

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“UNIONES ESTRUCTURALES CON TIRAFONES EN MADERA
COPAIBA (*copaifera officinalis*)”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CONSTRUCCION Y MATERIALES**

AUTOR:

Br. ALCÁNTARA HURTADO, FABIO ADRIÁN

ASESOR:

Ing. PAREDES ESTACIO, JORGE LUIS

TRUJILLO - PERÚ

2019

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme culminar este proyecto muy especial e importante para mi vida y profesión, al ingeniero Jorge Paredes y Gerardo Arteaga por su orientación y ayuda en el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

Este gran paso lo dedico a mis padres
Por su apoyo a lo largo de toda mi vida,
a mi hermano Diego por su orientación
durante toda mi carrera y a mi hermana
Ariana por alegrarme constantemente.

INDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACION	5
1.1. Descripción del problema	5
1.2. Formulación del problema	5
1.3. Objetivo general.....	6
1.4. Objetivos específicos	6
1.5. Justificación de la Investigación	6
1.6. Viabilidad de la investigación.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.2. Bases teóricas.....	8
2.2.1. Situación actual del recurso forestal en el Perú.....	8
2.2.2. La madera.....	13
2.2.3. El Tirafón	25
2.2.4. Uniones en madera.....	30
2.3. Definiciones conceptuales	41
2.4. Hipótesis	41
2.5. Variables	42
2.6. Operacionalización de las variables.....	42
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.1. Tipo de Investigación.....	43
3.2. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	43
3.2.1. Ensayos de Laboratorio.....	43
3.2.2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas.....	46
3.2.3. Ensayos para determinar las propiedades físicas	51

3.3.	Técnicas para el procesamiento y análisis de datos	53
3.3.1.	Técnicas de procesamiento.....	53
3.3.2.	Análisis de la información.....	53
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....		54
4.1.	Cuadros de resultados	54
4.1.1.	Resultados de los ensayos físicos.....	54
4.1.2.	Resultados de los ensayos mecánicos	54
4.1.3.	Valores de diseño	58
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS		60
5.1.	Resultados de los ensayos físicos	60
5.2.	Resultados de los ensayos mecánicos	60
5.2.1.	Extracción Directa.....	60
5.2.2.	Cizallamiento simple paralelo al grano	64
5.2.3.	Cizallamiento simple perpendicular al grano.....	73
5.2.4.	Cizallamiento doble.....	84
5.2.5.	Comparación entre cizallamiento simple paralelo y perpendicular	85
5.2.6.	Comparación entre cizallamiento doble paralelo y perpendicular	91
5.2.7.	Comparación con otras especies	92
CONCLUSIONES		107
RECOMENDACIONES		108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		109
ANEXOS.....		111
ANEXO A: Multimedia		111
ANEXO B: Resultados de las probetas ensayadas		123
ANEXO C: Gráficas de Esfuerzo vs Deformación de las probetas ensayadas		137

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Grandes tipos de bosques del Perú.	8
<i>Figura 2.</i> Partes del tronco.	13
<i>Figura 3.</i> Eje tangencial en una pieza de madera.	15
<i>Figura 4.</i> Eje radial en una pieza de madera.	15
<i>Figura 5.</i> Eje longitudinal en una pieza de madera.	15
<i>Figura 6.</i> Diagrama de rangos de humedad.	16
<i>Figura 7.</i> Efectos de la contracción en la madera.	18
<i>Figura 8.</i> Gráfica carga - deformación.	19
<i>Figura 9.</i> Espécimen para Ensayo de Flexión Estática.	20
<i>Figura 10.</i> Probeta de Corte Paralela.	20
<i>Figura 11.</i> Esquema de ensayo de compresión (a) paralela a las fibras (b) normal a las fibras.	21
<i>Figura 12.</i> Árbol de Copaiba.	22
<i>Figura 13.</i> Imágenes macroscópicas (a) transversal (ca. 10x). (b) tangencial (tamaño natural).	22
<i>Figura 14.</i> Madera Copaiba, foto de referencia.	24
<i>Figura 15.</i> Pija (tirafón).	25
<i>Figura 16.</i> De izquierda a derecha: Tirafón, Perno y Clavo.	27
<i>Figura 17.</i> Esquema de un Tirafón.	28
<i>Figura 18.</i> Perforación Guía.	29
<i>Figura 19.</i> (a) Necesidad de unir dos vigas en un apoyo (b) Unión con perno sometida a cizalle.	30
<i>Figura 20.</i> Hilera de 7 fijaciones.	31
<i>Figura 21.</i> Esquema de ensayo de corte paralelo al grano (a) simple y (b) doble.	32
<i>Figura 22.</i> Esquema de ensayo de corte perpendicular al grano (a) simple y (b) doble.	33
<i>Figura 23.</i> Método de ensayar los tirafones para extracción directa.	33
<i>Figura 24.</i> Formas de colapso en una unión.	34
<i>Figura 25.</i> Connection Yield Modes.	35
<i>Figura 26.</i> Unión empernada sometida a cizallamiento múltiple.	37
<i>Figura 27.</i> Método para medir espaciamientos paralelos a la fibra y perpendiculares a la fibra.	37
<i>Figura 28.</i> Curva para la determinación del límite proporcional según la NDS.	38
<i>Figura 29.</i> Gráficos de rigidez.	39
<i>Figura 30.</i> Metodología para la codificación de las muestras.	43

INDICE DE FÓRMULAS

<i>Fórmula 1.</i> Contenido de Humedad.	16
<i>Fórmula 2.</i> Densidad Básica.	17
<i>Fórmula 3.</i> Carga de diseño - Cizallamiento o Corte según AWC.	40
<i>Fórmula 4.</i> Carga de diseño - Cizallamiento o Corte según investigaciones antecedentes.	41
<i>Fórmula 5.</i> Carga de diseño - Extracción Directa.	41

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Evolución de la producción nacional de madera rolliza	10
Gráfica 2. Participación por volumen especie en la producción acumulada de madera rolliza	10
Gráfica 3. Participación en los volúmenes producidos por producto maderable	11
Gráfica 4. Participación por volumen de especie en la producción acumulada de madera aserrada	11
Gráfica 5. Consumo de productos maderables	12
Gráfica 6. Relación entre el Diámetro vs Carga máxima para una profundidad de penetración de 25mm	61
Gráfica 7. Relación entre el Diámetro vs Carga máxima para una profundidad de penetración de 30mm	61
Gráfica 8. Comparativo entre el Diámetro vs Carga máxima para diferentes profundidades de penetración	62
Gráfica 9. Comparativo porcentual.....	62
Gráfica 10. Comparativo entre Profundidad de penetración vs Carga máxima para varios diámetros.....	63
Gráfica 11. Comparativo porcentual.....	63
Gráfica 12. Relación entre el Diámetro vs Carga promedio	64
Gráfica 13. Relación entre el Diámetro vs Carga de diseño	64
Gráfica 14. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=1/4''$	65
Gráfica 15. Comparativo porcentual.....	65
Gráfica 16. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=5/16''$	66
Gráfica 17. Comparativo porcentual.....	66
Gráfica 18. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=3/8''$	67
Gráfica 19. Comparativo porcentual.....	67
Gráfica 20. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y al límite proporcional para $\varnothing=1/4''$	68
Gráfica 21. Comparativo porcentual.....	68
Gráfica 22. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y al límite proporcional para $\varnothing=5/16''$	69
Gráfica 23. Comparativo porcentual.....	70
Gráfica 24. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y al límite proporcional para $\varnothing=3/8''$	71
Gráfica 25. Comparativo porcentual.....	71
Gráfica 26. Comparativo entre Penetración vs $\varnothing=1/4''$, $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=3/8''$ para la Carga máxima	72
Gráfica 27. Comparativo porcentual.....	72
Gráfica 28. Comparativo entre Penetración vs $\varnothing=1/4''$, $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=3/8''$ para la Carga al límite proporcional ...	73
Gráfica 29. Comparativo porcentual.....	73
Gráfica 30. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=1/4''$	74
Gráfica 31. Comparativo porcentual.....	74
Gráfica 32. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=5/16''$...	75
Gráfica 33. Comparativo porcentual.....	75
Gráfica 34. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=3/8''$	76
Gráfica 35. Comparativo porcentual.....	76
Gráfica 36. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y al límite proporcional para $\varnothing=1/4''$	77

Gráfica 37. Comparativo porcentual.....	77
Gráfica 38. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y al límite proporcional para $\varnothing=5/16''$	78
Gráfica 39. Comparativo porcentual.....	78
Gráfica 40. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y al límite proporcional para $\varnothing=3/8''$	79
Gráfica 41. Comparativo porcentual.....	79
Gráfica 42. Comparativo entre Diámetro vs Carga máxima y al límite proporcional para una penetración de 1''	80
Gráfica 43. Comparativo porcentual.....	80
Gráfica 44. Comparativo entre Diámetro vs Carga máxima y al límite proporcional para una penetración de 3/4'' ..	81
Gráfica 45. Comparativo porcentual.....	81
Gráfica 46. Comparativo entre Diámetro vs P=3/4'' y P=1'' para la Carga máxima	82
Gráfica 47. Comparativo porcentual.....	82
Gráfica 48. Comparativo entre Diámetro vs P=3/4'' y P=1'' para la Carga al límite proporcional	83
Gráfica 49. Comparativo porcentual.....	83
Gráfica 50. Comparativo entre Dirección de carga respecto al grano vs Carga máxima y al límite proporcional	84
Gráfica 51. Comparativo porcentual.....	84
Gráfica 52. Comparativo entre Dirección de carga respecto al grano vs Def. máxima y al límite proporcional	85
Gráfica 53. Comparativo porcentual.....	85
Gráfica 54. Comparativo entre relación EL/D vs Dirección de carga respecto al grano para un $\varnothing=1/4''$	86
Gráfica 55. Comparativo entre relación EL/D vs Dirección de carga respecto al grano para un $\varnothing=5/16''$	86
Gráfica 56. Comparativo entre relación EL/D vs Dirección de carga respecto al grano para un $\varnothing=3/8''$	86
Gráfica 57. Comparativo porcentual.....	87
Gráfica 58. Comparativo porcentual.....	87
Gráfica 59. Comparativo porcentual.....	88
Gráfica 60. Comparativo entre relación EL/D vs Dirección de carga respecto al grano para un $\varnothing=1/4''$	88
Gráfica 61. Comparativo entre relación EL/D vs Dirección de carga respecto al grano para un $\varnothing=5/16''$	89
Gráfica 62. Comparativo entre relación EL/D vs Dirección de carga respecto al grano para un $\varnothing=3/8''$	89
Gráfica 63. Comparativo porcentual.....	90
Gráfica 64. Comparativo porcentual.....	90
Gráfica 65. Comparativo porcentual.....	91
Gráfica 66. Comparativo entre tipos de cargas vs Dirección de carga respecto al grano para cizalla doble	91
Gráfica 67. Comparativo porcentual.....	92
Gráfica 68. Comparativo entre Diámetro vs Carga de diseño de extracción directa de 4 especies	94
Gráfica 69. Comparativo porcentual.....	94
Gráfica 70. Comparativo entre EL/D vs Carga de diseño a cizalla simple paralela de 4 especies para $\varnothing=1/4''$	97
Gráfica 71. Comparativo porcentual.....	97
Gráfica 72. Comparativo entre EL/D vs Carga de diseño a cizalla simple paralela de 4 especies para $\varnothing=5/16''$	98
Gráfica 73. Comparativo porcentual.....	98

Gráfica 74. Comparativo entre EL/D vs Carga de diseño a cizalla simple paralela de 4 especies para $\varnothing=3/8''$	99
Gráfica 75. Comparativo porcentual.....	99
Gráfica 76. Comparativo entre EL/D vs Carga de diseño a ciz. simple perpendicular de 4 especies para $\varnothing=1/4''$..	101
Gráfica 77. Comparativo porcentual.....	101
Gráfica 78. Comparativo entre EL/D vs Carga de diseño a ciz. simple perpendicular de 4 especies para $\varnothing=5/16''$..	102
Gráfica 79. Comparativo porcentual.....	102
Gráfica 80. Comparativo entre EL/D vs Carga de diseño a ciz. simple perpendicular de 4 especies para $\varnothing=3/8''$..	103
Gráfica 81. Comparativo porcentual.....	103
Gráfica 82. Comparativo entre Cargas de diseño de 4 especies para cizallamiento doble paralelo.....	104
Gráfica 83. Comparativo porcentual.....	105
Gráfica 84. Comparativo entre Cargas de diseño de 4 especies - cizalla doble perpendicular	106
Gráfica 85. Comparativo porcentual.....	106

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de la madera por grupos estructurales</i>	21
Tabla 2 <i>Ensayo de Tracción del Tirafón</i>	27
Tabla 3 <i>Dimensiones mínimas de arandelas para uniones estructurales</i>	29
Tabla 4 <i>Operacionalización de Variables</i>	42
Tabla 5 <i>Codificación de probetas por el tipo de ensayo</i>	44
Tabla 6 <i>Codificación de probetas por el espesor lateral</i>	44
Tabla 7 <i>Codificación de probetas por el diámetro del tirafón</i>	44
Tabla 8 <i>Características de las probetas utilizadas en los ensayos de Cizallamiento</i>	45
Tabla 9 <i>Características de las probetas utilizadas en los ensayos de Extracción Directa</i>	45
Tabla 10 <i>Determinación de las perforaciones guías</i>	48
Tabla 11 <i>Diámetros de brocas utilizadas</i>	48
Tabla 12 <i>Resultados de los ensayos físicos</i>	54
Tabla 13 <i>Resultados de Extracción Directa</i>	54
Tabla 14 <i>Datos estadísticos de los resultados de Extracción Directa</i>	55
Tabla 15 <i>Resultados de Cizallamiento Simple Paralelo - Cargas</i>	55
Tabla 16 <i>Resultados de Cizallamiento Simple Paralelo - Deformaciones</i>	56
Tabla 17 <i>Resultados de Cizallamiento Simple Perpendicular - Cargas</i>	56
Tabla 18 <i>Resultados de Cizallamiento Simple Perpendicular - Deformaciones</i>	57
Tabla 19 <i>Resultados de Cizallamiento Doble Paralelo</i>	57
Tabla 20 <i>Resultados de Cizallamiento Doble Perpendicular</i>	57
Tabla 21 <i>Valores de diseño - Cizallamiento Simple Paralelo</i>	58
Tabla 22 <i>Valores de diseño - Cizallamiento Simple Perpendicular</i>	58
Tabla 23 <i>Valores de diseño - Cizallamiento Doble Paralelo</i>	58
Tabla 24 <i>Valores de diseño - Cizallamiento Doble Perpendicular</i>	59
Tabla 25 <i>Modos de Falla de las uniones</i>	59
Tabla 26 <i>Propiedades físicas de las especies estudiadas</i>	93
Tabla 27 <i>Valores de diseño de extracción directa para la especie Tornillo</i>	93
Tabla 28 <i>Valores de diseño de extracción directa para la especie Capirona</i>	93
Tabla 29 <i>Valores de diseño de extracción directa para la especie Quinilla Colorada</i>	94
Tabla 30 <i>Valores de diseño de cizallamiento simple paralelo para la especie Tornillo</i>	95
Tabla 31 <i>Valores de diseño de cizallamiento simple paralelo para la especie Capirona</i>	96
Tabla 32 <i>Valores de diseño de cizallamiento simple paralelo para la especie Quinilla Colorada</i>	96
Tabla 33 <i>Valores de diseño de cizallamiento simple perpendicular para la especie Tornillo</i>	100
Tabla 34 <i>Valores de diseño de cizallamiento simple perpendicular para la especie Capirona</i>	100
Tabla 35 <i>Valores de diseño de cizallamiento simple perpendicular para la especie Quinilla Colorada</i>	100
Tabla 36 <i>Valores de diseño de cizallamiento doble paralelo para la especie Tornillo</i>	104

Tabla 37	<i>Valores de diseño de cizallamiento doble paralelo para la especie Capirona</i>	104
Tabla 38	<i>Valores de diseño de cizallamiento doble paralelo para la especie Quinilla Colorada</i>	104
Tabla 39	<i>Valores de diseño de cizallamiento doble perpendicular para la especie Tornillo</i>	105
Tabla 40	<i>Valores de diseño de cizallamiento doble perpendicular para la especie Capirona</i>	105
Tabla 41	<i>Valores de diseño de cizallamiento doble perpendicular para la especie Quinilla Colorada</i>	105
Tabla 42	<i>Contenido de Humedad de las muestras de madera Copaiba</i>	123
Tabla 43:	<i>Densidad Básica de las muestras en madera Copaiba</i>	124
Tabla 44:	<i>Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.1.1</i>	125
Tabla 45:	<i>Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.1.2</i>	125
Tabla 46:	<i>Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.1.3</i>	125
Tabla 47:	<i>Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.2.1</i>	126
Tabla 48:	<i>Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.2.2</i>	126
Tabla 49:	<i>Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.2.3</i>	126
Tabla 50:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.1.1</i>	127
Tabla 51:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.1.2</i>	127
Tabla 52:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.1.3</i>	128
Tabla 53:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.2.1</i>	128
Tabla 54:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.2.2</i>	129
Tabla 55:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.2.3</i>	129
Tabla 56:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.3.1</i>	130
Tabla 57:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.3.2</i>	130
Tabla 58:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.3.3</i>	131
Tabla 59:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.4.1</i>	131
Tabla 60:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.4.2</i>	132
Tabla 61:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.4.3</i>	132
Tabla 62:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.1.1</i>	133
Tabla 63:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.1.2</i>	133
Tabla 64:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.1.3</i>	134
Tabla 65:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.2.1</i>	134
Tabla 66:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.2.2</i>	135
Tabla 67:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.2.3</i>	135
Tabla 68:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra C.1.1</i>	136
Tabla 69:	<i>Ensayo de Cizallamiento - Muestra D.1.1</i>	136

RESUMEN

El potencial forestal del Perú como el segundo país con mayor superficie forestal de América Latina y las casi nulas normativas nacionales sobre construcción en madera, destacando la escasa variedad de medios de unión investigados en madera nacional siendo las uniones los sectores más vulnerables de las construcciones en madera, son antecedentes de la presente tesis que seleccionó al tirafón y la especie Copaiba, por sus propiedades mecánicas y accesible precio en el mercado peruano, con el sólido objetivo de determinar las propiedades mecánicas de las uniones con tirafones en esta madera (*copaifera officinalis*).

En primer lugar se desarrollaron los ensayos de resistencia al cizallamiento de las uniones (100) y de extracción de tirafones (60) bajo los lineamientos de la normativa ASTM D-1761, NcH 1198 e investigaciones antecedentes obteniendo como resultados los valores de la carga y deformación máxima, carga y deformación al límite proporcional y carga de diseño para cada una de las uniones diseñadas. Posteriormente se estableció relaciones que caracterizan el comportamiento mecánico de las uniones a través de la variación del diámetro, penetración del tirafón y el EL/D (espesor de la pieza lateral de madera entre diámetro del tirafón). Además se comparó dichos resultados con los de otras especies que usaron la misma metodología. En efecto se obtuvieron conclusiones que califican a la unión tirafón-copaiba como muy recomendable estructuralmente para su uso en la construcción.

En segundo lugar se llevó a cabo los ensayos de contenido de humedad (CH) y densidad básica a partir de la madera que fue obtenida para los ensayos mecánicos teniendo como guía la normativa NTP 251.010, NTP 251.011 e investigaciones antecedentes obteniendo como resultados un CH aceptable para los ensayos de 18.04% y una densidad de 0.575 gr/cm³ que presenta un error de 5.7% respecto a la teórica estando conforme con los lineamientos de la investigación.

ABSTRACT

The forestry potential of Peru as the second country with the largest forest area in Latin America and the almost zero national regulations on wood construction, highlighting the scarce variety of union media investigated in national timber, with unions being the most vulnerable sectors of construction in wood, are antecedents of the present thesis that selected the Tirafón and the species Copaiba, for its mechanical properties and accessible price in the Peruvian market, with the solid objective of determining the mechanical properties of the unions with laundries in this wood (*copaifera officinalis*) .

In the first place, the shear strength tests of the joints (100) and the extraction of the laths (60) were developed under the guidelines of the ASTM D-1761, NcH 1198 and previous investigations, obtaining as results the values of the load and Maximum deformation, load and deformation to the proportional limit and design load for each of the designed joints. Subsequently, relationships were established that characterize the mechanical behavior of the joints through the variation of the diameter, penetration of the loop and the EL / D (thickness of the lateral piece of wood between the diameter of the loop). In addition, these results were compared with those of other species that used the same methodology. In fact, conclusions were obtained that qualify the labyrinth-copaiba junction as highly structurally recommendable for its use in construction.

In the second place, the moisture content (CH) and basic density tests were carried out from the wood that was obtained for the mechanical tests, taking as a guide the normative NTP 251.010, NTP 251.011 and previous investigations obtaining as a result an acceptable CH for the tests of 18.04% and a density of 0.575 gr / cm³ that presents an error of 5.7% with respect to the theoretical one, being in accordance with the guidelines of the investigation.

INTRODUCCIÓN

El interés por investigar uniones estructurales con tirafones nace frente a la necesidad de implementar un nuevo tipo de unión en la construcción de madera en el Perú el cual cumpla de manera más eficiente con las necesidades estructurales que los clavos y pernos como únicos investigados por la Junta del Acuerdo de Cartagena, los cuales según constructores han presentado inconvenientes como poca resistencia a la extracción por parte de los clavos por su falta de rugosidad, y pérdida de ajuste o mala apariencia en el caso de los pernos por su disposición. Fomentando además como una potencial alternativa a la madera para su uso estructural debido a sus buenas propiedades mecánicas y a la enorme extensión de bosques los cuales representan un 57% del territorio nacional con un 30% del mismo apto para la extracción de madera. Con estos antecedentes el presente estudio seleccionó a la especie de madera Copaiba (*copaifera officinalis*), por presentar propiedades mecánicas aptas para su uso en la construcción y sobre todo por su accesible precio en el mercado peruano respecto a otras maderas más pesadas.

Para realizar un integro análisis de los nuevos tipos de unión es necesario evaluarlos experimentalmente con distintos valores para sus variables como el diámetro, profundidad de penetración del tirafón, la relación EL/D (espesor de la pieza lateral de madera entre diámetro del tirafón), así como también la dirección de la carga respecto a la orientación de las fibras. De esta manera puede darse respuesta a la hipótesis que enuncia un comportamiento mecánico óptimo de las uniones estudiadas para su uso en la construcción por presentar amplia ductilidad y un gradual incremento en su resistencia en paralelo con el valor de EL/D .

Se llevaron a cabo ensayos en laboratorio de: extracción directa, cizallamiento o extracción lateral, contenido de humedad y densidad básica; las muestras ensayadas fueron seleccionadas siguiendo las recomendaciones de la Norma de Clasificación Visual del Tratado de Cartagena donde se especifican criterios de selección para madera con fines estructurales y diseñadas según ensayos de publicaciones antecedentes. Para la ejecución de ensayos mecánicos fue tomada como guía principal la norma ASTM D1761 y para ensayos físicos las normas NTP 251.010 y NTP 251.011.

Los resultados de las pruebas mecánicas fueron clasificados por cada tipo de unión y luego graficados a través de una función polinómica de orden 6 para poder determinar posteriormente la carga y deformación al límite proporcional con el uso del software “Maple”. En tanto, los

resultados de las pruebas físicas fueron recogidos diariamente hasta su culminación para luego ser procesados en hojas de cálculo en Excel.

Las conclusiones se establecieron a partir de la comparación de resultados entre un mismo tipo de unión con diferentes valores en las variables antes mencionadas, diferente dirección de la carga respecto a la fibra y diferentes especies de madera.

Se ha estructurado el presente estudio en siete capítulos que comprenden: Problema de investigación, Marco teórico: “Situación actual del recurso forestal en el Perú”, “La Madera”, “El Tirafón”, “Uniones en Madera”, Metodología de la investigación: “Ensayos de Laboratorio”, “Técnicas de Procesamiento”, Resultados y Discusión de Resultados.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1.Descripción del problema

“En la actualidad el Perú, con 73,3 millones de hectáreas de áreas forestales que ocupan un 57,3% del territorio nacional, es uno de los 10 países con mayor cobertura forestal en el mundo y el segundo en Latinoamérica después de Brasil” (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 29). “A pesar de ello este potencial no ha sido aprovechado representando así entre el 1% y el 4% del PBI nacional” (FAO, 2016, pág. 27). Este indicador explica el bajo porcentaje (menos del 10%) de viviendas en el Perú que presentan como material estructural a la madera a pesar de tener una alta demanda de viviendas modulares para personas de escasos recursos económicos. (INEI, 2017)

“Asimismo, la mayoría de estructuras en madera han sido construidas empíricamente por la ausencia de normativas nacionales” (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 1), teniendo como última referencia el Tratado de Cartagena en 1984. “Siendo las uniones los puntos débiles de una estructura de madera” (CORMA, 2003, pág. 131), esta normativa investigó solo uniones con clavos y pernos, “las cuales por su forma y variedad de dimensiones han presentado ciertas desventajas respecto a medios de unión como el tirafón”(Menacho C., 2010, pág. 31).

Entre las dificultades según testimonios de profesionales en el sector de la construcción se presentaron en la baja resistencia a la extracción de los clavos y el desajuste de las tuercas a lo largo del tiempo en los pernos.

En efecto se considera de alta necesidad el estudio de un nuevo tipo de unión en una especie local, proponiendo para el caso los tirafones y la madera Copaiba (*copaifera officinalis*), clasificada como una madera de mediana resistencia por su densidad básica (0.61 gr/cm³) de acuerdo a lo establecido en el Tratado de Cartagena (PADT-REFORT, 1984) y estando incluida entre las maderas más comerciales. (Cámara Nacional Forestal, 2016, pág. 1)

Siendo necesario conocer el comportamiento de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de unión con tirafones en la especie seleccionada a diseñarse para viviendas modulares y múltiples fines en la construcción.

1.2.Formulación del problema

¿Cuál es el comportamiento de las propiedades mecánicas de las Uniones Estructurales con tirafones en Madera Copaiba (*copaifera officinalis*)?

1.3.Objetivo general

Determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas de las Uniones Estructurales con tirafones en Madera Copaiba (*copaifera officinalis*).

1.4.Objetivos específicos

Determinar la incidencia de las propiedades físicas de la especie Copaiba.

Determinar la resistencia de la especie Copaiba, a la extracción de tirafones en sus diferentes diámetros y profundidades de penetración.

Determinar la resistencia al cizallamiento o corte de los diferentes tipos de unión con tirafones en la especie Copaiba.

Caracterizar los resultados mediante un análisis comparativo en función a las variables.

Comparar los resultados con las propiedades mecánicas de uniones estructurales con tirafones en otras especies nacionales.

1.5.Justificación de la Investigación

Siendo las uniones estructurales la parte más delicada de las construcciones en madera y presentando el tirafón una forma y propiedades mecánicas que se traducen en un posible mejor comportamiento mecánico en uniones que los clavos y pernos investigados por una normativa muy antigua.

Además, el presente estudio es una continuación de los elaborados años pasados con otras especies de madera, en consecuencia, presenta alta relevancia al ser una investigación sucesiva haciendo uso de tirafones como nueva alternativa de unión en especies maderables nacionales. De tal manera beneficia y motiva a la comunidad científica interesada en investigar sobre nuevos medios de unión para especies maderables nacionales, al mismo tiempo aporta un conocimiento para el desarrollo de una futura norma E.010 que asocie el comportamiento estructural de las uniones no sólo con pernos y clavos, además con tirafones en maderas nacionales.

1.6.Viabilidad de la investigación

Para desarrollar la investigación, los recursos humanos, materiales y el tiempo necesario para la elaboración de la Tesis son moderadamente costosos. Sin embargo, el tiempo de elaboración del informe puede ser relativamente corto con la debida metodología y el uso de herramientas como macros y hojas de cálculo en Excel.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Hasta el momento se han encontrado 3 investigaciones nacionales de uniones estructurales con tirafones desarrolladas en la Universidad Nacional de Ingeniería, a continuación, se menciona una.

La tesis para el título de Ingeniero Civil “Uniones Estructurales con Tirafones en Madera Tornillo (*cedrelinga catenamorfis duke*)” por García Mucha, Andrés publicada en la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú en 2012. Investigación con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas de las uniones estructurales con tirafones en madera Tornillo. Teniendo como resultado para el ensayo de extracción directa una carga máxima de 43 kg/cm. Respecto a cizallamiento simple, la resistencia al cizallamiento perpendicular a la fibra fue mayor que la paralela a la fibra. En resumen, se obtuvo cargas de diseño menores a las obtenidas en otras investigaciones con maderas nacionales de mayor densidad. (García M., 2012, págs. 130-132)

La tesis para el Título de Ingeniero Civil “Diseño de una Vivienda de Madera de Dos Niveles con el Sistema de Poste y Viga.” por Romero Ramos, Christian publicada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima – Perú en 2016. Publicación que realiza el diseño estructural de una vivienda unifamiliar íntegramente con madera estructural, entre los elementos estructurales a diseñar se consideraron las Uniones y Conexiones haciendo uso de la Norma Técnica de Edificación E.010, Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino (1984). Entre las conclusiones se menciona que las uniones y conexiones son muy importantes dentro de la estructura, debido a que aseguran el correcto ensamblaje entre cada elemento prefabricado, además de la correcta transmisión de cargas de cada uno de ellos hacia el terreno. (Romero R., 2016, pág. 88)

La Investigación “Estructuras de madera aplicadas al sector de la construcción en el Perú” por Ordoñez García, Patricia y Lugo Chávez, Yessenia publicada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima – Perú en 2016. Publicación que determina la viabilidad de la especie Pino radiata para la construcción en el Perú mediante un modelamiento con el programa SAP 2000. Entre las conclusiones menciona que el programa presentó limitaciones y las uniones que eran los puntos débiles de la estructura fueron simplificadas. Asimismo, motiva al uso o desarrollo de un programa específico de diseño donde se modelen las uniones. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 87)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Situación actual del recurso forestal en el Perú

2.2.1.1. Generalidades

Perú es una potencia mundial en términos de cobertura de bosques. Es el segundo país latinoamericano en extensión de bosques amazónicos, el cuarto a escala mundial en bosques tropicales (superado por Brasil, Congo e Indonesia) y el sexto en bosques primarios (si se consideran todos los tipos de bosques). (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 29)

Según datos del MINAM (2010), el país posee alrededor de 39 millones de hectáreas de bosques donde podría realizarse manejo forestal sostenible. Sin embargo, este potencial no ha sido aprovechado aún. El sector forestal representa entre el 1% y el 4% del PBI nacional y la superficie destinada al aprovechamiento forestal alcanza aproximadamente 7.4 millones de hectáreas bajo concesiones forestales maderables. La cobertura de bosques naturales se encuentra principalmente en la Amazonía, mientras que los bosques secos de la costa representan actualmente menos del 1% de la cobertura boscosa. (FAO, 2016, pág. 27)

Los bosques en el Perú constituyen el ecosistema de mayor superficie, con 73 280 424 hectáreas, que representan el 57.3% del territorio nacional. A pesar de ello, gran parte de la población peruana no parece haber interiorizado esta realidad en su visión del país y sus ecosistemas. (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 29)

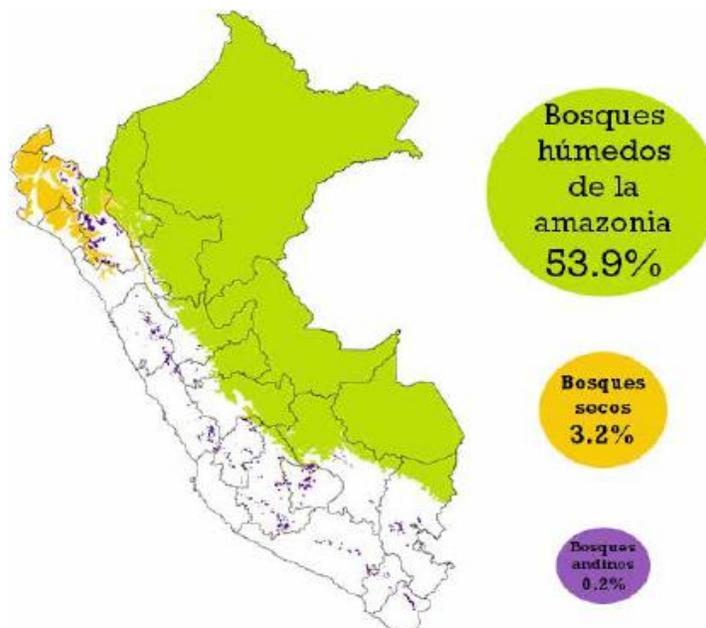


Figura 1. Grandes tipos de bosques del Perú. (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 30)

2.2.1.2. Deforestación

Si bien los bosques son muy importantes para la vida en el planeta, para un país como el Perú, con 57% de su territorio cubierto por ellos, su importancia también compromete el desarrollo económico y social. En los últimos quince años (2000-2014), el Perú ha perdido, en promedio, 118 081 hectáreas anuales de bosques. (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 18)

Frente a este panorama, el Perú se ha comprometido ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) a lograr una significativa reducción en deforestación y, por tanto, de las emisiones procedentes de esta fuente. Como parte de estos esfuerzos, en el año 2010 se creó el Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático (PNCB) en el MINAM, con la meta de conservar 54 millones de hectáreas, compuestas de tierras forestales con algún estatus legal: áreas naturales protegidas, bosques de producción permanente y bosques en tierras de comunidades campesinas y nativas. (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 18)

Gracias a estos trabajos, actualmente ya se conoce que el promedio de deforestación de los últimos 15 años (2000-2014) fue de 118 081 ha/año en el periodo de 2000-2001 y 177 571 ha en el año 2014, cifra que se estima se habría reducido durante el año 2015 debido a una mejor respuesta frente a la presión de deforestación que cultivos de palma aceitera de escala industrial han generado en los años recientes. (Ministerio del Ambiente, 2016, pág. 21)

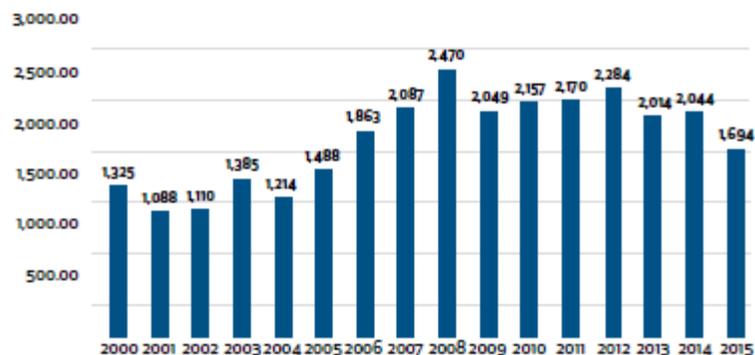
2.2.1.3. Potencial del sector forestal maderable

Resultados

De acuerdo a los datos obtenidos en el análisis económico, en el 2015 las ventas registradas por el sector fueron de USD 1,385 millones (S/. 4,418 millones), mientras que sus exportaciones alcanzaron los USD 150 millones (S/. 481,3 millones) y las importaciones USD 315 millones (S/. 1,006 millones). Ello muestra que el mercado interno representa aproximadamente el 90% de las ventas en este sector. (FAO, 2018, pág. XVII)

Producción de madera rolliza

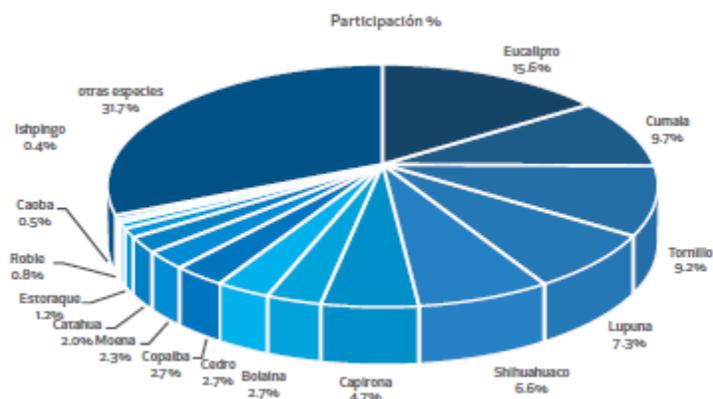
En materia de producción, la madera rolliza ha tenido una evolución marcada por dos momentos en el periodo analizado 2000-2015 teniendo como principal hito el 2008, año con el mayor nivel de producción que alcanzó los 2.4 millones de m³ de madera rolliza. Posterior al 2008 la producción mostro una tendencia decreciente, registrando en el 2015 el nivel más bajo de producción (1.7 millones de m³) desde el 2006. (FAO, 2018, pág. 25)



Gráfica 1. Evolución de la producción nacional de madera rolliza (miles de m3). (FAO, 2018, pág. 25)

“Según data del INEI, la producción de madera rolliza a nivel de regiones se concentra en un 86% en las regiones de Loreto, Madre de Dios, Ucayali; y cuya producción proviene de bosques tropicales” (FAO, 2018, pág. 25).

De acuerdo a la oferta maderable, la producción de madera en trozas se compone principalmente de las especies de cumala, capinuri, capirona, lupuna y tornillo. Las siguientes dos regiones en importancia son Junín y Pasco, cuya producción es preferente de coníferas principalmente el eucalipto. (FAO, 2018, pág. 26)



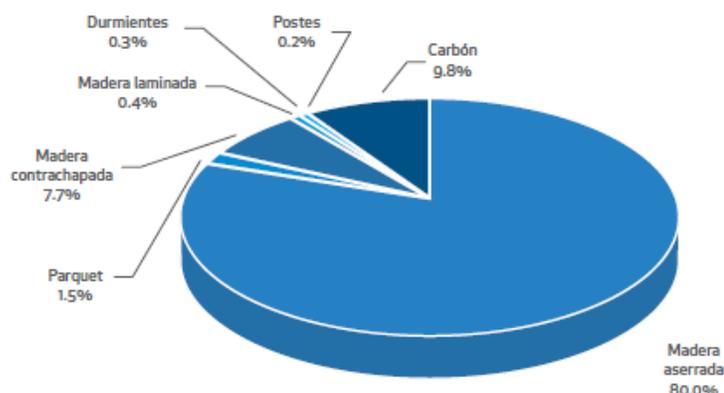
Gráfica 2. Participación por volumen especie en la producción acumulada de madera rolliza 2005-2015. (FAO, 2018, pág. 27)

Producción de productos maderables

“A pesar que en el año 2015 se registraron los menores niveles de producción desde el 2005 con un monto de 686,397 m3; el nivel de participación de cada producto en el total se ha mantenido relativamente igual” (FAO, 2018, pág. 28).

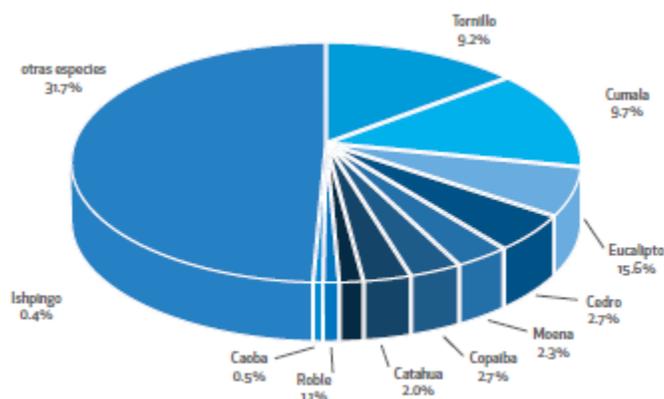
“Según la información por volumen del periodo 2005-2015, la madera aserrada represento 80.0%, el carbón represento el 9.8%, la madera contrachapada representó el 7.7%, el Parquet 1.5%,

la madera laminada representó el 0.4% y las durmientes y postes representaron el 0.5%” (FAO, 2018, pág. 29).



Gráfica 3. *Participación en los volúmenes producidos por producto maderable (2005-2015).* (FAO, 2018, pág. 29)

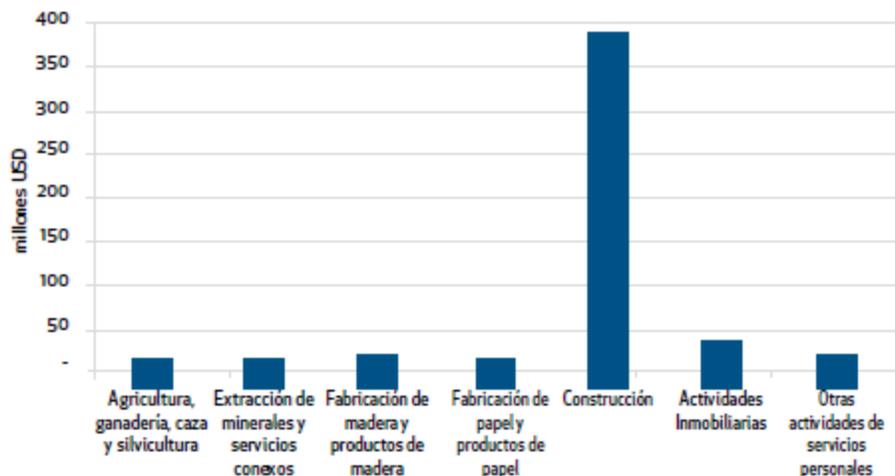
“A nivel de regiones productoras de madera aserrada son Loreto, Madre de Dios, Ucayali y Junin, siendo las principales especies utilizadas el tornillo, la cumala y el eucalipto en los porcentajes y volúmenes abajo señalados” (FAO, 2018, pág. 30).



Gráfica 4. *Participación por volumen de especie en la producción acumulada de madera aserrada 2005-2015.* (FAO, 2018, pág. 31)

Demanda en la Construcción.

“El estudio de GGGI (Global Green Growth Institute) sobre la cadena de valor del sector forestal del Perú destaca la importancia del sector construcción en el consumo de madera aserrada y en el consumo de productos de madera” (FAO, 2018, pág. 58).



Gráfica 5. Consumo de productos maderables (millones de USD, 2007). (FAO, 2018, pág. 58)

En el periodo 2005-2015, el sector construcción creció anualmente en 4.7% aunque presentó una contracción en el 2015 de -5.8% respecto al año anterior. De acuerdo al Macroeconómico Multianual 2017-2019 (revisado) se prevé una recuperación del sector con un crecimiento promedio de 5.1% entre 2017 y 2019. (FAO, 2018, pág. 59)

La madera aserrada se utiliza para encofrados, usos estructurales permanentes (como vigas) o como elemento en diseños interiores. De acuerdo al estudio encargado por la SNV se estimó que en el 2008 el sector construcción consumió 185,066 m³ de madera aserrada, tomando de referencia la tasa de crecimiento de la actividad de madera (no muebles) se tiene que al 2015 se redujo a 169,523 m³. (FAO, 2018, pág. 60)

2.2.1.4. Especies estudiadas

Se conocen más de 2500 especies identificadas en nuestra amazonía de las cuales alrededor de 205 de estas especies han recibido algún tipo de atención científica o estudio preliminar. Sin embargo la mayoría de estos trabajos no avalan que sean madera de uso estructural, pues el estudio que se les dio tenía la finalidad de clasificarlas como especie maderera, y los ensayos a que fueron sometidos estuvieron bajo las exigencias de normas como las de INDECOPI referidas a determinar sólo sus propiedades físicas. (García M., 2012, págs. 24-25) Asimismo, la Junta del Acuerdo de Cartagena estudió las propiedades de 20 especies de maderas peruanas.

2.2.2. La madera

2.2.2.1. Estructura del Tronco

“Al hacer un corte transversal de un árbol y analizar desde el exterior hacia el interior una sección de éste, se pueden apreciar zonas claramente diferenciadas, las cuales cumplen funciones específicas.” (CORMA, 2003, pág. 15).

La primera zona apreciable es la corteza, formada por materia muerta, de aspecto resquebrajado, que se divide en corteza exterior y corteza interior (floema). La corteza exterior está compuesta por células muertas que cumplen la función de proteger la estructura interior frente a agentes climáticos y biológicos. (CORMA, 2003, pág. 15)

“Siguiendo hacia dentro se encuentra la corteza interior, compuesta por células que trasladan savia elaborada” (CORMA, 2003, pág. 15).

“Luego se presenta el cambium o cambio, zona que corresponde al tejido generador de células, es decir, donde se produce el crecimiento del árbol. Hacia el interior forma el xilema y hacia el exterior, forma el floema” (CORMA, 2003, pág. 15).

“En el xilema podemos distinguir la albura hacia el exterior, con células que cumplen la función de sostén y traslado de agua y nutrientes” (CORMA, 2003, pág. 15).

“Hacia el interior del xilema se forma el duramen, compuesto por células inactivas, per que mantienen la función de sostén” (CORMA, 2003, pág. 16).

“En el centro del árbol se encuentra la médula, tejido inactivo sin función específica” (CORMA, 2003, pág. 16).

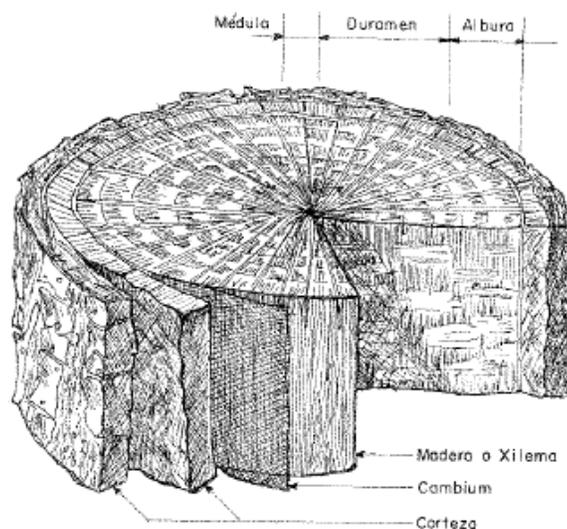


Figura 2. Partes del tronco. (PADT-REFORT, 1984, pág. 9)

“Otra de las características relevantes del árbol en su sección transversal son los denominados anillos de crecimiento (concéntricos), los cuales son apreciables a simple vista, dependiendo de la especie”(CORMA, 2003, pág. 16).

“Las especies forestales se clasifican en dos grandes grupos: coníferas y latifoliadas. En las primeras, los anillos de crecimiento son perfectamente diferenciables, mientras que en las segundas, no son tan apreciables” (CORMA, 2003, pág. 16). “La madera de coníferas es más liviana que la de las latifoliadas” (Gálvez R., 2011, pág. 18). “Aun cuando las diferencias entre ambos grupos son de origen botánico, existe la creencia errónea que esta clasificación puede ser aplicada al campo de las propiedades físicas y mecánicas de la madera que de ellas se obtiene” (García M., 2012, pág. 26).

2.2.2.2.Generalidades de la Madera

La madera es un material natural muy complejo, de poco peso y buena resistencia, pero de propiedades y características que no dependen solo de su composición sino cómo se encuentran colocados u orientados los diversos elementos que la conforman. Aunque el material es combustible, sus propiedades mecánicas no se afectan con el fuego, como sí ocurre con los materiales metálicos como el acero y el aluminio. Es muy susceptible a los cambios de humedad y al ataque de insectos; sin embargo esta desventaja puede eliminarse con tratamientos químicos de inmunización. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 13)

“Independientemente de la especie, la madera puede ser considerada como un material biológico, anisotrópico e higroscópico” (CORMA, 2003, pág. 18).

Según sea el plano o dirección que se considere respecto a la dirección longitudinal de sus fibras y anillos de crecimiento, el comportamiento tanto físico como mecánico del material, presenta resultados dispares y diferenciados. Para tener una idea de cómo se comporta, la madera resiste entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido trasversal. (CORMA, 2003, pág. 19)

Por este comportamiento irregular es necesario estudiar sus 3 ejes por separado:

“El eje tangencial, como su nombre lo indica, es tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular al eje longitudinal de la pieza” (CORMA, 2003, pág. 19).

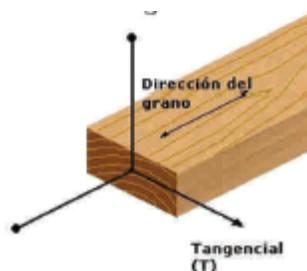


Figura 3. Eje tangencial en una pieza de madera. (CORMA, 2003, pág. 19)

“El eje radial es perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal” (CORMA, 2003, pág. 19).

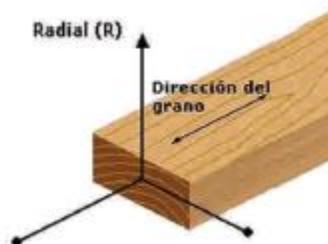


Figura 4. Eje radial en una pieza de madera. (CORMA, 2003, pág. 19)

“El eje longitudinal es paralelo a la dirección de las fibras y por ende, al eje longitudinal del tronco. Forma una perpendicular respecto al plano formado por los ejes tangencial y radial” (CORMA, 2003, pág. 19).

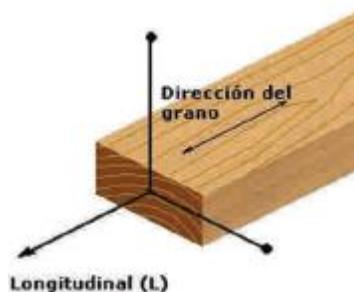


Figura 5. Eje longitudinal en una pieza de madera. (CORMA, 2003, pág. 19)

2.2.2.3. Propiedades Físicas

Contenido de humedad

Es un parámetro de relevancia que influye sobre las propiedades físicas y mecánicas. La madera contiene una importante cantidad de humedad. Esta se encuentra bajo tres formas: agua libre en el interior de las cavidades celulares; agua higroscópica, contenida en las paredes celulares y agua de constitución, inherente a su naturaleza orgánica. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 13)

“Cuando la madera es expuesta al medio ambiente, entrega agua libre contenida en sus cavidades y después agua higroscópica. En el caso del agua de constitución solo se pierde en combustión” (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 13).

Fórmula 1. Contenido de Humedad. (INACAL, 2014)

$$\text{Contenido de Humedad} = \frac{(\text{Peso Húmedo} - \text{Peso Seco}) * 100}{\text{Peso Seco}}$$

“Para determinar la humedad en la madera, se establece una relación entre masa de agua contenida en una pieza y masa de la pieza anhidra, expresada en porcentaje. A este cociente se le conoce como contenido de humedad” (CORMA, 2003, pág. 20).

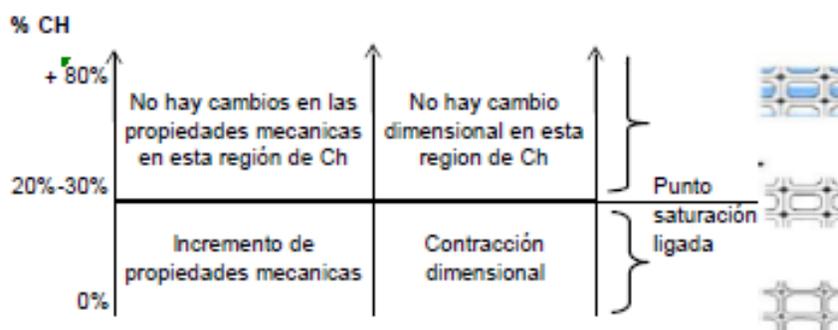


Figura 6. Diagrama de rangos de humedad. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 14)

Dependiendo del contenido de humedad obtenido en la madera, se puede diferenciar tres estados: madera verde, cuando solo se ha perdido agua libre y su porcentaje de humedad es mayor que 30%; madera seca, si ha perdido también una parte del agua higroscópica y su porcentaje de humedad es menor a 18%; y madera seca anhidra, que ha perdido toda el agua libre e higroscópica donde el porcentaje de humedad es igual a 0% tras haber sido secado en la estufa a 105 °C. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 14)

Al cortar un árbol, la madera contiene gran volumen de agua en sus cavidades y paredes celulares, humedad que oscila alrededor del 80%. Dependiendo el intercambio de humedad que produce el medio ambiente, se dice que la madera ha alcanzado un punto denominado humedad de equilibrio. Se denomina, entonces, humedad de equilibrio al porcentaje de agua que alcanza una madera sometida durante un lapso determinado a condiciones de temperatura y humedad en su medio ambiente. (CORMA, 2003, pág. 20)

Kollmann (1959) comprobó que la humedad de equilibrio es casi constante para todas las maderas. O sea, cuando la madera tiene un contenido de humedad bajo (el punto de saturación de

las fibras es menor al 30%), se habla de madera seca. Sin embargo, para ser utilizada como material de construcción, y específicamente con fines estructurales, el contenido de humedad debe ser inferior al 15%. (CORMA, 2003, pág. 20)

Densidad de la madera

La densidad de un cuerpo es el cociente de su masa entre su volumen. En la madera, por ser higroscópica, la masa y el volumen varían con el contenido de humedad; por lo que resulta importante expresar la condición bajo la cual se obtiene la densidad. Esta es una de las características físicas más importantes, ya que está directamente relacionada con las propiedades mecánicas y durabilidad de la madera. (CORMA, 2003, pág. 21)

Fórmula 2. Densidad Básica. (INACAL, 2014)

$$\text{Densidad Básica} = \frac{\text{Peso Seco}}{\text{Volumen Húmedo Saturado}}$$

Según el porcentaje del contenido de humedad de la madera, pueden determinarse diferentes tipos de densidades:

“Densidad Anhidra: Relaciona la masa y el volumen de la madera anhidra (completamente seca)” (CORMA, 2003, pág. 21).

“Densidad Normal: Aquella que relaciona la masa y el volumen de la madera con un contenido de humedad del 12%” (CORMA, 2003, pág. 21).

“Densidad Básica: Relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con humedad igual o superior al 30%” (CORMA, 2003, pág. 21).

Contracción y expansión de la madera

“El secado de la madera por debajo del punto de saturación de la fibra, provoca pérdida de agua en las paredes celulares, lo que a su vez produce contracción de la madera” (CORMA, 2003, pág. 21).

Las dimensiones de la madera comienzan a disminuir en los tres ejes. Sin embargo, en este proceso la contracción tangencial es mayor a la que se produce en un árbol. A la contracción tangencial le sigue la radial, con menos efecto, pero significativo en la deformación de la pieza. La contracción longitudinal es prácticamente despreciable en madera utilizada con fines estructurales. (CORMA, 2003, págs. 21-22)

Desde el punto de vista del comportamiento de la madera, el punto de saturación de la fibra es una variable muy importante, puesto que sobre él, la madera no variará sus características ni su comportamiento físico o mecánico. Sin embargo, cuando la madera se encuentra bajo dicho punto, sufre cambios dimensionales y volumétricos que pueden ir de leves a drásticos. (CORMA, 2003, pág. 22)

“La contracción por secado provoca deformaciones en la madera. Sin embargo con un adecuado método, los efectos son beneficiosos sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera” (CORMA, 2003, pág. 22).



Figura 7. Efectos de la contracción en la madera. (CORMA, 2003, pág. 22)

2.2.2.4. Propiedades Acústicas

La madera, como material de construcción, cumple un rol acústico importante en habitaciones y aislamiento de edificios, ya que tiene la capacidad de amortiguar las vibraciones sonoras. Su estructura celular porosa transforma la energía sonora en calórica, debido al roce y resistencia viscosa del medio, evitando de esta forma transmitir vibraciones a grandes distancias. (CORMA, 2003, pág. 23)

2.2.2.5. Propiedades Térmicas

La alta resistencia que ofrece la madera al paso del calor, la convierte en un buen aislante térmico y en un material resistente a la acción de fuego. La madera, al igual que otros materiales, se dilata o contrae al aumentar o disminuir la temperatura, pero su efecto es bastante menor, sin ser despreciable, en valores que representan 1/3 de acero y 1/6 de aluminio, aproximadamente. (CORMA, 2003, pág. 23)

2.2.2.6. Propiedades Mecánicas

Generalidades

Las propiedades mecánicas de la madera determinan la capacidad o aptitud para resistir fuerzas externas. El conocimiento de las propiedades mecánicas de la madera se obtiene a través de la experimentación, mediante ensayos que se aplican al material, y que determinan los diferentes valores de esfuerzos a los que puede estar sometida. (CORMA, 2003, pág. 23)

Cuando la carga aplicada a un cuerpo aumenta, se produce una deformación que se incrementa paulatinamente. Esta relación entre la carga aplicada y la deformación que sufre un cuerpo se puede representar gráficamente por una recta, hasta el punto donde se inicia el límite elástico del material ensayado. Si se sigue aumentando la carga, se logra la rotura del material. (CORMA, 2003, pág. 23)

El límite elástico se define como el esfuerzo por unidad de superficie, en que la deformación aumenta en mayor proporción que la carga que se aplica. El esfuerzo necesario para solicitar un material hasta el límite elástico, determina la tensión en el límite de proporcionalidad, que es la carga máxima a que se puede someter sin que se produzcan deformaciones permanentes. (CORMA, 2003, pág. 23)

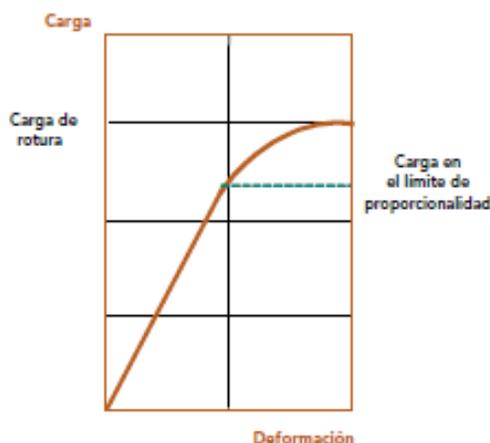


Figura 8. Gráfica carga - deformación. (CORMA, 2003, pág. 23)

La rigidez de un cuerpo se define como la propiedad que tiene para resistir la deformación al ser solicitado por fuerzas externas. La medida de rigidez de la madera se conoce como módulo de elasticidad o coeficiente de elasticidad, calculado por la razón entre esfuerzo por unidad de superficie y deformación por unidad de longitud. Cuando la carga resulta mayor a la del límite elástico, la pieza continúa deformándose hasta llegar a colapsar, obteniendo la tensión de rotura de la pieza de madera. (CORMA, 2003, pág. 24)

Flexión estática

“Es la resistencia de la viga a una carga puntual, aplicada en el centro de la luz, determinando la tensión en el límite de proporcionalidad, tensión de rotura y el módulo de elasticidad” (CORMA, 2003, pág. 24).

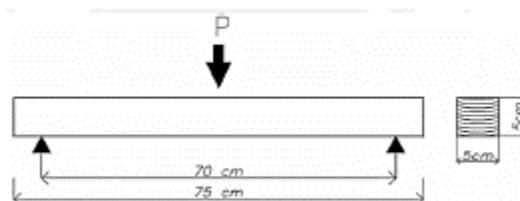


Figura 9. Espécimen para Ensayo de Flexión Estática. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 17)

Cizallamiento

“Es la medida de la capacidad de la pieza para resistir fuerzas que tienden a causar deslizamiento de una parte de la pieza sobre otra” (CORMA, 2003, pág. 25). Perpendicularmente a las fibras la resistencia es alrededor de tres a cuatro veces mayor que en la dirección paralela. En el ensayo de cizalle paralelo a las fibras, se distinguen dos tipos de sollicitaciones, según la ubicación del plano de falla respecto a los anillos de crecimientos. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 16)



Figura 10. Probeta de Corte Paralelo. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 16)

Compresión paralela a las fibras

La resistencia a la compresión paralela es la fuerza que se genera en la madera contra las tensiones de compresión a lo largo de sus fibras. Esta capacidad portante inherente del espécimen está limitada por el pandeo de las fibras más que por su propia resistencia al aplastamiento. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, pág. 15)

Compresión perpendicular a las fibras

La resistencia a la compresión perpendicular es la fuerza (capacidad de carga) que se genera en la madera contra las tensiones de compresión perpendiculares a sus fibras. Al aplicar una carga perpendicular a las fibras estas sufren un esfuerzo perpendicular a su eje, que tienden a comprimir las pequeñas cavidades contenidas en ellas. (Ordoñez G. & Lugo C., 2016, págs. 15-16)

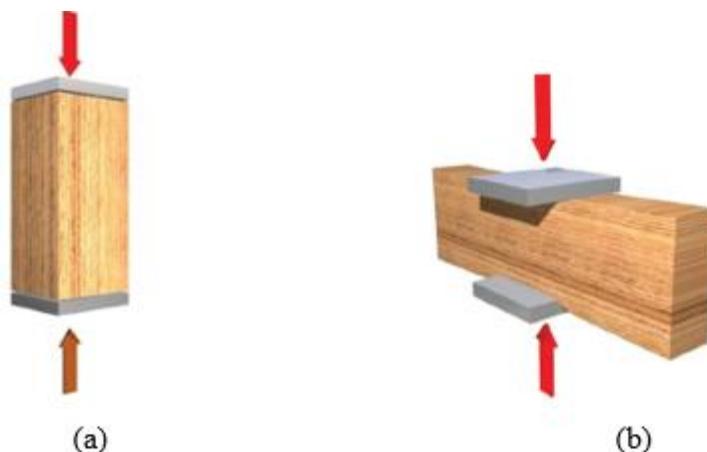


Figura 11. Esquema de ensayo de compresión (a) paralela a las fibras (b) normal a las fibras. (CORMA, 2003, pág. 24)

Extracción de clavo

“Se mide su resistencia por la fuerza necesaria para extraer un clavo de la madera. Se debe considerar la resistencia al desclavo en una superficie paralela a las fibras y en una superficie normal a las fibras” (CORMA, 2003, pág. 26).

2.2.2.7. Clasificación Estructural de la Madera

La Junta del Acuerdo de Cartagena estableció tres grupos estructurales (A, B y C). Cada grupo lo conforman especies de madera de similares propiedades físico-mecánicas como la flexión, compresión, cizalladura, entre otros. Sin embargo, el agrupamiento está principalmente basado en la densidad básica y la resistencia mecánica. (PADT-REFORT, 1984)

Tabla 1

Clasificación de la madera por grupos estructurales

Grupo	Densidad básica (gr/cm ³)
A	≥ 0.71
B	0.56 - 0.70
C	0.40 - 0.55

(PADT-REFORT, 1984)

2.2.2.8. La madera Copaiba

Esta especie perteneciente a la familia Caesalpinaceae, está distribuida en la Amazonía peruana, brasileña, colombiana, venezolana, y en Cuba. Su distribución en el Perú se da en los bosques húmedos tropicales (bh-T), bosques secos tropicales (bs-T), en suelos bien drenados y húmidos, especialmente en los departamentos de Loreto y Ucayali, entre 0 a 500 msnm. La

especie existe en cantidades regulares en la amazonía del Perú. (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29)



Figura 12. Árbol de Copaiba. Fuente: Revista Quercus

Características de la madera

La madera Copaiba presenta una albura de color rojo rosado grisáceo blanco, con transición abrupta a rojo amarillento y un duramen marrón rojizo. Olor ausente o no distintivo. Sabor ausente o no distintivo. Un brillo de mediano a brillante. Un grano de recto a entrecruzado. Textura mediana a fina en algunos casos. Veteado pronunciado con arcos superpuestos bien diferenciados, bandas longitudinales. (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29)

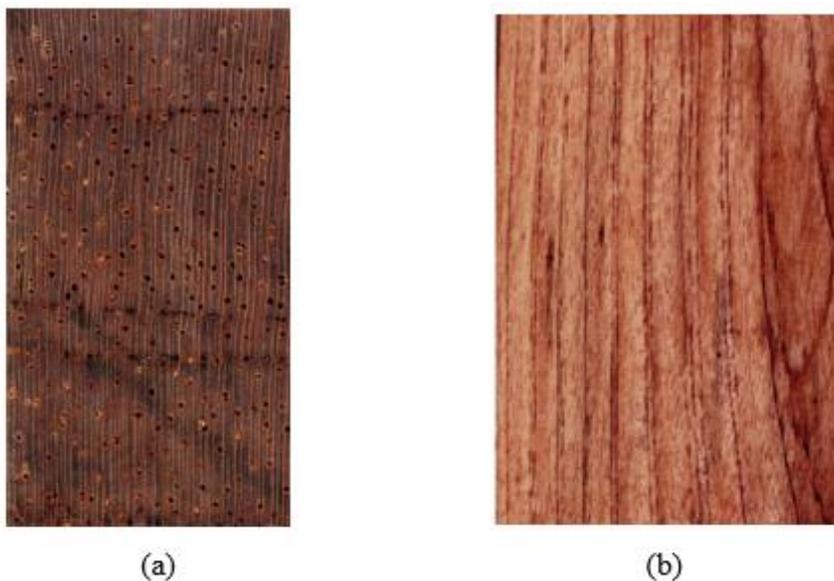


Figura 13. Imágenes macroscópicas (a) transversal (ca. 10x). (b) tangencial (tamaño natural). Fuente: Richter y Dallwitz (2000), publicación en línea: www.delta-intkey.com

Descripción del árbol en pie

Árbol de fuste recto y cilíndrico, especie dominante. Alcanza una altura total de 40 m. y una altura comercial de 20 m. con d.a.p. de 0.7 a 1.0 m. El fuste se ramifica en la parte terminal formando una copa abierta. Presenta pequeñas raíces y aletas basales. La corteza es rojiza a parda oscura, de textura compacta y con un espesor de 20 a 30 mm, al hacer una incisión exuda abundante resina gomosa translúcida conocida como “Bálsamo de Copaiba”. (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29)

Propiedades Físicas

- “Densidad Básica: 0.61 gr/cm³” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29).
- “Contracción Volumétrica: 10.70 %” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29).
- “Relación T/R: 2.00” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29).
- “Contracción Tangencial: 7.04 %” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29).
- “Contracción Radial: 3.43 %” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 29).

Propiedades Mecánicas

- “Módulo de Elasticidad en flexión: 112.0 tn/cm²” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).
- “Módulo de Ruptura en flexión: 736.0 kg/cm²” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).
- “Comprensión Paralela: 268.0 kg/cm²” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).
- “Comprensión Perpendicular: 74.0 kg/cm²” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).
- “Corte paralelo a las Fibras: 99.0 kg/cm²” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).
- “Dureza de lados: 587.0 kg/cm²” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).
- “Tenacidad: 3.40 Kg-m” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).

Aserrío y Secado

Especie de aserrío sencillo y de fácil trabajabilidad; ofrece acabados lisos y bien pulidos excepto en algunas partes del material que muestran grano vellosa después del cepillado. Secado moderado a muy rápido, alcanzando humedad de equilibrio en 3 meses a menos. (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30)

Para secar al aire libre, la madera de humedad inicial de 30% hasta un mínimo de 19%, se demora aproximadamente 55 días, presentando riesgos mínimos de deformaciones y rajaduras

leves. En el secado al horno demora 45 horas, en programa fuerte, para bajar de 43 a 14.6% de humedad. No presenta defectos en el secado. (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30)

Durabilidad Natural y Usos

Durabilidad natural: Especie muy resistente al ataque de hongos e insectos de madera humedad. El duramen es muy difícil de preservar, pero la albura tiene una penetración completa. Tratamiento preservante por métodos de inmersión y presión. La albura retiene más de 200 kg/m³, siendo la penetración total uniforme. El duramen retiene menos de 50 kg/m³. No se nota ningún tipo de penetración. (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30)

“Usos: Estructuras, carpintería general y de interiores, cajonería, postes de cercos, durmientes, chapas, contrachapados, torneados, encofrado, embalaje, parihuela y mobiliario” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).

Comentarios

“Madera de Densidad media alta. Muy resistente al ataque de hongos e insectos de madera húmeda. Resistencia mecánica media a alta. Fácil aserrío y buena trabajabilidad con máquinas de carpintería. De secado natural moderadamente lento. Fácil tratamiento de preservación” (Corporación Peruana de la Madera, 2008, pág. 30).



Figura 14. Madera Copaiba, foto de referencia. Fuente: Ficha Estándar del Catálogo de bienes del MEF, publicación en línea: www.mef.gob.pe

2.2.3. El Tirafón

2.2.3.1. Definición

Tirafón (derivado de francés tirefond), también conocido como tirafondo, es un elemento de unión intermedio entre tornillo para madera y perno. Es un tornillo con rosca cónica, generalmente de mayor que la del tornillo, con la cabeza de perno cuadrada o hexagonal. (CORMA, 2003, pág. 142)

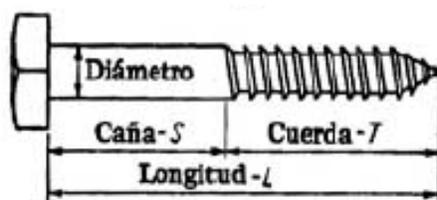


Figura 15. Pija (tirafón). (Hansen, 1961, pág. 97)

“Los tirafones poseen las puntas agudas y los hilos de rosca gruesa diseñados para penetrar y agarrar la fibra de madera. Desde que los tirafones presentan una zona roscada, pueden ser diseñados para resistir cargas de extracción y cizallamiento” (García M., 2012, pág. 48).

“Es comúnmente usado en sitios donde es difícil colocar un perno o donde la apariencia de la tuerca sobre la superficie sería objetable” (Hansen, 1961, pág. 97). “Los tirafones se usan en uniones que deben resistir cargas de corte y cargas de extracción” (Menacho C., 2010, pág. 31).

2.2.3.2. Ventajas

La ventaja de los tirafones se encuentra en los tamaños que poseen. Los tamaños típicos se presentan desde 1 pulg. hasta 16 pulg. en longitud y desde 3/16 pulg. hasta 1 pulg. en diámetro. Sin embargo depende del diseño de la unión para aprovechar las ventajas en tamaño que tiene el tirafón. (Hurtado A., 2007, pág. 29)

El comportamiento de un tirafón en una unión es básicamente muy similar al de un clavo; sin embargo, su rigidez y resistencia son mayores, debido a la restricción impuesta por la rosca al penetrar la madera, lo cual incrementa su resistencia a la extracción. Como los tirafones se instalan en un agujero guía taladrado previamente en la pieza lateral, existe una mejor distribución de los esfuerzos de aplastamiento y una mejor sujeción del elemento de unión, lo cual incrementa notablemente su rigidez y resistencia, cuando se la compara con un clavo de dimensiones similares. Además de los factores mencionados para clavos y pernos, el comportamiento de uniones con tirafones se ve notablemente afectado por el peso específico de la madera en las piezas que forman la unión. (Menacho C., 2010, pág. 31)

2.2.3.3. Instalación

La correcta instalación del tirafón viene dada por una perforación previa, la cual llamamos “perforación guía”. Esta perforación tiene como finalidad guiar al tirafón hacia la zona de penetración. El tirafón deberá ser colocado por una llave inglesa la cual hará girar el tirafón hasta penetrar completamente dentro de la madera. (Hurtado A., 2007, pág. 29)

“Para facilitar la introducción y evitar daños en el tirafón, se recomienda el empleo de lubricantes en la rosca o en la perforación” (CORMA, 2003, pág. 143).

“Estos compuestos facilitan notablemente la operación de atornillar y según el estudio realizado por J.J. Salinas en “Conexiones con clavos, pernos y pijas” en 1983, no afecta el comportamiento de la unión” (Menacho C., 2010, pág. 31).

2.2.3.4. Tipos de tirafón

El rango de tirafones es de aproximadamente 5.1 mm a 25.4 mm (3/16” a 1”) en diámetro y de 25.4 mm a 406 mm (1” a 16”) en longitud. La longitud de la parte roscada varía con la longitud del tirafón y se extiende a partir de 19 mm (3/4”) con longitudes de tirafones de 25.4 y 31.8 mm (1” y 1 ¼”) a la mitad de la longitud para todas las longitudes mayores de 254 mm (10”). (Hurtado A., 2007, pág. 30).

2.2.3.5. Características del tirafón

El tirafón es fabricado en frío con acero al carbón SAE 1007 y su recubrimiento puede ser Pavonado (óxido negro) o Zincado. Tiene una cabeza hexagonal que es apretada por una llave de tuerca, por lo que se tiene un efecto de palanca que aumenta el momento (en comparación con los tornillos para madera, que tienen una cabeza ranurada y son apretados por un destornillador). (Hurtado A., 2007, pág. 30).

“El comercio nacional entrega ciertos tipos de tirafones que, por lo general, son mal aprovechados, pues no existe conocimiento de su capacidad resistente, además de poder conseguirlos a un buen precio en determinados lugares comerciales” (Hurtado A., 2007, pág. 30).

“A diferencia de los tornillos, los tirafones tienen hilos filosos, lo que facilita la penetración en la madera. Además poseen una rosca recta permitiendo mayor agarre (...)” (Hurtado A., 2007, pág. 31).



Figura 16. De izquierda a derecha: Tirafón, Perno y Clavo. Fuente: www.homedepot.com

2.2.3.6. Propiedades mecánicas

La empresa CORONA realizó un ensayo de dureza como referencia resultando 85 – 90 Rb, lo que quiere decir que contiene baja cantidad de carbono en el acero, logrando obtener un alto porcentaje de elongación (aproximadamente 30%) y una resistencia a tracción relativamente baja. (Paredes P., 2006, pág. 18)

La Norma SAE 429-H que rige para los tirafones no exige resistencia a la tracción. Como referencia se realizó un ensayo de tracción del tirafón en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, el cual arrojó una resistencia de 55.6 kg/mm². (Paredes P., 2006, pág. 18)

Tabla 2

Ensayo de Tracción del Tirafón

Probeta	Carga de Fluencia	Carga Máxima	Área	Límite de Fluencia	Resistencia Límite a la Ruptura
1	792	1470	0.264	2997.6	5563.8
2	760	1370	0.264	2876.5	5185.3
3	770	1510	0.264	2914.3	5715.2
4	900	1470	0.264	3406.4	5563.8
5	792	1420	0.264	2997.6	5374.5
6	760	1470	0.264	2876.5	5563.8
7	770	1500	0.264	2914.3	5677.3
8	900	1500	0.264	3406.4	5677.3
9	770	1480	0.264	2914.3	5601.6
10	900	1490	0.264	3406.4	5639.5
Promedio (kg/cm²)				3071.0	5556.2
Promedio (kg/mm²)				30.7	55.56

Procedencia: Empresa Corona, Fecha de ensayo: 05-06-2005, Maquina de Ensayo: Maquina Universal de 100 Tn Tokyokoki Seizosho. (Paredes P., 2006, pág. 100)

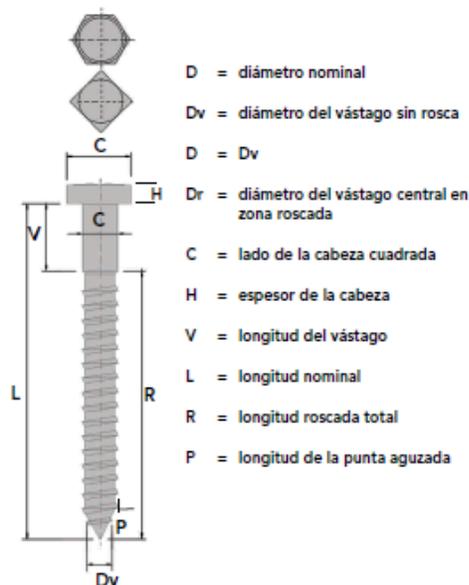


Figura 17. Esquema de un Tirafón. (CORMA, 2003, pág. 143)

2.2.3.7. Perforaciones guías

“Los tirafones deben ser instalados en perforaciones que tienen la propiedad de guiar su ubicación final, por tal motivo estas toman el nombre de Perforaciones Guías (...)” (CORMA, 2003, pág. 143), cuyas características son las siguientes:

“La perforación donde se alojará el vástago del tirafón debe tener el mismo diámetro (D) de dicho vástago y una profundidad igual a la longitud (V) de la zona sin rosca del tirafón” (CORMA, 2003, pág. 143).

“La perforación para la zona con rosca del tirafón debe tener una profundidad al menos igual a la longitud de la zona roscada del tirafón ($R-P$) y un diámetro comprendido entre:” (CORMA, 2003, pág. 143).

“40% y 70% del diámetro del vástago para las especies con densidad anhidra no mayor de 400 kg/m^3 ” (CORMA, 2003, pág. 143). (Madera perteneciente al grupo C de la clasificación estructural hecha por la Junta del Acuerdo de Cartagena).

“60% y 75% de dicho diámetro para las especies con densidad anhidra superior a 400 kg/m^3 , pero no mayor de 500 kg/m^3 ” (CORMA, 2003, pág. 143). (Madera perteneciente al grupo C de la clasificación estructural hecha por la Junta del Acuerdo de Cartagena).

“65% y 85% del diámetro del vástago para las especies con densidad anhidra superior a 500 kg/m^3 ” (CORMA, 2003, pág. 143). (Madera perteneciente al grupo B de la clasificación estructural hecha por la Junta del Acuerdo de Cartagena).

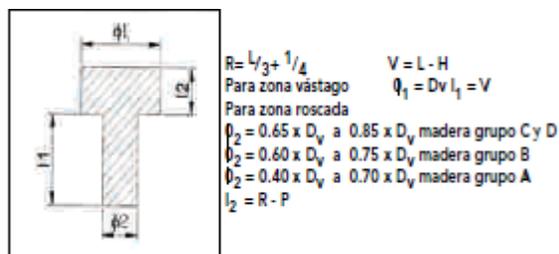


Figura 18. Perforación Guía. (CORMA, 2003, pág. 143)

“Toda la zona con rosca debe ser colocada en la perforación guía con una llave tuerca. No es aceptable el uso de golpes de martillo en esta operación” (CORMA, 2003, pág. 143).

En la figura 18 se detalla las consideraciones para realizar la perforación guía, en donde ϕ_1 será igual al diámetro del vástago del tirafón (D_v). En cambio en la zona roscada la perforación guía ϕ_2 será realizado de acuerdo al grupo al que pertenezca la especie maderera a utilizar.

2.2.3.8. Arandelas

Pieza en forma de anillo que se usa para asegurar el cierre hermético de una junta o para evitar el roce entre dos piezas, en este caso la madera y el tirafón; son las establecidas para los pernos de diámetro igual al diámetro del vástago del tirafón usado. Según la tesis de grado sobre uniones estructurales de tirafón con madera Quinilla y la recomendación de la Norma Chilena, los tirafones deben llevar arandelas según lo indica la tabla 3, excepto que se dispongan planchas de acero entre la cabeza del tirafón y la madera. (García M., 2012, pág. 51)

Tabla 3

Dimensiones mínimas de arandelas para uniones estructurales

Dimensión	Unidad	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Diámetro del Perno	mm	10	12	16	20	>20
Espesor de la Arandela	mm	5	5	6	6	6
Diámetro externo (arandela circular)	mm	50	55	65	75	98
Lado (arandela cuadrada)	mm	45	50	60	65	85

(García M., 2012, pág. 52)

“Sin embargo, el comercio peruano cuenta con arandelas con espesores desde 1.8 mm hasta 9.5 mm para diámetros internos de 3.4 mm a 133 mm” (García M., 2012, pág. 52).

2.2.4. Uniones en madera

2.2.4.1. Generalidades

Las intersecciones de elementos estructurales dan origen a nudos o uniones (sectores más vulnerables de las construcciones de madera), los cuales deben ser resueltos en el diseño considerando aspectos estructurales (resistencia y transmisión de las cargas), arquitectónicos (si quedará a la vista o no el nudo) y constructivos (procedimientos y consideraciones para la materialización de la unión). (CORMA, 2003, pág. 131)

Estructuralmente estos nudos deben ser capaces de transmitir los esfuerzos de un elemento a otro, sin comprometer la rigidez y geometría del sistema estructural, donde los esfuerzos de compresión se transmiten por simple apoyo y los de tracción, que requieren de un mayor análisis para dar continuidad a la estructura, se resuelven mediante fijaciones que traspasarán los esfuerzos de un elemento a otro. (CORMA, 2003, pág. 131)

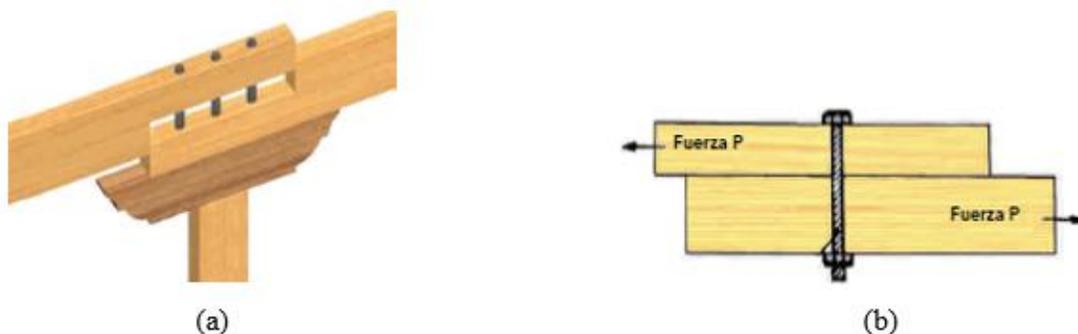


Figura 19. (a) Necesidad de unir dos vigas en un apoyo (b) Unión con perno sometida a cizalle. (CORMA, 2003, págs. 131-132)

Mediante estas fijaciones en los nudos o intersecciones de elementos estructurales se podrá dar solución a la necesidad de mantener los esfuerzos en el sentido axial, prolongar los largos de las piezas comerciales y que elementos independientes puedan ensamblarse para conformar una estructura que resista las solicitaciones y transmita los esfuerzos, sin que se generen puntos de debilidad, impidiendo el deslizamiento de una pieza con respecto a otra (fijar los elementos, asegurando un cuerpo con el otro) y permitiendo que el conjunto de elementos conforme una estructura monolítica (el resultado de fijar los elementos es su unión). (CORMA, 2003, pág. 132)

2.2.4.2. Uniones mecánicas

Son elementos metálicos, generalmente cilíndricos y de acero que se hincan, insertan o atornillan en las piezas de madera que constituyen la unión. El mecanismo de traspaso de fuerzas

se materializa por medio de un trabajo en flexión, aplastamiento o cizalle del medio de unión y del aplastamiento, cizalle y hendimiento de la madera. (CORMA, 2003, pág. 132)

Las fijaciones deben ser sencillas, obtenerse con la mínima pérdida de material, dar una seguridad suficiente para su uso y ser de rápida ejecución. Las fijaciones más utilizadas que cumplen con los requisitos antes mencionados y que permitirán obtener una estructura segura son: clavos, tornillos, tirafondos, pasadores, pernos, placas dentadas y conectores. (CORMA, 2003, pág. 132)

“La característica de estas uniones mecánicas es que al quedar sometidas a fuerzas de cizalle, admiten corrimientos relativos entre las piezas conectadas y cuyas magnitudes dependen de la fuerza solicitante, la rigidez y la disposición de los sujetores” (CORMA, 2003, pág. 132).

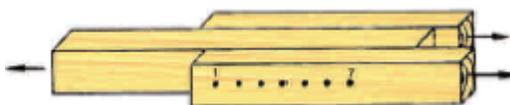


Figura 20. Hilera de 7 fijaciones. (CORMA, 2003, pág. 135)

“Los corrimientos relativos son consecuencia de las deformaciones por aplastamiento que sufre la madera en la zona de contacto con la fijación y la deformación experimentada por los sujetores” (CORMA, 2003, pág. 132). Asimismo según otras bibliografías, estas solicitaciones provocan flexión en los sujetores, desarrollándose rotulas plásticas a partir de cierto esfuerzo en el área de contacto con la madera.

2.2.4.3. Resistencias de la madera y el sujetador

Las dos variables resistentes que intervienen en las expresiones de cálculo y de las que depende la capacidad de carga y forma de colapso de la unión son la resistencia característica al aplastamiento de la madera y el momento plástico de la sección del medio de unión de tipo clavija. (Gálvez R., 2011, pág. 178)

Resistencia característica al aplastamiento de la madera

“La resistencia al aplastamiento de una madera o de un tablero derivado de esta es la tensión última de compresión que es capaz de soportar la pieza, ejercida por un elemento lineal rígido que atraviesa la unión” (Gálvez R., 2011, pág. 178).

Resistencia a la flexión de la clavija

El momento plástico es el momento flector que solicita una sección cuando ésta alcanza el agotamiento resistente a flexión y se produce una plastificación completa de la sección del elemento de fijación pasante. Se alcanza la tensión en el límite elástico y se producen

deformaciones formándose una rótula plástica, de forma que la pieza gira (se dobla) respecto a la sección del momento plástico, existiendo plastificaciones en las secciones vecinas. (Gálvez R., 2011, pág. 181)

2.2.4.4. Tipos de uniones mecánicas

Destacan por ser flexibles y presentar facilidad de ensamblaje, en comparación con las uniones encoladas, las cuales generan un gasto adicional al utilizar elementos externos como tirafones, clavos, pernos, etc. Pueden presentar solicitaciones de cizallamiento o corte las cuales pueden ser simples o dobles de acuerdo a las especificaciones y diseño del proyecto. (Romero R., 2016, pág. 72)

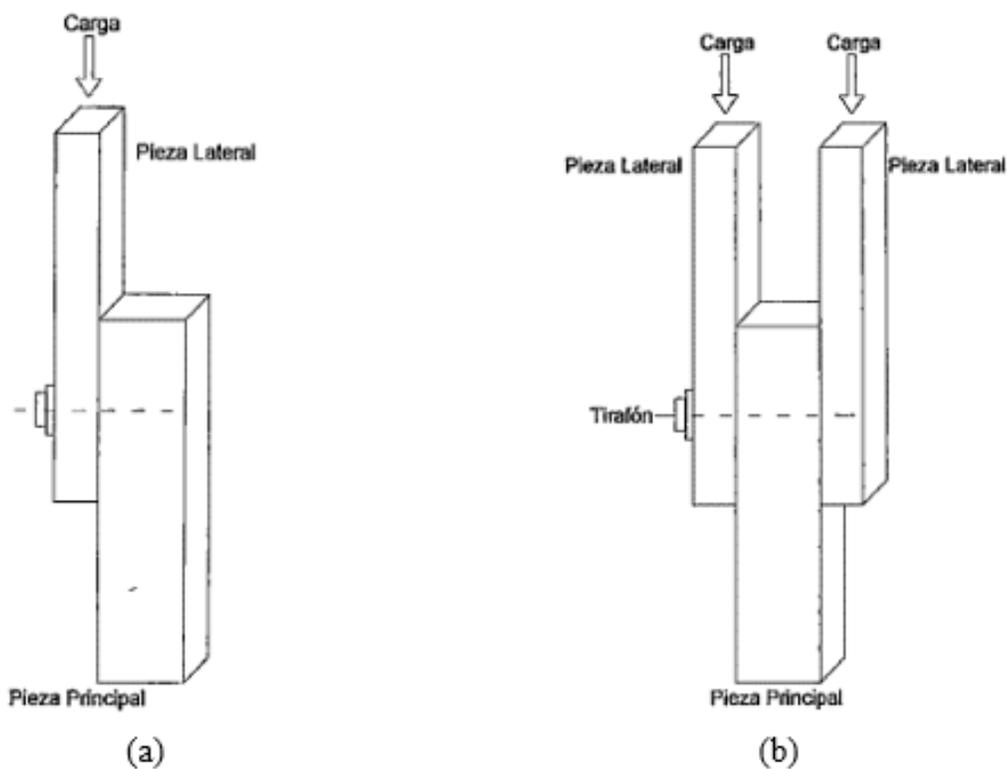


Figura 21. Esquema de ensayo de corte paralelo al grano (a) simple y (b) doble. (García M., 2012, págs. 75-79)

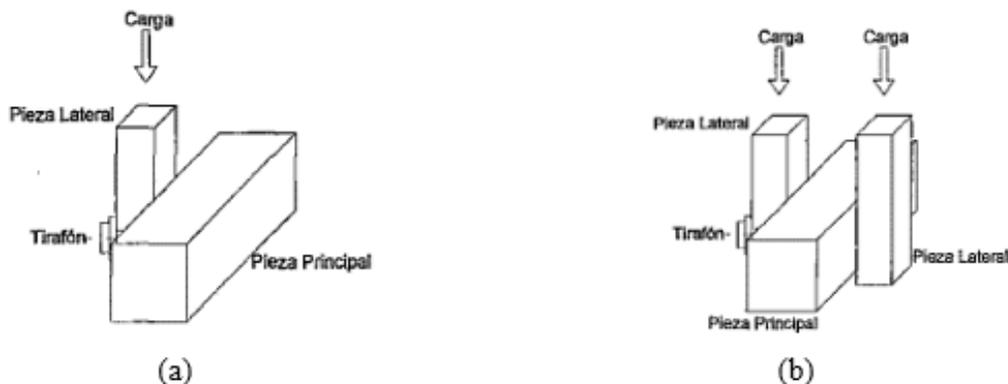


Figura 22. Esquema de ensayo de corte perpendicular al grano (a) simple y (b) doble. (García M., 2012, págs. 77-80)

“Asimismo, pueden presentar solicitaciones de extracción, cuando hay una fuerza de tracción en la misma dirección al eje del tirafón” (Romero R., 2016, pág. 72).

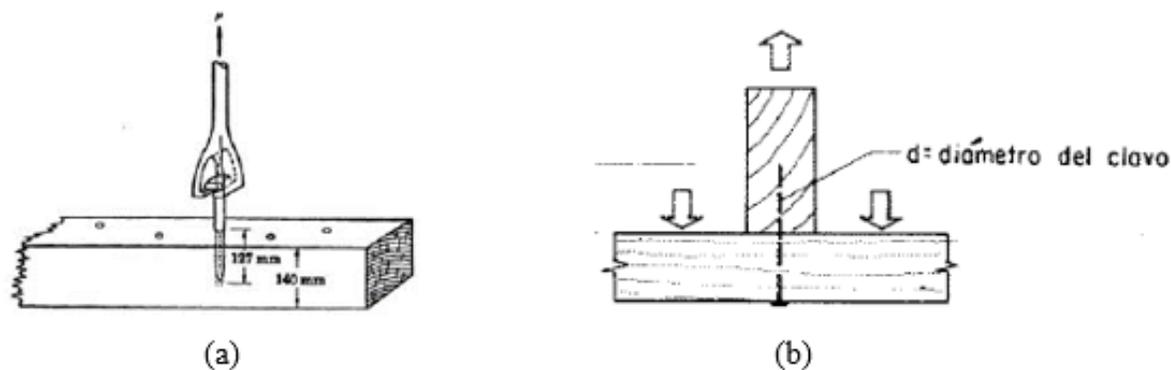


Figura 23. (a) Método de ensayar los tirafones para extracción directa. (Hansen, 1961, pág. 97) (b) Clavo sometido a fuerzas de extracción. (PADT-REFORT, 1984, pág. 11)

2.2.4.5. Formas de colapso

Las formas de colapso o desorganización de la unión pueden producirse en diferentes circunstancias. Puede darse la rotura de la pieza a axil en el área neta de la sección, pudiendo verificarse mediante la comprobación de resistencia de la pieza de madera (figura 24a). Puede ocurrir que llegue a superarse la resistencia a flexión de la clavija, formándose en ella rótulas plásticas que conducen a elevadas deformaciones por el giro de las mismas (figura 24b). No llega a producirse la rotura por cortante del elemento clavija ya que, al ser la madera un material mucho menos rígido, ocurren elevadas deformaciones y desgarros en la misma. (Gálvez R., 2011, pág. 177)

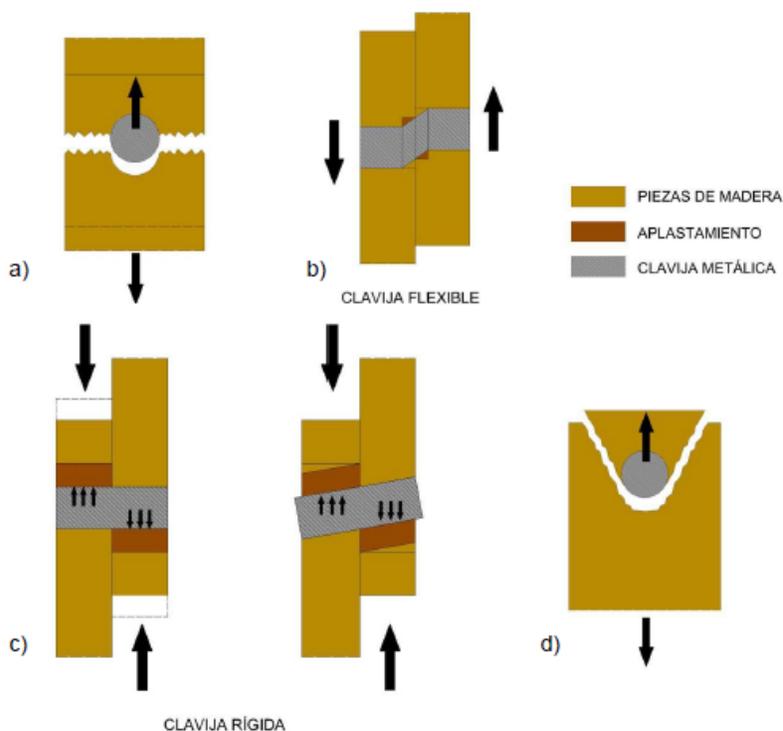


Figura 24. Formas de colapso en una unión. (Gálvez R., 2011, pág. 177)

Otra forma es cuando se produce el aplastamiento de la madera en las zonas de contacto clavija-madera desarrollándose grandes deformaciones y giro de la clavija (figura 24c). En este caso puede ocurrir que la clavija se comporte como rígida sin llegar a plastificarse y produciéndose el aplastamiento de la madera, o que se comporte como flexible y aparezcan rótulas plásticas más el aplastamiento de la madera. Se puede aumentar la resistencia al aplastamiento elevando el espesor de las piezas a unir, el diámetro de la clavija o la densidad de la madera, es decir, su clase resistente. (Gálvez R., 2011, pág. 178)

Por otro lado, las disposiciones geométricas a la hora de diseñar la unión pueden evitar el desgarro o rotura de la pieza por la combinación de tensiones normales o tangenciales de parte de la pieza de madera entre las clavijas o entre éstas y el borde (figura 24d). (Gálvez R., 2011, pág. 178)

Asimismo, la American Wood Council (2018), en su publicación “National Design Specification for Wood Construction” considera 4 modos de falla para uniones estructurales de madera con tirafones, tornillo, pernos, clavos y espigas. A pesar de no coincidir completamente con las conexiones diseñadas especialmente en la profundidad de penetración del tirafón, serán usadas de base para caracterización. (*documento con copyright*)

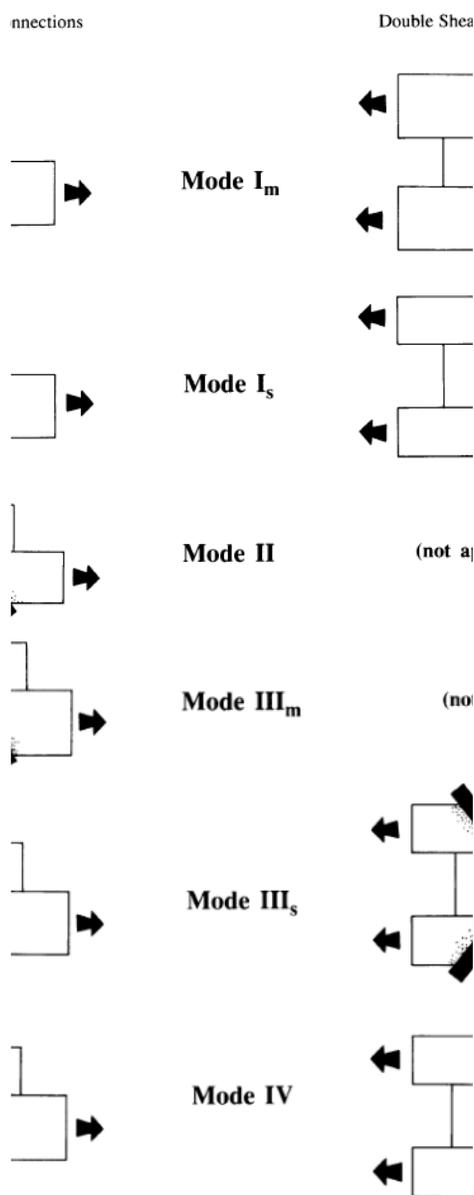


Figura 25. Connection Yield Modes (imagen con copyright) (American Wood Council, 2018, pág. 174)

“Los modos I_m y I_s representan el comportamiento con un aplastamiento moderado de las fibras de madera en contacto con el sujetador ya sea en el elemento principal o lateral respectivamente” (American Wood Council, 2018, pág. 173).

“El modo II representa el giro del sujetador con eje en el plano de corte de una unión simple, con aplastamiento puntual de las fibras de la madera cerca de las caras externas e internas de ambas piezas de madera” (American Wood Council, 2018, pág. 173).

“Los modos III_m y III_s representan el comportamiento del sujetador al doblarse con una rotula plástica por cada plano de corte, y también el comportamiento con un aplastamiento moderado de

las fibras de madera en contacto con el sujetador ya sea en el elemento(s) principal o lateral(es) respectivamente” (American Wood Council, 2018, pág. 173).

“El modo IV representa el comportamiento del sujetador al doblarse con dos rotulas plásticas por cada plano de corte, con un aplastamiento puntual de las fibras de madera cerca de los planos de corte” (American Wood Council, 2018, pág. 173).

2.2.4.6. Factores que afectan el comportamiento de las uniones estructurales

Densidad: la unión estructural resiste la acción de la carga por medio del elemento de unión y la madera. El elemento de unión transmite la carga a la madera produciéndose compresión paralela o perpendicular a las fibras, en esta etapa interviene la resistencia que opone la madera a estas fuerzas. Las resistencias mecánicas están en relación directa a las densidades de la madera y existe la tendencia de utilizar esta relación como base para agrupar las especies. (García M., 2012, pág. 21)

Contenido de humedad: Hansen, señala que, la humedad afecta la resistencia entre el punto de saturación de las fibras y el contenido de humedad equilibrio. A medida que aumente la humedad y se acerque al punto de saturación de las fibras, la madera resulta menos resistente; después de este punto, permanece constante. El grado de disminución de la resistencia por aumento del contenido de humedad varía entre las especies. (García M., 2012, pág. 22)

Dirección de las Fibras: de las pruebas realizadas en diversos estudios tecnológicos del Timber Engineering Company, se puede afirmar que la resistencia de la madera a la compresión, flexión y tracción disminuye si las fibras se desvían del paralelismo, encontrándose que a desviaciones de 90° al eje de carga se estabilizan y solo alcanzan porcentajes pequeños de los obtenidos para cargas paralelas a las fibras. (García M., 2012, pág. 22)

“Planos de Corte: la carga admisible para un perno sometido a simple cizallamiento puede considerarse como la mitad de la carga tabulada o calculada para una unión con doble cizallamiento” (PADT-REFORT, 1984, pág. 16). “Asimismo, para uniones empernadas de 4 o más elementos (figura 26) la carga admisible puede determinarse sumando las cargas admisibles para cada plano de cizallamiento” (PADT-REFORT, 1984, pág. 17).



Figura 26. (a) Valores de L en uniones formadas por cuatro miembros de igual espesor. (Hansen, 1961, pág. 121)

(b) Unión empernada sometida a cizallamiento múltiple. (PADT-REFORT, 1984, pág. 17)

“Sección Crítica: es el área del miembro tomada en ángulo recto hacia la dirección de la carga, la cual da el máximo esfuerzo, basado sobre el área neta sobrante, después de reducir la sección de los agujeros del elemento de unión” (García M., 2012, págs. 22-23).

“Espaciamientos: los espaciamientos mínimos dependen del diámetro del elemento, estas son distancias medidas del centro del tirafón al borde, al extremo de la unión o medidas también entre tirafones” (García M., 2012, pág. 23).

Número de Elementos: según la Junta del Acuerdo de Cartagena, para una unión con más de un perno o sujetor, es necesario aplicar un factor de reducción a la carga admisible total debido a que la distribución de fuerzas en los diversos sujetores no es uniforme. (PADT-REFORT, 1984)



Figura 27. Método para medir espaciamientos (a) paralelos a la fibra y (b) perpendiculares a la fibra. (Hansen, 1961, pág. 122)

Dimensiones: según Hansen, las uniones varían notablemente su capacidad de carga con la variación del diámetro del sujetor, la profundidad de penetración del sujetor en la pieza principal y el espesor de la pieza lateral de la unión. Con estas últimas variables, la Junta del Acuerdo de Cartagena, en sus comentarios menciona la relación “ EL/D ” (espesor de la pieza lateral entre diámetro del sujetor) como una variable a considerar en la determinación experimental de la resistencia de las uniones. (Hansen, 1961, págs. 97-112)

2.2.4.7. Límite de proporcionalidad

La ley de Hook señala que todo esfuerzo sometido a un cuerpo lo deforma, la deformación es proporcional al esfuerzo mientras persista la deformación. A medida que se incrementan los esfuerzos, se observa una desviación marcada del comportamiento. Tal desviación empieza a ser significativa después de cierto nivel de esfuerzo, que podría calificarse como el límite de proporcionalidad en muchos casos. (García M., 2012, pág. 81)

“Según la American Wood Council, el límite proporcional se ubica al 5% del diámetro del tirafón, con una línea paralela a la parte proporcional de deformación entre el límite elástico y la carga máxima” (García M., 2012, pág. 81). De esa manera para cada curva de carga-deformación se proyecta una línea de compensación paralela a la rama lineal inicial de la curva igual al 5% del diámetro del tirafón.

“El límite proporcional puede establecerse como la intersección de la línea de compensación y la curva carga-deformación” (García M., 2012, pág. 81).

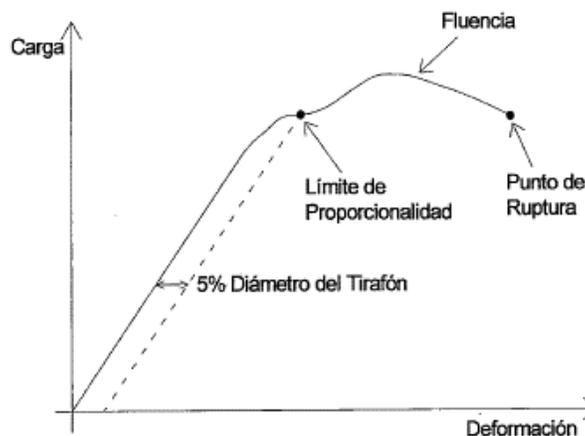


Figura 28. Curva para la determinación del límite proporcional según la NDS. (García M., 2012, pág. 81)

Asimismo, los materiales pueden presentar una falla dúctil o una falla frágil. En la primera el material presenta una deformación grande antes de su rotura. En la segunda el material presenta una deformación despreciable antes de su rotura. A partir del límite proporcional es posible identificar el tipo de falla mediante la curva de carga-deformación del material.

2.2.4.8. Principios generales para el calculo

A la hora de diseñar y calcular las uniones para estructuras de madera es importante tener en cuenta una seria de condicionantes generales que afectan, independientemente del tipo de unión empleado. Las posibilidades en el diseño de las uniones son enormes no siendo posible definir una única solución para cada situación, siendo la idea principal que cuanto más simple sea la unión y

menor el número de herrajes utilizados, mejor será el resultado estructural. (Gálvez R., 2011, pág. 138)

Deslizamiento de las uniones

En el momento de poner en carga una estructura, los elementos de unión de tipo clavija en uniones mecánicas sufren deslizamientos debidos a la flexión del metal provocando deformaciones plásticas y aplastamiento en la madera. En el caso de pernos o elementos con pretaladro se dejan holguras del taladro respecto al diámetro del perno. Esto provoca un deslizamiento de la unión que influye de manera importante en la estructura, aumentando la deformación global de la misma al acumularse las deformaciones de los nudos que pueden experimentar estos deslizamientos. (Gálvez R., 2011, pág. 139)

Rigidez del medio de unión

“Las características de rigidez de las uniones son distintas según el medio de unión utilizado, resultando las uniones encoladas más rígidas que las clavadas o empernadas” (Gálvez R., 2011, pág. 139).

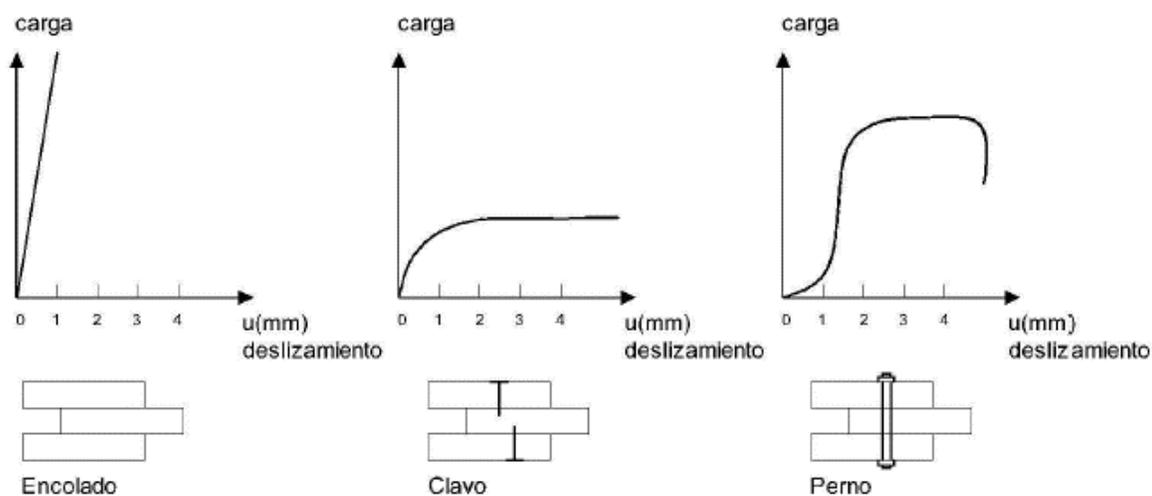


Figura 29. Gráficos de rigidez. (Gálvez R., 2011, pág. 139)

“La figura 29 muestra la comparativa para los tres medios de unión mediante gráficos que representan la relación entre el deslizamiento y la carga” (Gálvez R., 2011, pág. 140).

Las uniones encoladas son las más rígidas no siguiendo un orden lineal y no presentando plasticidad. En cambio en las uniones con clavos la rigidez disminuye con el deslizamiento, y en los pernos existe un deslizamiento inicial importante como representa el inicio de la curva en la gráfica, debido a las holguras dejadas en la unión. Posteriormente pasa a un tramo de bastante

rigidez comparable a la de la unión encolada y por último entra en una fase de deformación plástica con deslizamientos importantes y sin aumento de carga. (Gálvez R., 2011, pág. 140)

Cuando los medios de unión son distintos, pero de la misma naturaleza, como clavos y pasadores, el reparto de la carga puede realizarse admitiendo un comportamiento elástico, quedando del lado de la seguridad. De este modo la distribución de carga entre cada grupo de medios de unión se realiza de manera proporcional a su módulo de deslizamiento. (Gálvez R., 2011, págs. 140-141)

Efectos de agrupación de los elementos de unión

Un aspecto que puede limitar la resistencia en una unión es la agrupación de los elementos de fijación utilizados. Cuando existen muchos elementos colocados en línea o un conjunto de elementos agrupados en un área de la pieza, existe el peligro de que se produzca el desgarro de un trozo de la misma. La limitación de la resistencia por agrupamiento de medios de unión se produce por este desgarro, antes de que se haya agotado la capacidad resistente de cada uno de los elementos de unión utilizados por separado. (Gálvez R., 2011, pág. 141)

La forma de producirse la rotura en estos casos es secuencial, lo que significa que se produce primero la rotura o desgarramiento en uno de los planos o superficies de rotura, produciéndose a continuación una plastificación de la misma, para finalmente producirse la rotura en la segunda superficie. Este comportamiento se debe al comportamiento frágil de la madera que no puede desarrollar grandes deformaciones. (Gálvez R., 2011, pág. 142)

2.2.4.9. Valores de Diseño

Según la American Wood Council (AWC) y las investigaciones antecedentes, se emplearán las siguientes ecuaciones para la obtención de la carga de diseño para cada solicitud de las uniones.

Fórmula 3. Carga de diseño - Cizallamiento o Corte según AWC. (American Wood Council, 2015, pág. 250)

$$\text{Valor de Diseño} = \frac{\text{Valor de la Carga al Límite Proporcional}}{2.25}$$

Fórmula 4. Carga de diseño - Cizallamiento o Corte según investigaciones antecedentes.
(García M., 2012, pág. 88)

$$\text{Valor de Diseño} = \frac{\text{Valor de la Carga al Límite Proporcional}}{2.5} * 1.2$$

Fórmula 5. Carga de diseño - Extracción Directa. (American Wood Council, 2015, pág. 249)

$$\text{Valor de Diseño} = \frac{\text{Valor de la Carga Máxima}}{5}$$

“Estas especificaciones obedecen a ciertos factores de seguridad asignados para valores obtenidos experimentalmente, sugeridos principalmente por la AWC como valores de diseño de referencia” (American Wood Council, 2015, págs. 249-252).

2.3. Definiciones conceptuales

Carga: Fuerza estructural externa o interna (peso propio) aplicada a los elementos resistentes.

Cizallamiento o Corte: Deformación lateral que se produce por una fuerza externa.

Falla Dúctil: Fractura ocurrida cuando hay una deformación plástica.

Falla Frágil: Fractura ocurrida con poca o nula deformación plástica.

Grano: Fibra de madera caracterizada por la gran proximidad entre los anillos anuales.

Resistencia: Capacidad de un material de soportar cargas aplicadas antes de llegar al estado de falla.

Rigidez: Medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones.

2.4. Hipótesis

Las uniones estructurales con tirafones en madera Copaiba (*copaifera officinalis*) en estado seco presentan fracturas del tipo dúctil y un incremento en su resistencia a mayor valor de EL/D.

2.5. Variables

Variable Dependiente:

Las propiedades mecánicas de las uniones estructurales.

Variables Independientes

Las dimensiones de los elementos de la unión.

Variables Intervinientes

Las propiedades físicas de la especie como el contenido de humedad y la densidad básica

2.6. Operacionalización de las variables

Tabla 4

Operacionalización de Variables

Variable	Tipo	Dimensión	Indicadores	Unidad de Medida	Instrumento de Investigación
Propiedades Mecánicas de las Uniones	Dependiente	Resistencia al Cizallamiento	Esfuerzo	kg/cm ²	Maquina Universal
		Resistencia Extracción Directa	Esfuerzo	kg/cm	Maquina Universal
Dimensiones de los elementos en la Unión	Independiente	Dimensiones del Tirafón	Diámetro	pulg	Regla Graduada
			Profundidad de Penetración	mm	Vernier
		Dimensión Espécimen Lateral	Espesor	pulg	Regla Graduada precisión 1mm
Propiedades Físicas de la Especie	Interviniente	Contenido de Humedad	Porcentaje	%	Horno E. Balanza Electrónica
		Densidad Básica	Densidad	gr/cm ³	Horno E. Balanza Electrónica

(Elaboración propia)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de Investigación

Nivel de Investigación

La presente tesis es una Investigación Aplicativa, debido a que pretende generar un nuevo conocimiento con la aplicación directa de pruebas en los tipos de uniones a estudiar.

Diseño de Investigación

La presente tesis es una Investigación Experimental, debido a que pretende evaluar el comportamiento de las propiedades mecánicas de las uniones variando las dimensiones de los elementos de la unión.

3.2. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

3.2.1. Ensayos de Laboratorio

Los ensayos correspondientes se efectuaron en la Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO) y Universidad Nacional de Trujillo (UNT). Los ensayos físicos se desarrollaron en el Laboratorio de Suelos UPAO teniendo como guía principal las Normas NTP. Los ensayos mecánicos se desarrollaron en el Laboratorio de Materiales Compuestos de la Facultad de Ingeniería de Materiales UNT teniendo como guía principal las Normas ASTM e investigaciones antecedentes.

Para el diseño de probetas de ensayo, se utilizó la codificación recomendada en investigaciones antecedentes al cual se basa en dos de las variables que afectan la resistencia de los tirafones según Hansen. Cada probeta fue codificada teniendo en cuenta las siguientes variables:

Diámetro del tirafón (\emptyset)

Relación Espesor Lateral entre Diámetro (EI/D).

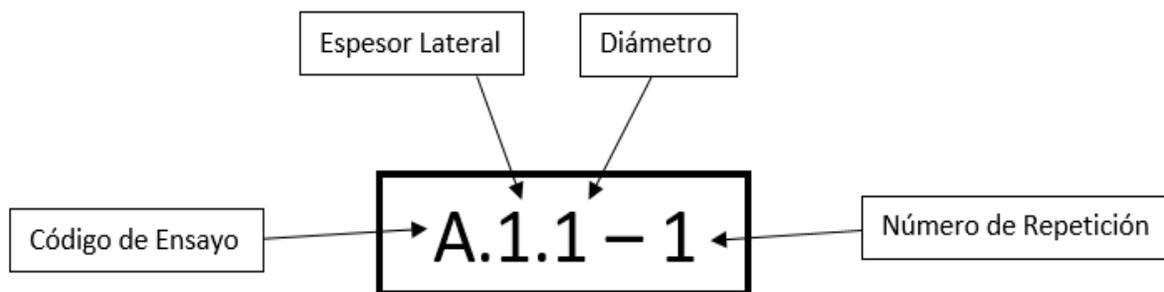


Figura 30. Metodología para la codificación de las muestras. (Elaboración propia)

Tabla 5
Codificación de probetas por el tipo de ensayo

Código	Ensayo
A	Cizallamiento Simple Paralelo
B	Cizallamiento Simple Perpendicular
C	Cizallamiento Doble Paralelo
D	Cizallamiento Doble Perpendicular
E	Extracción Directa

(Elaboración propia)

Tabla 6
Codificación de probetas por el espesor lateral

Espesor Lateral (EI)	Clave
1/2 ‘‘	1
3/4 ‘‘	2
1 ‘‘	3
1 1/2 ‘‘	4

(Elaboración propia)

Tabla 7
Codificación de probetas por el diámetro del tirafón

Diámetro del Tirafón (D)	Clave
1/4 ‘‘	1
5/16 ‘‘	2
3/8 ‘‘	3

(Elaboración propia)

Asimismo, el número de repeticiones por muestra para determinar las propiedades mecánicas de las uniones, fue determinado de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM D1761-12. Siendo para Extracción Directa necesario hacer 10 réplicas como mínimo para cada variable. Y para los ensayos de cizallamiento siendo necesario hacer 5 réplicas como mínimo. (ASTM, 2012) (Ver fotos 22 y 23)

Para el cálculo de la densidad básica de la especie en ensayo se realizaron 40 repeticiones superando el número de repeticiones recomendado según la N.T.P.251.011.2014. (INACAL, 2014) Para el cálculo del contenido de humedad de la especie se realizaron 25 repeticiones siguiendo lo recomendado en la N.T.P.251.010.2014. (INACAL, 2014) (Ver fotos 27 y 28)

Se elaboró tablas de los ensayos que incluyen dimensiones y detalles de los elementos para cada tipo de muestra, presentados a continuación:

Tabla 8

Características de las probetas utilizadas en los ensayos de Cizallamiento

Muestra	Especímenes (pulg)						Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (pulg)	Relación EI/D
	Principal			Lateral			diámetro	longitud		
	espesor	ancho	longitud	espesor	ancho	longitud				
A.1.1	2	2	12	1/2	2	12	1/4	1 1/2	1	2.00
A.1.2	2	2	12	1/2	2	12	5/16	1 1/2	1	1.60
A.1.3	2	2	12	1/2	2	12	3/8	1 1/2	1	1.33
A.2.1	1 1/2	2	12	3/4	2	12	1/4	1 1/2	3/4	3.00
A.2.2	1 1/2	2	12	3/4	2	12	5/16	1 1/2	3/4	2.40
A.2.3	1 1/2	2	12	3/4	2	12	3/8	1 1/2	3/4	2.00
A.3.1	3	2	12	1	2	12	1/4	2 1/2	1 1/2	4.00
A.3.2	3	2	12	1	2	12	5/16	2 1/2	1 1/2	3.20
A.3.3	3	2	12	1	2	12	3/8	2 1/2	1 1/2	2.67
A.4.1	4	2	12	1 1/2	2	12	1/4	3 1/2	2	6.00
A.4.2	4	2	12	1 1/2	2	12	5/16	3 1/2	2	4.80
A.4.3	4	2	12	1 1/2	2	12	3/8	3 1/2	2	4.00
B.1.1	1	3	12	1/2	2	6	1/4	1 1/2	1	2.00
B.1.2	1	3	12	1/2	2	6	5/16	1 1/2	1	1.60
B.1.3	1	3	12	1/2	2	6	3/8	1 1/2	1	1.33
B.2.1	1 1/2	3	12	3/4	2	6	1/4	1 1/2	3/4	3.00
B.2.2	1 1/2	3	12	3/4	2	6	5/16	1 1/2	3/4	2.40
B.2.3	1 1/2	3	12	3/4	2	6	3/8	1 1/2	3/4	2.00
C.1.1	1	2	12	1/2	2	12	1/4	2	0	2.00
D.1.1	1	3	12	1/2	2	6	1/4	2	0	2.00

(Elaboración propia)

Tabla 9

Características de las probetas utilizadas en los ensayos de Extracción Directa

Muestra	Especímenes (pulg)			Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (pulg)
	Principal			diámetro	longitud	
	espesor	ancho	longitud			
E.1.1	2	2	6	1/4	2 1/2	2.5
E.1.2	2	2	6	5/16	2 1/2	2.5
E.1.3	2	2	6	3/8	2 1/2	2.5
E.2.1	2	2	6	1/4	2 1/2	3
E.2.2	2	2	6	5/16	2 1/2	3
E.2.3	2	2	6	3/8	2 1/2	3

(Elaboración propia)

3.2.2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas

3.2.2.1.Extracción Directa

Fecha de ejecución: diciembre 2019.

Materiales

Madera: especímenes de madera de la especie Copaiba, preparadas en la maderera “La Perla del Huallaga” ubicada en la Av. Miraflores cuadra 19 de la Ciudad de Trujillo. Todas las maderas comercializadas eran provenientes del departamento de Ucayali.

Tirafones y arandelas: unidades compradas de la Distribuidora de Pernos “Probinse Industrial S.A.C” ubicada en la Av. América Sur N° 692 de la ciudad de Trujillo. Los tirafones en venta fueron de la marca importada RUMI. (Ver foto 17)

Grasa: obtenida en el Laboratorio de Materiales compuestos – UNT. Este material facilita la trabajabilidad al momento de la instalación de los tirafones en los especímenes.

Equipos

Maquina Universal Tecnotest Modena, capaz de la operación con una velocidad constante de carga y una precisión de $\pm 1\%$. La máquina estaba calibrada y tenía una capacidad de carga de 60 toneladas.

Accesorios, diseñados cada uno con el fin de estabilizar y mantener las probetas a nivel durante la ejecución. El accesorio superior tenía una abertura circular de 3/8” para poder sostener efectivamente la cabeza de los tirafones y sus arandelas. El accesorio inferior tenía una abertura lateral de 6cm x 6cm que permitía la instalación libre del espécimen de madera. (Ver fotos 13 y 14)

Ordenador, con software para la lectura de cargas y deformaciones de los ensayos realizados por la Maquina Universal.

Preparación de las probetas

Los especímenes fueron obtenidos de troncos de madera almacenados aproximadamente por 3 meses. Para la selección de los troncos a ser trabajados, se debe realizar una clasificación visual de los mismos. Cualquier tronco con alguna irregularidad en su apariencia que pueda variar las propiedades mecánicas de la especie según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, no debe ser considerado. En la foto 1, 3 y 4 se observan algunos troncos que se seleccionaron para ser trabajados en el dimensionamiento de especímenes. Los troncos seleccionados fueron sometidos al corte y cepillado para un correcto dimensionamiento (Ver fotos 5, 6, 7 y 8). Los

especímenes listos fueron clasificados en los 6 grupos para realizarles perforaciones guías de 4mm, 5mm y 6mm (Ver foto 10). El trabajo fue realizado en la maderera por contar con personal y equipos especializados en este tipo de trabajos. La instalación de los tirafones en los especímenes fue ejecutada una vez instalados los accesorios en la maquina (Ver foto 18 y 20). Se usó llaves inglesas para cada diámetro de tirafón. Se aplicó lubricante para facilitar la instalación de los tirafones en los especímenes de madera.

Procedimiento

Las probetas fueron codificadas con el objetivo de identificar los tirafones que correspondían a cada una. Cada tirafón debe llevar una arandela en la cabeza para generar una mayor área de contacto con el accesorio superior durante el ensayo.

Para iniciar el ensayo, la probeta debe ser colocada de modo que el eje central del tirafón esté verticalmente alineado con el centro de la cabeza móvil de la Máquina Universal. Inicialmente se aplicará una carga leve, no mayor a 1 kilonewton, para verificar la posición de la probeta.

La carga de tracción se aplicó continuamente durante el ensayo haciendo que la cabeza móvil de la máquina se desplace con una velocidad constante hasta la falla de la probeta. Las deformaciones y cargas máximas fueron registradas por el software del ordenador incorporado a la Máquina Universal Tecnotest Modena, arrojando al final de cada ensayo la gráfica de carga vs deformación respectiva. (Ver foto 19)

Cálculo y expresión de resultados

La carga de diseño para este ensayo se debe determinar con la fórmula 5 recomendada por la National Design Specification (NDS) e investigaciones antecedentes. Los resultados se registrarán como el valor promedio de las 10 repeticiones de cada clase de ensayo.

Comentarios

La distancia del tirafón a los bordes fue mayor que $3/4''$ respetando así las recomendaciones de espaciamientos mínimas.

No se usó la longitud recomendada por la normativa ASTM debido a la intención de evaluar diferentes profundidades de penetración en el espécimen. Además de presentar complicaciones de espacio con el accesorio durante la ejecución del ensayo.

Para determinar el diámetro de las perforaciones guías, de acuerdo al resultado del ensayo de Densidad Básica, primero se clasificó a la madera Copaiba con una densidad de 0.575 gr/cm³ en el grupo B, por tanto según la normativa NCh 1198, le corresponde una perforación guía de 65%

al 85 % del diámetro del vástago del tirafón. (INN - Chile, 2014, pág. 97) En la tabla 10, se detallan los criterios según la normativa citada para la elección de las brocas.

Tabla 10

Determinación de las perforaciones guías

Diámetro del tirafón (D)	Porcentaje (P)	Diámetro del vástago (Dv) (mm)	Perforación zona roscada Pr=P*Dv (mm)	Diámetro de la rosca (Dr) (mm)	Adherencia A=Dr-Pr (mm)
1/4	65%	6.3	4.10	4.50	0.41
1/4	70%	6.3	4.41	4.50	0.09
1/4	75%	6.3	4.73	4.50	-0.23
1/4	80%	6.3	5.04	4.50	-0.54
1/4	85%	6.3	5.36	4.50	-0.86
5/16	65%	7.7	5.01	5.50	0.50
5/16	70%	7.7	5.39	5.50	0.11
5/16	75%	7.7	5.78	5.50	-0.28
5/16	80%	7.7	6.16	5.50	-0.66
5/16	85%	7.7	6.55	5.50	-1.05
3/8	65%	9.4	6.11	6.50	0.39
3/8	70%	9.4	6.58	6.50	-0.08
3/8	75%	9.4	7.05	6.50	-0.55
3/8	80%	9.4	7.52	6.50	-1.02
3/8	85%	9.4	7.99	6.50	-1.49

(Elaboración propia)

Para la investigación se consideró necesario reducir ligeramente la perforación de la zona roscada para obtener una adherencia eficaz. A pesar de lo recomendado en la normativa, según el PADT/REFOR, la madera Copaiba califica en el grupo C, por eso se determinó reducir el diámetro de perforación como se detalla en la tabla 11.

Tabla 11

Diámetros de brocas utilizadas

Diámetro del tirafón (pulg)	Diámetro de la broca (Db) (mm)	Diámetro del vástago (Dv) (mm)	Porcentaje (Db/Dv)	Diámetro de la rosca (mm)	Adherencia (mm)
1/4	4	6.3	63.49%	4.5	0.5
5/16	5	7.7	64.94%	5.5	0.5
3/8	6	9.4	63.83%	6.5	0.5

(Elaboración propia)

De esta manera, las recomendaciones de la normativa NCh 1198 para las perforaciones guías fueron tomadas en la práctica para todos casos, presentándose con estas especificaciones una moderada a alta dificultad en la instalación de los tirafones, en especial con los tirafones de mayor longitud que tenían un vástago pronunciado. (INN - Chile, 2014, pág. 97)

La ubicación de estas perforaciones se hizo de manera muy precisa, con el fin de uniformizar la distribución de esfuerzos en todas las probetas y cumplir con el espaciamiento entre tirafón y borde del espécimen sugerido por la Junta del Tratado de Cartagena. Todas las probetas fueron preparadas e inmediatamente ensayadas, cumpliendo con el tiempo máximo de espera sugerido por la ASTM (1 hora). (ASTM, 2012)

3.2.2.2. Cizallamiento o Corte

Fecha de ejecución: diciembre 2018.

Materiales

Similares al ensayo de Extracción Directa.

Equipos

Maquina Universal Tecnotest Modena, similar al ensayo de Extracción Directa.

Accesorios, diseñados cada uno con el fin de estabilizar y mantener las probetas a nivel durante la ejecución. Se diseñó un accesorio para cada sección de espécimen principal fijándolo a una pletina de 3/8” de espesor con el fin de garantizar una correcta estabilidad. (Ver fotos 15 y 16)

Ordenador, similar al ensayo de Extracción Directa.

Preparación de las probetas

Los especímenes fueron obtenidos de troncos de madera almacenados aproximadamente por 3 meses. Para la selección de los troncos a ser trabajados, se debe realizar una clasificación visual de los mismos. Cualquier tronco con alguna irregularidad en su apariencia que pueda variar las propiedades mecánicas de la especie según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, no debe ser considerado. En la foto 1, 3 y 4 se observan algunos troncos que se seleccionaron para ser trabajados en el dimensionamiento de especímenes. Los troncos seleccionados fueron sometidos al corte y cepillado para un correcto dimensionamiento (Ver fotos 5, 6, 7 y 8). Los especímenes listos fueron clasificados en los 20 grupos para realizarles perforaciones guías de 4mm, 5mm y 6mm tanto a las piezas principales como laterales (Ver foto 9). El trabajo fue realizado en la maderera por contar con personal y equipos especializados en este tipo de trabajos. La instalación de los tirafones en los especímenes fue ejecutada el mismo día de ensayo (Ver foto

21 y 25). Se usó llaves inglesas para cada diámetro de tirafón. Para tirafones de mayor longitud, es necesario aplicar lubricantes para facilitar su instalación en los especímenes de madera. (Ver foto 24)

Procedimiento

Las probetas fueron codificadas con el objetivo de identificar los tirafones que correspondían a cada una. Cada tirafón debe llevar una arandela en la cabeza para evitar una posible penetración o esfuerzo de aplastamiento de la cabeza del tirafón en el espécimen lateral.

Para iniciar el ensayo, la probeta debe ser colocada de modo que el eje central del espécimen lateral esté verticalmente alineado con el centro de la cabeza móvil de la Máquina Universal. Inicialmente se aplicará una carga leve, no mayor a 1 kilonewton, para verificar la posición de la probeta.

La carga de compresión se aplicó continuamente durante el ensayo haciendo que la cabeza móvil de la máquina se desplace con una velocidad constante hasta la falla de la probeta. Las deformaciones y cargas máximas fueron registradas por el software del ordenador incorporado a la Máquina Universal Tecnotest Modena, arrojando al final de cada ensayo la gráfica de carga vs deformación respectiva. (Ver foto 26)

Cálculo y expresión de resultados

La carga de diseño, se debe calcular con la fórmula 3 o fórmula 4 recomendada por la National Design Specification (NDS) e investigaciones antecedentes. Los resultados se registrarán como el valor promedio de las 5 repeticiones de cada clase de ensayo.

Comentarios

Las probetas estuvieron formadas por dos piezas de madera de la especie Copaiba, unidos por un tirafón el cual pasaba a través de la pieza lateral (grapa) y entrando a la pieza principal (prisma).

Para los ensayos de cizallamiento simple paralelo y perpendicular, la pieza lateral o grapa estaba alineada aproximadamente al centro de la cabeza móvil de la máquina universal. De tal manera la línea de fuerza pasaba aproximadamente por el tirafón en el punto de unión entre la pieza lateral (grapa) y la pieza principal (prisma).

Solo para probetas con tirafones de longitud mayor a 1 1/2" con un vástago pronunciado, se realizó una perforación del mismo diámetro y longitud que el vástago en la pieza lateral según la recomendación de la norma NCh 1198. (INN - Chile, 2014, pág. 97)

Las dimensiones de las probetas ensayadas y la ubicación de sus tirafones, se determinaron según la normativa ASTM D1761, las especificaciones del PADT/REFORT y principalmente de investigaciones antecedentes de la Universidad Agraria La Molina y la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.2.3. Ensayos para determinar las propiedades físicas

3.2.3.1. Contenido de Humedad

Fecha de ejecución: diciembre de 2018.

Materiales

Madera: similar a ensayos anteriores.

Equipos

Balanza electrónica, con precisión 0.1 g.

Horno eléctrico de 100°.

Preparación de las probetas

Las probetas fueron obtenidas de troncos de madera almacenados aproximadamente por 3 meses. Para la selección de los troncos a ser trabajados, se debe realizar una clasificación visual de los mismos. Cualquier tronco con alguna irregularidad en su apariencia que pueda variar las propiedades mecánicas de la especie según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, no debe ser considerado. En la foto 1, 3 y 4 se observan algunos troncos que se seleccionaron para ser trabajados en el dimensionamiento de especímenes. Las dimensiones de las probetas deben ser de 4'' de longitud y 1''x1'' de sección transversal. Los troncos seleccionados fueron sometidos al corte y cepillado para un correcto dimensionamiento. El trabajo fue realizado en la maderera por contar con personal y equipos especializados en este tipo de trabajos.

Procedimiento

En el laboratorio, las probetas deben ser codificadas para luego determinar el peso inicial o a temperatura ambiente de cada una con una precisión de 0,1 g (Ver foto 30). Luego deben ser colocadas en el horno eléctrico por aproximadamente 24 horas a una temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, provocando un calentamiento gradual hasta alcanzar dicha temperatura. Cumplido el tiempo, retirar las probetas usando guantes de protección (Ver foto 31). Registrar los pesos nuevos de cada probeta y volver a colocarlas nuevamente en el horno eléctrico repitiendo el procedimiento hasta obtener una masa constante. El ensayo puede considerarse terminado cuando la diferencia entre las masas sucesivas no excede 0,1 g.

Cálculo y expresión de resultados

Con las masas obtenidas, calcular el contenido de humedad en porcentaje de cada probeta utilizando la fórmula 1. El resultado final se registrará como la media aritmética de los 25 resultados obtenidos.

3.2.3.2.Densidad Básica

Fecha de ejecución: enero de 2019.

Materiales

Madera: similar a ensayos anteriores.

Equipo

Balanza electrónica, con precisión 0.1 g.

Horno eléctrico de 100°.

Probeta graduada, con precisión 2 ml (cm³).

Preparación de las probetas

Las probetas fueron obtenidas de troncos de madera almacenados aproximadamente por 3 meses. Para la selección de los troncos a ser trabajados, se debe realizar una clasificación visual de los mismos. Cualquier tronco con alguna irregularidad en su apariencia que pueda variar las propiedades mecánicas de la especie según el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, no debe ser considerado. En la foto 1, 3 y 4 se observan algunos troncos que se seleccionaron para ser trabajados en el dimensionamiento de especímenes. Las dimensiones de la probeta deben ser de 4'' de longitud y 1''x1'' de sección transversal. Los troncos seleccionados fueron sometidos al corte y cepillado para un correcto dimensionamiento. El trabajo fue realizado en la maderera por contar con personal y equipos especializados en este tipo de trabajos.

Procedimiento

En el laboratorio, las probetas fueron codificadas siempre separando los dos grupos para luego determinar el peso inicial o a temperatura ambiente de cada una con una precisión de 0,1 g. Luego deben ser saturadas en agua por un periodo de 20 a 24 horas (Ver foto 32). Cumplido el tiempo, retirar las probetas y registrar los pesos nuevos de cada probeta. Sumergirlas nuevamente en agua repitiendo el procedimiento hasta obtener una masa constante que represente el peso de las probetas en estado saturado. El ensayo puede considerarse terminado cuando la diferencia entre las masas sucesivas no excede 0,1 g. (Ver foto 33)

Calcular el volumen saturado de cada probeta empleando el método de medición indirecto por inmersión en agua (Ver fotos 34 y 35). Después colocar las 40 muestras en el horno eléctrico por un periodo mayor o igual a 24 horas a una temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, provocando un calentamiento gradual hasta alcanzar dicha temperatura (Ver foto 36). Cumplido el tiempo, registrar los pesos nuevos de cada probeta y volver a colocarlas nuevamente en el horno eléctrico repitiendo el procedimiento hasta obtener una masa constante que represente el peso de las probetas en estado seco. (Ver foto 37)

Cálculo y expresión de resultados

Con los pesos secos y volúmenes saturados obtenidos, calcular la densidad básica en gr/cm^3 de cada probeta utilizando la fórmula 2. El resultado final se registrará como la media aritmética de los 40 resultados obtenidos.

Comentarios

La cantidad de probetas fueron separadas en dos grupos de 20 cada uno debido a un severo cambio de color observado en el mismo tronco (Ver foto 2), asociándolo a un posible cambio de densidades.

3.3. Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

3.3.1. Técnicas de procesamiento

Microsoft Excel: se usará el software de hojas de cálculo, para almacenar, clasificar y graficar los resultados de cada ensayo mediante: tablas, gráficas y fórmulas.

Coefficiente de Variación: se calculará el coeficiente de variación para cada serie de ensayos.

Media Aritmética: se calculará la media aritmética para cada serie de ensayos.

Intervalo de Confianza: se calculará el intervalo de confianza para cada serie de ensayo para hacer constancia de la uniformidad de los resultados.

3.3.2. Análisis de la información

Uso graficas de dispersión, barras y cuadros de ensayos para relacionar el comportamiento de las distintas variables con el fin de analizar y describir las propiedades mecánicas de las uniones estructurales. Preparación de tablas de diseño con tirafones; se presentarán cuadros con las cargas admisibles por tirafón según tipo de cizalle (simple o doble) y según dirección de la carga respecto a la fibra (paralelo o perpendicular).

Análisis comparativo entre estudios anteriores y el obtenido, combinando relaciones entre el medio de unión o la especie estudiada. Uso de diagramas en barra y diagramas de dispersión.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Cuadros de resultados

4.1.1. Resultados de los ensayos físicos

Se realizó la tabla 12 donde muestra el resultado de los ensayos de Densidad Básica y Contenido de Humedad de los especímenes estudiados. Dichos resultados fueron calculados a través del promedio de todas las repeticiones realizadas para cada ensayo. Repeticiones y valores pueden ser consultados en las tablas 42 y 43.

Tabla 12

Resultados de los ensayos físicos

Espece	Densidad básica (gr/cm ³)	Contenido de humedad (%)
<i>Copaifera Officinalis</i>	0.575	18.04

(Elaboración propia)

4.1.2. Resultados de los ensayos mecánicos

4.1.2.1. Extracción Directa

En tabla 13 se resumen los resultados del ensayo. Los valores obtenidos pueden ser consultados a detalle en las tablas 44 – 49.

Tabla 13

Resultados de Extracción Directa

Muestra	Diámetro (pulg)	Profundidad Penetración (mm)	Carga Máxima (kg)	Carga por longitud penetración (kg/cm)	Carga Promedio (kg/cm)
E.1.1	1/4	25.00	430.01	172.00	182.8
E.2.1	1/4	30.00	581.03	193.68	
E.1.2	5/16	25.00	519.33	207.73	218.6
E.2.2	5/16	30.00	688.50	229.50	
E.1.3	3/8	25.00	661.79	264.71	264.6
E.2.3	3/8	30.00	793.43	264.48	

(Elaboración propia)

Tabla 14
Datos estadísticos de los resultados de Extracción Directa

Muestra	Datos Estadísticos		
	Media Aritmética	Desviación Estándar	CV (%)
E.1.1	430.01	44.29	10.30
E.2.1	581.03	66.32	11.41
E.1.2	519.33	73.75	14.20
E.2.2	688.50	122.09	17.73
E.1.3	661.79	56.49	8.54
E.2.3	793.43	76.78	9.68

(Elaboración propia)

4.1.2.2. Cizallamiento simple paralelo al grano

Los valores de la carga máxima y carga al límite de proporcionalidad para cada muestra del presente ensayo, se resumen en la tabla 15 relacionando cada una con las variables.

De la misma manera en la tabla 16, se resumen las deformaciones registradas en el límite de proporcionalidad como también la deformación máxima.

Tabla 15
Resultados de Cizallamiento Simple Paralelo - Cargas

Muestra	Diámetro (pulg)	EL/D	Profundidad Penetración (pulg)	Carga Máxima (kg)	Carga al Límite Proporcional (kg)
A.1.1	1/4	2.00	1	359.63	223.53
A.1.2	5/16	1.60	1	416.04	268.11
A.1.3	3/8	1.33	1	580.40	364.31
A.2.1	1/4	3.00	3/4	345.03	205.08
A.2.2	5/16	2.40	3/4	442.42	272.59
A.2.3	3/8	2.00	3/4	535.00	327.55
A.3.1	1/4	4.00	1 1/2	643.18	281.92
A.3.2	5/16	3.20	1 1/2	742.89	342.14
A.3.3	3/8	2.67	1 1/2	930.01	492.27
A.4.1	1/4	6.00	2	804.23	302.12
A.4.2	5/16	4.80	2	900.56	315.53
A.4.3	3/8	4.00	2	1099.86	505.75

(Elaboración propia)

Tabla 16
Resultados de Cizallamiento Simple Paralelo - Deformaciones

Muestra	Diámetro (pulg)	EL/D	Profundidad Penetración (pulg)	Deformación Máxima (mm)	Deformación al Límite Proporcional (mm)
A.1.1	1/4	2.00	1	12.70	1.06
A.1.2	5/16	1.60	1	12.86	1.22
A.1.3	3/8	1.33	1	10.10	1.41
A.2.1	1/4	3.00	3/4	9.92	0.94
A.2.2	5/16	2.40	3/4	9.00	1.08
A.2.3	3/8	2.00	3/4	10.66	1.36
A.3.1	1/4	4.00	1 1/2	15.80	1.38
A.3.2	5/16	3.20	1 1/2	13.90	1.59
A.3.3	3/8	2.67	1 1/2	18.32	1.96
A.4.1	1/4	6.00	2	15.94	1.41
A.4.2	5/16	4.80	2	14.54	1.54
A.4.3	3/8	4.00	2	18.76	2.12

(Elaboración propia)

4.1.2.3. Cizallamiento simple perpendicular al grano

Los valores de la carga máxima y carga al límite de proporcionalidad para cada muestra del presente ensayo, se resumen en la tabla 17 relacionando cada una con las variables.

De la misma manera en la tabla 18, se resumen las deformaciones registradas en el límite de proporcionalidad como también la deformación máxima.

Tabla 17
Resultados de Cizallamiento Simple Perpendicular - Cargas

Muestra	Diámetro (pulg)	EL/D	Profundidad Penetración (pulg)	Carga Máxima (kg)	Carga al Límite Proporcional (kg)
B.1.1	1/4	2.00	1	522.85	229.46
B.1.2	5/16	1.60	1	469.60	251.45
B.1.3	3/8	1.33	1	623.04	308.44
B.2.1	1/4	3.00	3/4	314.02	182.14
B.2.2	5/16	2.40	3/4	317.27	216.81
B.2.3	3/8	2.00	3/4	554.21	391.35

(Elaboración propia)

Tabla 18
Resultados de Cizallamiento Simple Perpendicular - Deformaciones

Muestra	Diámetro (pulg)	EL/D	Profundidad Penetración (pulg)	Deformación Máxima (mm)	Deformación al Límite Proporcional (mm)
B.1.1	1/4	2.00	1	15.80	1.27
B.1.2	5/16	1.60	1	13.64	1.73
B.1.3	3/8	1.33	1	15.46	1.91
B.2.1	1/4	3.00	3/4	10.55	0.90
B.2.2	5/16	2.40	3/4	7.98	1.12
B.2.3	3/8	2.00	3/4	10.73	2.12

(Elaboración propia)

4.1.2.4. Cizallamiento doble paralelo al grano

La tabla 19 resume los resultados del presente ensayo para una muestra.

Tabla 19
Resultados de Cizallamiento Doble Paralelo

Muestra	Longitud Tirafrón (pulg)	Espesor Lateral (pulg)	Diámetro Tirafrón (pulg)	EL/D	Cargas (kg)		Deformaciones (mm)	
					Máxima	Límite Proporcional	Máxima	Límite Proporcional

(Elaboración propia)

4.1.2.5. Cizallamiento doble perpendicular al grano

La tabla 20 resume los resultados del presente ensayo para una muestra.

Tabla 20
Resultados de Cizallamiento Doble Perpendicular

Muestra	Longitud Tirafrón (pulg)	Espesor Lateral (pulg)	Diámetro Tirafrón (pulg)	EL/D	Cargas (kg)		Deformaciones (mm)	
					Máxima	Límite Proporcional	Máxima	Límite Proporcional

(Elaboración propia)

4.1.3. Valores de diseño

Los valores de diseño presentados a continuación fueron calculados con la fórmula 4, usada por las investigaciones antecedentes con el fin de realizar una correcta comparación. Todos los resultados se redondearon al número entero menor.

Tabla 21

Valores de diseño - Cizallamiento Simple Paralelo

Especimen		Tirafón			
		Diámetro	1/4"	5/16"	3/8"
Principal (pulg)	Lateral (pulg)	Longitud (pulg)	Carga Diseño (kg)	Carga Diseño (kg)	Carga Diseño (kg)
2	1/2	1 1/2	107.00	128.00	174.00
1 1/2	3/4	1 1/2	98.00	130.00	157.00
3	1	2 1/2	135.00	164.00	236.00
4	1 1/2	3 1/2	145.00	151.00	242.00

(Elaboración propia)

Tabla 22

Valores de diseño - Cizallamiento Simple Perpendicular

Especimen		Tirafón			
		Diámetro	1/4"	5/16"	3/8"
Principal (pulg)	Lateral (pulg)	Longitud (pulg)	Carga Diseño (kg)	Carga Diseño (kg)	Carga Diseño (kg)
2	1/2	1 1/2	110.00	120.00	148.00
1 1/2	3/4	1 1/2	87.00	104.00	187.00

(Elaboración propia)

Tabla 23

Valores de diseño - Cizallamiento Doble Paralelo

Especimen		Tirafón	
		Diámetro	1/4"
Principal (pulg)	Lateral (pulg)	Longitud (pulg)	Carga Diseño (kg)
1	1/2	2	155.000

(Elaboración propia)

Tabla 24
Valores de diseño - Cizallamiento Doble Perpendicular

Especimen		Tirafón	
		Diámetro	1/4"
Principal (pulg)	Lateral (pulg)	Longitud (pulg)	Carga Diseño (kg)
1	1/2	2	197.000

(Elaboración propia)

Tabla 25
Modos de Falla de las uniones

Muestra	El (espesor pieza lateral)	D (diámetro)	El/d	Elemento que falla	Modo de falla	Aplastamiento
A.1.1	1/2	1/4	2.00	MADERA	III-m	Bajo
A.1.2	1/2	5/16	1.60	MADERA	III-m	Moderado
A.1.3	1/2	3/8	1.33	MADERA	II	Severo
A.2.1	3/4	1/4	3.00	MADERA	III-m	Moderado
A.2.2	3/4	5/16	2.40	MADERA	III-m	Moderado
A.2.3	3/4	3/8	2.00	MADERA	II	Severo
A.3.1	1	1/4	4.00	AMBOS	IV	Severo
A.3.2	1	5/16	3.20	TIRAFON	IV	Severo
A.3.3	1	3/8	2.67	TIRAFON	II	Enorme
A.4.1	1 1/2	1/4	6.00	AMBOS	IV	Moderado
A.4.2	1 1/2	5/16	4.80	TIRAFON	IV	Moderado
A.4.3	1 1/2	3/8	4.00	TIRAFON	II	Severo
B.1.1	1/2	1/4	2.00	MADERA	III-m	Moderado
B.1.2	1/2	5/16	1.60	MADERA	III-m	Severo
B.1.3	1/2	3/8	1.33	MADERA	II	Severo
B.2.1	3/4	1/4	3.00	MADERA	III-m	Bajo
B.2.2	3/4	5/16	2.40	MADERA	III-m	Bajo
B.2.3	3/4	3/8	2.00	MADERA	II	Moderado
C.1.1	1/2	1/4	2.00	MADERA	III-s	Moderado
D.1.1	1/2	1/4	2.00	MADERA	III-s	Moderado

(Elaboración propia)

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1.Resultados de los ensayos físicos

El valor obtenido para la densidad básica, difiere en 5.7% al valor hallado por la Junta del Acuerdo de Cartagena, cuyo valor es de 0.61 g/cm³ para la especie de madera Copaiba.

De acuerdo a este valor de densidad la madera Copaiba se debería clasificar estructuralmente en el grupo B. No obstante, el mismo autor la clasifica como madera del Grupo C por sus propiedades mecánicas propias como elemento individual. Es oportuno mencionar que el presente trabajo investiga las propiedades mecánicas de las uniones (Madera-Tirafón) mas no de la madera como elemento individual.

Respecto al contenido de humedad según la bibliografía consultada, el valor obtenido indica que los especímenes en estudio están en estado seco por estar debajo de 30% (Punto de saturación).

Para valores de diseño no será necesario aplicar un factor de reducción por contenido de humedad a pesar de no contener el 15% recomendado para la construcción debido a considerar una tolerancia de $\pm 3\%$ sugerido por la NCh 1198.

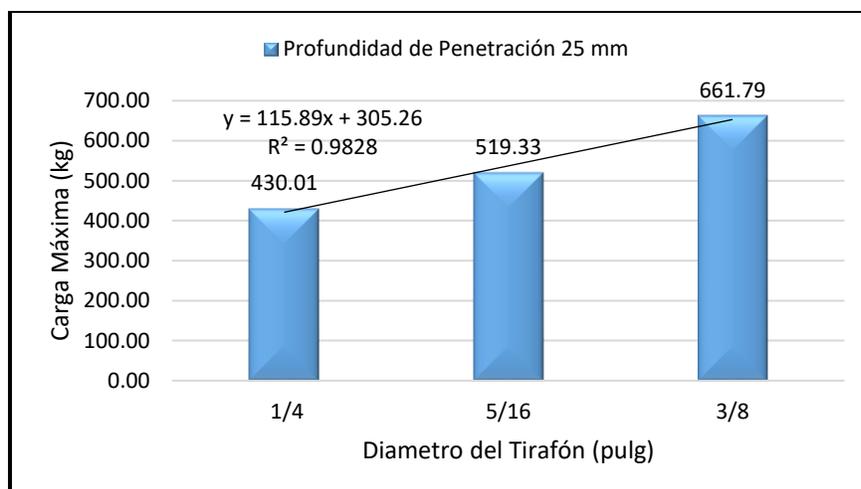
5.2.Resultados de los ensayos mecánicos

5.2.1. Extracción Directa

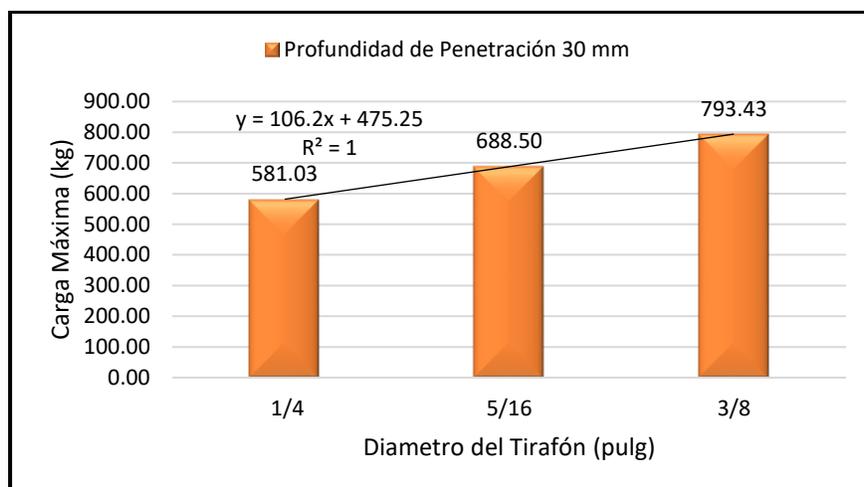
En el presente ensayo, todas las muestras fallaron por rotura de las fibras de la madera Copaiba, presentando una falla del tipo dúctil debido a la gran deformación plástica observada previo a la fractura validando lo enunciado en la hipótesis. De las gráficas, la profundidad de penetración incide en la resistencia en mayor grado que el diámetro, debido a que con 5 mm más de profundidad se incrementó la resistencia en 29.20%.

Para cada diámetro de tirafón y cada profundidad de penetración se obtuvo el máximo valor de carga resistida. Con estos valores experimentales se ha podido proponer funciones que relacionan las variables mencionadas. Para el caso de una penetración de 25 mm, es posible calcular el valor máximo de la carga resistida asignándole un diámetro en la función $y(x) = 115.89x + 305.26$, expresada en la gráfica 6.

De la misma manera, para una penetración de 30 mm, la carga máxima resistida está en función del diámetro en $y(x) = 106.2x + 475.25$, expresada en la gráfica 7.



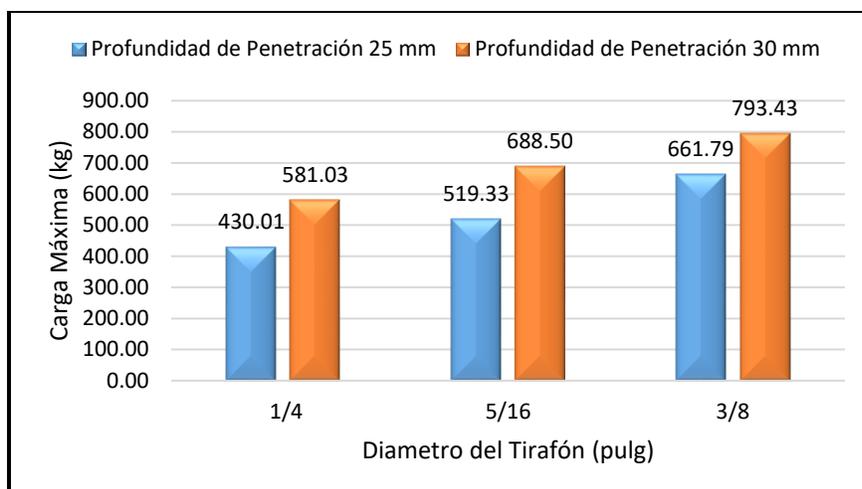
Gráfica 6. Relación entre el Diámetro vs Carga máxima para una profundidad de penetración de 25mm



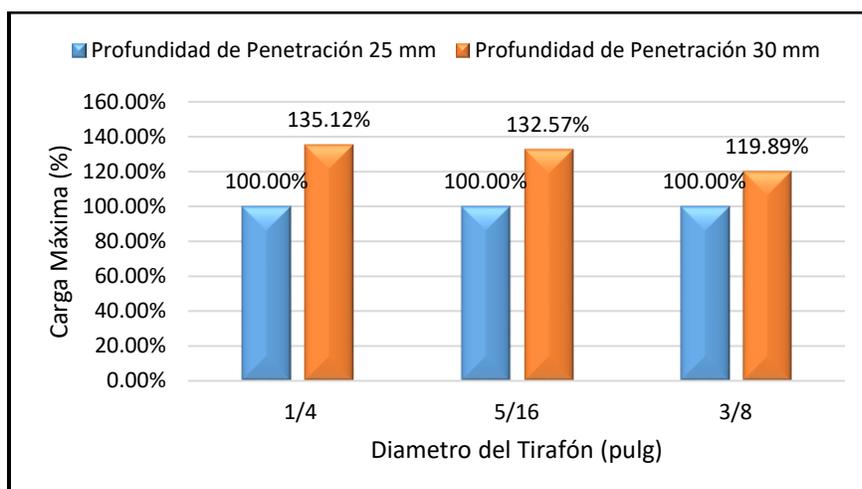
Gráfica 7. Relación entre el Diámetro vs Carga máxima para una profundidad de penetración de 30mm

En la gráfica 8, se observa la variación de la carga máxima resistida por las probetas en función a las dos penetraciones ensayadas para cada diámetro de tirafón.

Con la gráfica 9 podemos interpretar que realizando una penetración de 30 mm las probetas pueden resistir cargas de un 29.20% promedio mayor que con una penetración de 25 mm.



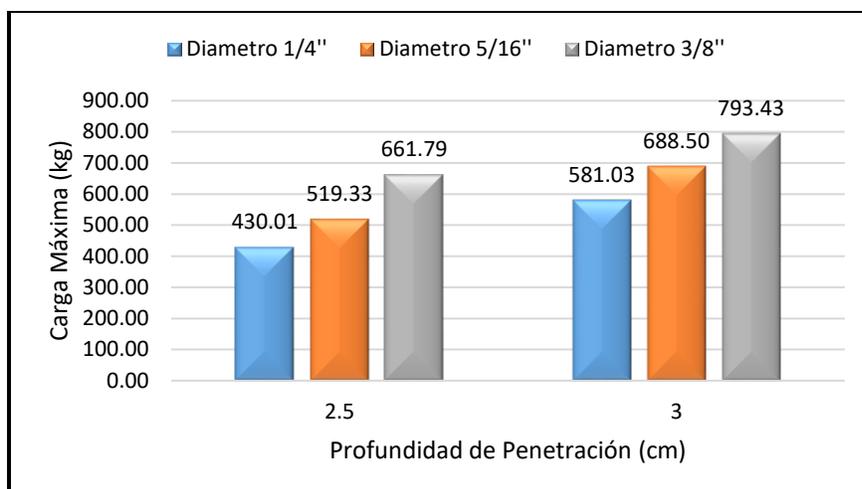
Gráfica 8. *Comparativo entre el Diámetro vs Carga máxima para diferentes profundidades de penetración*



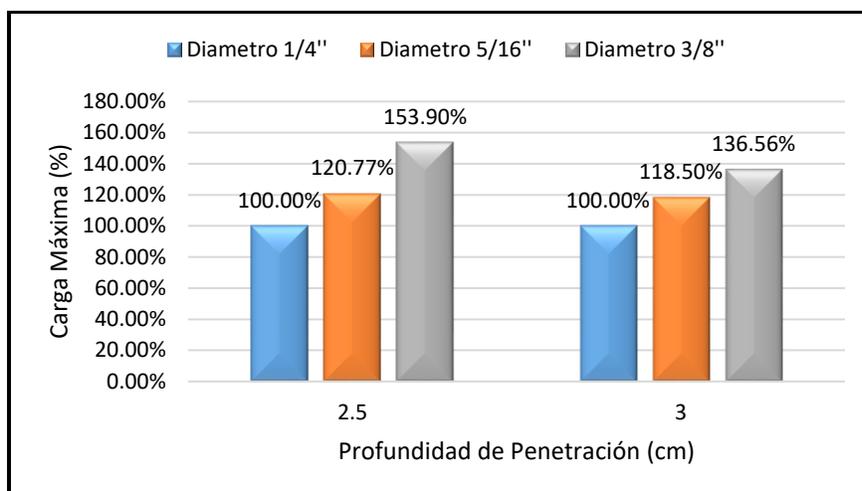
Gráfica 9. *Comparativo porcentual*

De la gráfica 10, podemos observar la diferencia de la carga máxima resistida por las probetas en función al diámetro de tirafón para cada profundidad de penetración.

Con la gráfica 11 podemos observar la variación porcentual al incrementar el diámetro con una penetración de 25 mm es de 20.77 % para un diámetro de 5/16'' y 53.90 % para un diámetro de 3/8''. Asimismo, para una penetración de 30 mm, la variación porcentual es de 18.50 % para un diámetro de 5/16'' y 36.56 % para un diámetro de 3/8''.



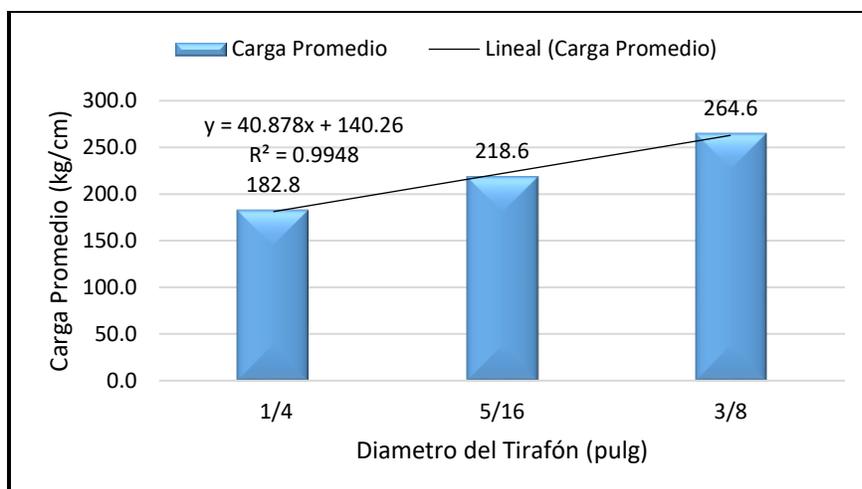
Gráfica 10. Comparativo entre Profundidad de penetración vs Carga máxima para varios diámetros



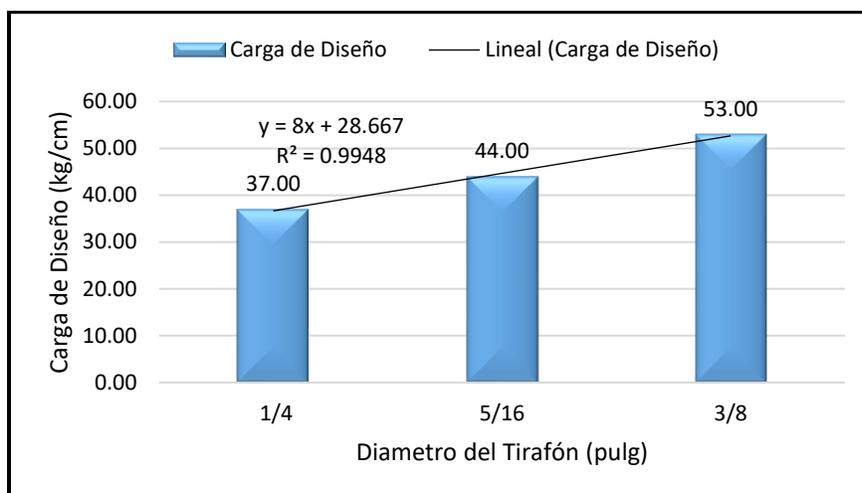
Gráfica 11. Comparativo porcentual

Con la gráfica 12 se ha deducido la función, $y(x) = 40.88x + 140.26$, en donde la carga promedio (en kilogramos por centímetro de penetración) está en función del diámetro (x).

Con la gráfica 13 se ha podido obtener la función, $y = 8.00x + 28.67$, en donde la carga promedio con unidades de kilogramo por centímetro está en función del diámetro.



Gráfica 12. Relación entre el Diámetro vs Carga promedio



Gráfica 13. Relación entre el Diámetro vs Carga de diseño

5.2.2. Cizallamiento simple paralelo al grano

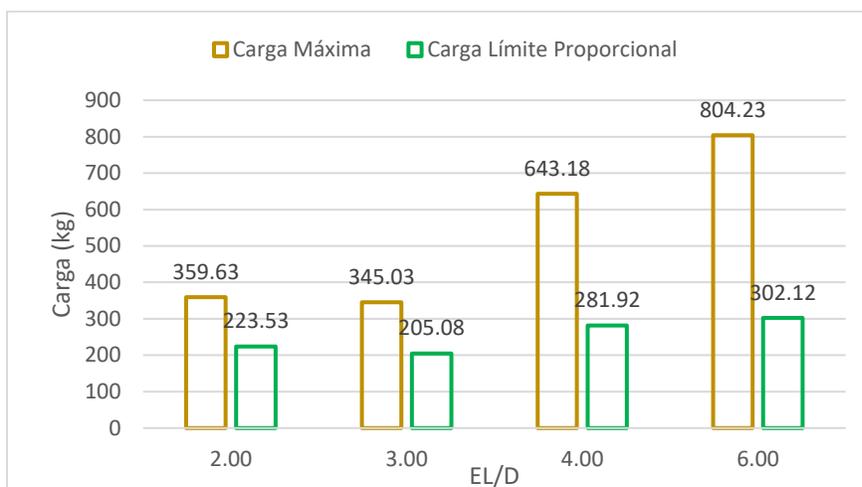
Respecto a los dos tipos cargas (máxima y al límite proporcional), podemos establecer relaciones entre los valores de EL/D para cada diámetro del tirafón.

La gráfica 14 contiene los resultados relacionados a las muestras con un tirafón de $\varnothing=1/4''$ para cada valor EL/D.

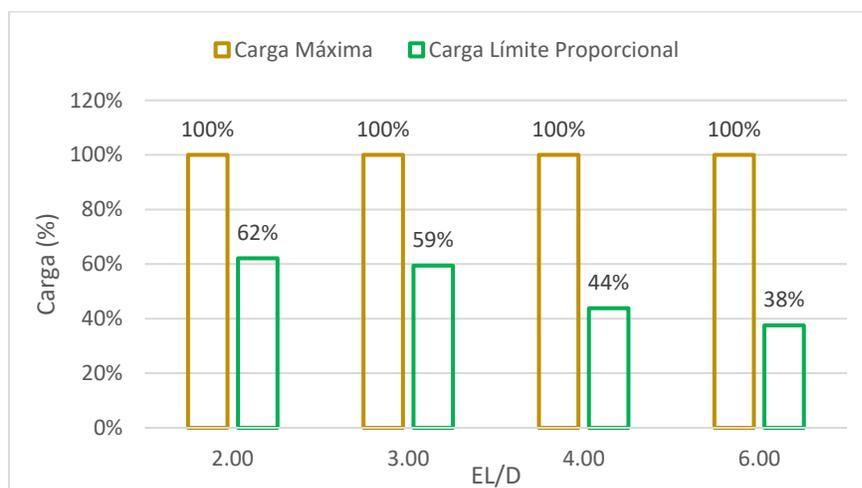
Según estos resultados, el comportamiento mecánico relacionado a la capacidad de carga para las muestras con $\varnothing=1/4''$ aumenta en paralelo al valor EL/D. Sin embargo, solo para las muestras con una relación EL/D=3 este comportamiento no se aplica. Podemos asociar lo anterior a la incidencia de la penetración del tirafón puesto que estas muestras tienen una P=3/4'' calificada como la menor de todas.

Además, se observa que al aumentar el valor EL/D también aumenta la fase plástica de las muestras.

Con la gráfica 15, es posible establecer que para una unión paralela simple con un tirafón de $\varnothing=1/4''$, la carga al límite proporcional representa en promedio el 50.8% de la carga máxima.



Gráfica 14. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=1/4''$



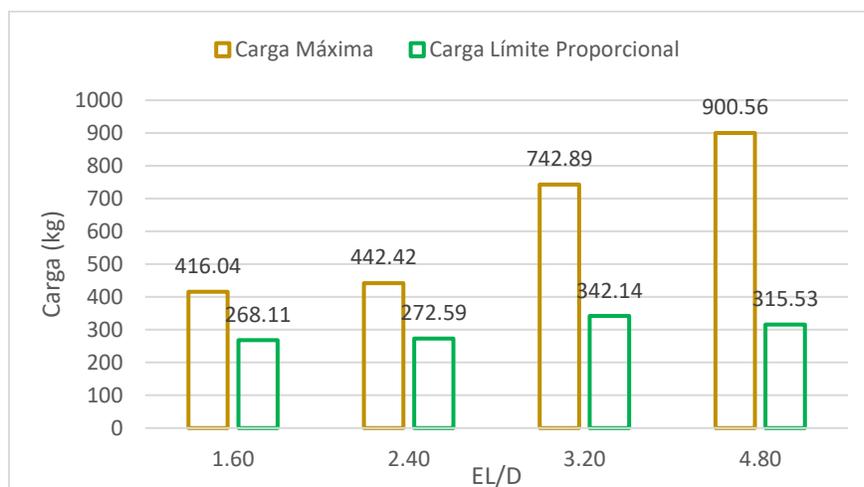
Gráfica 15. Comparativo porcentual

La gráfica 16 contiene los resultados relacionados a las muestras con un tirafón de $\varnothing=5/16''$ para cada valor EL/D.

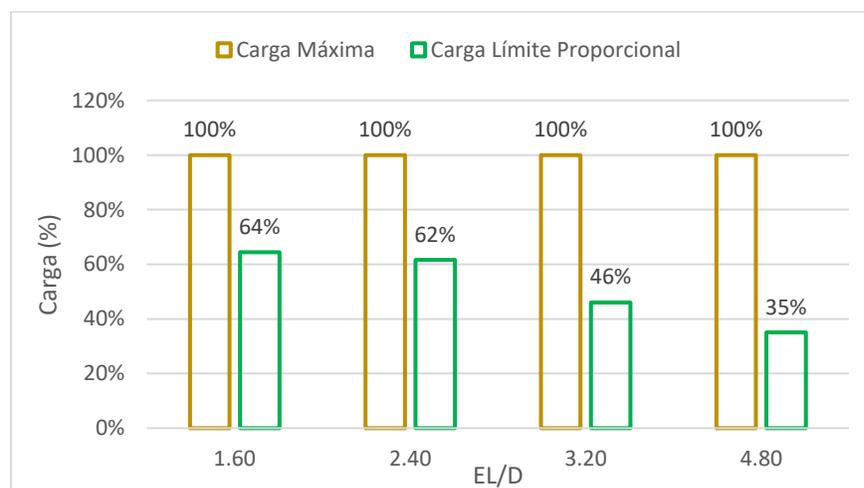
Según estos resultados, a diferencia del anterior solo la carga máxima tiende a aumentar con el valor EL/D, no siendo así para la carga al límite proporcional la cual tiende a mantenerse.

Además, se observa un comportamiento similar puesto que aumentando el valor EL/D también aumenta la fase plástica de las muestras.

Con la gráfica 17, es posible establecer que para una unión paralela simple con un tirafón de $\varnothing=5/16''$, la carga al límite proporcional representa en promedio el 51.8% de la carga máxima.



Gráfica 16. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=5/16''$



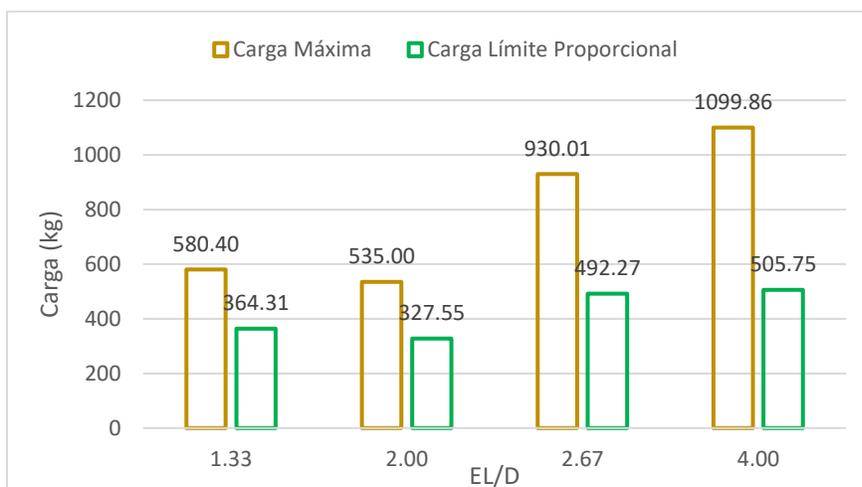
Gráfica 17. Comparativo porcentual

La gráfica 18 contiene los resultados relacionados a las muestras con un tirafón de $\varnothing=3/8''$ para cada valor EL/D.

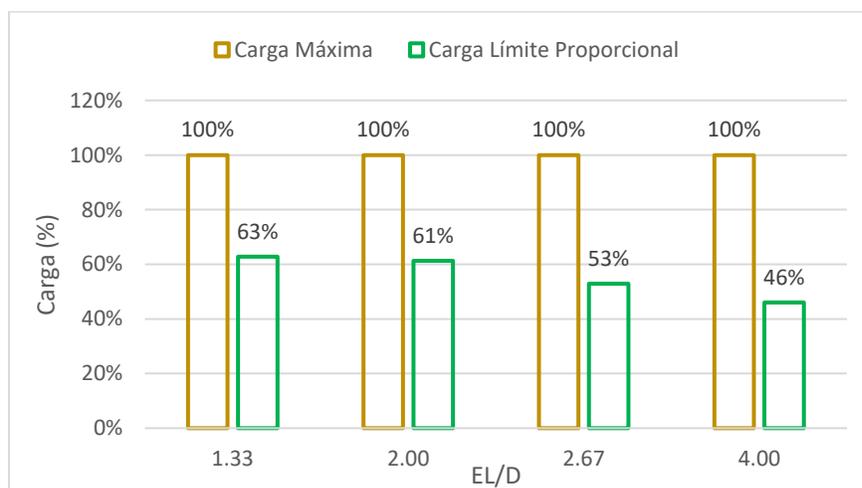
Según estos resultados, la capacidad de carga de la muestra tiende a aumentar en paralelo con el valor EL/D. Sin embargo, solo para las muestras con una relación EL/D=2 este comportamiento no se aplica. Podemos asociar lo anterior a la incidencia de la penetración del tirafón puesto que estas muestras tienen una $P=3/4''$ calificada como la menor de todas.

Además, se observa que aumentando el valor EL/D aumenta en paralelo la fase plástica de las muestras.

Con la gráfica 19, es posible establecer que para una unión paralela simple con un tirafón de $\varnothing=3/8''$, la carga al límite proporcional representa en promedio el 55.8% de la carga máxima.



Gráfica 18. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=3/8''$



Gráfica 19. Comparativo porcentual

Respecto a los dos tipos de deformación (máxima y al límite proporcional), podemos establecer relaciones entre los valores de EL/D para cada diámetro del tirafón.

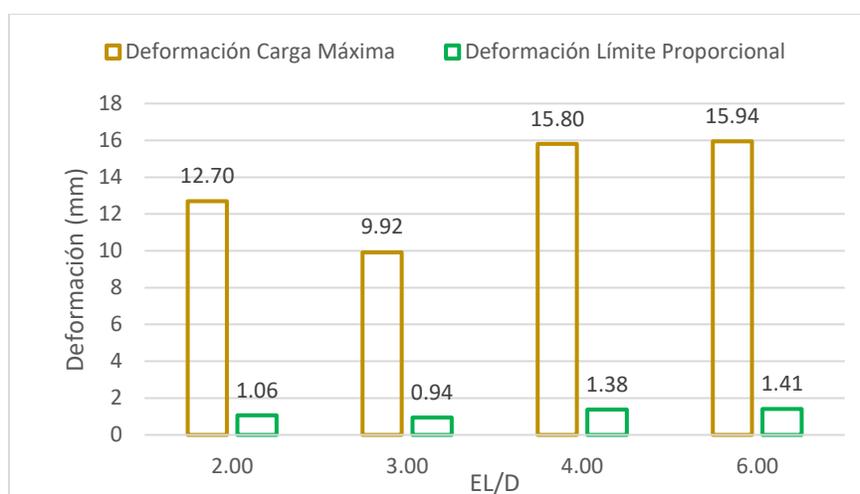
La gráfica 20 contiene los resultados relacionados a las muestras con un tirafón de $\varnothing=1/4''$ para cada valor EL/D.

Según estos resultados, el comportamiento mecánico relacionado a la deformación para algunas muestras con $\varnothing=1/4''$ se incrementa moderadamente en paralelo al valor EL/D. Sólo para las

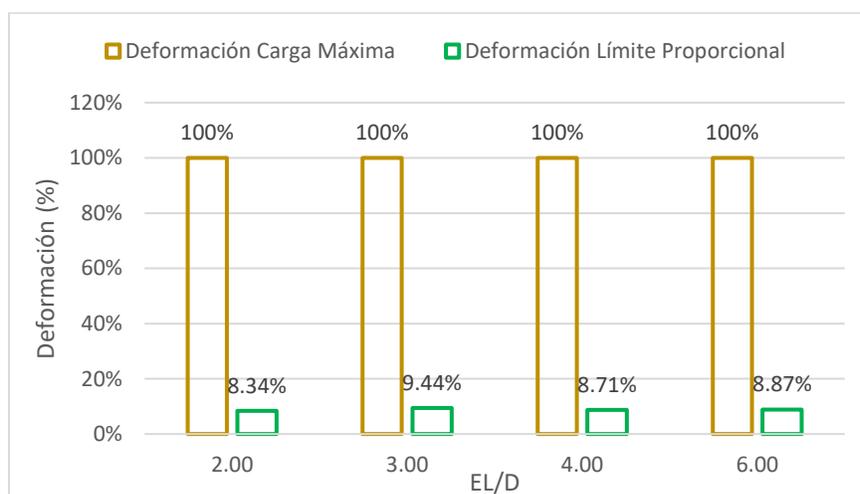
muestras con una relación $EL/D=3$ y $EL/D=6$ este comportamiento no se aplica. Podemos asociar la primera ($EL/D=3$) a la incidencia de la penetración del tirafón puesto que estas muestras tienen una $P=3/4''$ calificada como la menor de todas y la segunda ($EL/D=6$) a las propiedades físicas de la madera Copaiba por no admitir mayores deformaciones significativas a partir de $EL/D=4$ ($EL=1\ 1/2''$).

Con la gráfica 21, es posible establecer que para una unión paralela simple con un tirafón de $\varnothing=1/4''$, la deformación al límite proporcional representa en promedio el 8.8% de la deformación por carga máxima.

Además, no se observa un aumento significativo en el porcentaje de deformación al límite proporcional conforme aumenta el valor EL/D .



Gráfica 20. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y Deformación al límite proporcional para $\varnothing=1/4''$



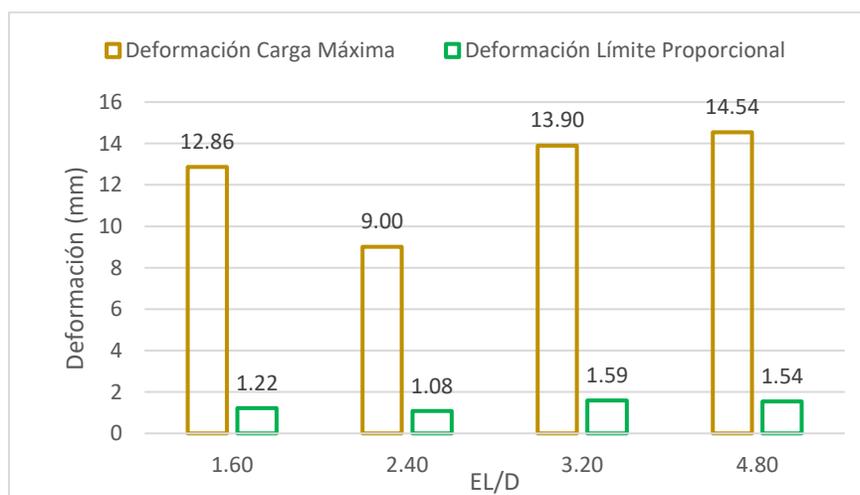
Gráfica 21. Comparativo porcentual

La gráfica 22 contiene los resultados relacionados a las muestras con un tirafón de $\varnothing=5/16''$ para cada valor EL/D.

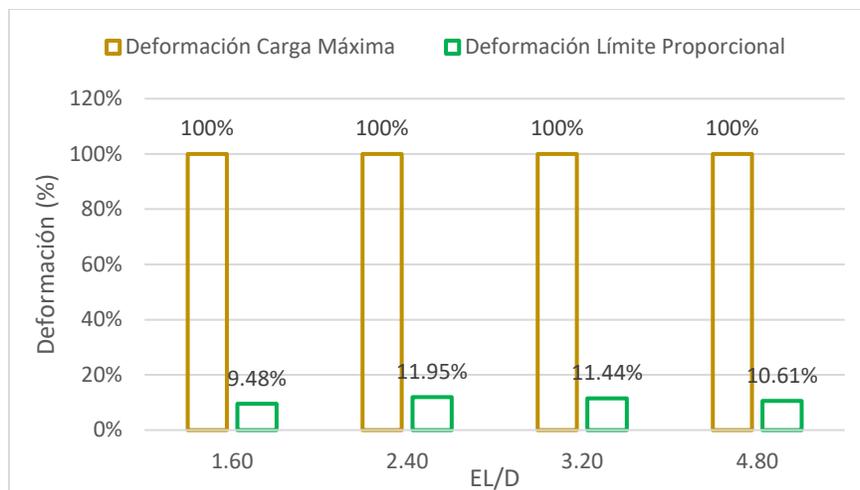
Según estos resultados, como el caso anterior el comportamiento mecánico relacionado a la deformación para algunas muestras con $\varnothing=5/16''$ se incrementa moderadamente en paralelo al valor EL/D. Sólo para las muestras con una relación EL/D=2.4 y EL/D=4.8 este comportamiento aplica parcialmente. Podemos asociar la primera (EL/D=2.4) a la incidencia de la penetración del tirafón puesto que las muestras tienen una $P=3/4''$ siendo la menor de todas y la segunda (EL/D=4.8) a las propiedades físicas de la madera Copaiba por no admitir mayores deformaciones significativas a partir de EL/D=3.2 (EL=1 1/2'').

Con la gráfica 23, es posible establecer que para una unión paralela simple con un tirafón de $\varnothing=5/16''$, la deformación al límite proporcional representa en promedio el 10.9% de la deformación por carga máxima.

Además, no se observa un aumento significativo en el porcentaje de deformación al límite proporcional conforme aumenta el valor EL/D.



Gráfica 22. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y Deformación al límite proporcional para $\varnothing=5/16''$



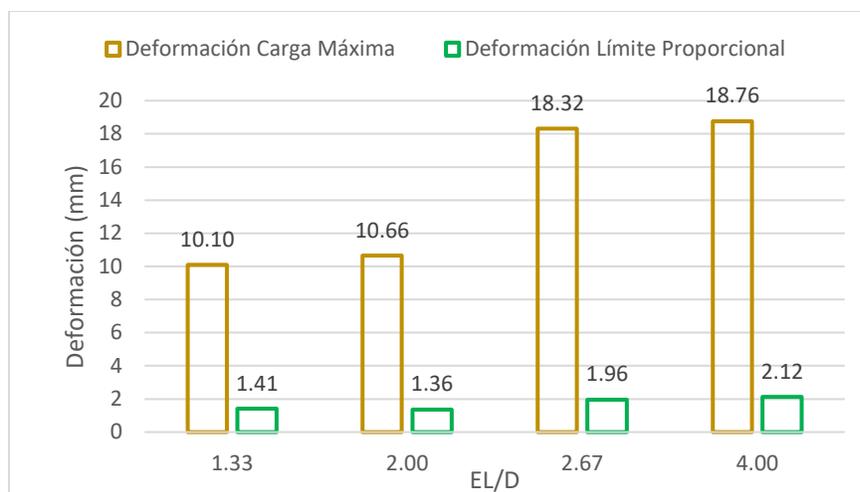
Gráfica 23. Comparativo porcentual

La gráfica 24 contiene los resultados relacionados a las muestras con un tirafón de $\varnothing=3/8''$ para cada valor EL/D.

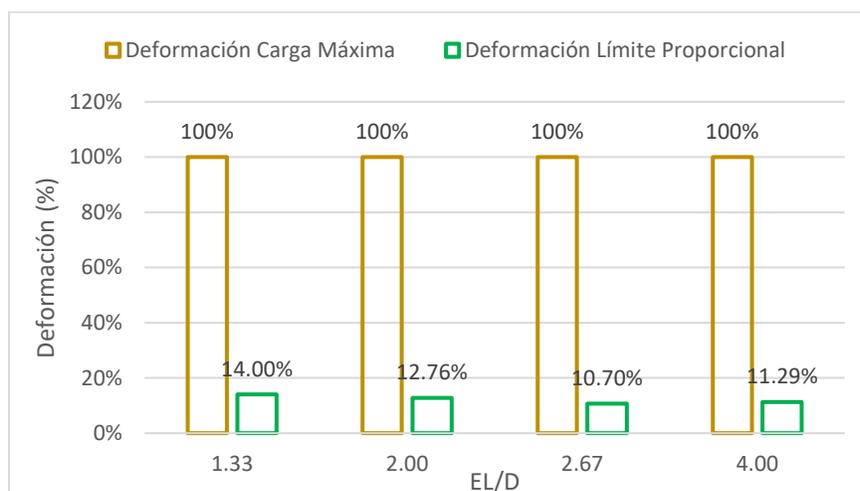
Según estos resultados, a diferencia de los casos anteriores la deformación para todas las muestras con $\varnothing=3/8''$ se incrementa moderadamente en paralelo al valor EL/D. Sin embargo, para las muestras con una relación EL/D=4 no se observa un incremento significativo y podemos asociarlo a las propiedades físicas de la madera Copaiba por no admitir mayores deformaciones significativas a partir de EL/D=2.67 (EL=1 1/2'').

Con la gráfica 25, es posible establecer que para una unión paralela simple con un tirafón de $\varnothing=3/8''$, la deformación al límite proporcional representa en promedio el 12.2% de la deformación por carga máxima.

Además, se observa una ligera reducción en el porcentaje de deformación al límite proporcional conforme aumenta el valor EL/D.



Gráfica 24. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y Deformación al límite proporcional para $\varnothing=3/8''$



Gráfica 25. Comparativo porcentual

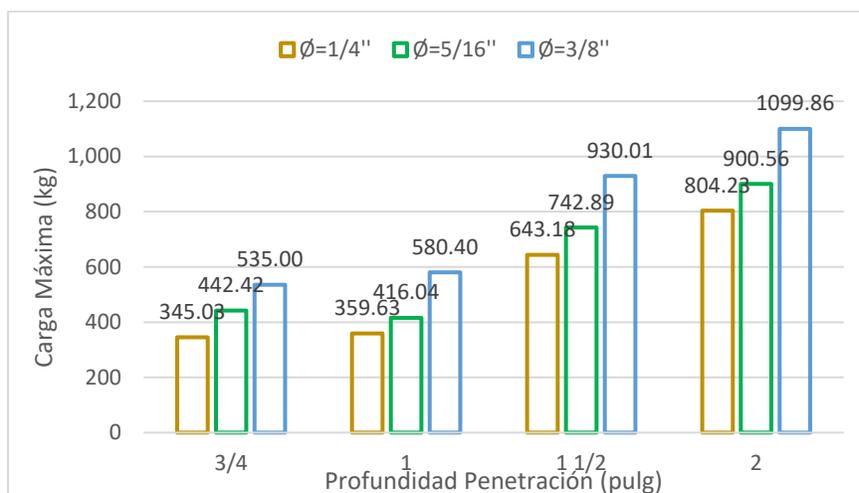
Respecto a los tres diámetros ($\varnothing=1/4''$, $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=3/8''$), podemos establecer relaciones entre los valores de las profundidades de penetración para cada tipo de carga.

La gráfica 26 contiene los resultados relacionados a las muestras solicitadas solo por la carga máxima para cada profundidad de penetración.

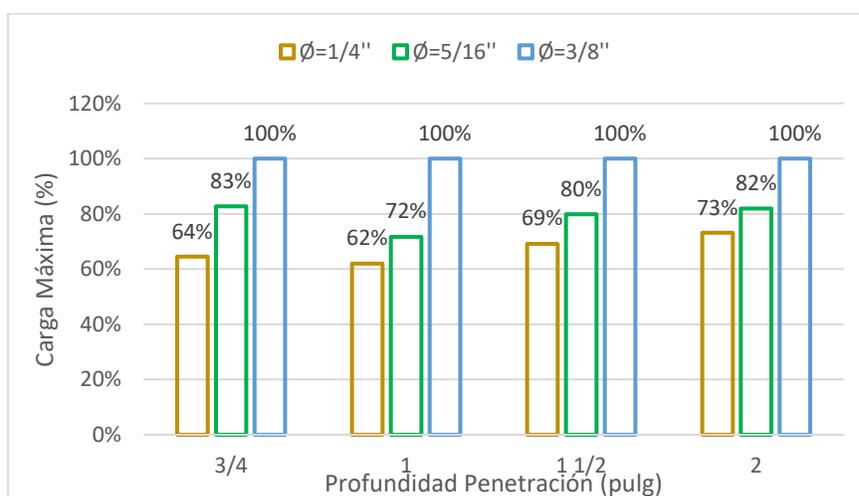
Para los 3 diámetros se observa un inminente incremento en la carga máxima a medida que la penetración aumenta. Sólo para el caso de las muestras con una $P=1''$ el incremento no es significativo y especialmente para un $\varnothing=5/16''$ la carga máxima se reduce ligeramente. Es importante tomar en cuenta que las muestras con una $P=1''$ fueron diseñados con los valores EL/D más bajos.

Según la gráfica 27, la carga máxima obtenida para $\varnothing=1/4''$ y $\varnothing=5/16''$ representa en promedio el 67% y 79.3% respectivamente de la carga máxima para $\varnothing=3/8''$.

Además, las cargas no amplían su diferencia sustancialmente entre los diámetros a medida que aumenta la penetración.



Gráfica 26. Comparativo entre Profundidad de penetración vs $\varnothing=1/4''$, $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=3/8''$ para la Carga máxima



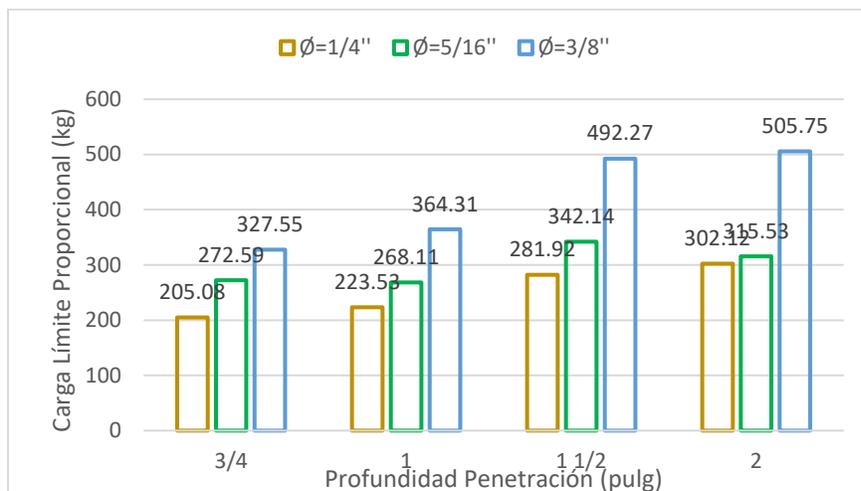
Gráfica 27. Comparativo porcentual

La gráfica 28 contiene los resultados relacionados a las muestras solicitadas solo por la carga al límite de proporcionalidad para cada profundidad de penetración.

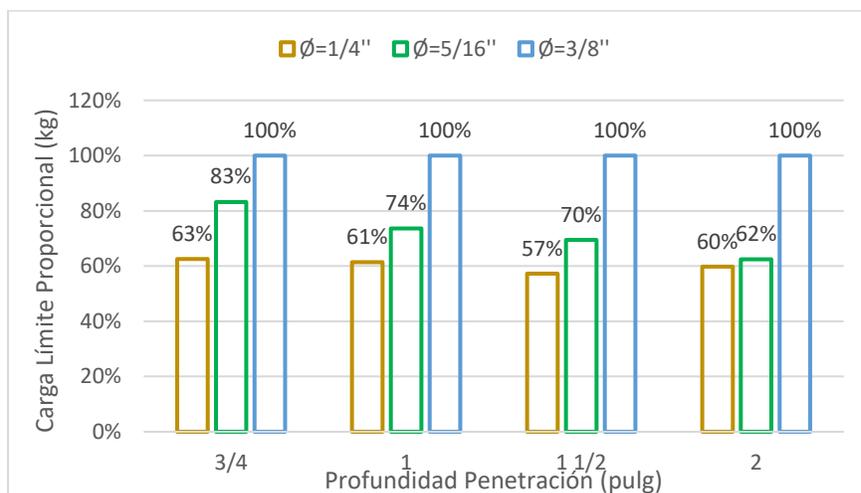
Para los 3 diámetros se observa un incremento sustancial en la carga al límite proporcional a medida que la penetración aumenta. Sin embargo, sólo para el caso de las muestras con un $\varnothing=5/16''$ el incremento de carga es irregular.

Según la gráfica 29, la carga al límite proporcional obtenida para $\varnothing=1/4''$ y $\varnothing=5/16''$ representa en promedio el 60.3% y 72.3% respectivamente de la carga máxima para $\varnothing=3/8''$.

Además, las cargas para $\varnothing=5/16''$ presentan decrecimiento en su porcentaje respecto a un $\varnothing=3/8''$.



Gráfica 28. Comparativo entre Profundidad de penetración vs $\varnothing=1/4''$, $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=3/8''$ para la Carga al límite proporcional



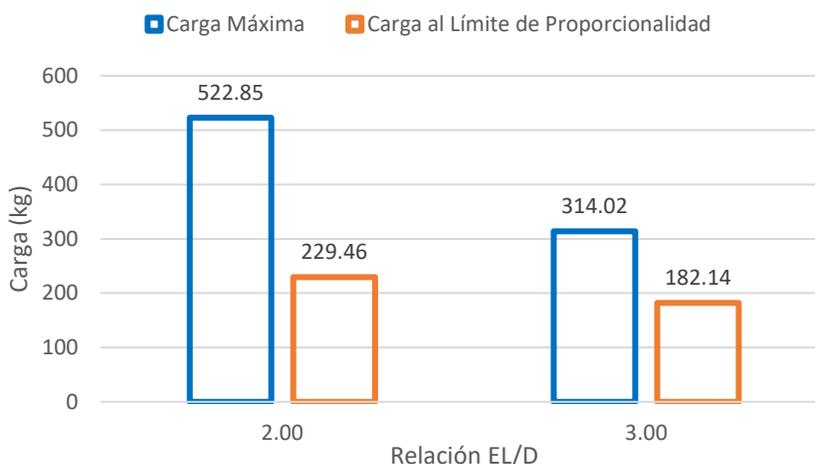
Gráfica 29. Comparativo porcentual

5.2.3. Cizallamiento simple perpendicular al grano

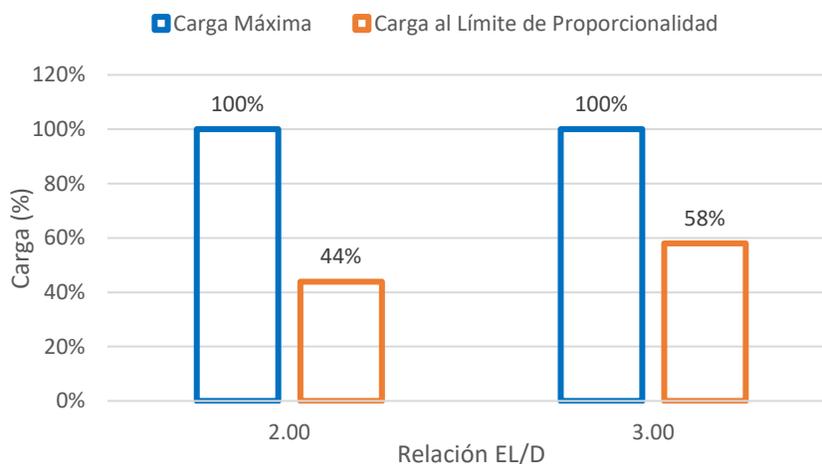
Respecto a los dos tipos cargas (máxima y al límite proporcional), podemos establecer relaciones entre los valores de EL/D para cada diámetro de tirafón.

Para el caso de la muestra con un diámetro de 1/4", en la gráfica 30 se observa un marcado decrecimiento en los 2 tipos carga a medida que el valor de EL/D aumenta. Este comportamiento contradice la hipótesis que considera una relación directamente proporcional entre el EL/D y el valor de la carga máxima. Sin embargo, las muestras con un valor de EL/D = 2.00 y EL/D = 3.00 fueron diseñadas con una penetración de 1" y 3/4" respectivamente con el fin de medir la incidencia de la misma en el comportamiento mecánico de las uniones estructurales.

Con la gráfica 31, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con un tirafón de $\varnothing=1/4"$, la carga al límite proporcional representa en promedio el 51% de la carga máxima.



Gráfica 30. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=1/4"$

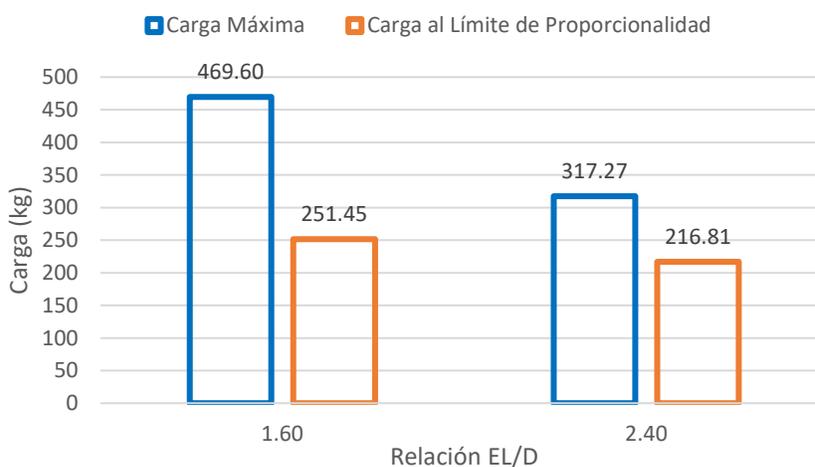


Gráfica 31. Comparativo porcentual

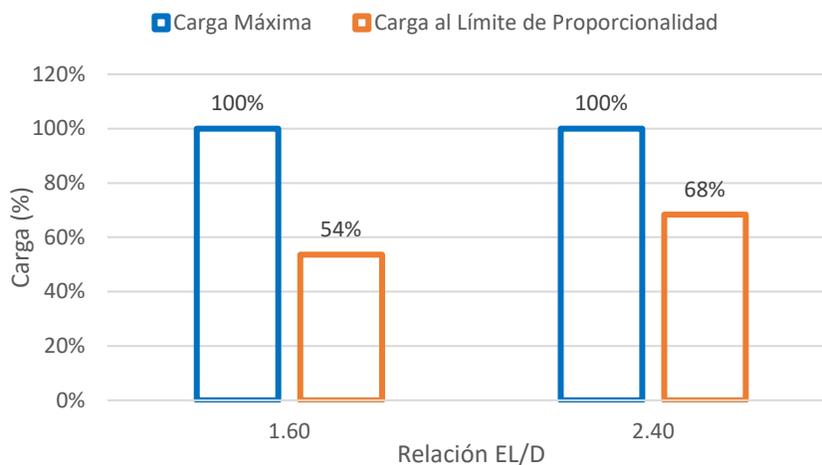
Para el caso de la muestra con un diámetro de 5/16", en la gráfica 32 se observa un comportamiento mecánico similar al caso anterior con una relación inversamente proporcional

entre el valor de EL/D y los 2 tipos de carga. En paralelo las muestras con un valor de EL/D = 1.60 y EL/D = 2.40 fueron diseñadas con una penetración de 1'' y 3/4'' respectivamente con el propósito mencionado en el anterior párrafo.

Con la gráfica 33, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con un tirafón de $\varnothing=5/16''$, la carga al límite proporcional representa en promedio el 61% de la carga máxima.



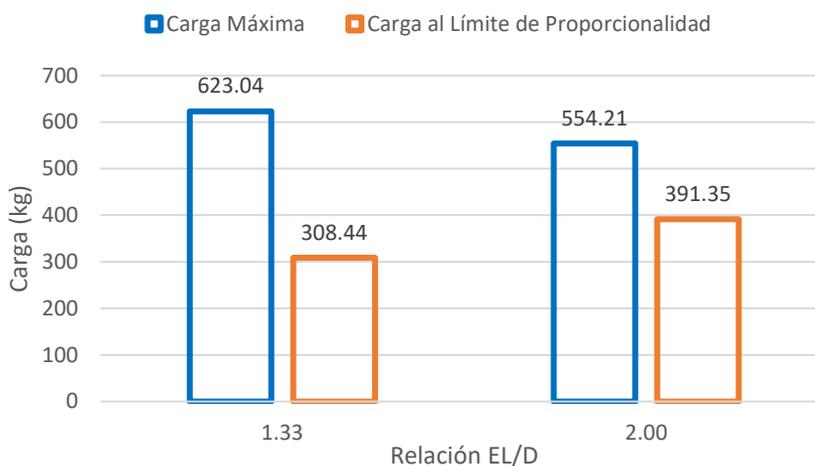
Gráfica 32. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=5/16''$



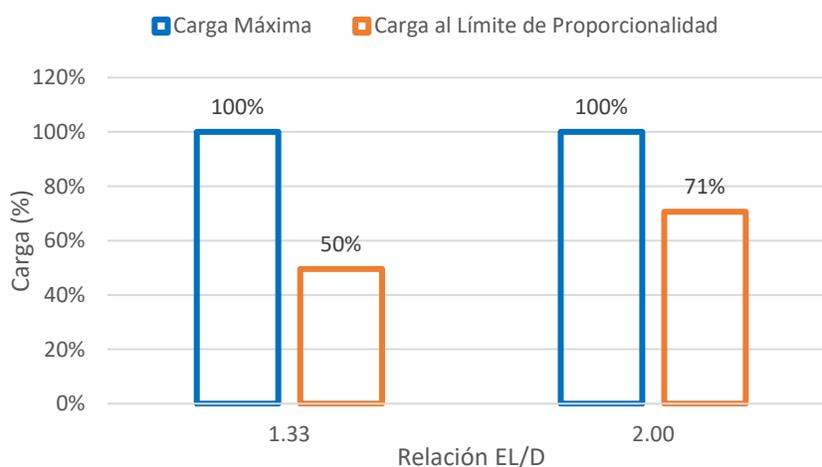
Gráfica 33. Comparativo porcentual

Para el caso de la muestra con un diámetro de 3/8'', a diferencia de las anteriores muestras en la gráfica 34 se observa una relación inversamente proporcional pero solo entre el valor de EL/D y la carga máxima, en contraste la carga al límite proporcional cumple con la hipótesis enunciada. Las muestras con un valor de EL/D = 1.33 y EL/D = 2.00 fueron diseñadas con una penetración de 1'' y 3/4'' respectivamente con el propósito mencionado en el anterior párrafo.

Con la gráfica 35, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con un tirafón de $\varnothing=3/8''$, la carga al límite proporcional representa en promedio el 60.5% de la carga máxima.



Gráfica 34. Comparativo entre relación EL/D vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para un $\varnothing=3/8''$

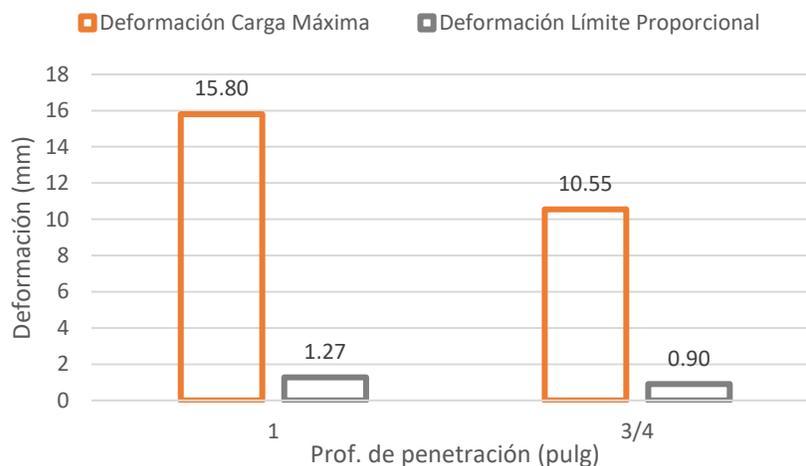


Gráfica 35. Comparativo porcentual

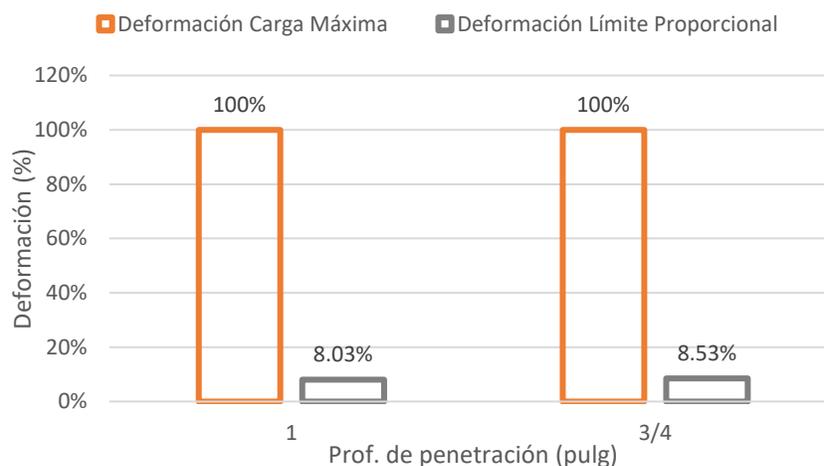
Respecto a las deformaciones provocadas por la carga al límite de proporcionalidad y la carga máxima, podemos establecer relaciones entre las diferentes profundidades de penetración para cada diámetro de tirafón.

Para el caso de la muestra con un diámetro de $1/4''$, en la gráfica 36 la relación entre las deformaciones por penetración coincide con la hipótesis que considera dicha relación directamente proporcional entre ambas deformaciones y la penetración del tirafón.

Con la gráfica 37, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con un tirafón de $\varnothing=1/4''$, la deformación al límite proporcional representa en promedio el 8.3% de la deformación por carga máxima.



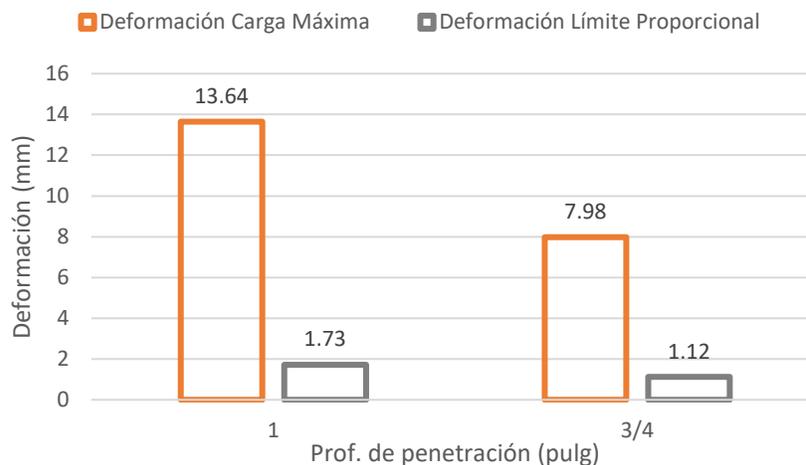
Gráfica 36. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y Deformación al límite proporcional para $\varnothing=1/4''$



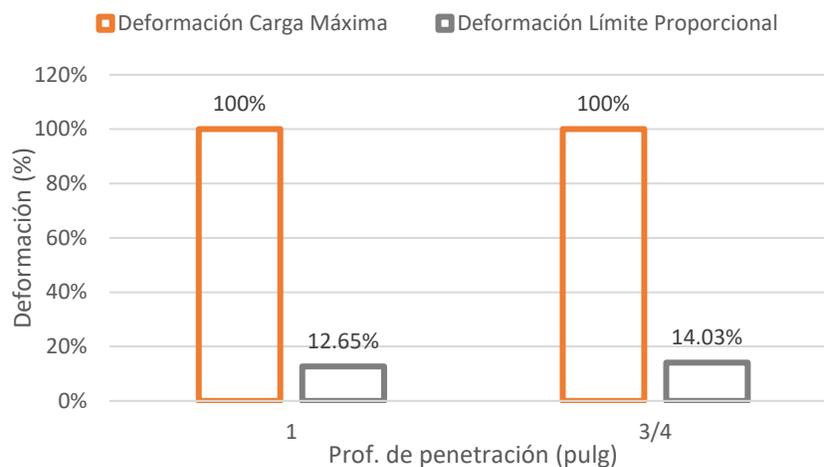
Gráfica 37. Comparativo porcentual

Para el caso de la muestra con un diámetro de $5/16''$, en la gráfica 38 la relación entre las deformaciones por penetración coincide con la hipótesis anunciada en el párrafo anterior.

Con la gráfica 39, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con un tirafón de $\varnothing=5/16''$, la deformación al límite proporcional representa en promedio el 13.3% de la deformación por carga máxima.



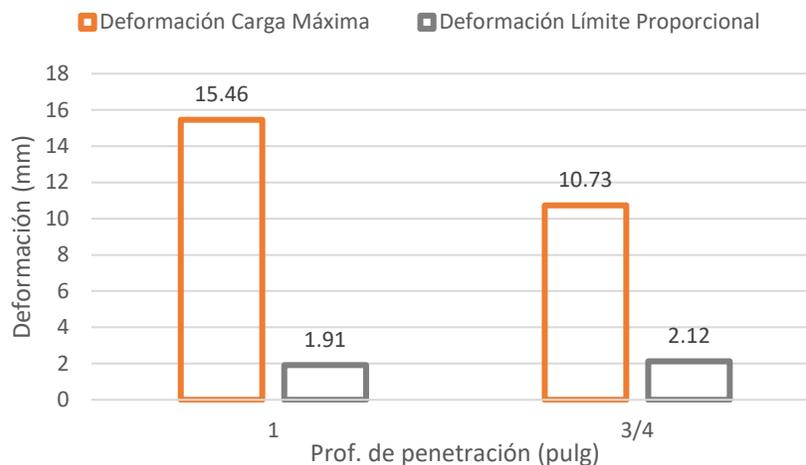
Gráfica 38. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y Deformación al límite proporcional para $\varnothing=5/16''$



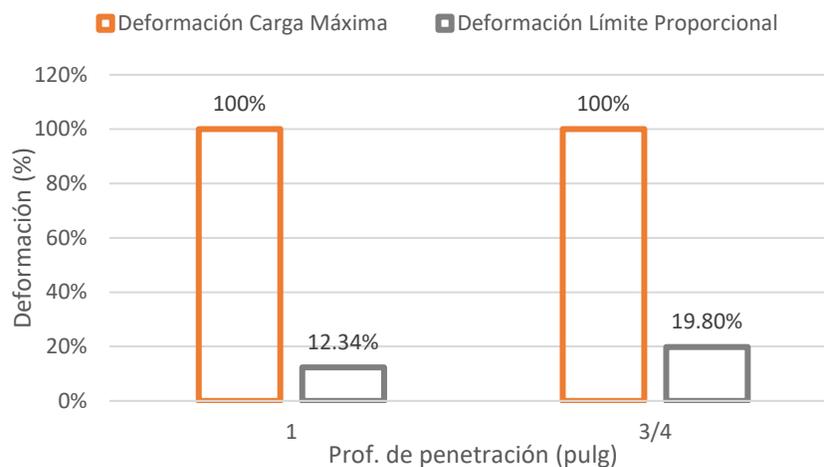
Gráfica 39. Comparativo porcentual

Para el caso de la muestra con un diámetro de $3/8''$, a diferencia de los anteriores casos en la gráfica 40 solo la deformación por carga máxima se incrementa junto al valor de la penetración. En paralelo la deformación al límite proporcional se incrementa ligeramente de manera inversa.

Con la gráfica 41, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con un tirafón de $\varnothing=3/8''$, la deformación al límite proporcional representa en promedio el 16.1% de la deformación por carga máxima.



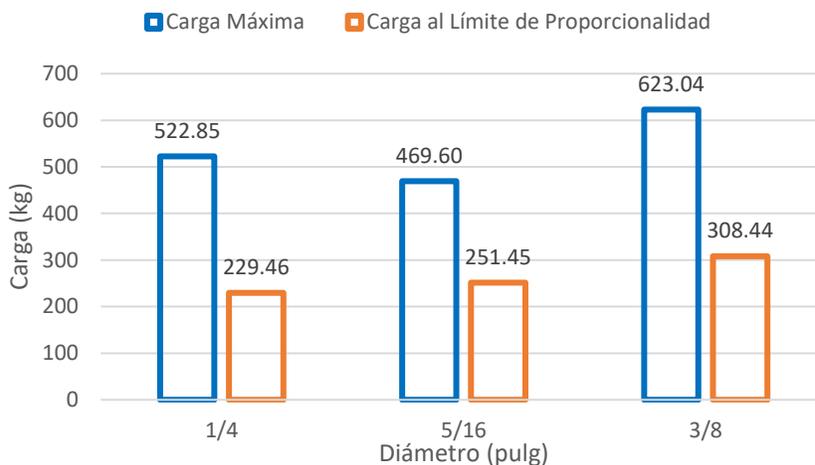
Gráfica 40. Comparativo entre relación EL/D vs Deformación máxima y Deformación al límite proporcional para $\varnothing=3/8$ "



Gráfica 41. Comparativo porcentual

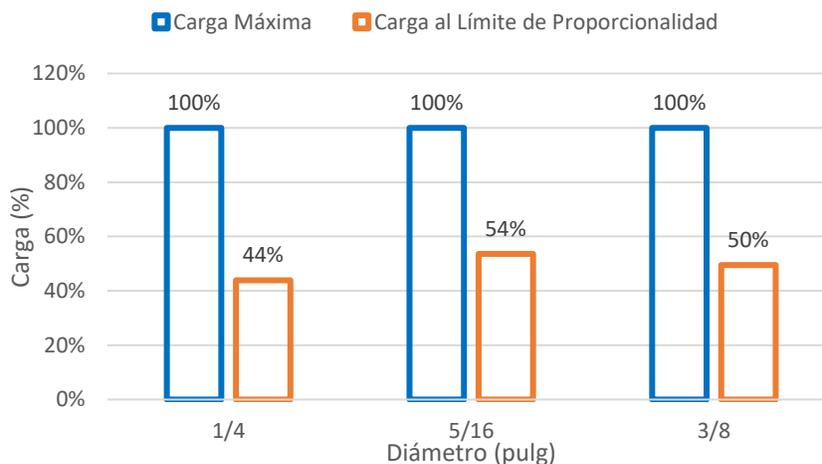
Respecto a los 2 tipos de carga, podemos establecer relaciones entre los diferentes diámetros del tirafón para cada profundidad de penetración.

Para el caso de las muestras con una penetración del tirafón igual a 1", en la gráfica 42 se puede observar una incongruencia con la hipótesis que considera un incremento de las cargas en paralelo al incremento del diámetro del tirafón. Dicha incongruencia sólo se presenta para la muestra de $\varnothing=5/16$ " en su capacidad de carga máxima.



Gráfica 42. Comparativo entre Diámetro vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para una profundidad de penetración de 1''

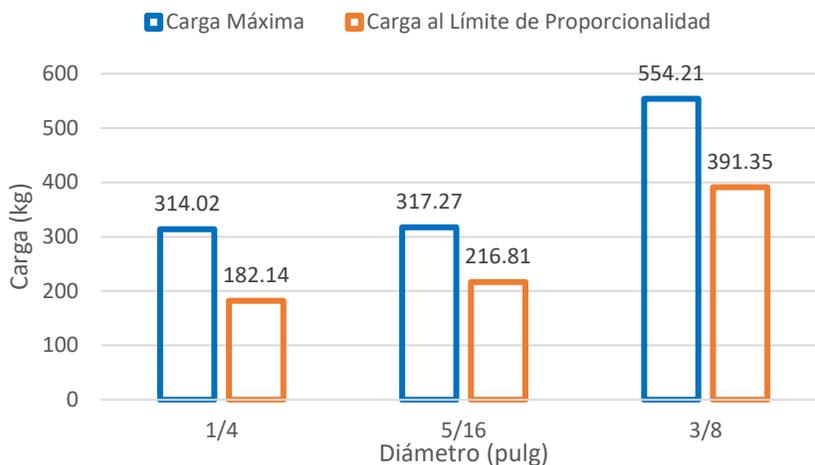
Con la gráfica 43, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con una penetración del tirafón igual a 1'', la carga al límite proporcional representa en promedio el 49.3% de la carga máxima.



Gráfica 43. Comparativo porcentual

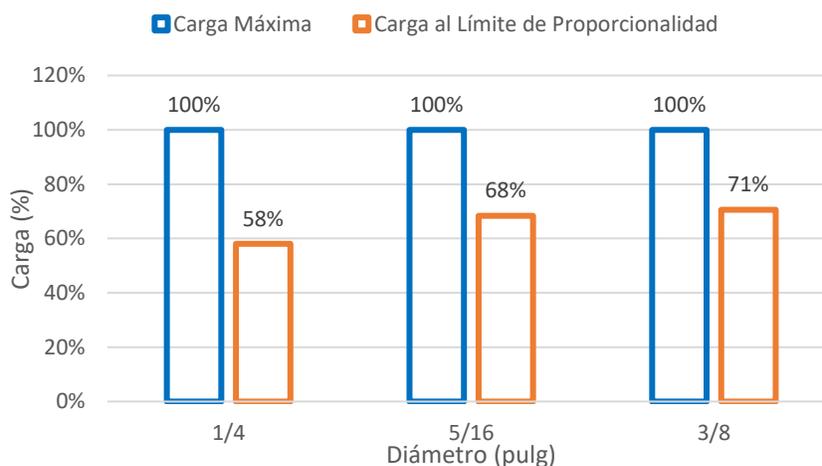
Para el caso de las muestras con una penetración del tirafón igual a 3/4'', en la gráfica 44 los valores de las cargas cumplen con la hipótesis que considera un incremento de las cargas en paralelo al incremento del diámetro del tirafón. No obstante, existe nuevamente una baja capacidad de carga máxima para la muestra de $\varnothing=5/16''$ en comparación con la muestra con $\varnothing=1/4''$.

Asimismo, es muy importante observar que a mayor diámetro obtenemos una menor plasticidad para uniones perpendiculares simples con una penetración igual a 3/4''.



Gráfica 44. Comparativo entre Diámetro vs Carga máxima y Carga al límite proporcional para una profundidad de penetración de 3/4''

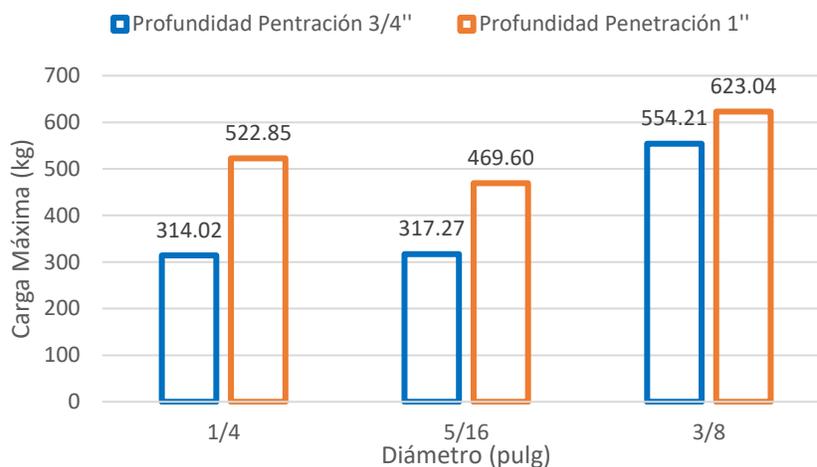
Con la gráfica 45, es posible establecer que para una unión perpendicular simple con una penetración del tirafón igual a 3/4'', la carga al límite proporcional representa en promedio el 65.7% de la carga máxima.



Gráfica 45. Comparativo porcentual

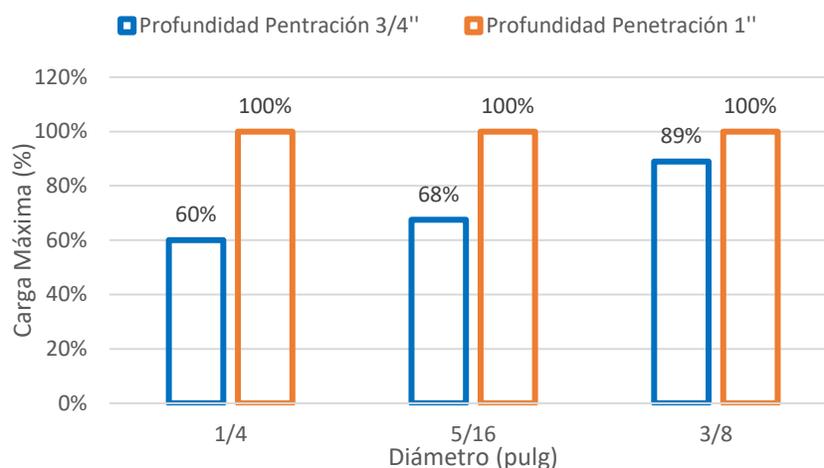
Respecto a los tipos de carga que solicitan los especímenes de madera Copaiba en estudio, podemos establecer relaciones entre los diferentes diámetros del tirafón y profundidad de penetración para la carga máxima y al límite proporcionalidad por separado.

Para el caso de la carga máxima, en la gráfica 46 se observa que las muestras tienen una mayor capacidad de carga a medida que se incrementa el diámetro en conjunto con la penetración del tirafón. Podemos enunciar además que a mayor diámetro menor será la incidencia de la penetración en el comportamiento mecánico de la unión estructural.



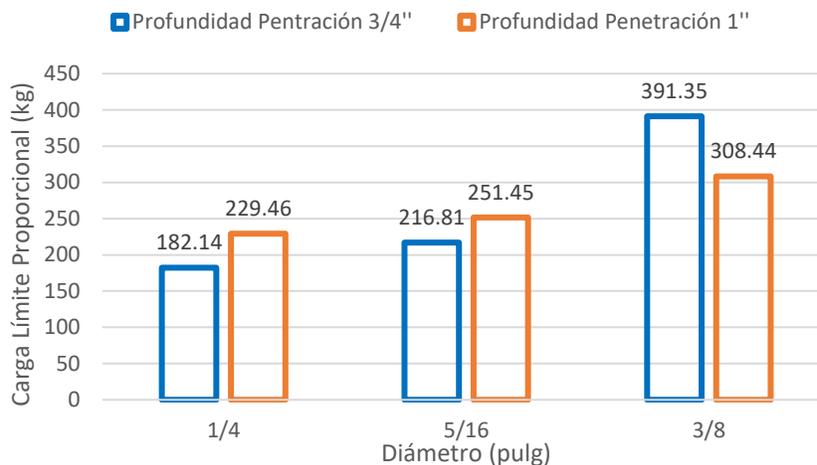
Gráfica 46. Comparativo entre Diámetro vs $P=3/4''$ y $P=1''$ para la Carga máxima

Con la gráfica 47, es posible establecer que para la presente unión la carga máxima con una penetración de $3/4''$ representa en promedio el 72% de la carga máxima obtenida con una penetración de $1''$ para tirafones no mayores que $3/8''$.



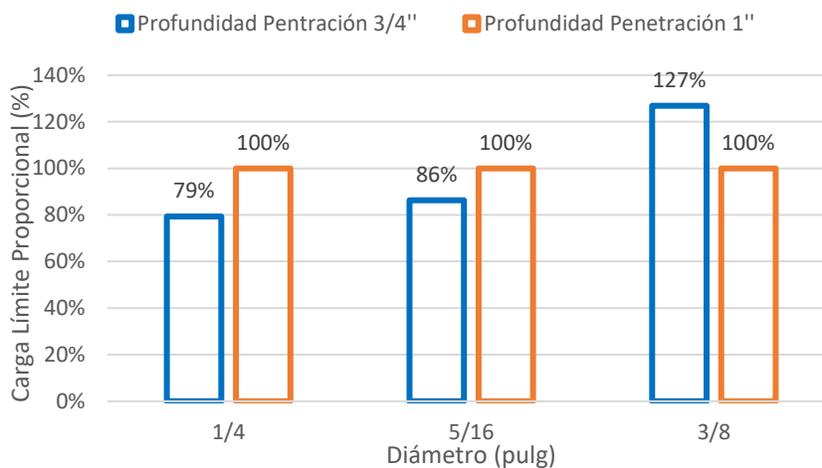
Gráfica 47. Comparativo porcentual

Para el caso de la carga al límite proporcional, a diferencia del anterior en la gráfica 48 se observa que solo las muestras con un tirafón $\varnothing=1/4''$ y $\varnothing=5/16''$ tienen una mayor capacidad de carga a medida que se incrementa la penetración a diferencia de un $\varnothing=3/8''$. En conclusión, la penetración tiene menor incidencia en el comportamiento mecánico a medida que aumenta el diámetro del mismo.



Gráfica 48. Comparativo entre Diámetro vs $P=3/4''$ y $P=1''$ para la Carga al límite proporcional

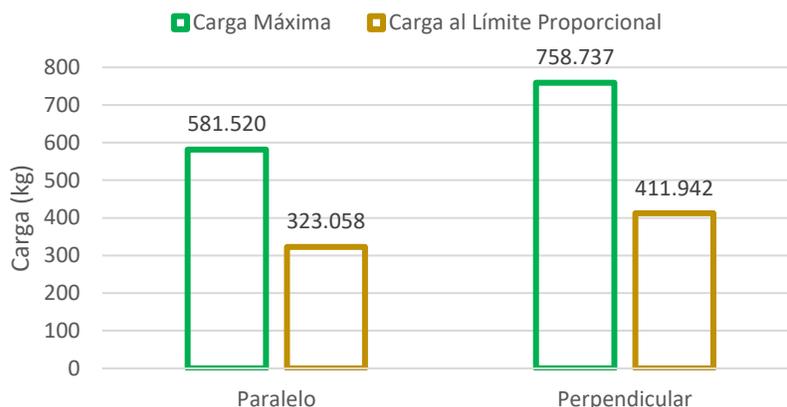
Con la gráfica 49, es posible establecer que para la presente unión la carga al límite proporcional con una penetración de $3/4''$ representa en promedio el 97.3% de la carga al límite proporcional obtenida con una penetración de $1''$ para tirafones no mayores que $3/8''$.



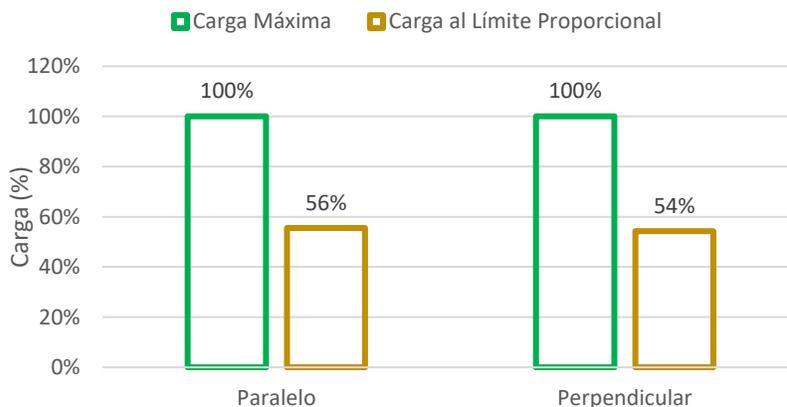
Gráfica 49. Comparativo porcentual

5.2.4. Cizallamiento doble

Respecto a las cargas obtenidas, la carga al límite proporcional para una unión doble paralela al grano representa 56% de la carga máxima. Asimismo, para una unión doble perpendicular al grano representa 54% de la carga máxima.



Gráfica 50. Comparativo entre Sentido de la carga respecto al grano vs Carga máxima y Carga al límite proporcional



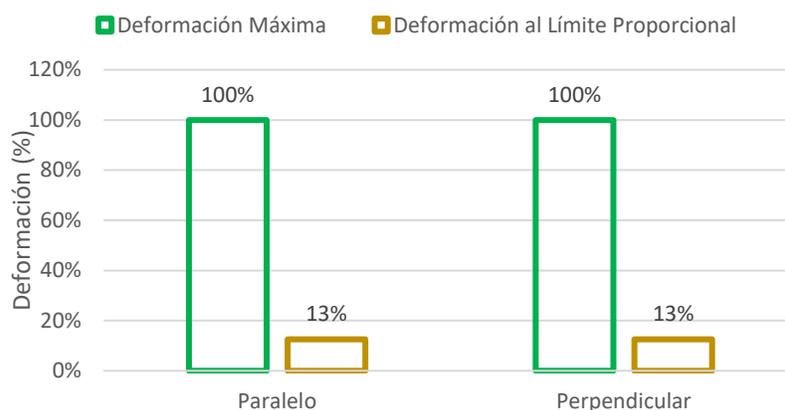
Gráfica 51. Comparativo porcentual

Respecto a las deformaciones obtenidas, la deformación al límite proporcional para una unión doble paralela al grano representa 13% de la deformación máxima. Asimismo, para una unión doble perpendicular al grano representa 13% de la deformación máxima.

En todas las muestras ensayadas fallaron las fibras de la madera presentando una fractura del tipo dúctil, validando lo enunciado en la hipótesis.



Gráfica 52. Comparativo entre Sentido de la carga respecto al grano vs Deformación máxima y Deformación al límite proporcional



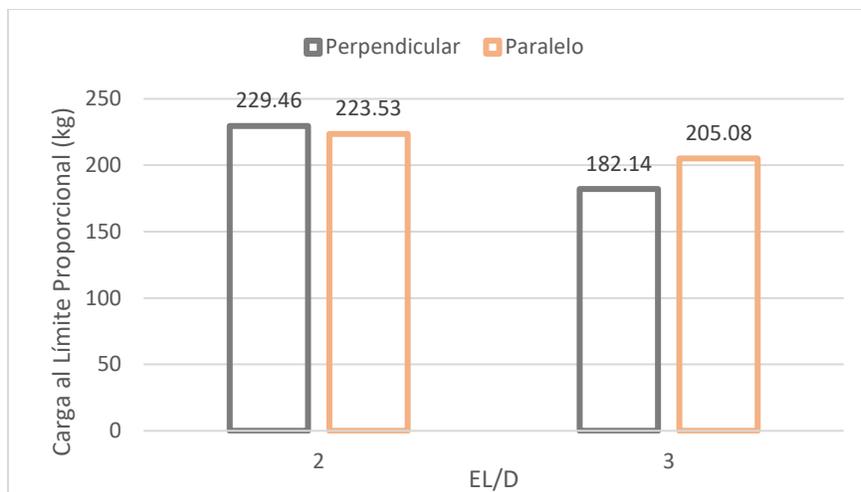
Gráfica 53. Comparativo porcentual

5.2.5. Comparación entre cizallamiento simple paralelo y perpendicular

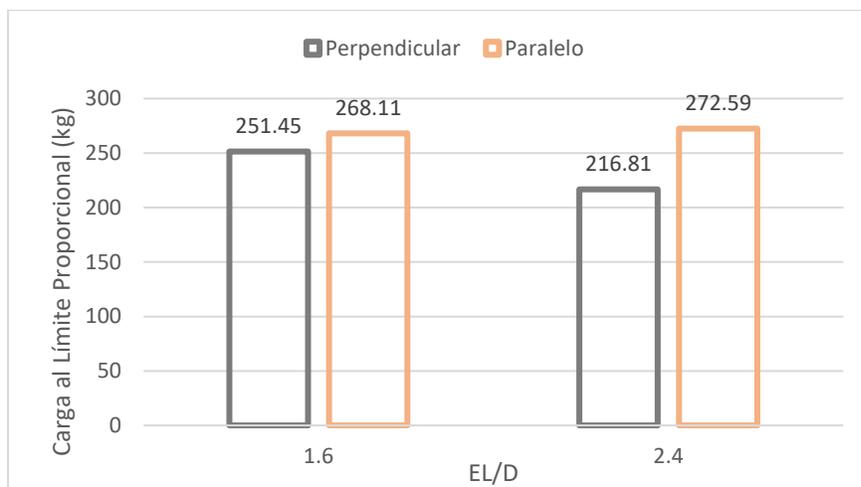
Los valores de las cargas al límite de proporcionalidad fueron clasificados según diámetro del tirafón en las gráficas 54, 55 y 56.

Respecto al comportamiento de las cargas aplicadas perpendicularmente al grano, este aumenta a la par con el diámetro destacando el gran incremento observado para las cargas entre un $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=3/8''$. Además, para incrementos en función a EL/D manteniendo un mismo diámetro, solo aumenta en el caso de $\varnothing=3/8''$.

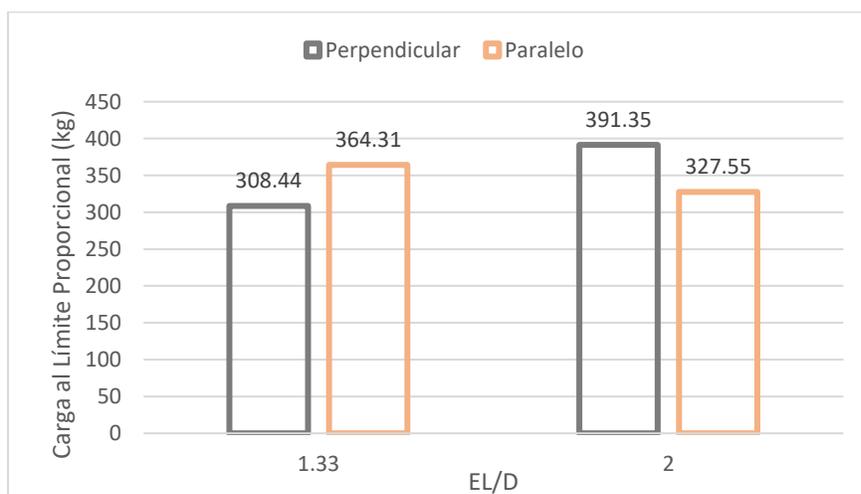
Respecto al comportamiento de las cargas aplicadas paralelamente al grano, todas aumentan a la par con el diámetro. Además, para incrementos en función a EL/D manteniendo un mismo diámetro, solo se aprecia un ligero incremento cuando la muestra tiene un $\varnothing=5/16''$.



Gráfica 54. Comparativo entre relación EL/D vs Sentido de la carga respecto al grano para un $\varnothing=1/4''$



Gráfica 55. Comparativo entre relación EL/D vs Sentido de la carga respecto al grano para un $\varnothing=5/16''$



Gráfica 56. Comparativo entre relación EL/D vs Sentido de la carga respecto al grano para un $\varnothing=3/8''$

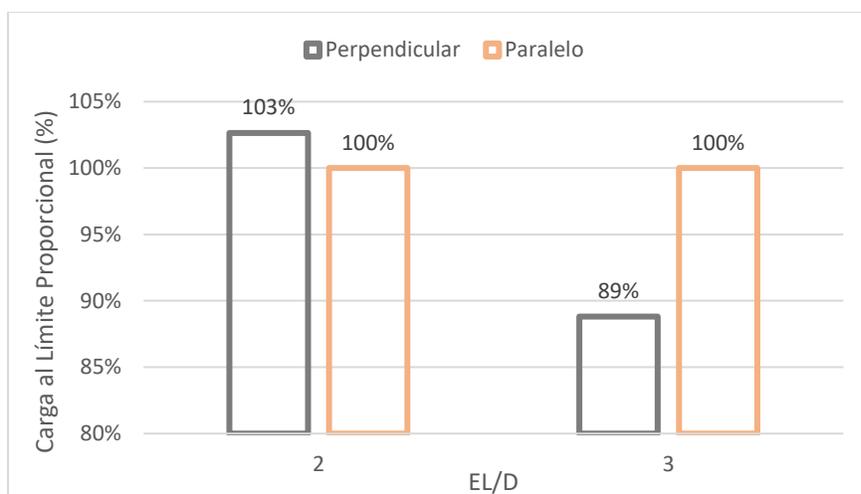
Con las gráficas 57, 58 y 59 se puede analizar que:

Para un $\varnothing=1/4''$ no varían según el sentido respecto al grano, debido a que las obtenidas perpendicularmente son el 96% en promedio de las paralelas al grano.

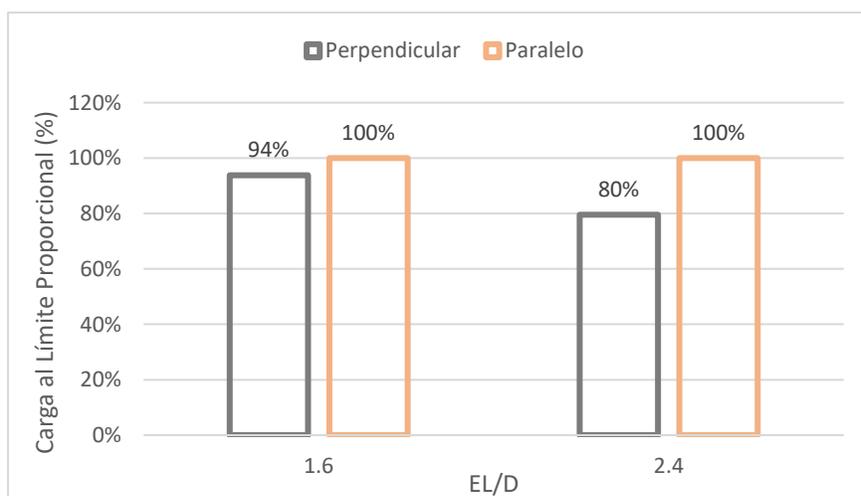
Para un $\varnothing=5/16''$ mantienen una diferencia según el sentido del grano, puesto que las obtenidas perpendicularmente son el 87% en promedio de las paralelas al grano.

Para un $\varnothing=3/8''$ no varían sustancialmente según el sentido del grano, representando las obtenidas perpendicularmente en promedio un 102% de las paralelas al grano.

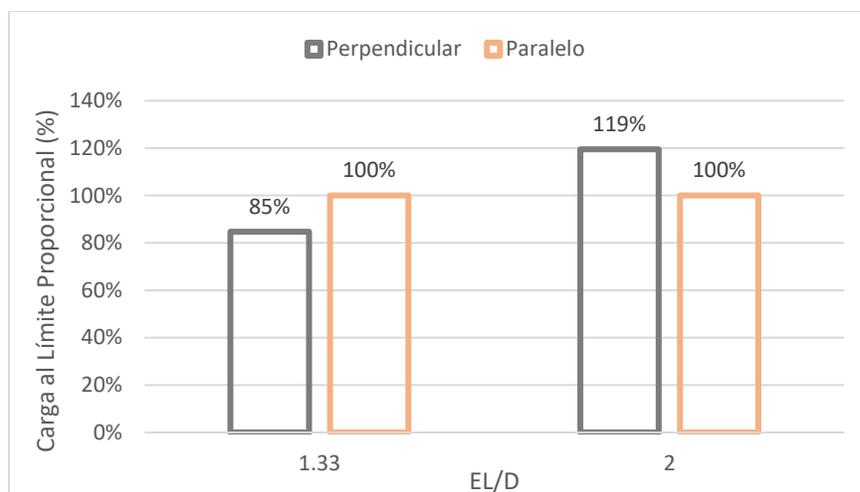
A partir de ello podemos suponer que las uniones cargadas perpendicularmente tienden en promedio a resistir cargas ligeramente menores que las paralelas al grano. Sin embargo, esta relación tiende a invertirse conforme aumenta el diámetro del tirafón y EL/D.



Gráfica 57. Comparativo porcentual



Gráfica 58. Comparativo porcentual

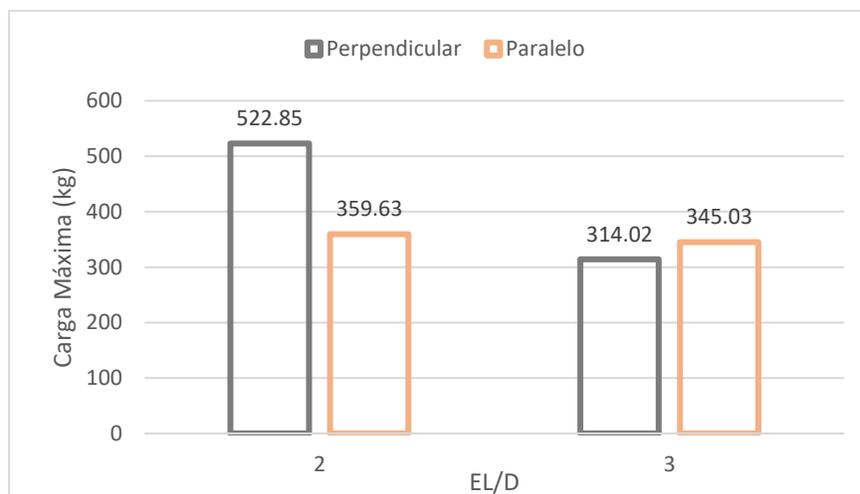


Gráfica 59. Comparativo porcentual

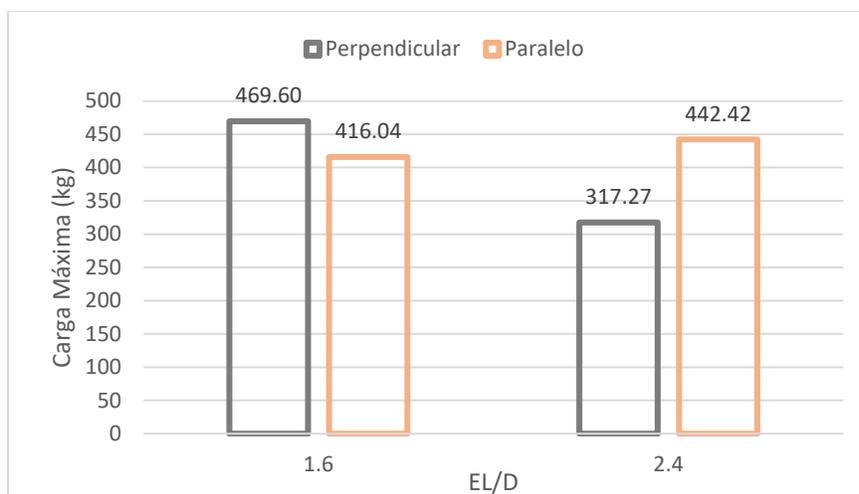
Los valores correspondientes a las cargas máximas fueron clasificados según diámetro del tirafón en las gráficas 60, 61 y 62.

Respecto al comportamiento de las cargas aplicadas perpendicularmente al grano, este solo se incrementa con el diámetro entre $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=3/8''$ mientras entre $\varnothing=5/16''$ y $\varnothing=1/4''$ se produce una reducción. Además, para incrementos de EL/D manteniendo un mismo diámetro, para ningún caso aumentan los valores.

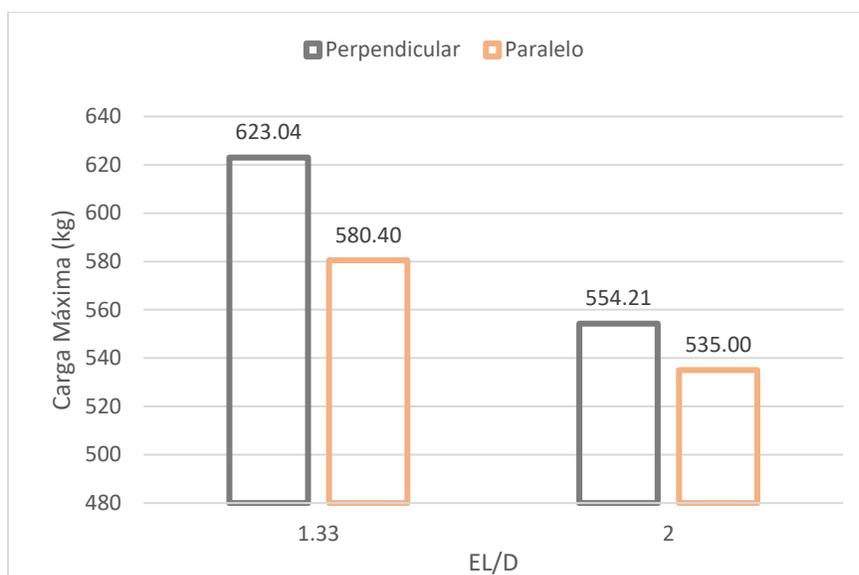
Respecto al comportamiento de las cargas aplicadas paralelamente al grano, todas aumentan notablemente a la par con el diámetro. Además, para incrementos de EL/D manteniendo un mismo diámetro, no se aprecia un aumento en la capacidad de carga salvo el caso de $\varnothing=5/16''$.



Gráfica 60. Comparativo entre relación EL/D vs Sentido de la carga respecto al grano para un $\varnothing=1/4''$



Gráfica 61. Comparativo entre relación EL/D vs Sentido de la carga respecto al grano para un $\varnothing=5/16''$



Gráfica 62. Comparativo entre relación EL/D vs Sentido de la carga respecto al grano para un $\varnothing=3/8''$

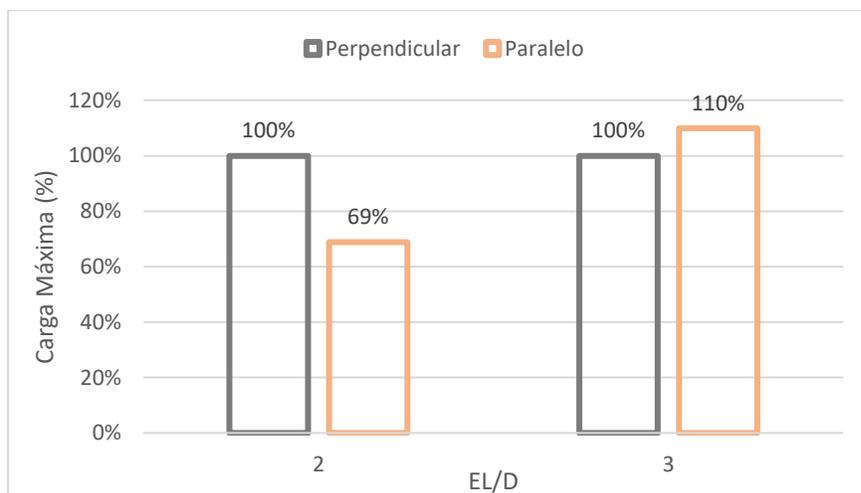
Con las gráficas 63, 64 y 65 se puede analizar que:

Para un $\varnothing=1/4''$ se observa un mejor comportamiento en el caso paralelo respecto al perpendicular para un $EL/D=3$. A pesar de ello, las obtenidas paralelamente representan en promedio el 89.5% de las perpendiculares al grano.

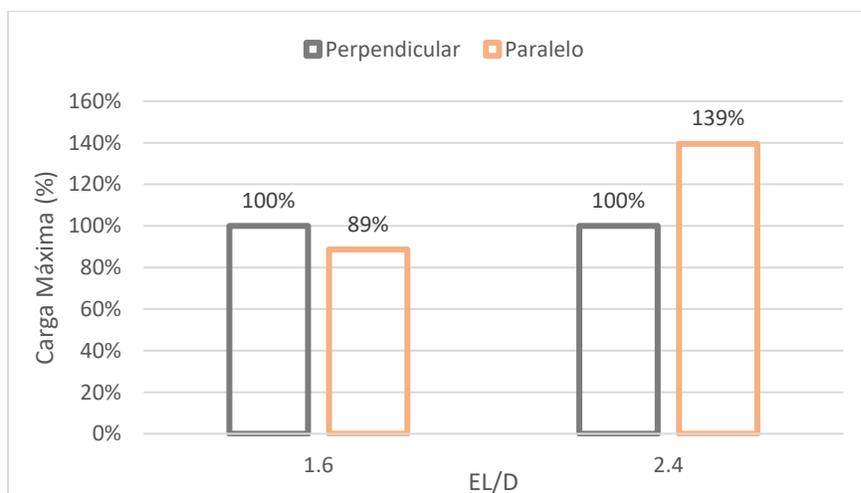
Para un $\varnothing=5/16''$ se observa un comportamiento superior en el caso paralelo respecto al perpendicular para $EL/D=2.4$. En consecuencia, las obtenidas paralelamente representan en promedio el 114% de las perpendiculares al grano.

Para un $\varnothing=3/8''$ a diferencia de los anteriores el caso paralelo presenta una ligera menor capacidad de carga respecto al perpendicular para ambos valores de EL/D. En consecuencia, las obtenidas paralelamente representan en promedio el 95% de las perpendiculares al grano.

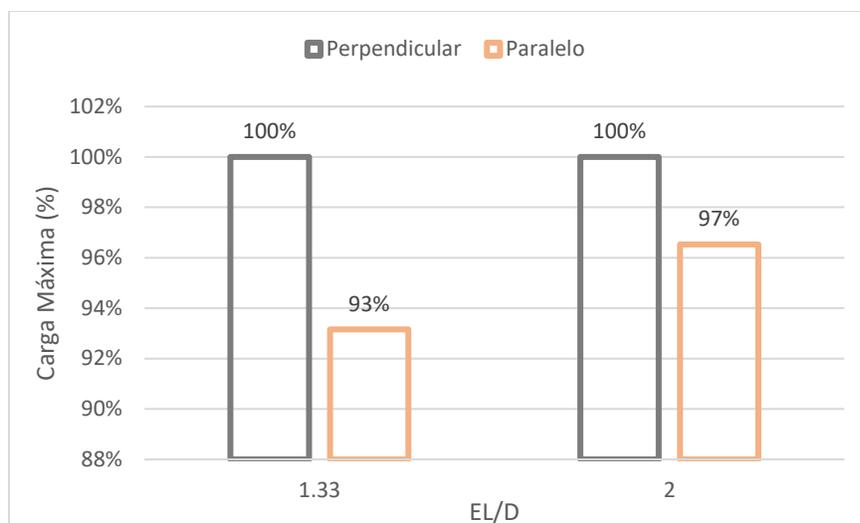
Podemos suponer que las uniones cargadas paralelamente tienden a resistir cargas igual o ligeramente menores que las perpendiculares al grano. Sólo para el caso de $\varnothing=5/16''$, las uniones cargadas en paralelo soportaran cargas moderadamente mayores a las perpendiculares al grano.



Gráfica 63. Comparativo porcentual



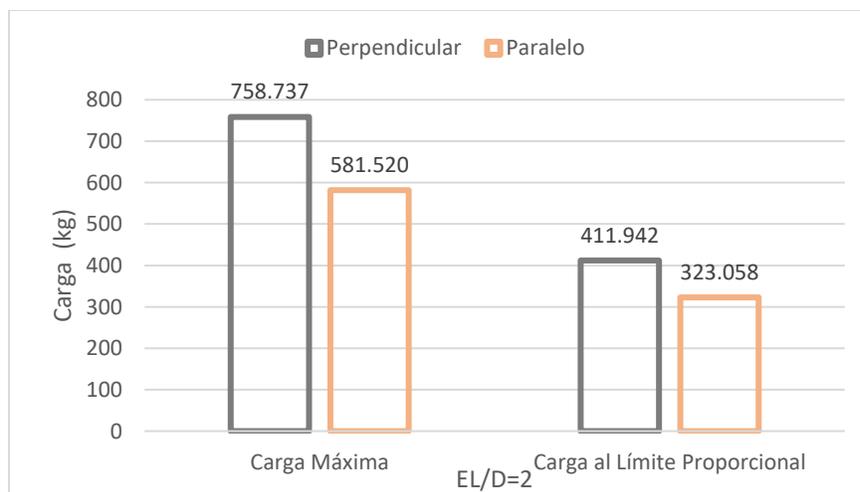
Gráfica 64. Comparativo porcentual



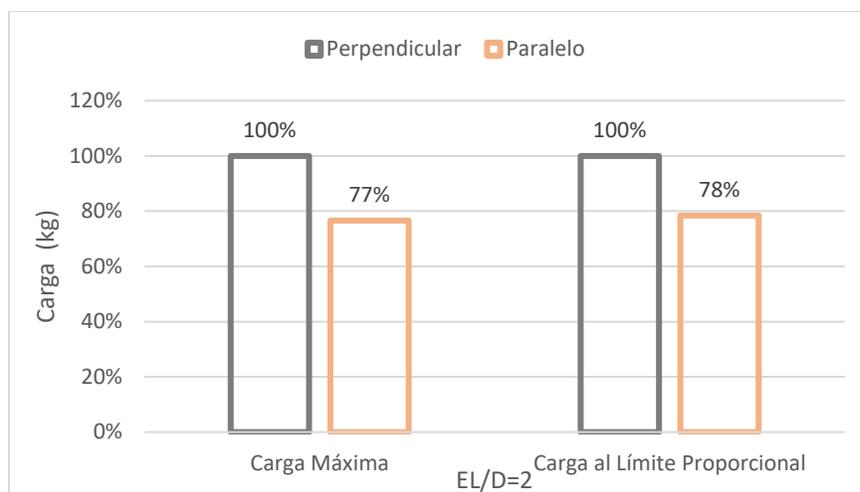
Gráfica 65. Comparativo porcentual

5.2.6. Comparación entre cizallamiento doble paralelo y perpendicular

Según la gráfica 66, la resistencia de las uniones sometidas a doble cizallamiento perpendicular es mayor que las paralelas al grano para ambos tipos de carga. Es posible además establecer que la carga obtenida al límite proporcional y máxima paralelamente representa un 80% y 77% respectivamente de la perpendicular al grano.



Gráfica 66. Comparativo entre tipos de cargas vs Sentido de carga respecto al grano para cizallamiento doble



Gráfica 67. Comparativo porcentual

5.2.7. Comparación con otras especies

El presente proyecto de investigación mantuvo como referencia investigaciones anteriormente realizadas. Se seleccionó a la madera Capirona y Tornillo por presentar una metodología que acreditan sus resultados como datos de referencia.

- Uniones Estructurales con Tirafones en madera Tornillo

Autor: Andrés García

Año: 2012

- Uniones Estructurales con Tirafones en madera Capirona

Autor: Jany Hurtado

Año: 2007

- Uniones Estructurales con Tirafones en madera Quinilla Colorada

Autor: Claudia Paredes

Año: 2006

Es de suma importancia adjuntar las propiedades físicas de cada especie determinadas por cada autor para el ensayo de las muestras, donde consideramos la densidad básica y el contenido de humedad debido a su incidencia en las propiedades mecánicas de la madera como adelantamos en el marco teórico.

Tabla 26
Propiedades físicas de las especies estudiadas

Especie	Densidad básica (gr/cm ³)	Contenido de humedad (%)
Tornillo	0.472	13.96
Copaiba	0.575	18.04
Capirona	0.728	24.10
Quinilla	0.780	13.20

(Hurtado A., 2007) (Paredes P., 2006) (García M., 2012)

5.2.7.1. Extracción directa

En las tablas 27, 28 y 29 se han clasificado las cargas de diseño de las otras especies, a partir de esta información se establecerán relaciones que permitan caracterizar el comportamiento a la extracción directa entre las especies. Es importante tomar en cuenta que para la especie Capirona, no se ensayó probetas con un $\varnothing=5/16''$ sino con $\varnothing=1/2''$.

Tabla 27
Valores de diseño de extracción directa para la especie Tornillo

Diámetro del Tirafón (cm)	Carga de Extracción Permisible (kg/cm)
1/4	30
5/16	36
3/8	43

(García M., 2012)

Tabla 28
Valores de diseño de extracción directa para la especie Capirona

Diámetro del Tirafón (pulg)	Carga de Extracción Permisible (kg/cm)
1/4	46.1
5/16	-
3/8	48.2

(Hurtado A., 2007)

Tabla 29

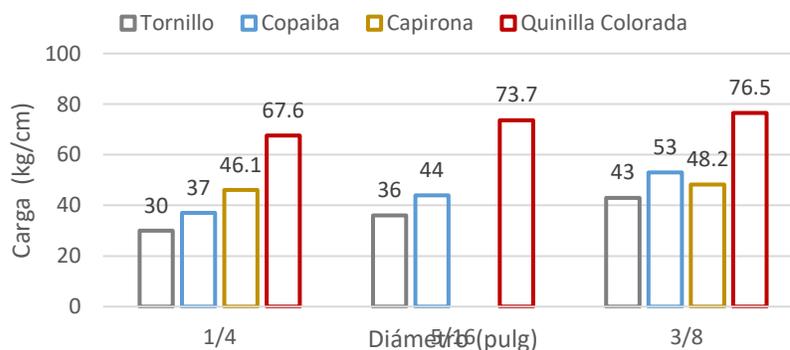
Valores de diseño de extracción directa para la especie Quinilla Colorada

Diámetro del Tirafrón (cm)	Carga de Extracción Permissible (kg/cm)
1/4	67.6
5/16	73.7
3/8	76.5

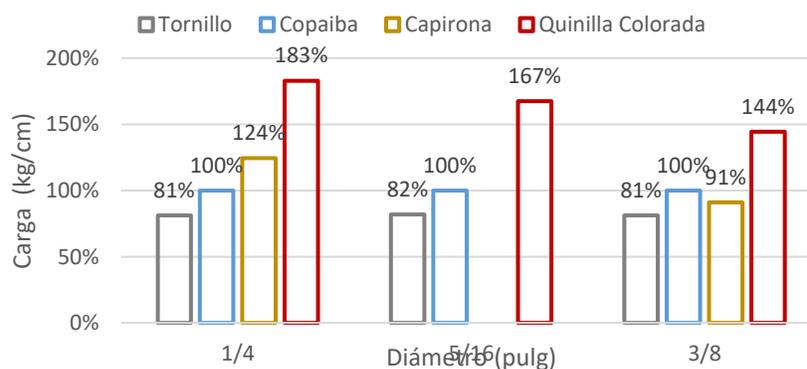
(Paredes P., 2006)

Con la gráfica 68 podemos observar un incremento de la carga para todas las especies en paralelo con el aumento del diámetro. Asimismo, la carga permisible de extracción incrementa su valor en sentido al peso específico de cada especie. Por consiguiente, siendo la Quinilla Colorada la especie más densa obtiene los valores más altos.

No obstante, para el caso de la Capirona para un $\varnothing=3/8''$ presenta un valor menor al obtenido con la actual especie en estudio y para un $\varnothing=1/4''$ no obtiene una carga permisible suficiente para justificar su elevado peso específico. Podemos asociar este comportamiento de la especie Capirona al alto contenido de humedad que tenían sus muestras al momento del ensayo.



Gráfica 68. Comparativo entre Diámetro vs Carga de diseño de extracción directa de 4 especies



Gráfica 69. Comparativo porcentual

La gráfica 69 nos indica que los valores para la especie Copaiba varían en paralelo con los de la especie Tornillo, no siendo así para el caso de las maderas más pesadas las cuales ilustran la mayor diferencia con la Copaiba para un $\varnothing=1/4''$.

Cizallamiento

Se clasificaron cargas de diseño de las 4 especies a solicitaciones de cizallamiento. A partir de esta información se establecerán relaciones que permitan caracterizar el comportamiento al cizallamiento entre las especies. Es importante tomar en cuenta que para la especie Capirona, no se ensayó probetas con un $\varnothing=5/16''$ sino con $\varnothing=1/2''$.

5.2.7.2. Cizallamiento simple paralelo

Los valores de diseño de las especies al cizallamiento simple paralelo se presentan en las tablas 30, 31 y 32.

Tabla 30

Valores de diseño de cizallamiento simple paralelo para la especie Tornillo

Diámetro Tirafón (pulg)	Longitud Tirafón	EI (pulg)	EI/D	Carga de Diseño (kg)
1/4	1 1/2	1/2	2.00	24
1/4	1 1/2	3/4	3.00	40
1/4	2 1/2	1	4.00	43
1/4	3 1/2	1 1/2	6.00	66
5/16	1 1/2	1/2	1.60	43
5/16	1 1/2	3/4	2.40	59
5/16	2 1/2	1	3.20	63
5/16	3 1/2	1 1/2	4.80	68
3/8	1 1/2	1/2	1.33	67
3/8	1 1/2	3/4	2.00	73
3/8	2 1/2	1	2.67	80
3/8	3 1/2	1 1/2	4.00	120

(García M., 2012)

Tabla 31

Valores de diseño de cizallamiento simple paralelo para la especie Capirona

Diámetro Tirafón (pulg)	Longitud Tirafón	EI (pulg)	EI/D	Carga de Diseño (kg)
1/4	1 1/2	1/2	2.00	102.2
1/4	1 1/2	3/4	3.00	149.8
1/4	2 1/2	1	4.00	163.7
1/4	3 1/2	1 1/2	6.00	161.0
3/8	1 1/2	1/2	1.33	140.6
3/8	1 1/2	3/4	2.00	205.4
3/8	2 1/2	1	2.67	256.3
3/8	3 1/2	1 1/2	4.00	281.3

(Hurtado A., 2007)

Tabla 32

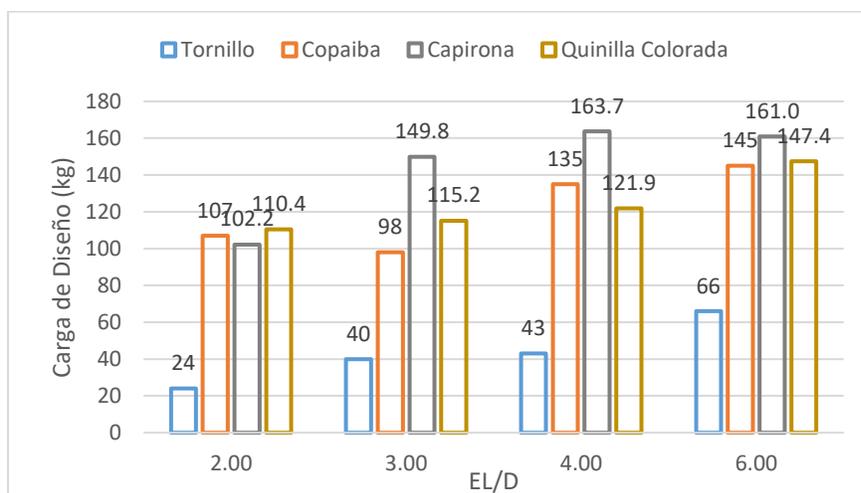
Valores de diseño de cizallamiento simple paralelo para la especie Quinilla Colorada

Diámetro Tirafón (pulg)	Longitud Tirafón	EI (pulg)	EI/D	Carga de Diseño (kg)
1/4	1 1/2	1/2	2.00	110.4
1/4	2	3/4	3.00	115.2
1/4	2 1/2	1	4.00	121.9
1/4	2 1/2	1 1/2	6.00	147.4
5/16	1 1/2	1/2	1.60	128.4
5/16	2	3/4	2.40	133.9
5/16	2 1/2	1	3.20	170.9
5/16	2 1/2	1 1/2	4.80	189.9
3/8	1 1/2	1/2	1.33	149.3
3/8	2	3/4	2.00	139.7
3/8	2 1/2	1	2.67	183.4
3/8	2 1/2	1 1/2	4.00	193.0

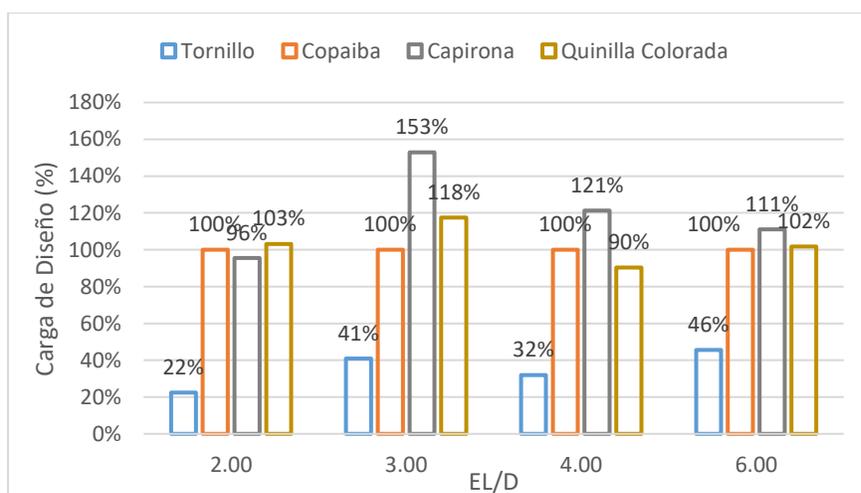
(Paredes P., 2006)

Para uniones con un $\emptyset=1/4''$ se organizaron sus valores de diseño en las gráficas 70 y 71, de donde debemos destacar la gran resistencia obtenida de las muestras de madera Copaiba, debido a sus valores relativamente cercanos en relación a los de otras maderas con un peso específico mayor como la Capirona y especialmente la Quinilla Colorada. Además, es posible identificar que la madera Copaiba presenta sus mejores valores respecto a las otras maderas cuando $EL/D=2.0$.

Asimismo, podemos establecer que la carga de diseño con un $\varnothing=1/4''$ para la madera Tornillo, madera Capirona y Quinilla Colorada representa el 30.3%, 120.3% y 103.3% respectivamente de la carga de diseño para la madera Copaiba.



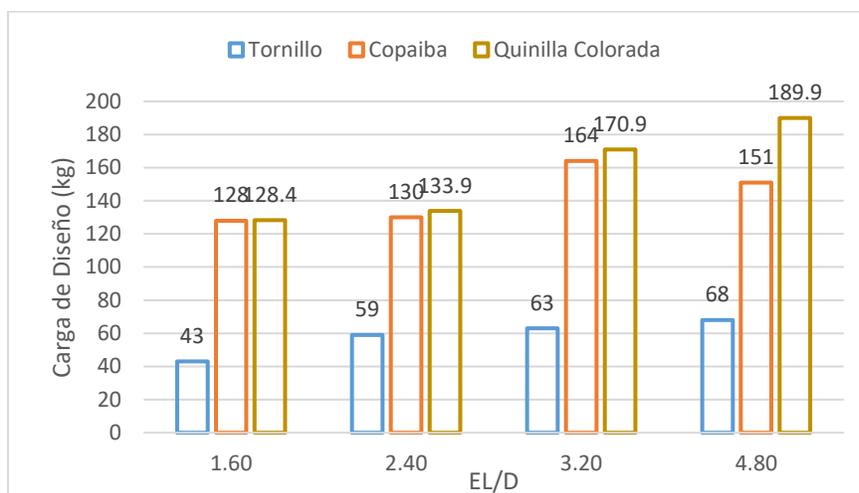
Gráfica 70. Comparativo entre relación EL/D vs Carga de diseño de cizallamiento simple paralelo de 4 especies para un $\varnothing=1/4''$



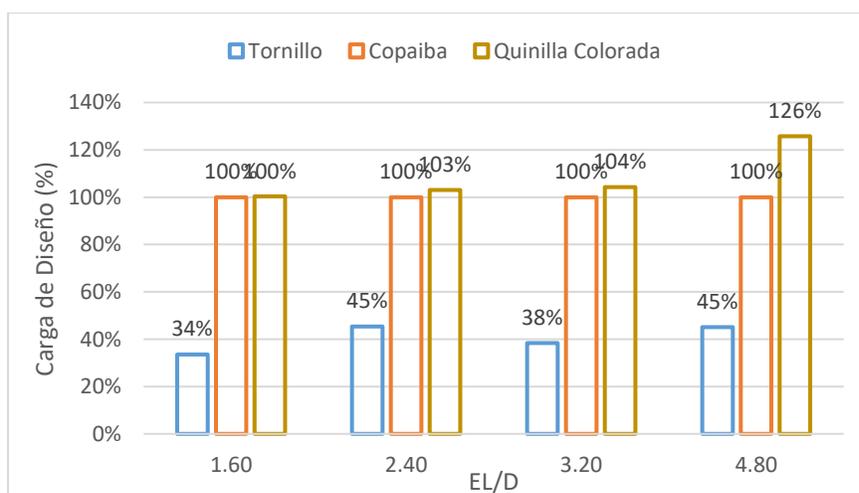
Gráfica 71. Comparativo porcentual

Para uniones con un $\varnothing=5/16''$ se organizaron sus valores de diseño en las gráficas 72 y 73, de donde podemos destacar la gran resistencia obtenida de las muestras de madera Copaiba respecto a los valores de la madera Quinilla Colorada siendo esta una madera con un peso específico mayor. Además, es posible identificar que la madera Copaiba presenta sus mejores valores respecto a las otras maderas cuando $EL/D=1.60$. (La madera Capirona no fue ensayada con un $\varnothing=5/16''$).

Asimismo, podemos establecer que la carga de diseño con un $\varnothing=5/16''$ para la madera Tornillo y Quinilla Colorada representa el 40.5% y 108.3% respectivamente de la carga de diseño para la madera Copaiba.



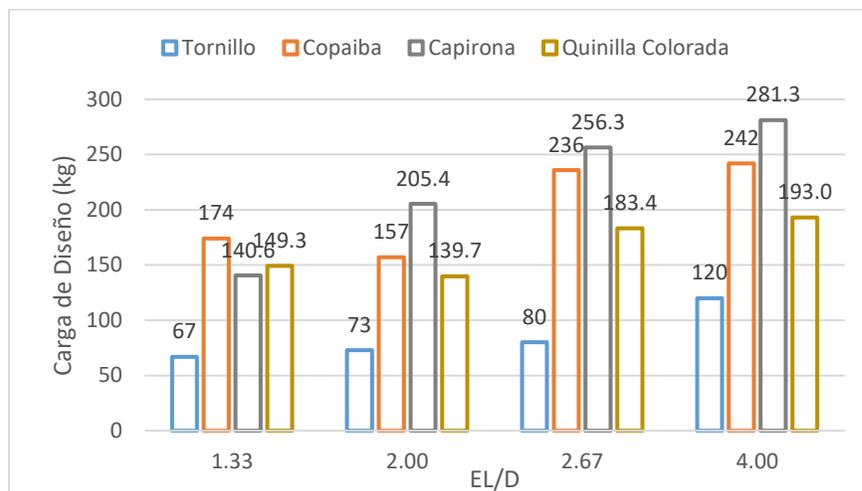
Gráfica 72. Comparativo entre relación EL/D vs Carga de diseño de cizallamiento simple paralelo de 4 especies para un $\varnothing=5/16''$



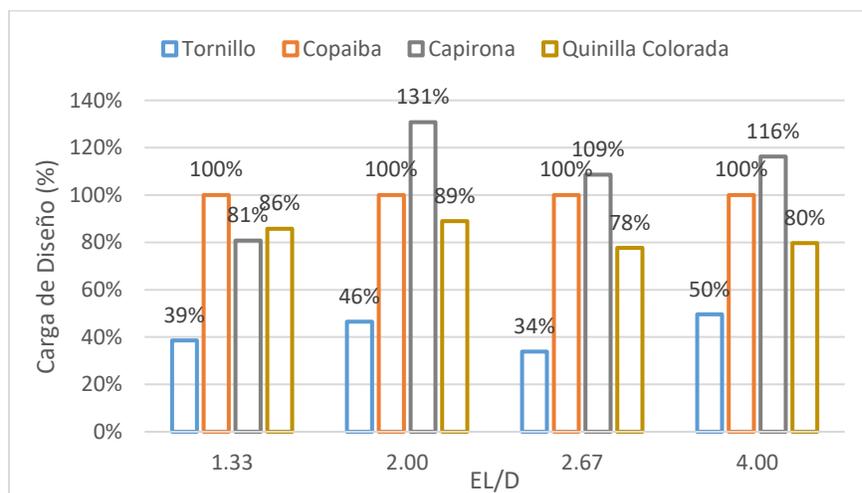
Gráfica 73. Comparativo porcentual

Para uniones con un $\varnothing=3/8''$ se organizaron sus valores de diseño en las gráficas 74 y 75, de donde nuevamente podemos destacar la gran resistencia obtenida de las muestras de madera Copaiba, debido a sus valores relativamente cercanos en relación a los de otras maderas con un peso específico mayor como la Capirona y especialmente la Quinilla Colorada. Además, es posible identificar que la madera Copaiba presenta sus mejores valores respecto a las otras maderas cuando $EL/D=1.33$.

Asimismo, podemos establecer que la carga de diseño con un $\varnothing=3/8''$ para la madera Tornillo, madera Capirona y Quinilla Colorada representa el 42.3%, 109.3% y 83.3% respectivamente de la carga de diseño para la madera Copaiba.



Gráfica 74. Comparativo entre relación *EL/D* vs Carga de diseño de cizallamiento simple paralelo de 4 especies para un $\varnothing=3/8''$



Gráfica 75. Comparativo porcentual

5.2.7.3. Cizallamiento simple perpendicular

Los valores de diseño de las especies al cizallamiento simple perpendicular se presentan en las tablas 33, 34 y 35.

Tabla 33

Valores de diseño de cizallamiento simple perpendicular para la especie Tornillo

Diámetro Tiraforón (pulg)	Longitud Tiraforón	EI (pulg)	EI/D	Carga de Diseño (kg)
1/4	1 1/2	1/2	2.00	62
1/4	1 1/2	3/4	3.00	70
5/16	1 1/2	1/2	1.60	78
5/16	1 1/2	3/4	2.40	63
3/8	1 1/2	1/2	1.33	84
3/8	1 1/2	3/4	2.00	79

(García M., 2012)

Tabla 34

Valores de diseño de cizallamiento simple perpendicular para la especie Capirona

Diámetro Tiraforón (pulg)	Longitud Tiraforón	EI (pulg)	EI/D	Carga de Diseño (kg)
1/4	1 1/2	1/2	2.00	121.4
1/4	1 1/2	3/4	3.00	164.6
3/8	1 1/2	1/2	1.33	144.5
3/8	1 1/2	3/4	2.00	202.1

(Hurtado A., 2007)

Tabla 35

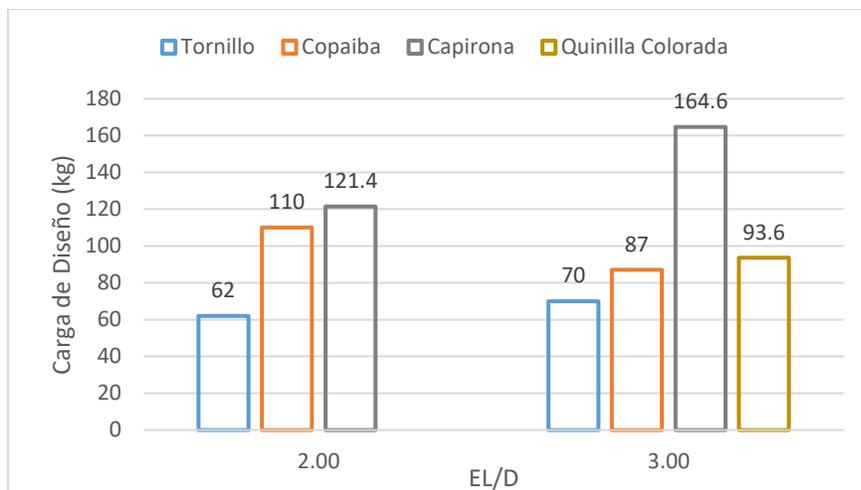
Valores de diseño de cizallamiento simple perpendicular para la especie Quinilla Colorada

Diámetro Tiraforón (pulg)	Longitud Tiraforón	EI (pulg)	EI/D	Carga de Diseño (kg)
1/4	1 1/2	3/4	3.00	93.6
5/16	1 1/2	3/4	2.40	95.8
3/8	1 1/2	3/4	2.00	97.7

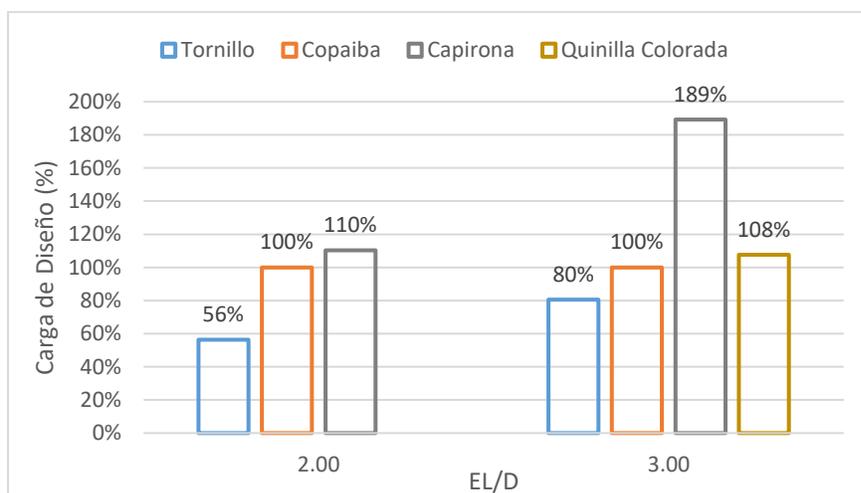
(Paredes P., 2006)

Para uniones con un $\varnothing=1/4''$ se organizaron sus valores de diseño en las gráficas 76 y 77, de donde es posible identificar que la madera Copaiba presenta su mejor valor cuando $EL/D=2.0$ respecto a maderas de mayor peso específico como la Capirona. (La madera Quinilla Colorada no ensayó muestra alguna para $EL/D=2.0$).

Asimismo, podemos establecer que la carga de diseño con un $\varnothing=1/4''$ para la madera Tornillo, madera Capirona y Quinilla Colorada representa el 68%, 149.5% y 108% respectivamente de la carga de diseño para la madera Copaiba.



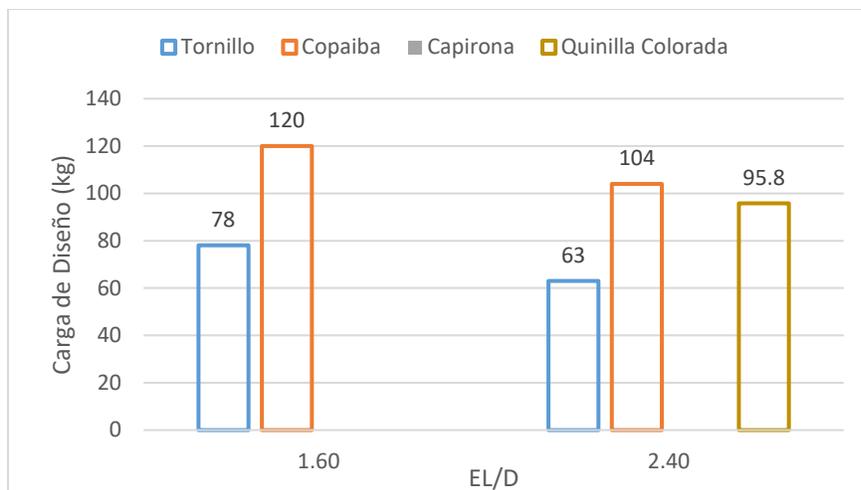
Gráfica 76. Comparativo entre relación EL/D vs Carga de diseño de cizallamiento simple perpendicular de 4 especies para un $\varnothing=1/4''$



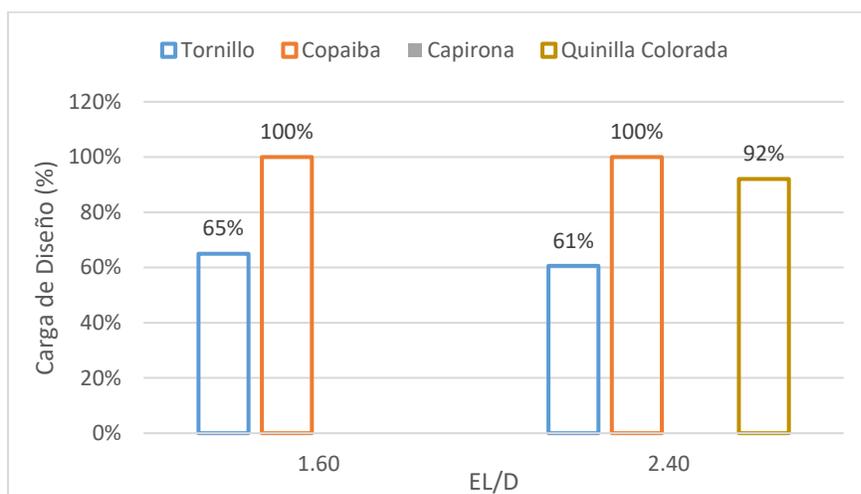
Gráfica 77. Comparativo porcentual

Para uniones con un $\varnothing=5/16''$ se organizaron sus valores de diseño en las gráficas 78 y 79, de donde es posible identificar que la madera Copaiba presenta su valor más alto cuando $EL/D=1.60$. (La madera Capirona no fue ensayada con un $\varnothing=5/16''$ y la madera Quinilla Colorada no ensayó muestra alguna para $EL/D=1.6$).

Asimismo, podemos establecer que la carga de diseño con un $\varnothing=5/16''$ para la madera Tornillo y Quinilla Colorada representa el 63% y 92% respectivamente de la carga de diseño para la madera Copaiba.



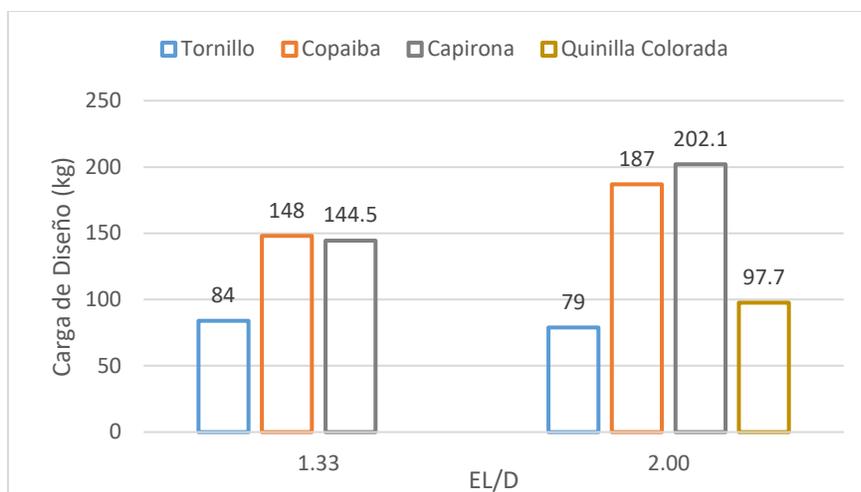
Gráfica 78. Comparativo entre relación EL/D vs Carga de diseño de cizallamiento simple perpendicular de 4 especies para un $\varnothing=5/16''$



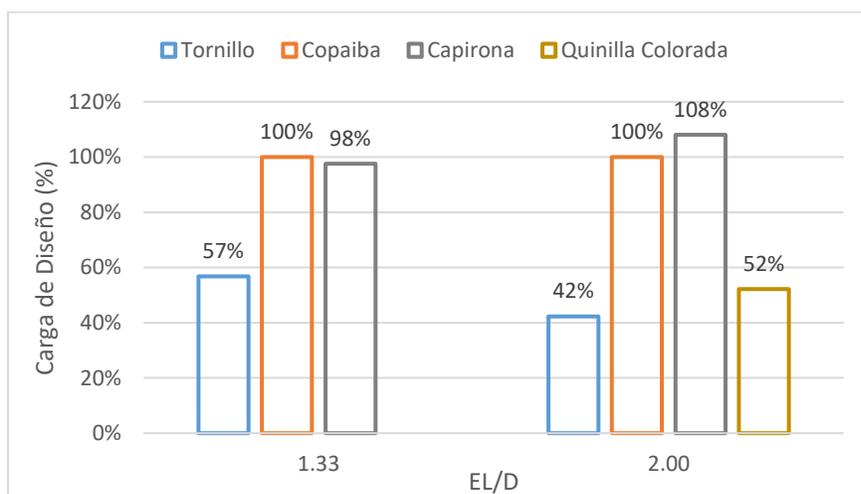
Gráfica 79. Comparativo porcentual

Para uniones con un $\varnothing=3/8''$ se organizaron sus valores de diseño en las gráficas 80 y 81, de donde es posible identificar que la madera Copaiba presenta sus mejores valores respecto a las otras maderas cuando $EL/D=1.33$. (La madera Quinilla Colorada no ensayó muestra alguna para $EL/D=1.33$).

Asimismo, podemos establecer que la carga de diseño con un $\varnothing=3/8''$ para la madera Tornillo, madera Capirona y Quinilla Colorada representa el 49.5%, 103% y 52% respectivamente de la carga de diseño para la madera Copaiba.



Gráfica 80. Comparativo entre relación EL/D vs Carga de diseño de cizallamiento simple perpendicular de 4 especies para un $\varnothing=3/8''$



Gráfica 81. Comparativo porcentual

5.2.7.4. Cizallamiento doble paralelo

Las tablas 36, 37 y 38 incluyen valores de diseño de otras especies de madera que consideraron una muestra con las mismas especificaciones.

Para el caso de la madera Tornillo con una densidad igual a 0.45 gr/cm³, la carga de diseño coincide con la hipótesis que considera una mayor capacidad de carga a medida que aumenta la densidad básica de una especie.

Para el caso de las maderas Capirona y Quinilla Colorada con densidades igual a 0.76 gr/cm³ y 0.78 gr/cm³ respectivamente, la carga de diseño también coincide con la hipótesis mencionada en el párrafo anterior.

Tabla 36

Valores de diseño de cizallamiento doble paralelo para la especie Tornillo

Tirafón		Espesor Lateral (pulg)	EL/D	Carga de Diseño (kg)
Longitud (pulg)	Diámetro (pulg)			
2.0	1/4	1/2	2.00	144.00

(García M., 2012)

Tabla 37

Valores de diseño de cizallamiento doble paralelo para la especie Capirona

Tirafón		Espesor Lateral (pulg)	EL/D	Carga de Diseño (kg)
Longitud (pulg)	Diámetro (pulg)			
2.0	1/4	1/2	2.00	224.16

(Hurtado A., 2007)

Tabla 38

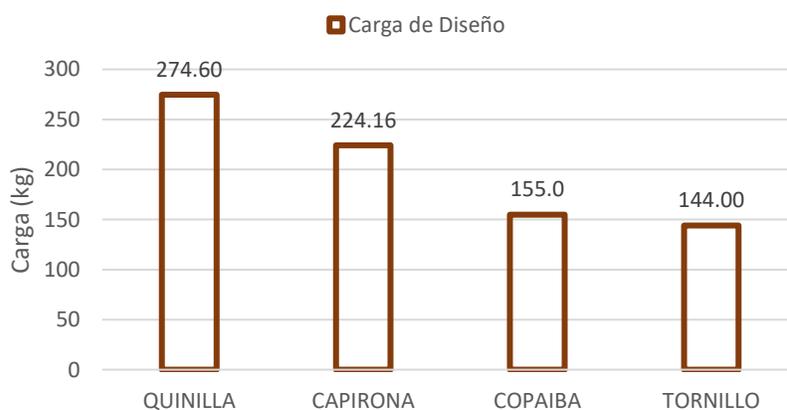
Valores de diseño de cizallamiento doble paralelo para la especie Quinilla Colorada

Tirafón		Espesor Lateral (pulg)	EL/D	Carga de Diseño (kg)
Longitud (pulg)	Diámetro (pulg)			
2.0	1/4	1/2	2.00	274.60

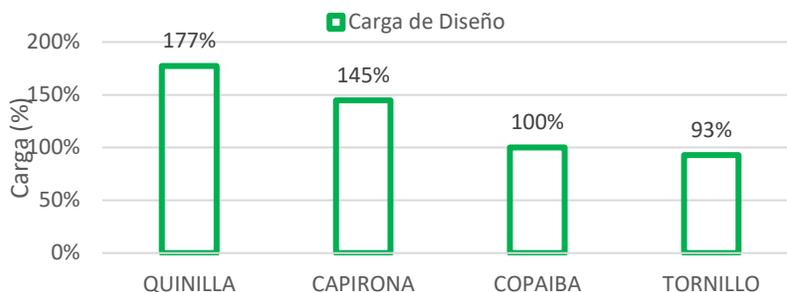
(Paredes P., 2006)

Según las gráficas 82 y 83, es posible establecer que la carga de diseño para uniones a doble cizallamiento paralelo en la especie Quinilla Colorada, Capirona y Tornillo representan un 177%, 145% y 93% respectivamente de la especie Copaiba.

Este comportamiento coincide con las bases teóricas respecto al peso específico de cada especie, siendo mayores que la Copaiba para el caso de las especies Capirona y Quinilla Colorada.



Gráfica 82. Comparativo entre Cargas de diseño de 4 especies para cizallamiento doble paralelo



Gráfica 83. Comparativo porcentual

5.2.7.5. Cizallamiento doble perpendicular

Las tablas 39, 40 y 41 incluyen valores de diseño de otras especies de madera que consideraron una muestra con las mismas especificaciones.

Para el caso de la madera Tornillo, la carga de diseño coincide con la hipótesis que considera una mayor capacidad de carga a medida que aumenta la densidad básica de una especie.

Para el caso de la madera Capirona, la carga de diseño no coincide con la hipótesis mencionada debido a ser menor a la carga obtenida con la madera Copaiba. En cuanto a la madera Quinilla Colorada, obtuvo un superior a la madera Copaiba.

Tabla 39

Valores de diseño de cizallamiento doble perpendicular para la especie Tornillo

Tirafón		Espesor Lateral (pulg)	EL/D	Carga de Diseño (kg)
Longitud (pulg)	Diámetro (pulg)			
2.0	1/4	1/2	2.00	177.00

(García M., 2012)

Tabla 40

Valores de diseño de cizallamiento doble perpendicular para la especie Capirona

Tirafón		Espesor Lateral (pulg)	EL/D	Carga de Diseño (kg)
Longitud (pulg)	Diámetro (pulg)			
2.0	1/4	1/2	2.00	174.72

(Hurtado A., 2007)

Tabla 41

Valores de diseño de cizallamiento doble perpendicular para la especie Quinilla Colorada

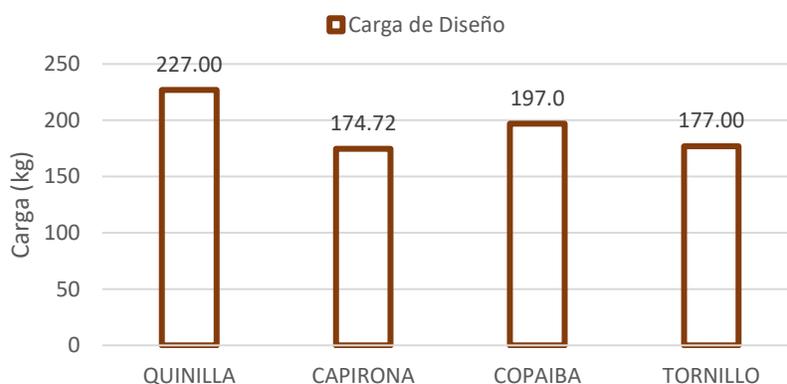
Tirafón		Espesor Lateral (pulg)	EL/D	Carga de Diseño (kg)
Longitud (pulg)	Diámetro (pulg)			
2.0	1/4	1/2	2.00	227.00

(Paredes P., 2006)

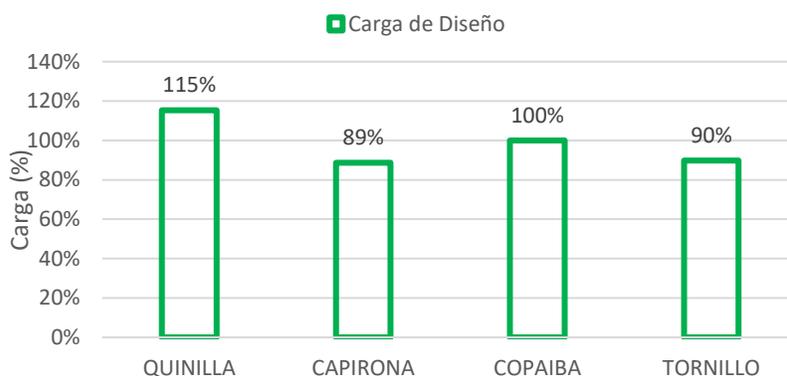
Según las gráficas 84 y 85, es posible establecer que la carga de diseño para uniones a doble cizallamiento perpendicular en la especie Quinilla Colorada, Capirona y Tornillo representan un 115%, 89% y 90% respectivamente de la especie Copaiba.

Este comportamiento un tanto contrario a las bases teóricas entre la madera Capirona y Copaiba, puede ser asociado a que las muestras de madera Capirona ensayadas tuvieron un alto contenido de humedad (CH) de 24.10%, siendo un valor bastante cercano al punto de saturación. Sin embargo, según las bases teóricas, la Copaiba presenta una mayor resistencia a la compresión perpendicular a las fibras que la madera Capirona.

Asimismo, debemos considerar que la carga de diseño para la madera Tornillo es mayor que a la madera Capirona debido a que las muestras de madera Tornillo ensayadas tuvieron el contenido de humedad ideal de 13.96% y a pesar que la misma presenta una resistencia perpendicular a las fibras menor que la Capirona.



Gráfica 84. Comparativo entre Cargas de diseño de 4 especies - cizalla doble perpendicular



Gráfica 85. Comparativo porcentual

CONCLUSIONES

El comportamiento de la unión Copaiba-Tirafón presenta para la mayoría de sus casos una falla del tipo dúctil, calificando como una unión adecuada para su uso estructural.

La Copaiba en estado seco (CH=18.04%) es un material altamente resistente a pesar de su mediana densidad, con propiedades mecánicas muy cercanas a especies mucho más densas como la Capirona y la Quinilla Colorada.

La carga admisible a la extracción directa de la especie Copaiba incrementa en mayor magnitud para un valor creciente de la profundidad de penetración del tirafón.

De los ensayos de extracción directa, se obtuvo para un diámetro de 3/8", la carga de diseño más cercana a la Capirona y Quinilla Colorada.

La carga en el límite proporcional al cizallamiento simple con un diámetro constante, incrementa en mayor magnitud para un valor creciente de la profundidad de penetración.

Para valores de EL/D comprendidos entre 1.33 y 3.00, la carga de diseño al cizallamiento simple paralelo es mayor que el perpendicular.

De los ensayos de cizallamiento simple paralelo y perpendicular, la deformación al límite proporcional representa en promedio el 12.5% y 10.6% de la deformación máxima respectivamente.

Según los ensayos de cizallamiento simple, el tirafón tiende a fallar para valores del espesor lateral (EL) a partir de 1".

De acuerdo a los modos de falla en cizallamiento, el tirafón tiende a fallar para espesores de la pieza lateral comprendidos entre 1" – 1 1/2", presentado 1 o 2 rotulas plásticas con deformaciones globales a partir de 14 cm.

La carga de diseño al cizallamiento doble perpendicular en madera Copaiba, presenta valores muy similares a especies pesadas como Quinilla Colorada y Capirona.

De los ensayos de cizallamiento simple, el porcentaje de la deformación al límite proporcional respecto a la deformación máxima, incrementa a mayor diámetro.

RECOMENDACIONES

La investigación se desarrolló con madera en condición seca de 18.04%, siendo ideal para la construcción un contenido de humedad menor que 15%, se sugiere considerar este parámetro para la selección de troncos de madera.

Es necesario desarrollar ensayos a cizallamiento doble con tirafones en ambos lados para obtener una mayor estabilidad y simetría en la unión.

Es muy importante respetar los porcentajes de diseño para los agujeros guías con el objetivo de obtener una adecuada trabajabilidad de la madera.

Es crucial contar con el apoyo de un técnico en laboratorio para el ensayo de las muestras y el diseño de accesorios para la estabilización de las muestras.

Es de suma importancia realizar una minuciosa clasificación visual de los troncos al momento de la selección identificando posibles grietas en sus fibras, ataque de insectos, entre otros; con el fin de obtener resultados confiables para una correcta caracterización.

Se recomienda aumentar la cantidad de ensayos ampliando los valores de las variables que permitan comprobar u obtener mayores relaciones que caractericen el comportamiento mecánico de las uniones en la especie Copaiba o en otras especies.

Se recomienda continuar este tipo de estudios debido a la cantidad y diversidad de variables a estudiar como: la especie de madera, número de elementos de unión, diferentes dimensiones del tirafón, planos de corte, profundidad de penetración, contenido de humedad, entre otros.

Es altamente recomendable el uso del tirafón para uniones en madera Copaiba debido a la formidable resistencia y sus tipos de falla que presenta en relación a su peso específico.

Para el diseño de uniones simples de madera Copaiba, evitar seleccionar un diámetro elevado conjunto a una profundidad de penetración demasiado corta.

Es de gran importancia trabajar en la investigación de nuevos factores de diseño o reducción nacionales por contenido de humedad, duración de carga, temperatura, protección contra el fuego, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Wood Council. (2015). *The Commentary to the National Design Specification (NDS) for Wood Construction*. Leesburg, United States of America: AWC. Recuperado el Noviembre de 2018
- American Wood Council. (2018). *NDS National Design Specification for Wood Construction*. Leesburg, United States of America: AWC. Recuperado el Enero de 2019
- ASTM. (2012). *Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood ASTM D-1761*. Washington D.C., United States of America: ASTM.
- Cámara Nacional Forestal. (2016). *Cartilla de precios de productos y servicios forestales*. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. Lima: CNF. Recuperado el Septiembre de 2018
- CORMA. (2003). *Manual para la construcción de viviendas*. Santiago, Chile: CORMA. Recuperado el Enero de 2019
- Corporación Peruana de la Madera. (2008). *32 especies forestales* (Segunda ed., Vol. I). Lima, Perú: CITEMADERA. Recuperado el Enero de 2019
- FAO. (2016). *Los bosques y el cambio climático en el Perú*. Roma, Italia: FAO. Recuperado el Enero de 2019
- FAO. (2018). *La industria de la madera en el Perú*. Lima, Perú: FAO. Recuperado el Enero de 2019
- Gálvez R., B. (2011). *Madera estructural tipología y cálculo de uniones*. Valencia, España: UPV. Recuperado el Enero de 2019
- García M., A. (2012). *Uniones estructurales con tirafones en madera tornillo (cedrelinga catenaeformis duke)*. Lima, Perú: UNI. Recuperado el Enero de 2019
- Hansen, H. (1961). *Diseño moderno de estructuras de madera* (Primera ed.). Ciudad de México, México: Continental S.A. Recuperado el Mayo de 2017
- Hurtado A., J. (2007). *Uniones estructurales con tirafones en madera capirona (calycophyllum spruceanum)*. Lima, Perú: UNI. Recuperado el Diciembre de 2018
- INACAL. (2014). *Madera: Métodos para determinar el contenido de humedad. NTP 251.010*. Lima, Perú: INDECOPI.
- INACAL. (2014). *Maderas: Método para determinar la densidad. NTP 251.011*. Lima, Perú: INDECOPI.

- INEI. (2017). *Censo 2017*. Lima, Perú: INEI. Recuperado el Septiembre de 2018, de <http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>
- INN - Chile. (2014). *Norma Chilena Oficial. NCh 1198*. Santiago, Chile: INN.
- Menacho C., G. (2010). *Uso de tirafones en uniones estructurales con la especie de madera cachimbo - cariniana domesticata*. Lima, Perú: UNI. Recuperado el Diciembre de 2019
- Ministerio del Ambiente. (2016). *La Conservación de Bosques en el Perú* (Primera ed.). (M. d. Ambiente, Ed.) Lima, Perú: MINAM. Recuperado el Enero de 2019
- Ordoñez G., P., & Lugo C., Y. (2016). *Estructuras de madera aplicadas al sector de la construcción en el Perú*. Lima, Perú: PUCP. Recuperado el Enero de 2019
- PADT-REFORT. (1984). *Manual de diseño para maderas del grupo andino* (Tercera ed.). (J. d. Cartagena, Ed.) Lima, Perú: JUNAC. Recuperado el Mayo de 2017
- Paredes P., C. (2006). *Uniones estructurales con tirafones en madera quinilla colorada (manilkara bidentada)*. Lima, Perú: UNI. Recuperado el Diciembre de 2018
- Romero R., C. (2016). *Diseño de una vivienda de madera de dos niveles con el sistema de poste y viga*. Lima, Perú: PUCP. Recuperado el Septiembre de 2018

ANEXOS

ANEXO A: Multimedia



FOTO 1: Muestras de madera Copaiba



FOTO 2: Cambio de textura de la Copaiba



FOTO 3: Listón de madera Copaiba



FOTO 4: Tronco de madera Copaiba



FOTO 5: Cepillado de un Tronco



FOTO 6: Proceso de Cepillado



FOTO 7: Corte de listones por sección transversal



FOTO 8: Corte por longitud



FOTO 9: Perforación de especímenes



FOTO 10: Especímenes a ser perforados

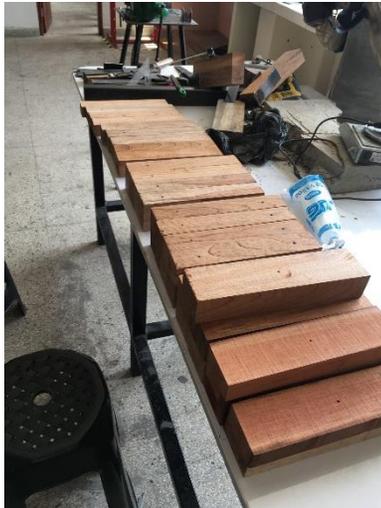


FOTO 11: Especímenes en laboratorio



FOTO 12: Especímenes empaquetados



FOTO 13: Accesorio superior para extracción



FOTO 14: Accesorio inferior para extracción



FOTO 15: Accesorio para cizalla perpendicular



FOTO 16: Accesorio para cizalla paralela



FOTO 17: Tirafones de 1/4'' para extracción FOTO 18: Preparación de probeta para extracción



FOTO 19: Ensayo de Extracción directa



FOTO 20: Especímenes a ser preparados in-situ



FOTO 21: Elementos de unión para cizallamiento



FOTO 22: Probetas de cizalla perpendicular



FOTO 23: Probetas de cizalla paralela



FOTO 24: Ensamblaje de probetas



FOTO 25: Probetas de cizallamiento



FOTO 26: Ensayo de cizallamiento paralelo



FOTO 27: Probetas de Densidad Básica



FOTO 28: Probetas de Contenido de Humedad



FOTO 30: Lectura de peso inicial



FOTO 31: Proceso de secado al horno



FOTO 32: Proceso de saturación de probetas



FOTO 33: Probetas saturadas



FOTO 34: Lectura de volumen saturado



FOTO 35: Proceso de inmersión indirecta



FOTO 36: Secado de probetas saturadas



FOTO 37: Probetas de Densidad Básica secas



FOTO 38: Falla de la muestra A.1.1



FOTO 39: Falla de la muestra A.1.2



FOTO 40: Falla de la muestra A.1.3



FOTO 41: Falla de la muestra A.2.1



FOTO 42: Falla de la muestra A.2.2



FOTO 43: Falla de la muestra A.2.3



FOTO 44: Falla de la muestra A.3.1



FOTO 45: Falla de la muestra A.3.2



FOTO 46: Falla de la muestra A.3.3



FOTO 47: Falla de la muestra A.4.1



FOTO 48: Falla de la muestra A.4.2



FOTO 49: Falla de la muestra A.4.3

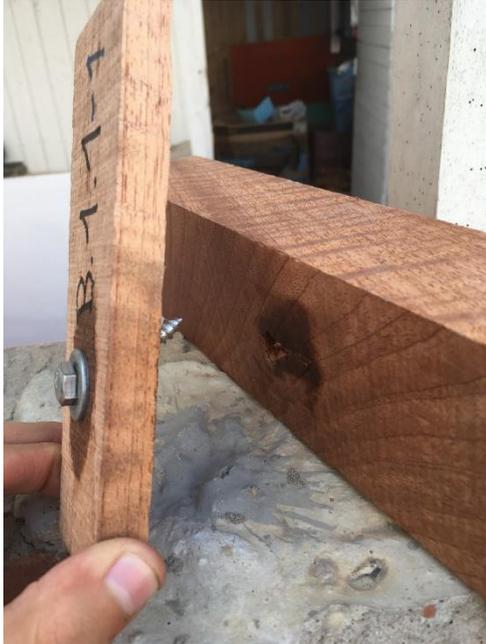


FOTO 50: Falla de la muestra B.1.1



FOTO 51: Falla de la muestra B.1.2



FOTO 52: Falla de la muestra B.1.3



FOTO 53: Falla de la muestra B.2.1



FOTO 54: Falla de la muestra B.2.2



FOTO 55: Falla de la muestra B.2.3



FOTO 56: Falla de la muestra C.1.1



FOTO 57: Falla de la muestra D.1.1

ANEXO B: Resultados de las probetas ensayadas

Tabla 42

Contenido de Humedad de las muestras de madera Copaiba

Muestra	Peso Inicial (gr)	Peso Semi Seco (gr)	Peso Seco (gr)	Contenido Humedad (%)
1	54.4	46.2	45.9	18.52
2	44.5	37.5	37.4	18.98
3	44.3	38.5	38.2	15.97
4	49.7	42.2	42	18.33
5	50.3	42.8	42.5	18.35
6	47.6	40.3	40	19.00
7	49.6	41.7	41.3	20.10
8	46.4	39.6	39.3	18.07
9	44.5	38.5	38.2	16.49
10	44.6	38	37.9	17.68
11	50.6	42.9	42.5	19.06
12	48.4	41.2	41	18.05
13	44.4	38.6	38.3	15.93
14	45.4	39.3	38.9	16.71
15	50.8	43.6	43.3	17.32
16	47.5	40.6	40.4	17.57
17	48.3	40.9	40.6	18.97
18	44.5	37.9	37.7	18.04
19	46.9	39.7	39.6	18.43
20	46.1	38.8	38.7	19.12
21	45.9	39.1	39	17.69
22	46.2	39.1	38.9	18.77
23	49.8	42	41.8	19.14
24	48	40.9	40.9	17.36
25	54	46.2	46	17.39
Promedio de Densidad (gr/ml ó gr/cm ³)				18.04
Desviación Estándar				1.02

Tabla 43: *Densidad Básica de las muestras en madera Copaiba*

Muestra	Peso Inicial (gr)	Peso Saturado (gr)	Volumen Desplazado (ml o cm3)	Peso Seco (gr)	Densidad Básica (gr/ml)
1	44.4	73	70	37.8	0.540
2	47.2	74.5	72	39.7	0.551
3	43.6	71.2	70	36.9	0.527
4	42.5	72.5	71	36	0.507
5	46.9	74.7	72	39.3	0.546
6	42.8	73.2	71	36	0.507
7	47.2	76.2	73	39.8	0.545
8	49.3	78.1	72	41	0.569
9	47.6	75.4	71	39.9	0.562
10	44.8	72.7	71	37.2	0.524
11	48.4	75.6	72	39.9	0.554
12	47.6	74.4	70	39	0.557
13	46.3	77.2	71	39.1	0.551
14	47.2	74.6	70	39	0.557
15	45.5	73.6	71	38	0.535
16	43.8	74.1	72	36.9	0.513
17	43.4	74.2	70	36.9	0.527
18	53.4	74.4	71	44.7	0.630
19	44	75.4	72.5	37.2	0.513
20	45.8	76.5	71	38.4	0.541
21	48.8	78.9	73	40.1	0.549
22	53.2	81.9	74	44.4	0.600
23	59.2	76.8	70.5	49.8	0.706
24	50.2	81.2	74	41.7	0.564
25	49.5	80.2	71	40.9	0.576
26	46.7	73.6	71	39.5	0.556
27	55.5	74.3	70.5	46.8	0.664
28	58.4	76	70	49.1	0.701
29	45.6	75.2	71	38.5	0.542
30	62.9	80	72	53	0.736
31	48.7	78.3	71	40	0.563
32	49.2	79.9	75	40.7	0.543
33	58.9	76.5	71	49.4	0.696
34	53	75.6	73	44.1	0.604
35	47.7	77.7	70	39.8	0.569
36	59.6	77.4	72.5	50.3	0.694
37	46.3	76.7	71.5	38.8	0.543
38	51.1	76.6	71	42.5	0.599
39	51.3	76.2	72	42.3	0.588
40	45.5	75.4	70.5	38.5	0.546
Promedio de Densidad Básica (gr/ml ó gr/cm3)					0.575
Desviación Estándar					0.060
Densidad Básica Teórica (gr/cm3)					0.610
% error					5.76

Tabla 44: *Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.1.1*

Muestra	Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (mm)	Diámetro Perforación Guía (mm)	Carga Máxima (kg)	Tiempo Ensayo (s)
	Diámetro	Longitud				
E.1.1-1	1/4	2 1/2	25	4	452.75	37.3
E.1.1-2	1/4	2 1/2	25	4	454.79	25.1
E.1.1-3	1/4	2 1/2	25	4	405.84	21.9
E.1.1-4	1/4	2 1/2	25	4	460.90	23.1
E.1.1-5	1/4	2 1/2	25	4	474.16	24.2
E.1.1-6	1/4	2 1/2	25	4	407.88	36
E.1.1-7	1/4	2 1/2	25	4	349.76	21.7
E.1.1-8	1/4	2 1/2	25	4	406.86	22.3
E.1.1-9	1/4	2 1/2	25	4	392.58	22.3
E.1.1-10	1/4	2 1/2	25	4	494.55	26.3
Promedio					430.01	26.02

Tabla 45: *Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.1.2*

Muestra	Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (mm)	Diámetro Perforación Guía (mm)	Carga Máxima (kg)	Tiempo Ensayo (s)
	Diámetro	Longitud				
E.1.2-1	5/16	2 1/2	25	5	637.31	21.4
E.1.2-2	5/16	2 1/2	25	5	605.70	20.6
E.1.2-3	5/16	2 1/2	25	5	592.45	20.5
E.1.2-4	5/16	2 1/2	25	5	436.43	31.9
E.1.2-5	5/16	2 1/2	25	5	469.06	23
E.1.2-6	5/16	2 1/2	25	5	464.98	25.5
E.1.2-7	5/16	2 1/2	25	5	450.71	24.7
E.1.2-8	5/16	2 1/2	25	5	471.10	34.2
E.1.2-9	5/16	2 1/2	25	5	497.61	27.4
E.1.2-10	5/16	2 1/2	25	5	567.97	22.4
Promedio					519.33	25.16

Tabla 46: *Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.1.3*

Muestra	Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (mm)	Diámetro Perforación Guía (mm)	Carga Máxima (kg)	Tiempo Ensayo (s)
	Diámetro	Longitud				
E.1.3-1	3/8	2 1/2	25	6	681.16	22.8
E.1.3-2	3/8	2 1/2	25	6	651.59	17.2
E.1.3-3	3/8	2 1/2	25	6	609.78	17.3
E.1.3-4	3/8	2 1/2	25	6	693.40	19.3
E.1.3-5	3/8	2 1/2	25	6	799.44	20.7
E.1.3-6	3/8	2 1/2	25	6	666.88	18.7
E.1.3-7	3/8	2 1/2	25	6	619.98	19.2
E.1.3-8	3/8	2 1/2	25	6	642.41	19.8
E.1.3-9	3/8	2 1/2	25	6	648.53	21.9
E.1.3-10	3/8	2 1/2	25	6	604.68	19.5
Promedio					661.79	19.64

Tabla 47: *Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.2.1*

Muestra	Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (mm)	Diámetro perforación guía (mm)	Carga Máxima (kg)	Tiempo Ensayo (s)
	Diámetro	Longitud				
E.2.1-1	1/4	2 1/2	30	4	605.70	30.5
E.2.1-2	1/4	2 1/2	30	4	503.73	33.2
E.2.1-3	1/4	2 1/2	30	4	495.57	35.6
E.2.1-4	1/4	2 1/2	30	4	651.59	43.6
E.2.1-5	1/4	2 1/2	30	4	491.50	38.3
E.2.1-6	1/4	2 1/2	30	4	652.61	44.6
E.2.1-7	1/4	2 1/2	30	4	638.33	40.4
E.2.1-8	1/4	2 1/2	30	4	592.45	37
E.2.1-9	1/4	2 1/2	30	4	544.52	36.9
E.2.1-10	1/4	2 1/2	30	4	634.25	38.8
Promedio					581.03	37.89

Tabla 48: *Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.2.2*

Muestra	Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (mm)	Diámetro Perforación Guía (mm)	Carga Máxima (kg)	Tiempo Ensayo (s)
	Diámetro	Longitud				
E.2.2-1	5/16	2 1/2	30	5	707.67	30.1
E.2.2-2	5/16	2 1/2	30	5	664.84	27.5
E.2.2-3	5/16	2 1/2	30	5	695.44	24.9
E.2.2-4	5/16	2 1/2	30	5	683.20	23.6
E.2.2-5	5/16	2 1/2	30	5	694.42	25.3
E.2.2-6	5/16	2 1/2	30	5	471.10	30.2
E.2.2-7	5/16	2 1/2	30	5	508.83	27.3
E.2.2-8	5/16	2 1/2	30	5	854.51	30.1
E.2.2-9	5/16	2 1/2	30	5	799.44	29.3
E.2.2-10	5/16	2 1/2	30	5	805.56	28.3
Promedio					688.50	27.66

Tabla 49: *Ensayo de Extracción Directa - Muestra E.2.3*

Muestra	Tirafón (pulg)		Profundidad penetración (mm)	Diámetro Perforación Guía (mm)	Carga Máxima (kg)	Tiempo Ensayo (s)
	Diámetro	Longitud				
E.2.3-1	3/8	2 1/2	30	6	846.35	24.7
E.2.3-2	3/8	2 1/2	30	6	819.84	24.3
E.2.3-3	3/8	2 1/2	30	6	876.94	21.1
E.2.3-4	3/8	2 1/2	30	6	789.25	20
E.2.3-5	3/8	2 1/2	30	6	846.35	21.5
E.2.3-6	3/8	2 1/2	30	6	609.78	16.8
E.2.3-7	3/8	2 1/2	30	6	731.12	18.2
E.2.3-8	3/8	2 1/2	30	6	801.48	20.9
E.2.3-9	3/8	2 1/2	30	6	777.01	20.8
E.2.3-10	3/8	2 1/2	30	6	836.15	21.5
Promedio					793.43	20.98

Tabla 50: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.I.1*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	99.90	0.04	125.42	0.09	175.24	0.20	148.82	0.16	125.12	0.02
	121.94	0.10	149.65	0.56	185.43	0.25	173.02	0.22	150.47	0.31
	150.65	0.47	175.33	0.74	193.74	0.35	200.67	0.56	175.32	0.39
	174.47	0.55	177.41	1.50	193.74	0.80	227.38	0.64	193.74	0.70
	199.76	0.97	199.98	2.27	197.76	0.90	250.72	1.25	199.85	0.93
	221.87	1.08	224.33	3.00	199.92	1.07	273.32	1.44	224.81	1.18
	250.84	2.16	224.33	3.49	205.96	1.21	299.66	3.42	242.68	1.99
Carga (kg)	274.27	2.45	224.84	4.01	214.11	1.40	326.06	3.85	242.69	2.50
	299.84	5.53	248.49	4.56	224.84	1.65	352.05	5.62	242.69	2.99
	325.06	6.18	273.28	5.49	234.47	2.01	376.12	5.96	242.69	3.50
	350.76	9.91	277.10	6.26	242.53	2.51	400.93	7.89	242.69	3.99
	389.53	13.11	299.71	6.74	242.69	3.00	405.85	8.01	242.69	5.00
			324.26	9.59	242.69	4.00	425.45	8.49	242.69	5.98
Deform (mm)			354.34	11.55	249.83	4.60	436.37	9.02	249.32	6.73
					273.25	5.02	436.43	10.02	266.52	7.98
					291.63	6.01	436.43	10.82	275.82	8.99
					291.63	7.51			283.70	9.98
					295.84	7.99			289.64	11.99
					300.00	8.49			291.63	13.36
					312.16	9.00				
					323.39	9.99				
					326.24	10.55				
Tiempo (s)	96.5		75.7		82.6		85.3		81.6	

Tabla 51: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.I.2*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	124.34	0.03	126.91	0.03	124.85	0.02	126.50	0.04	127.92	0.05
	149.27	0.31	150.79	0.26	148.88	0.28	149.62	0.29	149.13	0.31
	175.12	0.38	177.26	0.31	174.22	0.34	178.11	0.31	174.64	0.37
Carga (kg)	199.43	0.74	199.60	0.53	199.61	0.68	201.02	0.52	199.12	0.68
	224.20	0.82	228.14	0.60	223.68	0.78	221.41	0.59	227.66	0.75
	250.07	1.32	248.55	1.00	248.80	1.32	248.81	0.89	249.76	1.26
	275.24	1.48	274.87	1.08	273.05	1.46	274.90	1.07	276.90	1.34
	300.18	3.63	290.40	1.30	297.75	2.97	299.66	1.80	300.03	2.16
	324.77	4.16	296.48	2.00	324.18	3.35	324.89	2.00	323.12	2.39
Deform (mm)	349.39	6.04	298.01	2.59	348.61	5.29	349.27	3.14	347.42	3.59
	375.24	6.67	309.31	2.76	383.40	6.01	374.41	3.34	373.52	3.93
	377.29	8.04	340.58	4.04	389.53	7.00	398.51	4.71	397.09	5.51
	377.29	9.01	340.58	5.01	389.53	8.00	424.30	5.00	422.85	5.82
	377.29	10.18	340.58	6.02	389.53	8.74	449.81	7.11	450.70	8.04
			340.58	7.46			473.68	7.73	467.98	9.00
						485.38	10.08	487.42	11.76	
Tiempo (s)	70.2		67.8		68.9		68.5		64.1	

Tabla 52: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.1.3*

Repetición	1		2		3		4		5		
Variable	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	126.06	0.01	127.09	0.01	148.99	0.04	127.54	0.01	122.68	0.03	
	150.66	0.16	148.99	0.19	175.18	0.06	148.75	0.14	148.84	0.18	
	172.95	0.19	173.18	0.22	199.51	0.26	173.75	0.21	175.06	0.21	
	197.81	0.36	199.60	0.42	225.74	0.30	196.83	0.43	198.84	0.36	
	228.01	0.41	225.81	0.47	246.26	0.59	232.74	0.50	228.96	0.38	
	248.39	0.59	252.23	0.71	276.44	0.70	244.22	0.74	248.62	0.60	
Carga (kg)	269.91	0.63	278.33	0.76	299.67	1.11	271.92	0.86	275.67	0.63	
	300.77	0.86	299.27	1.01	324.90	1.24	298.26	1.24	295.33	0.85	
	327.63	0.91	325.63	1.07	347.24	1.95	324.95	1.34	326.45	0.88	
	351.64	1.20	347.71	1.35	375.85	2.15	349.23	1.84	347.46	1.19	
	376.98	1.27	372.29	1.41	395.64	3.23	374.71	2.03	378.20	1.26	
	Deform (mm)	397.41	1.70	403.24	1.72	424.76	3.42	403.55	2.93	396.45	1.64
		451.97	2.75	426.07	1.78	452.98	4.70	425.68	3.22	423.12	1.73
498.95		4.33	450.22	2.24	474.28	4.99	453.70	4.62	446.49	2.33	
548.52		5.74	475.04	2.41	495.65	6.34	470.12	4.84	475.61	2.46	
600.01		7.51	487.42	2.99	525.92	6.71	504.88	6.95	499.89	3.35	
641.71		10.50	487.42	4.01	528.20	8.01	524.50	7.36	550.52	4.74	
			487.46	6.03	528.21	9.04	534.32	9.54	595.34	6.20	
		492.46	6.97	545.11	10.27			650.97	8.10		
		499.72	7.35					681.16	10.11		
Tiempo (s)	48.7		52.3		45.7		42.7		48.5		

Tabla 53: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.2.1*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	174.37	0.10	124.92	0.01	125.93	0.11	125.39	0.08	124.08	0.05
	199.86	0.40	150.91	0.30	151.87	0.51	149.90	0.54	149.38	0.38
	224.32	0.52	173.35	0.42	172.50	0.64	175.12	0.68	172.30	0.48
	242.69	1.00	191.70	0.60	191.70	1.00	199.83	2.18	185.59	0.58
Carga (kg)	242.69	1.30	191.70	0.95	191.70	1.60	224.24	2.82	187.62	0.99
	242.69	1.70	191.70	1.35	193.73	2.01	250.83	4.68	187.62	1.49
	242.69	2.00	195.78	1.60	199.91	2.31	272.98	4.92	193.74	2.06
	248.80	2.53	199.35	1.82	225.24	2.65	300.79	6.20	197.82	2.20
	275.13	3.02	224.43	2.31	250.69	4.62	325.07	6.53	199.86	2.39
	301.29	5.05	240.65	2.87	275.00	5.12	342.59	9.15	224.49	2.89
	Deform (mm)	323.21	5.39	240.65	3.99	299.79	8.01			236.57
340.58		6.13	240.65	4.85	325.66	9.52			251.81	5.16
			250.08	5.34	334.30	9.90			272.91	5.53
			275.43	5.73					287.56	9.04
			299.68	7.19						
			324.09	7.41						
			348.67	8.54						
		387.49	10.74							
Tiempo (s)	66.4		85.6		83.8		80.7		71.7	

Tabla 54: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.2.2*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	124.24	0.01	150.15	0.13	150.79	0.21	149.00	0.14	149.86	0.14
	149.00	0.19	173.34	0.18	175.32	0.27	173.31	0.19	175.32	0.20
	173.21	0.24	199.85	0.43	199.61	0.60	199.86	0.50	199.85	0.64
	199.77	0.51	226.10	0.51	223.99	0.68	226.11	0.59	224.30	0.75
Carga (kg)	226.97	0.57	248.84	0.90	248.58	1.05	250.45	1.00	251.59	1.49
	250.84	0.96	274.10	0.99	275.41	1.16	275.69	1.11	276.79	1.71
	278.31	1.08	299.76	1.86	301.58	1.74	300.49	1.81	300.98	3.15
	301.31	1.74	327.28	2.07	325.40	1.92	326.01	2.00	324.26	3.50
Deform (mm)	323.75	1.96	350.52	3.53	350.78	3.18	350.78	3.21	351.28	5.43
	348.71	3.85	374.72	3.77	377.03	3.54	374.99	3.46	375.20	5.89
	376.51	4.25	399.33	5.26	401.51	5.83	399.44	5.01	381.37	7.85
	389.53	6.24	425.43	5.56	425.61	6.18	425.33	5.41		
	401.67	8.06	450.07	6.92	440.13	7.79	450.07	7.41		
		473.87	7.15	458.30	8.53	485.38	9.35			
		485.38	8.30							
Tiempo (s)	55.1		57.5		59.5		64.3		63.4	

Tabla 55: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.2.3*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	202.35	0.13	149.35	0.09	126.12	0.04	123.37	0.04	123.15	0.03
	224.60	0.16	175.26	0.14	150.78	0.27	150.66	0.28	150.65	0.22
	250.56	0.34	200.74	0.38	172.13	0.31	174.73	0.33	172.22	0.25
	275.74	0.38	224.33	0.74	199.43	0.55	198.84	0.60	199.60	0.45
	300.68	0.61	248.57	0.88	227.20	0.62	227.22	0.67	227.19	0.51
Carga (kg)	327.53	0.66	275.20	1.53	248.54	0.90	248.55	1.01	252.24	0.75
	346.52	0.94	299.77	1.89	277.74	0.98	276.76	1.10	274.90	0.79
	374.61	1.02	325.03	3.08	301.32	1.40	300.78	1.59	299.65	1.09
	401.12	1.50	350.58	3.31	323.69	1.49	322.92	1.74	327.23	1.18
Deform (mm)	426.07	1.63	374.99	4.25	347.62	2.05	348.70	2.68	348.16	1.58
	450.18	2.62	402.58	4.52	374.91	2.18	376.20	2.88	375.87	1.68
	473.36	2.85	424.17	6.06	400.79	3.21	399.40	3.65	398.68	2.28
	497.35	4.04	449.42	6.55	425.95	3.50	426.61	3.84	425.04	2.42
	525.79	4.33	467.02	7.75	451.22	5.27	449.50	4.59	448.41	3.19
	551.69	5.72	467.02	9.85	474.38	5.61	476.79	4.80	474.05	3.36
	571.85	5.96			499.78	9.48	497.54	5.62	499.59	4.65
	581.23	6.42			505.75	14.10	550.44	7.94	549.60	7.16
581.23	7.67			514.94	15.51	553.14	8.17	558.67	7.73	
Tiempo (s)	48.4		47		47.5		46.9		48	

Tabla 56: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.3.1*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	99.93	0.01	174.97	0.16	199.86	0.78	126.30	0.01	150.15	0.33
	123.73	0.04	199.86	0.40	224.34	0.99	150.84	0.26	175.13	0.38
	148.88	0.20	227.20	0.45	248.52	2.08	179.49	0.36	199.03	0.78
	174.43	0.24	249.30	0.74	274.78	2.42	197.77	0.66	225.10	0.89
	199.22	0.44	276.34	0.82	300.61	3.45	226.74	0.70	248.55	1.64
	225.08	0.49	299.54	1.24	327.23	3.63	249.52	1.07	275.57	1.89
Carga (kg)	250.84	0.92	324.23	1.38	350.50	4.41	276.13	1.21	301.57	3.19
	275.22	1.03	348.63	2.17	368.00	4.91	301.57	1.78	324.26	3.53
	300.81	2.15	376.23	2.35	400.78	5.84	324.16	1.87	349.62	4.55
	324.19	2.44	399.72	3.33	424.16	6.09	348.48	3.36	373.19	4.75
	347.71	3.77	425.45	3.52	447.53	6.91	373.34	3.65	399.06	5.47
Deform (mm)	374.98	4.06	449.80	4.42	470.52	7.22	400.81	4.88	446.07	6.32
	399.64	5.05	476.05	4.59	498.07	8.25	425.77	5.10	498.98	7.22
	425.69	5.27	498.62	5.38	548.78	9.36	450.87	6.15	552.13	8.22
	451.95	6.22	550.06	6.41	601.39	11.30	473.03	6.39	598.94	9.27
	474.09	6.44	599.43	7.39	632.21	13.30	499.24	8.36	649.00	10.61
	500.80	8.84	650.15	8.43			550.38	19.47	701.16	11.92
	534.32	14.23	681.16	9.02					749.43	13.41
									798.40	15.27
									817.80	17.04
Tiempo (s)	86.3		57.4		100.3		102.5		98.9	

Tabla 57: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.3.2*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	199.84	0.25	148.62	0.15	99.42	0.07	124.25	0.07	99.93	0.01
	224.13	0.30	172.55	0.20	128.77	0.09	148.36	0.30	121.72	0.11
	248.74	0.58	197.69	0.44	149.89	0.30	177.73	0.36	153.85	0.31
	276.30	0.66	227.64	0.51	178.82	0.35	199.54	0.60	177.84	0.36
	297.52	1.01	249.70	0.79	198.84	0.60	221.74	0.64	200.10	0.60
Carga (kg)	322.91	1.10	275.99	0.88	225.82	0.67	249.76	0.90	225.45	0.68
	347.69	1.59	299.66	1.30	250.78	0.99	273.87	0.95	248.79	0.99
	376.74	1.74	327.02	1.42	272.61	1.07	299.66	1.25	271.99	1.07
	397.62	2.42	350.77	2.12	298.74	1.51	351.47	1.68	299.77	1.48
	451.47	3.70	372.59	2.25	325.47	1.63	399.57	2.25	325.74	1.57
	501.37	4.97	398.67	3.28	348.66	2.29	447.64	2.92	347.70	1.92
Deform (mm)	545.76	6.11	424.18	3.53	376.24	2.51	499.23	3.70	376.14	2.05
	597.21	7.15	449.24	5.20	401.49	3.76	550.49	4.69	400.23	2.49
	651.95	8.27	475.11	5.68	424.64	4.05	598.77	5.84	450.45	3.48
	700.71	9.49	497.36	7.46	449.68	6.31	647.08	6.81	500.13	4.78
	752.01	11.02	550.57	11.67	476.01	6.78	702.74	7.86	546.42	5.91
	784.15	14.09	598.28	15.39	499.65	9.34	746.53	8.83	600.03	6.96
			622.25	16.39	550.12	13.14	801.18	9.73	649.25	7.98
					583.27	15.42	901.78	11.55	701.22	9.02
							970.75	13.08	754.04	10.19
Tiempo (s)	49.6		54.7		50.5		69.1		56.4	

Tabla 58: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.3.3*

Repetición	1		2		3		4		5		
Variable	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	149.86	0.25	201.64	0.29	173.10	0.12	199.85	0.21	199.35	0.11	
	173.63	0.29	225.21	0.33	199.70	0.30	224.07	0.24	224.54	0.13	
	201.63	0.47	248.61	0.51	223.30	0.34	247.77	0.42	250.65	0.27	
	222.39	0.51	280.82	0.55	247.76	0.54	276.68	0.46	276.81	0.30	
	250.58	0.74	297.61	0.74	273.88	0.59	302.28	0.66	297.73	0.44	
	274.13	0.78	326.02	0.79	301.80	0.80	326.98	0.69	323.62	0.48	
Carga (kg)	301.25	1.05	349.75	1.00	326.92	0.85	347.97	0.89	350.74	0.64	
	322.93	1.10	375.99	1.06	350.20	1.09	375.93	0.95	376.82	0.67	
	350.64	1.49	399.58	1.32	372.09	1.14	399.18	1.18	398.64	0.83	
	370.00	1.56	445.60	1.65	401.63	1.39	450.66	1.61	449.65	1.07	
	399.53	2.06	499.59	2.14	449.92	1.80	500.01	2.28	498.57	1.33	
	Deform (mm)	445.62	3.12	545.51	2.69	498.47	2.39	549.60	3.55	549.03	1.65
		500.38	4.46	600.97	3.58	550.60	3.29	601.24	5.21	592.50	2.24
548.28		6.08	651.57	4.85	598.55	4.40	649.16	7.14	650.13	2.86	
599.44		7.49	700.91	6.89	650.02	6.31	698.72	8.98	700.74	4.05	
648.75		9.37	750.05	8.78	698.46	8.29	748.96	11.19	748.30	5.45	
700.45		11.39	803.05	10.20	749.41	10.38	802.71	13.33	800.54	8.28	
746.10		13.68	847.72	12.15	799.19	13.29	849.66	15.82	899.18	11.14	
800.94	16.08	900.84	14.17	847.86	16.10	887.62	18.58	998.27	13.52		
	878.79	20.04	940.09	17.06	874.90	18.52			1068.65	15.84	
Tiempo (s)	57.2		50.8		54.2		53.5		55.1		

Tabla 59: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.4.1*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	150.13	0.17	102.10	0.01	99.87	0.08	124.40	0.15	99.96	0.01
	175.29	0.18	123.15	0.04	124.56	0.14	149.21	0.18	120.22	0.04
	200.70	0.32	149.73	0.25	150.03	0.72	174.61	0.37	145.43	0.22
	224.14	0.37	174.79	0.29	174.37	0.92	200.41	0.40	175.37	0.31
	249.92	0.68	198.56	0.53	200.07	2.02	226.21	0.60	201.26	0.53
	276.77	0.76	222.64	0.57	224.99	2.27	253.96	0.70	226.17	0.57
Carga (kg)	297.73	1.18	250.92	0.91	250.03	3.22	275.51	0.82	248.73	0.80
	324.38	1.39	274.64	0.99	274.58	3.40	289.36	1.02	274.87	0.86
	351.36	2.44	299.06	1.59	300.44	4.19	325.69	2.23	300.63	1.12
	376.28	2.88	324.66	1.86	322.57	4.32	351.34	2.70	324.12	1.18
	398.65	4.05	349.27	3.45	351.91	5.00	375.99	3.77	350.77	1.59
	450.51	5.24	375.97	3.70	372.62	5.10	397.11	4.19	374.28	1.68
	Deform (mm)	500.42	6.19	398.54	4.80	399.69	5.69	450.26	5.29	398.75
545.24		7.58	452.04	5.86	451.93	6.44	502.96	6.31	448.88	5.31
598.44		8.57	497.51	6.97	497.20	7.10	548.66	7.14	499.02	6.38
652.06		9.79	548.50	8.21	548.20	7.86	601.66	7.87	550.02	7.35
700.25		11.17	599.56	9.66	599.66	8.69	699.86	10.04	601.26	8.24
768.34		14.68	650.21	11.22	650.15	9.67	749.88	11.78	648.83	9.21
			698.65	12.90	699.30	10.80	781.97	13.61	706.05	9.93
	797.32		16.14	743.31	14.15			801.24	12.68	
		868.78	18.94					858.75	17.48	
Tiempo (s)	101.2		94.7		94.8		92.3		102.9	

Tabla 60: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.4.2*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	150.09	0.15	148.22	0.36	124.40	0.14	126.19	0.01	150.85	0.15
	175.32	0.20	176.09	0.42	149.89	0.43	148.56	0.21	173.85	0.25
	199.52	0.42	195.46	0.66	174.60	0.54	175.36	0.25	201.14	0.49
	224.01	0.46	228.32	0.78	199.33	1.04	200.79	0.44	222.21	0.62
	249.56	0.71	256.33	1.07	225.99	1.92	224.27	0.49	250.02	0.97
	269.55	0.75	276.49	1.14	250.58	2.27	248.34	0.71	274.04	1.05
	301.56	1.05	295.54	1.61	275.19	3.34	275.25	0.78	299.07	1.65
Carga (kg)	323.98	1.12	325.73	1.80	297.34	3.57	300.76	1.04	324.78	1.79
	350.48	1.49	348.39	2.87	324.14	4.31	346.32	1.58	348.48	2.82
	374.92	1.59	375.29	3.26	346.95	4.47	399.19	2.40	373.68	3.15
	399.81	2.33	398.29	4.21	376.65	5.09	449.85	3.50	398.08	4.22
	450.57	3.97	449.81	5.22	403.19	5.23	501.03	4.48	422.91	4.44
Deform (mm)	498.46	5.20	496.71	6.12	453.00	5.87	549.45	5.34	451.16	5.35
	553.87	6.11	547.46	6.97	496.27	6.41	602.90	6.07	472.06	5.53
	599.10	6.72	599.69	7.74	551.29	7.00	651.98	6.77	498.04	6.29
	645.99	7.38	654.02	8.67	604.86	7.60	697.66	7.43	549.95	7.19
	697.77	7.95	701.34	9.72	655.00	8.26	804.21	8.86	602.52	8.03
	751.65	8.56	749.07	10.78	700.44	8.92	900.18	10.39	651.76	8.92
	799.62	9.13	802.72	11.98	800.80	10.70	951.09	11.52	681.67	9.92
	898.23	10.58	899.94	17.02	899.30	12.58	1000.78	13.27		
	969.86	13.51	931.92	20.34	907.53	13.71	1011.80	15.20		
	Tiempo (s)	73		83.2		60.8		65.5		47.2

Tabla 61: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra A.4.3*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform	Carga	Deform
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	148.88	0.15	146.17	0.32	124.62	0.05	199.48	0.18	247.19	0.21
	176.23	0.19	175.93	0.37	150.36	0.28	228.45	0.21	274.72	0.24
	199.10	0.38	198.47	0.61	174.34	0.37	249.65	0.36	304.21	0.39
	224.66	0.44	223.58	0.65	201.86	0.60	276.36	0.39	326.88	0.41
	251.74	0.67	250.63	0.86	225.54	0.81	302.02	0.56	342.05	0.54
Carga (kg)	272.36	0.72	274.89	0.89	249.20	0.99	327.30	0.58	376.57	0.59
	297.24	0.99	288.26	1.07	275.44	1.07	342.37	0.73	400.02	0.74
	349.75	1.44	348.38	1.37	301.01	1.19	369.68	0.77	458.52	0.94
	399.66	2.06	399.33	1.69	352.34	1.37	395.89	0.93	491.39	1.13
	447.47	3.51	447.15	2.09	395.76	1.72	449.44	1.19	553.86	1.40
	500.99	6.31	497.08	2.72	498.48	3.34	503.48	1.46	609.84	1.71
Deform (mm)	548.20	8.32	545.73	3.69	600.53	6.48	544.55	1.76	651.07	2.15
	595.20	9.42	602.29	5.24	696.49	9.58	603.40	2.18	700.43	2.91
	644.86	10.06	651.98	6.69	802.03	11.43	650.81	2.91	806.46	6.75
	700.96	10.53	706.07	7.34	897.97	13.04	700.94	4.15	907.98	8.94
	801.67	11.48	799.05	8.44	1005.33	15.78	804.64	6.41	992.26	10.57
	900.22	12.67	897.80	9.50	1099.86	18.36	899.19	8.48	1110.33	12.94
	1001.70	15.33	1001.43	10.77			996.98	11.88		
	1025.82	18.33	1102.48	12.72			1052.39	15.20		
		1192.59	17.63			1070.68	24.52			
Tiempo (s)	66		65.7		61.2		62.5		50.6	

Tabla 62: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.1.1*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	149.66	0.30	124.40	0.04	99.93	0.02	99.93	0.02	149.92	0.19
	175.26	0.39	148.88	0.52	123.83	0.09	125.87	0.09	175.04	0.32
	200.24	0.89	175.39	0.67	149.39	0.41	150.40	0.52	199.81	0.88
	225.27	1.03	199.86	1.41	174.80	0.49	174.60	0.65	225.99	1.01
	250.33	1.95	225.86	1.63	199.87	0.89	200.04	1.29	249.21	2.04
	274.08	2.17	228.41	2.00	224.33	0.96	223.82	1.41	274.99	2.40
Carga (kg)	299.66	3.32	249.62	2.87	249.82	1.57	250.85	2.44	299.20	4.04
	324.52	3.71	274.77	3.42	275.30	1.94	274.73	2.67	324.42	4.46
	350.27	5.50	277.36	3.99	301.32	3.14	299.80	4.10	349.68	5.62
	376.27	5.79	277.36	5.01	324.23	3.49	325.58	4.44	376.62	5.78
Deform (mm)	399.85	7.46	301.32	6.08	350.77	4.63	349.73	5.96	400.69	7.05
	425.72	7.91	325.25	6.78	375.22	4.93	372.10	6.33	448.26	8.22
	449.72	10.42	326.30	9.00	399.69	6.07	399.71	7.63	500.67	9.44
	474.24	10.82	328.25	12.00	424.19	6.40	425.20	7.85	550.47	12.68
	500.82	12.99	338.52	13.25	449.62	7.56	448.44	10.10	600.73	16.44
	544.39	15.33			474.67	7.85	475.11	10.76	613.72	16.79
					499.61	10.41	500.67	13.04		
					534.32	13.33	550.61	15.73		
							583.27	17.17		
Tiempo (s)	159.4		175.9		193.2		151		193.5	

Tabla 63: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.1.2*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	124.38	0.36	100.06	0.01	101.84	0.04	99.88	0.02	101.40	0.01
	150.91	0.44	124.63	0.06	124.39	0.42	124.40	0.08	124.39	0.34
	176.77	0.84	149.86	0.35	148.78	0.50	149.93	0.39	148.69	0.41
	198.78	0.94	175.10	0.42	174.37	1.09	175.26	0.51	174.75	0.81
	226.11	1.46	200.24	0.94	198.83	1.29	198.36	0.91	199.60	0.89
Carga (kg)	250.34	1.58	224.31	1.08	224.34	2.78	225.35	1.56	226.12	1.38
	275.06	2.19	250.85	1.86	249.83	3.16	249.44	1.82	247.79	1.49
	300.81	2.40	275.12	2.12	275.07	5.65	274.81	2.85	274.30	2.15
	324.99	3.14	299.92	3.37	299.80	7.08	301.13	3.17	300.78	2.32
	350.20	3.39	324.07	3.60	324.25	12.22	325.03	5.41	326.40	3.15
Deform (mm)	374.77	4.27	349.53	5.47	327.07	12.62	350.65	6.94	350.22	3.30
	399.85	5.40	375.18	5.83			371.17	9.00	375.19	4.25
	425.70	5.74	400.67	9.16			375.26	13.56	399.71	4.53
	450.45	7.82	425.66	9.39			386.97	14.16	426.09	6.05
	474.66	8.21	450.55	10.60					450.14	6.48
	500.55	9.71	476.18	10.94					475.10	9.17
	550.51	12.69	502.71	13.91					499.96	9.69
	561.85	12.98	519.60	14.30					507.81	11.99
									552.49	14.14
Tiempo (s)	135.9		129.4		131.3		136.6		133.3	

Tabla 64: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.1.3*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	99.93	0.04	124.14	0.04	100.44	0.03	124.28	0.06	99.80	0.01
	125.73	0.11	149.32	0.25	123.87	0.10	150.41	0.32	124.40	0.25
	150.41	0.48	174.46	0.29	150.77	0.36	175.12	0.38	150.81	0.45
	173.33	0.58	199.05	0.53	174.87	0.44	199.60	0.68	175.13	0.83
	199.85	1.05	224.36	0.57	201.39	0.84	224.19	0.75	199.86	0.94
	224.29	1.15	248.61	0.83	225.33	0.94	250.67	1.10	224.59	1.34
Carga (kg)	250.82	1.80	275.18	0.88	250.34	1.41	274.04	1.17	250.57	1.48
	275.34	2.03	299.35	1.32	275.57	1.54	299.79	1.57	275.20	1.99
	298.64	2.99	324.52	1.46	299.73	2.20	323.61	1.64	299.34	2.14
	324.47	3.20	348.73	2.27	324.87	2.36	350.73	2.15	324.26	2.88
	348.51	4.16	376.77	2.46	350.27	3.24	375.04	2.24	348.56	3.08
	372.95	4.35	399.70	3.75	373.68	3.43	401.25	2.85	374.74	4.08
	397.62	5.37	424.00	4.11	400.38	4.39	424.17	2.99	399.69	4.39
Deform (mm)	424.18	5.59	450.38	5.95	424.49	4.60	449.38	3.87	451.98	5.88
	449.37	6.88	474.14	6.47	450.45	5.85	475.71	4.05	499.14	7.42
	475.12	7.13	499.20	7.79	474.91	6.13	499.70	5.02	550.36	9.44
	501.38	8.36	550.13	9.44	501.51	7.44	549.35	6.60	601.49	11.54
	550.13	11.30	577.15	11.52	549.69	9.91	598.55	9.87	649.54	14.36
	580.34	13.34			585.31	12.01	650.05	12.94	703.59	18.47
							668.84	15.19		
Tiempo (s)	102.4		96.7		106.7		108		106.7	

Tabla 65: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.2.1*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	149.90	0.08	100.44	0.03	149.83	0.36	99.29	0.02	99.93	0.05
	175.14	0.24	124.61	0.09	175.32	0.46	124.40	0.38	124.91	0.12
	193.74	0.50	150.40	0.65	187.62	0.75	148.88	0.47	144.80	0.50
	193.74	0.75	175.44	0.75	187.62	1.00	161.11	0.75	144.80	0.75
	193.74	1.00	199.83	2.04	190.72	1.20	161.11	1.00	144.80	1.00
Carga (kg)	193.74	1.35	225.38	2.32	199.86	1.41	165.38	1.25	150.02	1.13
	199.86	1.65	250.33	4.09	224.49	1.68	175.37	1.41	175.26	1.57
	224.33	2.17	275.22	4.40	236.57	2.00	199.21	1.76	192.29	2.00
	240.64	2.50	283.47	5.00	236.57	2.50	208.03	2.00	193.74	3.00
	242.69	3.00	283.48	6.00	237.59	3.00	210.06	3.00	197.81	4.00
	242.69	3.50	283.48	7.00	250.85	3.35	225.86	3.80	199.86	4.21
	242.69	4.00	300.05	7.95	275.32	3.68	250.08	4.21	224.72	4.90
Deform (mm)	249.83	4.41	326.05	8.52	285.48	4.50	259.00	5.00	242.69	5.99
	275.30	4.87	332.42	10.31	285.52	5.00	275.25	6.93	242.69	7.00
	291.63	6.00			300.30	6.03	307.95	8.51	250.79	8.23
	291.63	6.50			324.26	6.51	307.95	9.20	274.49	9.17
	291.63	7.00			330.38	7.00			291.63	10.76
	297.69	7.50			330.38	8.00				
	301.77	8.00			334.46	9.00				
	303.62	8.18			334.46	9.41				
Tiempo (s)	395.9		120.6		148.7		164.4		133.3	

Tabla 66: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.2.2*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	125.10	0.12	149.39	0.04	99.93	0.10	99.93	0.03	99.93	0.03
	150.41	0.21	174.87	0.36	124.20	0.20	125.10	0.09	124.93	0.08
	150.95	0.50	199.86	0.50	150.92	0.71	149.63	0.38	149.15	0.41
	175.29	0.73	199.86	0.70	175.39	1.08	174.49	0.46	176.39	0.50
Carga (kg)	199.85	0.90	200.37	0.80	197.82	2.00	200.05	0.84	193.74	0.75
	199.86	1.25	224.31	1.00	197.82	2.50	224.09	0.93	198.86	1.26
	224.33	1.67	248.81	1.25	197.82	3.00	250.84	1.45	226.10	1.51
	248.77	2.00	250.85	1.76	199.93	3.37	274.87	1.66	242.69	2.50
Deform (mm)	250.83	2.83	275.54	2.12	224.94	4.72	291.63	2.50	250.86	3.30
	275.23	3.30	297.75	3.00	234.53	4.99	299.79	3.46	274.78	3.76
	297.75	4.01	299.79	3.59	246.77	5.99	324.18	4.03	287.74	4.50
	297.75	5.00	324.74	4.06	246.77	6.99	350.78	7.43	291.57	5.25
	297.75	6.00	346.70	5.00	246.77	7.06	376.20	8.15	291.63	5.84
	299.79	7.01	346.70	6.00			389.53	9.60		
	305.66	7.98	346.81	6.50						
			352.77	7.19						
Tiempo (s)	113.2		127.5		106.1		118.9		110.6	

Tabla 67: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra B.2.3*

Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	99.92	0.01	201.65	0.34	99.90	0.02	99.92	0.01	99.93	0.01
	123.24	0.05	222.17	0.41	126.22	0.08	126.69	0.07	128.00	0.07
	150.37	0.27	250.72	0.66	150.79	0.32	151.93	0.35	149.89	0.34
	174.70	0.32	276.70	0.74	174.14	0.38	172.14	0.40	175.00	0.41
	199.73	0.54	295.71	0.90	199.83	0.65	200.88	0.69	199.80	0.73
	222.25	0.59	299.81	1.06	222.73	0.70	225.06	0.74	223.89	0.79
Carga (kg)	250.59	0.83	327.02	1.13	248.80	0.99	250.59	1.03	248.55	1.13
	272.12	0.86	350.59	1.53	274.80	1.06	276.32	1.09	273.25	1.22
	297.73	1.08	375.75	1.62	299.28	1.39	300.09	1.39	299.58	1.69
	328.68	1.13	393.60	2.00	326.22	1.46	324.18	1.45	326.27	1.80
	350.74	1.42	400.70	2.23	349.73	1.87	348.67	1.81	348.71	2.46
	374.82	1.45	425.31	2.37	373.02	1.96	374.72	1.88	375.25	2.68
Deform (mm)	400.42	1.78	442.54	3.00	401.25	2.52	399.18	2.30	399.85	4.04
	426.96	1.84	449.24	3.80	425.25	2.65	425.15	2.42	425.66	4.41
	449.50	2.36	476.68	4.20	450.44	3.55	438.44	3.00	450.13	6.50
	478.44	2.46	489.46	5.50	473.14	3.81	450.22	3.14	475.29	7.59
	500.04	3.29	499.94	6.54	501.42	5.37	475.00	3.30	485.38	10.02
	550.70	5.73	515.87	7.00	549.55	7.42	485.38	4.00		
	599.76	8.73	536.33	7.99	576.62	8.99	485.38	4.99		
	627.87	9.53	538.40	9.01	583.02	10.50	501.20	6.02		
		538.40	10.01			528.27	7.01			
		542.48	11.03			532.28	8.00			
						532.28	9.04			
Tiempo (s)	97.5		99.5		100.7		101.8		101.4	

Tabla 68: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra C.1.1*

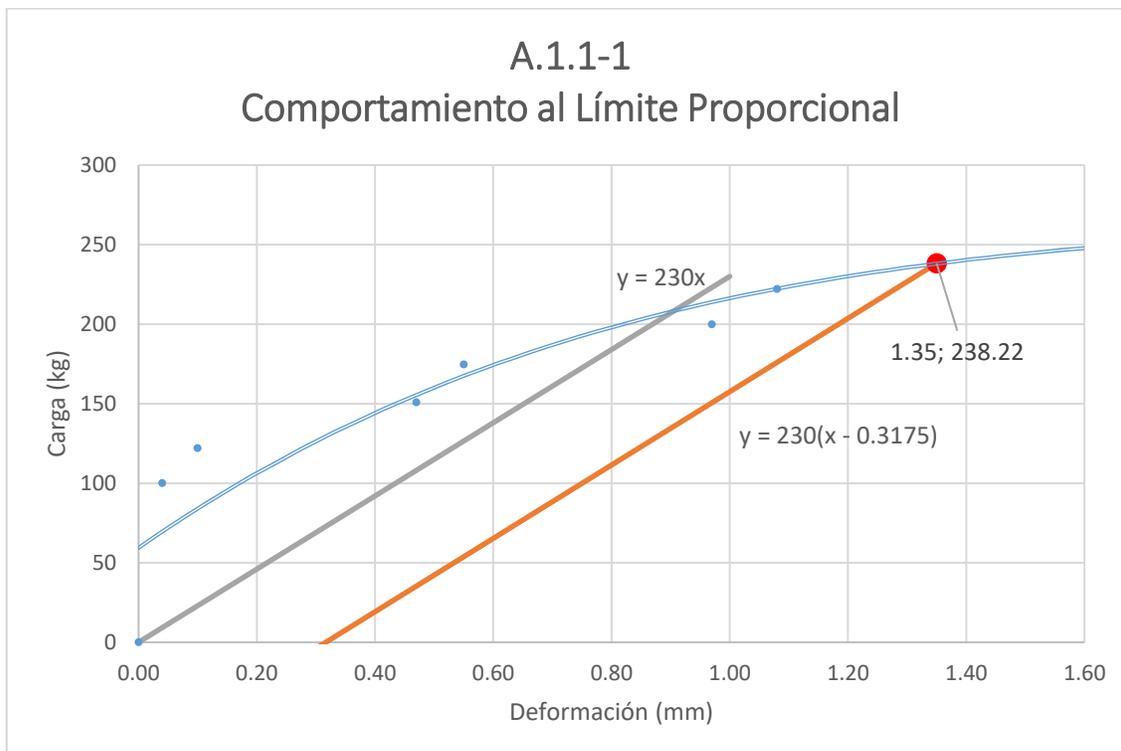
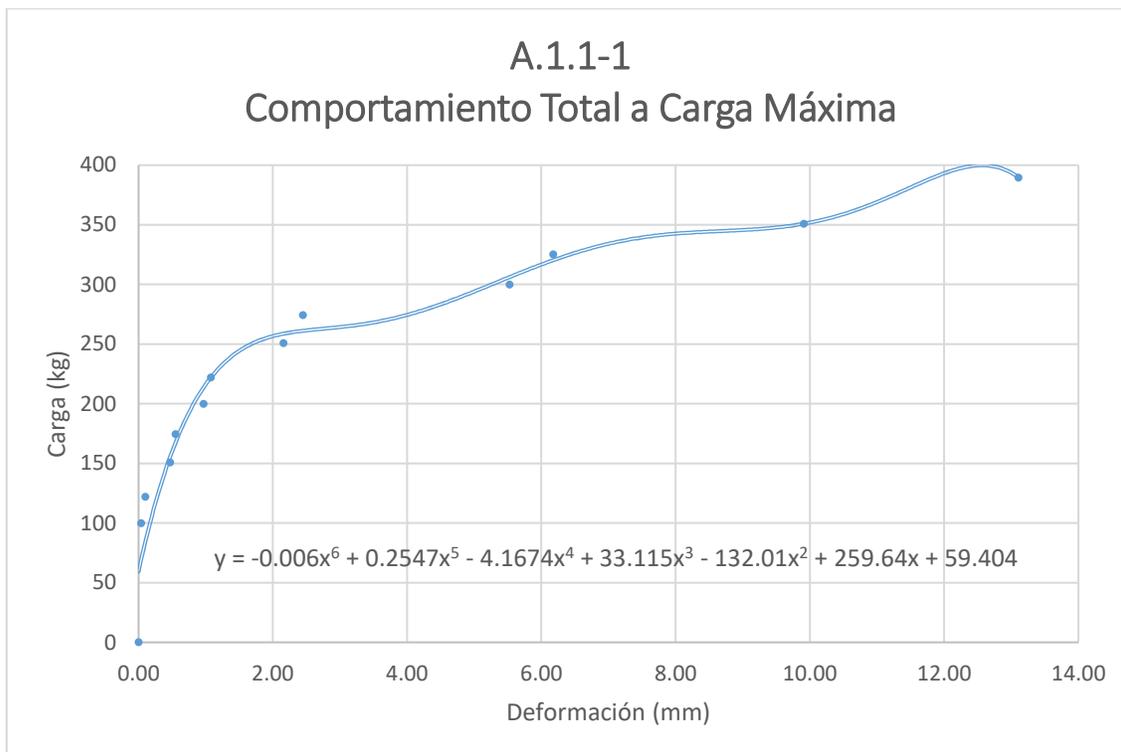
Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	149.72	0.16	123.90	0.01	99.68	0.03	103.98	0.05	125.56	0.07
	174.74	0.23	149.89	0.21	122.30	0.29	124.34	0.07	150.92	0.25
	200.77	0.54	175.20	0.25	151.45	0.35	149.81	0.28	176.88	0.31
	223.62	0.63	199.62	0.47	177.20	0.55	174.93	0.33	199.86	0.53
	250.06	1.10	226.21	0.50	202.15	0.60	200.67	0.58	226.03	0.60
	276.26	1.29	248.09	0.70	225.78	0.81	224.33	0.66	249.30	0.87
Carga (kg)	299.66	2.08	275.33	0.76	251.46	0.87	249.68	0.99	272.54	0.95
	323.99	2.24	303.17	0.97	274.13	1.11	273.14	1.11	299.79	1.41
	349.71	3.34	325.73	1.03	298.15	1.19	301.09	1.59	323.72	1.58
	378.04	3.43	350.05	1.36	327.58	1.55	325.83	1.78	349.31	2.36
Deform (mm)	401.57	4.70	374.08	1.41	350.26	1.62	350.10	2.55	373.21	2.61
	424.24	5.14	401.78	2.21	376.60	2.09	374.78	3.59	399.60	3.56
	448.67	6.70	421.66	2.36	398.99	2.20	399.93	3.99	423.12	3.78
	475.91	6.87	448.16	3.87	424.41	2.95	425.21	5.03	450.41	4.64
	502.10	9.88	474.50	4.02	451.83	3.29	450.48	5.49	473.20	4.84
	528.63	12.28	501.70	5.14	475.15	4.86	475.07	7.42	498.62	5.92
	0.00	0.00	545.00	6.31	499.35	5.32	499.28	7.96	551.96	7.65
	0.00	0.00	601.39	7.69	550.11	7.53	520.05	10.12	597.49	9.47
	0.00	0.00	632.21	11.45	590.41	11.49	0.00	0.00	636.29	10.72
Tiempo (s)	74.2		84.6		75.9		74.4		76.3	

Tabla 69: *Ensayo de Cizallamiento - Muestra D.1.1*

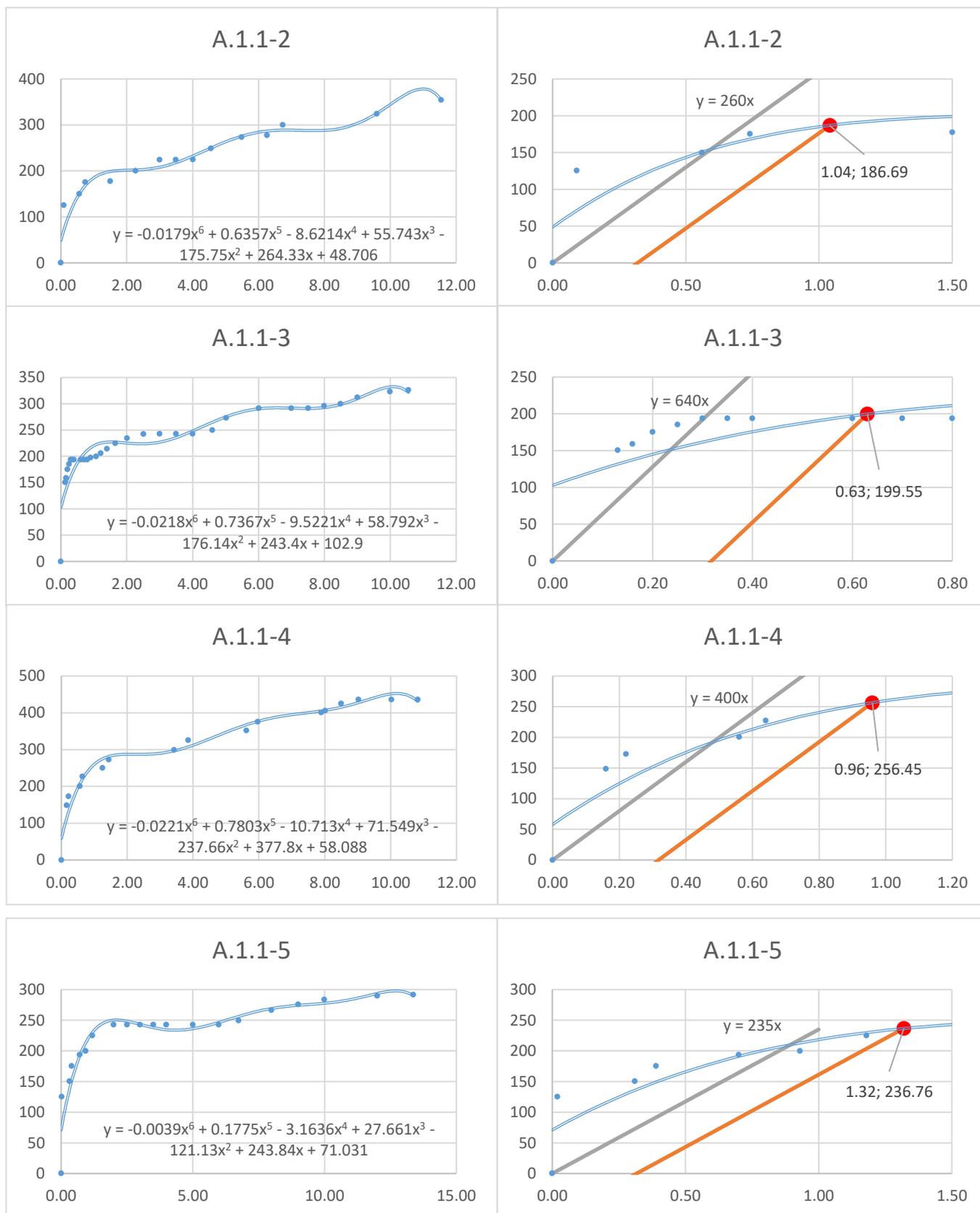
Repetición	1		2		3		4		5	
Variable	Carga	Deform								
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	126.16	0.10	151.17	0.07	150.83	0.01	124.04	0.04	74.69	0.00
	150.38	0.27	174.29	0.09	174.37	0.03	149.93	0.18	99.93	0.04
	174.34	0.31	199.86	0.22	199.15	0.15	176.87	0.23	126.25	0.08
	200.27	0.50	226.29	0.24	224.93	0.19	200.85	0.38	150.17	0.27
	227.37	0.53	249.78	0.38	250.46	0.34	223.56	0.42	174.62	0.34
	250.85	0.73	273.02	0.42	275.06	0.37	248.04	0.58	199.86	0.61
	276.58	0.76	299.58	0.62	299.05	0.53	274.57	0.64	225.26	0.68
Carga (kg)	299.76	0.93	324.29	0.68	325.87	0.58	300.81	0.82	250.08	0.99
	326.64	0.98	348.67	0.92	351.08	0.74	326.62	0.87	274.20	1.08
	351.66	1.18	374.41	1.00	374.96	0.80	350.29	1.08	300.30	1.47
	374.99	1.25	400.74	1.38	399.76	0.99	375.11	1.13	325.02	1.61
	398.08	1.44	425.08	1.49	424.51	1.28	400.67	1.40	350.56	2.20
Deform (mm)	425.13	1.52	449.94	2.20	449.54	1.43	425.13	1.48	375.59	2.40
	450.17	1.86	474.67	2.38	474.84	1.94	449.34	1.87	399.55	3.17
	473.90	1.90	500.74	3.21	499.91	2.16	474.73	2.00	424.95	3.32
	499.39	2.49	549.86	4.34	549.06	3.16	497.08	2.66	449.98	4.10
	547.39	3.53	599.33	5.64	601.92	4.27	549.02	3.75	475.00	4.32
	599.84	4.90	649.79	7.03	650.41	5.46	599.43	5.21	500.27	5.34
	651.75	6.45	700.11	8.24	700.89	6.78	649.92	6.64	549.08	6.64
	699.69	8.36	749.71	9.80	748.10	8.32	699.23	8.11	599.39	7.99
	749.32	10.44	766.31	11.65	799.50	9.87	749.37	10.44	636.29	10.03
	794.23	13.39	0.00	0.00	813.72	11.51	783.13	12.23	0.00	0.00
Tiempo (s)	184.2		222		228.3		216.3		182.4	

ANEXO C: Gráficas de Esfuerzo vs Deformación de las probetas ensayadas

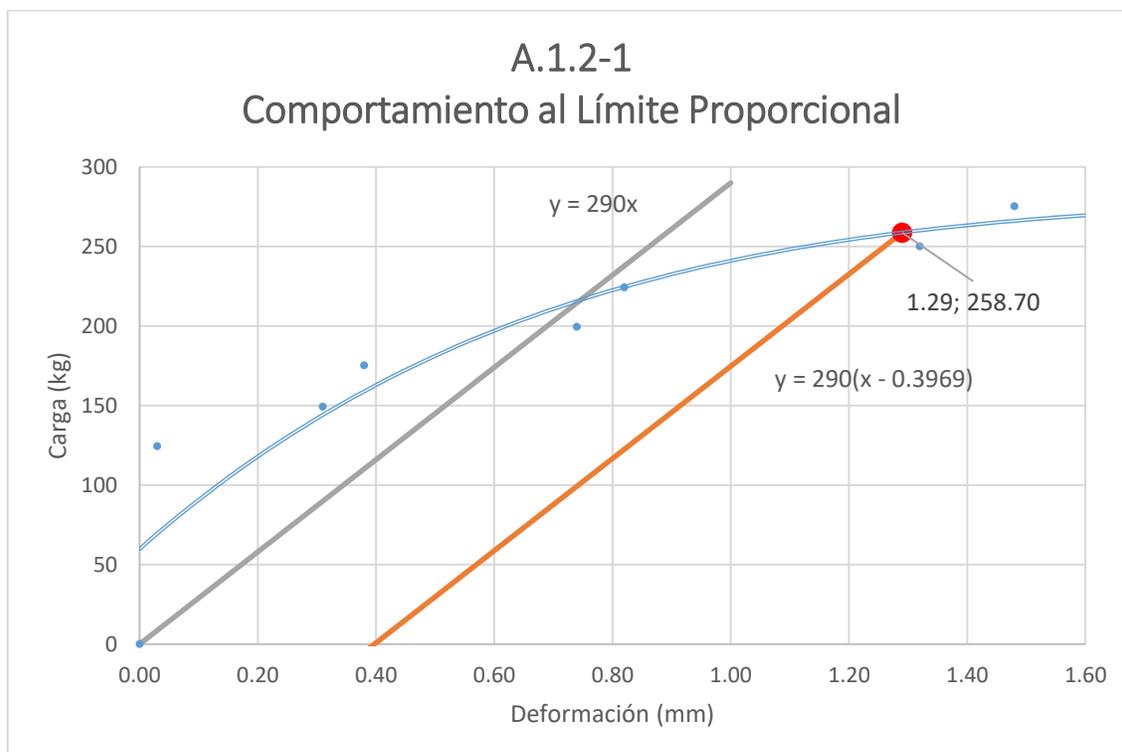
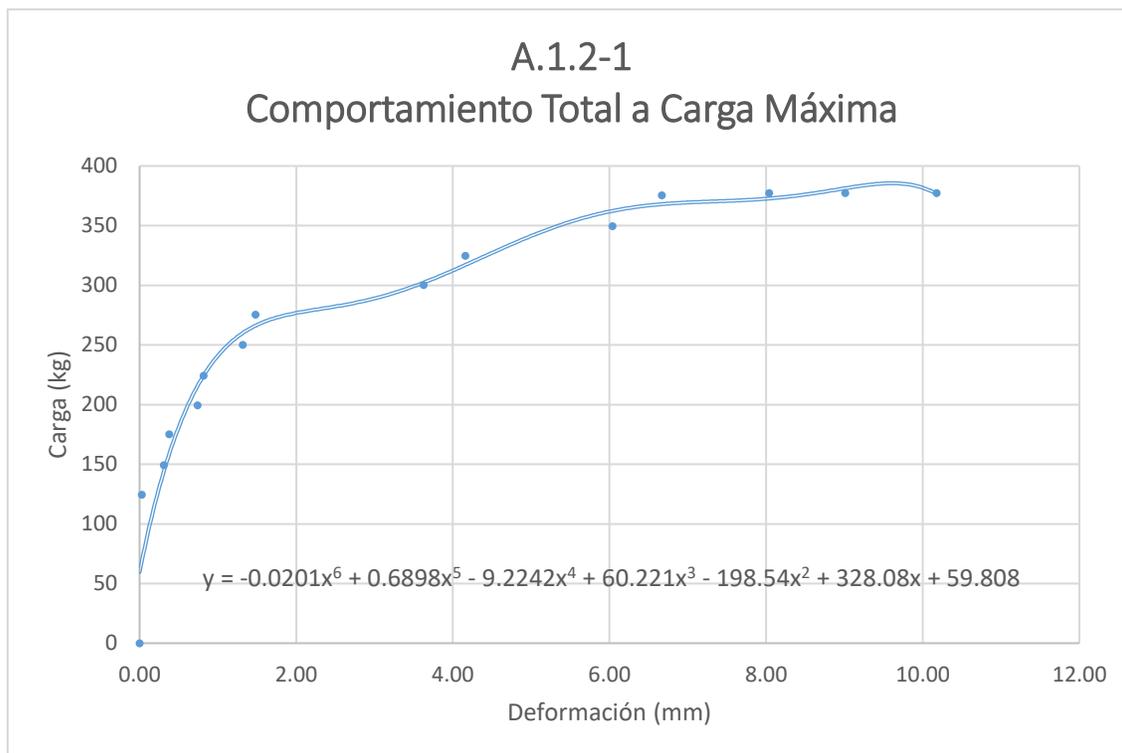
Gráfica 86: Repetición 1 de la muestra A.1.1



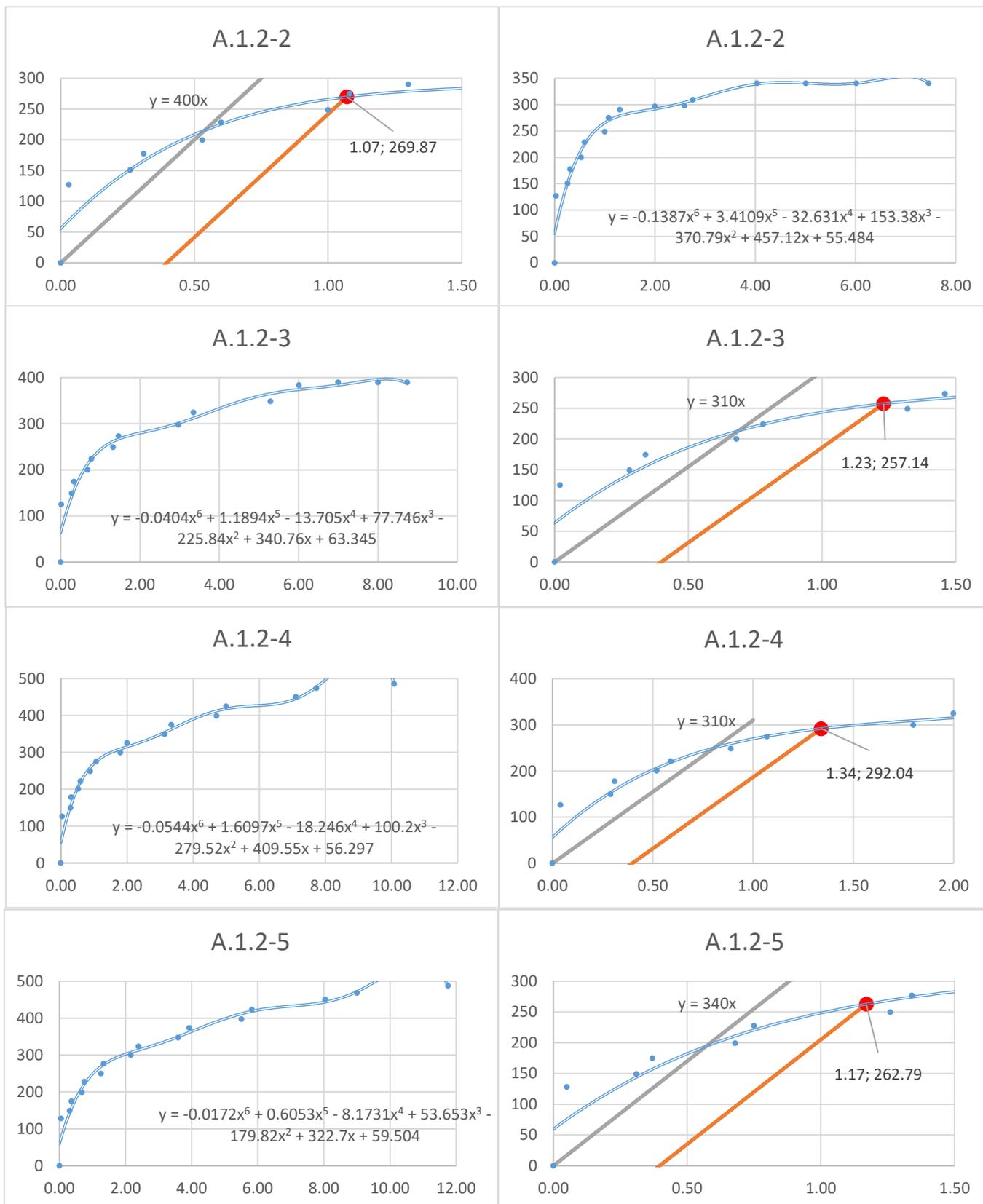
Gráfica 87: Repeticiones 2-5 de la muestra A.1.1



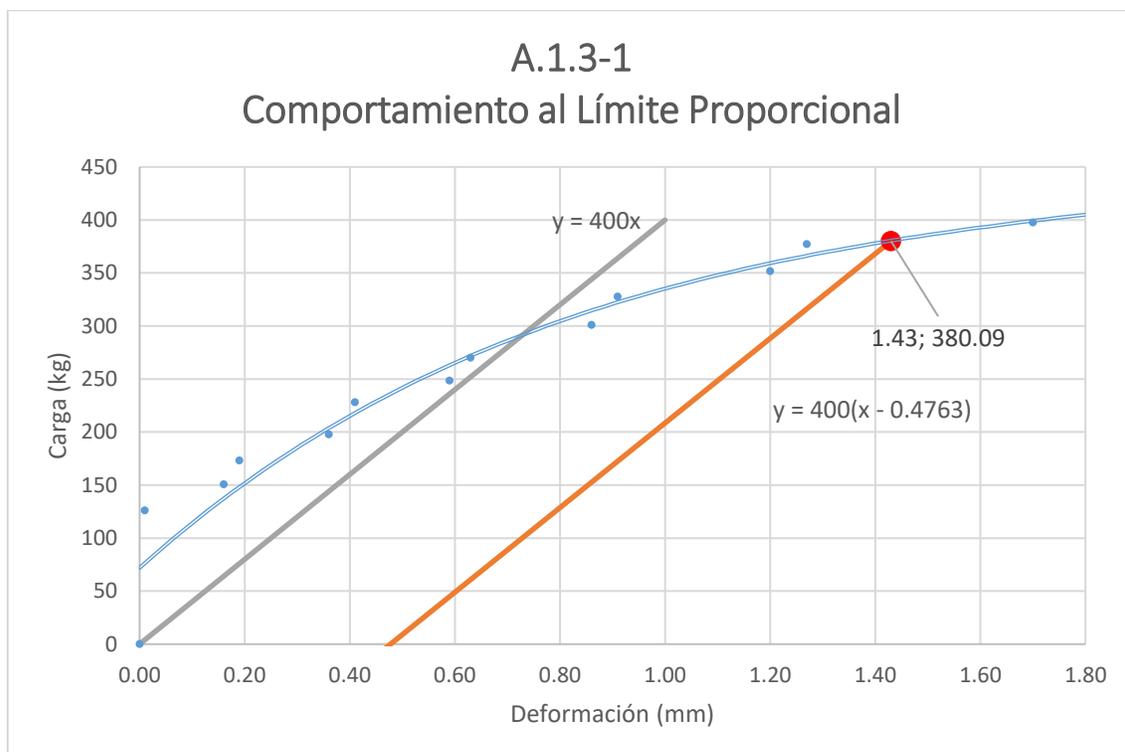
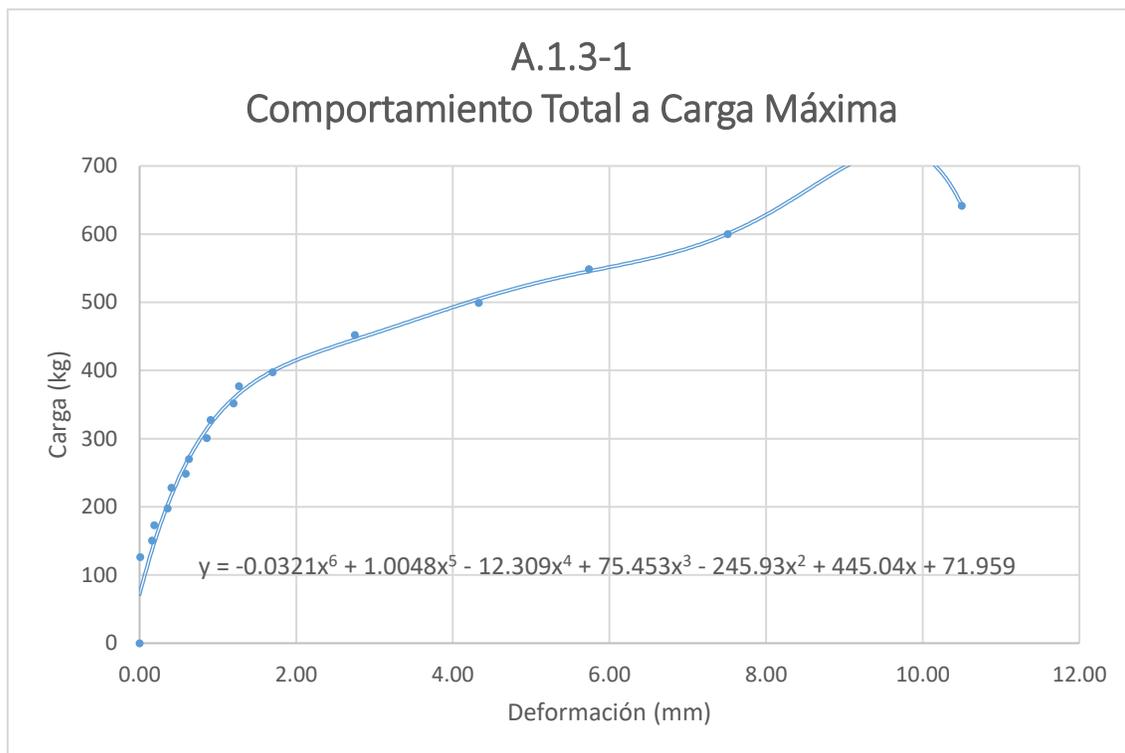
Gráfica 88: Repetición 1 de la muestra A.1.2



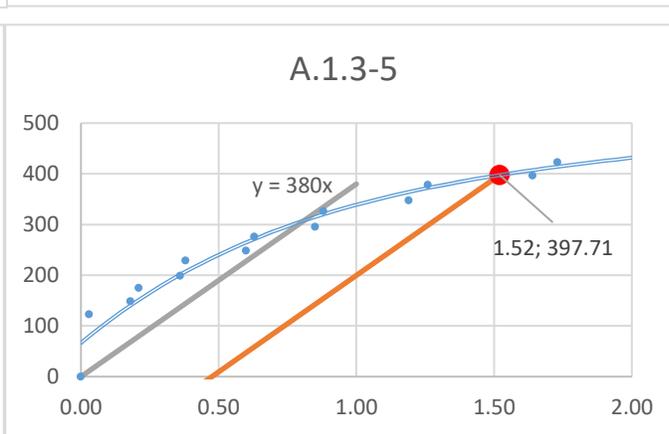
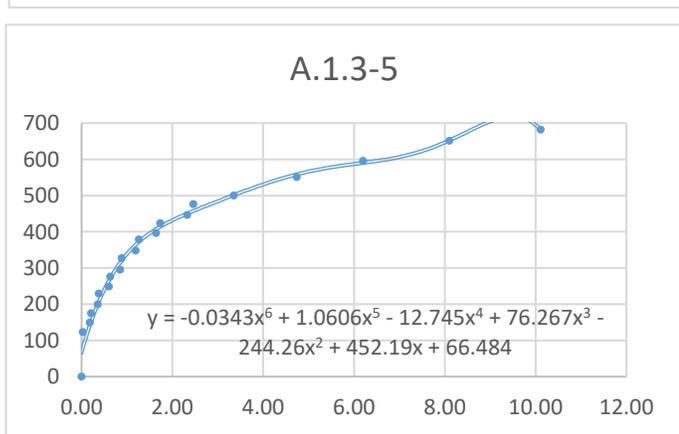
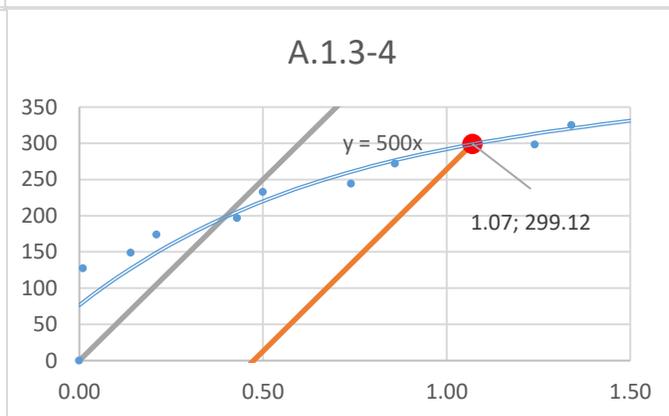
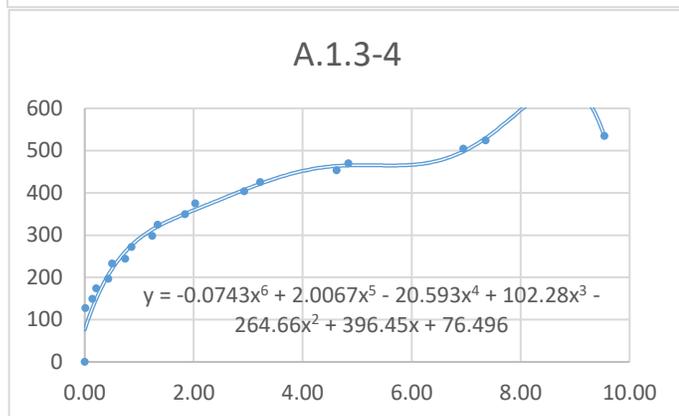
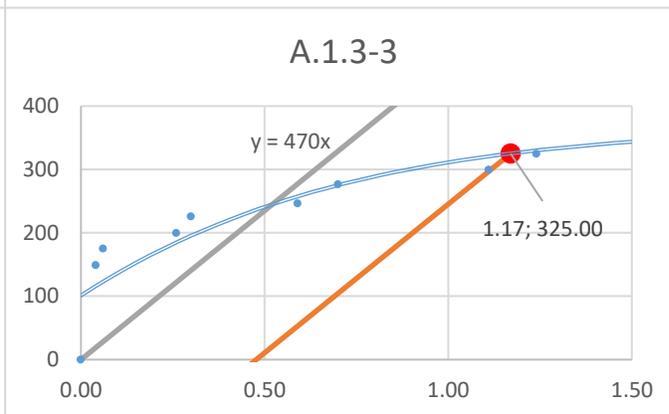
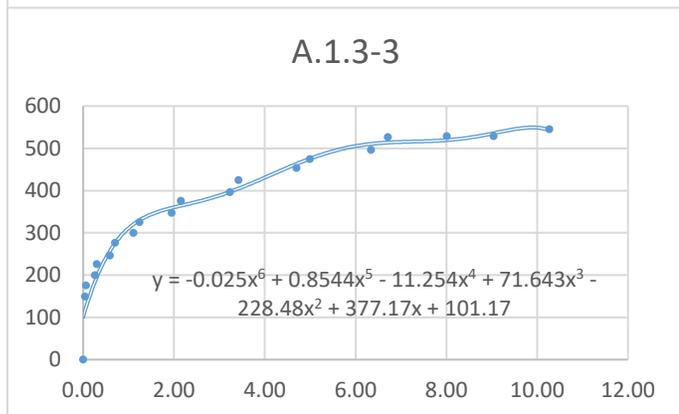
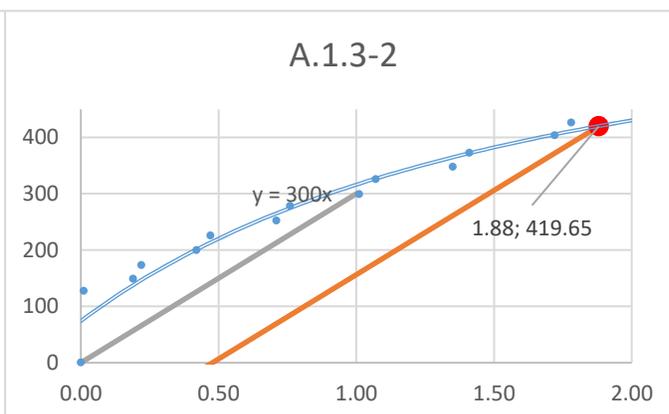
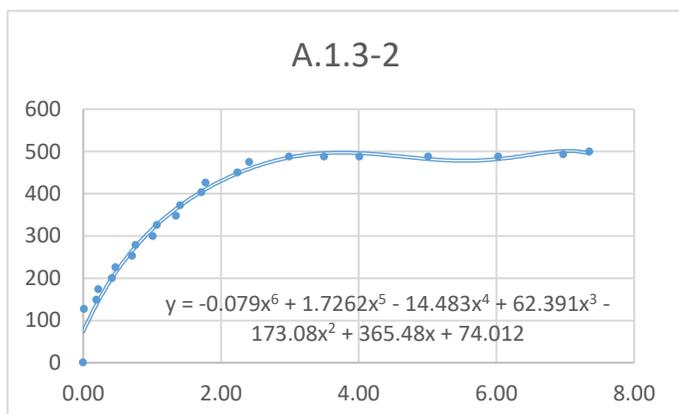
Gráfica 89: Repeticiones 2-5 de la muestra A.1.2



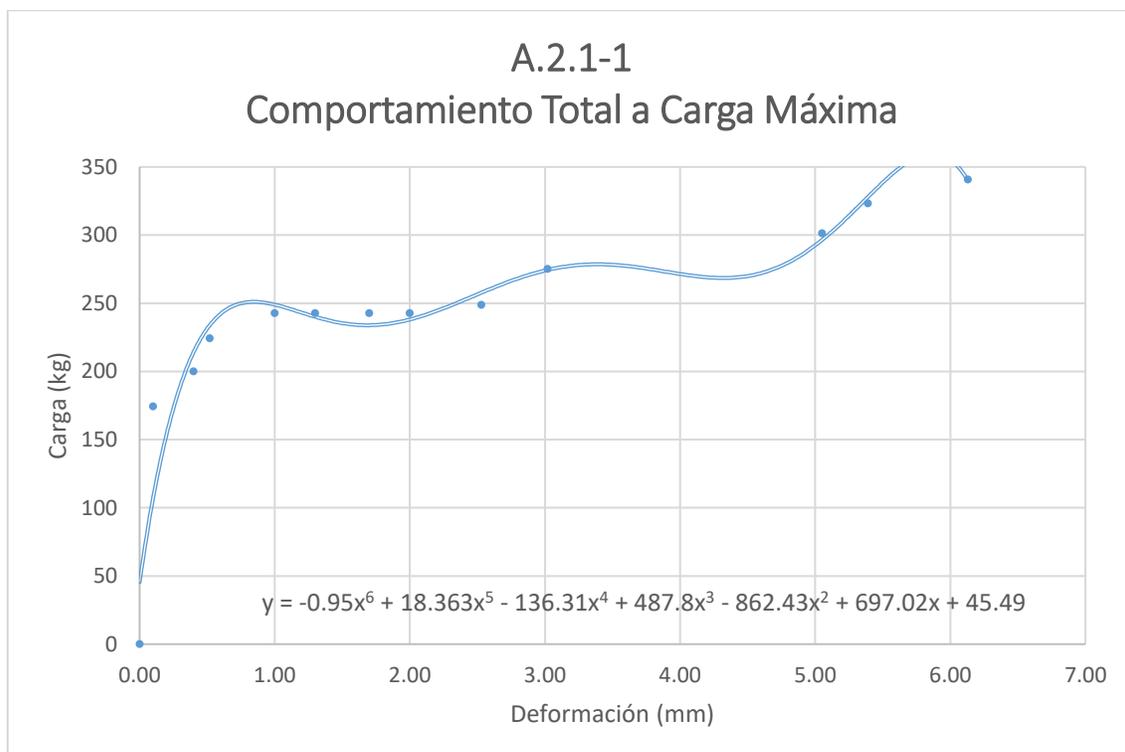
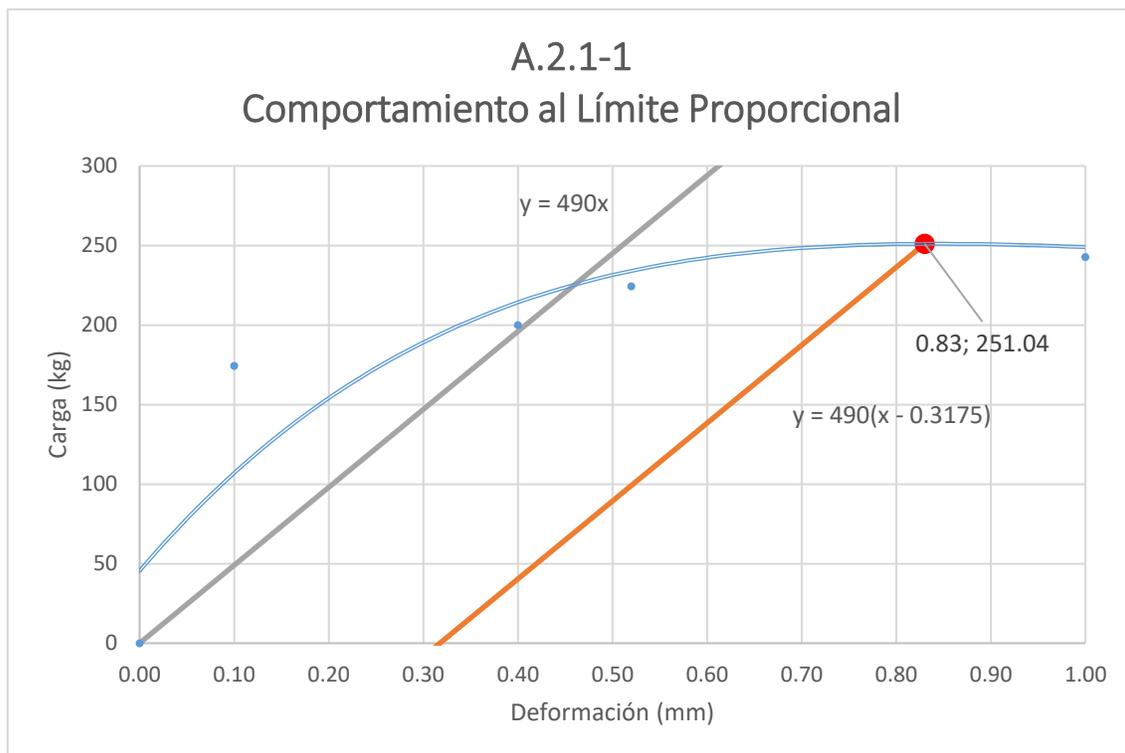
Gráfica 90: Repetición 1 de la muestra A.1.3



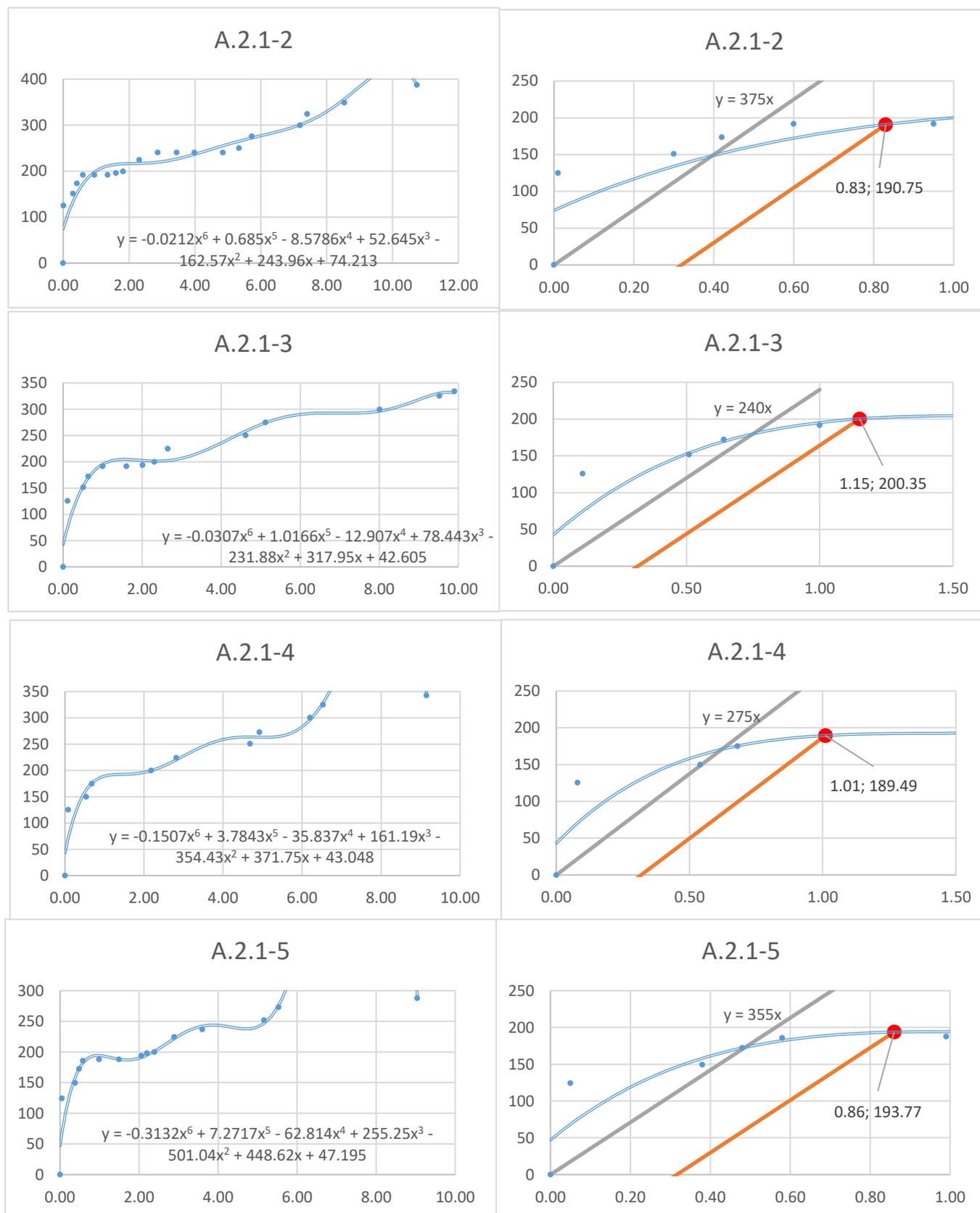
Gráfica 91: Repeticiones 2-5 de la muestra A.1.3



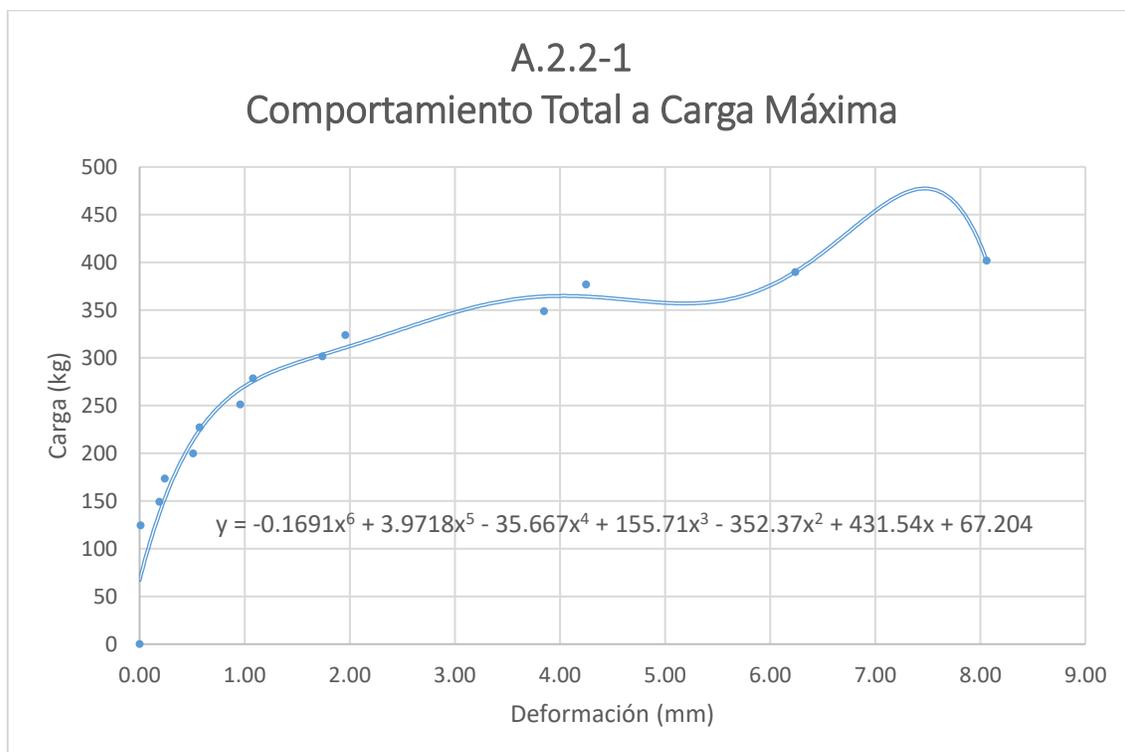
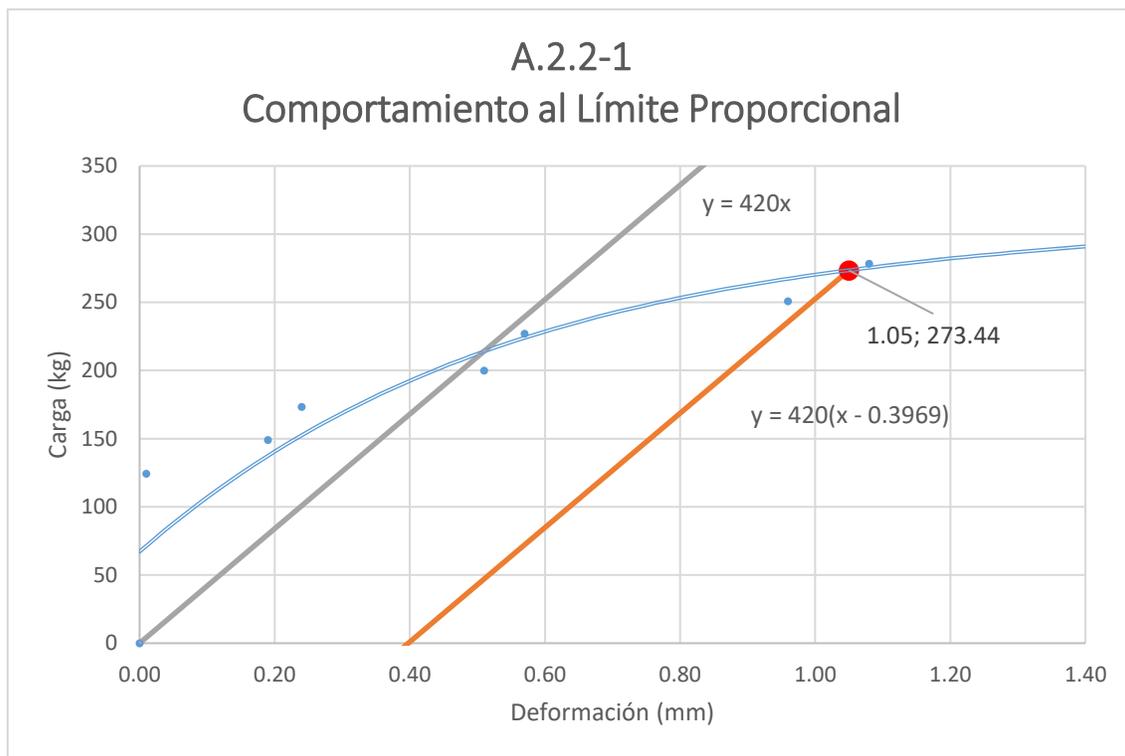
Gráfica 92: Repetición 1 de la muestra A.2.1



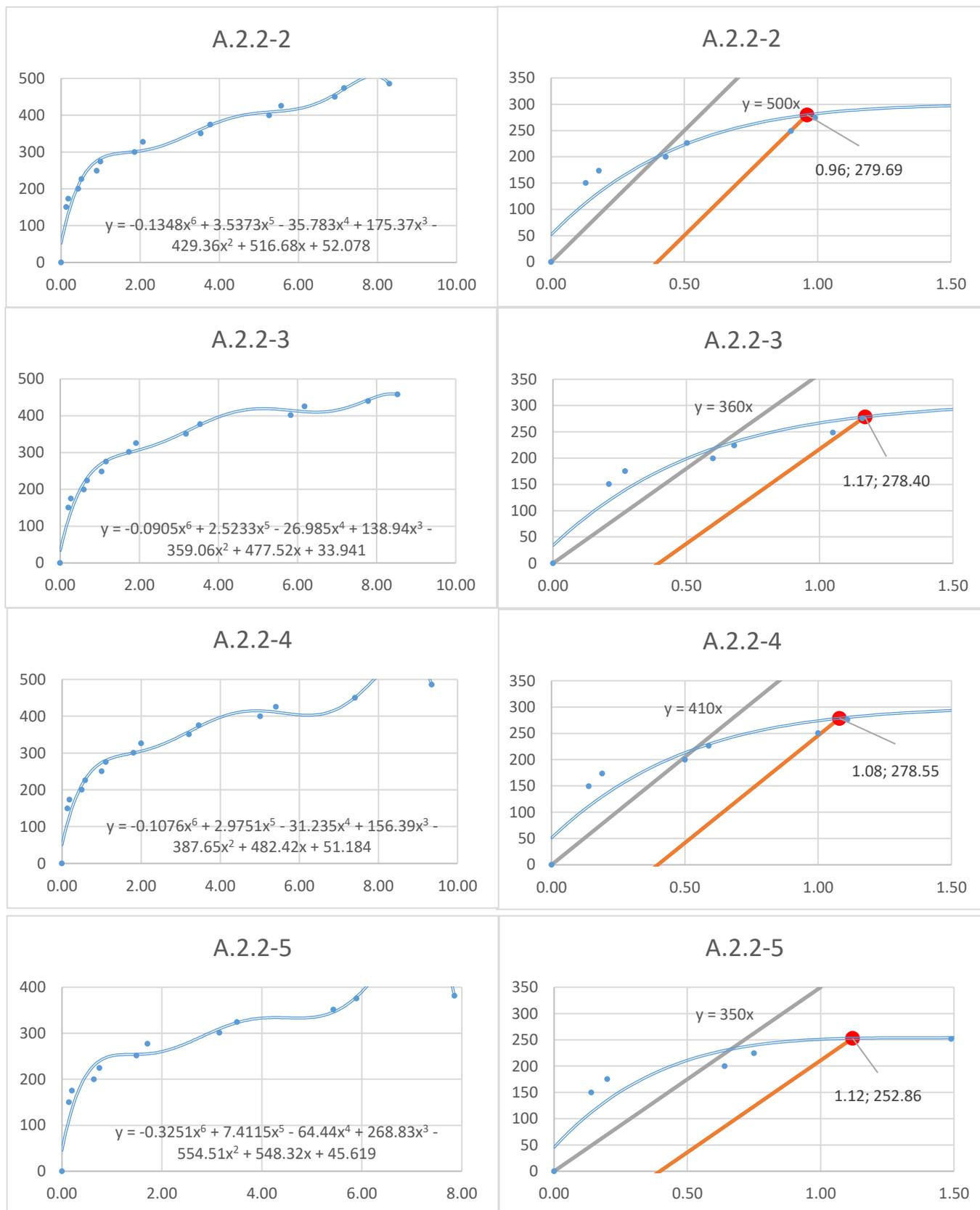
Gráfica 93: Repeticiones 2-5 de la muestra A.2.1



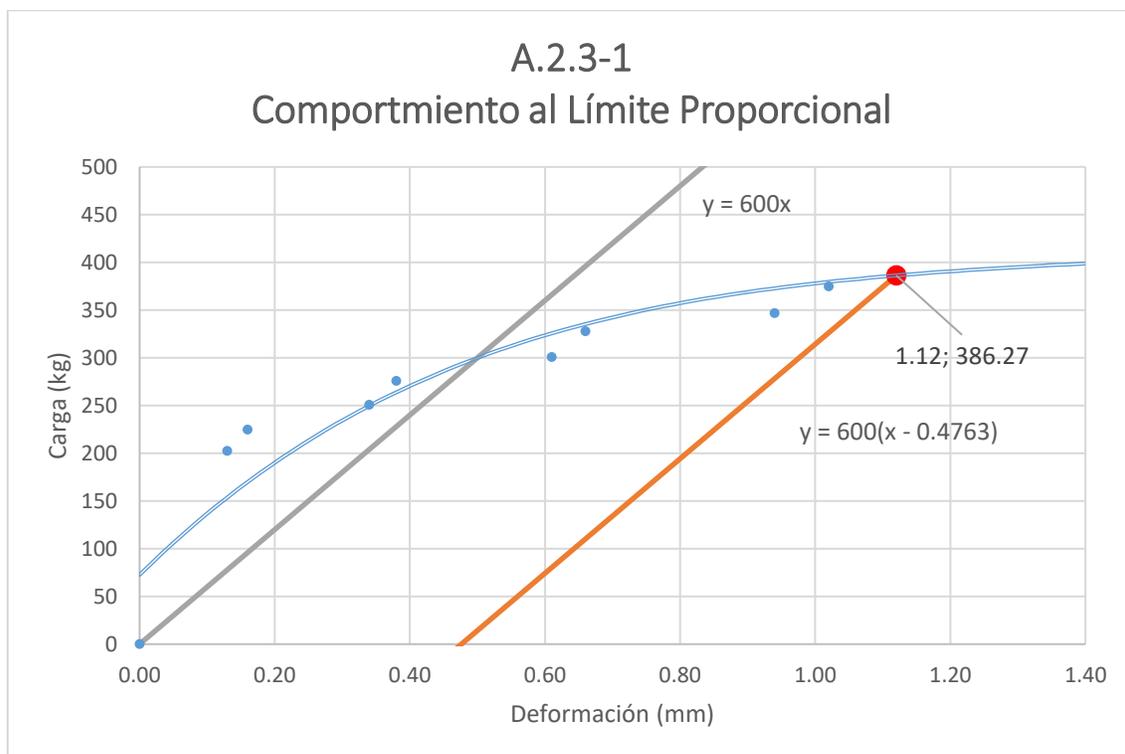
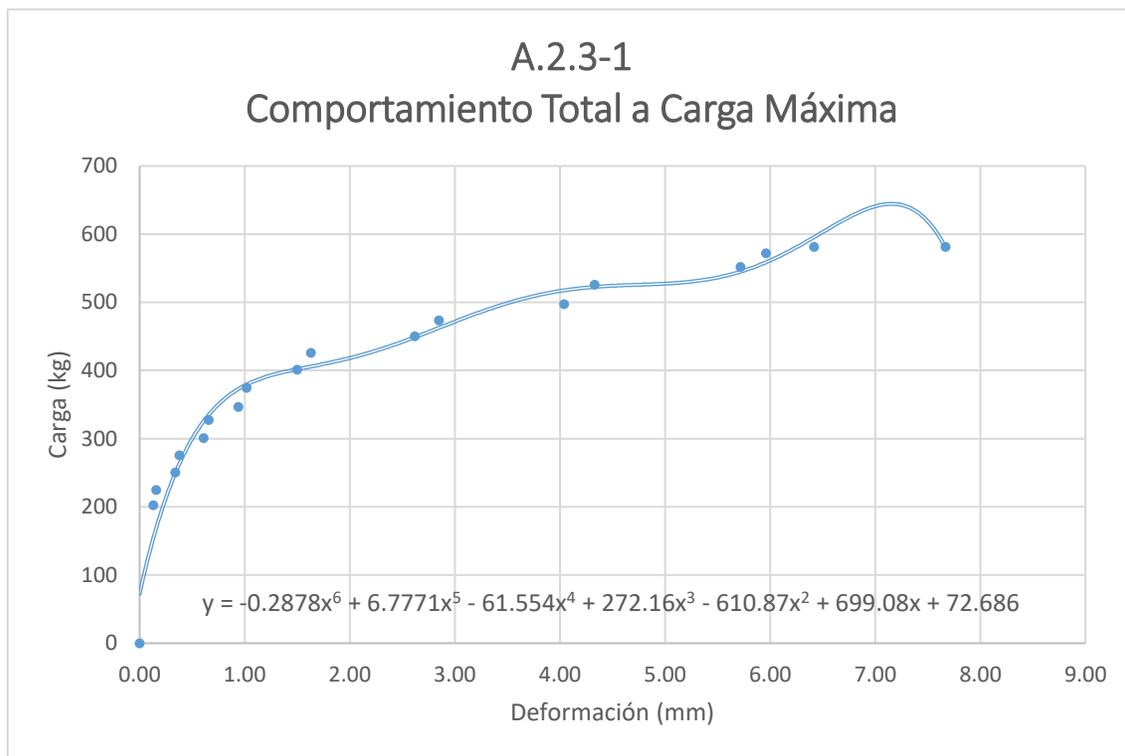
Gráfica 94: Repetición 1 de la muestra A.2.2



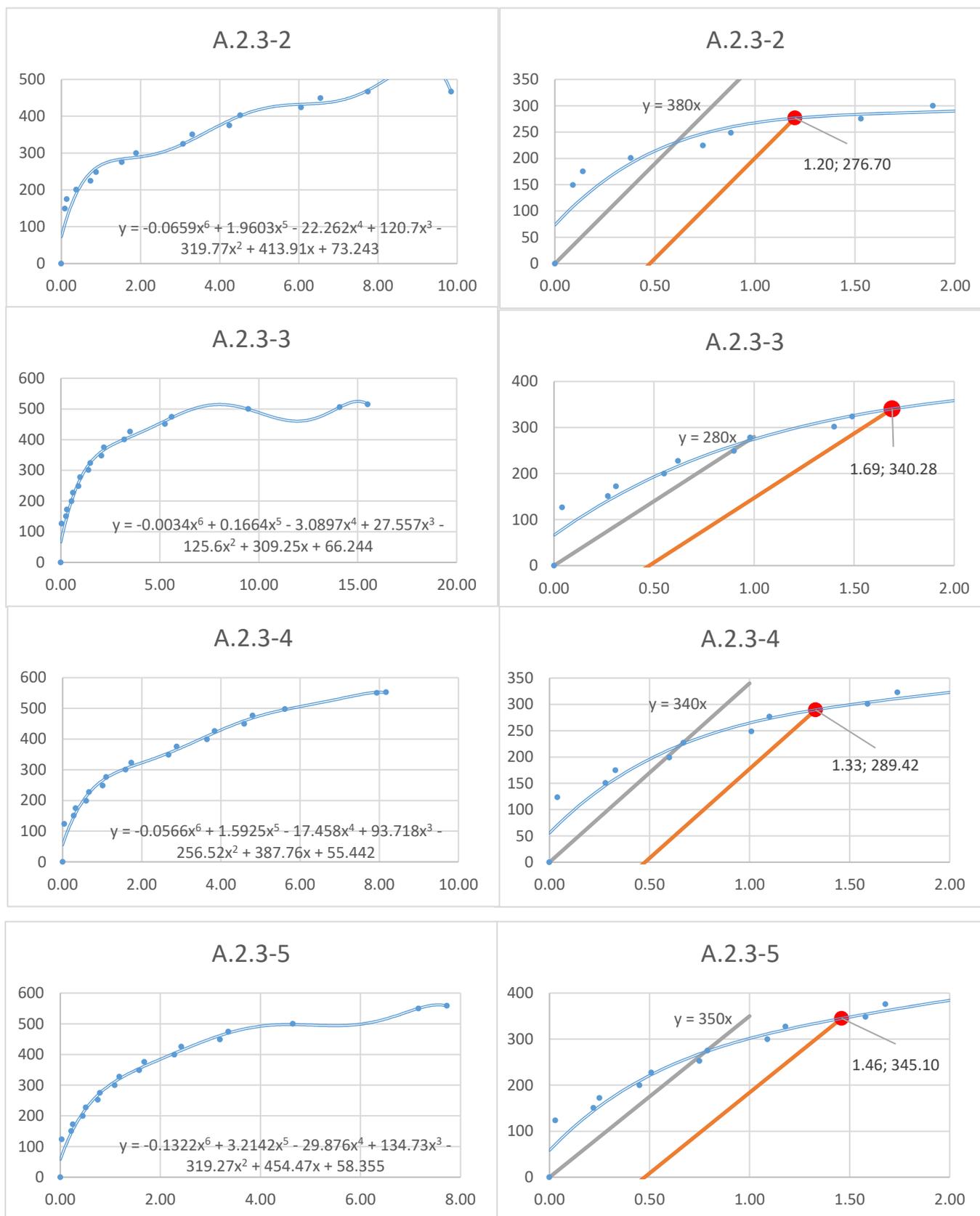
Gráfica 95: Repeticiones 2-5 de la muestra A.2.2



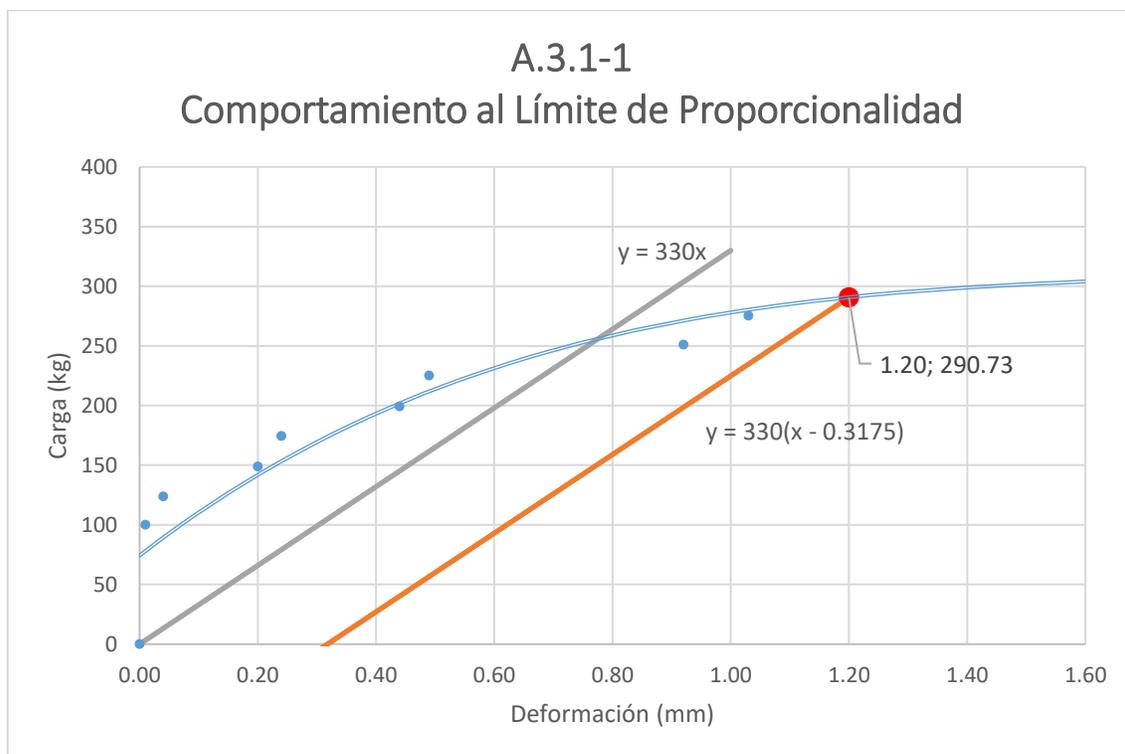
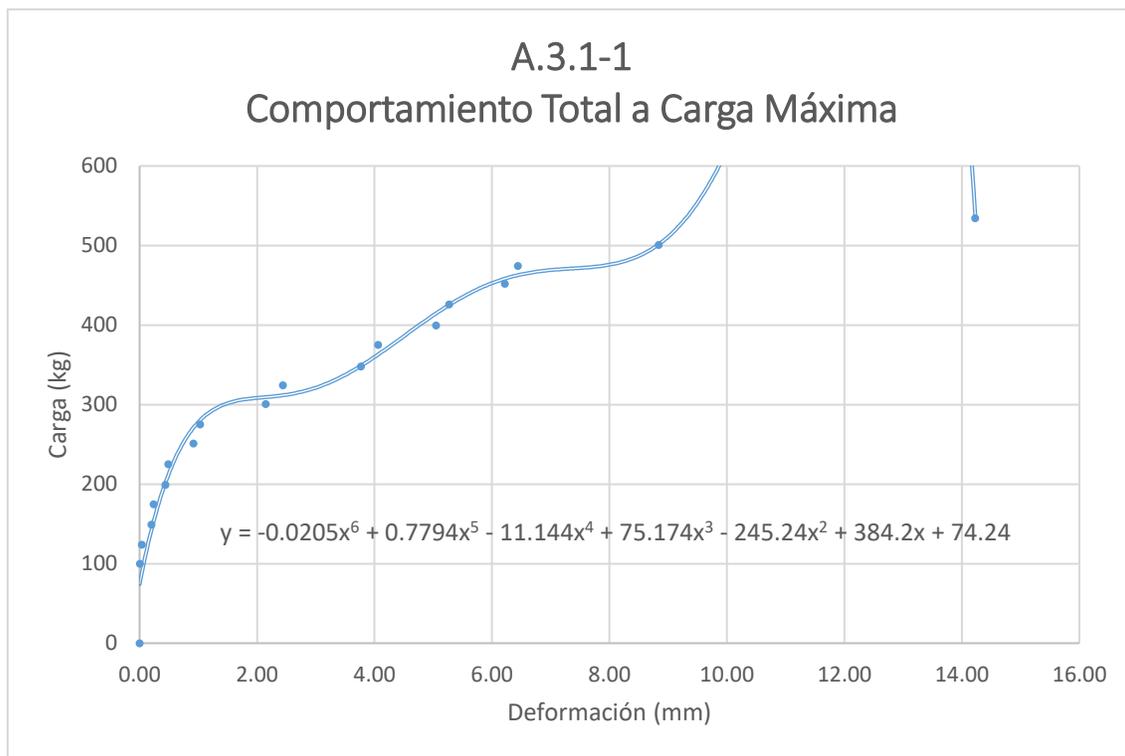
Gráfica 96: Repetición 1 de la muestra A.2.3



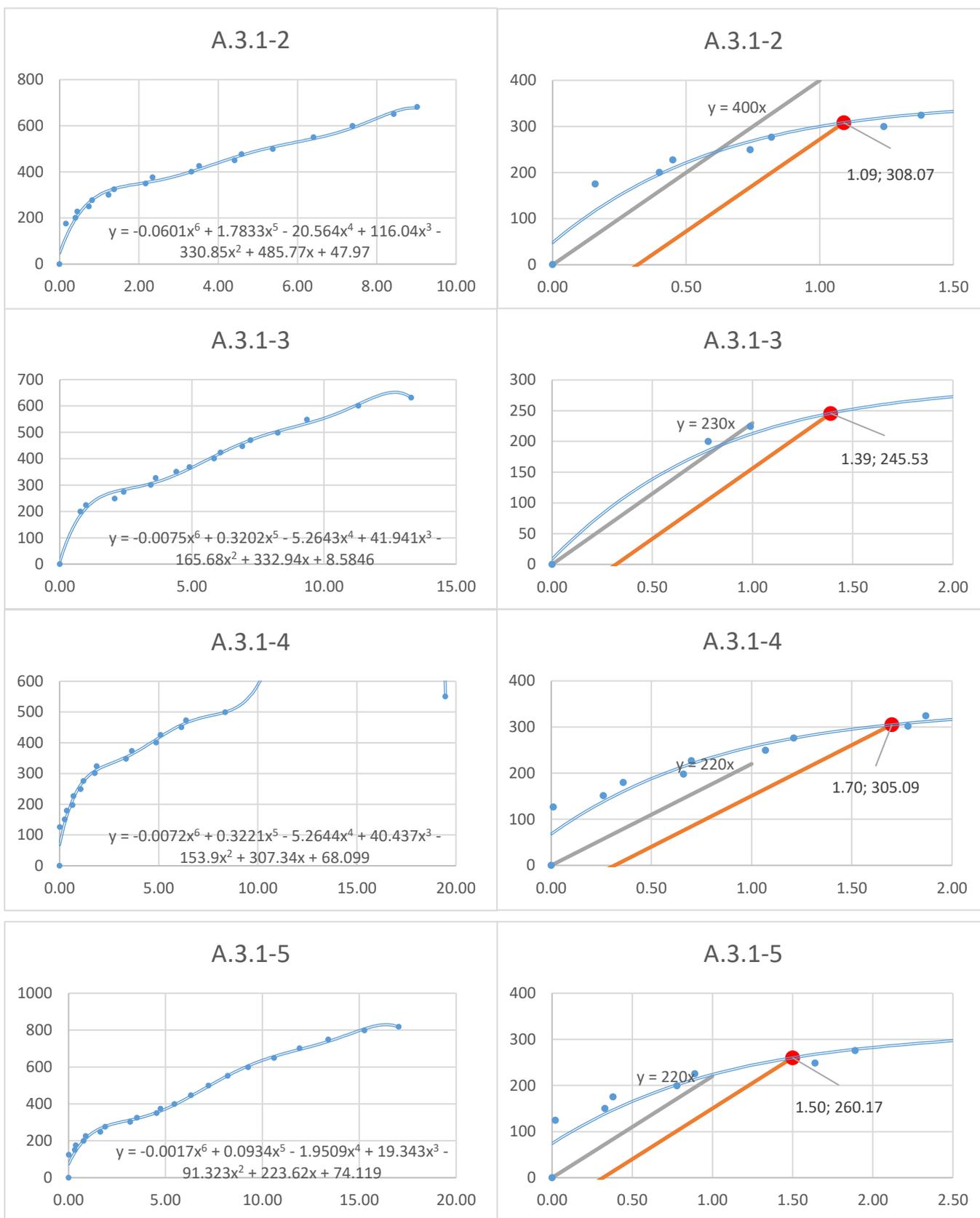
Gráfica 97: Repeticiones 2-5 de la muestra A.2.3



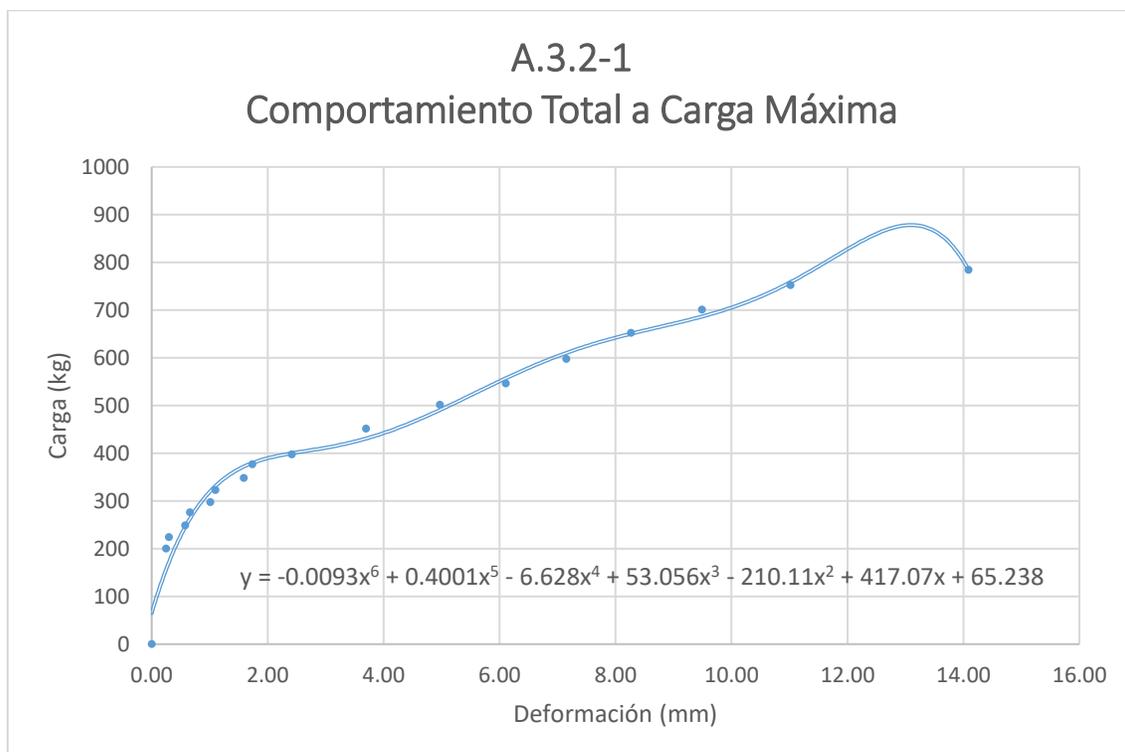
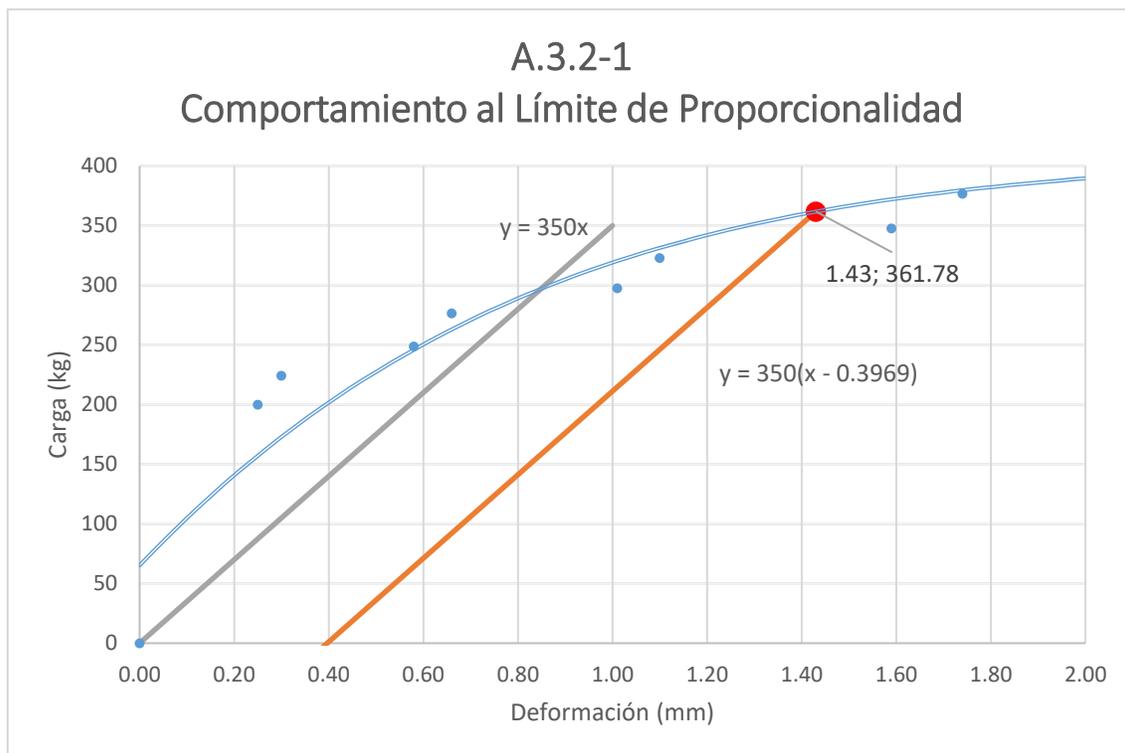
Gráfica 98: Repetición 1 de la muestra A.3.1



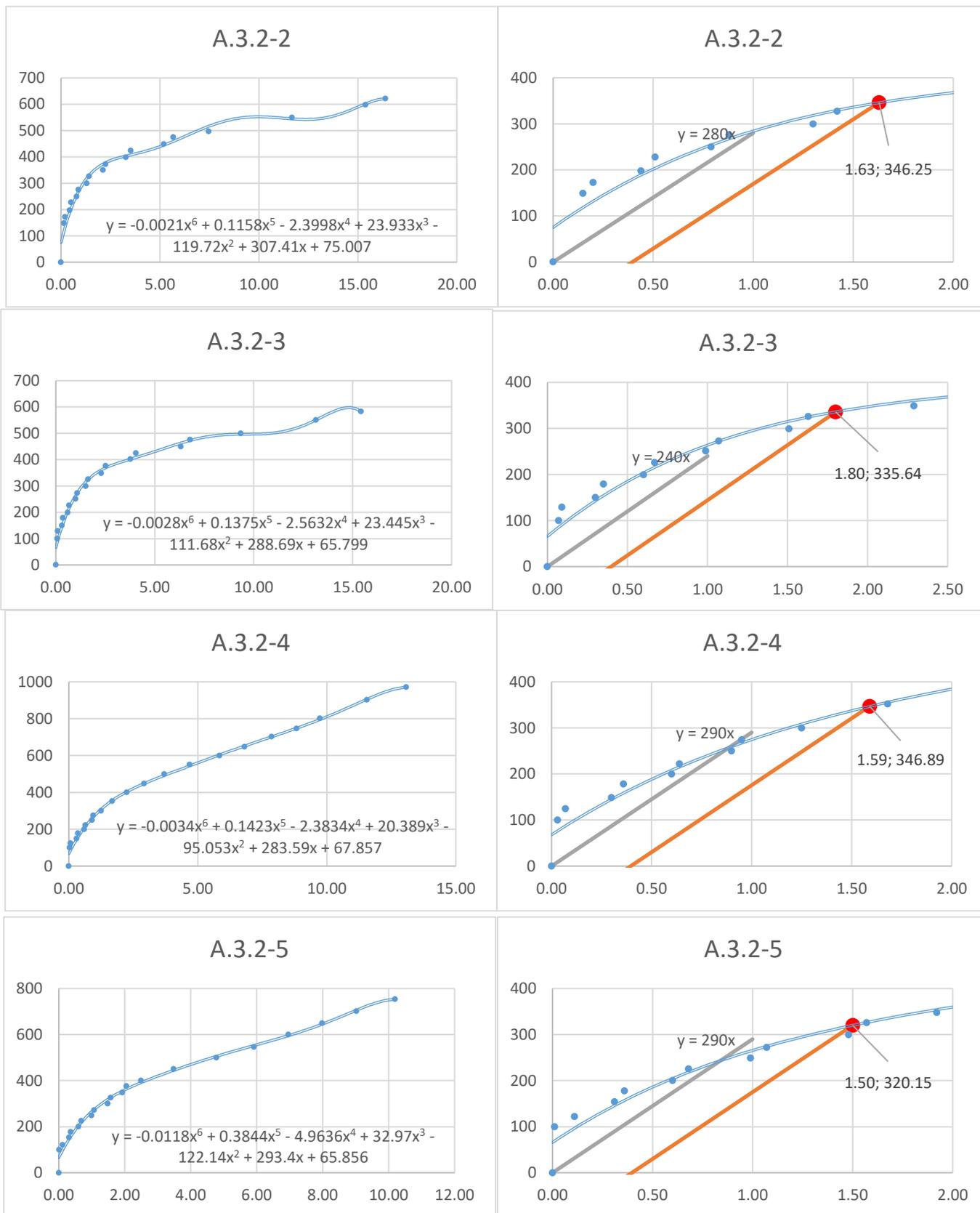
Gráfica 99: Repeticiones 2-5 de la muestra A.3.1



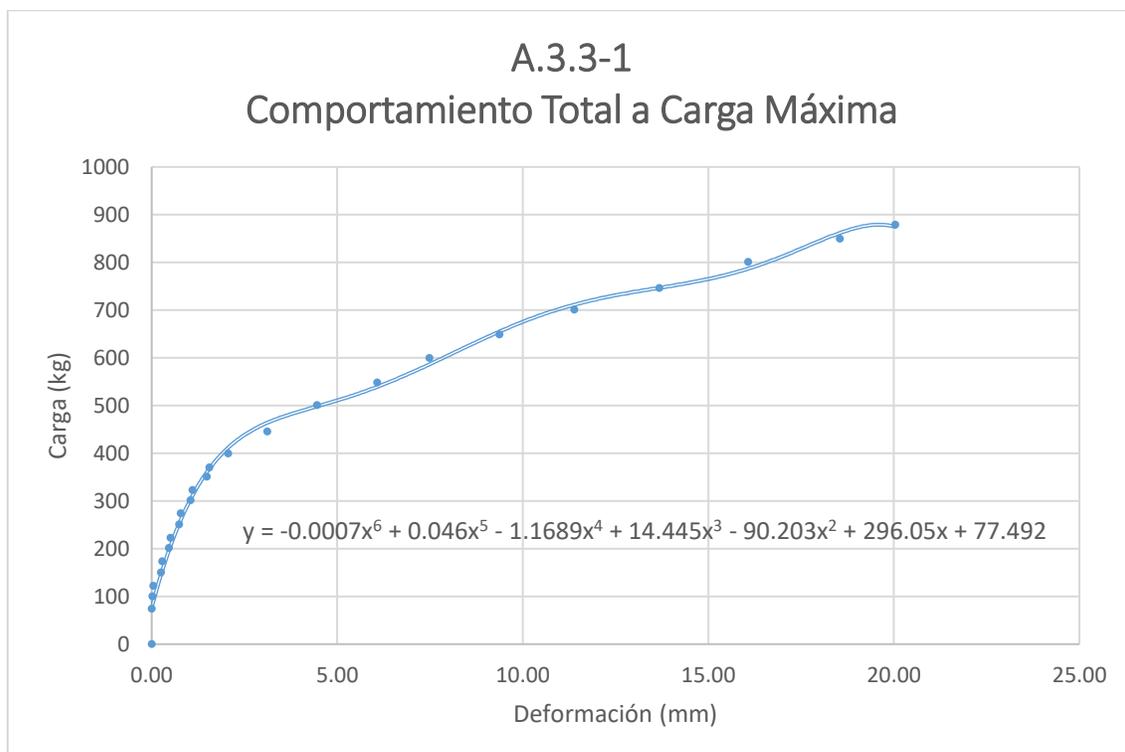
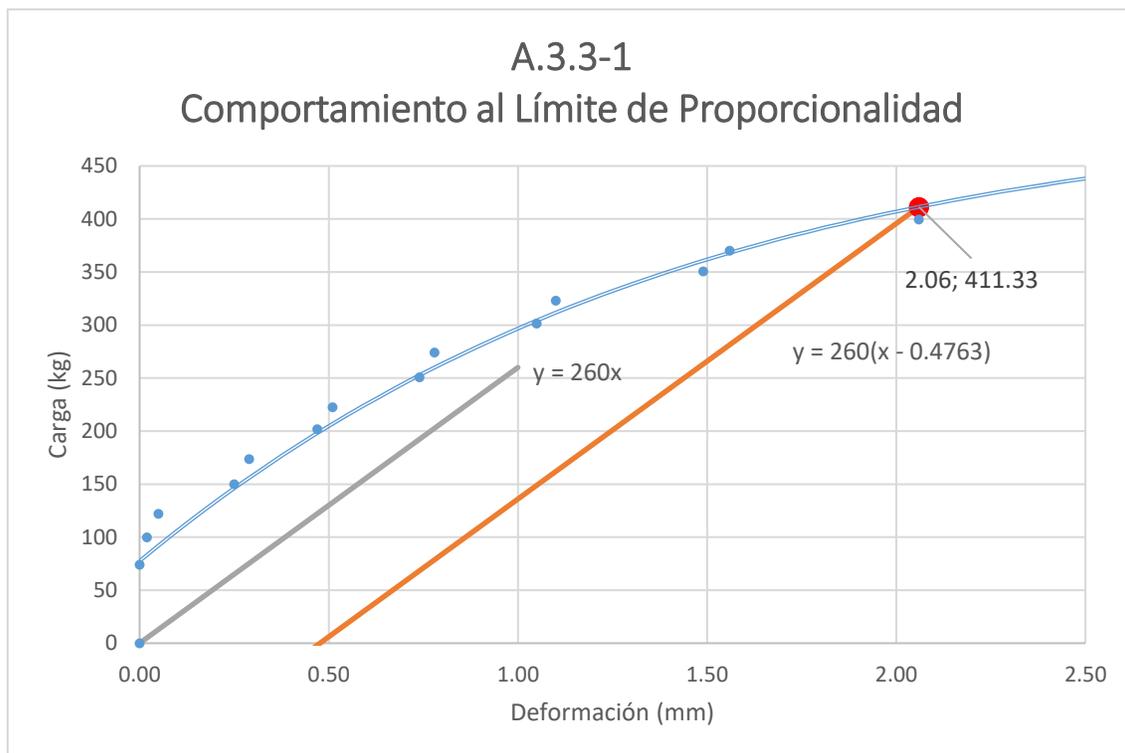
Gráfica 100: Repetición 1 de la muestra A.3.2



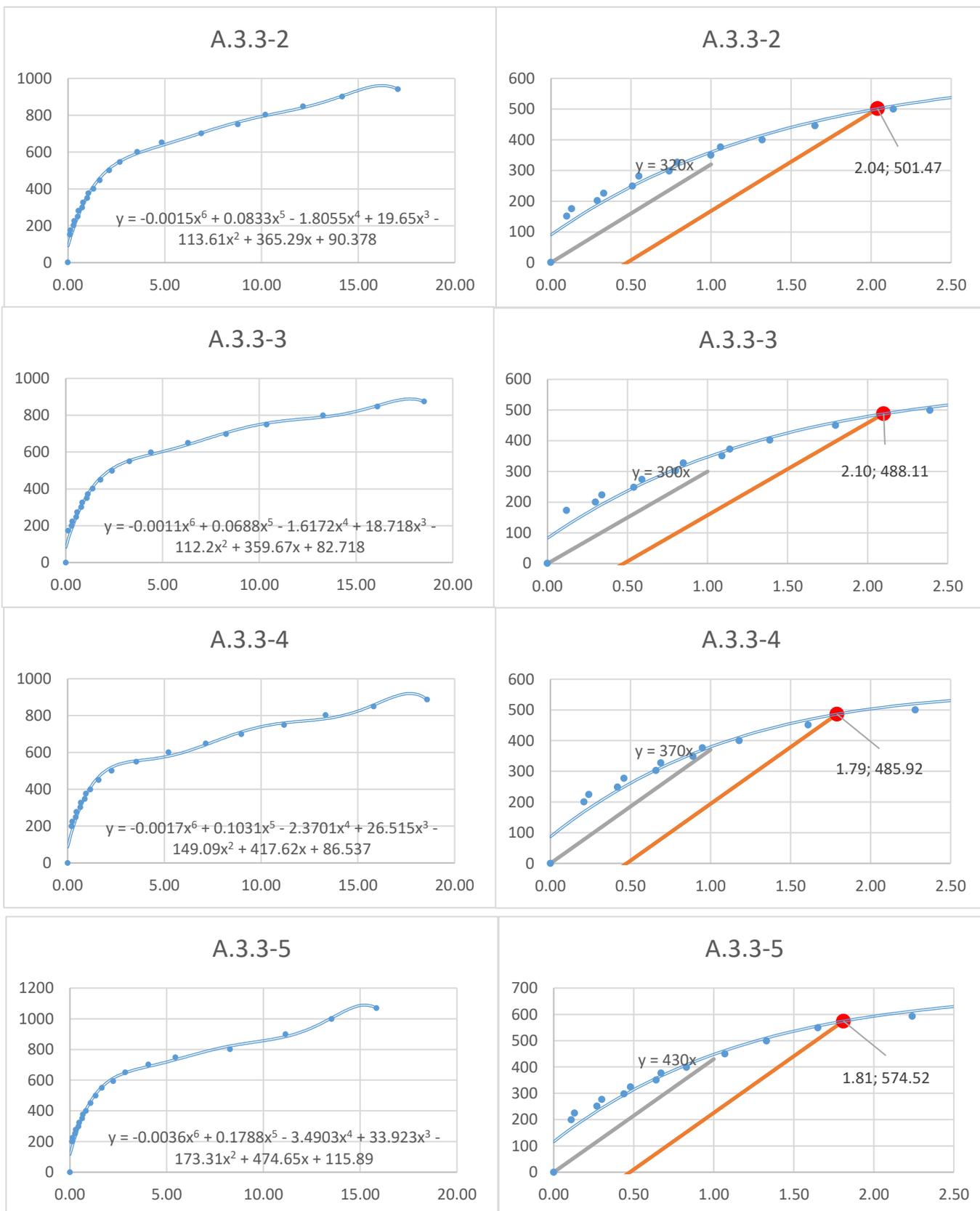
Gráfica 101: Repeticiones 2-5 de la muestra A.3.2



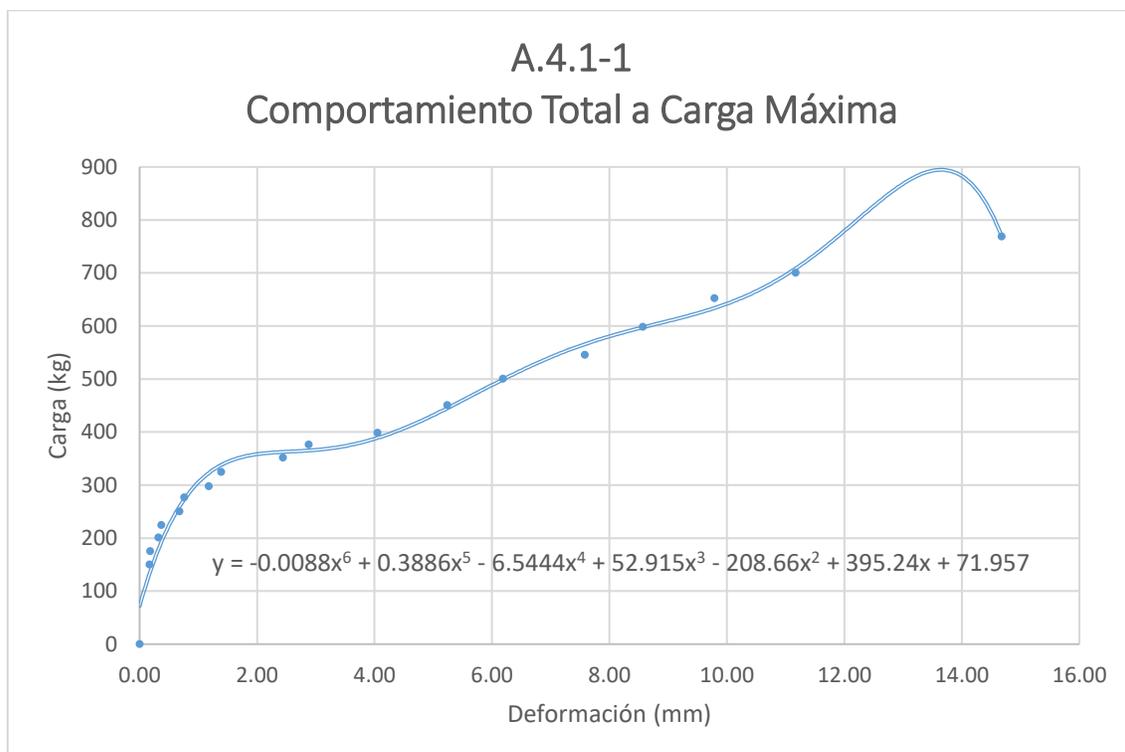
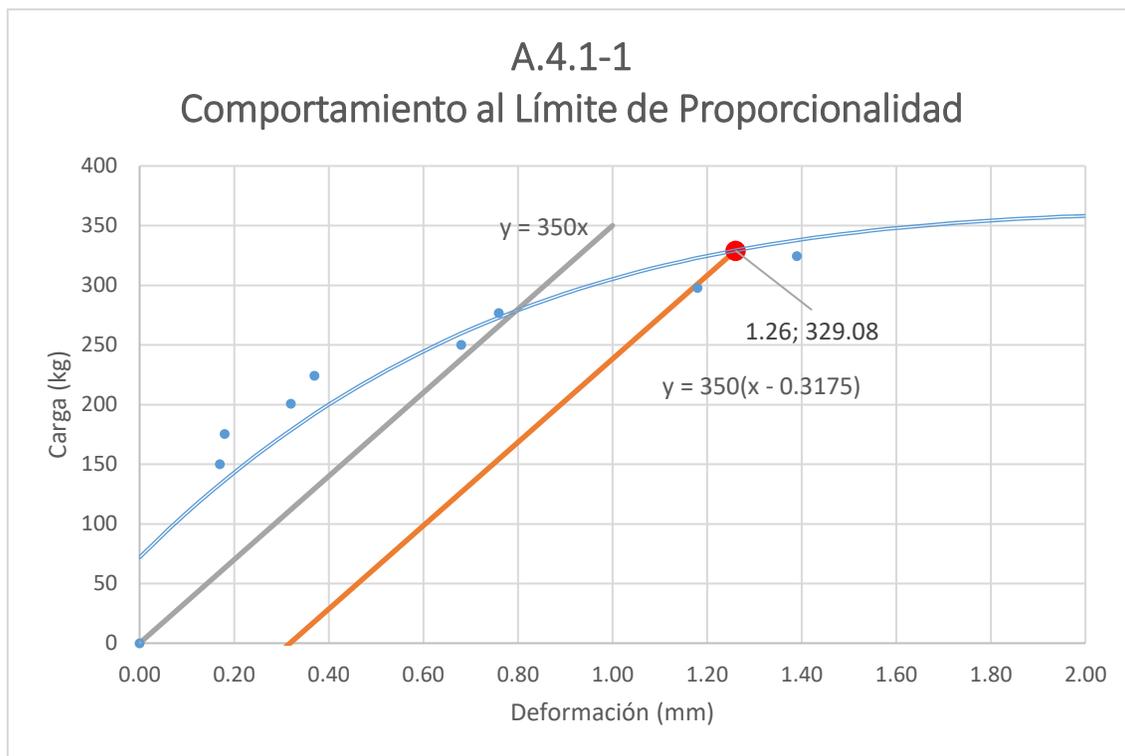
Gráfica 102: Repetición 1 de la muestra A.3.3



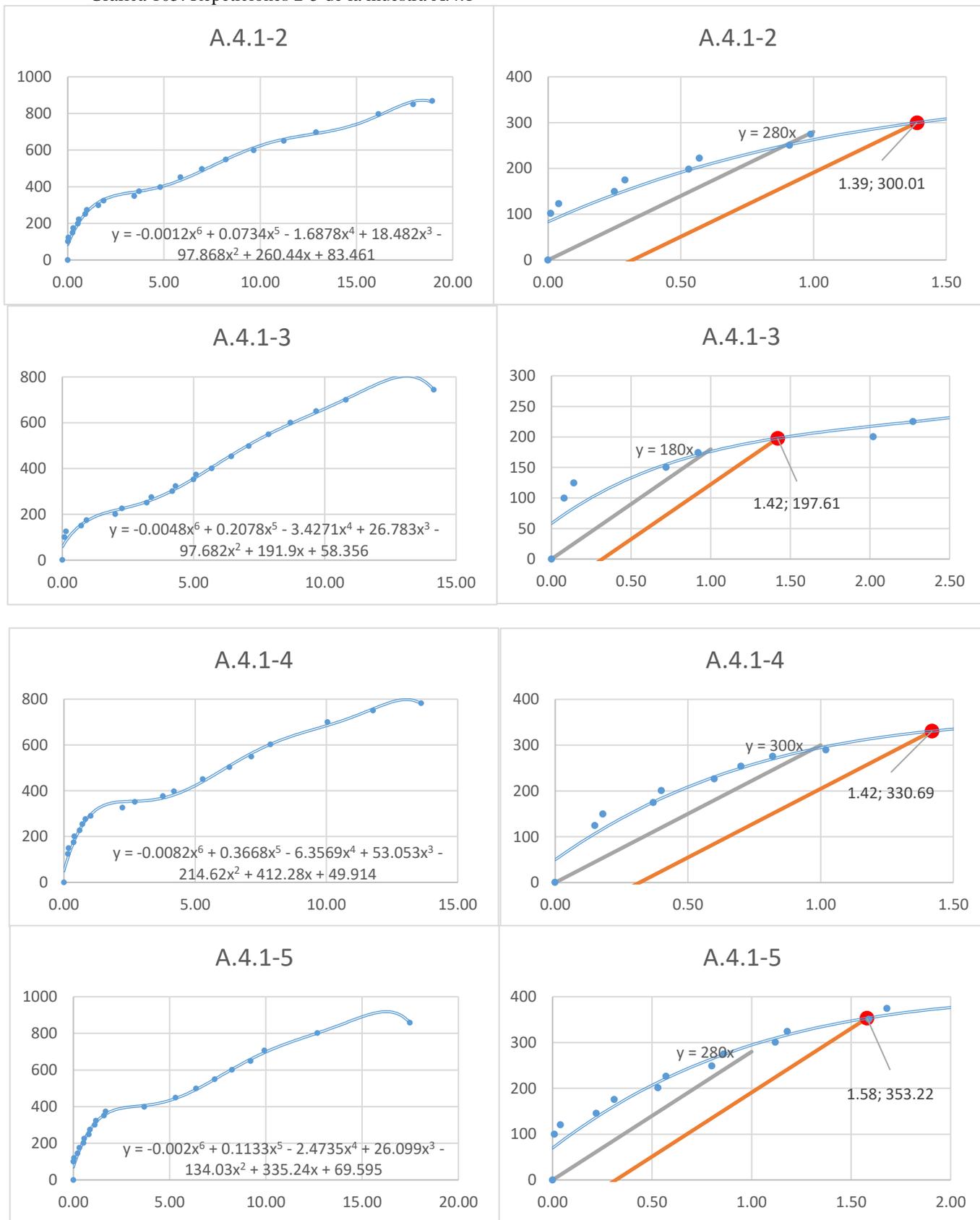
Gráfica 103: Repeticiones 2-5 de la muestra A.3.3



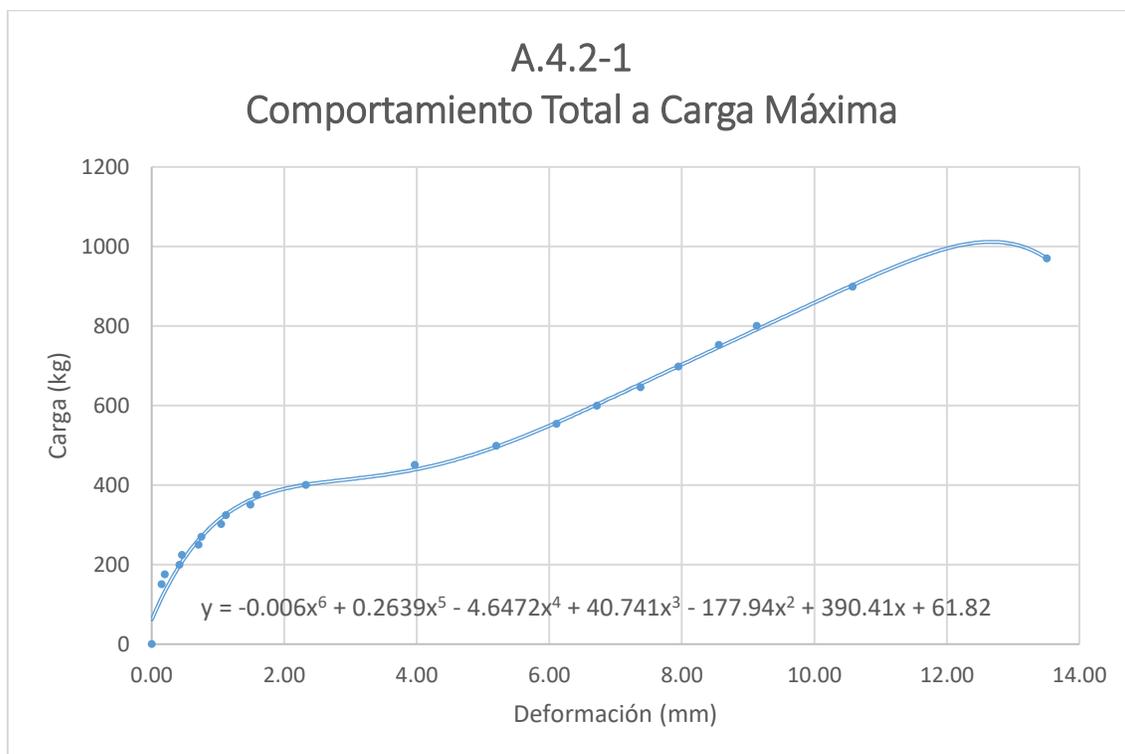
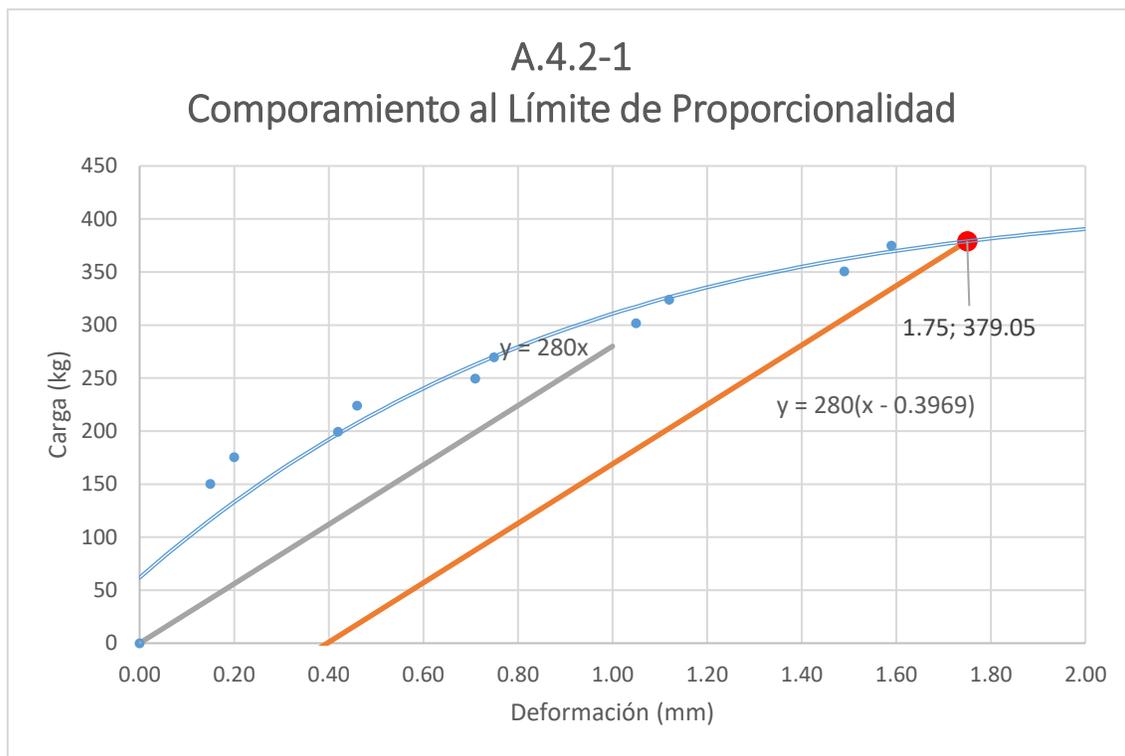
Gráfica 104: Repetición 1 de la muestra A.4.1



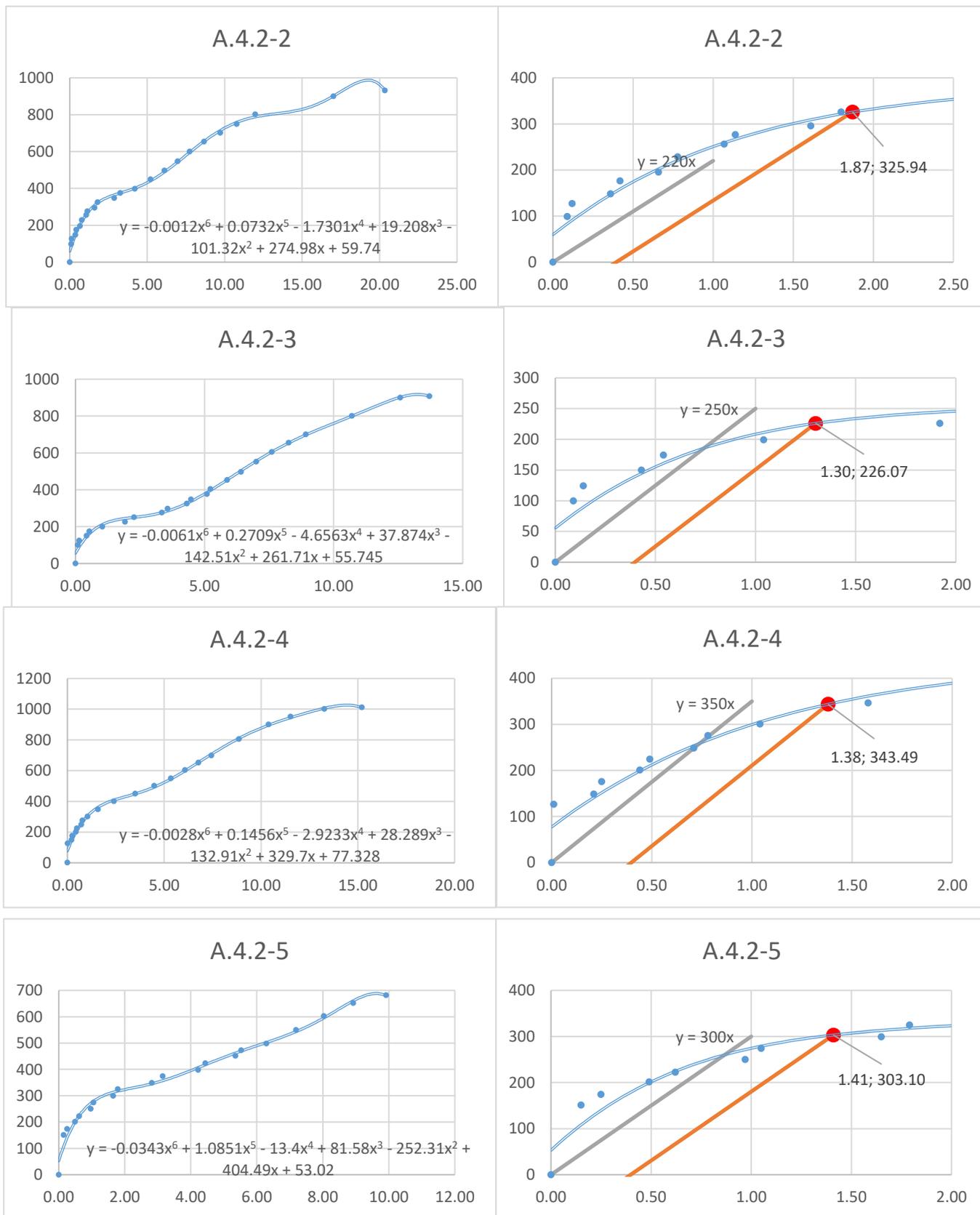
Gráfica 105: Repeticiones 2-5 de la muestra A.4.1



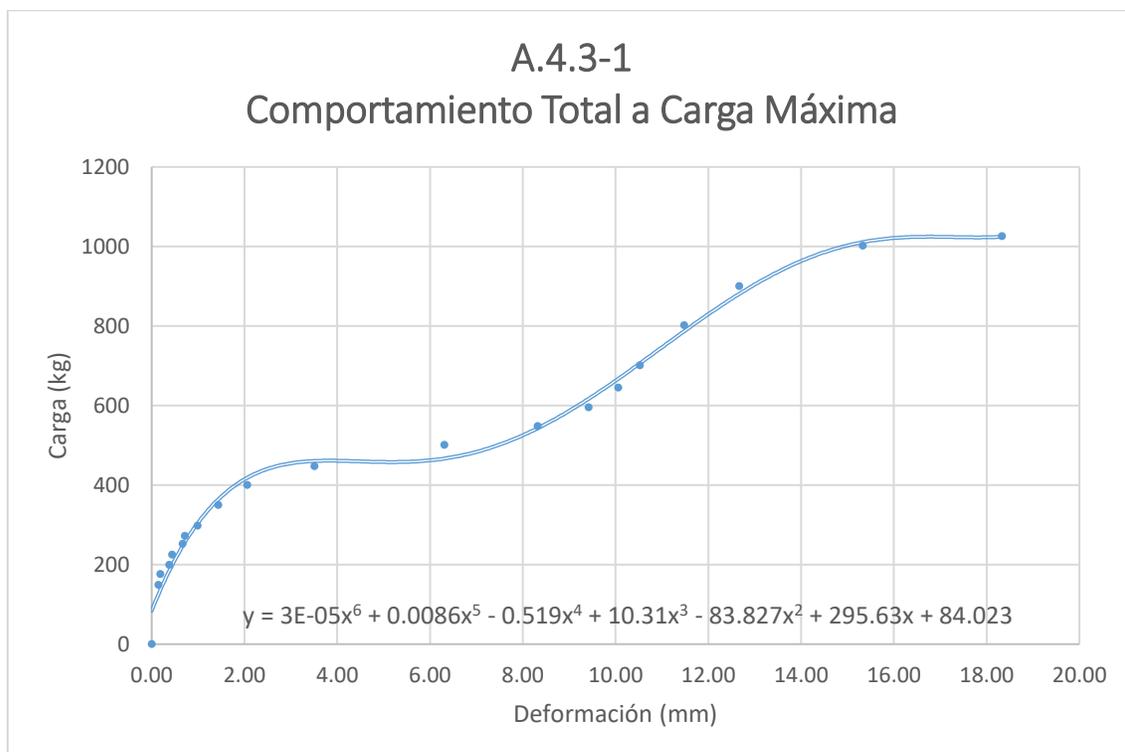
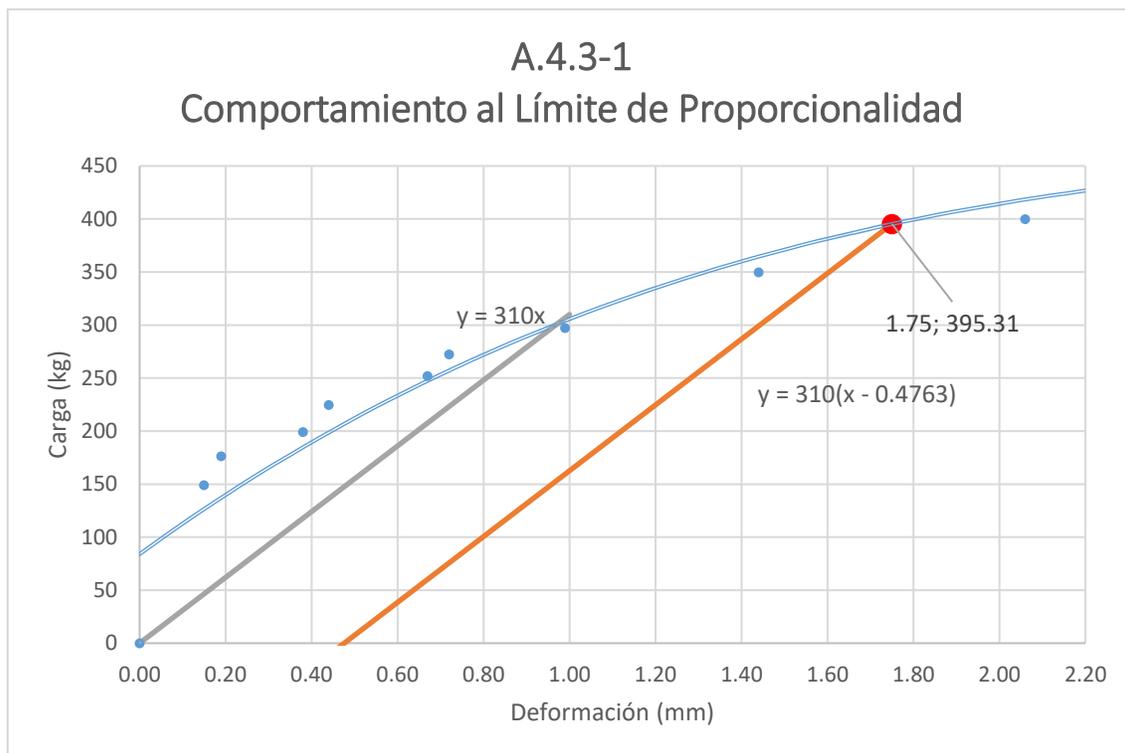
Gráfica 106: Repetición 1 de la muestra A.4.2



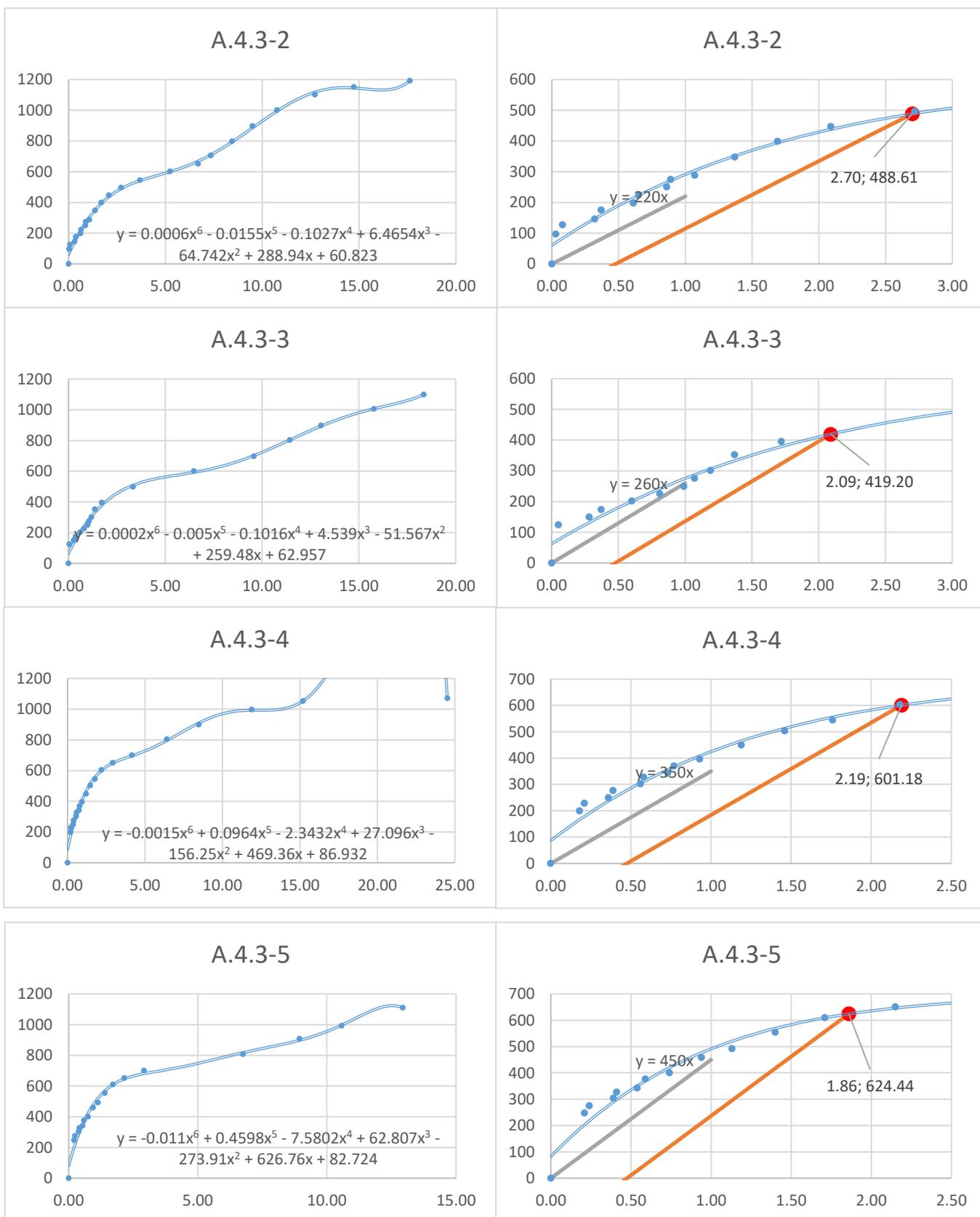
Gráfica 107: Repeticiones 2-5 de la muestra A.4.2



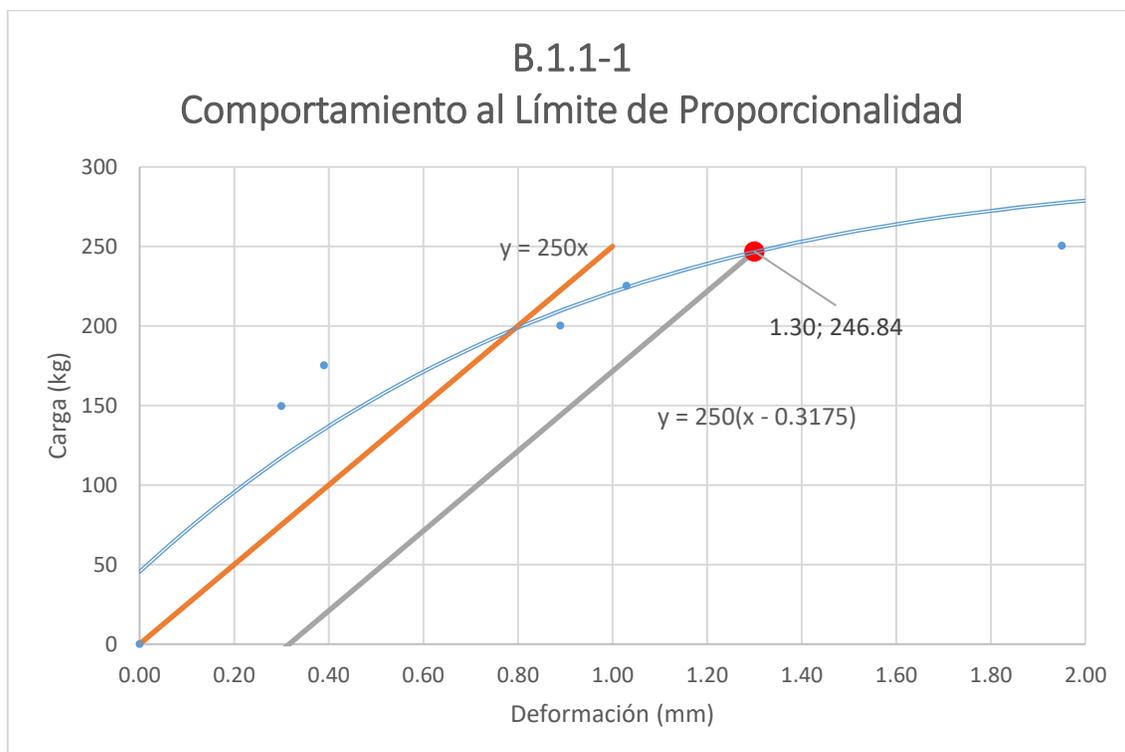
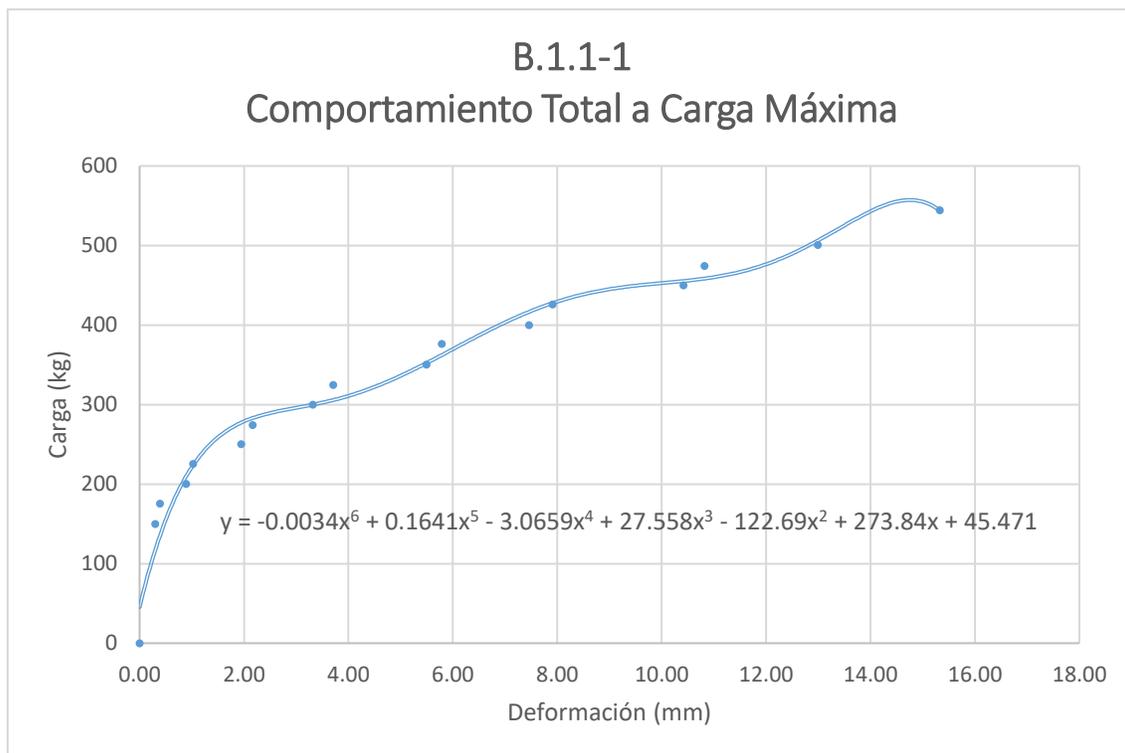
Gráfica 108: Repetición 1 de la muestra A.4.3



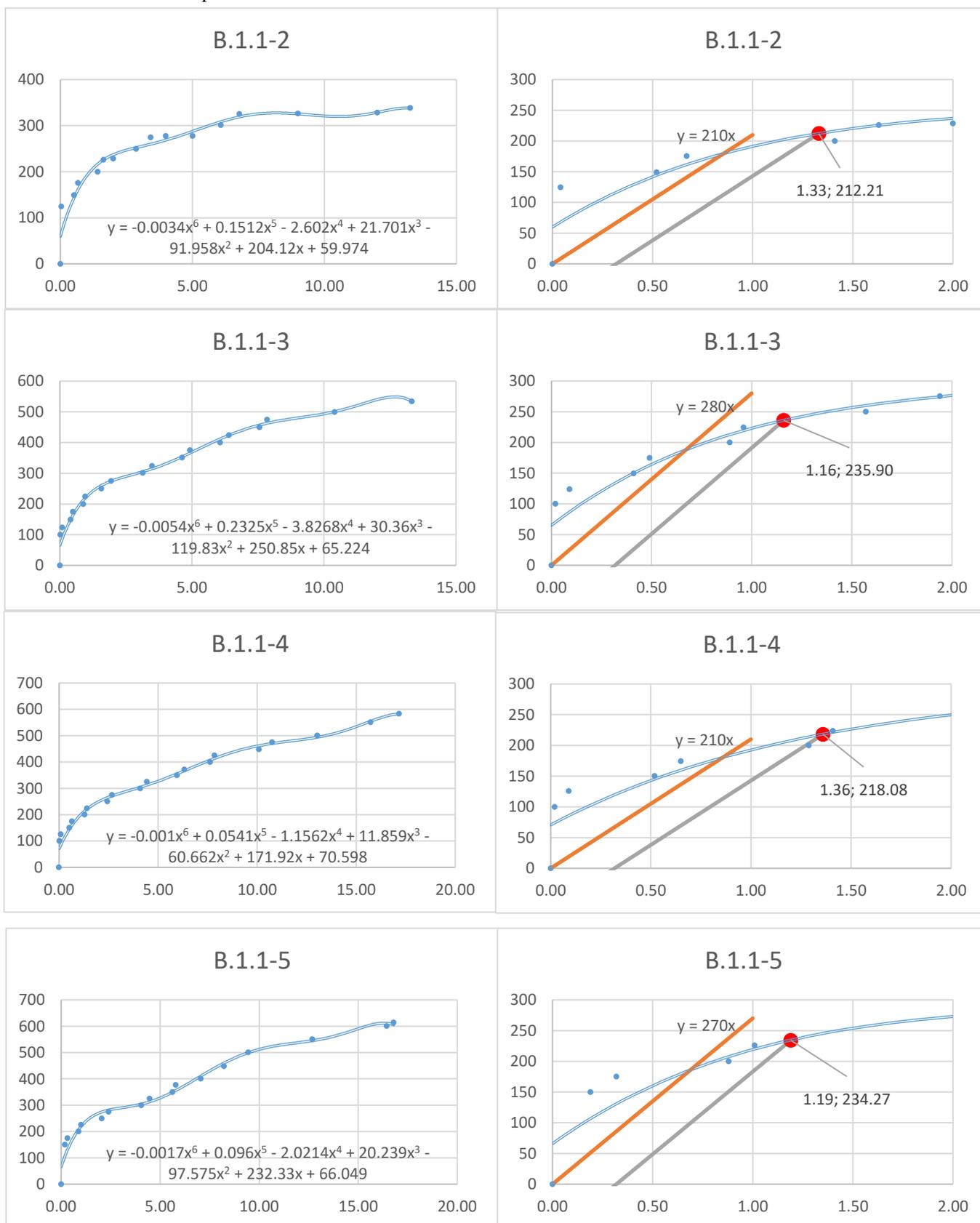
Gráfica 109: Repeticiones 2-5 de la muestra A.4.3



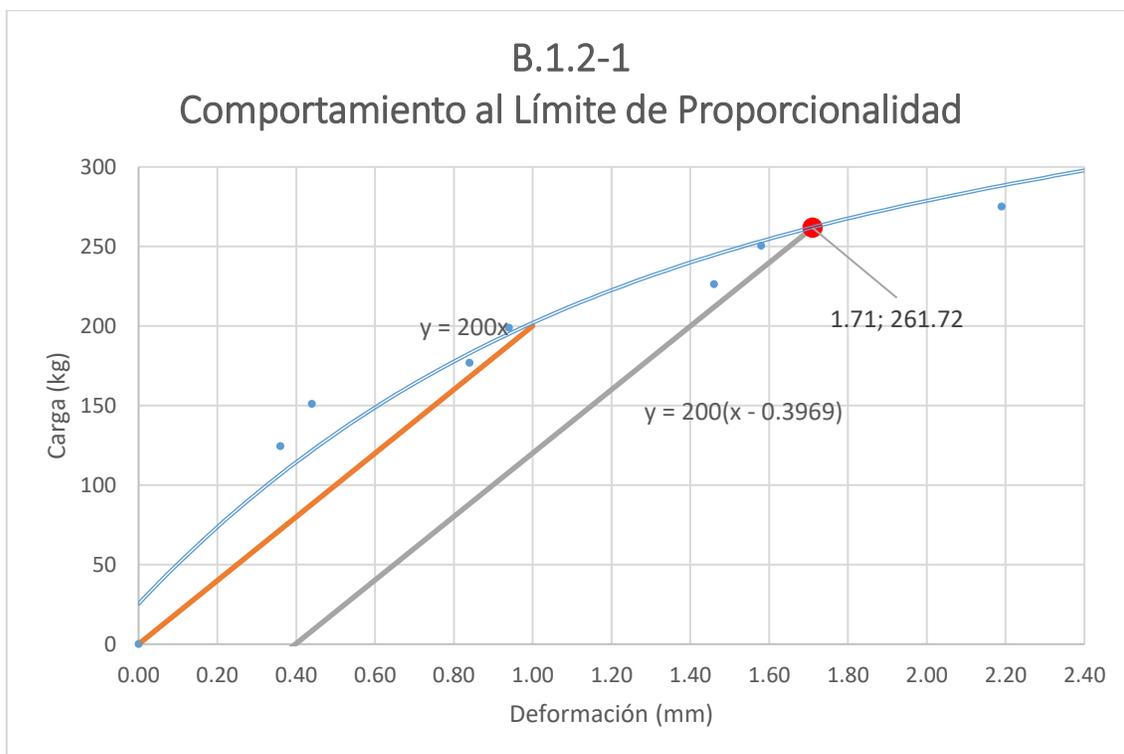
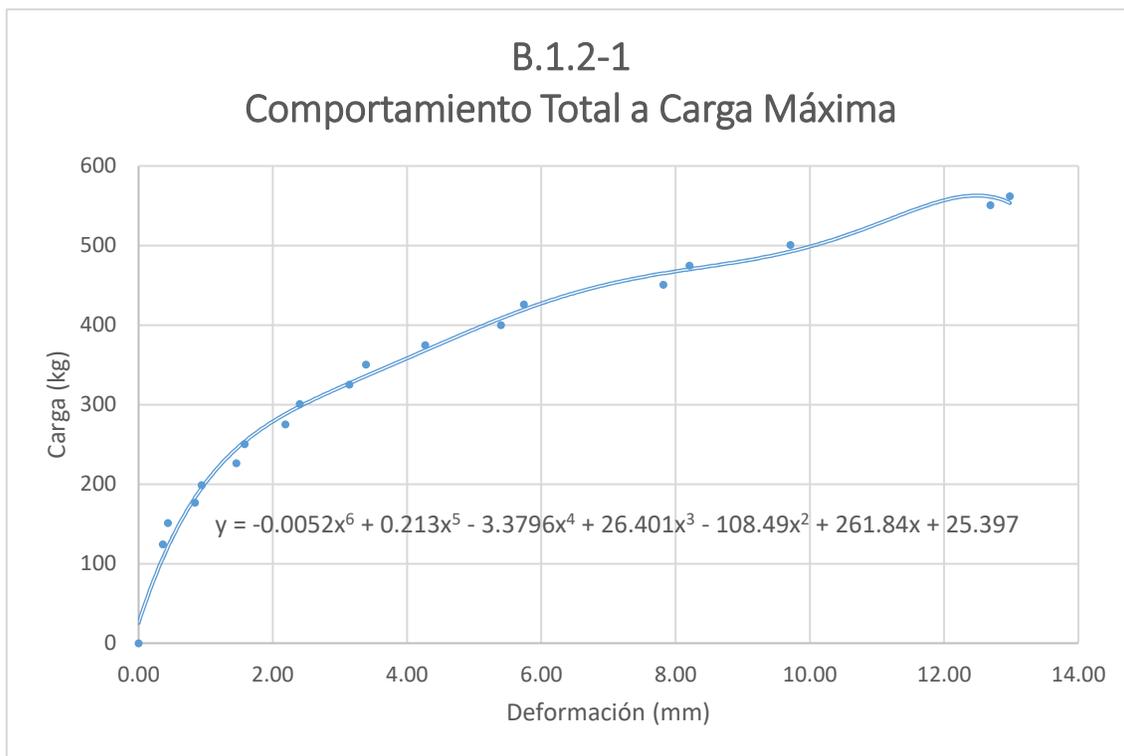
Gráfica 110: Repetición 1 de la muestra B.1.1



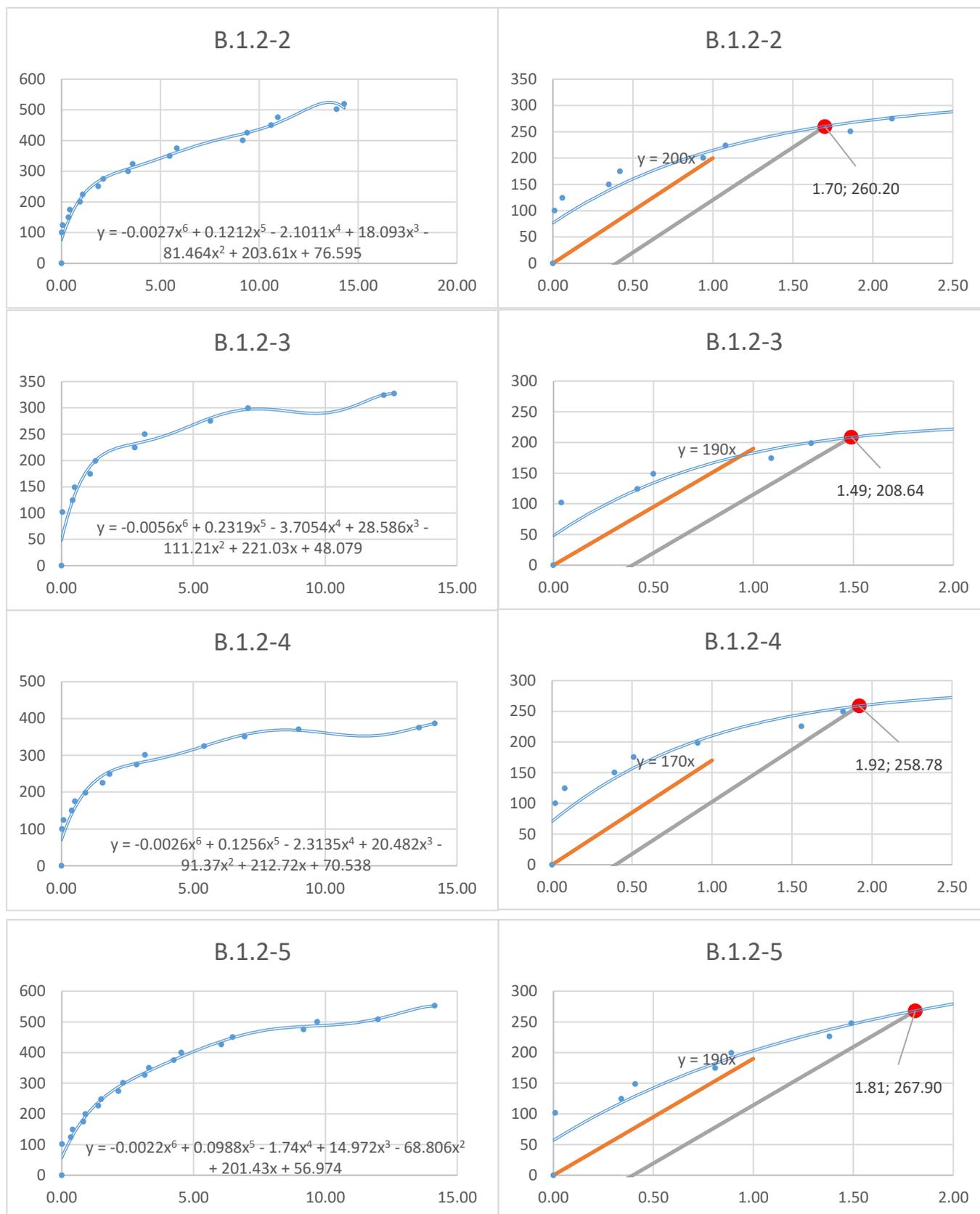
Gráfica 111: Repeticiones 2-5 de la muestra B.1.1



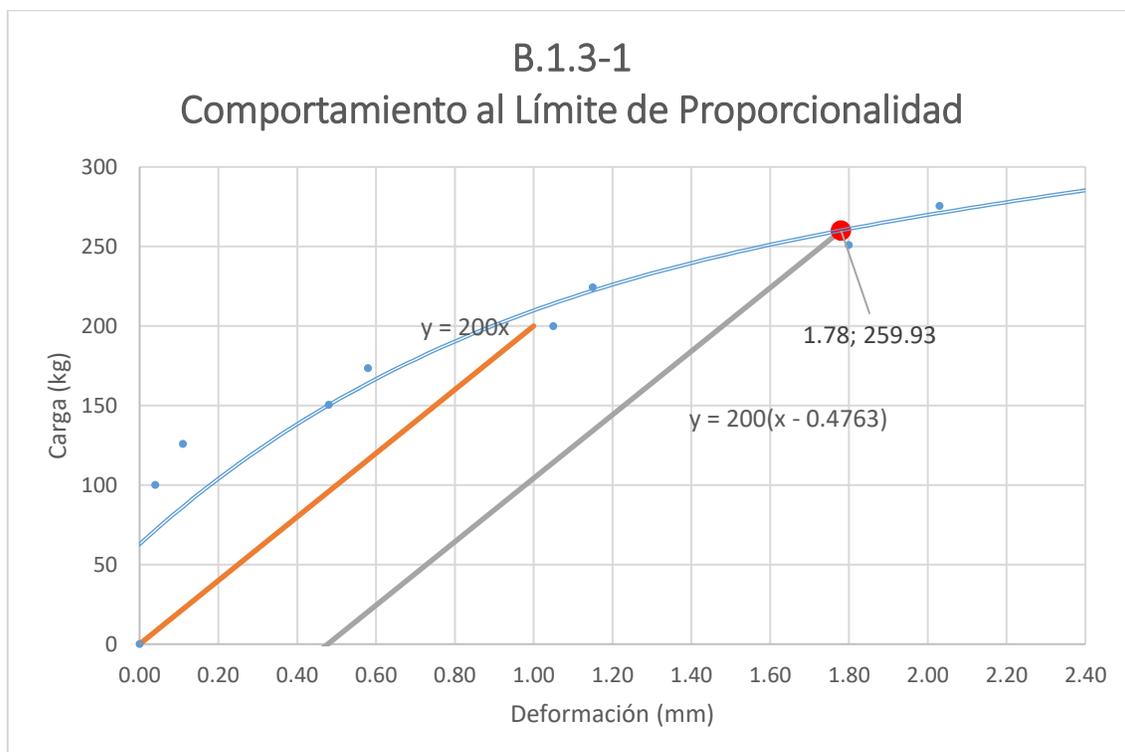
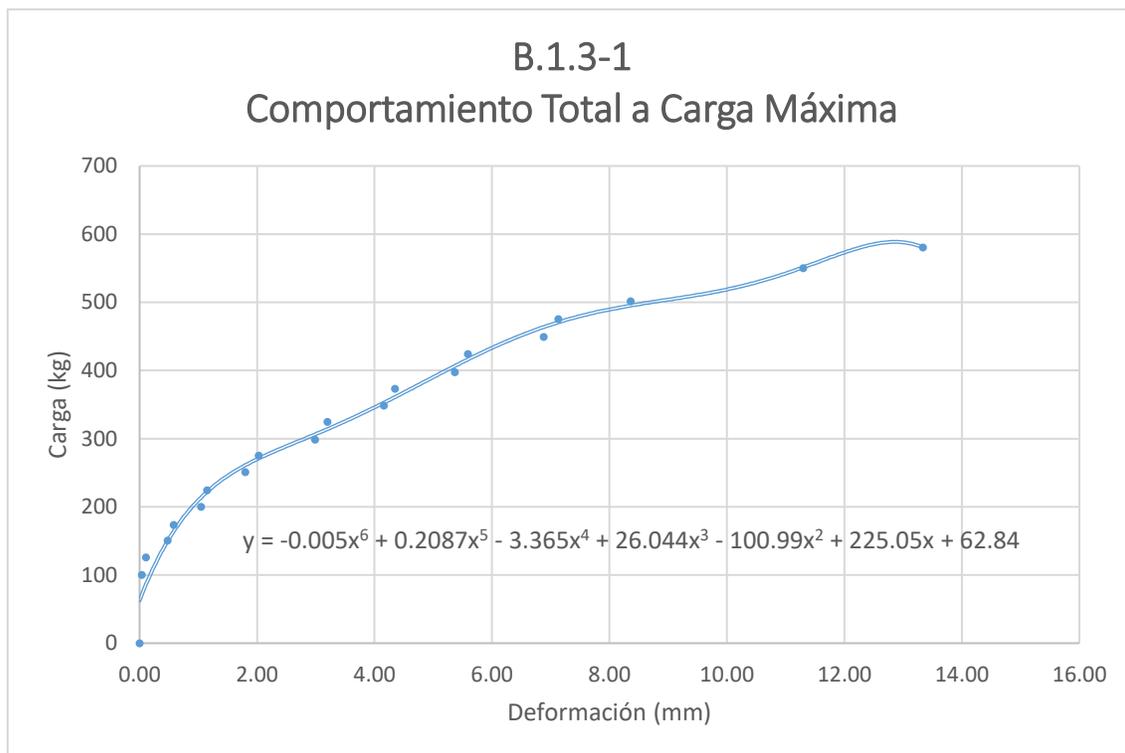
Gráfica 112: Repetición 1 de la muestra B.1.2



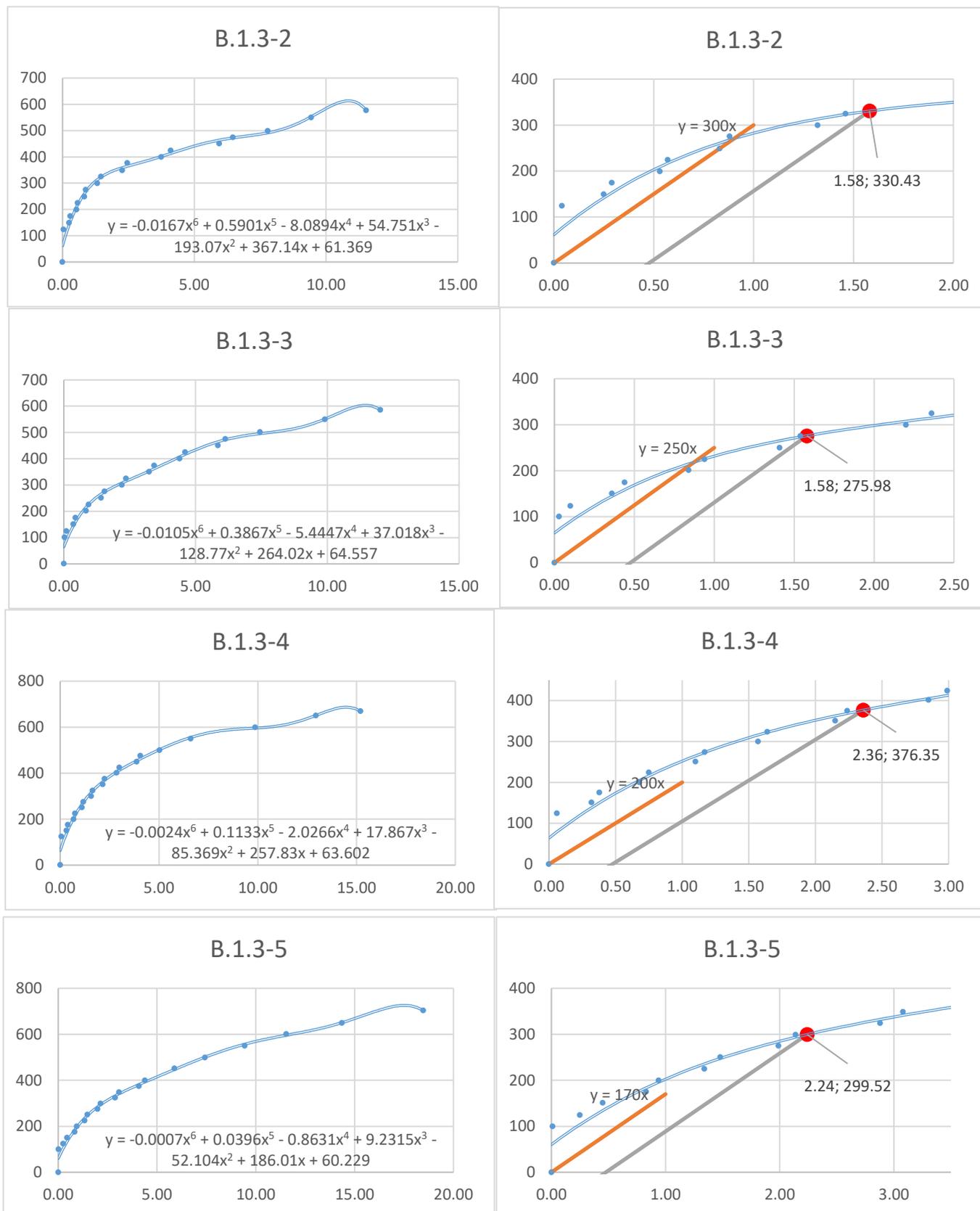
Gráfica 113: Repeticiones 2-5 de la muestra B.1.2



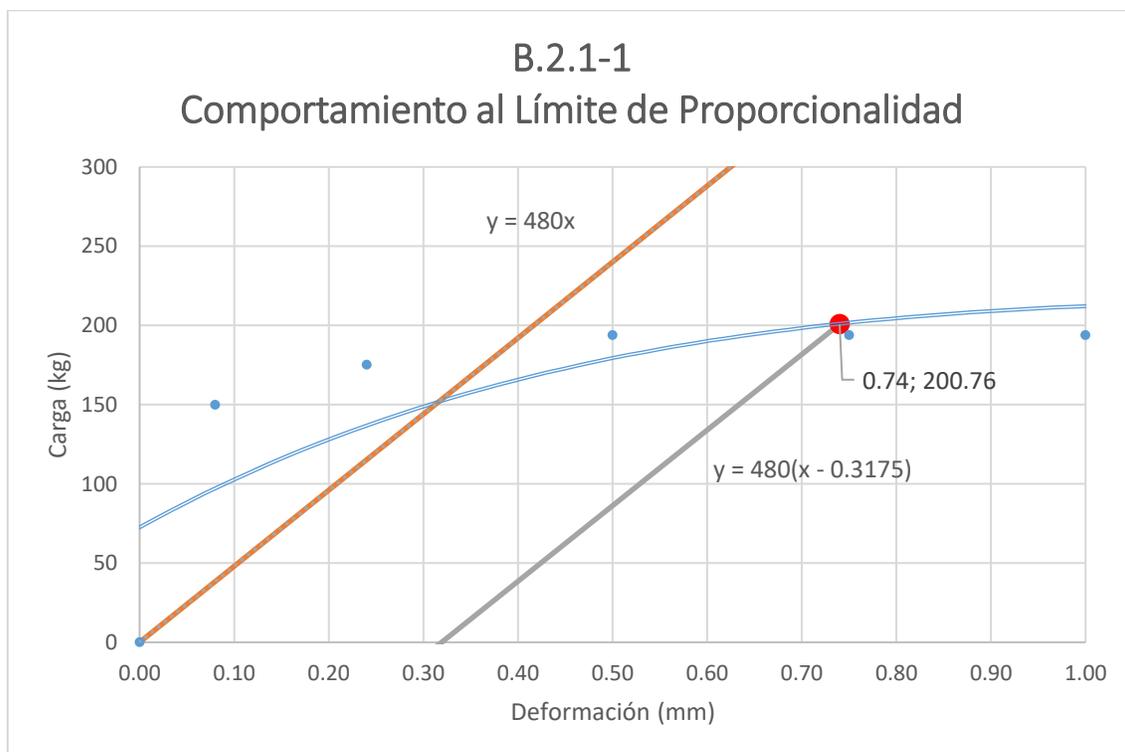
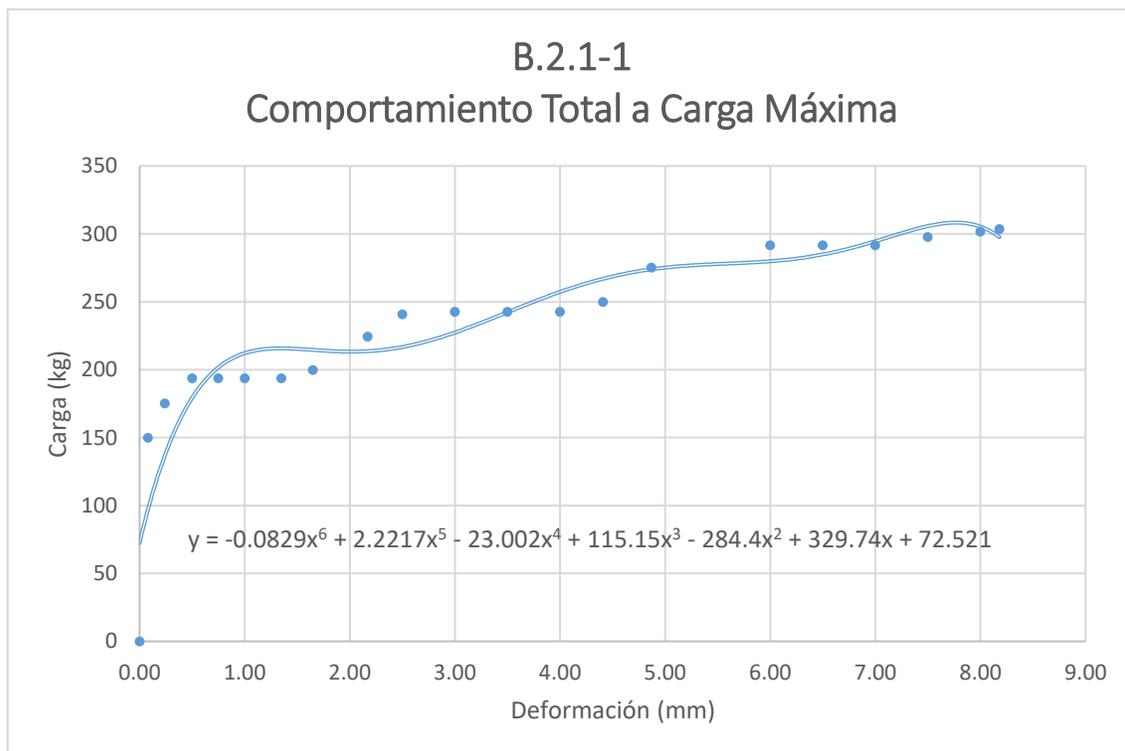
Gráfica 114: Repetición 1 de la muestra B.1.3



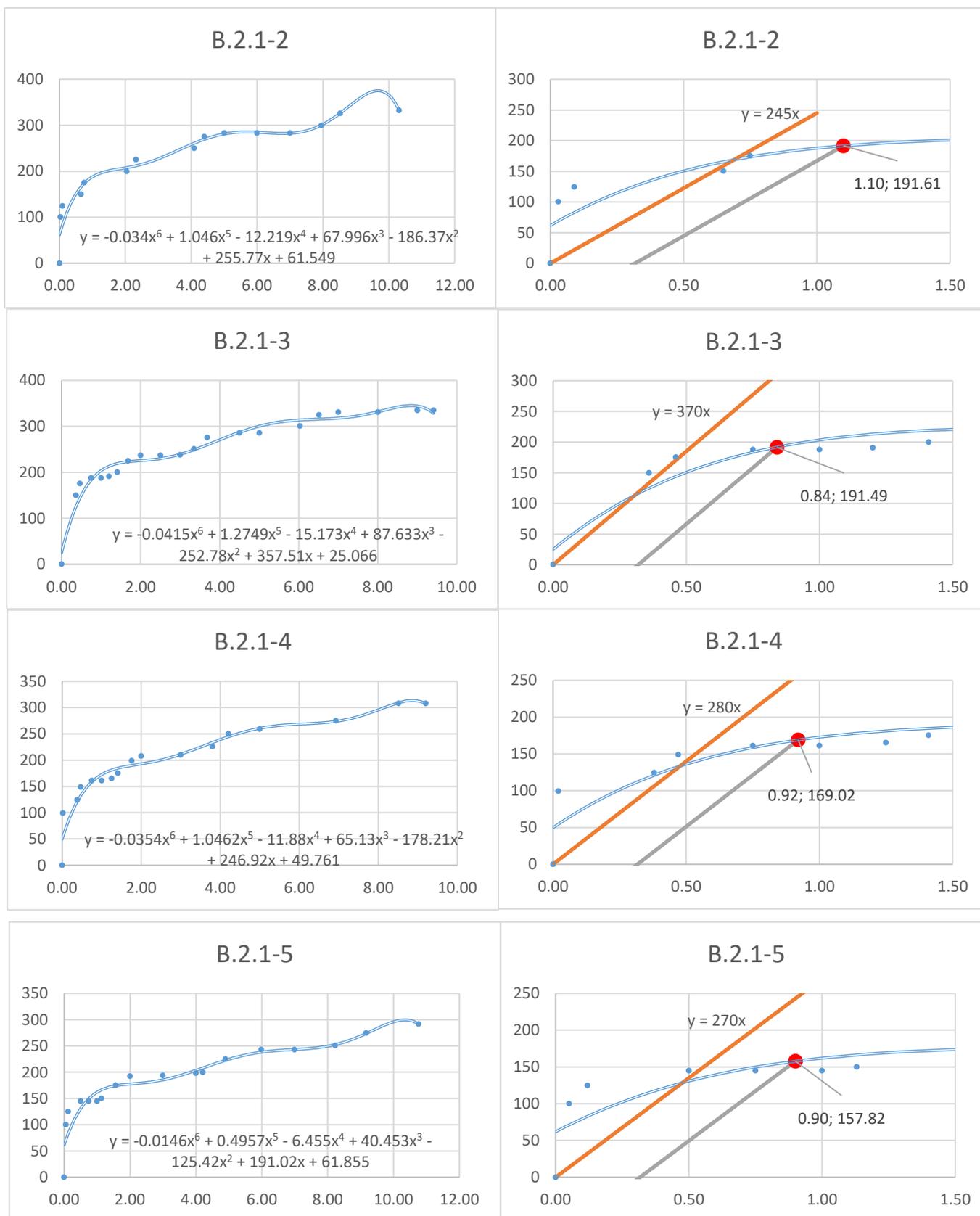
Gráfica 115: Repeticiones 2-5 de la muestra B.1.3



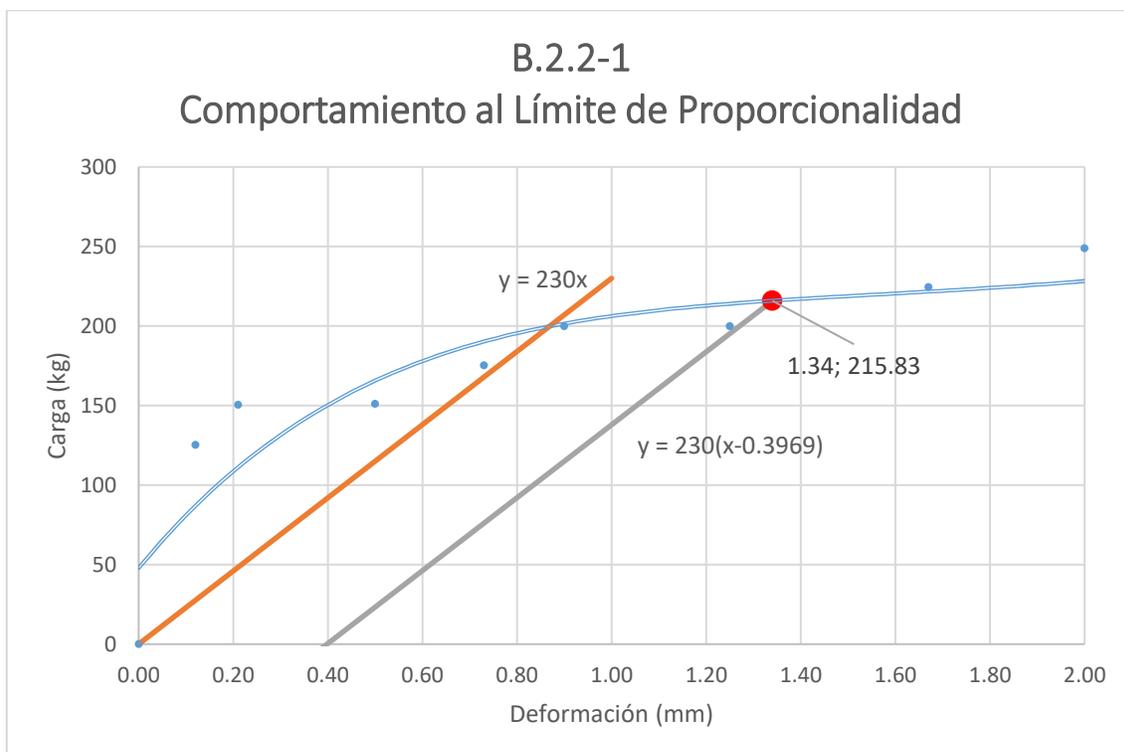
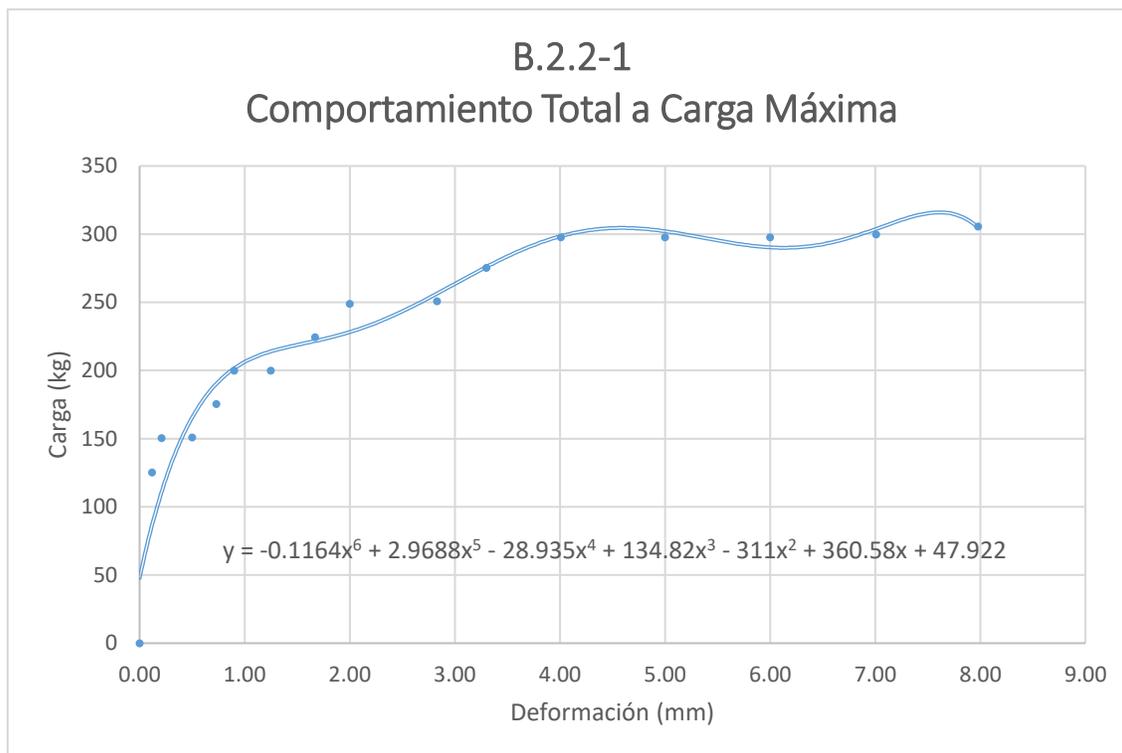
Gráfica 116: Repetición 1 de la muestra B.2.1



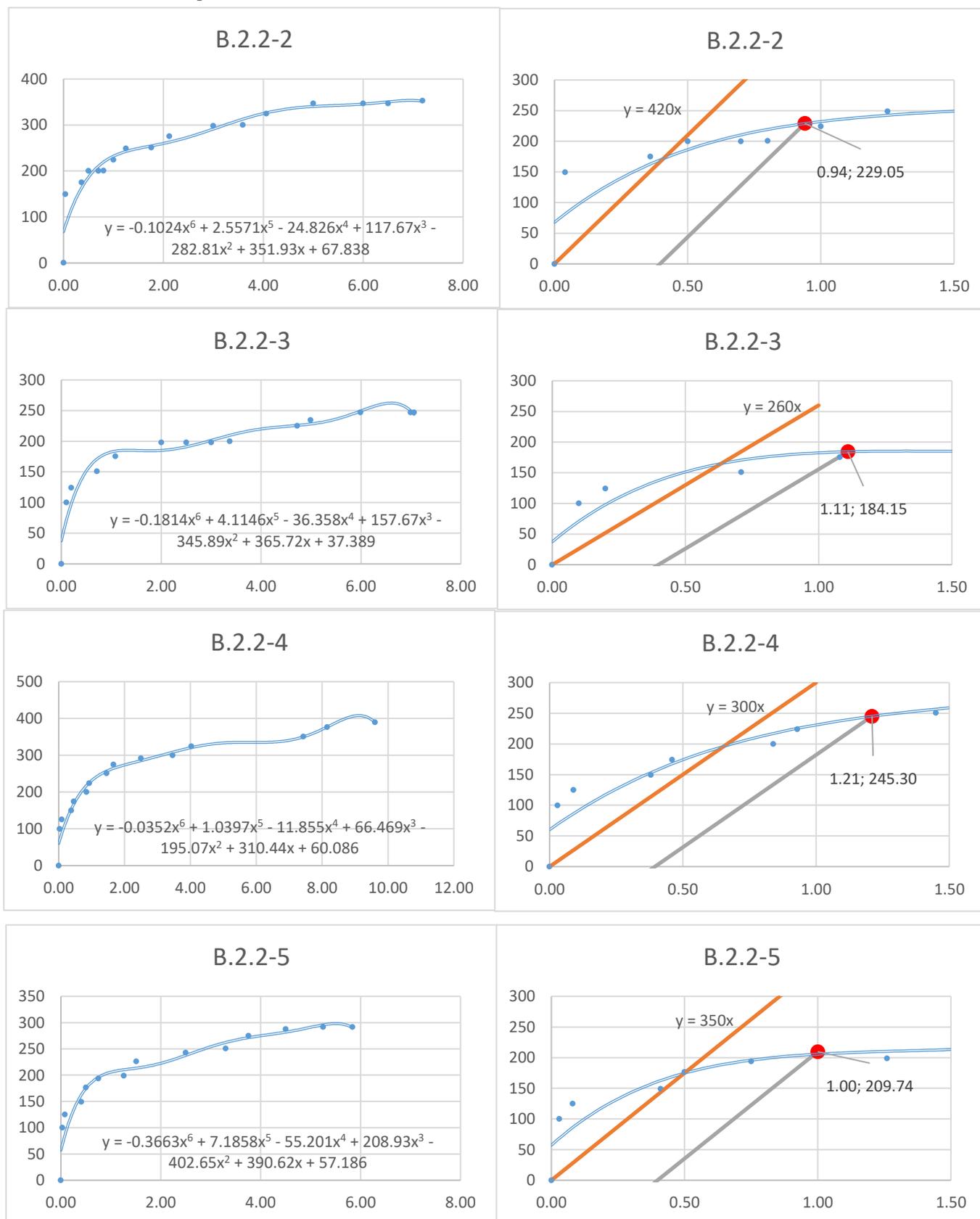
Gráfica 117: Repeticiones 2-5 de la muestra B.2.1



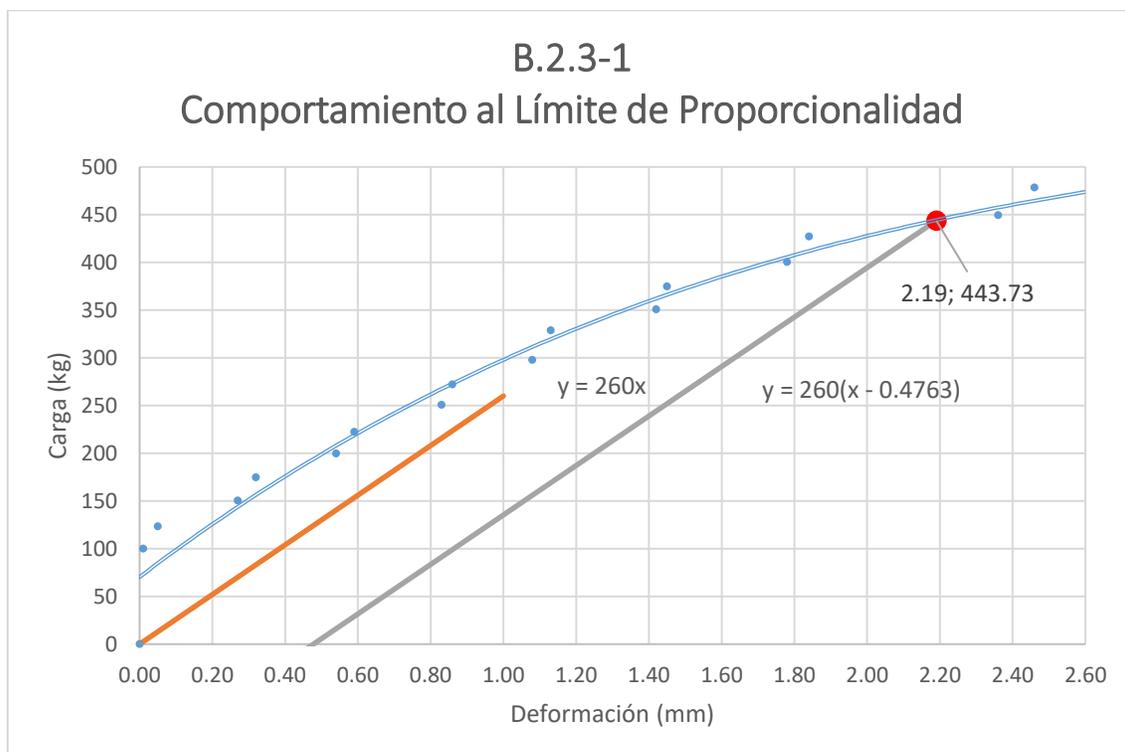
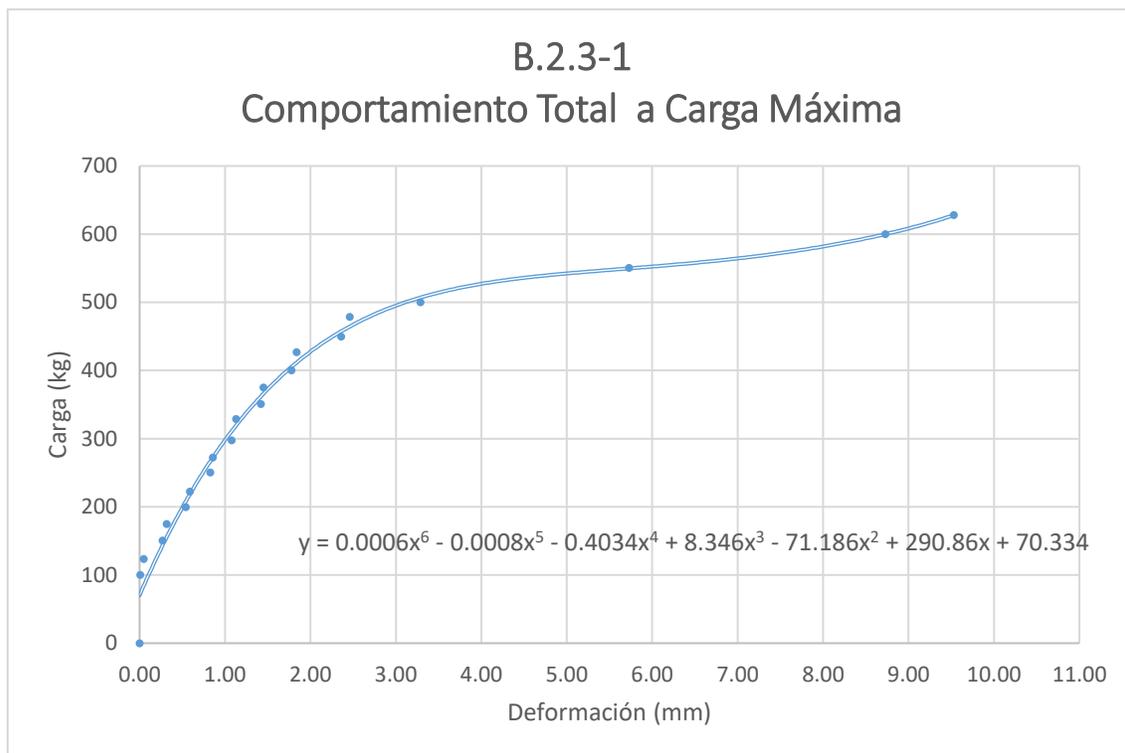
Gráfica 118: Repetición 1 de la muestra B.2.2



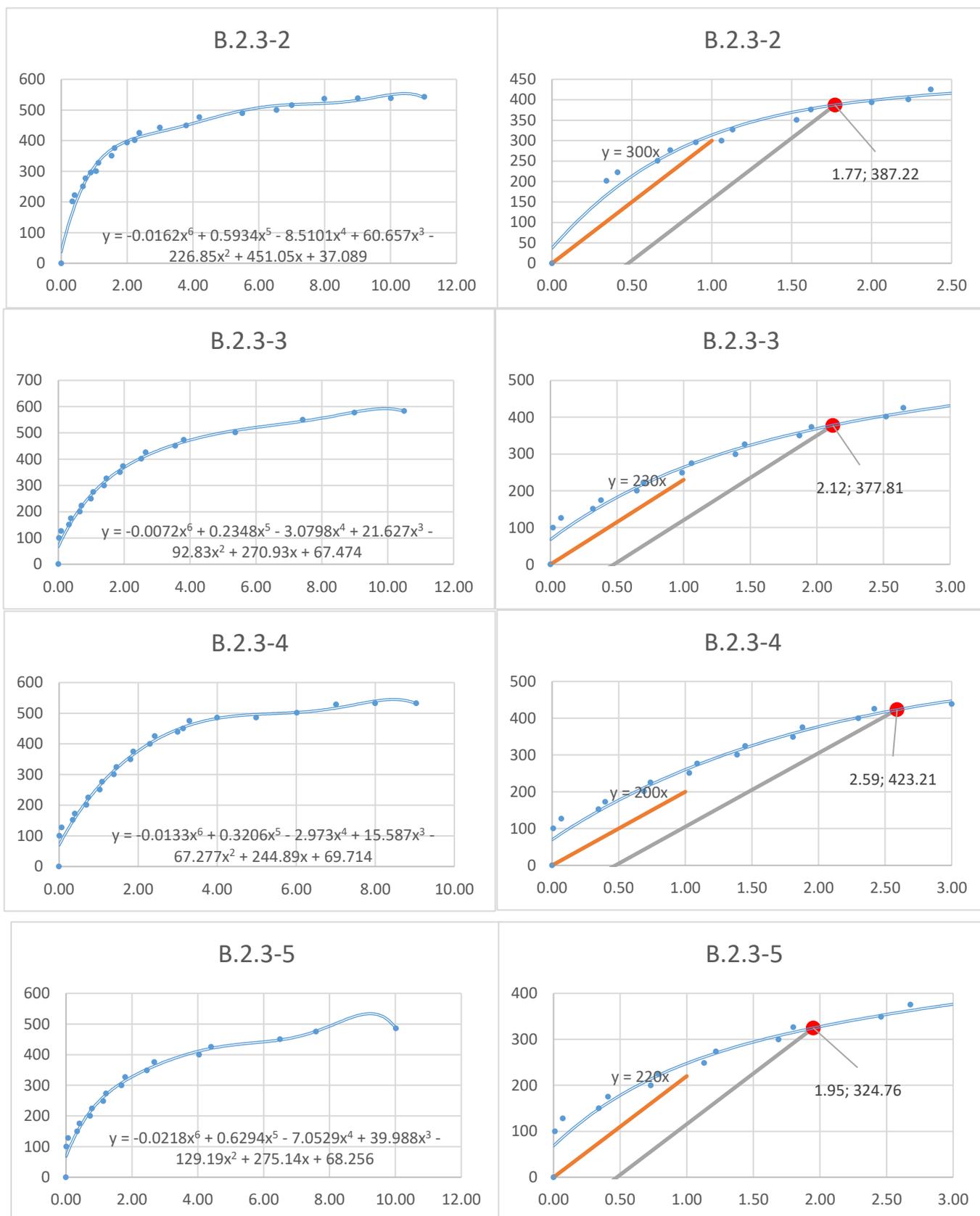
Gráfica 119: Repeticiones 2-5 de la muestra B.2.2



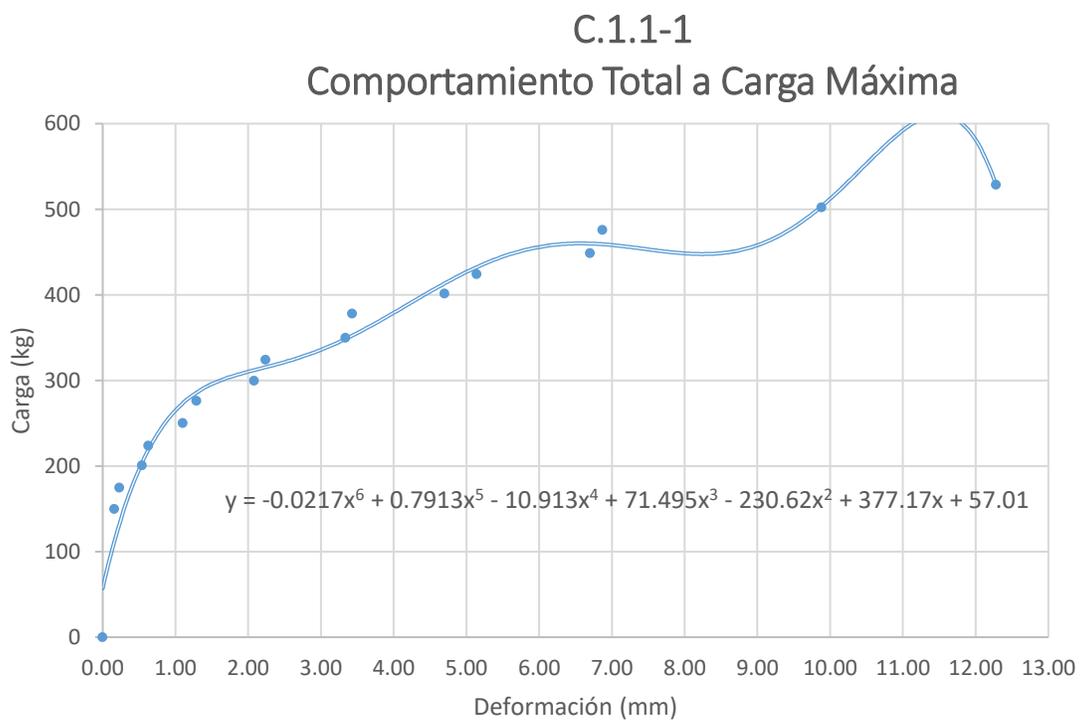
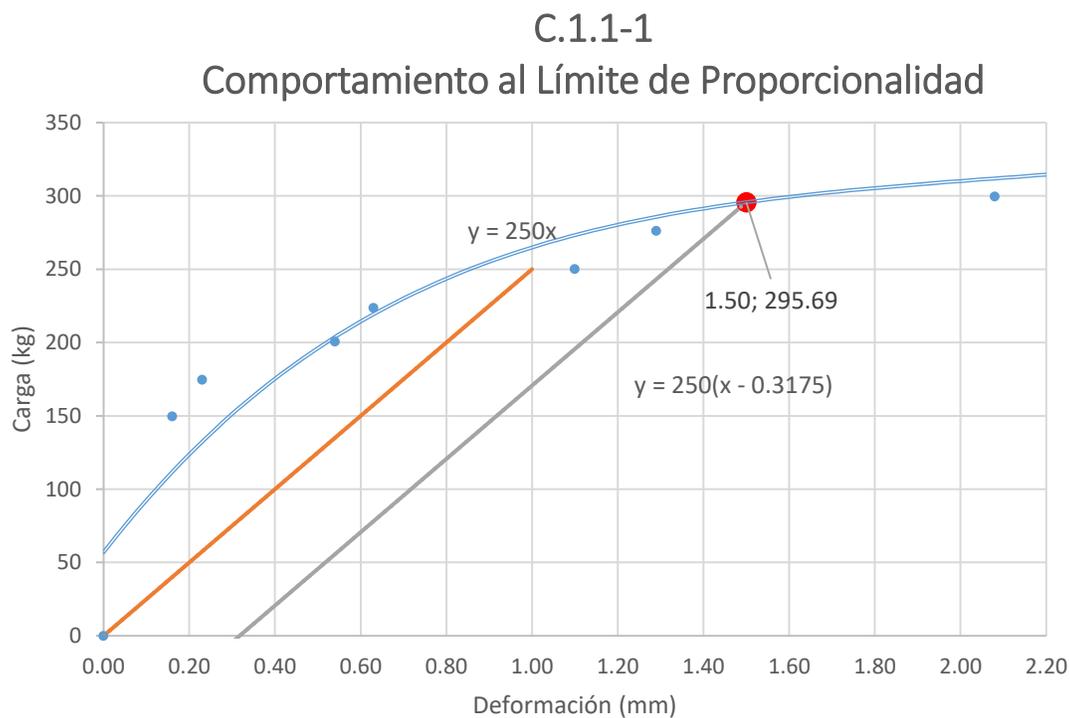
Gráfica 120: Repetición 1 de la muestra B.2.3



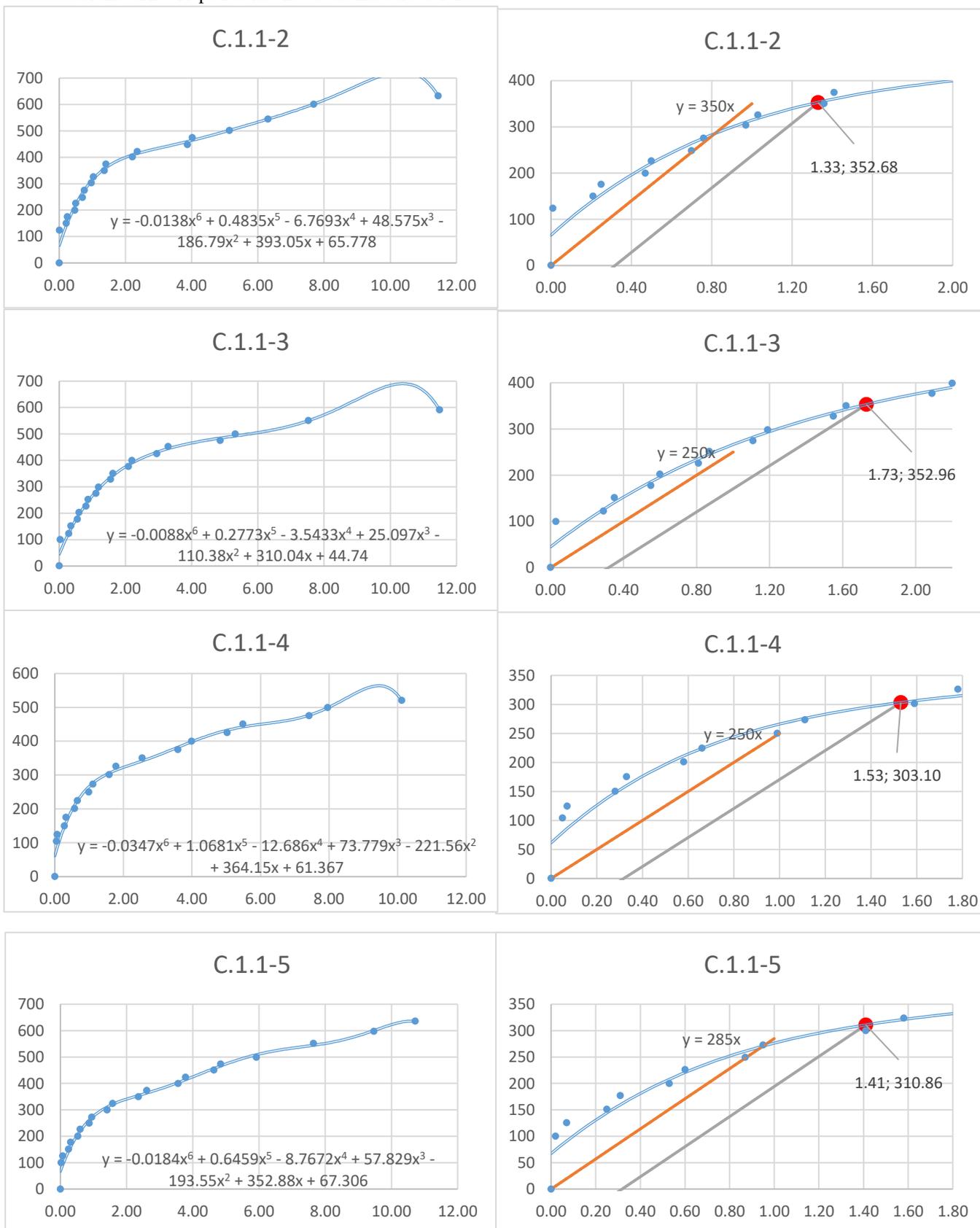
Gráfica 121: Repeticiones 2-5 de la muestra B.2.3



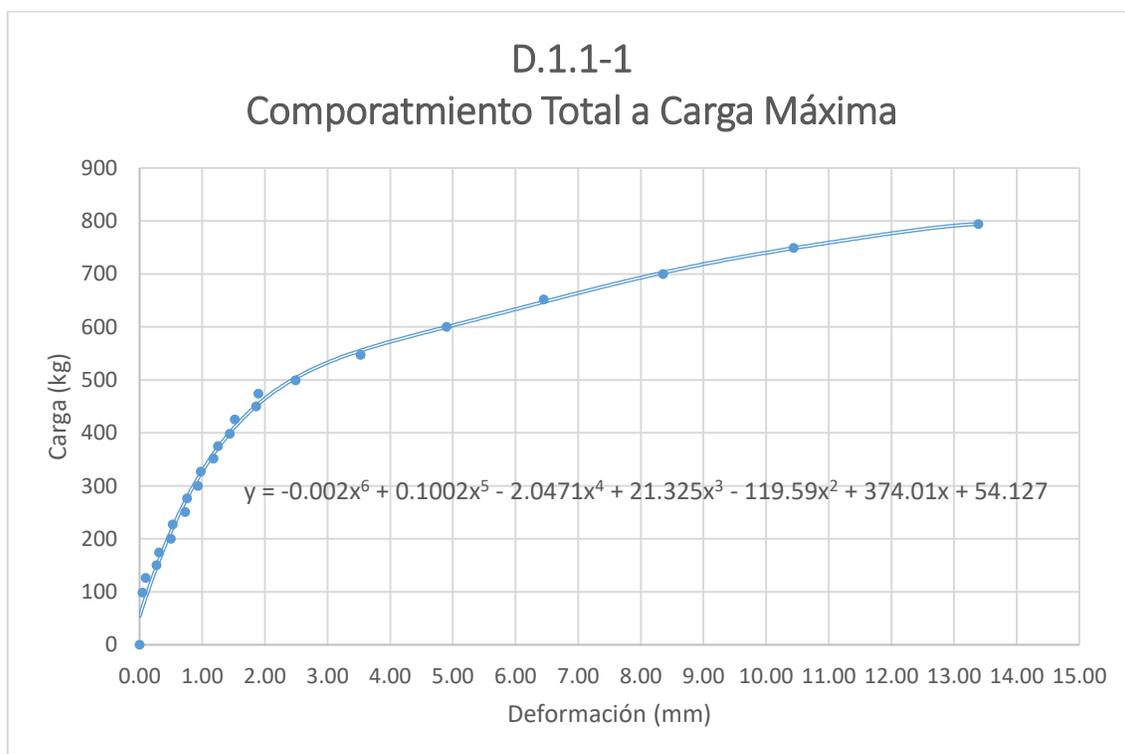
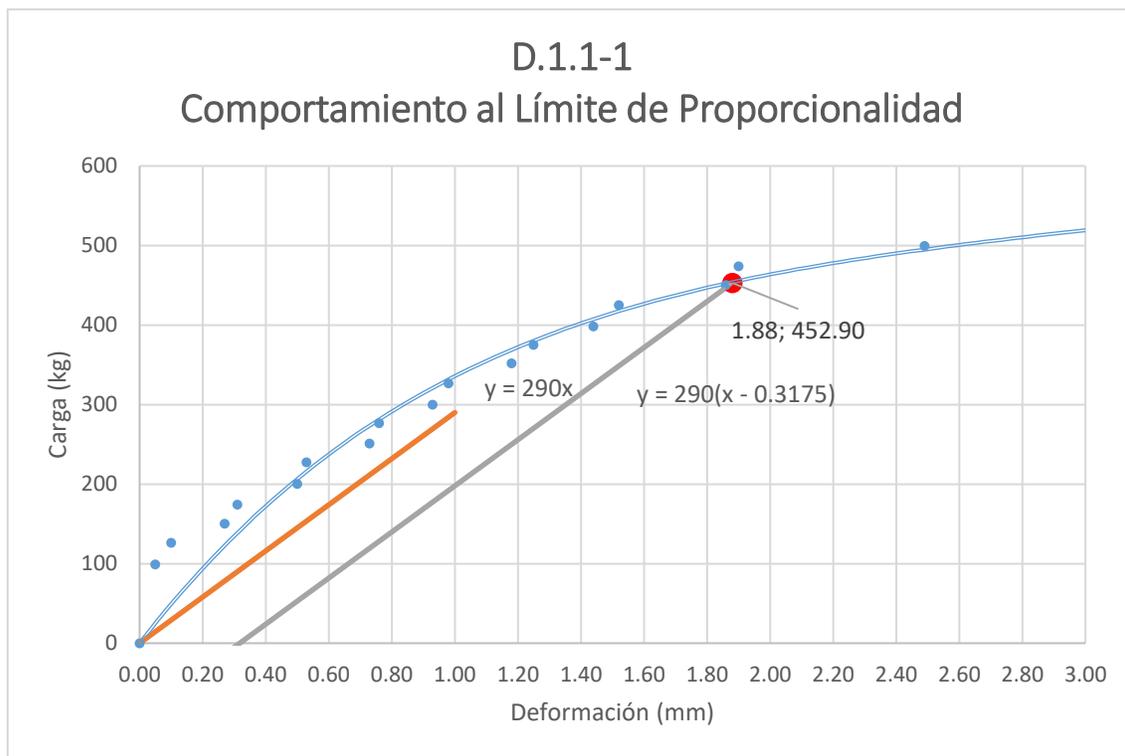
Gráfica 122: Repetición 1 de la muestra C.1.1



Gráfica 123: Repeticiones 2-5 de la muestra C.1.1



Gráfica 124: Repetición 1 de la muestra D.1.1



Gráfica 125: Repeticiones 2-5 de la muestra D.1.1

