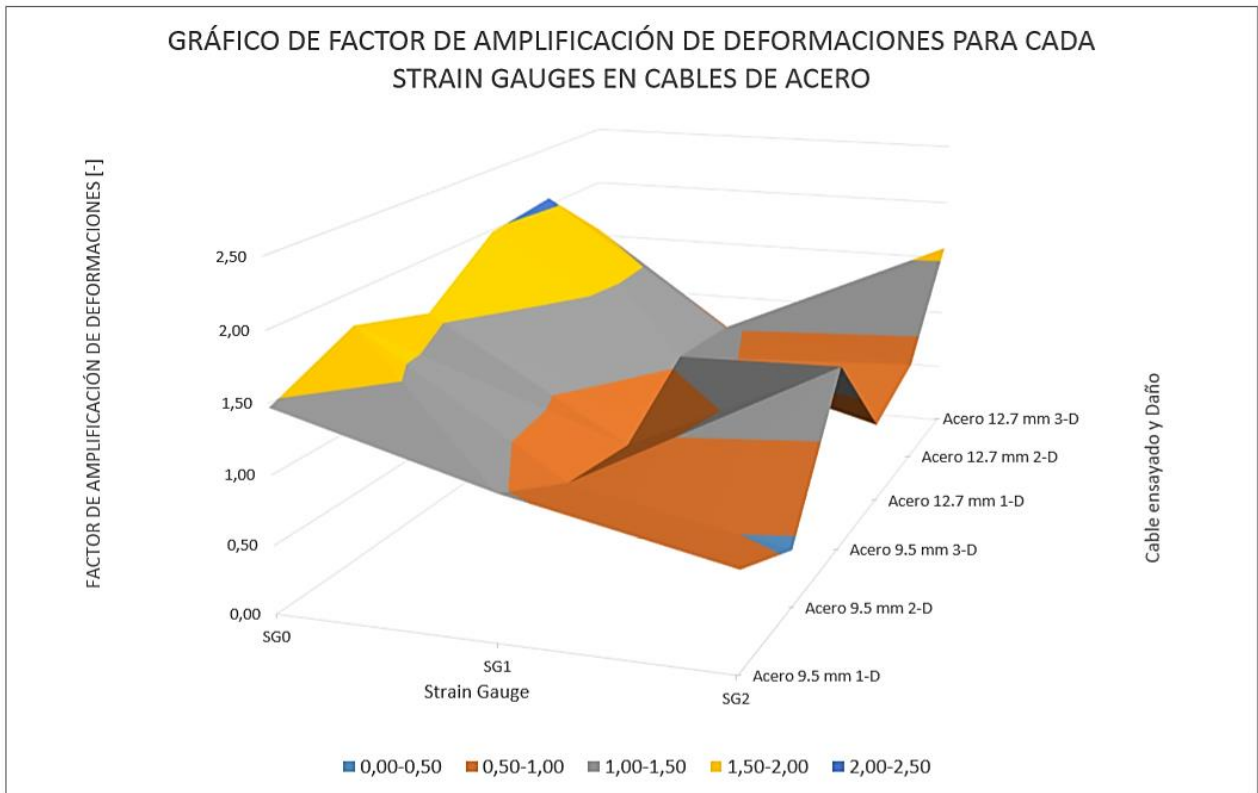


Figura 25: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro en función del tipo de daño e índice de asimetría.

Analizando el gráfico de la Figura 26, no se aprecia un efecto con respecto al índice de asimetría, sino que solamente corrobora el efecto diámetro que se ha analizado y que se distingue en la figura anterior analizada. Se observa que con el aumento del índice de asimetría (I.A.) para diferentes niveles de daño o diámetro, en algunos casos se incrementa el rango, en otros de mantiene o simplemente disminuye.

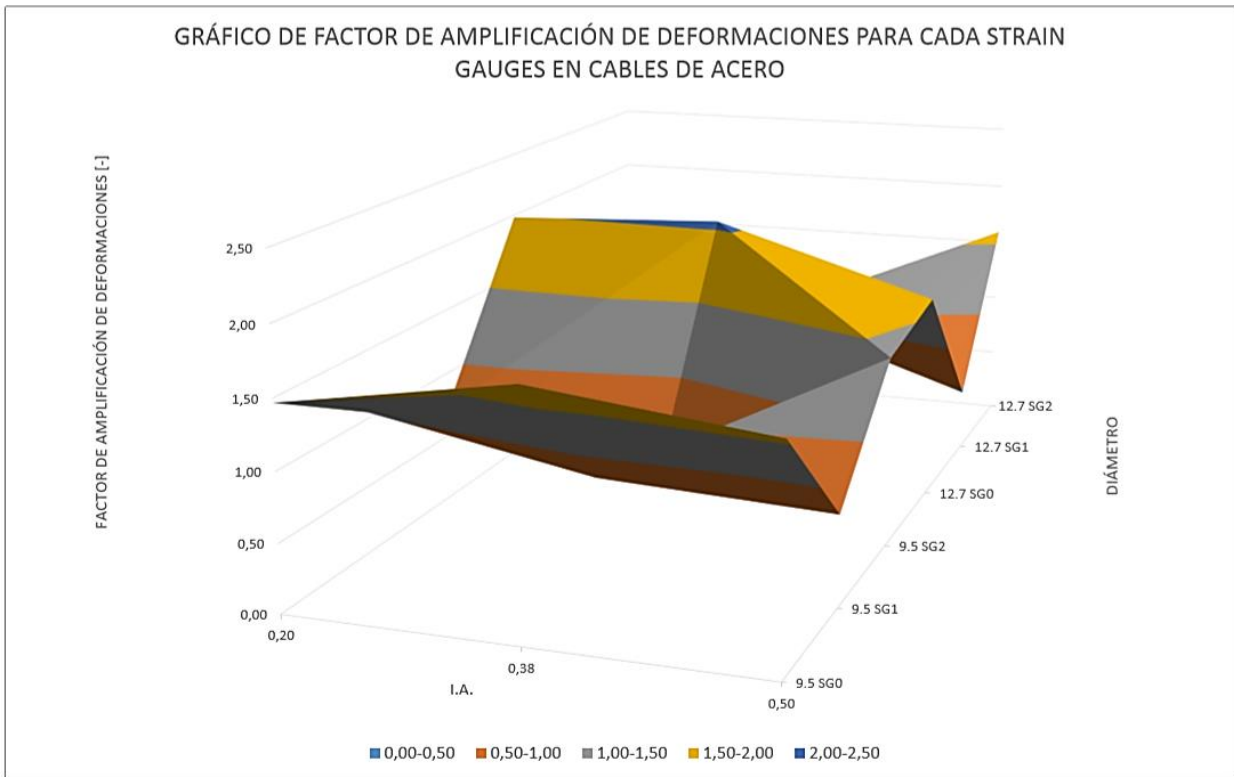


Figura 26: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero de 9.5 mm y 12.7 mm de diámetro en función del diámetro e I.A.

## Capítulo 5. Análisis Experimental de Cables de Aluminio

Siguiendo con el mismo análisis realizado a los cables de acero, se muestra a continuación el ejecutado a los cables de aluminio.

### 5.1. Desempeño de los Cables de Aluminio de diámetros 10.1 mm, 14.3 mm y 19.9 mm

Al igual que en los ensayos de cables de acero, los de aluminio realizados se encontraban sin daño alguno de lo cual se obtuvo la relación entre la tensión y la deformación, tanto de tres hebras del cable con el uso de strain gauges para determinar el comportamiento local como del global con el uso de extensómetro y LVDT.

Para el cable de 10.1 mm de diámetro, se realizó un solo ensayo del que se obtuvo la curva tensión-deformación que incorpora la información de tres Strain Gauges (según la disposición mostrada) y dos extensómetros (representados por los colores rojo y azul), la que se aprecia en la Figura 27. De los datos mostrados en el gráfico se desprenden los valores de los módulos de elasticidad conseguidos a partir de los datos registrados por cada uno de los strain gauges, extensómetros y LVDT, los que se muestran en la Tabla 11, obteniéndose un valor del módulo de elasticidad de 57.576 [MPa] para el caso de los datos adquiridos con uso de strain gauges y valores diferentes con uso de extensómetros y LVDT.

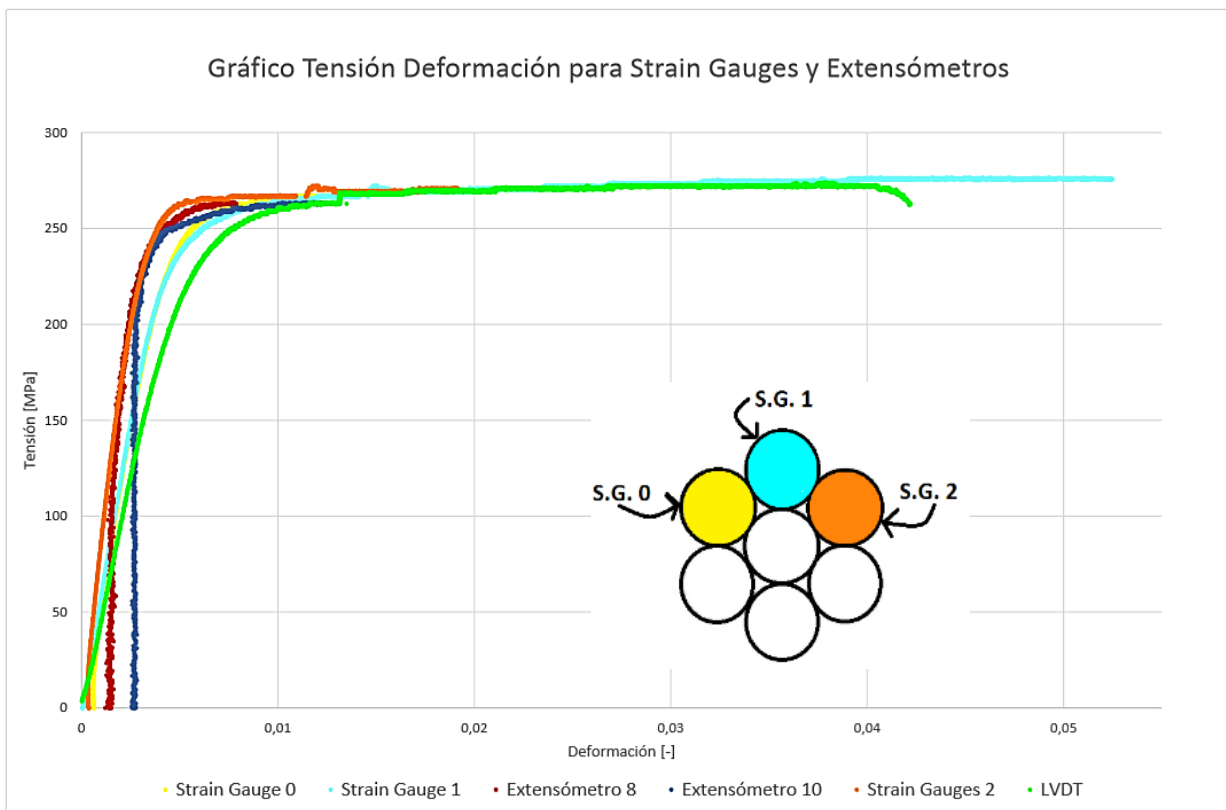


Figura 27: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 10.1 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, dos Extensómetros y LVDT

Tabla 11: Módulos de Elasticidad para el Cable de Aluminio de 10.1 mm de diámetro

Módulo de Elasticidad [MPa]					
Ensayo	Strain Gauges		Extensómetro 8	Extensómetro 10	LVDT
AL3	Strain Gauge 0	57.576	82.137	72.775	45.899
	Strain Gauge 1	56.337			
	Strain Gauge 2	82.738			
	<b>Mediana</b>	<b>57.576</b>	<b>82.137</b>	<b>72.775</b>	<b>45.899</b>

Para el cable de aluminio de 14.3 mm de diámetro se realizan tres ensayos, de éstos se obtuvo las curvas tensión-deformación que incorpora la información de tres strain gauges (según la disposición mostrada), dos extensómetros y LVDT (representados por los colores azul, rojo y verde, respectivamente), las que se aprecian en la Figura 28. De los datos mostrados en el gráfico se desprenden los valores de los módulos de elasticidad conseguidos a partir de los datos registrados por cada uno de los strain gauges, extensómetros y LVDT, los que se muestran en la Tabla 12, obteniéndose un valor del módulo de elasticidad de 77.198 [MPa] para el caso de los datos adquiridos con uso de strain gauges y valores menores con uso de extensómetros y LVDT.

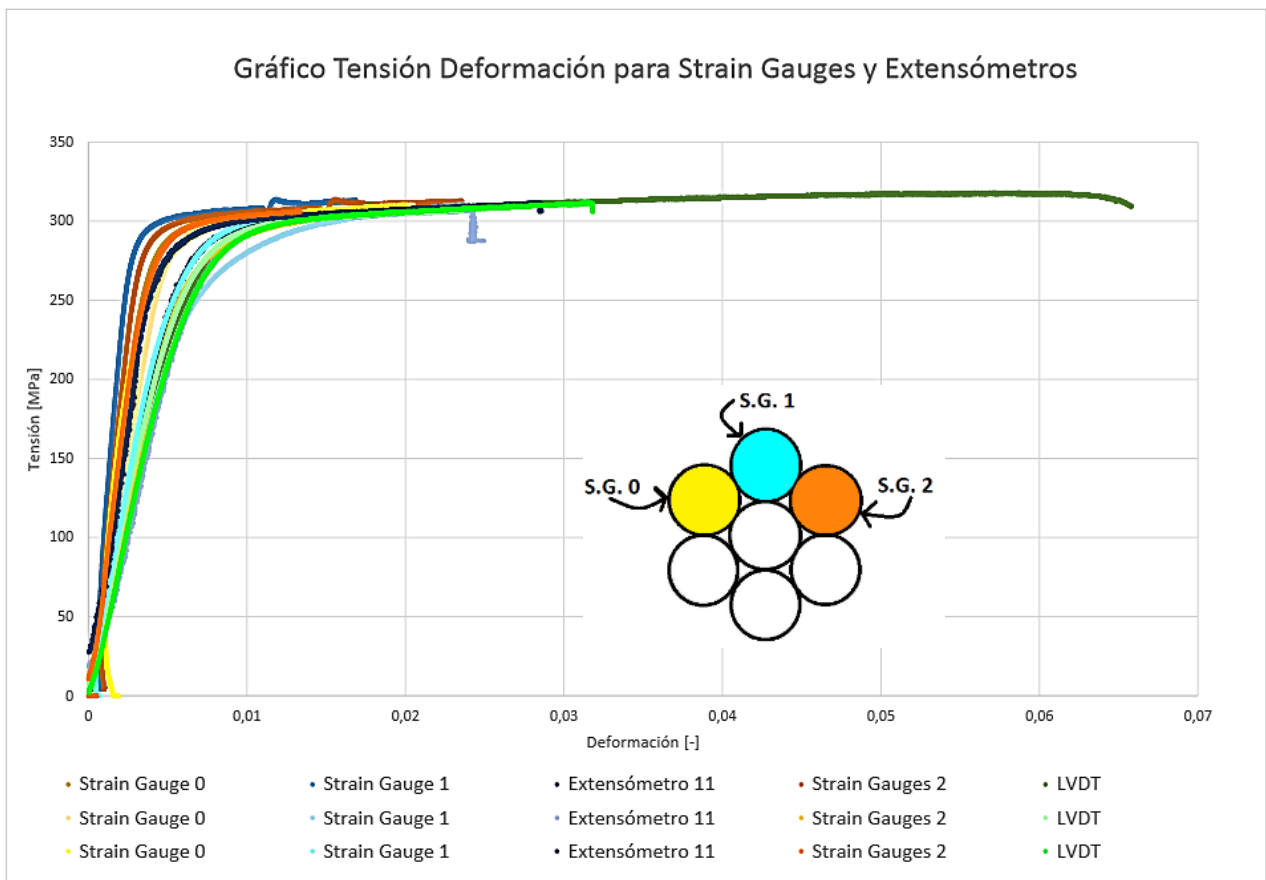


Figura 28: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 14.3 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, Extensómetro y LVDT



Tabla 12: Módulos de Elasticidad para el Cable de Acero de 14.3 mm de diámetro

<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>Strain Gauges</b>		<b>Extensómetro 11</b>	<b>LVDT</b>
<b>AL1</b>	<b>Strain Gauge 0</b>	77.408	49.968	46.078
	<b>Strain Gauge 1</b>	111.824		
	<b>Strain Gauge 2</b>	91.737		
<b>AL2</b>	<b>Strain Gauge 0</b>	59.641	40.483	49.972
	<b>Strain Gauge 1</b>	43.858		
	<b>Strain Gauge 2</b>	47.410		
<b>AL3</b>	<b>Strain Gauge 0</b>	83.052	68.542	42.874
	<b>Strain Gauge 1</b>	53.995		
	<b>Strain Gauge 2</b>	77.198		
<b>Mediana</b>		<b>77.198</b>	<b>49.968</b>	<b>46.078</b>

De manera análoga, para el cable de aluminio de tres capas de 19.9 mm de diámetro, se realizó tres ensayos, de éstos se obtuvo las curvas tensión-deformación que incorpora la información de tres Strain Gauges (según la disposición mostrada), un extensómetro y LVDT (representados por los colores azul, rojo y verde, respectivamente), la que se aprecia en la Figura 29. De los datos mostrados en el gráfico se desprenden los valores de los módulos de elasticidad para cada uno de los strain gauges, los que se muestran en la Tabla 13, obteniéndose un valor del módulo de elasticidad de 78.466 [MPa] para el caso de los datos adquiridos con uso de strain gauges y valores menores con uso de extensómetros y LVDT.

Al igual que para el caso de los cables de acero, en los de aluminio los valores más bajos de módulo de elasticidad obtenidos con el uso de extensómetros y LVDT se deben a que corresponden a módulos “efectivos” que representan el comportamiento global del cable, considerando la interacción de los alambres y la disposición helicoidal que éstos poseen. Por lo tanto, tiene sentido que sean diferentes a los obtenidos con los strain gauges ya que éstos a diferencia del otro instrumento estudian el comportamiento local en el alambre. Cabe destacar que los valores obtenidos de los extensómetros son bastante variados, no así los determinados por los LVDT, esto se puede deber a que los primeros no poseen un buen agarre al cable siendo este muy inestable.

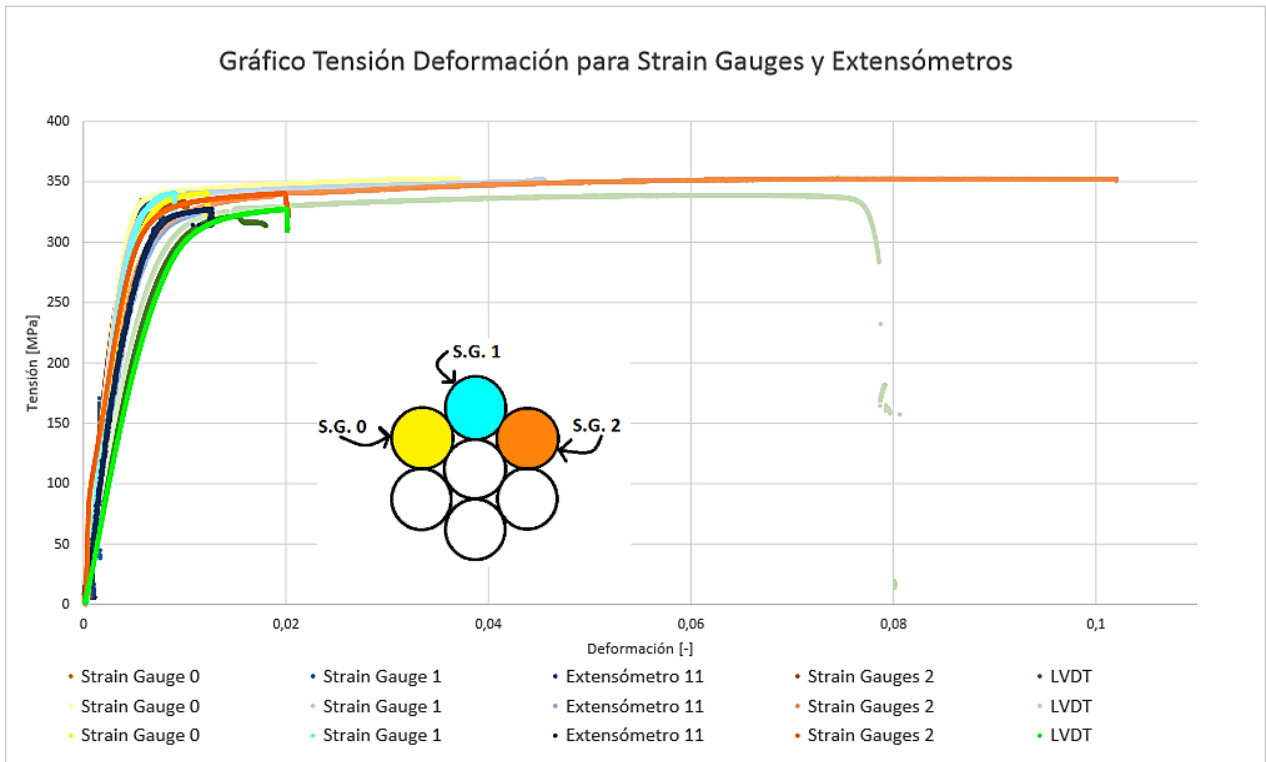


Figura 29: Gráfico Tensión-Deformación del Cable de 19,9 mm Sin Daño con el uso de 3 Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

Tabla 13: Módulos de Elasticidad para el Cable de Aluminio de 19,9 mm de diámetro

<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>				
Ensayo	Strain Gauges		Extensómetro 11	LVDT
<b>AL1</b>	Strain Gauge 0	79.149	66.679	42.451
	Strain Gauge 1	80.975		
	Strain Gauge 2	88.605		
<b>AL2</b>	Strain Gauge 0	81.977	55.737	44.041
	Strain Gauge 1	78.466		
	Strain Gauge 2	57.538		
<b>AL3</b>	Strain Gauge 0	72.641	57.521	39.462
	Strain Gauge 1	74.406		
	Strain Gauge 2	50.458		
<b>Mediana</b>		<b>78.466</b>	<b>57.521</b>	<b>42.451</b>

## 5.2. Gráficos de Deformación vs Carga

Siguiendo el patrón de daños y la ubicación de los strain gauges señalada en la Figura 9, se obtuvo una serie de gráficos de deformación en función de la carga de la máquina tanto para los cables de 10.1 mm, 14.3 mm y 19.9 mm de diámetro. Se mostrarán los datos para un cierto rango de cargas de modo de apreciar la variación en las deformaciones en cada uno de los instrumentos. En los anexos se muestran las curvas completas.

Las curvas que se presentan siguen la misma idea que la descrita para los cables de acero, por lo tanto habrá también un análisis cualitativo dado por los gráficos y cuantitativo determinado de las tablas que se desprenden de éstos. Igualmente se tiene que para todos los gráficos mostrados se mantiene uno de los ensayos realizados en los cables sin daño de modo de ir comparando las deformaciones y cargas conseguidas por la inducción de los daños.

### 5.2.1. Gráficos de Deformación vs Carga para Cables de 10.1 mm de diámetro

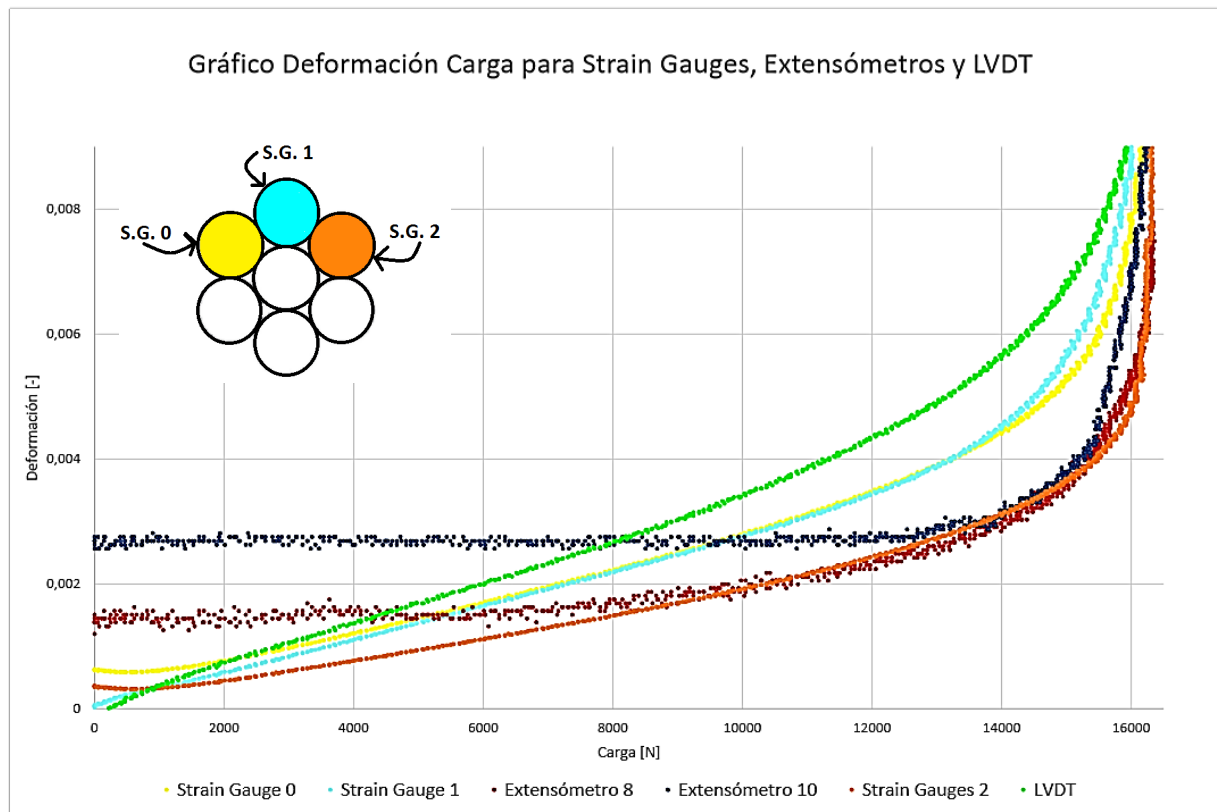


Figura 30: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

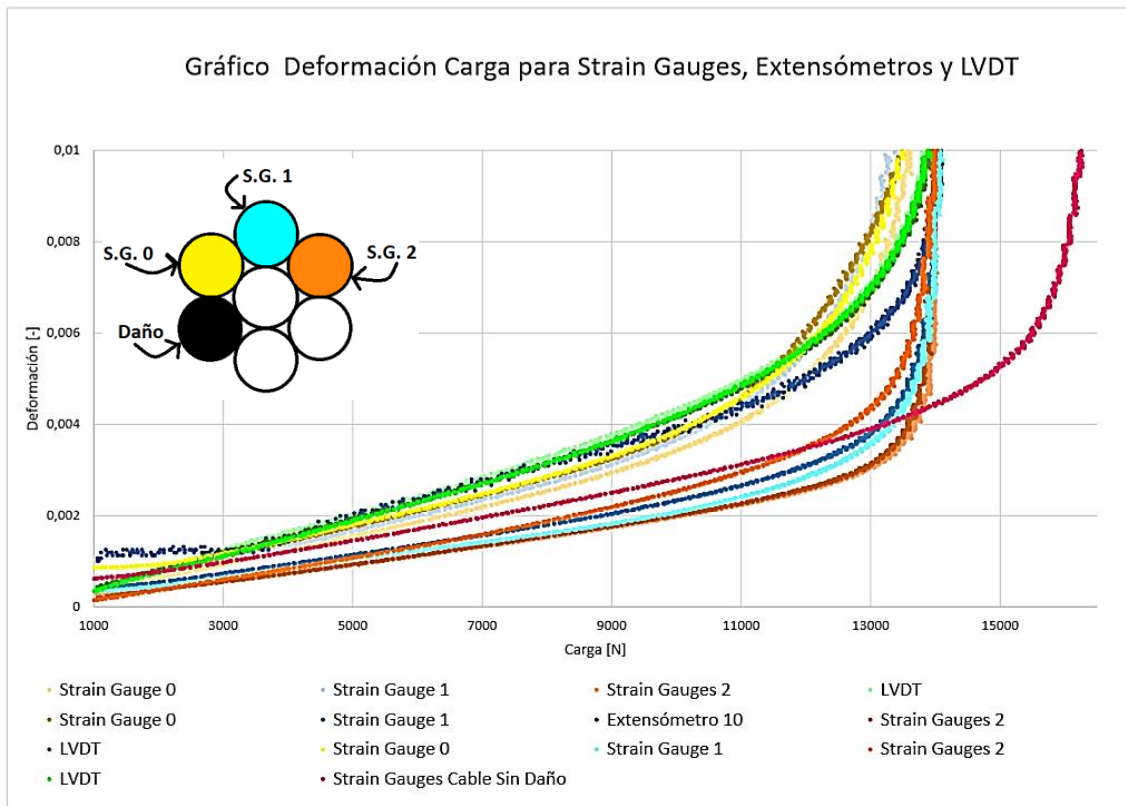


Figura 31: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

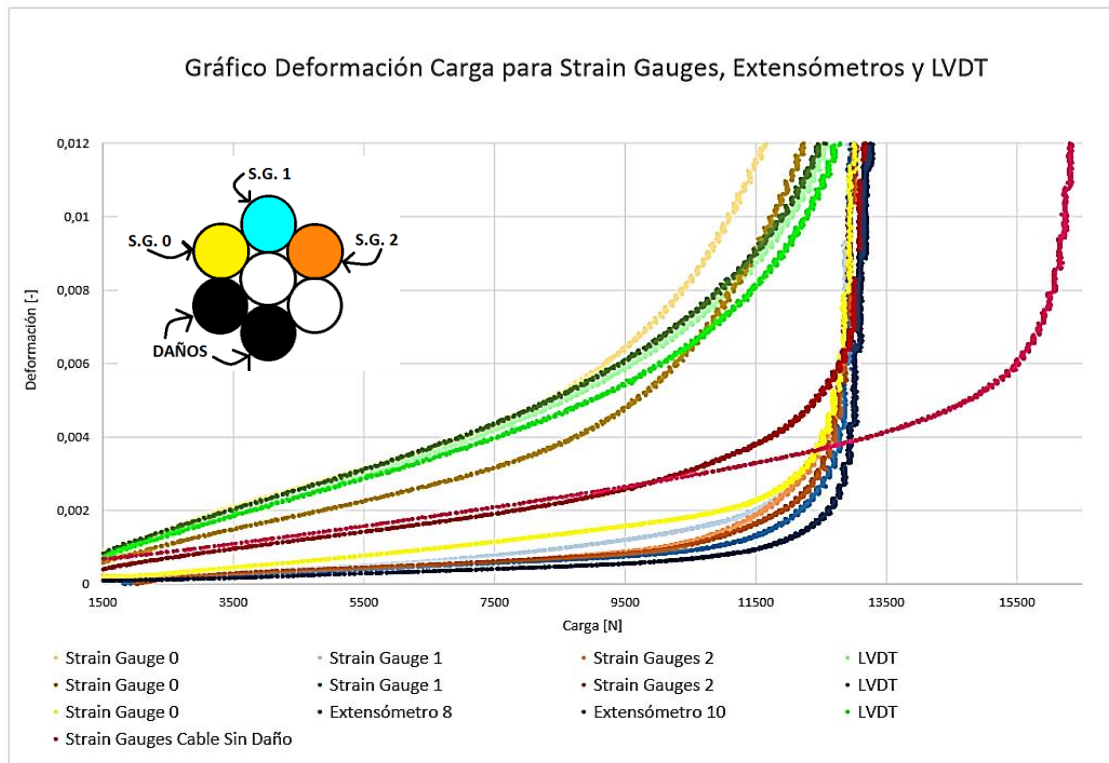


Figura 32: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

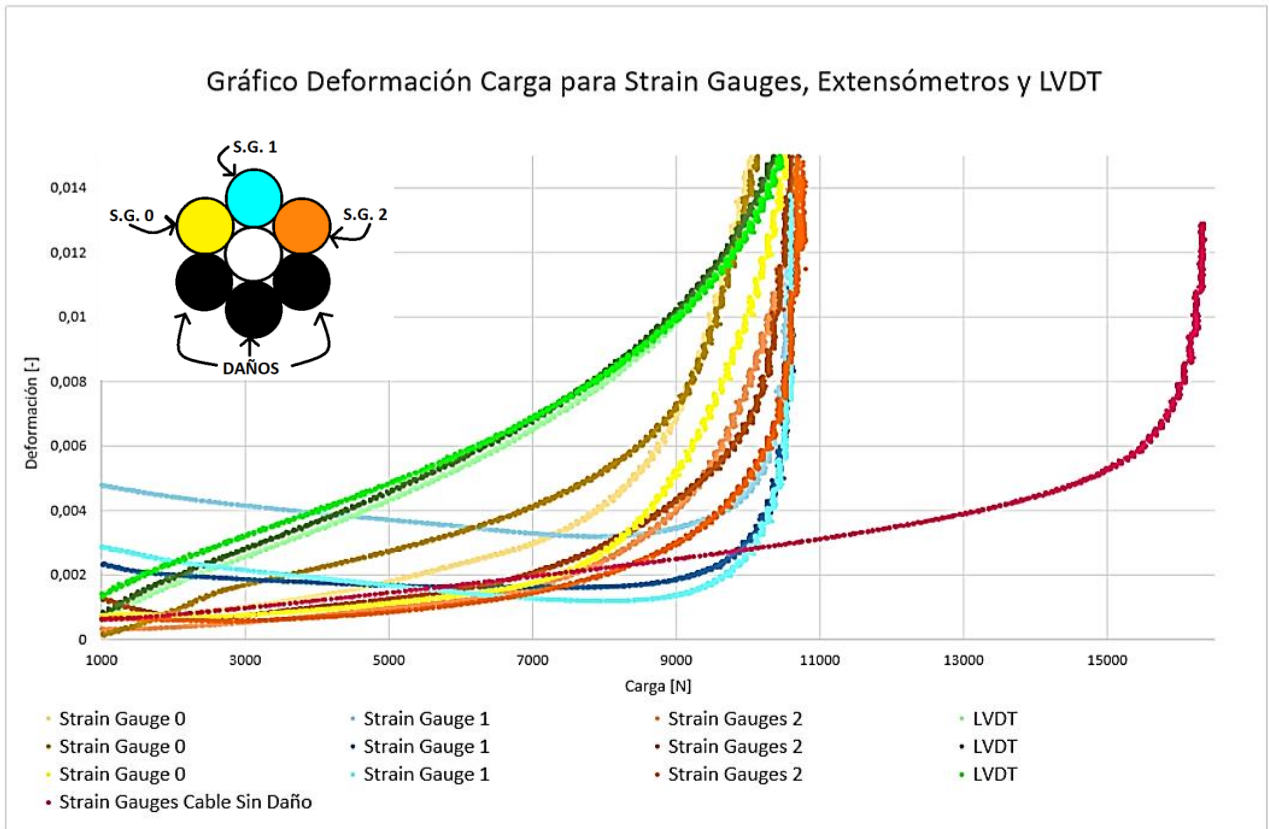


Figura 33: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

Análogamente a lo realizado con los cables de acero se determinaron los factores de amplificación de las deformaciones mostrados en la Tabla 14 para los cables de aluminio de 10.1 mm de diámetro. Recordar que de las tablas es importante analizar cómo los valores se ven modificados para un mismo strain gauge con el aumento de los daños, ya que representan una misma posición dentro del cable. Además, se puede distinguir si se encuentran en compresión o tracción con respecto al comportamiento del cable sin daño dependiendo si el factor es menor o mayor a 1, respectivamente. De las tablas es importante analizar cómo los valores se ven modificados para un mismo strain gauge con el aumento de los daños, ya que representan una misma posición dentro del cable. Además, se puede distinguir si se encuentran en compresión o tracción con respecto al comportamiento del cable sin daño dependiendo si el factor es menor o mayor a 1, respectivamente.

Tabla 14: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Aluminio de 10.1 mm de diámetro

<b>Aluminio 10.1 mm de diámetro</b>									
<b>Factor de Amplificación de deformaciones [-]</b>									
Carga/Carga max [-]	<b>Aluminio 10.1 mm 1-D AL4</b>			<b>Aluminio 10.1 mm 1-D AL5</b>			<b>Aluminio 10.1 mm 1-D AL6</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,178	1,009	1,062	0,577	1,107	0,761	0,576	1,216	0,603	0,603
0,267	1,095	1,095	0,614	1,178	0,774	0,617	1,233	0,718	0,718
0,355	1,106	1,176	0,659	1,253	0,806	0,679	1,176	0,779	0,779
0,444	1,113	1,198	0,677	1,232	0,795	0,693	1,258	0,717	0,802
0,533	1,160	1,264	0,708	1,306	0,816	0,712	1,340	0,732	0,860
0,622	1,228	1,342	0,705	1,378	0,832	0,713	1,396	0,755	0,906
0,711	1,461	1,624	0,725	1,734	0,888	0,736	1,585	0,817	0,997
<b>Factor de Amplificación de deformaciones [-]</b>									
Carga/Carga max [-]	<b>Aluminio 10.1 mm 2-D AL7</b>			<b>Aluminio 10.1 mm 2-D AL9</b>			<b>Aluminio 10.1 mm 2-D AL9</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,178	1,829	0,243	0,243	1,309	0,206	0,206	0,000	0,000	0,000
0,267	1,925	0,247	0,241	1,377	0,279	0,279	0,000	0,000	0,000
0,355	2,012	0,329	0,262	1,476	0,282	0,282	0,000	0,000	0,000
0,444	2,066	0,372	0,291	1,498	0,283	0,283	0,000	0,000	0,000
0,533	2,320	0,430	0,324	1,712	0,302	0,302	0,000	0,000	0,000
0,622	2,829	0,513	0,379	2,091	0,312	0,369	0,000	0,000	0,000
<b>Factor de Amplificación de deformaciones [-]</b>									
Carga/Carga max [-]	<b>Aluminio 10.1 mm 3-D AL10</b>			<b>Aluminio 10.1 mm 3-D AL11</b>			<b>Aluminio 10.1 mm 3-D AL12</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,296	1,253	2,534	2,979	1,884	1,151	0,870	0,788	1,151	0,586
0,355	1,408	2,071	3,136	1,982	0,888	0,888	0,852	0,852	0,657
0,415	1,477	1,667	3,253	2,020	0,808	1,010	0,904	0,641	0,737
0,474	1,842	1,437	3,577	2,252	0,739	1,306	1,236	0,541	0,901
0,533	2,763	1,375	3,874	2,767	0,731	1,700	2,016	0,538	1,186

## 5.2.2. Gráficos de Deformación vs Carga para Cables de 14.3 mm de diámetro

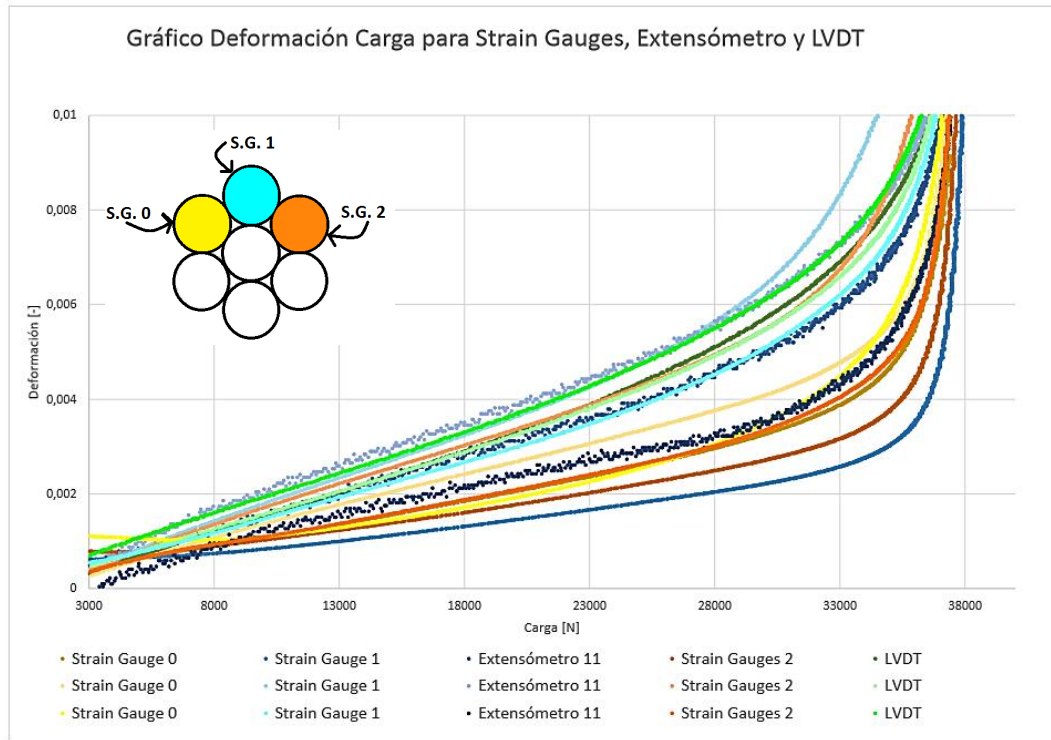


Figura 34: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

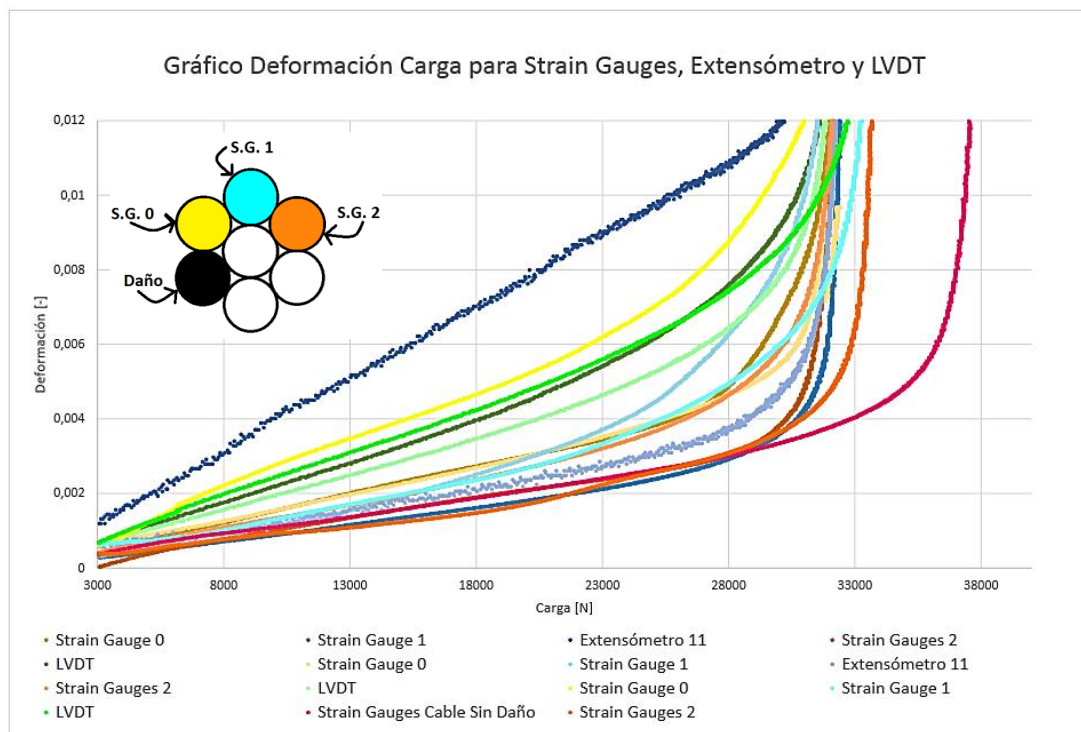


Figura 35: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

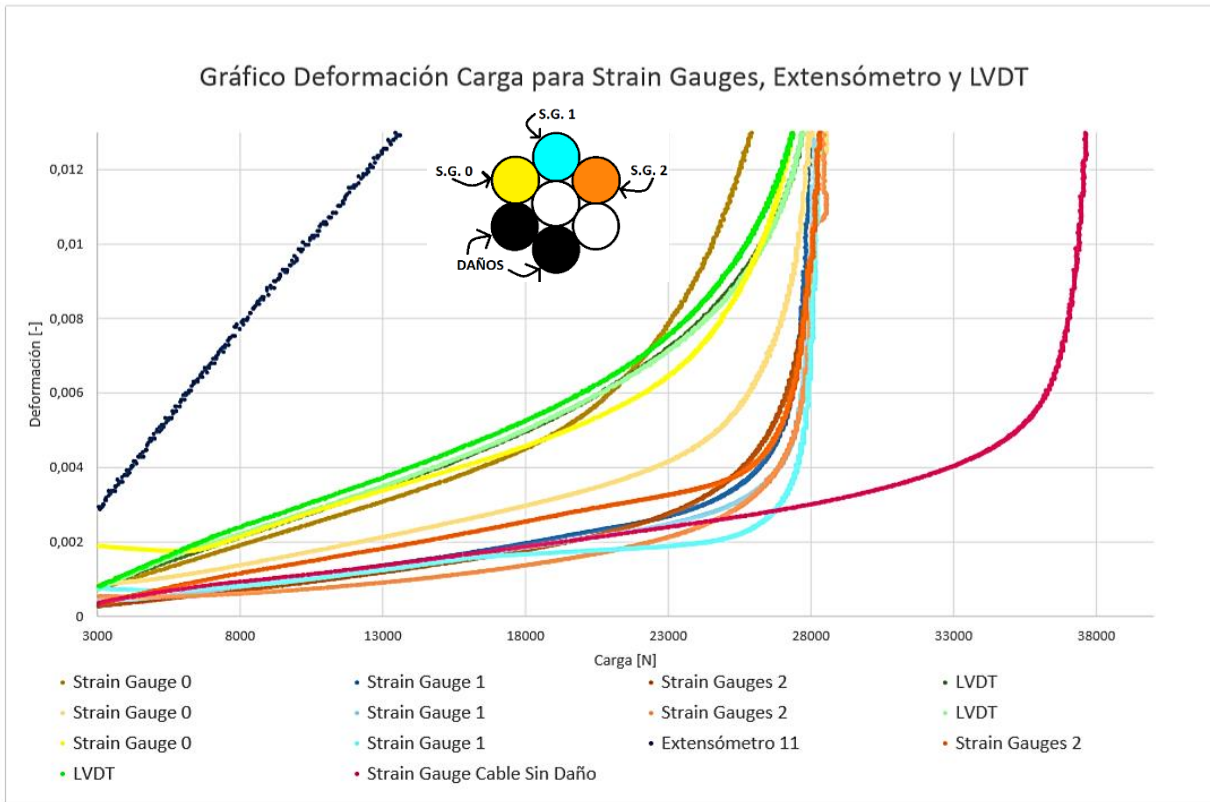


Figura 36: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

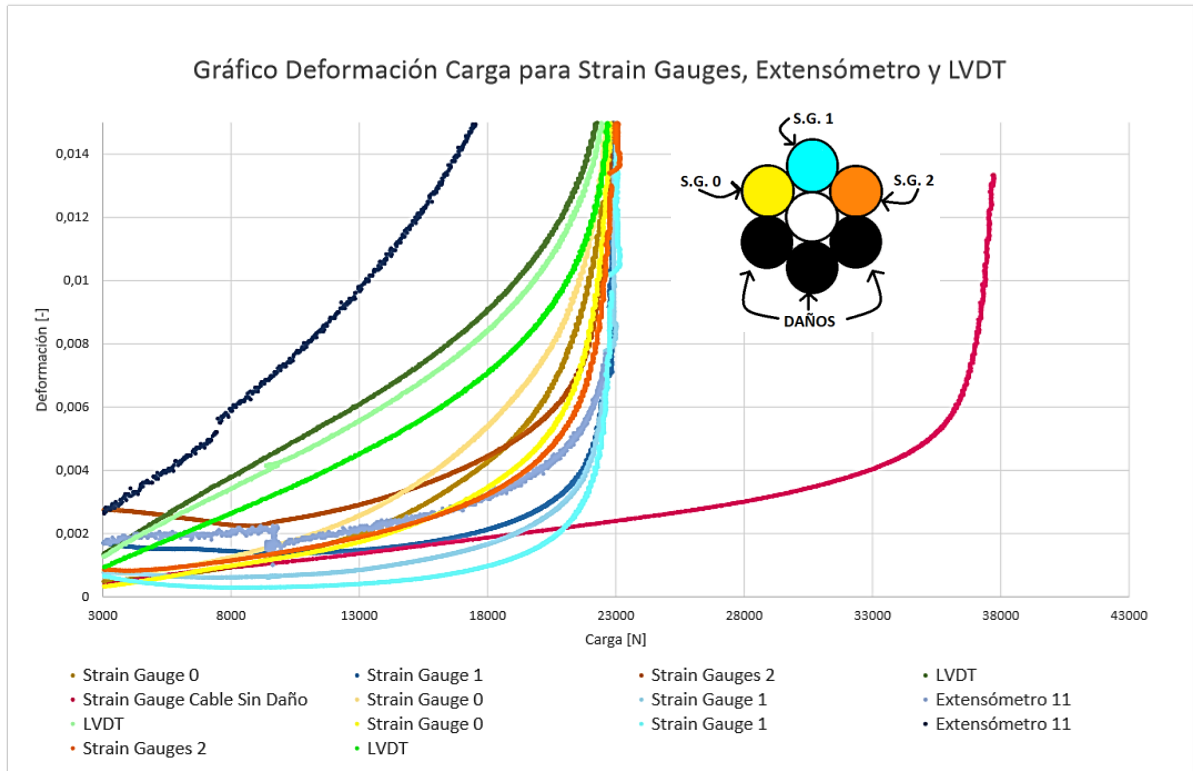


Figura 37: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT



Los factores de amplificación de las deformaciones se muestran en la Tabla 15 para los cables de aluminio 14.3 mm de diámetro.

Tabla 15: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Aluminio de 14.3 mm de diámetro

<b>Aluminio 14.3 mm de diámetro</b>									
	<b>Factor de Amplificación de deformaciones [-]</b>								
Carga/Carga max [-]	<b>Aluminio 14.3 mm 1-D AL4</b>			<b>Aluminio 14.3 mm 1-D AL5</b>			<b>Aluminio 14.3 mm 1-D AL6</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,203	1,305	0,747	0,821	1,347	0,947	1,168	2,311	0,989	0,800
0,304	1,434	0,853	0,930	1,426	1,082	1,240	2,519	1,238	0,775
0,406	1,458	0,833	1,000	1,429	1,190	1,190	2,512	1,250	0,774
0,507	1,438	0,863	1,007	1,438	1,438	1,294	2,505	1,270	0,839
0,609	1,452	0,887	0,988	1,492	1,653	1,371	2,671	1,452	0,968
0,710	1,641	0,954	0,987	1,513	2,049	1,513	2,911	1,612	1,000
	<b>Factor de Amplificación de deformaciones [-]</b>								
Carga/Carga max [-]	<b>Aluminio 14.3 mm 2-D AL7</b>			<b>Aluminio 14.3 mm 2-D AL8</b>			<b>Aluminio 14.3 mm 2-D AL9</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,203	2,053	0,842	0,747	1,459	0,853	0,653	2,316	0,874	1,242
0,304	2,132	0,989	0,853	1,543	1,000	0,653	2,481	1,341	1,318
0,406	2,304	1,012	0,893	1,565	1,000	0,694	2,381	0,935	1,369
0,507	2,637	1,071	0,479	1,616	1,000	0,784	2,469	0,839	1,376
	<b>Factor de Amplificación de deformaciones [-]</b>								
Carga/Carga max [-]	<b>Aluminio 14.3 mm 3-D AL10</b>			<b>Aluminio 14.3 mm 3-D AL11</b>			<b>Aluminio 14.3 mm 3-D AL12</b>		
	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2	SG0	SG1	SG2
0,203	0,831	1,260	1,986	1,102	0,542	0,000	1,000	0,260	1,005
0,254	1,184	1,266	2,186	1,549	0,610	0,000	1,127	0,283	1,297
0,304	1,367	1,094	2,109	1,773	0,602	0,000	1,211	0,280	1,355
0,330	1,442	1,070	2,101	1,906	0,623	0,000	1,377	0,300	1,377
0,381	1,695	1,058	2,192	2,202	0,701	0,000	1,463	0,351	1,463
0,431	2,087	1,091	2,256	2,685	0,823	0,000	1,720	0,440	1,607

### 5.2.3. Gráficos de Deformación vs Carga para Cables de 19.9 mm de diámetro

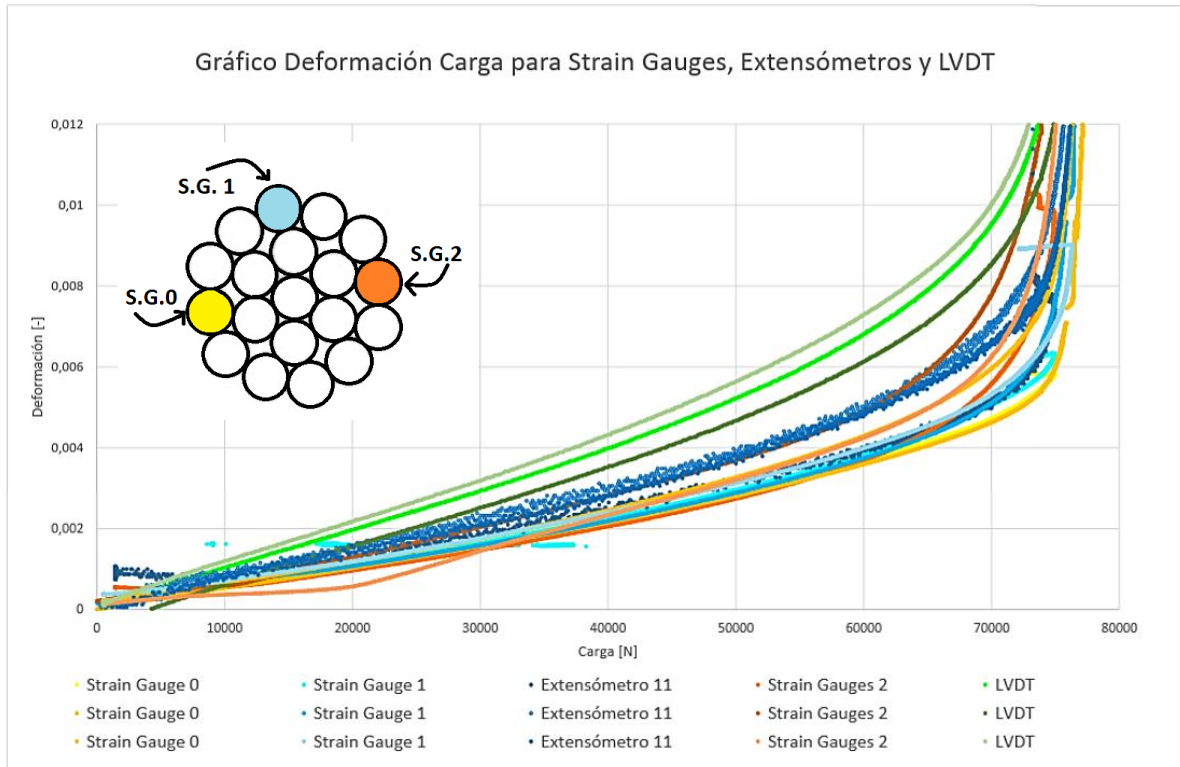


Figura 38: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

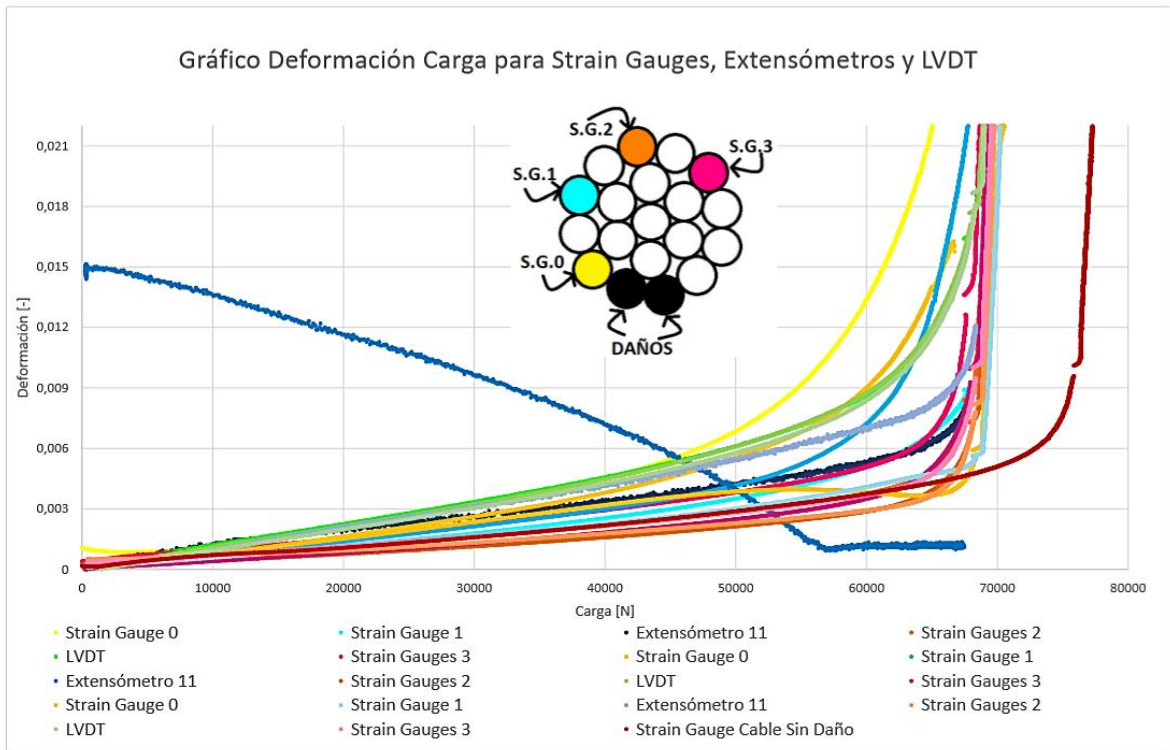


Figura 39: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

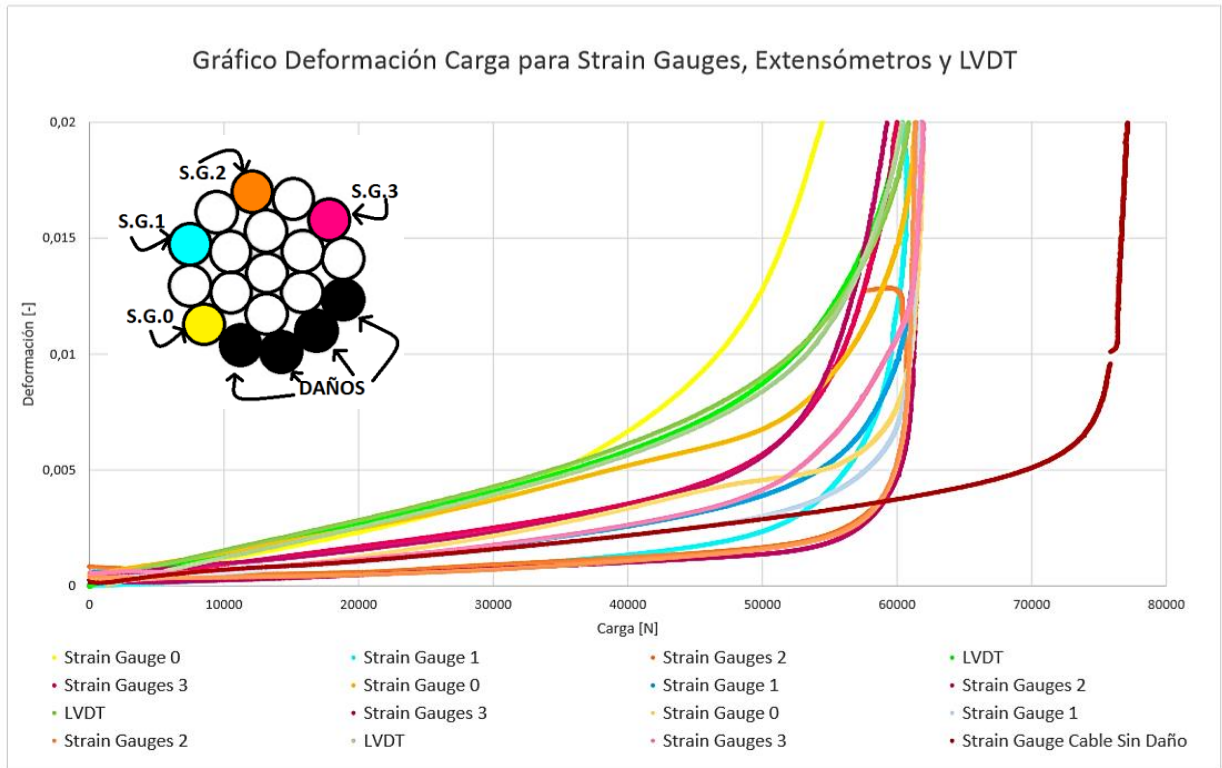


Figura 40: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 4 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT

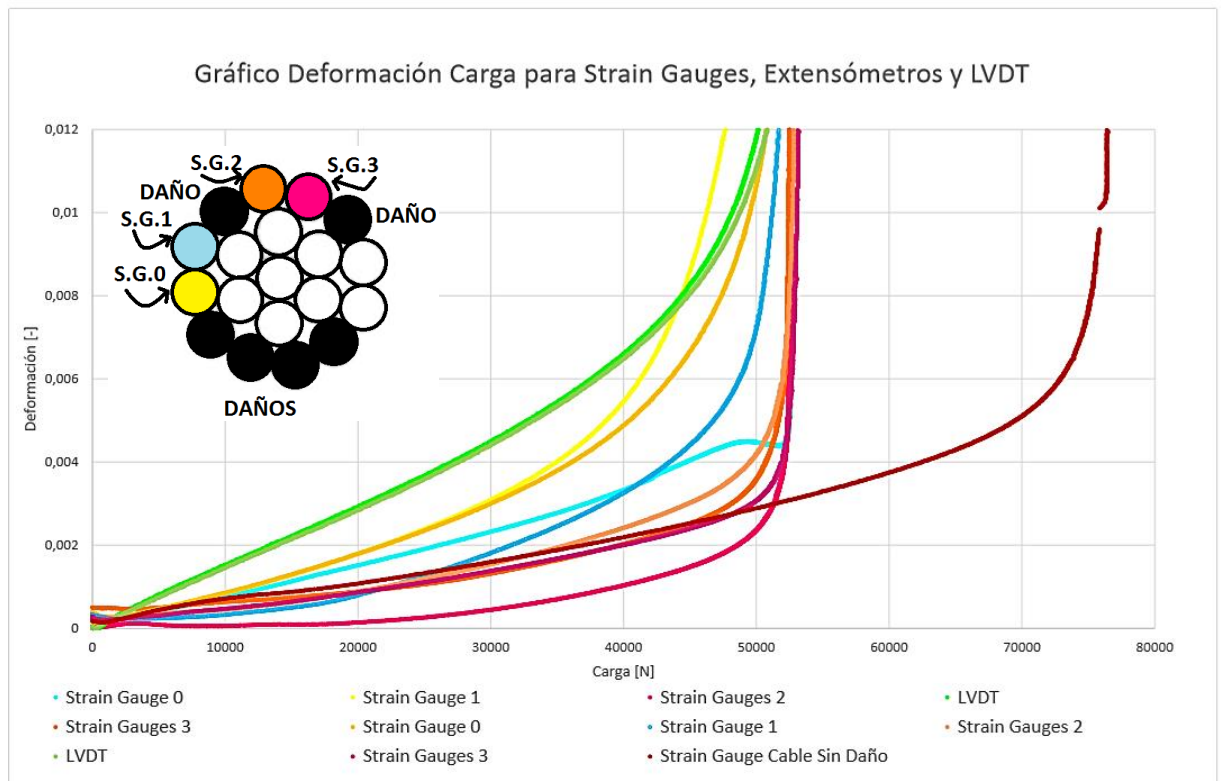


Figura 41: Gráfico de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 6 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT

Los factores de amplificación de las deformaciones son mostrados en la Tabla 16 para los cables de aluminio de 19.9 mm de diámetro.

Tabla 16: Factores de Amplificación de las Deformaciones de los Strain Gauges en ensayos de Cables de Aluminio de 19.9 mm de diámetro

Aluminio 19.9 mm de diámetro												
Factor de Amplificación de deformaciones [-]												
Carga/Carga max [-]	Aluminio 19.9 mm 2-D AL4				Aluminio 19.9 mm 2-D AL5				Aluminio 19.9 mm 2-D AL6			
	SG0	SG1	SG2	SG3	SG0	SG1	SG2	SG3	SG0	SG1	SG2	SG3
0,203	1,80	1,03	1,03	1,43	1,35	1,21	0,73	0,73	1,37	0,96	0,91	1,08
0,304	1,86	1,17	1,01	1,40	1,55	1,31	0,71	0,78	1,43	1,00	0,85	1,06
0,406	1,99	1,16	1,00	1,35	1,70	1,35	0,73	0,82	1,47	1,03	0,84	1,03
0,507	2,08	1,16	1,00	1,34	1,77	1,36	0,73	0,84	1,45	1,02	0,82	1,00
0,609	2,28	1,20	0,98	1,33	1,88	1,42	0,73	0,88	1,38	1,05	0,80	0,97
0,710	3,00	1,28	0,98	1,36	2,13	1,66	0,75	0,89	1,18	1,09	0,78	0,98
Factor de Amplificación de deformaciones [-]												
Carga/Carga max [-]	Aluminio 19.9 mm 4-D AL7				Aluminio 19.9 mm 4-D AL8				Aluminio 19.9 mm 4-D AL9			
	SG0	SG1	SG2	SG3	SG0	SG1	SG2	SG3	SG0	SG1	SG2	SG3
0,203	2,09	0,46	0,60	1,54	2,33	0,99	0,41	1,47	1,06	0,91	0,47	1,06
0,304	2,21	0,56	0,56	1,55	2,32	1,01	0,45	1,45	1,24	0,96	0,44	1,09
0,406	2,35	0,59	0,59	1,59	2,34	1,12	0,47	1,48	1,41	0,98	0,46	1,13
0,507	3,05	0,64	0,56	1,61	2,36	1,18	0,46	1,55	1,50	0,98	0,50	1,22
0,609	4,01	0,73	0,56	1,82	2,30	1,30	0,47	1,77	1,62	1,02	0,55	1,35
Factor de Amplificación de deformaciones [-]												
Carga/Carga max [-]	Aluminio 19.9 mm 6-D AL10				Aluminio 19.9 mm 6-D AL12							
	SG0	SG1	SG2	SG3	SG0	SG1	SG2	SG3				
0,190	1,28	1,47	0,00	0,00	1,48	0,56	0,72	0,72				
0,254	1,45	1,69	0,14	0,00	1,67	0,75	0,83	0,83				
0,317	1,44	1,78	0,19	0,00	1,75	1,00	0,87	0,83				
0,380	1,46	1,94	0,29	0,00	1,87	1,13	1,00	0,86				
0,444	1,48	2,10	0,37	0,00	2,00	1,31	1,00	0,89				
0,507	1,53	2,51	0,46	0,00	2,19	1,48	1,08	0,91				

Para los ensayos realizados sin daño alguno en los cables, de las Figura 30, Figura 34 y Figura 38 se aprecia una superposición de las curvas de la mayoría de los strain gauges, lo que da a entender que todas las hebras de cada uno de los cables poseen un mismo comportamiento en cuanto a la deformación, aunque hay instrumentos que muestran una pequeña desviación (como por ejemplo, para el strain gauges 2 del cable de 10.1 mm de diámetro).

Cuando se realiza el daño de una de las hebras en el cable el comportamiento varía, lo que se observa en la Figura 31, Figura 35 y Figura 39, donde las curvas de color amarillo que representan al strain gauges contiguo al daño poseen mayor deformaciones con respecto a los otros strain gauges y con respecto a la curva del que no presenta daño. En el rango lineal, las curvas de color celeste poseen un nivel de deformación parecido al de la curva sin daño, y para las curvas de color naranja, que miden la deformación de la hebra opuesta al daño ésta es mucho menor a todas las otras hebras e incluso con respecto a la hebra del cable que no posee daño alguno, el mismo comportamiento que el observado en los cables de acero. En el caso del cable de 10.1 mm de diámetro las deformaciones de los strain gauges SG0 son mucho mayores que las del cable sin daño, e inclusive los strain gauges SG1 y SG2 poseen deformaciones menores a estas como manera de compensar. Esto se ve reafirmado con la Tabla 17 que muestra valores sobre 1 de los factores de amplificación de las deformaciones para el SG0 y valores mucho menores a 1 en los SG1 y SG2, excepto para el del ensayo del cable AL4. El mismo comportamiento se aprecia para el caso del cable de 14.3 mm, a excepción del SG2 del cable AL5 ensayado (ver Tabla 18). Para el caso del cable de 19.9 mm las deformaciones de los strain gauges SG2 son las únicas que se encuentran bajo el nivel entregado por el cable sin daño, pero si uno observa la Tabla 19 observa que todos los strain gauges del cable AL4 ensayado posee factores sobre 1, es decir muestra un aumento en las deformaciones en todo el cable; en el ensayo AL5 los strain gauges SG2 y SG3 muestran disminución de las deformaciones con factores menores de 1; y para el caso del ensayo AL6 sólo el SG2 muestra deformaciones debidas a la compresión del elemento, lo cual es consistente ya que corresponde a la hebras que está justo opuesta al daño.

Para los especímenes con dos daños (ver Figura 32 y Figura 36), al analizar los casos de los cables de dos capas y 4 daños para el cable de 3 capas (ver Figura 40), la hebra contigua al daño presenta deformaciones notoriamente mayores, las hebras representadas por el color celeste y naranja son opuestas a los daños y poseen deformaciones parecidas entre sí pero menores o iguales a la curva del cable sin daño. Para el cable de 19.9 mm las mayores deformaciones de manera decreciente van desde los strain gauges amarillo, fucsia, celeste y naranja. Consistente ya que corresponde al orden que presentan con respecto a los daños, siendo la más cercana la hebra de color amarillo y la más lejana la naranja, opuesta al daño. Si lo contraponemos con los resultados de las tablas mencionadas, la del cable de 10.1 mm de diámetro, se tienen dos ensayos consistentes entre sí y con el análisis cualitativo realizado ya que presenta valores de factores de amplificación sobre 1 para los SG0 y menores a 1 para los SG1 y SG2. El mismo comportamiento se observa en la siguiente tabla al analizar los cables de 14.3 mm de diámetro, excepto para el SG2 del cable AL9 ensayado, donde las deformaciones son mayores de las esperadas. Y finalmente, para el caso del cable del 19.9 mm de diámetro, los strain gauges más próximos a los daños son los SG0 y SG3, que justamente son los que poseen factores de amplificación de las deformaciones mayores a 1, en cambio el resto son menores a 1, en estos último son donde se aprecian las compresiones de las hebras.

Cuando el daño es mayor, ya con la mitad de las hebras de la última capa dañadas (ver Figura 33, Figura 37 y Figura 41), las hebras representadas por los colores amarillo y naranja son contiguas a los daños y la celeste opuesta. Las primeras poseen grandes

deformaciones, notoriamente mayores a la del cable sin presencia del daño, y la hebra opuesta a los daños se deforma menos inclusive en comparación al cable sin daño, para el caso de los cables de dos capas. Para el cable de 19.9 mm las mayores deformaciones de manera decreciente van desde los strain gauges amarillos, celeste, naranja y fucsia, lo cual tiene sentido ya que las que poseen mayores deformaciones son las que se encuentran contiguas a una mayor cantidad de daños. Verificándolo con los resultados de las tablas, la primera muestra comportamientos extraños y ninguna es consistente con lo esperado ya que en el cable AL10 el SG1 debiera tener factores de amplificación de deformaciones menores que 1, en el AL11 el SG2 debiera tener valores un poco mayores a los obtenidos. Para el caso de los cables de 14.3 mm de diámetro, los ensayos AL11 y AL12 si presentan coeficientes esperados, donde los SG0 y SG2 son parecidos entre sí y mayores que 1 y los SG1 son menores que 1, pero para el caso del ensayo AL10 se esperarían coeficientes un poco menores para el SG1. Y finalmente, para el cable de 19.9 mm de diámetro, el ensayo AL12 es bastante representativo ya que siguiendo el mismo orden de la numeración de los strain gauges estos se van alejando de las mayor cantidad de daños, por tanto van disminuyendo sus deformaciones y por consecuencia sus factores de amplificación de las deformaciones. En el caso del ensayo del cable AL10 se hubiese esperado que los valores del SG0 fuesen un poco mayores a los del SG1.

### **5.3. Efecto Daño**

#### **5.3.1. LVDT**

Para los diferentes niveles de daño se determinó la curva de carga en función de la deformación con el uso de LVDT para los distintos cables de aluminio, las que se muestran en las Figura 42, Figura 43 y Figura 44 para los cables de 10.1 mm, 14.3 y 19.9 mm de diámetro, respectivamente. Estas gráficas exponen una disminución de la resistencia residual y una variación en las deformaciones con el aumento de los daños y del nivel de asimetría que éste provoca en los cables. Más adelante, se analizan los valores las capacidades máximas obtenidas en cada uno de los ensayos y a las deformaciones alcanzadas en esos puntos

Para la curva de la Figura 44, las deformaciones fueron disminuyendo con el aumento de los daños realizados, mismo comportamiento que el obtenido para los cables de acero. Sin embargo para los cables de 14.3 mm de diámetro (ver Figura 43), las deformaciones fueron disminuyendo, pero para tres daños, si bien no se observa la curva completa, al momento de extrapolar los resultados debiera mostrar una deformación mayor a la anterior. Esto mismo se observa en la Figura 42, para el caso del cable de 10.1 mm de diámetro, en donde se aprecia un aumento de las deformaciones cuando se tienen 3 daños. Cabe destacar que visualmente los ensayos realizados en cables con la mitad de las hebras dañadas superficialmente mostraban un comportamiento distinto producto del efecto debido a la flexión, alto acomodamiento de las hebras fruto de la forma helicoidal en la que están dispuesta y a la gran asimetría presente, en este caso de 0,5 como índice de asimetría, lo cual puede influir bastante al momento de definir el nivel de deformación al cual están sometidas los alambres no dañados.

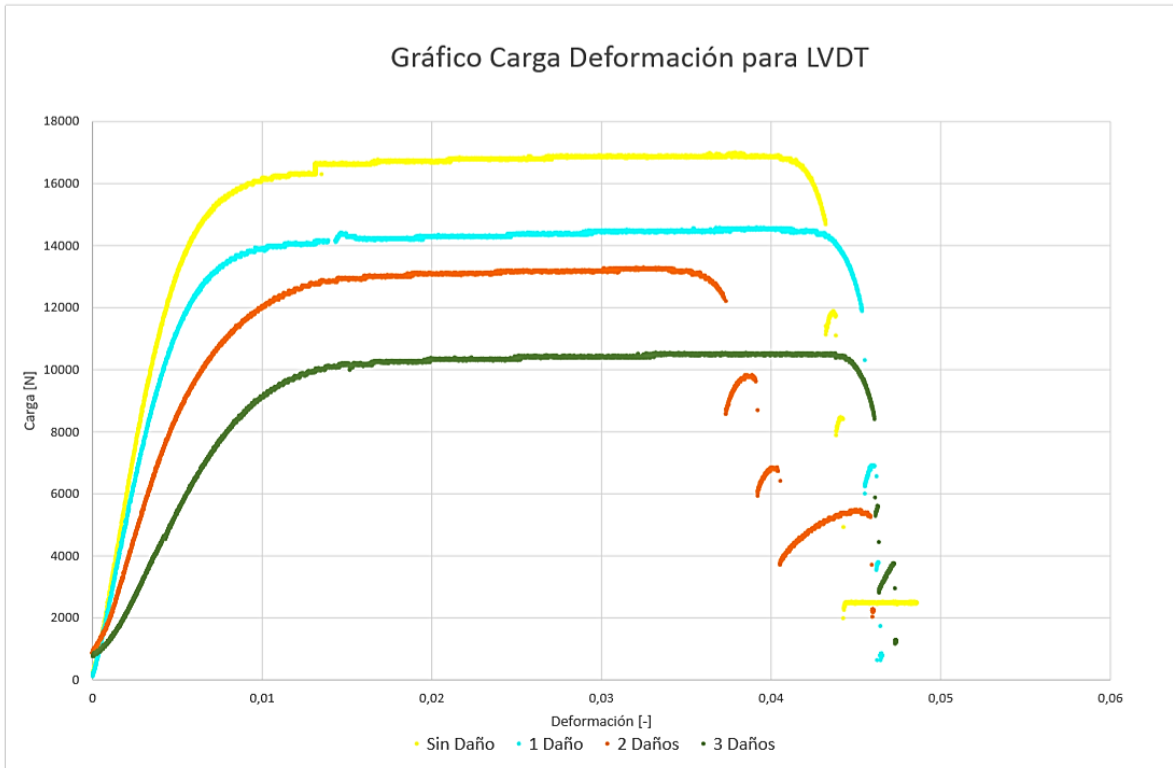


Figura 42: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Aluminio de 10.1 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño

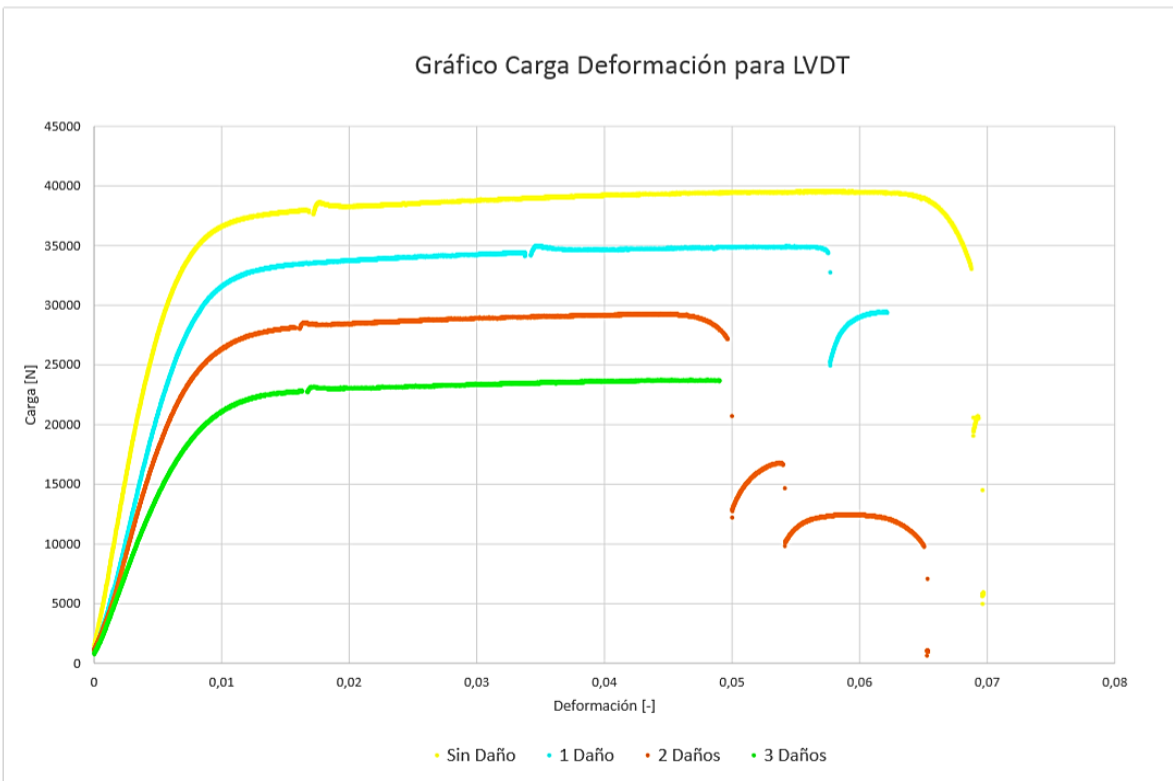


Figura 43: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Aluminio de 14.3 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño

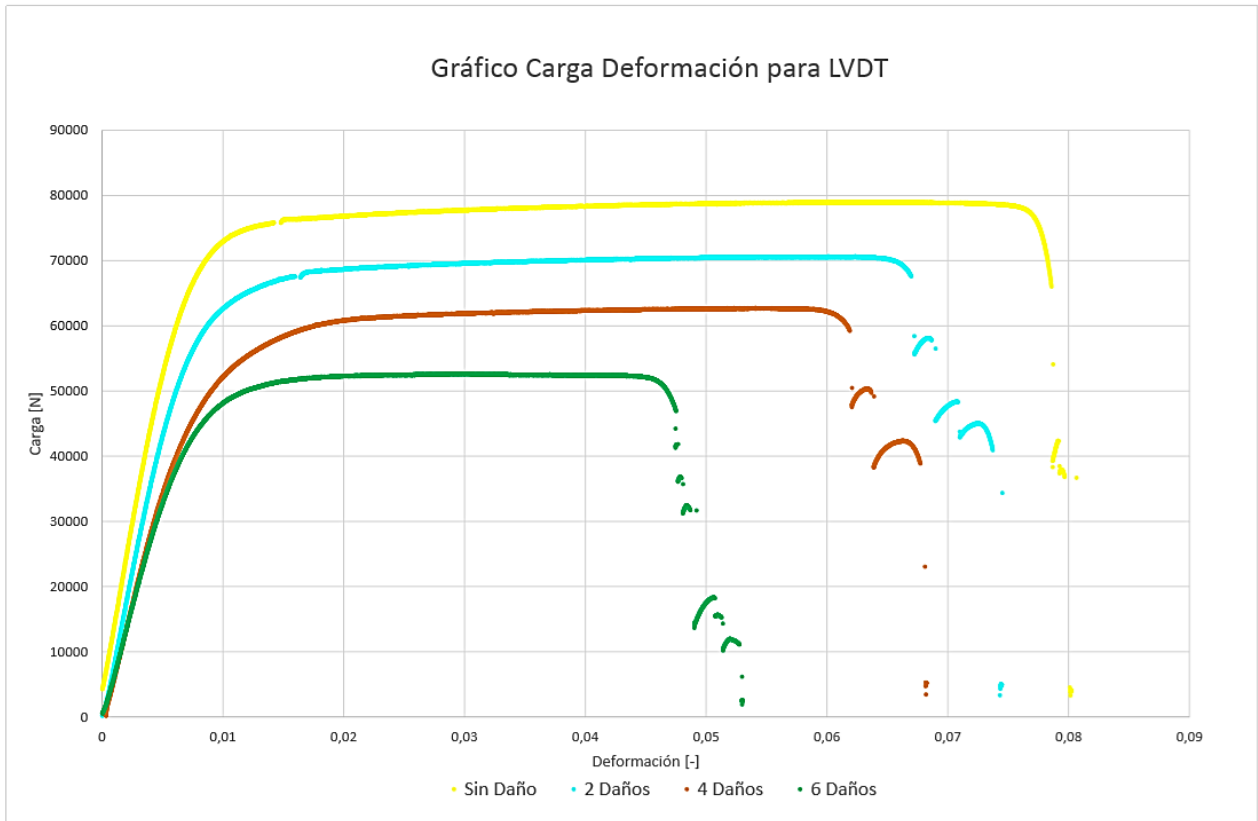


Figura 44: Gráfico de Carga-Deformación para un Cable de Aluminio de 19.9 mm con el uso de LVDT para diferentes niveles de daño

Con respecto a las resistencias residuales obtenidas en cada uno de los ensayos y a las deformaciones alcanzadas en esos puntos, se tienen las Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 que muestran estos valores obtenidos con el uso de LVDT. Si bien los valores de las deformaciones no son representativos ya que no coinciden la deformaciones máximas con los puntos de carga máxima, si se aprecia el mismo fenómeno de los gráficos anteriores que corresponde a la de disminución de la resistencia residual obtenida ante un aumento en los daños realizados en los cables y que son consistentes con los datos obtenidos de las resistencias residuales teóricas, donde la mayoría de los datos se parecen aunque son menores de las esperadas (como es analizado en el capítulo 6.1. Evolución de la carga máxima). Sin embargo, para los cables de 19.9 mm de diámetro, no hay una relación clara entre las resistencias ya que existe una variación de los datos obtenidos.

Analizando las rigideces, obtenidas como fue descrito para los cables de acero, también se consiguen valores menores a los teóricos calculados.



Tabla 17: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Aluminio de 10.1 mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica

CABLE	DAÑO	LVDT			Teórico	
		Deformación en el punto de Carga Max [-]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]
AL3	S-D	0,049	16.882	3.000.000	16.882	3.931.810
AL4	1-D	0,0326	14.424	2.000.000	14.470	3.372.502
AL5		0,042	14.496	3.000.000	14.470	
AL6		0,013	14.119	3.000.000	14.470	
AL7	2-D	0,035	13.222	2.000.000	12.059	2.813.193
AL8		0,027	13.204	2.000.000	12.059	
AL9		0,031	13.312	2.000.000	12.059	
AL10	3-D	0,021	10.711	5.000.000	9.647	2.253.885
AL11		0,03	10.872	1.000.000	9.647	
AL12		0,028	10.854	6.000.000	9.647	

Tabla 18: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Aluminio de 14.3 mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica

CABLE	DAÑO	LVDT			Teórico	
		Deformación en el punto de Carga Max [-]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]
AL1	S-D	0,0627	39.415	6.000.000	39.415	9.356.310
AL2		0,023	38.213	6.000.000	39.415	
AL3		0,03165	38.770	5.000.000	39.415	
AL4	1-D	0,03345	33.154	5.000.000	33.785	8.024.166
AL5		0,046	33.405	5.000.000	33.785	
AL6		0,0558	34.930	4.000.000	33.785	
AL7	2-D	0,03296	28.884	4.000.000	28.154	6.692.021
AL8		0,045	29.297	4.000.000	28.154	
AL9		0,0486	29.117	3.000.000	28.154	
AL10	3-D	0,05254	23.735	2.000.000	22.523	5.359.877
AL11		0,0495	23.735	2.000.000	22.523	
AL12		0,04895	23.735	3.000.000	22.523	

Tabla 19: Resistencia Residual y Deformación en ese punto para cada uno de los ensayos de Cables Aluminio de 19.9 mm de diámetro, realizados con uso de LVDT y Resistencia Residual y Rigidez Elástica Teórica

CABLE	DAÑO	LVDT			Teórico	
		Deformación en el punto de Carga Max [-]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]	Resistencia Residual [N]	Rigidez Elástica [N/m]
AL1	S-D	0,018	73.251	10.000.000	78.867	16.814.393
AL2		0,071	78.867	13.500.000	78.867	
AL3		0,02	76.301	9.000.000	78.867	
AL4	2-D	0,064	70.417	8.000.000	67.600	15.050.818
AL5		0,033	69.484	9.000.000	67.600	
AL6		0,053	70.417	9.000.000	67.600	
AL7	4-D	0,0295	59.903	7.000.000	56.333	13.287.243
AL8		0,058	62.182	7.000.000	56.333	
AL9		0,038	61.590	7.000.000	56.333	
AL10	6-D	0,045	52.189	7.000.000	45.067	11.523.668
AL11		-	-	-	-	
AL12		0,054	54.073	7.000.000	45.067	

#### 5.4. Efecto Diámetro

A partir de las Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se desprenden los valores promedios de los factores de deformaciones para cada strain gauges según tipo de daño, los que se muestran en la Tabla 20 y que están asociados a distintos índices de asimetría. De esos datos se obtienen los gráficos de las Figura 45, Figura 46 y Figura 47 que muestran de distinta perspectiva los datos obtenidos.

Tabla 20: Promedio de los Factores de Amplificación de Deformaciones para los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro

Strain Gauges	PROMEDIO DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DE DEFORMACIONES [-]					
	Aluminio 10.1 mm			Aluminio 14.3 mm		
	1-D	2-D	3-D	1-D	2-D	3-D
SG0	1,29	1,42	1,77	1,82	2,30	1,65
SG1	0,92	0,32	0,80	0,86	0,98	0,50
SG2	0,64	0,31	2,31	0,82	0,72	1,74
I.A.	0,20	0,38	0,50	0,20	0,38	0,50

Del gráfico de la Figura 45, se desprende que un aumento en el diámetro del cable produce un incremento del promedio del factor de amplificación de deformaciones, lo cual aunque en 2 de los 9 casos exista una disminución notoria, y que se traduce en que los valores asociados a los puntos amarillos, verde y rojo (relacionados al cable de 14.3 mm, de mayor diámetro) se encuentran por encima de los otros puntos.

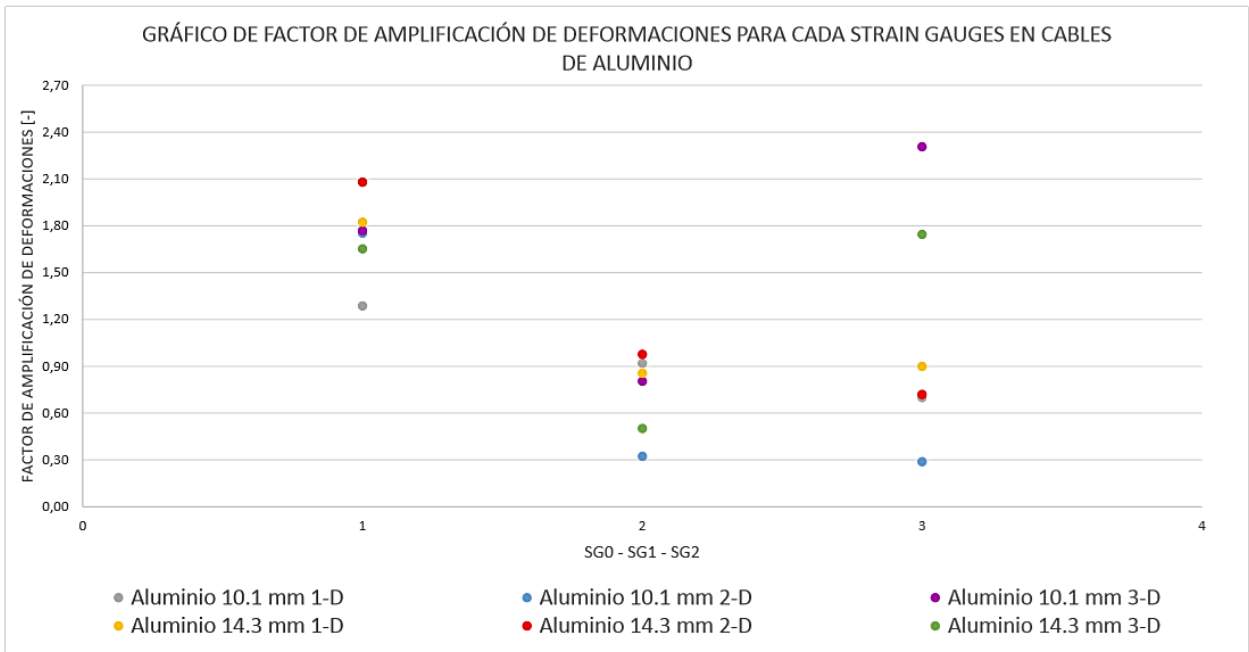


Figura 45: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro en función del tipo de daño.

En la Figura 46, se observa que el strain gauge SG1 siempre muestra los menores valores. Tiene que ver con que éste siempre en el sensor opuesto al daño por lo que se aprecia compresiones, lo que respalda el análisis de deformaciones hecho en capítulos anteriores. Además, se aprecia un leve aumento en los factores para un mismo nivel de daño con el aumento del diámetro del cable para todos los strain gauges que se utilizaron. A diferencia de los cables de acero, el aumento en los rangos de los colores no es tan notorio, en algunos casos incluso se mantiene constante o disminuye con el aumento del diámetro. Sin embargo, si se compara esta gráfica con la obtenida para los cables de acero, se aprecia la misma tendencia y forma lo que nos entrega una información que tiene relación con un efecto del diámetro y no del material del que se está analizando. El efecto del material es relevante cuando se aprecian los rangos en los que se encuentran los factores de amplificación de las deformaciones, siendo mayores para el caso de los cables de aluminio, lo que indica que éste es más susceptible a sufrir deformaciones al ser más dúctil.

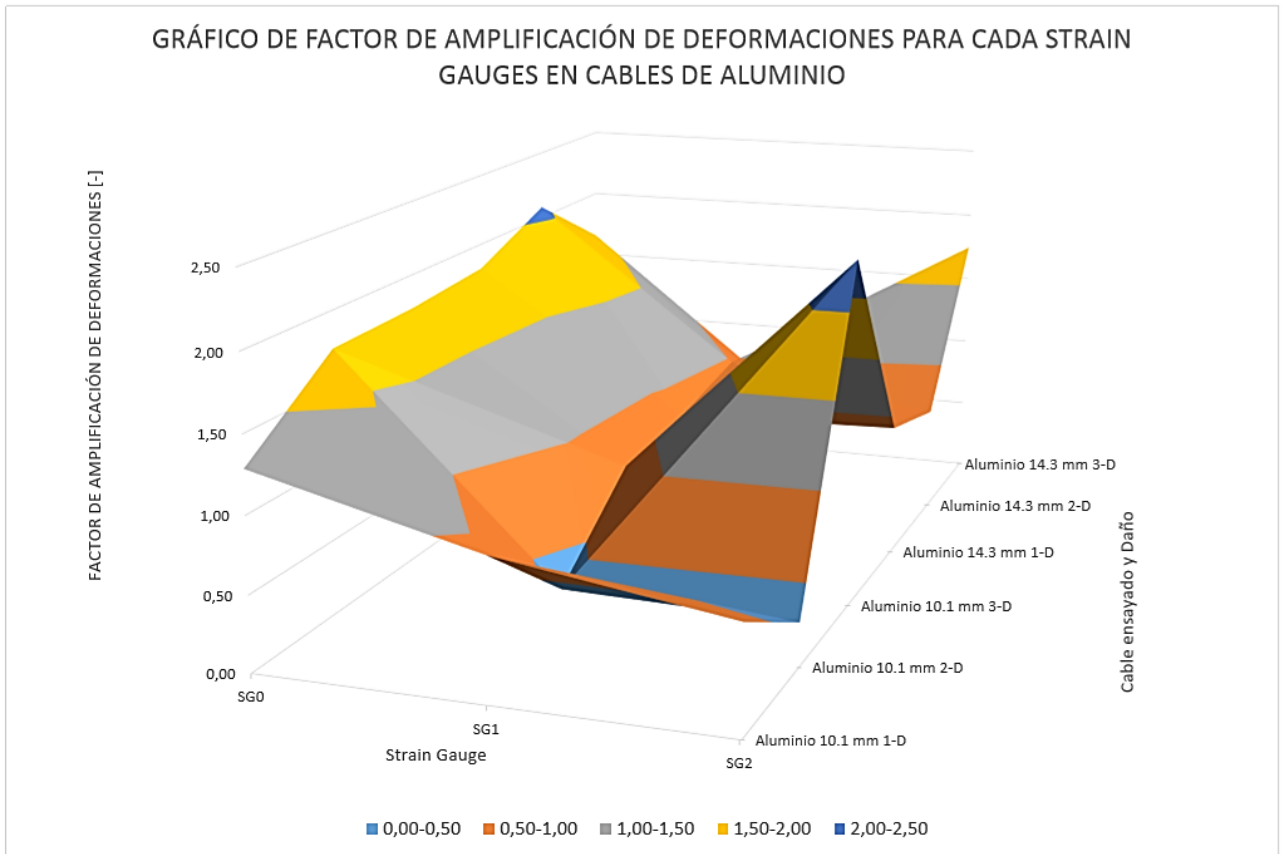


Figura 46: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro en función del tipo de daño.

Analizando el gráfico de la Figura 47, al igual que para el caso de los cables de acero, se observa que con el aumento del índice de asimetría (I.A.) para diferentes niveles de daño o diámetro, en algunos casos aumenta el rango, en otros de mantiene o simplemente disminuye.

La Figura 48, muestra este último gráfico para todos los cables estudiados corroborándose que no hay relación alguna de los factores de amplificación de las deformaciones con respecto al índice de asimetría, pero al mismo tiempo se aprecia un comportamiento similar entre los dos tipos de cables, una misma forma de las gráficas pero a diferentes magnitudes que no tienen relación con un efecto diámetro, ya que no se ve una tendencia en los rangos de deformaciones que se aprecian.

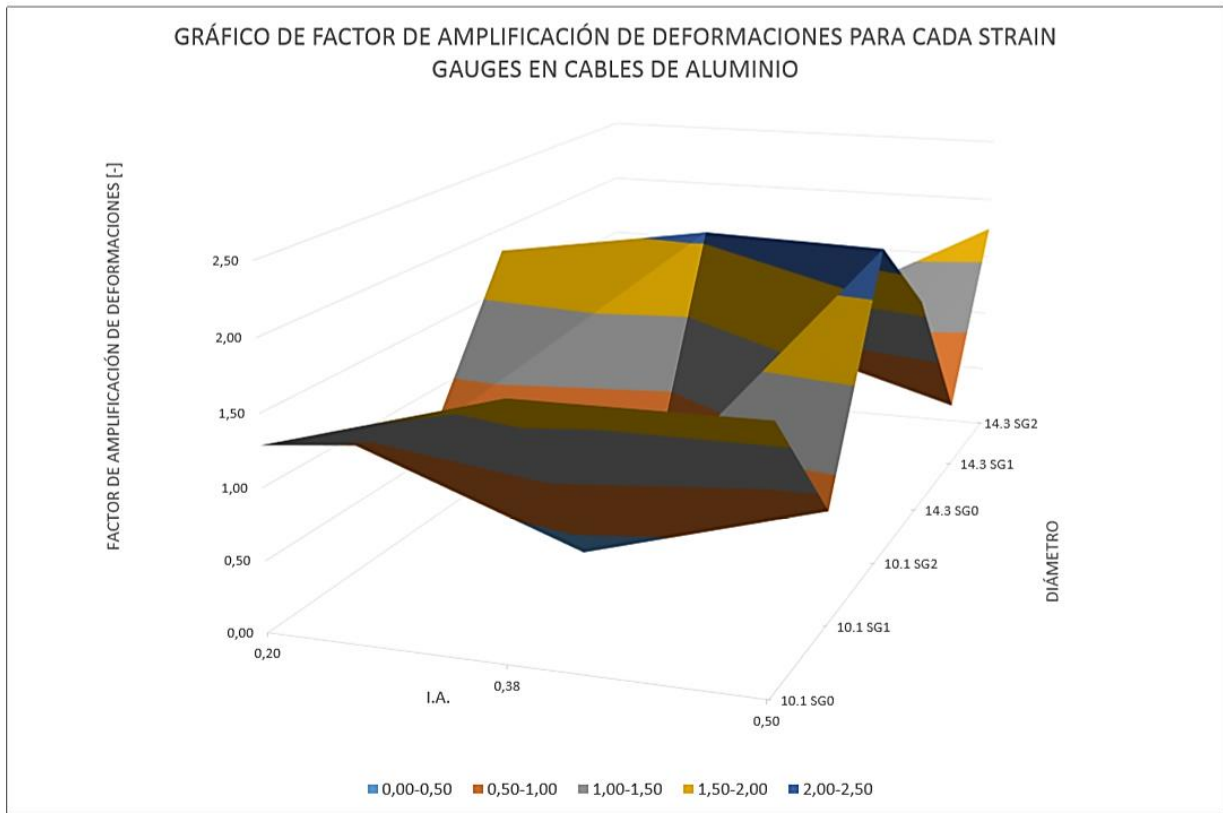


Figura 47: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Aluminio de 10.1 mm y 14.3 mm de diámetro en función del tipo del diámetro e índice de asimetría.

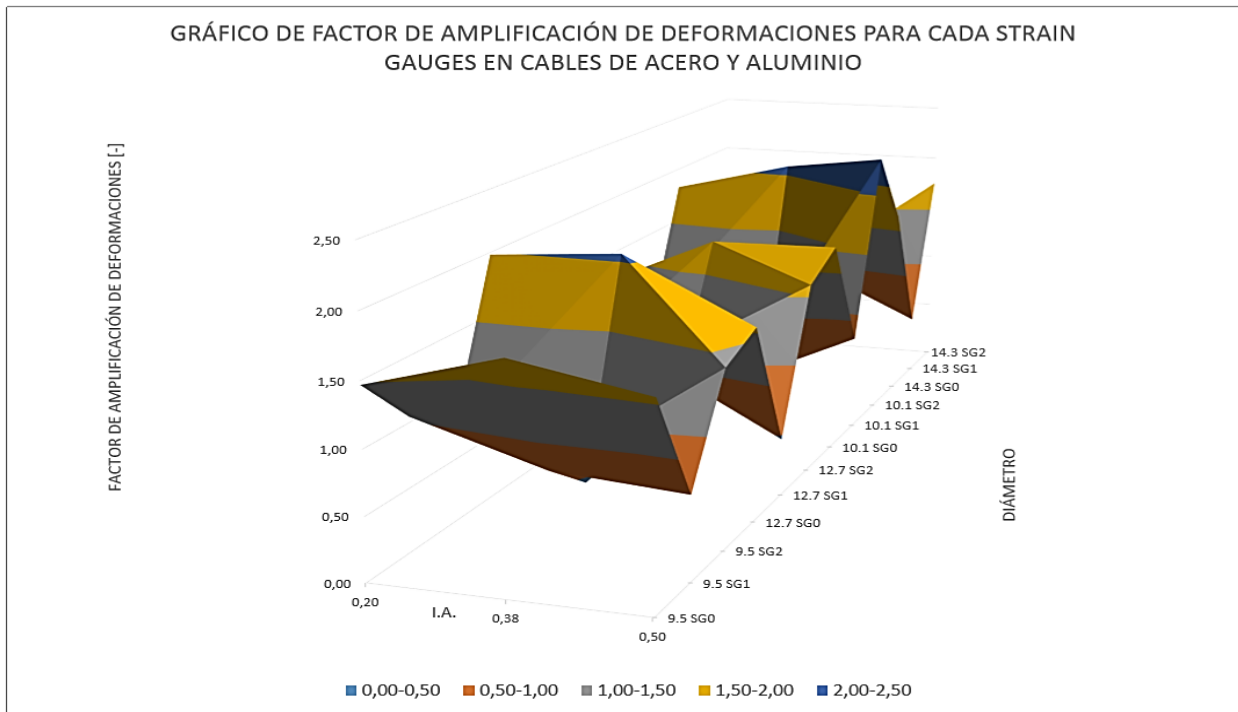


Figura 48: Gráfico de los Factores de Amplificación de Deformaciones para cada Strain Gauges en los cables de Acero y Aluminio en función del tipo del diámetro e índice de asimetría.

## Capítulo 6. Estudio del efecto diámetro y carga máxima

### 6.1. Evolución de la carga máxima

Con el aumento de los daños la resistencia residual de los cables disminuye pero no de manera proporcional a la reducción de área de la sección transversal. Como se aprecia en la Figura 49, se graficaron todos los valores de resistencia residual obtenidos para diferentes niveles de daño, de lo cual se obtuvo una regresión lineal correspondiente a la ecuación  $Y=1.2235 \cdot X - 0.2494$ , de la que se desprende que la pendiente es mayor a 1, es decir, a medida que el porcentaje de área remanente disminuye la capacidad lo hace en mayor medida del porcentaje de razón de carga.

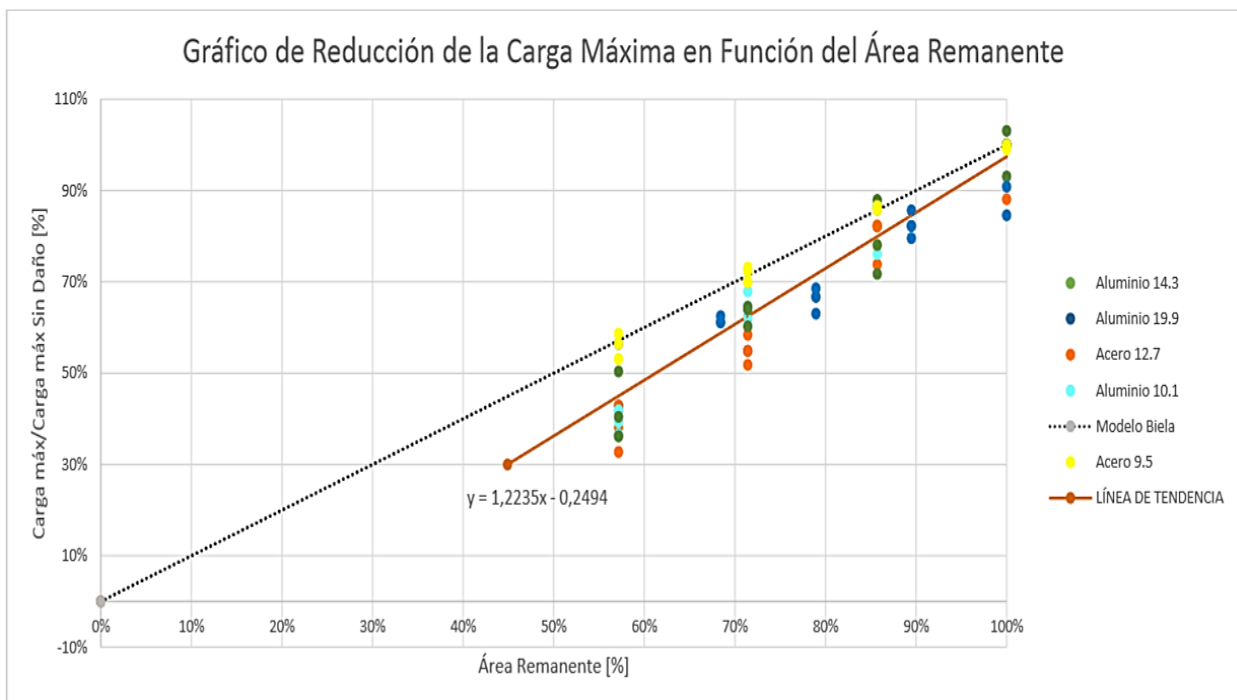


Figura 49: Gráfico de Carga máxima Normalizada por la Carga máxima del Cable Sin Daño en función del Área Remanente del cable.

Si comparamos los valores esperados con respecto al modelo biela del que se aprende como comportamiento de un cable, cuando se tiene un 70% de área remanente, es decir, un 30% de pérdida de área de la sección transversal del cable, uno esperaría obtener un 30% de pérdida de capacidad. En cambio, siguiendo la regresión lineal obtenida se tiene una disminución de la capacidad de un 39,3 %. Análogamente, para una pérdida de área de un 50% se tiene una pérdida de la capacidad de un 63,76%, valores mayores de los esperados en términos de pérdida de capacidad.

## 6.2. Efecto Diámetro

Se realizó un análisis global del efecto diámetro de los cables ensayados, considerando cómo varían las deformaciones en una misma posición del cable (un mismo Strain Gauge) en función del diámetro, independientemente del material analizado. Para eso se normalizaron los valores obtenidos de las deformaciones y carga en función del máximo valor obtenido según la Ley Constitutiva de cada material, como se mencionó en la revisión bibliográfica de la tesis en elaboración del alumno Tomás Bravo [13].

Para los cables sin daño alguno se obtuvo la Figura 50, Figura 51 y Figura 52, correspondientes a los strain gauges de posición 0, 1 y 2 respectivamente. De estos gráficos se debiera esperar el mismo comportamiento en todos los instrumentos utilizados al medir, ya que como no posee daño alguno el índice de asimetría es 0, obteniéndose una completa simetría. Para el strain gauge SG2, los valores del cable de aluminio de 10.1 mm de diámetro se escapan un poco al comportamiento de los otros instrumentos. En general, se observa que los cables de menor diámetro poseen mayores deformaciones cuando se analiza el comportamiento de cada uno de los materiales, por lo tanto si se aprecia un efecto diámetro pero éste no se puede desmaterializar ya que no es independiente del tipo de cable que se analice.

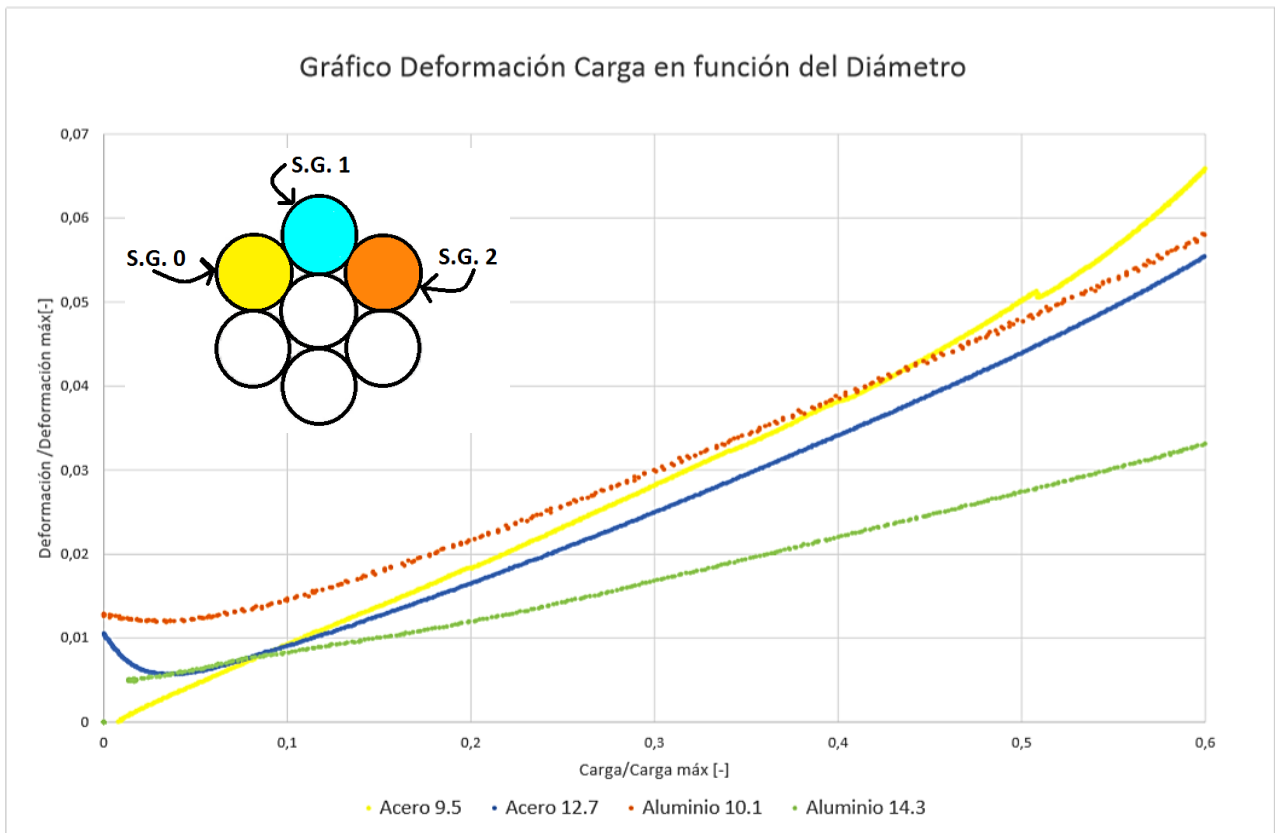


Figura 50: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable Sin Daño

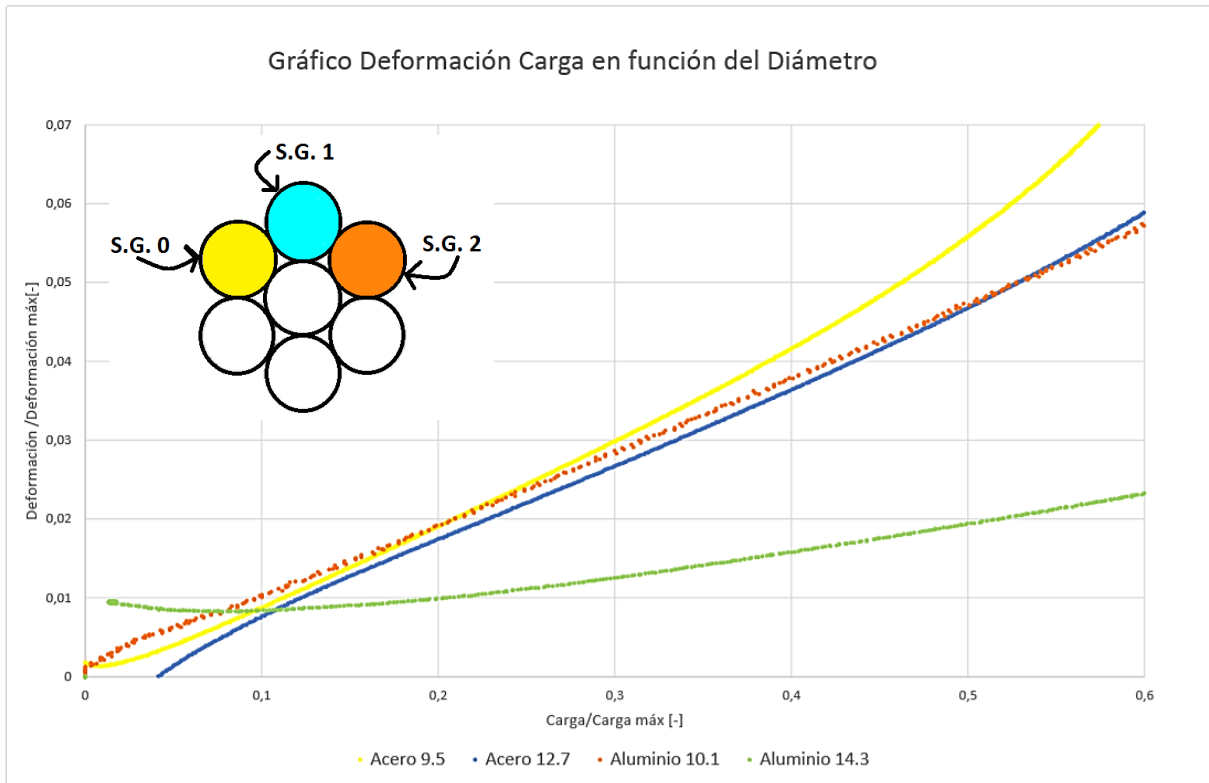


Figura 51: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable Sin Daño

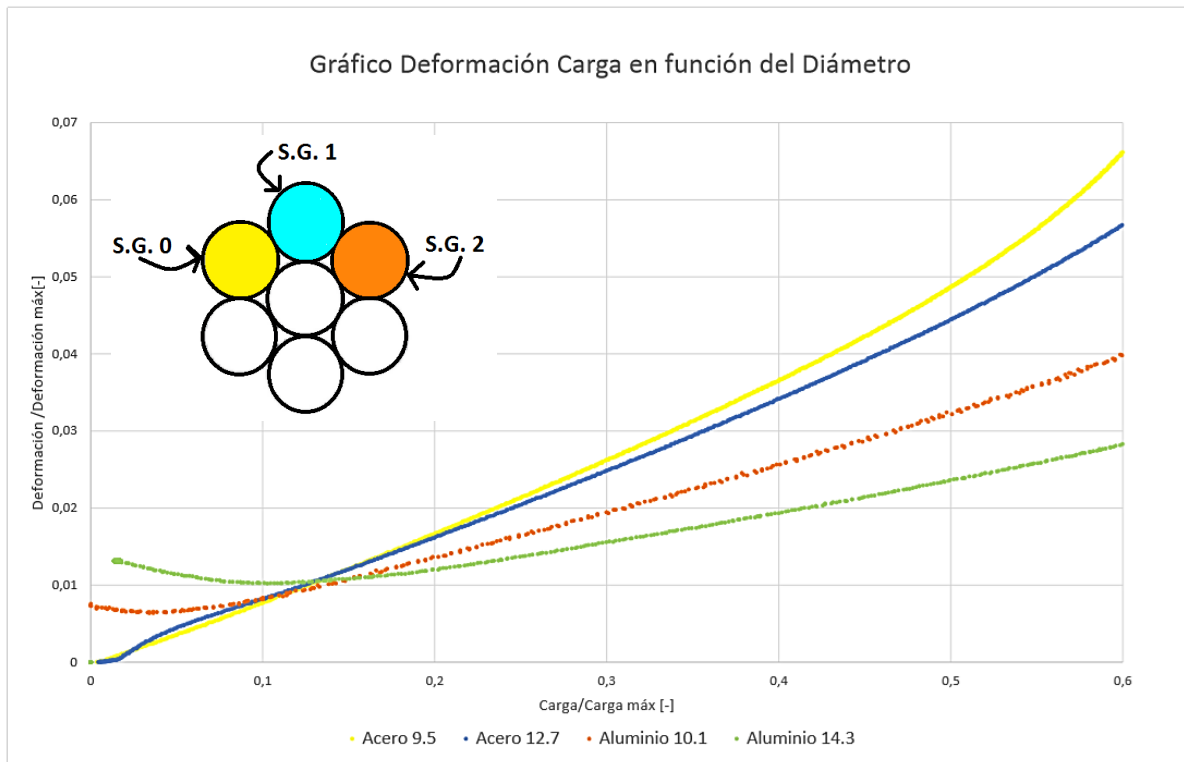


Figura 52: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable Sin Daño



Para el caso de los cables que poseen un daño se obtuvo los gráficos de las Figura 53, Figura 54 y Figura 55 en las que se aprecia que se invierte el nivel de deformaciones, en comparación a los cables sin daño, entre los cables de un mismo material para los dos primeros strain gauges, es decir, ahora se tiene que tanto para acero como para aluminio, las deformaciones son mayores para los cables de mayor diámetro. En cambio, para el strain gauge SG2 se tiene el mismo comportamiento que para los cables sin daño, y esto se explica ya que los primeros strain gauges se encuentran traccionados en contraposición al último. Por consecuencia, se sigue observando un orden de acuerdo al material, un efecto diámetro, pero el comportamiento no es generalizado, por tanto no hay desmaterialización del efecto. Además, las diferencias entre los niveles de deformaciones es mayor en los cables de acero más que para los de aluminio, esto se puede deber a que estos últimos son más susceptibles a sufrir deformaciones, al ser un material más dúctil, por lo tanto el efecto diámetro es más notorio (corrobora lo analizado en la Figura 46).

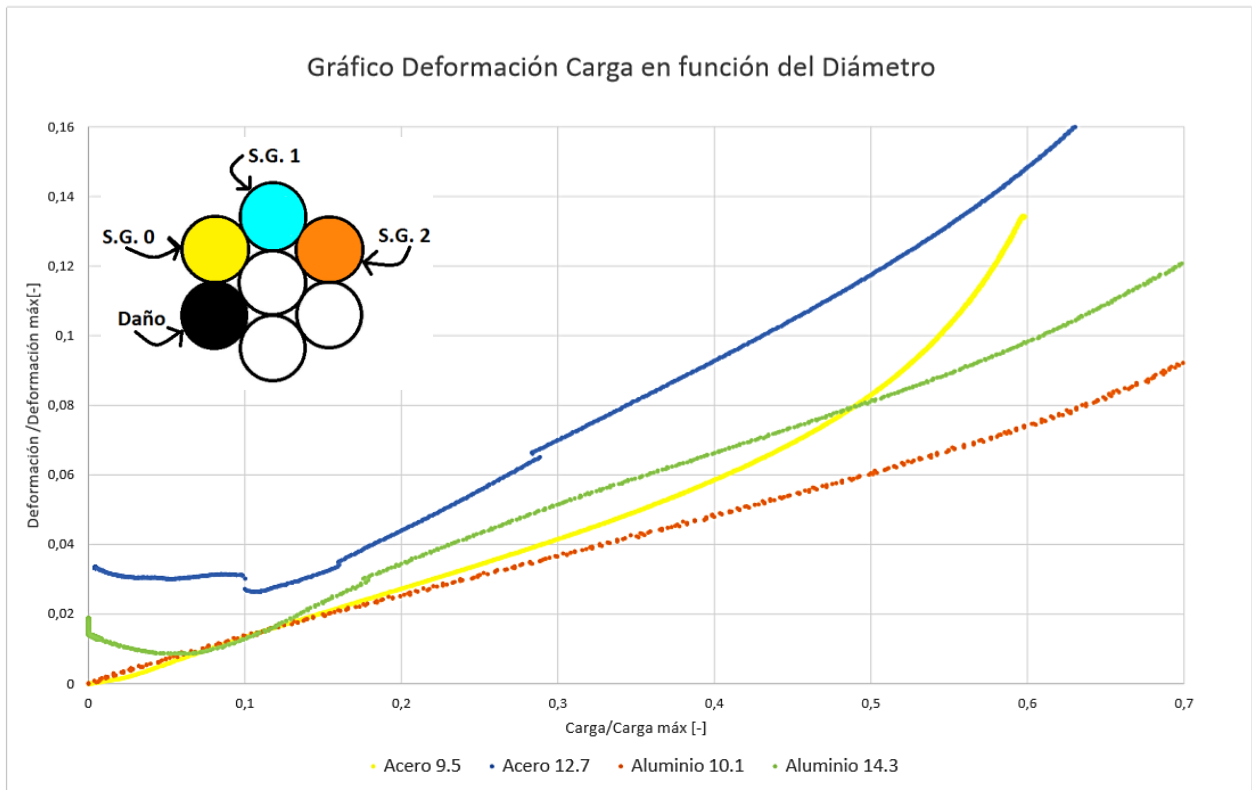


Figura 53: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable con Un Daño

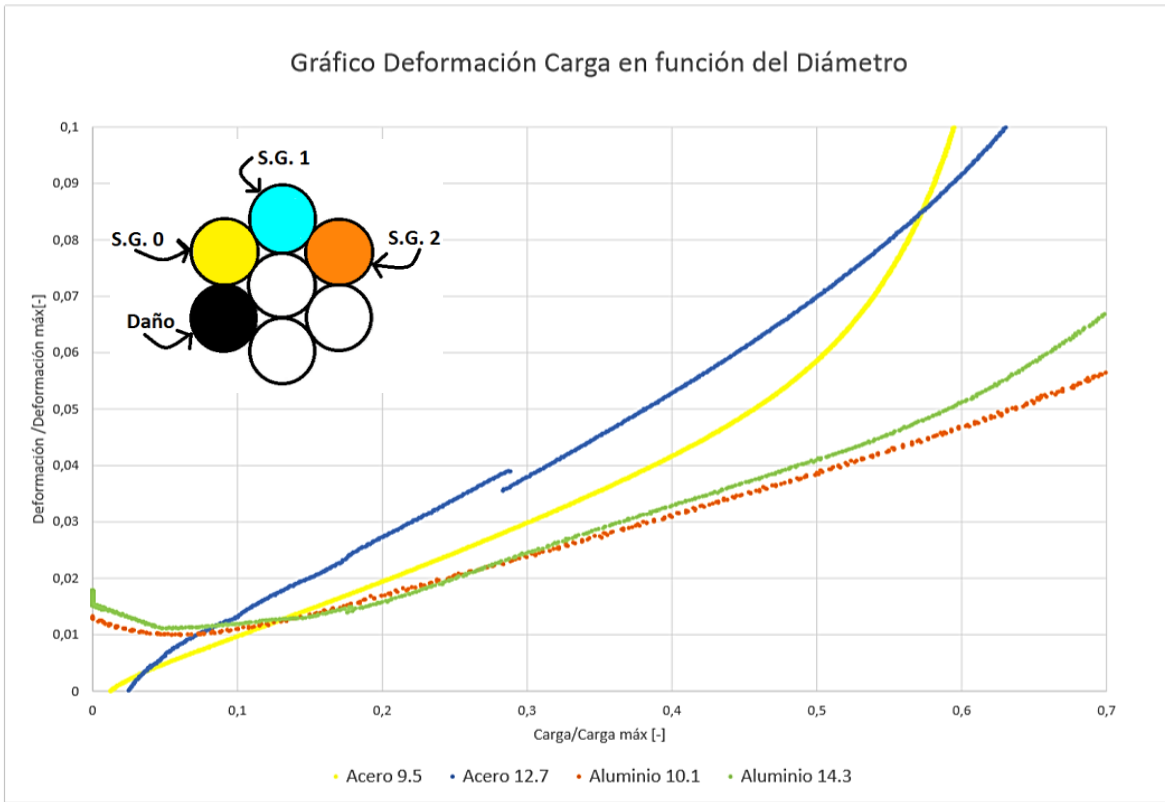


Figura 54: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable con Un Daño

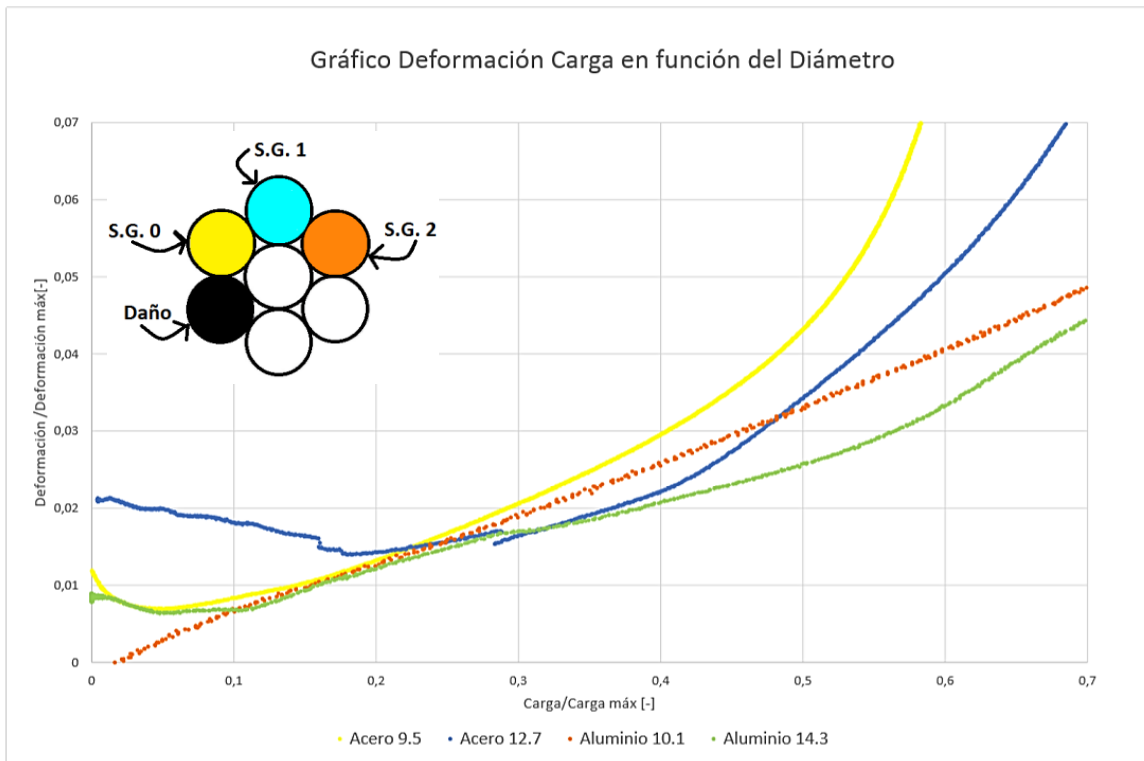


Figura 55: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable con Un Daño

Analizando los cables que poseen dos daños se obtuvo los gráficos de las Figura 56, Figura 57 y Figura 58. Para el strain gauge SG0, los resultados son consistentes en el caso de los cables de acero, ya que al ser la hebra contigua al daño éstas poseen el efecto de tracción del elemento, que genera mayores deformaciones en cables de mayor diámetro, pero no es consistente con los resultados obtenidos de los cables de aluminio. Analizando el strain gauges SG1 y SG2, se observa que no hay un efecto diámetro, ya que presenta el mismo nivel de deformaciones cada uno de los materiales analizados. Sin embargo, el hecho de que posean el mismo comportamiento para cada uno de los materiales viene a reforzar el hecho de no poder desmaterializar el análisis.

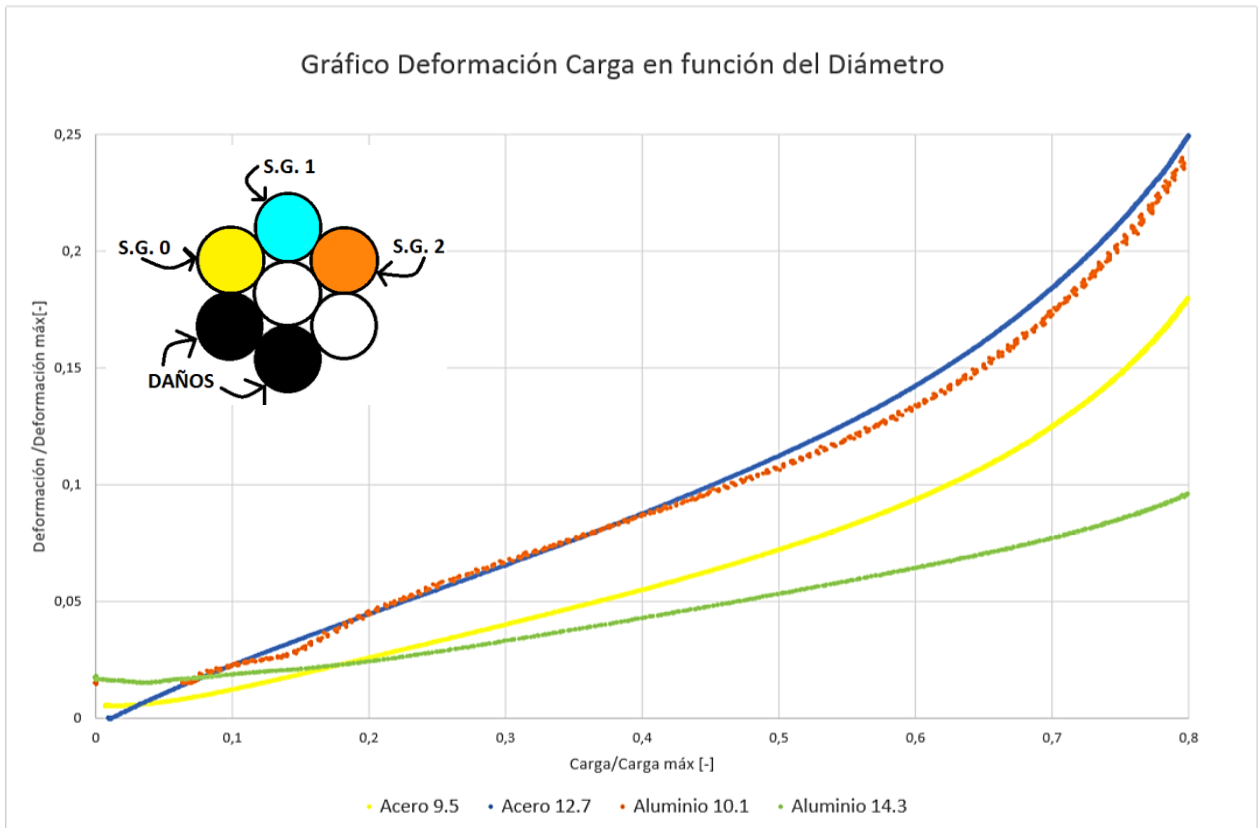


Figura 56: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable con Dos Daños

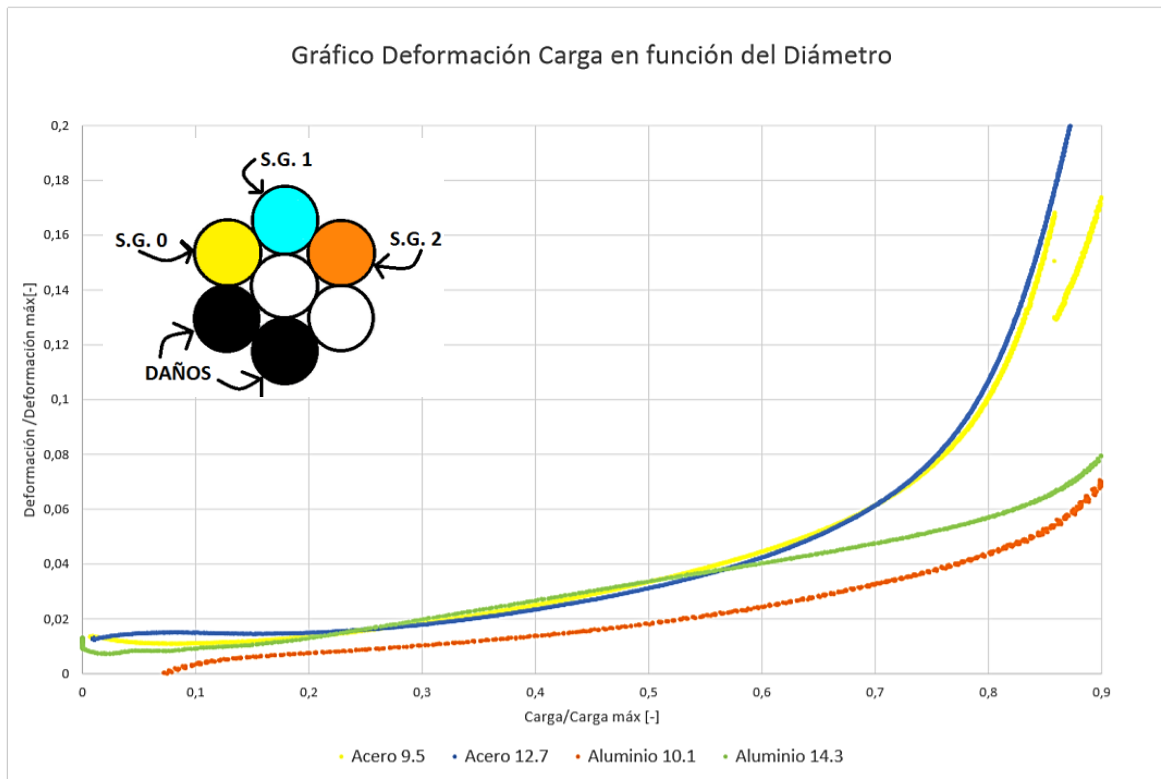


Figura 57: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable con Dos Daños

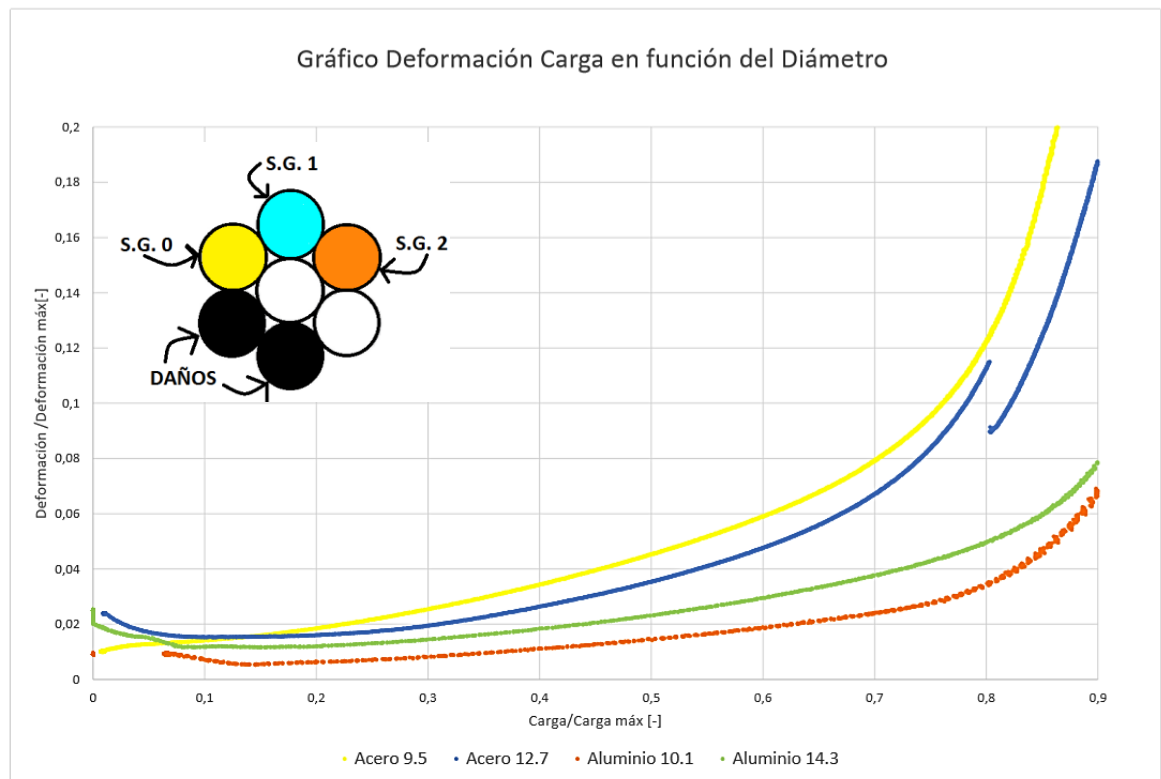


Figura 58: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable con Dos Daños

Para el último caso en que los cables poseen tres daños se obtuvieron los gráficos de las Figura 59, Figura 60 y Figura 61. En esto se muestra que en todas las curvas, los cables que poseen menor diámetro se deforman más que las que tienen uno mayor, y esto es porque todas se encuentran sometidas a compresión, y el elemento que debería estar traccionado es el núcleo, el cual no puede ser medida sus deformaciones. Por lo tanto, el efecto diámetro acá se cumple y sigue habiendo una dependencia del material ya que no hay un orden bien definido según los diámetros de los cables.

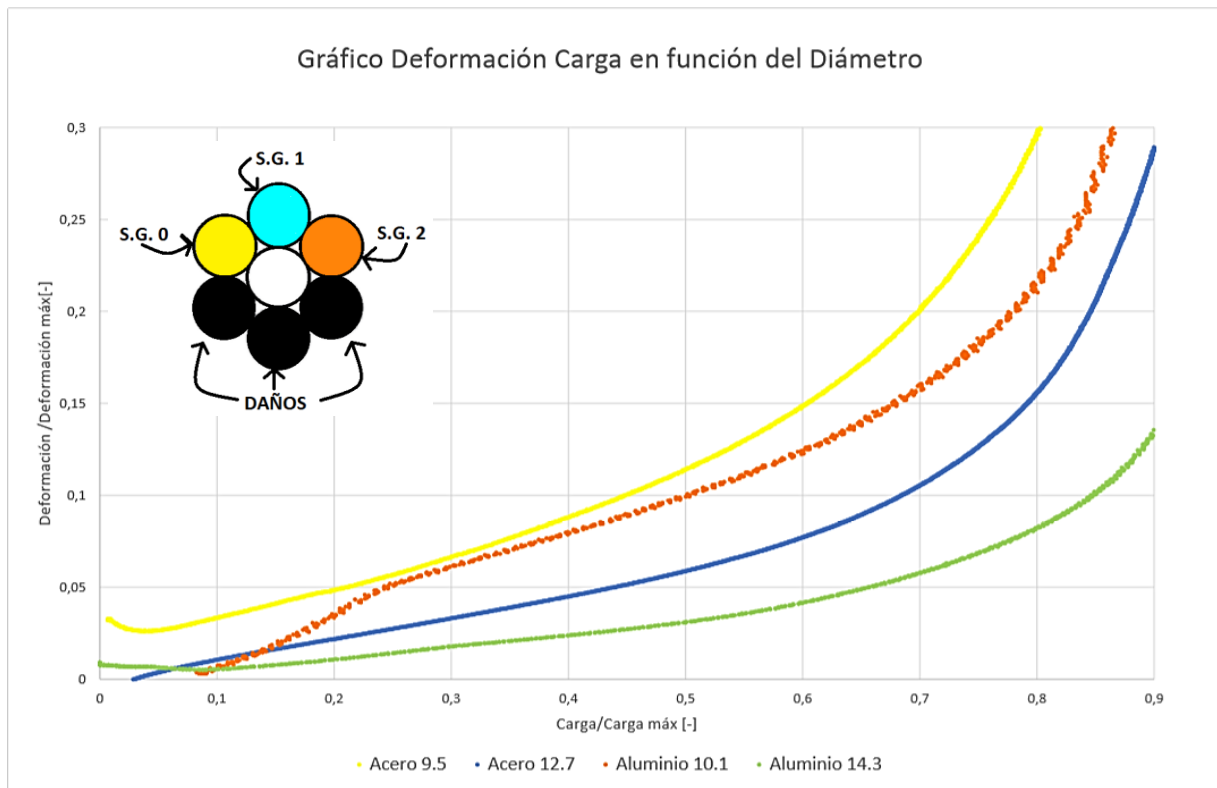


Figura 59: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG0 en un Cable con Tres Daños

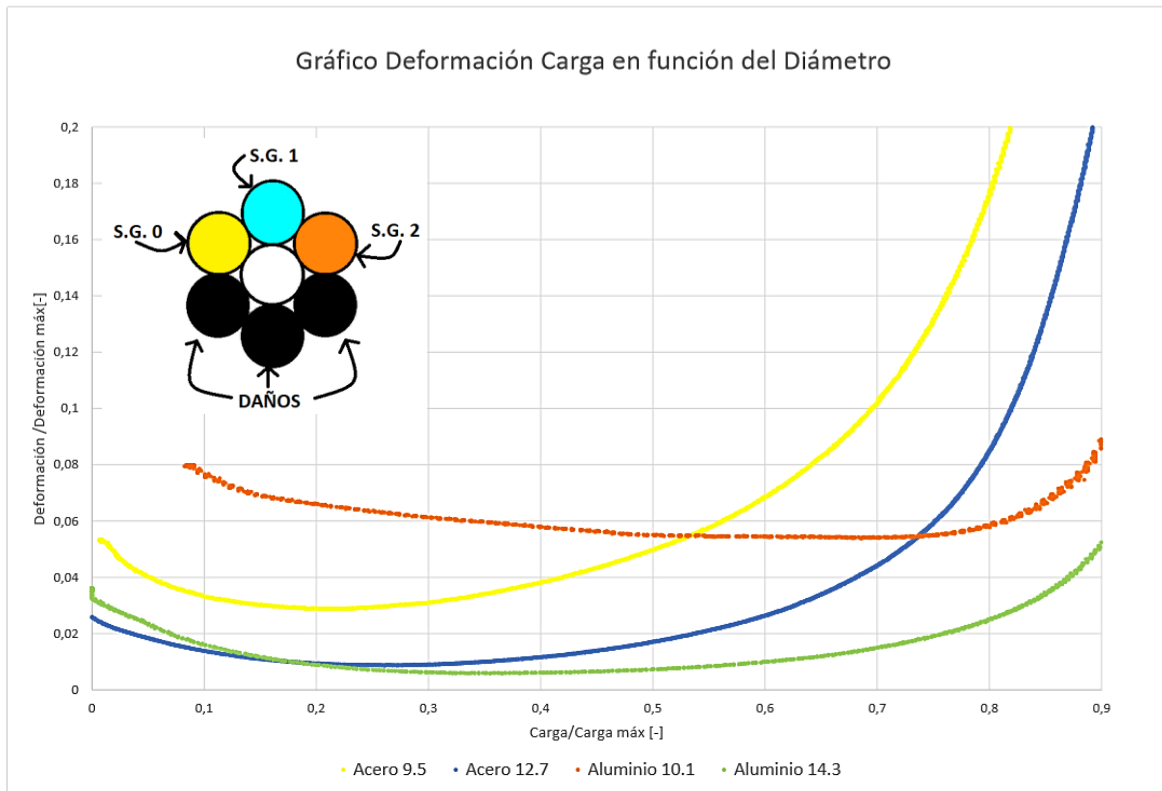


Figura 60: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG1 en un Cable con Tres Daños

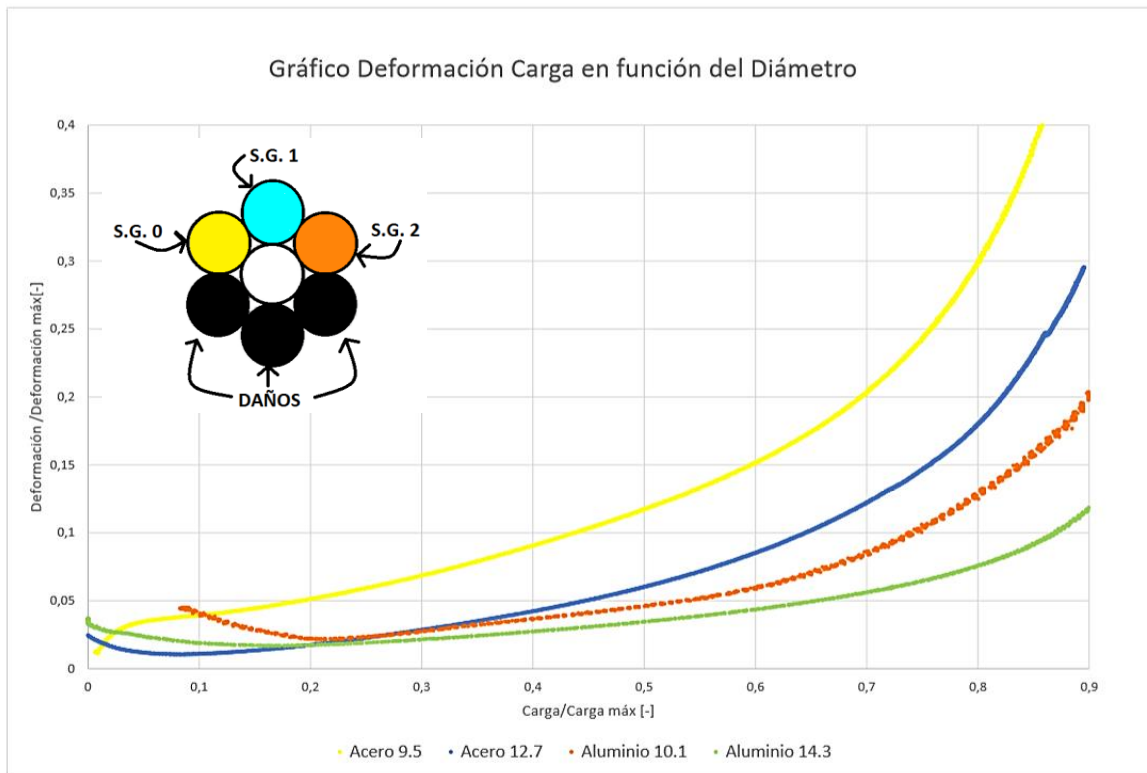


Figura 61: Gráfico de Deformación y Carga Normalizadas por la Ley Constitutiva de cada material en función de cada tipo de cable para el Strain Gauge SG2 en un Cable con Tres Daños

A partir del concepto de relación modular, se buscó la forma de desmaterializar el efecto diámetro transformando los diámetros de los cables de aluminio a los de acero. Es así como considerando las medianas obtenidas de los módulos de elasticidad con el uso de extensómetros de las Tabla 4, Tabla 5, Tabla 11 y Tabla 12 se tiene un promedio de 152,9 MPa para los cables de acero y 75 MPa para los de aluminio, de esta manera la relación modular corresponde a:

$$\text{Relación Modular: } n = \frac{152,9 \text{ MPa}}{75 \text{ MPa}} \cong 2,03$$

Si se define el área sólida de un cable como:

$$A = f * \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

En donde:

$f$ : "packing factor" (considerado como  $f \cong 0,8$ )

$d$ : diámetro del cable

De esta manera, el diámetro de un cable corresponde a:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi \cdot f}}$$

Considerando el cable de aluminio de 10,1 mm de diámetro, se tiene que:

$$\Rightarrow A_{\text{sólida}} = \frac{\pi \cdot (10,1)^2}{4} = 80,1 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow A_{\text{cable}} = f * 80,1 \text{ mm}^2 = 64,08 \text{ mm}^2$$

Así, el área equivalente a un cable de acero es:

$$\Rightarrow A_{\text{equivalente acero}} = \frac{64,08 \text{ mm}^2}{n} = \frac{64,08 \text{ mm}^2}{2,03} = 32 \text{ mm}^2$$

$$\therefore d_{\text{equivalente acero}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 32 \text{ mm}^2}{\pi \cdot 0,8}} \cong 7.1 \text{ mm}$$

Para el caso del cable de aluminio de 14,3 mm de diámetro, el diámetro equivalente se calcula de manera análoga:

$$\Rightarrow A_{solida} = \frac{\pi \cdot (14,3)^2}{4} = 160,5 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow A_{cable} = f * 160,5 \text{ mm}^2 = 128,4 \text{ mm}^2$$

Así, el área equivalente a un cable de acero es:

$$\Rightarrow A_{equivalente \text{ acero}} = \frac{128,4 \text{ mm}^2}{n} = \frac{128,4 \text{ mm}^2}{2,03} = 63,2 \text{ mm}^2$$

$$\therefore d_{equivalente \text{ acero}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 63,2 \text{ mm}^2}{\pi \cdot 0,8}} \cong 10,1 \text{ mm}$$

A partir de los diámetros equivalentes de acero de los ensayos realizados para los cables de igual configuración y utilizando los promedios de factores de amplificación de la Tabla 6, Tabla 7, Tabla 14 y Tabla 15 se graficaron estos valores para los strain gauges SG0 y SG2 en los casos en que hay una y dos hebras dañadas. Estos strain gauges corresponden al más próximo al daño y al opuesto a estos, respectivamente. Los resultados se muestran en las Figura 62 y Figura 63.

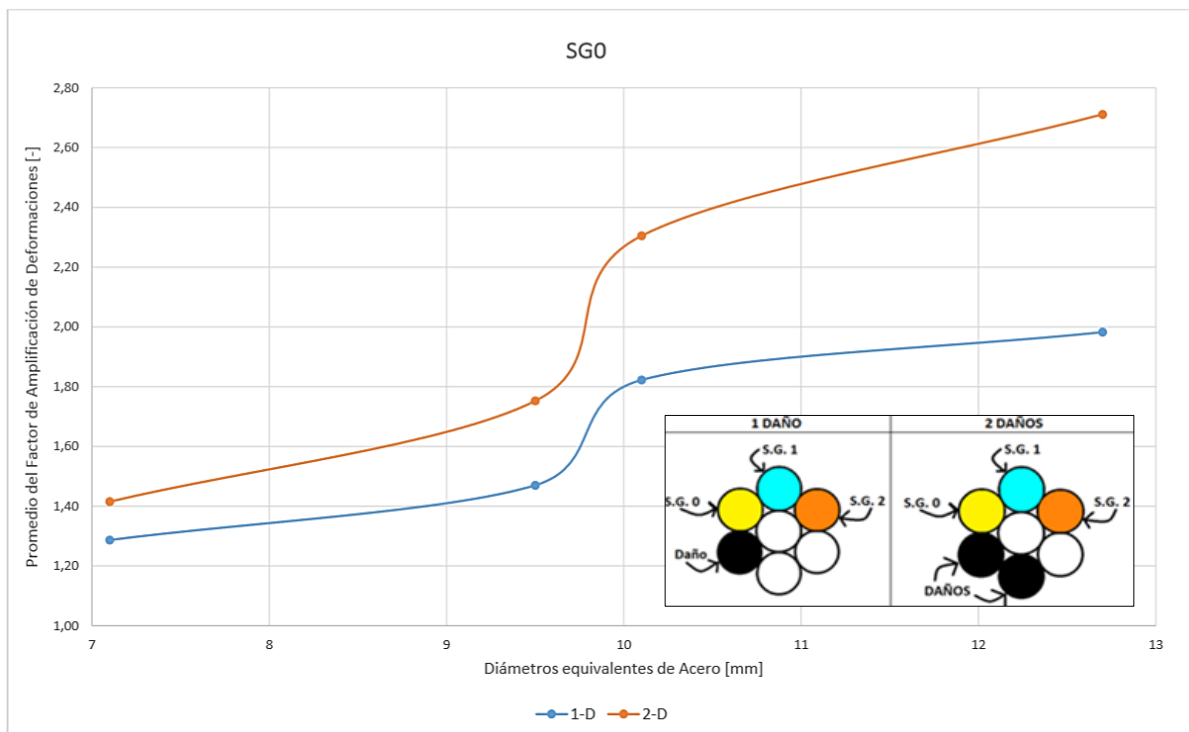


Figura 62: Gráfico de Factores de Amplificación de Deformaciones para el Strain Gauge SG0 en todos los cables según sus diámetros equivalentes de acero para ensayos de 1 y 2 daños.



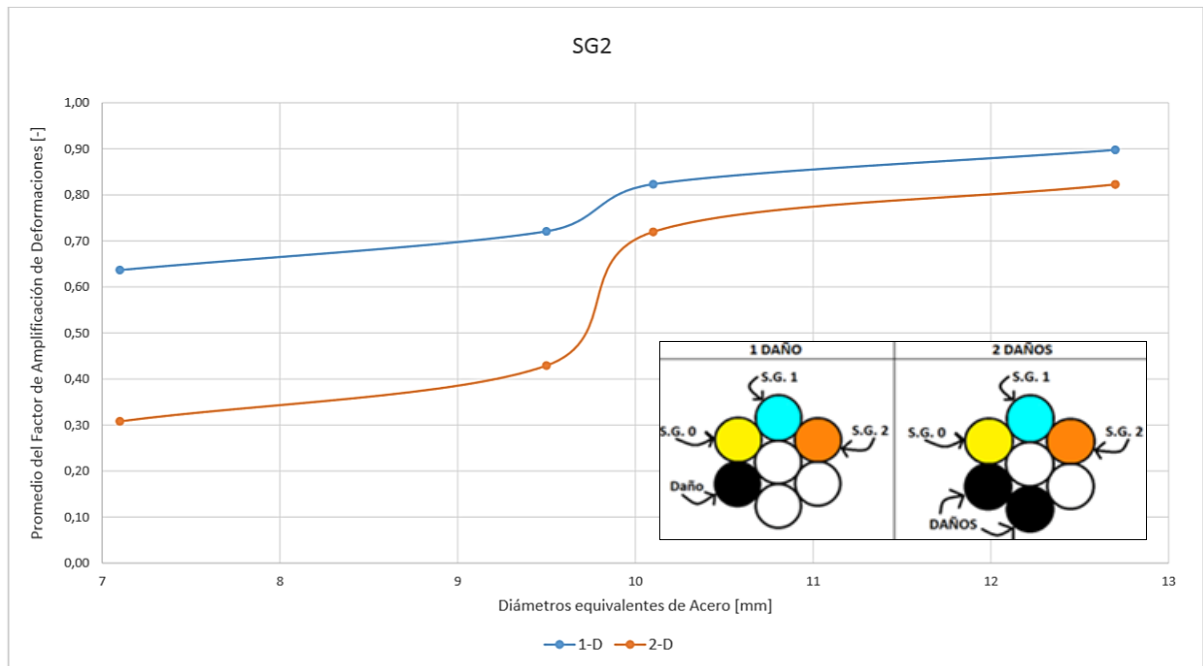


Figura 63: Gráfico de Factores de Amplificación de Deformaciones para el Strain Gauge SG2 en todos los cables según sus diámetros equivalentes de acero para ensayos de 1 y 2 daños.

Como se aprecia en las Figura 62, el strain gauge SG0 es el que se encuentra próximo a los daños para ambos casos, por lo tanto siempre se encuentra traccionado ya que posee promedios de factores de amplificación de deformaciones mayores a 1 y ascendente con respecto a los diámetros equivalentes a acero. Por otro lado, Figura 63 muestra el comportamiento del strain gauge SG2, el cual al estar siempre opuesto a los daños posee compresiones, que se aprecia por los valores de los factores menores a 1 que también aumentan con el incremento del diámetro equivalente de acero. Estos gráficos confirman el efecto diámetro.

## Capítulo 7. Conclusiones

En el presente estudio se logró caracterizar el desempeño de 60 cables: 24 cables de acero de dos diámetros distintos y 36 cables de aluminio de tres diferentes diámetros. Se indujo daños de manera de determinar la influencia de estos en las curvas de capacidad de tensión-deformación, la distribución de deformaciones, la relación del daño del cable con su diámetro e índice de asimetría y describir el método experimental desarrollado para obtención de los datos.

A partir de esto, desde el punto de vista cualitativo:

- Se logró confirmar que las deformaciones de las hebras contiguas a los daños eran mayores a las obtenidas en las hebras más alejadas, e inclusive el comportamiento de los alambres opuestos a los daños realizados a los cables presentaba deformaciones incluso menores a las presentes en los cables analizados sin daño, esto se debe al efecto de la flexión presente en los cables debido al nivel de asimetría impuesto por los daños realizados que conduce a compresión en esas hebras.
- El efecto del material es relevante cuando se aprecian los rangos en los que se encuentran los niveles de amplificación de las deformaciones obtenidos en comparación a los cables sin daño, siendo mayores para el caso de los cables de aluminio, lo que indica que éste es más susceptible a sufrir deformaciones al ser más dúctil.
- El conjunto de todas las deformaciones obtenidas, ya sea un aumento o disminución de las deformaciones de las hebras contenidas en los cables, generan una disminución de la capacidad y deformación global del elemento conforme aumenta el nivel de daño, siendo no clara la disminución de las deformaciones para el caso en que el nivel de asimetría era de 0.5, en donde en algunas ocasiones aumentaba.
- Si bien se logró observar un efecto diámetro relativo a las deformaciones en donde sin daño y en presencia de compresiones se deforma más los elementos de menor diámetro y en hebras contiguas a los daños, pero que ante efectos de tracción se aprecia una inversión del comportamiento. Sin embargo, este análisis si pudo ser desmaterializado de manera de considerar los ensayos realizados con todos los tipos de cables transformando los diámetros de los cables de aluminio a los de acero equivalente a través del concepto de relación modular. Así, para uno y dos daños si se aprecia un aumento de los factores de deformación (deformaciones normalizadas por la máxima determinada del cable sin daño) a medida que el diámetro equivalente de acero se ve incrementado.

Desde el punto de vista cuantitativo:

- Se determinaron factores de deformación que corresponden al valor de las deformaciones de un alambre para una cierta carga normalizada por la deformación de rotura del cable sin daño. Fueron determinados para distintos niveles de carga que también fueron normalizados por los valores de capacidad máxima obtenidos del desempeño evaluado de los cables sin daño. Dichos valores son mayores a 1 para la hebra adyacente al daño, encontrándose deformaciones de hasta un 270% con respecto a las deformaciones del cable sin daño, y menores a 1 para el alambre opuesto, con hasta un 20% de las deformaciones del cable virgen, es decir, con presencia de compresiones.
- Con el aumento de los daños, la carga máxima que resisten los cables disminuye pero no de manera lineal. De los datos se obtuvo que a medida que el área remanente disminuye, la capacidad lo hace en mayor cantidad. Esto es relevante al momento de generar criterios de descarte en la evaluación de cables que presenta daños, ya que según el modelo de biela utilizado éste se encuentra subestimado, lo que puede ocasionar problemas estructural graves considerando que para un nivel de pérdida de área de un 30% la capacidad puede disminuir hasta un 50%.
- Cabe destacar que si bien el nivel de daño aceptable dentro de una estructura metálica no debe exceder el 10% ésta no es una realidad, y al mismo tiempo el extender el nivel de daño a un 57% ayuda a entender el comportamiento del fenómeno analizado. Lo mismo sucede cuando se analiza no sólo el rango lineal siendo que se diseña para que los cables sean utilizados dentro de éste.

Con respecto al procedimiento experimental ejecutado se realizan las siguientes recomendaciones:

- El uso de strain gauges es bastante acertado como instrumento para medir las deformaciones locales de los cables en cada hebra analizada, ya que es bastante sensible, de tamaño suficientemente pequeño para ser colocado en alambres finos y de alta confiabilidad, pero que al mismo tiempo no logra medir las deformaciones hasta el momento de la rotura, ya que antes se despega por falta de adherencia o se corta. Para ensayos de estas características se recomienda el strain gauges *Tokyo Sokki Kenkyujo Co.*
- Sin embargo, el extensómetro está lejos de ser un instrumento confiable para el caso de los cables en los cuales fue manipulado, por el mal agarre que éste posee dada la disposición helicoidal de los cables y por consecuencia del gradiente de deformaciones que presentaba (siendo imposible de utilizar en cables con dos daños o más) y de las hebras de las cuales estaba sujeto, ya que no lograba generar un agarre completo del cable, por lo que no se obtenía un análisis global acertado. Se recomienda utilizar otro tipo de extensómetro.

- Con respecto al uso de LVDT, éste era bastante fidedigno al momento de determinar los niveles de deformación globales, además de ser el único elemento capaz de resistir las deformaciones propias del acomodamiento de los cables debido a los daños a lo largo de todo el ensayo, hasta la rotura.
- Se propone realizar una mayor cantidad de ensayos de modo de disminuir los datos con presencia de errores debido a la incertidumbre presente en la experimentación, para eso se plantea ensayar una cantidad más amplia de cables de diversos diámetros y materiales.
- Para los cables de aluminio, no se recomienda utilizar si se requiere estudiar algún comportamiento independientemente del material a tratar, debido a que la adherencia que posee a los diferentes pegamentos es difícil de conseguir tanto para las terminales de vaciado como el pegado de strain gauges. Cabe destacar, que se tuvo que recurrir a calentar las zonas previamente a la colocación de estos últimos para asegurar la adherencia.
- Cuando se tienen cables de diámetro inferiores a los 20 mm, se recomienda tener una verificación preliminar de la adherencia a las terminales de vaciado para garantizar el desempeño de los dispositivos ya que al poseer poca superficie es menor el área de contacto que se genera con el pegamento utilizado.
- No se recomienda realizar el ensayo a velocidades muy altas (en el caso de los cables utilizados fue de 5 mm/min) ya que esto altera el comportamiento de los cables y la adherencia a las terminales de vaciado.

## Bibliografía

- [1] American Society for Testing and Materials. (10 de Junio de 2003). *A370 – 03a Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/A370.htm>
- [2] American Society for Testing and Materials. (1 de 10 de 2008). *A931-08 Standard Test Method for Tension Testing of Wire Ropes and Strand*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/A370.htm>
- [3] American Society for Testing and Materials. (1 de Diciembre de 2009). *E8/E8M – 09 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/E8.htm>
- [4] Chouairi, A., El Ghorba, M., Benali, A., & Hachim, A. (s.f.). Estimated loss of residual strength of a flexible metal lifting wire rope: Case of artificial damage.
- [5] Colin MAcDougall, & F.Michael Bartlett. (September-October de 2003). Test of Unbounded Seven-Wire Tendon with Broken Outer Wires. *ACI Structural Journal*.
- [6] De Vico, E. (2013). *Efectos de la distribución asimétrica de daño en la sección transversal de un cable: Modelación numérica*. Universidad de Chile.
- [7] Evans, J., Ridge, I., & Chaplin, C. (2001). Wire failures in ropes and their influence on local wire strain behaviour in tension-tension fatigue. *Journal Of Strain Analysis*, vol. 36, no 2.
- [8] G.Oplatka, & M.Roth. (s.f.). *Relation between Number and Distribution of Wire Breaks and the Residual Breaking Force*. Institute of Lightweight Structures and Ropeways, ETH Zurich (CH), University of Texas Libraries.
- [9] ISO 4309, v. 2. (2010).
- [10] MacDougall, C., & Bartlett, F. (2006). Mechanical Model for Unbonded Seven-Wire Tendon with Single Broken Wire. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*.
- [11] Ramírez Guzmán, N. A. (2010). *Estimación Numérica de la Influencia de la Distribución Asimétrica de Daño en la Respuesta Estática de Cables con Geometría Multicapa-Multinivel*. Universidad de Chile.
- [12] Seyed Reza Ghoreishi, Tanguy Messenger, Patrice Cartraud, & Peter Davies. (2016). Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model. *HAL*.
- [13] Tetlak, T. B. (Tesis en Elaboración). *Estimación numérica de la respuesta estática de un cable dañado: formulación elemento viga-cable*. Universidad de Chile.

- [14] *UNE-EN ISO 6892-1*. (abril de 2010).
- [15] Vargas, D. (2010). *Análisis de cables de sección transversal sin daño y con daño simétrico y asimétrico sujetos a cargas axisimétricas utilizando modelos tridimensionales de elementos finitos*. tesis de Ing. Civil, U de Chile.
- [16] WIRE ROPE TECHNICAL BOARD. (s.f.). *WIRE ROPE USERS MANUAL*, Fourth Edition.

# Anexos

A continuación, se muestran los gráficos completo de Deformación versus carga de todos los cables ensayados:

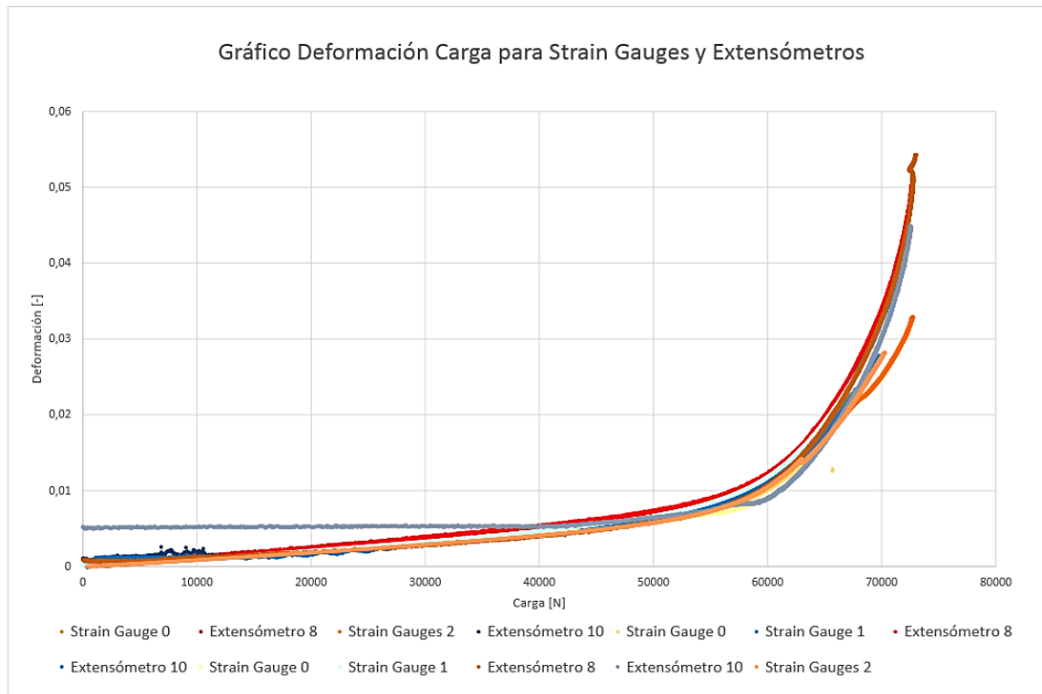


Figura 64: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros

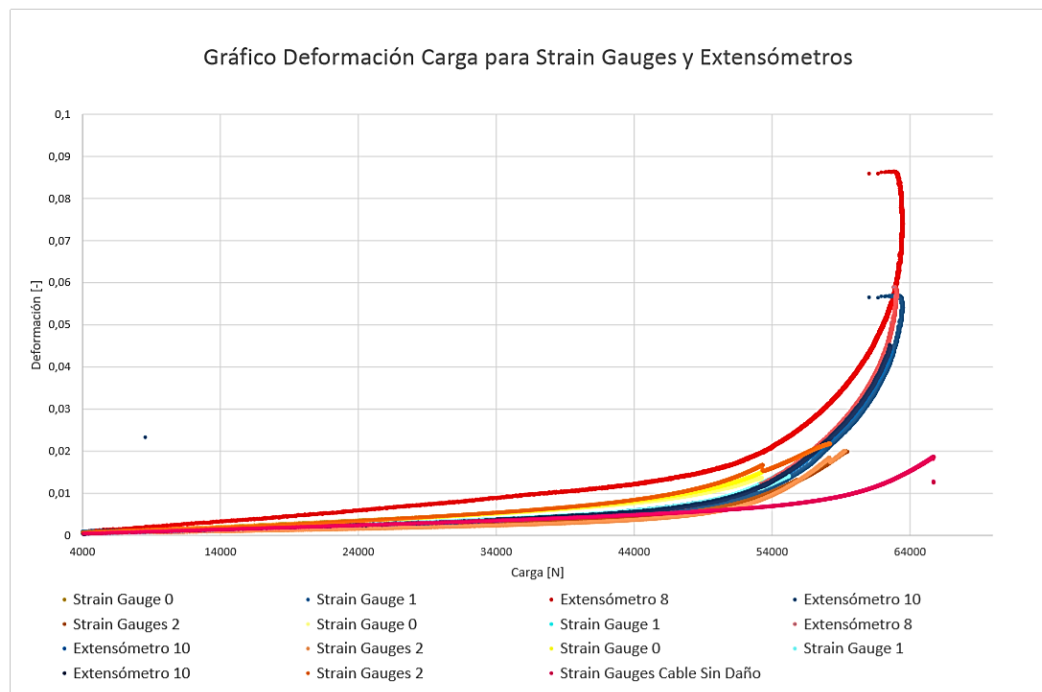


Figura 65: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges y Extensómetros



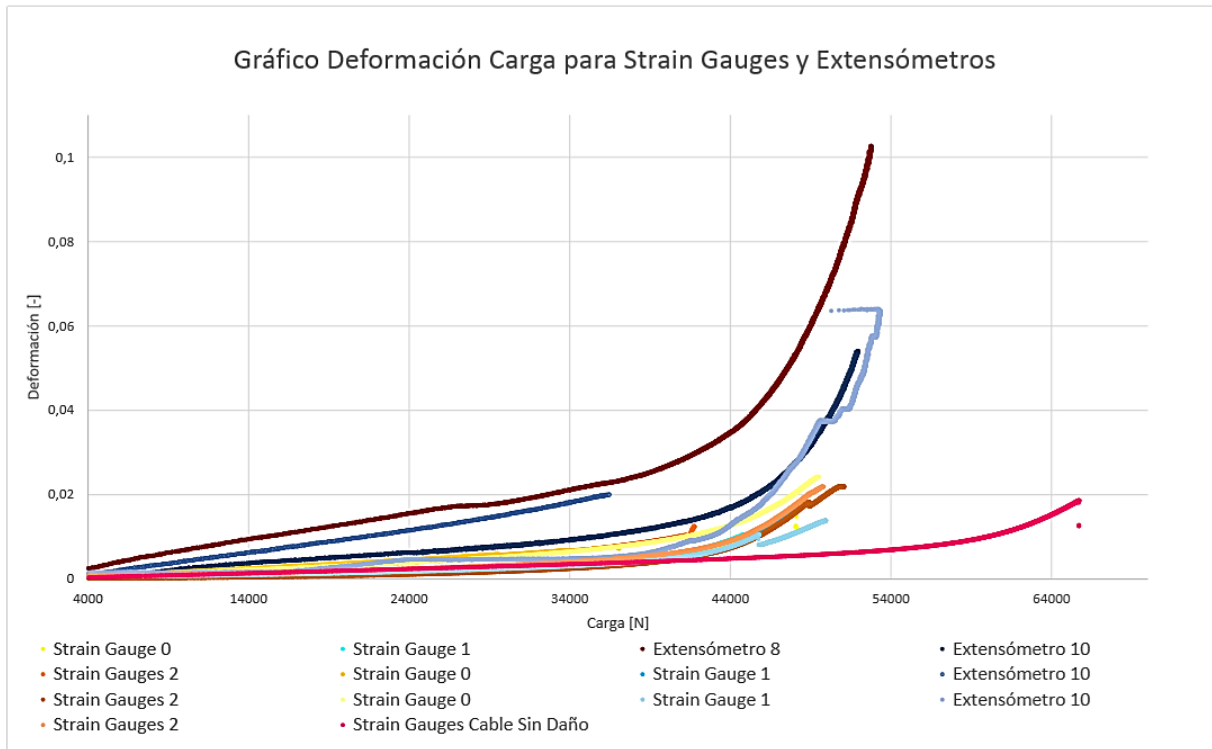


Figura 66: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros

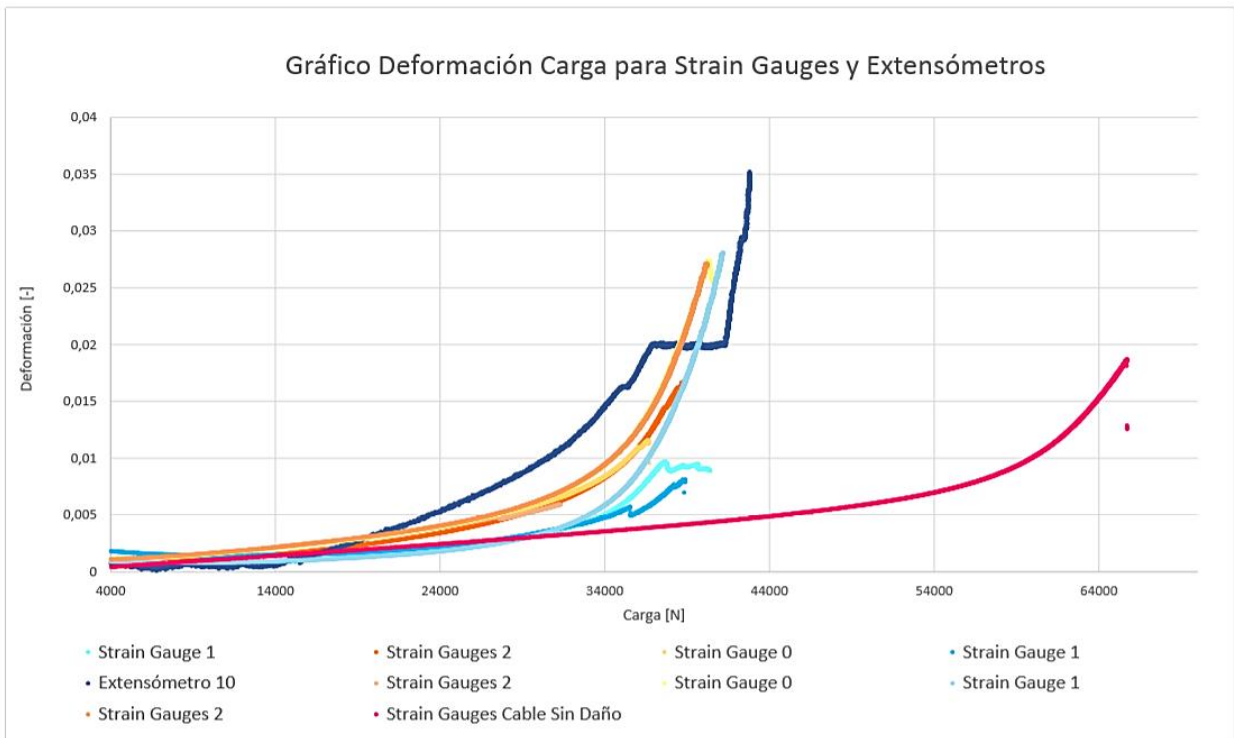


Figura 67: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 9.5 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges y Extensómetros

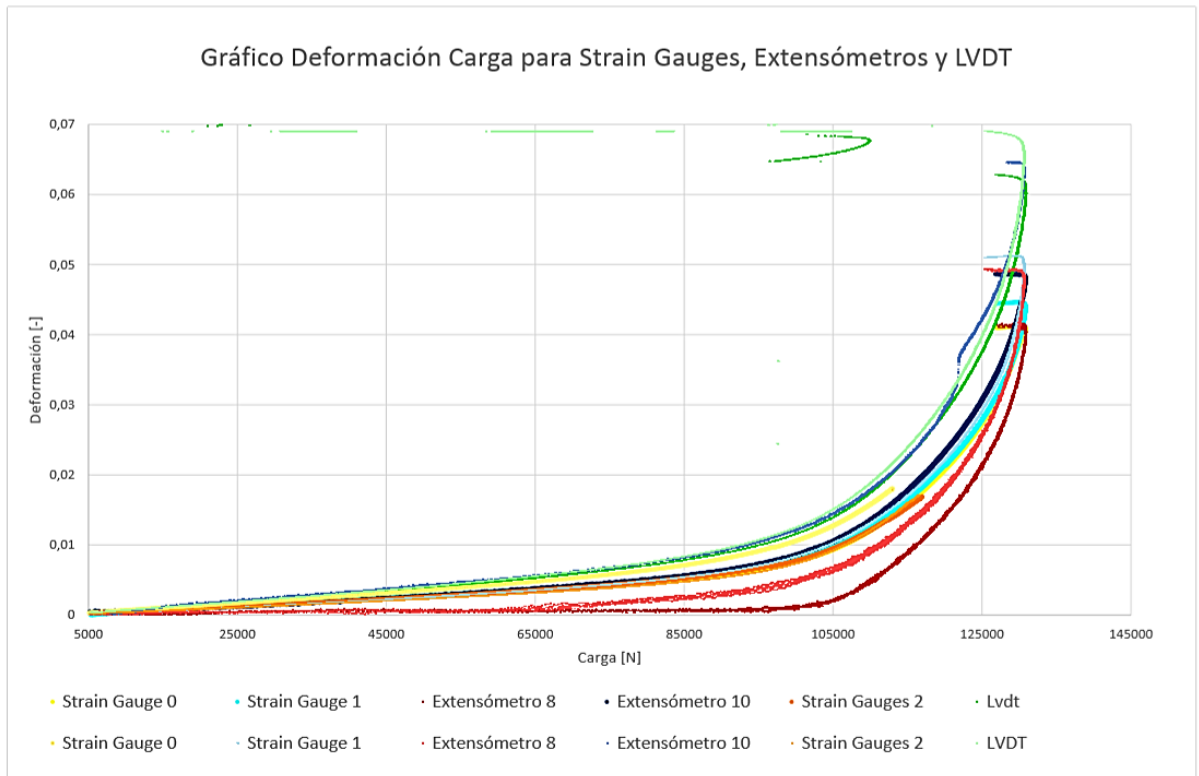


Figura 68: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

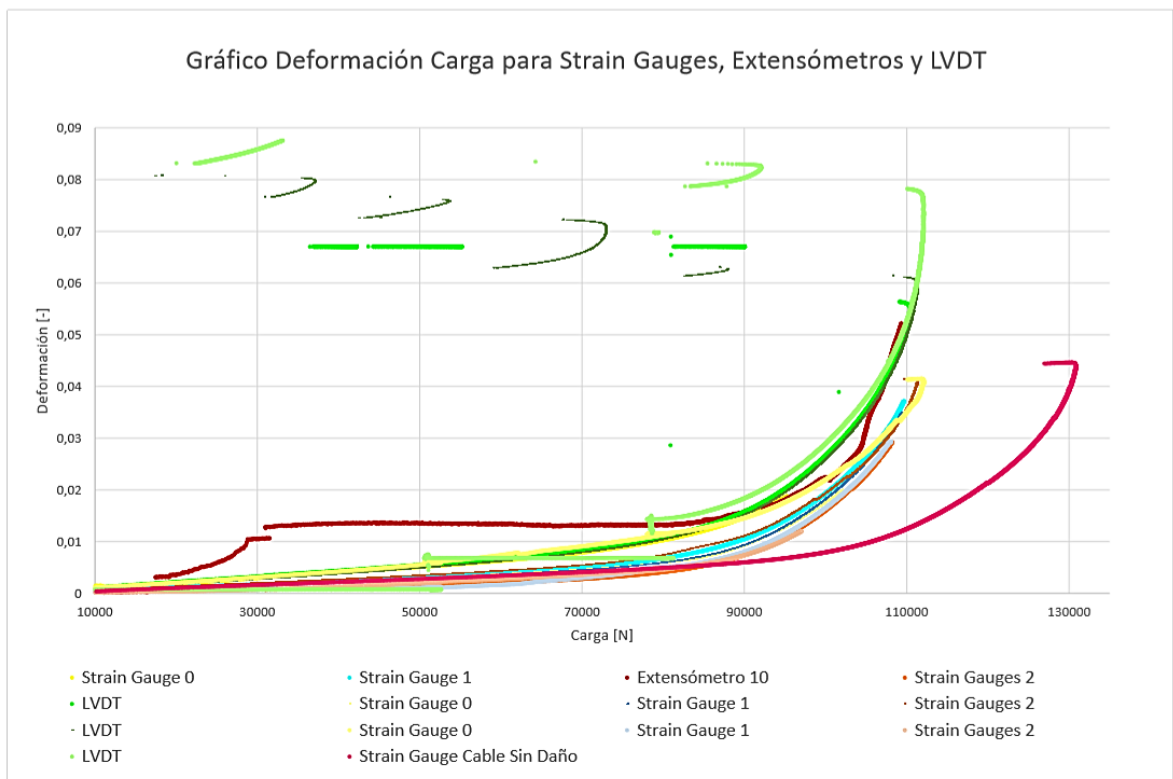


Figura 69: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

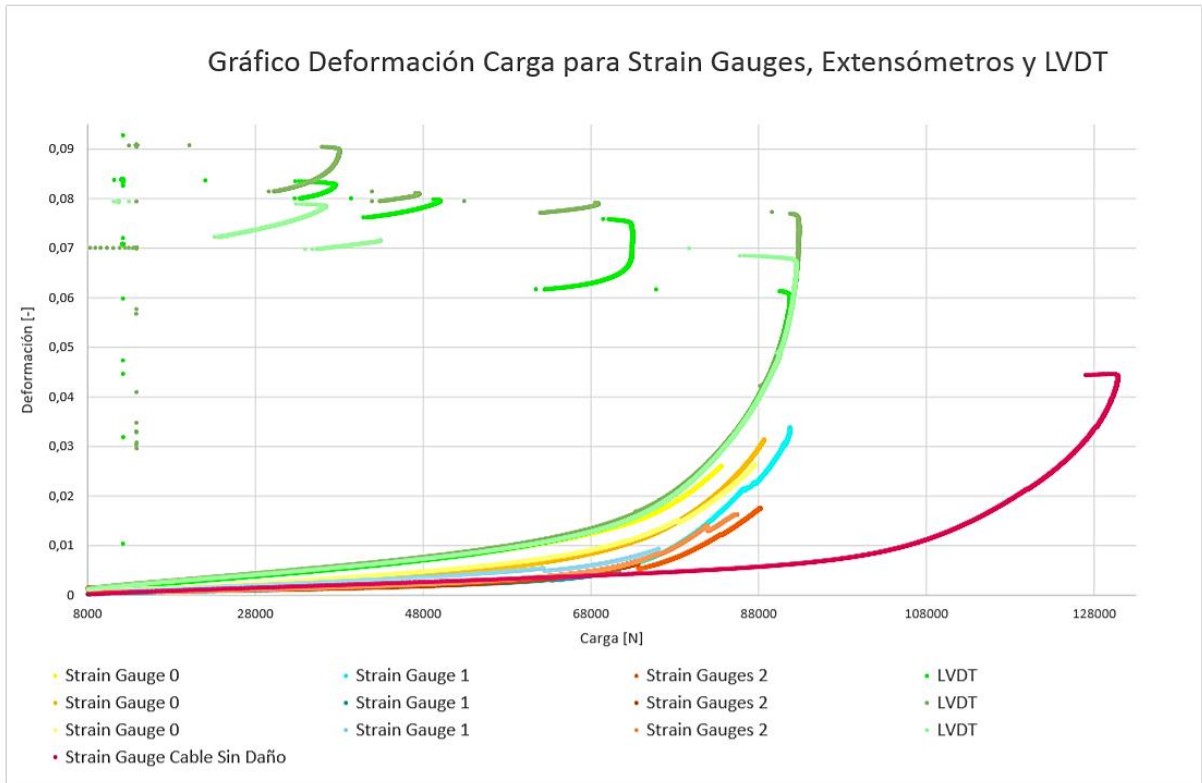


Figura 70: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT

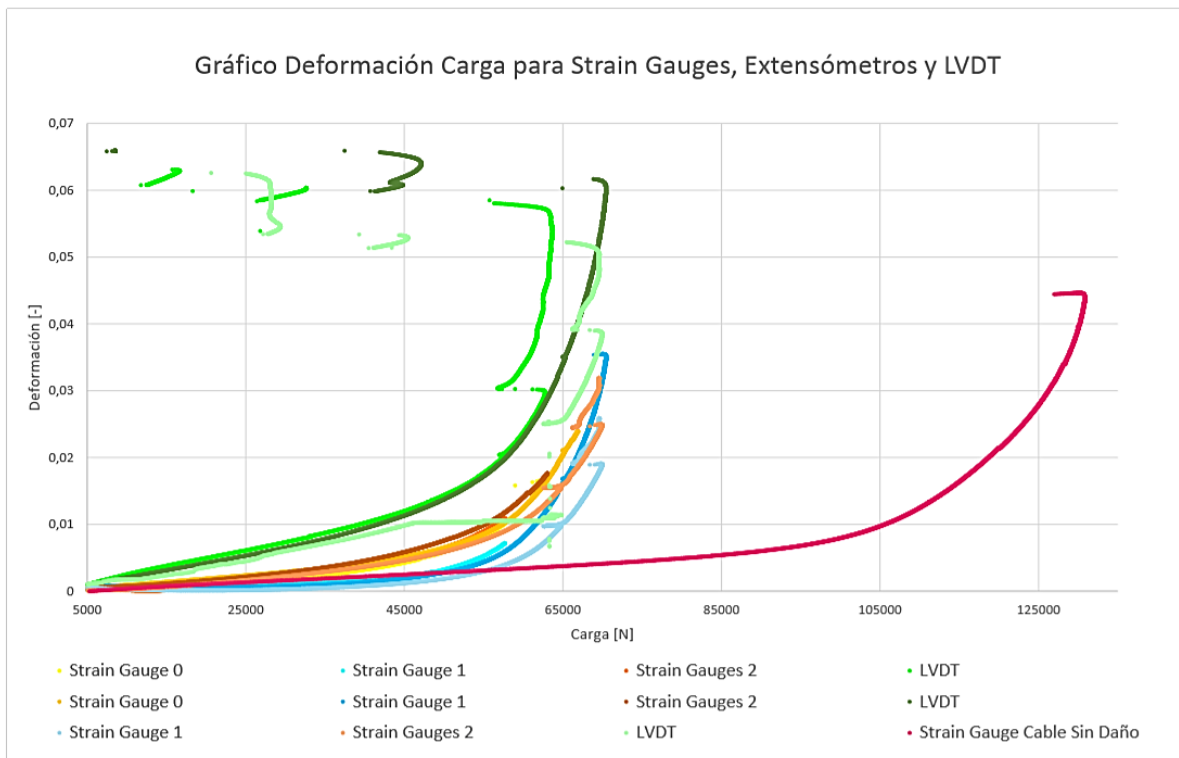


Figura 71: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Acero de 12.7 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

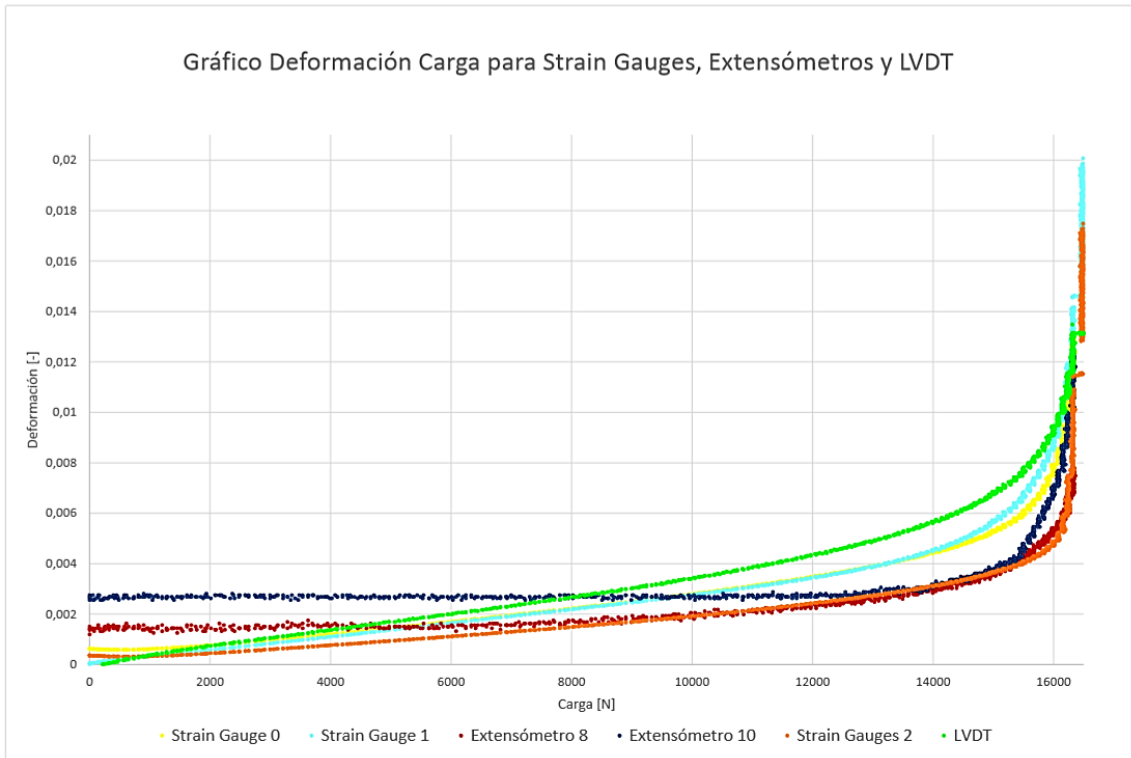


Figura 72: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm Sin Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

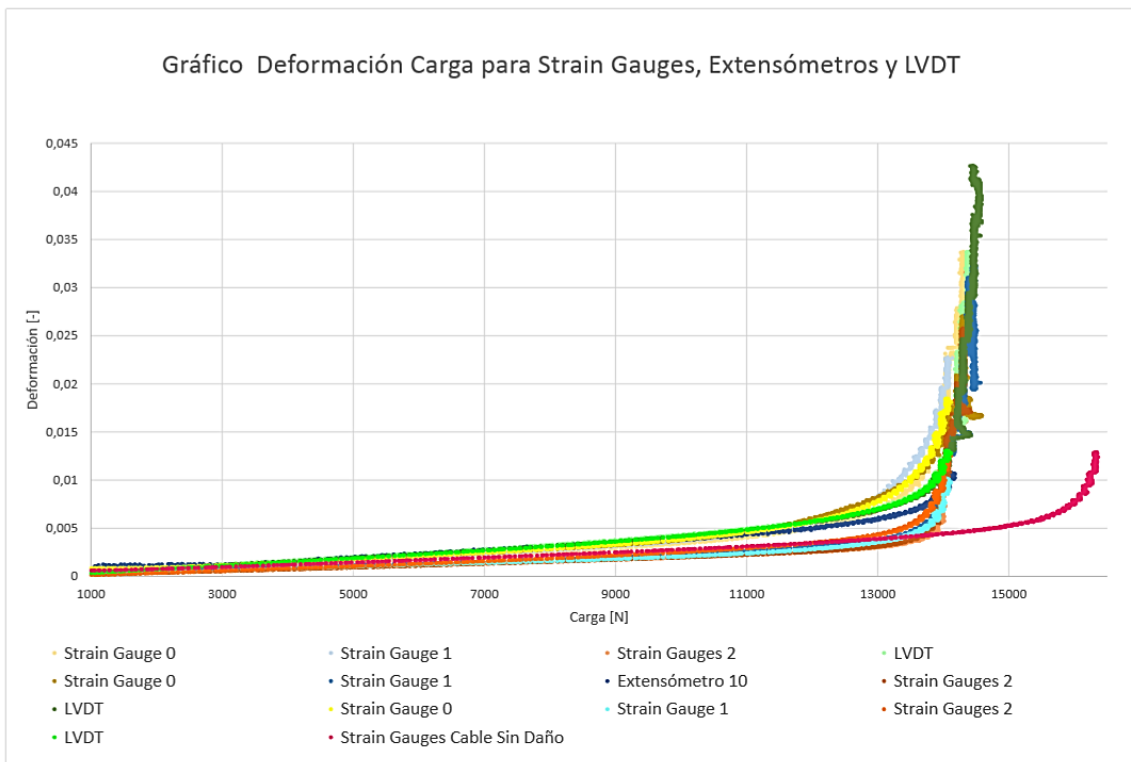


Figura 73: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

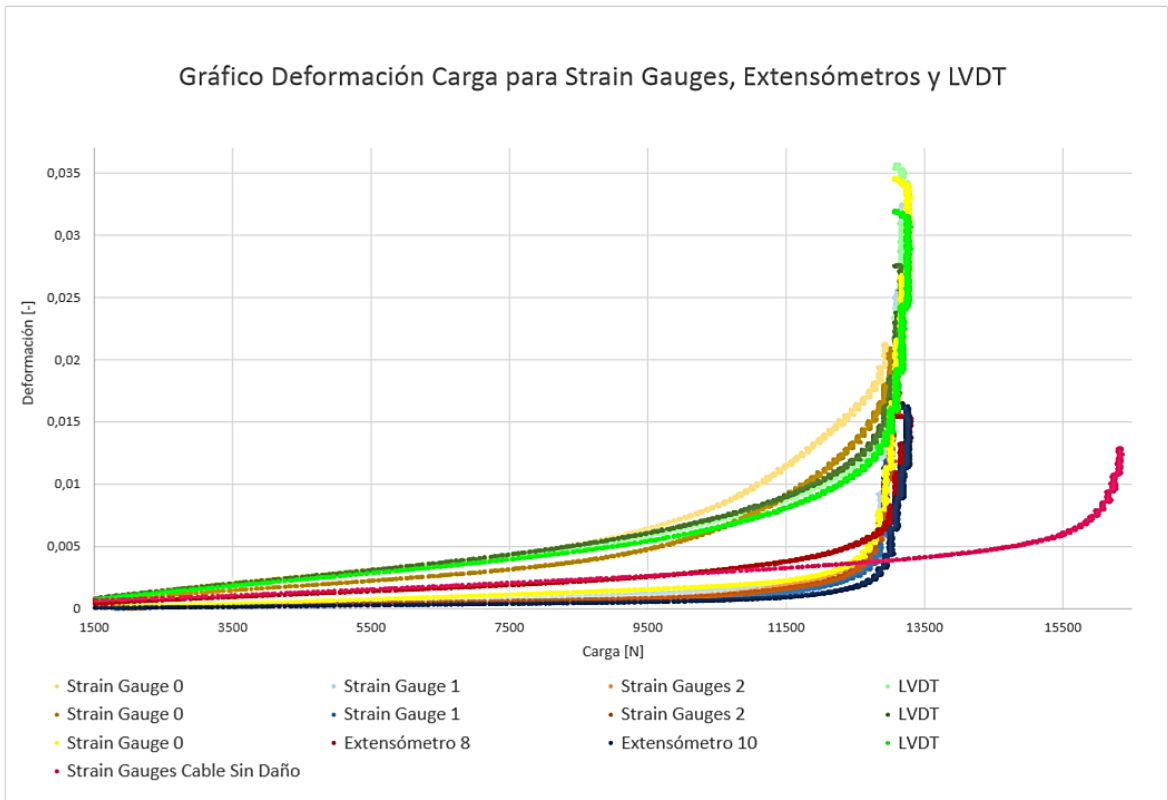


Figura 74: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

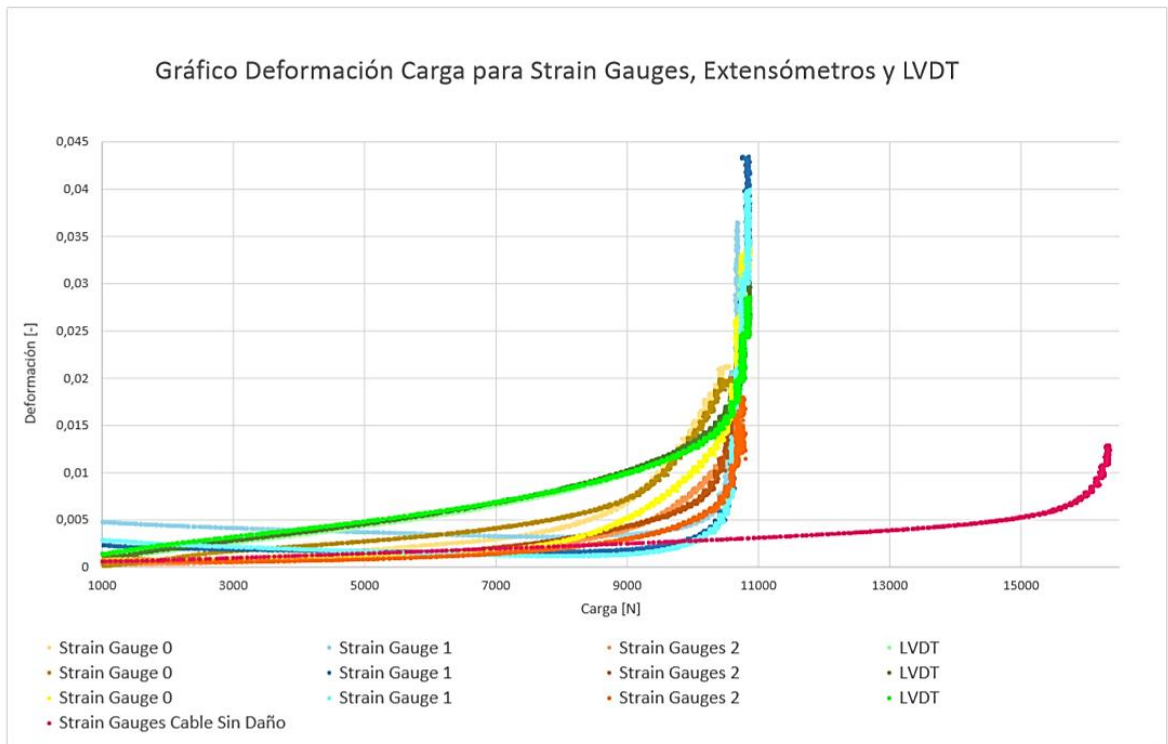


Figura 75: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 10.1 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetros y LVDT

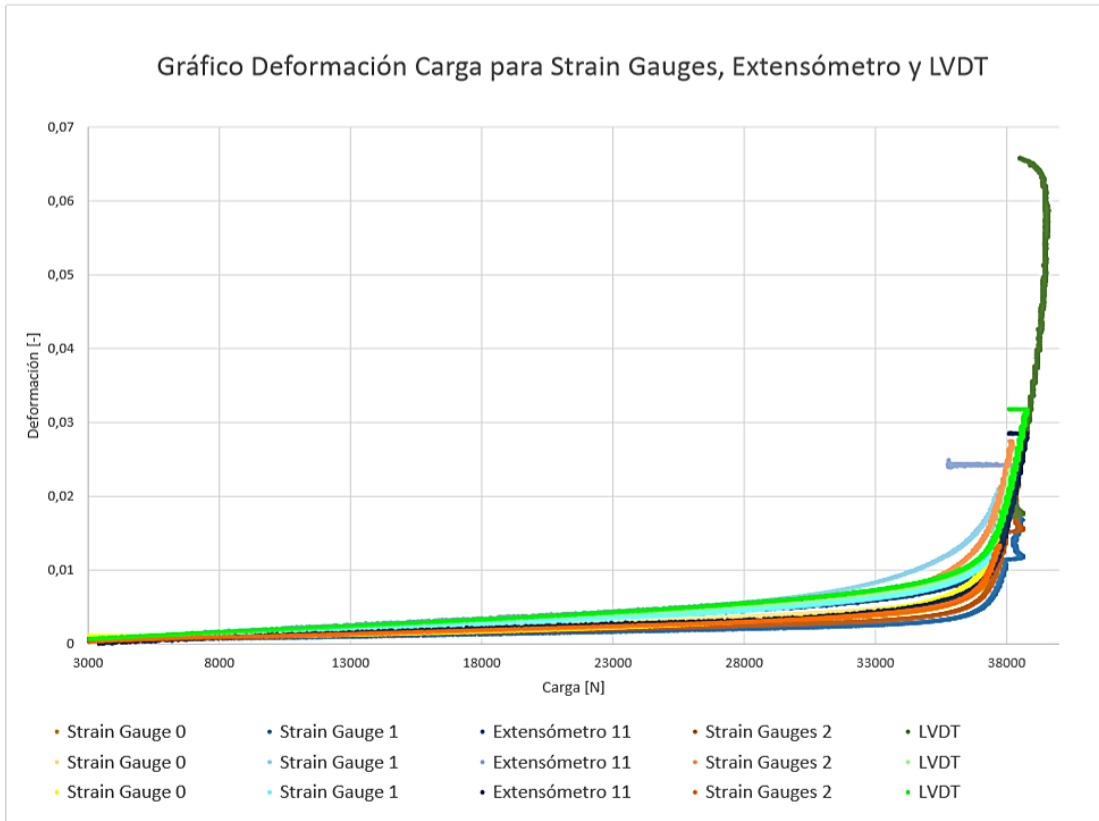


Figura 76: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

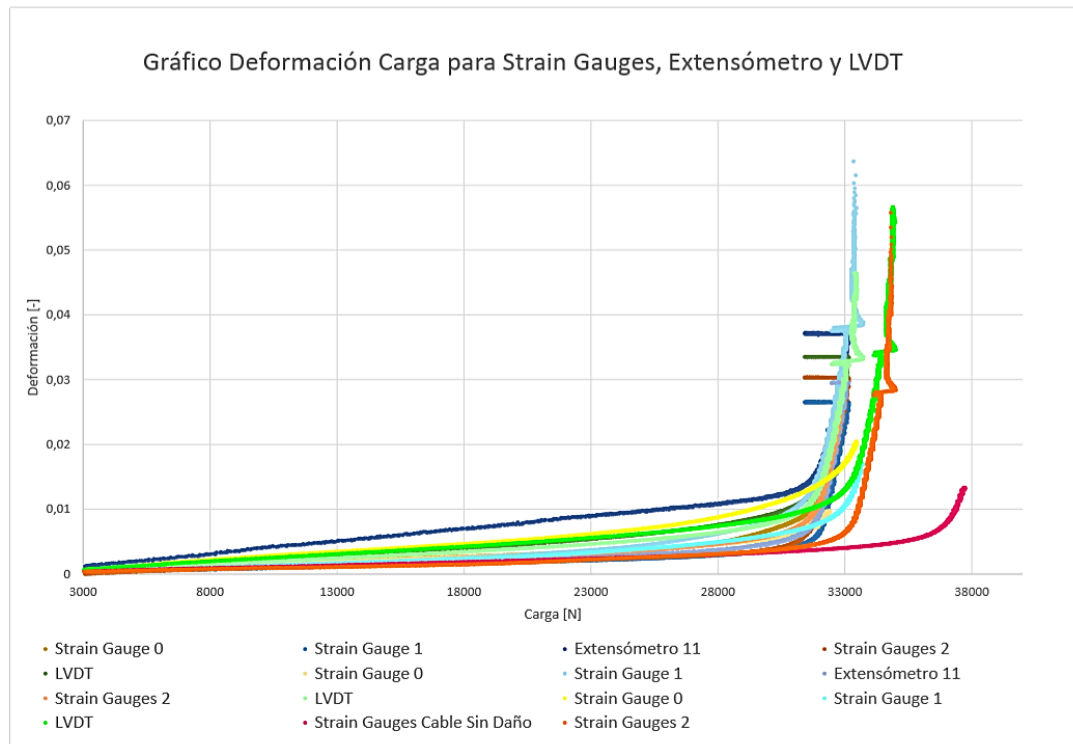


Figura 77: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 1 Daño, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

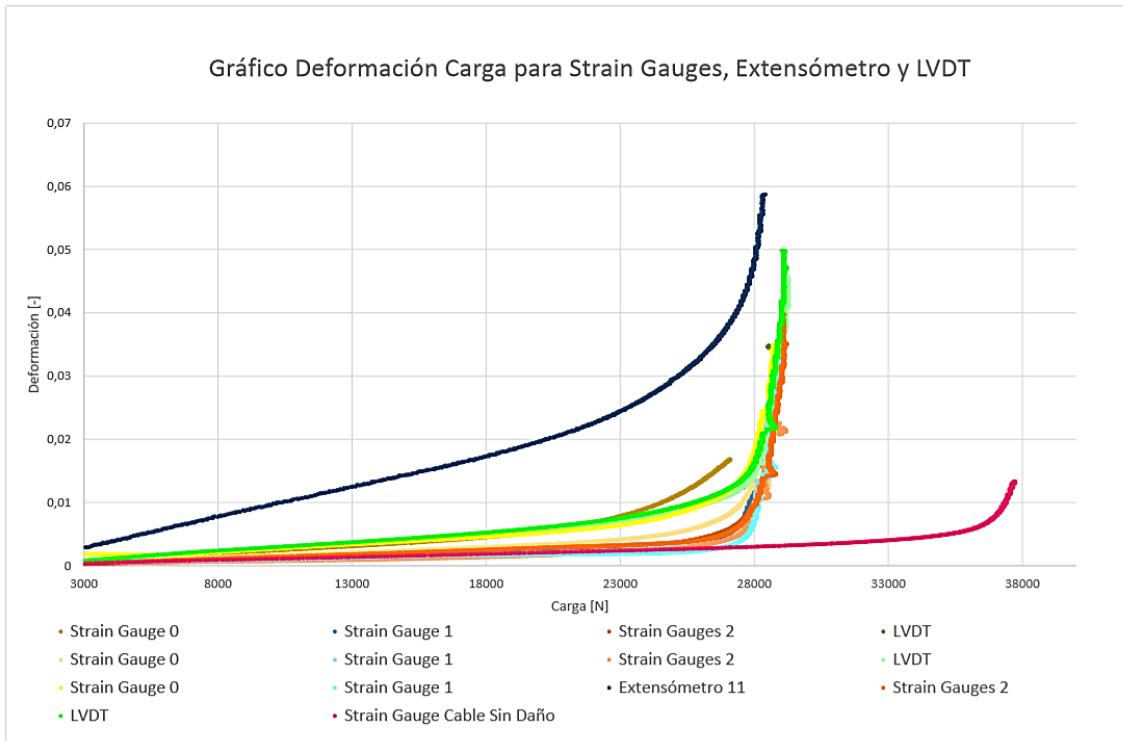


Figura 78: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

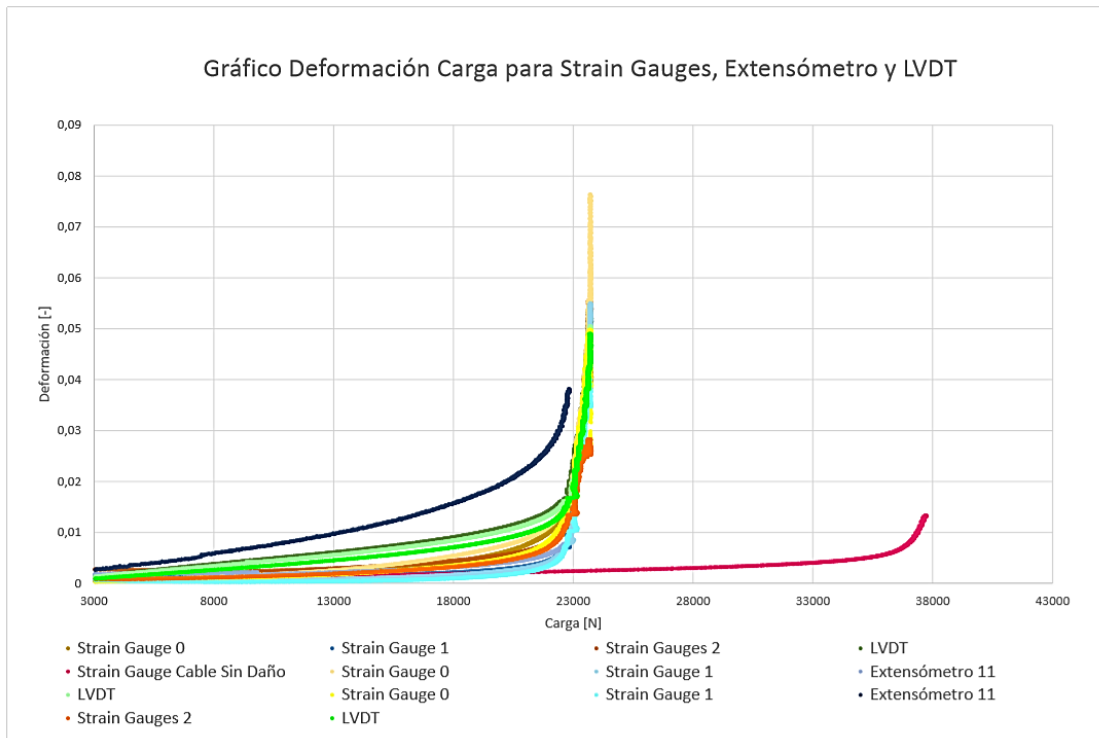


Figura 79: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 14.3 mm con 3 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

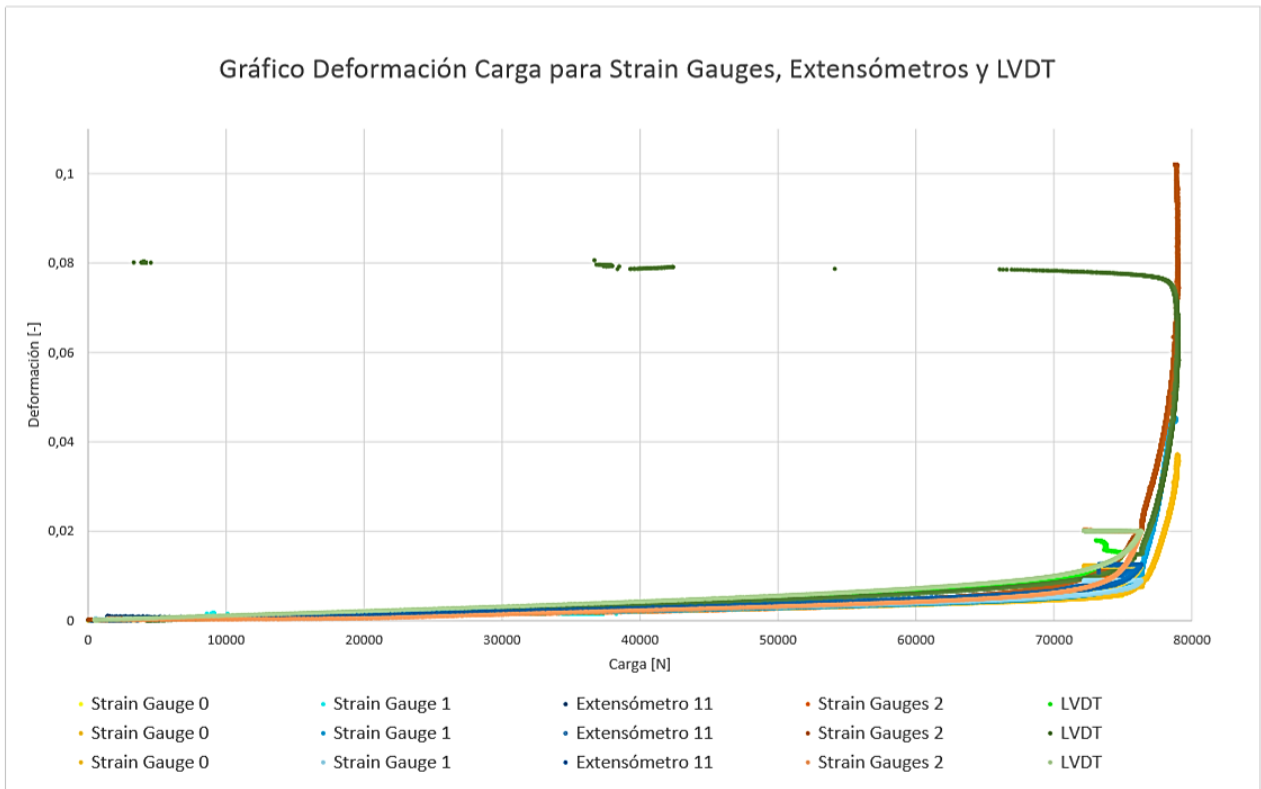


Figura 80: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm Sin Daño, con el uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT

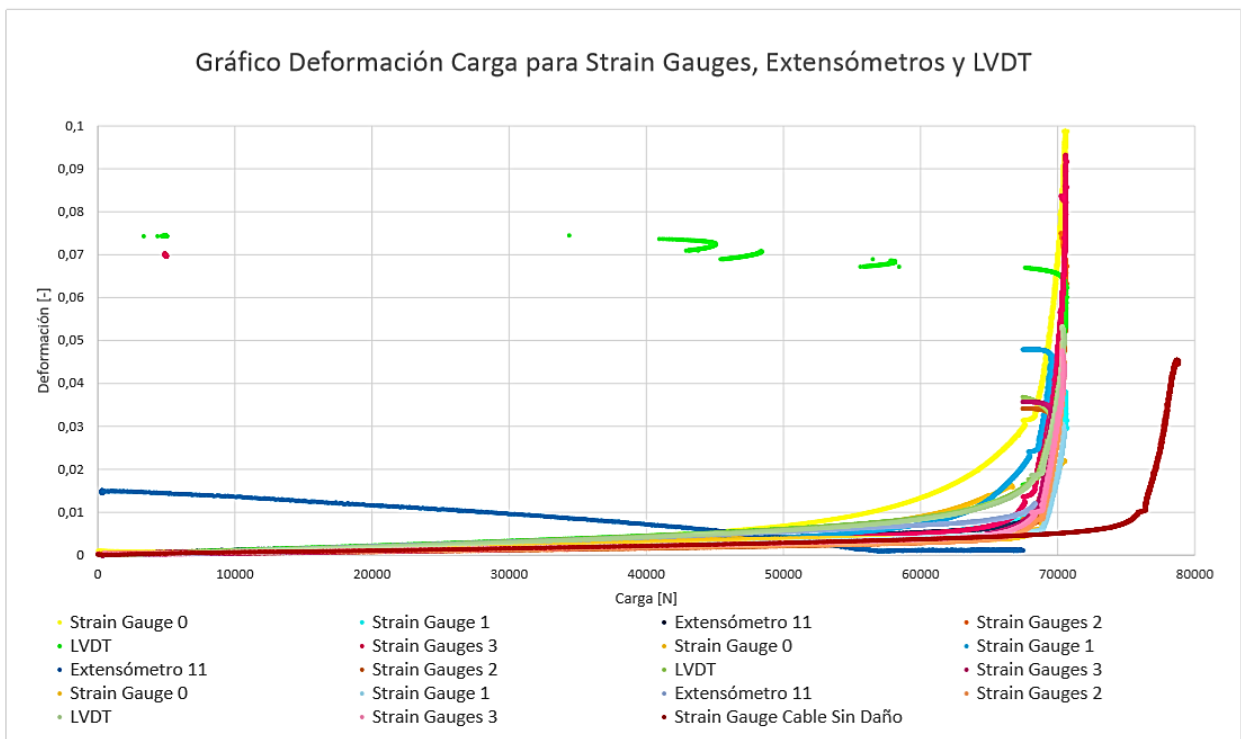


Figura 81: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 2 Daños, con uso de Strain Gauges, Extensómetro y LVDT



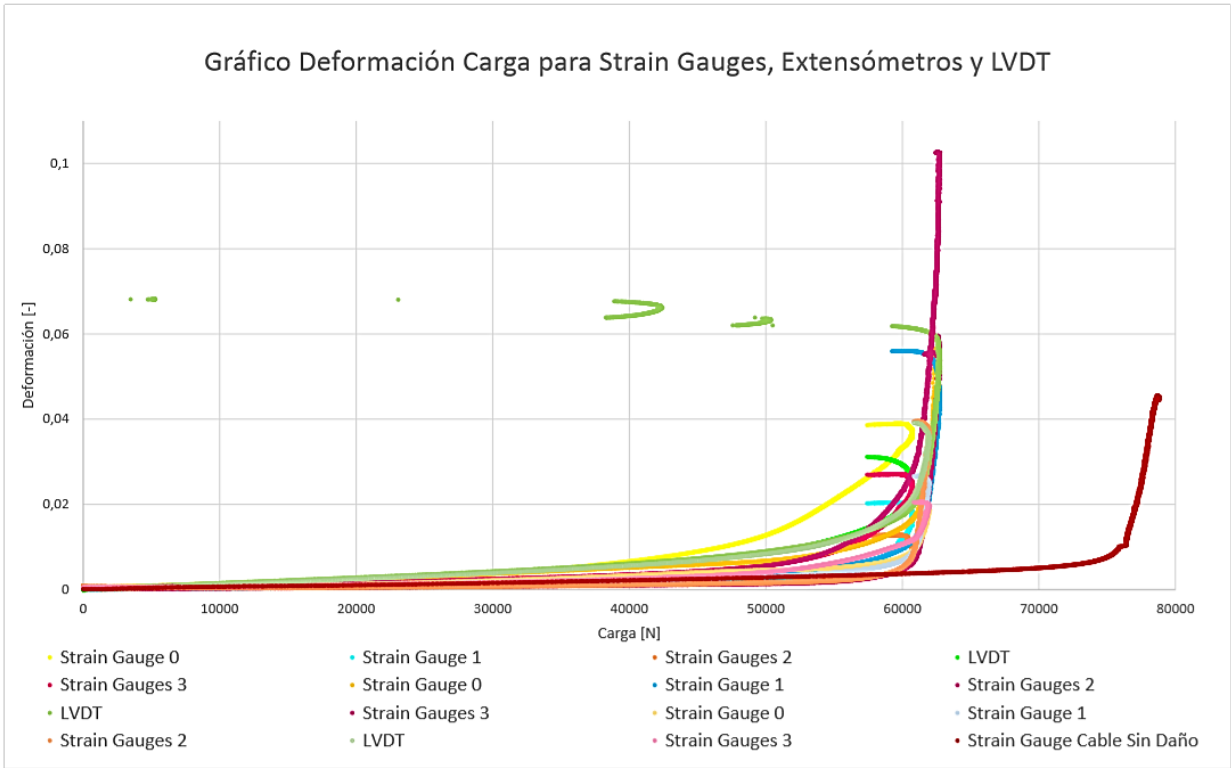


Figura 82: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 4 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT

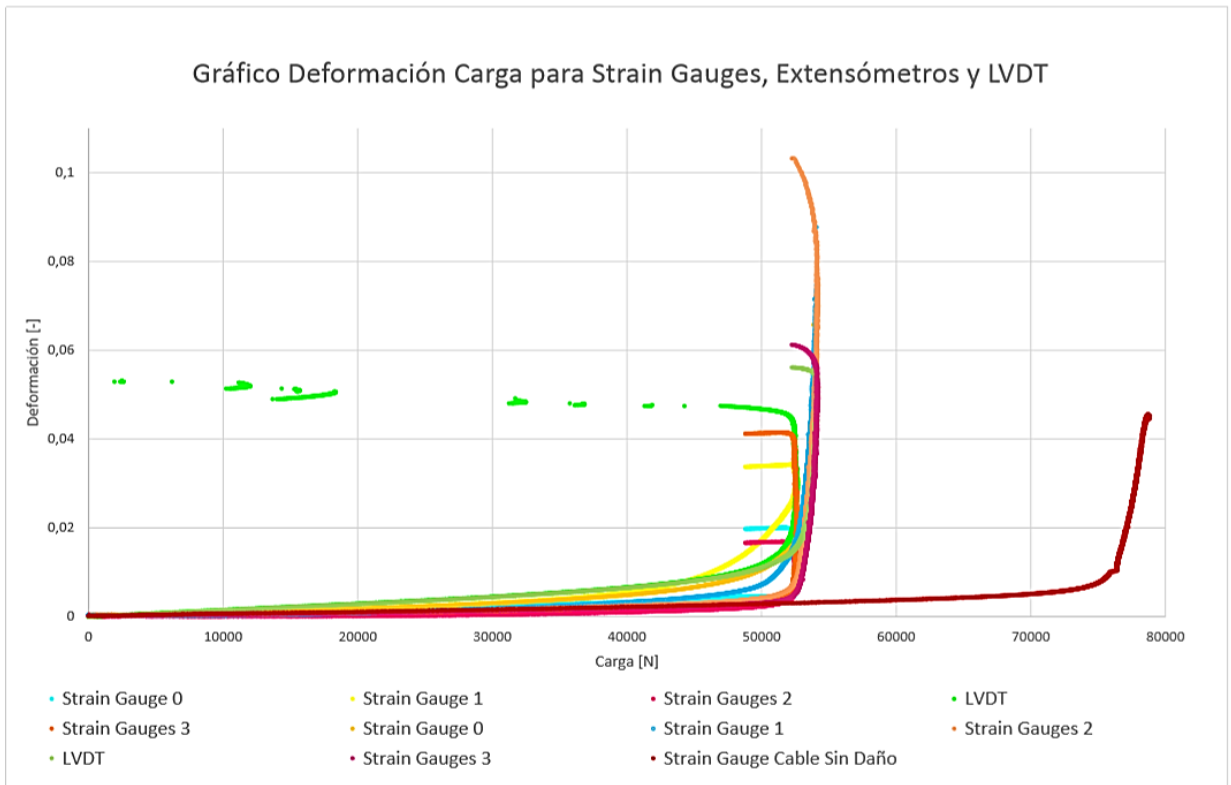


Figura 83: Gráfico completo de Deformación-Carga para Un Cable de Aluminio de 19.9 mm con 6 Daños, con uso de Strain Gauges y LVDT