



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos

Área de Conocimiento de Expresión Gráfica en la Ingeniería

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ESTRUCTURAL: ANÁLISIS Y
MEJORA DE UNIONES EN CARTÓN**

Grado en
Ingeniería Mecánica

Autora: Raquel Alcaraz Mora

Tutora: María Alonso García

Cotutor: Javier Martín Domínguez

MÁLAGA, octubre de 2025

RESUMEN

Este estudio investiga el comportamiento estructural del cartón corrugado aplicado al diseño de mobiliario ligero y sostenible, con especial atención a las uniones, que constituyen los puntos críticos de transmisión de esfuerzos. Previamente, se ha llevado a cabo una revisión de distintas uniones empleadas en carpintería tradicional, evaluando su posible adaptación al cartón corrugado, complementada con simulaciones digitales para seleccionar y ensayar las configuraciones más desfavorables. A partir de ello, se han analizado seis configuraciones distintas de uniones mediante ensayos experimentales de flexión en voladizo, registrando la carga máxima, las tensiones máximas, las deformaciones y los modos de fallo. Paralelamente, se han realizado simulaciones digitales con el fin de contrastar los resultados experimentales y validar la correspondencia entre el modelo físico y el digital.

Los resultados obtenidos reflejan que factores como la geometría de la unión, la orientación de la onda y el uso de refuerzos adhesivos ejercen una influencia determinante en la rigidez y la resistencia de las conexiones. Aunque se han identificado limitaciones asociadas a la variabilidad del material y a la precisión del montaje manual, los resultados confirman que el cartón corrugado, cuando se diseña con uniones adecuadas, puede constituir una alternativa ligera, sostenible y viable para la fabricación de estructuras de mobiliario.

Palabras clave: *cartón corrugado, uniones estructurales, mobiliario ligero, ensayos de flexión, simulación MEF.*

ABSTRACT

This study investigates the structural behaviour of corrugated cardboard applied to the design of lightweight and sustainable furniture, with particular focus on joints, which constitute the critical points for load transmission. A prior review of different joints used in traditional woodworking was carried out, assessing their potential adaptation to corrugated cardboard, complemented by digital simulations to identify and test the most unfavourable configurations. Based on this, six joint configurations were analysed through experimental cantilever bending tests, recording maximum load, peak stresses, deformations, and failure modes. In parallel, digital simulations were conducted to compare with the experimental results and validate the correspondence between the physical and digital models.

The findings show that factors such as joint geometry, flute orientation, and the use of adhesive reinforcements perform a decisive influence on the stiffness and load-bearing capacity of the connections. Although some limitations were identified, mainly related to material variability and manual assembly accuracy, the results confirm that corrugated cardboard, when combined with properly designed joints, can constitute a lightweight, sustainable, and viable alternative for the manufacturing of furniture structures.

Key words: *corrugated cardboard, structural joints, lightweight furniture, bending tests, FEM simulation.*

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	27
2. MARCO TEÓRICO	37
2.1. Objetivos.....	54
3. METODOLOGÍA	55
3.1. El cartón como material	58
3.1.1. Cartón corrugado	59
3.1.2. Cartón tubular	62
3.1.3. Comportamiento mecánico y clasificación de fallos	64
3.1.4. Elección del material.....	68
3.2. Diseño de uniones.....	69
3.3. Identificación de las diferentes uniones	78
3.4. Tipo de unión y sus esfuerzos	83
3.5. Tipo y forma de unión aplicadas al cartón	88
3.6. Determinación de uniones a partir del análisis estructural y proceso de diseño de probetas.....	99
3.7. Estudio experimental de las uniones	112
4. RESULTADOS	133
4.1. Ensayos de caracterización mecánica del cartón.....	135
4.1.1. Probeta L1.....	135
4.1.1.1. Gráfica fuerza-tiempo	135
4.1.1.2. Resultado del desplazamiento máximo	136
4.1.2. Probeta L2.....	138
4.1.2.1. Gráfica fuerza-tiempo	138
4.1.2.2. Resultado del desplazamiento máximo	139
4.1.3. Probeta T1	141
4.1.3.1. Gráficas fuerza-tiempo	141
4.1.3.2. Resultado del desplazamiento máximo	142
4.1.4. Probeta T2	144
4.1.4.1. Gráfica fuerza-tiempo	144
4.1.4.2. Resultado del desplazamiento máximo	145

Índice

4.1.5.	Comparativa entre L1 y T1	147
4.1.6.	Comparativa entre L2 y T2	149
4.1.7.	Comparativa entre L1 y L2.....	151
4.1.8.	Comparativa entre T1 y T2	153
4.2.	Ensayos de caracterización mecánica de las uniones A/B (HHV) ...	155
4.2.1.	Unión A-HHV-1/2/3	155
4.2.1.1.	Gráficas fuerza-tiempo	155
4.2.1.2.	Resultado del desplazamiento máximo	157
4.2.2.	Unión B-HHV-1/2/3	159
4.2.2.1.	Gráficas fuerza-tiempo	159
4.2.2.2.	Resultado del desplazamiento máximo	161
4.2.3.	Comparativa entre uniones A-HHV y B-HHV	163
4.3.	Ensayos de caracterización mecánica de las uniones A/B (PH)	165
4.3.1.	Unión A-PH-1/2/3.....	165
4.3.1.1.	Gráficas fuerza-tiempo	165
4.3.1.2.	Resultado del desplazamiento máximo	167
4.3.2.	Unión B-PH-1/2/3	169
4.3.2.1.	Gráficas fuerza-tiempo	169
4.3.2.2.	Resultado del desplazamiento máximo	171
4.3.3.	Comparativa entre uniones A-PH y B-PH.....	173
4.4.	Ensayos de caracterización mecánica de las uniones A/C (PV)	175
4.4.1.	Unión A-PV-1/2/3	175
4.4.1.1.	Gráficas fuerza-tiempo	175
4.4.1.2.	Resultado del desplazamiento máximo	177
4.4.2.	Unión C-PV-1/2/3	179
4.4.2.1.	Gráficas fuerza-tiempo	179
4.4.2.2.	Resultado del desplazamiento máximo	181
4.4.3.	Comparativa entre uniones A-PV y C-PV	183
4.5.	Tratamiento estadístico de los resultados	185
4.5.1.	Cálculo de parámetros estadísticos.....	185
4.5.2.	Unión A-HHV	187

4.5.3.	Unión B-HHV	188
4.5.4.	Unión A-PH	189
4.5.5.	Unión B-PH	190
4.5.6.	Unión A-PV	191
4.5.7.	Unión C-PV	192
4.6.	Comparativa entre resultados experimentales y el modelo de simulación.....	193
5.	DISCUSIONES	195
5.1.	Comparación de los resultados con estudios previos	197
5.2.	Comportamiento mecánico observado en los ensayos	204
5.3.	Limitaciones del estudio	209
5.4.	Recomendaciones para trabajos futuros	210
6.	CONCLUSIONES.....	211
7.	BIBLIOGRAFÍA	217
ANEXO 1.	Análisis por el Método de Elementos Finitos.....	223
1.1.	Estudio estructural del conjunto	226
1.1.1.	Descripción del modelo.....	226
1.1.2.	Ensayos según norma UNE-EN-12520	228
1.1.3.	Resultados y análisis.....	235
1.1.3.1.	Ensayo de carga estática sobre el asiento y el respaldo	237
1.1.3.2.	Ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento .	239
1.1.3.3.	Ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para pies .	241
1.1.3.4.	Ensayo de carga estática sobre las patas delanteras.....	243
1.1.3.5.	Ensayo de carga estática sobre las patas laterales.....	245
1.2.	Estudio individual de las uniones	248
1.2.1.	Metodología general	248
1.2.2.	Análisis por unión tipo horizontal + vertical	249
1.2.2.1.	Unión caja y espiga	250
1.2.2.2.	Unión caja y espiga con cuña	252
1.2.3.	Análisis por unión tipo horizontal + horizontal	254
1.2.3.1.	Unión caja y espiga	255

Índice

1.2.3.2.	Unión caja y espiga con cuña	257
1.2.4.	Análisis por unión tipo horizontal + horizontal + vertical 1	259
1.2.4.1.	Unión caja y espiga	260
1.2.4.2.	Unión caja y espiga con cuña	262
1.2.5.	Análisis por unión tipo horizontal + horizontal + vertical 2	264
1.2.5.1.	Unión caja y espiga	265
1.2.5.2.	Unión caja y espiga con cuña	267
1.2.6.	Análisis por unión tipo plancha + horizontal.....	269
1.2.6.1.	Unión caja y espiga	270
1.2.6.2.	Unión caja y espiga con cuña	272
1.2.7.	Análisis por unión tipo plancha + vertical 1	274
1.2.7.1.	Unión caja y espiga	275
1.2.7.2.	Unión caja y espiga con pasador cilíndrico	277
1.2.8.	Análisis por unión tipo plancha + vertical 2	279
1.2.8.1.	Unión caja y espiga	280
1.2.8.2.	Unión caja y espiga con pasador cilíndrico	282
1.2.9.	Comparativa de resultados	284
ANEXO 2. Modelado MEF basado en resultados experimentales.....		287
2.1.	Unión tipo A-HHV	290
2.2.	Unión tipo B-HHV	291
2.3.	Unión tipo A-PH	292
2.4.	Unión tipo B-PH	293
2.5.	Unión tipo A-PV.....	294
2.6.	Unión tipo C-PV	295
ANEXO 3. Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones		299
3.1.	Ensayo de flexión tipo biempotrado	302
3.2.	Ensayo de flexión tipo voladizo	305
3.3.	Ensayo de flexión tipo voladizo en una unión triple	308
3.4.	Desarrollo de cálculos para cada ensayo.....	312
3.4.1.	Probeta L1 y T1	312

3.4.2.	Probeta L2 y T2	314
3.4.3.	Unión A-HHV y B-HHV	316
3.4.4.	Unión A-PH y B-PH.....	321
3.4.5.	Unión A-PV y C-PV	324

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Paper Log House	30
Figura 2. Cardboard Cathedral.....	30
Figura 3. Feria de Arte Contemporáneo Art Madrid.....	30
Figura 4. Evento Focus PYME Alicante	30
Figura 5. Mobiliario para eventos o ferias	31
Figura 6. Colección Easy Edges de Frank O. Gehry.....	32
Figura 7. Objetos de Giles Miller	33
Figura 8. Direcciones ortotrópicas del cartón corrugado	33
Figura 9. Orientación de las ondas frente a esfuerzos de compresión	33
Figura 10. a) Caja y espiga, b) Entalladura, c) Cola de milano, d) Empalme ...	34
Figura 11. Chair Thing de Peter Murdoch	35
Figura 12. Diseño de Peter Raacke	35
Figura 13. Diseño de Riki Watanabe	35
Figura 14. Nomadic Furniture de James Hennessy y Victor Papanek	39
Figura 15. Cama plegable egipcia	40
Figura 16. Silla en forma de “X”	40
Figura 17. Direcciones ortotrópicas	42
Figura 18. Microestructura cartón.....	43
Figura 19. Capas cartón corrugado	43
Figura 20. Clasificación uniones de la carpintería tradicional.....	44
Figura 21. a) Empalme simple b) Empalme con refuerzos	45
Figura 22. Disposiciones del empalme de llave.....	45
Figura 23. Zonas críticas empalme de llave	45
Figura 24. Cola de milano.....	46
Figura 25. Mortaja y espiga	46
Figura 26. a) Unión con sujetador plano cruzado adhesivo, b) Unión con sujetador excéntrico friccional	47
Figura 27. Tipo de unión y su método ensayo correspondiente	48
Figura 28. Ejemplos de uniones madera-madera	50
Figura 29. a) Cartón de 3 capas, b) Cartón de 5 capas	50

Figura 30. a) Encaje sin adhesivos, b) Unión con refuerzos, c) Extracción de material	51
Figura 31. Delaminación del papel	51
Figura 32. Esquema metodología desarrollada	58
Figura 33. Estructura cartón corrugado.....	59
Figura 34. Clasificación cartón corrugado según a) número de capas, b) tipo de onda	60
Figura 35. Resistencia a) ECT b) BCT	62
Figura 36. Cartón tubular: a) tipos, b) como embalaje, c) como componente estructural en el diseño de muebles	62
Figura 37. Direcciones ortogonales cartón corrugado	64
Figura 38. Elección del material	68
Figura 39. Identificación de uniones en una silla	78
Figura 40. Unión horizontal + vertical.....	79
Figura 41. Unión horizontal + horizontal	79
Figura 42. Unión horizontal + horizontal + vertical	80
Figura 43. Unión plancha + horizontal	80
Figura 44. Unión plancha + vertical	81
Figura 45. Esfuerzos unión horizontal + vertical	83
Figura 46. Esfuerzos unión horizontal + horizontal.....	84
Figura 47. Esfuerzos unión horizontal + horizontal.....	84
Figura 48. Esfuerzos unión horizontal + horizontal + vertical.....	85
Figura 49. Esfuerzos unión horizontal + horizontal + vertical.....	85
Figura 50. Esfuerzos unión plancha + horizontal	86
Figura 51. Esfuerzos unión plancha + vertical	86
Figura 52. Esfuerzos unión plancha + vertical	87
Figura 53. Direcciones principales	100
Figura 54. Cortadora láser modelo Ibero Laser 1390	108
Figura 55. Archivo .dxf diseño de las uniones seleccionadas para ensayo ..	108
Figura 56. Parámetros de corte para distintos espesores	109
Figura 57. Distancia focal de la cortadora láser	109

Índice

Figura 58. Prueba de tolerancia a) caja y espiga b) elemento tubular	111
Figura 59. Proceso de corte	111
Figura 60. Mesa de trabajo extensible	112
Figura 61. Tornillos de apriete.....	112
Figura 62. Célula de carga Daysensor DYLY-102.....	113
Figura 63. Configuración general de los ensayos.....	113
Figura 64. Ensayo de flexión a) biempotrado, b) en voladizo	114
Figura 65. Impresora 3D Ultimaker S5.....	114
Figura 66. Pieza para el ensayo de flexión biempotrado	115
Figura 67. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión biempotrado	115
Figura 68. Pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 1 ..	116
Figura 69. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 1	116
Figura 70. Pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 2 ...	117
Figura 71. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 2	117
Figura 72. Pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 3 ...	118
Figura 73. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 3	118
Figura 74. Configuración ensayos para las uniones tipo A-HHV y B-HHV....	119
Figura 75. Configuración de los ensayos para las uniones tipo A-PH y B-PH	119
Figura 76. Configuración de los ensayos para las uniones tipo A-PV y C-PV	120
Figura 77. Sujeción probetas tipo L1/T1 y L2/T2	122
Figura 78. Sujeción uniones tipo A-HHV y B-HHV	125
Figura 79. Sujeción uniones tipo A-PH y B-PH.....	125
Figura 80. Sujeción uniones tipo A-PV y C-PV	125
Figura 81. Registro en Excel de los datos obtenidos en los ensayos.....	130
Figura 82. Software Tracker para la medición del desplazamiento	130
Figura 83. Probeta L1	135
Figura 84. Probeta L1 antes del ensayo experimental	135
Figura 85. Probeta L1 tras el ensayo experimental	135

Figura 86. Gráfica fuerza-tiempo L1	136
Figura 87. Probeta L1 tras el ensayo de flexión	137
Figura 88. Probeta L2	138
Figura 89. Probeta L2 antes del ensayo experimental	138
Figura 90. Probeta L2 tras el ensayo experimental	138
Figura 91. Gráfica fuerza-tiempo L2	139
Figura 92. Probeta L2 tras el ensayo de flexión	140
Figura 93. Probeta T1	141
Figura 94. Probeta T1 antes del ensayo experimental	141
Figura 95. Probeta T1 tras el ensayo experimental.....	141
Figura 96. Gráfica fuerza-tiempo T1	142
Figura 97. Probeta T1 tras el ensayo de flexión	143
Figura 98. Probeta T2	144
Figura 99. Probeta T2 antes del ensayo experimental	144
Figura 100. Probeta T2 tras el ensayo experimental.....	144
Figura 101. Gráfica fuerza-tiempo T2	145
Figura 102. Probeta T2 tras el ensayo de flexión	146
Figura 103. Configuración ensayo de flexión biempotrado.....	147
Figura 104. Gráfica comparativa fuerza-tiempo L1 y T1	147
Figura 105. Configuración ensayo de flexión en voladizo	149
Figura 106. Gráfica comparativa fuerza-tiempo L2 y T2	149
Figura 107. Configuración ensayo de flexión a) biempotrado, b) en voladizo	151
Figura 108. Gráfica comparativa fuerza-tiempo L1 y L2	151
Figura 109. Configuración ensayo flexión a) biempotrado, b) en voladizo ...	153
Figura 110. Gráfica comparativa fuerza-tiempo T1 y T2	153
Figura 111. Unión tipo A-HHV	155
Figura 112. Probeta A-HHV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental	155
Figura 113. Gráfica fuerza-tiempo unión A-HHV-1	156
Figura 114. Gráfica fuerza-tiempo unión A-HHV-2	156
Figura 115. Gráfica fuerza-tiempo unión A-HHV-3.....	156

Índice

Figura 116. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-HHV-1/2/3	157
Figura 117. Probetas A-HHV-1/2/3.....	158
Figura 118. Unión tipo B-HHV	159
Figura 119. Probeta B-HHV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental	159
Figura 120. Gráfica fuerza-tiempo unión B-HHV-1	160
Figura 121. Gráfica fuerza-tiempo unión B-HHV-2	160
Figura 122. Gráfica fuerza-tiempo unión B-HHV-3.....	160
Figura 123. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión B-HHV-1/2/3.....	161
Figura 124. Probetas B-HHV-1/2/3.....	162
Figura 125. Uniones tipo A-HHV y B-HHV	163
Figura 126. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-HHV y B-HHV	163
Figura 127. Unión tipo A-PH.....	165
Figura 128. Probeta A-PH a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental	165
Figura 129. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PH-1.....	166
Figura 130. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PH-2	166
Figura 131. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PH-3	166
Figura 132. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PH-1/2/3	167
Figura 133. Probetas A-PH-1/2/3	168
Figura 134. Unión tipo B-PH.....	169
Figura 135. Probeta B-PH a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental	169
Figura 136. Gráfica fuerza-tiempo unión B-PH-1.....	170
Figura 137. Gráfica fuerza-tiempo unión B-PH-2	170
Figura 138. Gráfica fuerza-tiempo unión B-PH-3	170
Figura 139. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión B-PH-1/2/3	171
Figura 140. Probetas B-PH-1/2/3.....	172
Figura 141. Uniones tipo A-PH y B-PH.....	173
Figura 142. Gráfica comparativa fuerza-tiempo A-PH-1/2/3 y B-PH-1/2/3....	173
Figura 143. Unión tipo A-PV	175

Figura 144. Probeta A-PV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental	175
Figura 145. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PV-1	176
Figura 146. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PV-2.....	176
Figura 147. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PV-3.....	176
Figura 148. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PV-1/2/3	177
Figura 149. Probetas A-PV-1/2/3	178
Figura 150. Unión tipo C-PV	179
Figura 151. Probeta C-PV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental	179
Figura 152. Gráfica fuerza-tiempo unión C-PV-1.....	180
Figura 153. Gráfica fuerza-tiempo unión C-PV-2	180
Figura 154. Gráfica fuerza-tiempo unión C-PV-3.....	180
Figura 155. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión C-PV-1/2/3	181
Figura 156. Probetas C-PV-1/2/3.....	182
Figura 157. Uniones tipo A-PV y C-PV.....	183
Figura 158. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PV-1/2/3 y C-PV-1/2/3	183
Figura 159. Gráfica comparativa L1, T1, L2 y T2	198
Figura 160. Gráfica comparativa de la fuerza máxima en probetas continuas y probetas con uniones.....	199
Figura 161. Modos de fallo en uniones a) A-HHV, b) A-PH, c) B-HHV	200
Figura 162. Gráfica comparativa de la fuerza máxima en uniones sin refuerzos y uniones reforzadas.....	201
Figura 163. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PV-1/2/3	202
Figura 164. Gráfica comparativa de la flecha máxima en uniones sin refuerzos y uniones reforzadas.....	203
Figura 165. Clasificación del comportamiento estructural de las uniones en función de la fuerza y la flecha máximas	208
Figura 166. Dimensiones silla	226
Figura 167. Plantilla de posición de la carga	230
Figura 168. Útil de carga del asiento.....	230

Índice

Figura 169. Útil de carga del respaldo.....	231
Figura 170. Posicionamiento plantilla de carga.....	232
Figura 171. Aplicación de la carga sobre el asiento y respaldo	233
Figura 172. Aplicación de la carga sobre las patas delanteras.....	234
Figura 173. Aplicación de la carga sobre las patas laterales	234
Figura 174. Modelo estructural de la silla, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes	235
Figura 175. Malla generada para el modelo estructural de la silla	236
Figura 176. Configuración ensayo carga estática sobre asiento y respaldo .	237
Figura 177. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre el asiento y respaldo	238
Figura 178. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre el asiento y respaldo.....	238
Figura 179. Configuración ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento.....	239
Figura 180. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento	240
Figura 181. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento	240
Figura 182. Configuración ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies	241
Figura 183. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies	242
Figura 184. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies.....	242
Figura 185. Configuración ensayo carga estática sobre patas delanteras	243
Figura 186. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre las patas delanteras.....	244
Figura 187. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre las patas delanteras	244
Figura 188. Configuración ensayo carga estática sobre las patas laterales ..	245

Figura 189. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre las patas laterales.....	246
Figura 190. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre las patas laterales	246
Figura 191. Unión horizontal + vertical, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes	249
Figura 192. Unión horizontal + vertical tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	250
Figura 193. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga	251
Figura 194. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga.....	251
Figura 195. Unión horizontal + vertical tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	252
Figura 196. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga con cuña.....	253
Figura 197. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga con cuña.....	253
Figura 198. Unión horizontal + horizontal, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes	254
Figura 199. Unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	255
Figura 200. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga	256
Figura 201. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga	256
Figura 202. Unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	257
Figura 203. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga con cuña.....	258

Índice

Figura 204. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga con cuña 258

Figura 205. Unión horizontal + horizontal + vertical 1, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes 259

Figura 206. Unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada 260

Figura 207. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga..... 261

Figura 208. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga..... 261

Figura 209. Unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada 262

Figura 210. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga con cuña..... 263

Figura 211. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga con cuña..... 263

Figura 212. Unión horizontal + horizontal + vertical 2, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes 264

Figura 213. Unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada 265

Figura 214. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga..... 266

Figura 215. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga..... 266

Figura 216. Unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada 267

Figura 217. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga con cuña..... 268

Figura 218. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga con cuña 268

Figura 219. Unión plancha + horizontal, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes	269
Figura 220. Unión plancha + horizontal tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	270
Figura 221. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga	271
Figura 222. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga.....	271
Figura 223. Unión plancha + horizontal tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	272
Figura 224. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga con cuña	273
Figura 225. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga con cuña	273
Figura 226. Unión plancha + vertical 1, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes	274
Figura 227. Unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	275
Figura 228. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga.....	276
Figura 229. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga	276
Figura 230. Unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada	277
Figura 231. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico	278
Figura 232. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico	278
Figura 233. Unión plancha + vertical 2, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes	279

Índice

Figura 234. Unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada 280

Figura 235. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga..... 281

Figura 236. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga 281

Figura 237. Unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada 282

Figura 238. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico 283

Figura 239. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico 283

Figura 240. Configuración ensayo de carga estática sobre unión A-HHV..... 290

Figura 241. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión A-HHV 290

Figura 242. Configuración ensayo de carga estática sobre unión B-HHV..... 291

Figura 243. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión B-HHV 291

Figura 244. Configuración ensayo de carga estática sobre unión A-PH 292

Figura 245. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión A-PH..... 292

Figura 246. Configuración ensayo de carga estática sobre unión B-PH 293

Figura 247. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión B-PH 293

Figura 248. Configuración ensayo de carga estática sobre unión A-PV..... 294

Figura 249. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión A-PV 294

Figura 250. Configuración ensayo de carga estática sobre unión C-PV..... 295

Figura 251. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión C-PV 295

Figura 252. Configuración ensayo biempotrado..... 302

Figura 253. Ensayos experimentales de las probetas a) L1, b) T1	302
Figura 254. Configuración ensayo voladizo.....	305
Figura 255. Ensayos experimentales de las probetas a) L2, b) T2	305
Figura 256. Ensayos experimentales de las uniones a) A-HHV, b) A-PH, c) A-PV, d) B-HHV, e) B-PH, f) C-PV.....	306
Figura 257. Configuración ensayo A-HHV y B-HHV.....	308
Figura 258. Esquema de solicitaciones en la unión	309
Figura 259. Configuración ensayo voladizo en una unión triple 1	309
Figura 260. Configuración ensayo voladizo en una unión triple 2	309
Figura 261. Configuración 3D probetas L1 y T1.....	312
Figura 262. Configuración 2D ensayo L1 y T1	312
Figura 263. Configuración 3D probetas L2 y T2	314
Figura 264. Configuración 2D ensayo L2 y T2	314
Figura 265. Configuración 3D ensayo a) A-HHV, b) B-HHV.....	316
Figura 266. Configuración 2D ensayo A-HHV y B-HHV pieza principal.....	316
Figura 267. Configuración 2D ensayo A-HHV y B-HHV pieza auxiliar	317
Figura 268. Configuración 3D ensayo a) A-PH, b) B-PH.....	321
Figura 269. Configuración 2D ensayo A-PH y B-PH.....	321
Figura 270. Configuración 3D ensayo a) A-PV b) C-PV.....	324
Figura 271. Configuración 2D ensayo A-PV y C-PV.....	324

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de cartón corrugado.....	61
Tabla 2. Clasificación cartón tubular	63
Tabla 3. Tipos de fallos en cartón corrugado	67
Tabla 4. Uniones en madera adaptadas al cartón. Cartón - Cartón	70
Tabla 5. Uniones en madera adaptadas al cartón. Cartón - Cola.....	74
Tabla 6. Uniones en madera adaptadas al cartón. Cartón - Soporte	75
Tabla 7. Tipos de unión en madera	82
Tabla 8. Tipo y forma de unión en cartón	89
Tabla 9. Tipo de unión y forma su aplicación	97
Tabla 10. Selección de uniones a comparar	98
Tabla 11. Dimensiones probetas caja y espiga	101
Tabla 12. Dimensiones probetas caja y espiga con cuña	103
Tabla 13. Dimensiones probetas con pasador cilíndrico	105
Tabla 14. Resultados obtenidos en la simulación	106
Tabla 15. Uniones seleccionadas para ensayo físico	107
Tabla 16. Parámetros de la cortadora láser	110
Tabla 17. Nomenclatura de las probetas del estudio previo del cartón	121
Tabla 18. Ensayos para la caracterización previa del cartón.....	121
Tabla 19. Configuración de los ensayos para L1 y T1.....	122
Tabla 20. Configuración de los ensayos para L2 y T2.....	123
Tabla 21. Comparación de las probetas ensayadas según tipo de unión y subtipo geométrico.....	124
Tabla 22. Configuración de los ensayos para la unión tipo A-HHV.....	126
Tabla 23. Configuración de los ensayos para la unión tipo B-HHV.....	127
Tabla 24. Configuración de los ensayos para la unión tipo A-PH	127
Tabla 25. Configuración de los ensayos para la unión tipo B-PH	128
Tabla 26. Configuración de los ensayos para la unión tipo A-PV	128
Tabla 27. Configuración de los ensayos para la unión tipo C-PV.....	129
Tabla 28. Resultados del desplazamiento máximo L1	137
Tabla 29. Parámetros calculados para L1.....	137

Tabla 30. Resultados del desplazamiento máximo L2	139
Tabla 31. Parámetros calculados para L2	140
Tabla 32. Resultados del desplazamiento máximo T1	142
Tabla 33. Parámetros calculados para T1	143
Tabla 34. Resultados del desplazamiento máximo T2	145
Tabla 35. Parámetros calculados para T2	146
Tabla 36. Parámetros calculados para L1 y T1	148
Tabla 37. Parámetros calculados para L2 y T2	150
Tabla 38. Parámetros calculados para L1 y L2	152
Tabla 39. Parámetros calculados para T1 y T2	154
Tabla 40. Resultados del desplazamiento máximo A-HHV-1/2/3	158
Tabla 41. Resultados del desplazamiento máximo B-HHV-1/2/3	162
Tabla 42. Parámetros calculados para A-HHV y B-HHV	164
Tabla 43. Resultados del desplazamiento máximo A-PH-1/2/3	168
Tabla 44. Resultados del desplazamiento máximo B-PH-1/2/3	172
Tabla 45. Parámetros calculados para A-PH y B-PH	174
Tabla 46. Resultados del desplazamiento máximo A-PV-1/2/3.....	178
Tabla 47. Resultados del desplazamiento máximo C-PV-1/2/3	182
Tabla 48. Parámetros calculados para A-PV y C-PV.....	184
Tabla 49. Valores de $t_1 - \alpha$ extraído de la norma UNE 66040:2003.....	186
Tabla 50. Comparativa resultados experimentales y simulados	194
Tabla 51. Resultados de los ensayos experimentales	204
Tabla 52. Parámetros para cartón corrugado	227
Tabla 53. Ensayos y parámetros de ensayo según la norma UNE-EN 12520.	229
Tabla 54. Resultados tensiones y desplazamientos de los ensayos según la norma UNE-EN 1728:2013	247
Tabla 55. Resultados obtenidos en la simulación.....	284
Tabla 56. Uniones seleccionadas para los ensayos físicos	285
Tabla 57. Comparativa resultados experimentales y simulados	296
Tabla 58. Parámetros calculados para L1 y T1	313
Tabla 59. Parámetros calculados para L2 y T2	315

Índice

Tabla 60. Parámetros calculados para A-HHV y B-HHV	320
Tabla 61. Parámetros calculados para A-PH y B-PH.....	323
Tabla 62. Parámetros calculados para A-PV y C-PV.....	326

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	185
Ecuación 2	185
Ecuación 3	186
Ecuación 4	186
Ecuación 5	193
Ecuación 6	303
Ecuación 7	304
Ecuación 8	304
Ecuación 9	307
Ecuación 10	307
Ecuación 11	307
Ecuación 12	310
Ecuación 13	311
Ecuación 14	311
Ecuación 15	311
Ecuación 16	311
Ecuación 17	311
Ecuación 18	311

INTRODUCCIÓN

1

En los últimos años, se ha intensificado la búsqueda de soluciones estructurales más **ligeras, desmontables y sostenibles**, impulsada por la necesidad de adaptarse a contextos cambiantes y **minimizar el impacto ambiental** asociado a los materiales convencionales. En este contexto, el **cartón** ha comenzado a ser considerado como una alternativa viable, no solo por su bajo peso y facilidad de manipulación, sino también por su capacidad para **soportar cargas y resistir esfuerzos** cuando se optimiza su geometría y se analizan sus propiedades mecánicas con mayor precisión.

La **arquitectura** ha comenzado a explorar materiales alternativos como el cartón. El estudio de Diarte y Shaffer (2021) ofrece una revisión amplia sobre cómo se ha utilizado el **cartón en arquitectura** desde 1940 hasta 2019. Muestra que la arquitectura con cartón no es un fenómeno reciente, aunque su desarrollo se ha intensificado desde los años noventa. Inicialmente asociado a soluciones de emergencia, el cartón ha sido progresivamente incorporado en sistemas constructivos más elaborados, utilizados en **pabellones, viviendas, refugios, y edificios públicos**. Este tipo de arquitectura ha evolucionado en torno a dos enfoques principales: por un lado, el estudio de sus propiedades técnicas para mejorar su resistencia estructural, y por otro, su aplicación práctica en sistemas modulares, desmontables y de bajo coste. Aunque la mayoría de las construcciones con cartón han sido temporales, existen casos significativos de **estructuras semi-permanentes o duraderas**, lo que demuestra que, con el tratamiento y diseño adecuados, este material puede ofrecer soluciones arquitectónicas viables **más allá de lo efímero**. Además, se menciona una de las figuras más influyentes en la consolidación del cartón como material arquitectónico, **Shigeru Ban**, cuyo trabajo desde los años noventa marcó un punto de inflexión en la forma de concebir estructuras ligeras y temporales. Ban desarrolló sistemas constructivos basados en **tubos de papel**, utilizados como columnas, cerchas y elementos de cubierta, combinando ligereza y resistencia. Sus obras, como la *Paper Log House* (Figura 1), la *Paper House*, o la *Cardboard Cathedral* (Figura 2), demuestran que, bajo

Introducción

un diseño preciso, el cartón puede responder a **exigencias reales de habitabilidad**.



Figura 1. Paper Log House || Fuente: centrepompidou.fr



Figura 2. Cardboard Cathedral || Fuente: architectureau.com

El cartón ha encontrado un lugar destacado en contextos donde la temporalidad y la facilidad de montaje son esenciales, como en **eventos masivos** o **ferias**. En estos entornos, el mobiliario se utiliza de **manera transitoria**, montándose y desmontándose rápidamente para luego ser **desechado** o **reutilizado** de forma económica y eficiente. Este enfoque permite explorar soluciones de diseño que prioricen la **ligereza**, la **facilidad de transporte** y el **bajo costo**, adaptándose a las necesidades de estos **espacios efímeros**. Ejemplos representativos de esta tendencia pueden verse en eventos como la Feria de Arte Contemporáneo Art Madrid (Figura 3) y el evento Focus PYME Alicante (Figura 4), donde el mobiliario de cartón se ha integrado como una alternativa funcional y sostenible.



Figura 3. Feria de Arte Contemporáneo Art Madrid || Fuente: cartonlab.com



Figura 4. Evento Focus PYME Alicante || Fuente: cartonlab.com

Según Melo Robert (2016), el cartón corrugado ha sido propuesto como una solución viable y sostenible para el diseño de **mobiliario destinado a eventos masivos** (Figura 5), particularmente en contextos donde el espacio es reducido y existe una necesidad urgente de mobiliario **desechable y ecológico**. El estudio identifica una carencia importante de mobiliario en eventos donde la afluencia de público es masiva y las soluciones convencionales como sillas plásticas no son viables por temas logísticos y ambientales. A través de una combinación de métodos experimentales y simulaciones digitales se demuestra que el cartón corrugado puede cumplir con los requisitos estructurales de resistencia necesarios para ser usado en este tipo de aplicaciones. Además, es un soporte para fines publicitarios, añadiendo valor comercial al diseño.



Figura 5. Mobiliario para eventos o ferias || Fuente: pixarprinting.es

Esta cualidad efímera y adaptable del cartón también se vincula con **nuevas formas de habitar**, más **nómadas y flexibles**, donde la movilidad y la ligereza del material lo convierten en una solución interesante. Según Castañeda Aller (2017), valores como la estabilidad o la pertenencia han perdido fuerza frente a la movilidad y la adaptabilidad. El sedentarismo, que antes definía la forma de vida dominante, está siendo reemplazado por nuevas formas de habitar ligadas al **nomadismo contemporáneo**. En este contexto, los modos de vida son más inestables y requieren entornos capaces de acompañar estos desplazamientos, lo que refuerza el valor de soluciones ligeras y adaptables.

Introducción

Se ha reconfigurado el uso del cartón desde una perspectiva profundamente conceptual y estética, demostrando que este material, tradicionalmente asociado con lo efímero, puede ocupar un lugar central en la narrativa del **diseño contemporáneo**. A través de propuestas que combinan exploración material, lenguaje escultórico y sensibilidad espacial, su trabajo no solo amplía las posibilidades técnicas del cartón, sino que también desafía los límites entre arte, arquitectura y sostenibilidad. Como expone Ruiz Merino (2014), uno de los hitos fundamentales en esta evolución fue el trabajo del arquitecto **Frank O. Gehry**, quien entre 1969 y 1973 desarrolló la serie *Easy Edges* (Figura 6), que transformó la percepción del cartón en el diseño de mobiliario. Gehry demostró la funcionalidad del cartón al crear sillas robustas construidas con **sesenta láminas de cartón corrugado ensambladas con tornillos**.



Figura 6. Colección Easy Edges de Frank O. Gehry || Fuente: themillievintage.com

Siguiendo esta línea, diseñadores contemporáneos como **Giles Miller** y **Luis Carlos Velásquez** han continuado innovando con el cartón en el ámbito del interiorismo. Miller, quien comenzó a trabajar con este material en 2006, ha desarrollado superficies y objetos que juegan con la **ondulación y textura del cartón** (Figura 7), aplicándolo en productos como sillas, armarios, mesas, lámparas, relojes, maletines, etc. Por su parte, Velásquez emplea el cartón como elemento central de su mobiliario conceptual, utilizando un sistema de repetición de perfiles ensamblados con adhesivos, **alejándose de la sujeción mecánica de Gehry** y aportando una visión más orgánica y sostenible.



Figura 7. Objetos de Giles Miller || Fuente: idnworld.com

Para comprender el verdadero potencial del cartón como material constructivo en estos nuevos escenarios habitacionales y de diseño, es fundamental detenerse en el análisis de sus **propiedades mecánicas**. El estudio de Fadiji et al. (2017) analiza el comportamiento mecánico del cartón corrugado. El cartón es **ortotrópico**, con propiedades mecánicas diferentes en **tres direcciones** (Figura 8): **MD (Machine Direction)** es la orientación del cartón corrugado alineada con el sentido de avance en el proceso de producción; **CD (Cross Direction)** es perpendicular a la anterior y corresponde a la orientación de las ondulaciones internas del material; y **ZD (Thickness Direction)** es la dirección perpendicular al plano del cartón, que atraviesa su grosor desde la cara inferior hasta la superior. La estructura tipo “sándwich” del cartón corrugado consta de **dos capas externas y un núcleo ondulado**, proporcionando una **alta relación resistencia-peso**. La Figura 9 ilustra cómo una **correcta orientación de las ondas** permite al cartón resistir mejor los esfuerzos de **compresión**, mientras que una disposición inadecuada reduce drásticamente su estabilidad estructural.

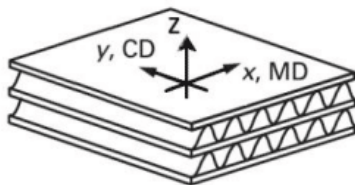


Figura 8. Direcciones ortotrópicas del cartón corrugado || Fuente: rollergrafics.com

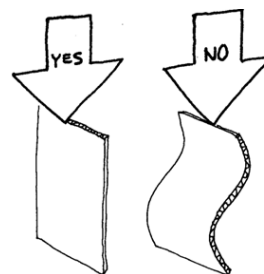


Figura 9. Orientación de las ondas frente a esfuerzos de compresión || Fuente: (Hennessey y Papanek, 1973)

Introducción

Con el objetivo de mejorar el rendimiento estructural del cartón, se toma como punto de partida el **estudio de uniones tradicionales empleadas en carpintería**. Según la revisión realizada por Van Nimwegen y Latteur (2023), las uniones estructurales tradicionales en carpintería, particularmente aquellas que no requieren adhesivos ni elementos metálicos, han despertado un renovado interés en los últimos años debido a su potencial en contextos de sostenibilidad y a su valor como patrimonio constructivo. Estas uniones, basadas en el **encaje geométrico y la fricción**, permiten la transferencia de cargas entre elementos **sin necesidad de refuerzos externos**, lo que las convierte en un recurso útil dentro del ámbito de la construcción. La investigación identifica una gran diversidad tipológica, incluyendo uniones como la **caja y espiga** (Figura 10a), las **entalladuras** (Figura 10b), las uniones tipo **cola de milano** (Figura 10c), o los **empalmes** (Figura 10d) cada una con características particulares de rigidez, capacidad de carga y respuesta frente a solicitaciones específicas. A través de estudios experimentales y modelados numéricos, se han analizado parámetros como el comportamiento frente a tracción, compresión y carga cíclica, observándose modos de fallo vinculados a la **geometría de la unión**, a la **precisión en el ensamblaje** y a las **propiedades del material**. Esta base teórica contribuye a consolidar el conocimiento existente sobre las **posibilidades y limitaciones** de las uniones estructurales sin elementos añadidos.

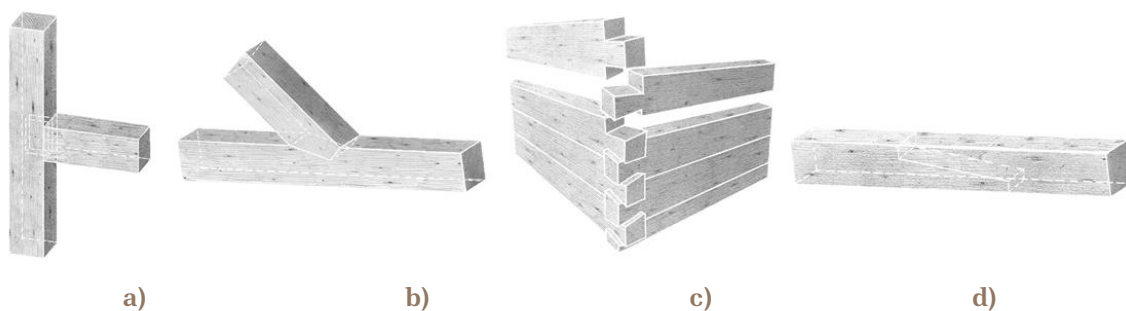


Figura 10. a) Caja y espiga, b) Entalladura, c) Cola de milano, d) Empalme || **Fuente:** (Van Nimwegen y Latteur, 2023)

En el contexto del **diseño sostenible**, el cartón ha dejado de ser un material secundario para convertirse en una alternativa válida frente a materiales más contaminantes. Su **bajo impacto ambiental**, combinando **reciclabilidad** y **ligereza**, lo posiciona como un recurso relevante para enfrentar los desafíos ecológicos actuales.

Turrini (2017) traza una evolución del cartón en el diseño desde los años 60 hasta hoy, destacando cómo ha pasado de considerarse un material barato y temporal a consolidarse como símbolo de **sostenibilidad**. Esta transformación ha sido posible gracias a una creciente **conciencia ecológica**, la mejora de los **procesos de reciclaje** y la **innovación en materiales derivados de la celulosa**. Desde el punto de vista del diseño, el cartón se ha convertido en una herramienta crítica y social. Desde los años 70, diseñadores como Peter Murdoch (Figura 11), Peter Raacke (Figura 12), Riki Watanabe (Figura 13), Frank Gehry o Papanek lo han empleado como respuesta al modelo capitalista y a la producción industrial en masa. Sus propuestas promovían el **bajo impacto ambiental**, la **producción local** y la **capacidad de desmontaje y reciclaje**, resaltando el potencial concienciador del material.



Figura 11. Chair Thing de Peter Murdoch || Fuente: [Chair Thing](#)



Figura 12. Diseño de Peter Raacke || Fuente: [Peter Raacke](#)

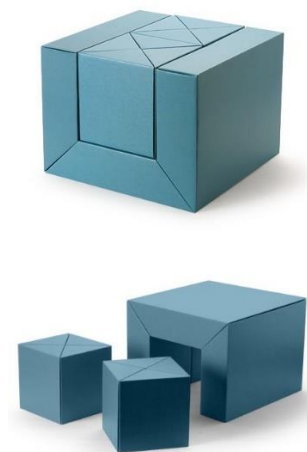


Figura 13. Diseño de Riki Watanabe || Fuente: [Riki Watanabe](#)

Introducción

A partir de este recorrido por el valor estético, conceptual y funcional que diversos diseñadores han sabido otorgar al cartón, se hace evidente su **potencial como material estructural** más allá de su uso decorativo o efímero. Sin embargo, a pesar de sus cualidades, su aplicación en estructuras resistentes aún presenta **desafíos** importantes, especialmente en lo que respecta a la **eficacia de sus uniones**. En este sentido, el presente trabajo propone investigar el comportamiento mecánico del cartón mediante un análisis estructural de diferentes tipos de uniones, tomando como inspiración los métodos tradicionales de ensamblaje en madera sin tornillos. Se busca evaluar la viabilidad del cartón en aplicaciones donde la **resistencia y la durabilidad** son factores clave, contribuyendo así al desarrollo de soluciones sostenibles y sólidas.

MARCO TEÓRICO

2

El diseño de mobiliario en la actualidad no se concibe sin considerar los cambios en los estilos de vida contemporáneos, marcados por la **movilidad** y **la temporalidad**. Desde enfoques históricos hasta propuestas actuales, el **mobiliario nómada** se plantea como una respuesta **funcional, ergonómica y adaptable** a contextos habitacionales inestables.

Fleming (2010) establece la relación entre el **nomadismo urbano** y el **diseño de muebles**. El término nomadismo urbano describe a personas que no están atadas a un solo lugar. Este movimiento surgió ya en los años 60, donde diseñadores como **Ken Isaacs, James Hennessey y Victor Papanek** (Figura 14) desarrollaron propuestas de mobiliario orientadas a estas necesidades.

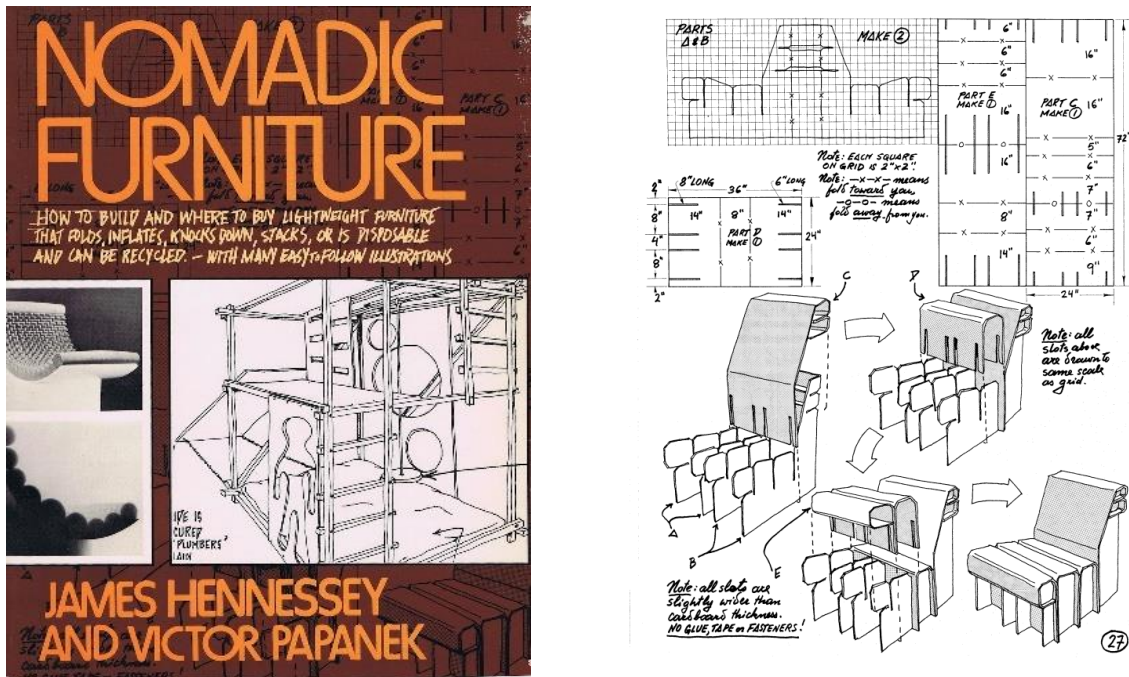


Figura 14. Nomadic Furniture de James Hennessey y Victor Papanek ||Fuente:

piasweethome.com

También se presentan antecedentes históricos de muebles portátiles, como los **taburetes y camas plegables egipcios** (Figura 15), cuya estructura se construía principalmente en madera, como acacia o sicómoro, y las **sillas en forma de “X” romanas o silla curul** (Figura 16), donde la estructura portante estaba fabricada con materiales desde madera maciza hasta bronce fundido o marfil tallado. Este mobiliario ha evolucionado hasta el mobiliario funcional

Marco teórico

actual. El autor destaca cómo movimientos modernos como el **Bauhaus** y **De Stijl** retomaron principios de simplicidad y producción eficiente. Además, subraya la importancia de reducir residuos y aprovechar los recursos en el diseño de mobiliario contemporáneo. Se apuesta por muebles **fáciles de montar, desmontar, transportar y reciclar**, capaces de responder tanto a las necesidades de los nómadas urbanos como a los retos ambientales actuales.



Figura 15. Cama plegable egipcia || Fuente: quo.eldiario.es



Figura 16. Silla en forma de "X" || Fuente: silla.curul

El estudio de Zhu (2015) se enfoca en el diseño de mobiliario destinado a un estilo de vida nómada. Expone que el mobiliario nómada debe responder a una serie de necesidades específicas: debe **ser fácil de transportar**, lo que implica que sea **ligero, compacto y desmontable**, para facilitar su traslado sin grandes esfuerzos ni costes elevados, también debe ser **fácil de montar y desmontar**, sin necesidad de herramientas complejas ni procesos largos. Además, debe ser **multifuncional y adaptable**, capaz de ajustarse a distintas configuraciones de vivienda y **cumplir más de una función** para aprovechar al máximo el espacio disponible. La **durabilidad** y la **estética** también son fundamentales. Finalmente, la **sostenibilidad** juega un papel importante: un mueble pensado para durar, transformarse y acompañar al usuario en múltiples mudanzas reduce el consumo y evita el desecho frecuente de mobiliario.

En este contexto, la elección de materiales resulta determinante. El cartón, por sus cualidades de **ligereza, bajo impacto ambiental y facilidad de manipulación**, se presenta como una alternativa coherente con los principios expuestos. No obstante, su comportamiento estructural resulta complejo, ya que está determinado por su composición **multicapa**, la **geometría ondulada** de su interior y su carácter **ortotrópico**. (Garbowski et al., 2020; Zulaikah et al., 2023; Fadji et al., 2017; Sekulić, 2013; Gospodinov et al., 2011) han analizado cómo influyen factores como la **orientación de las cargas, las condiciones ambientales o las características microestructurales** en su resistencia, rigidez y estabilidad, ofreciendo claves relevantes para el diseño de uniones estructurales eficientes y duraderas en aplicaciones mobiliarias.

En la investigación de Garbowski et al. (2020) se analiza el papel del **pandeo en la resistencia a compresión** del cartón ondulado, demostrando que una estimación precisa requiere considerar la **rigidez a flexión, corte y torsión** del material. El artículo compara métodos simplificados, como la fórmula de McKee, con modelos más detallados que tratan el cartón como un material ortotrópico. Los resultados muestran que los enfoques avanzados, que incorporan estas propiedades, reducen significativamente el error de estimación. Esta investigación refuerza la **necesidad de contemplar el comportamiento estructural del cartón** al diseñar elementos resistentes, especialmente en uniones o componentes sometidos a esfuerzos de compresión.

Zulaikah et al. (2023) se centraron en analizar las propiedades mecánicas del cartón ondulado de doble canal bajo cargas de **tracción y compresión**, evaluadas en las **tres direcciones ortotrópicas** (Figura 17): **MD (dirección máquina)**, **CD (dirección transversal)** y **ZD (espesor)**. Los resultados muestran que el comportamiento del cartón es **no lineal** y que la **geometría del canal** influye directamente en la resistencia y deformación del material. En particular, se observa que en **MD se alcanzan mayores valores de resistencia última** debido a la orientación de las ondas, mientras que en **CD se presenta**

Marco teórico

una mejor absorción de energía. Estas diferencias direccionales son clave para el diseño de uniones estructurales, ya que determinan cómo se comporta el material ante esfuerzos localizados. Además, se destaca la sensibilidad del cartón a parámetros como la **velocidad de carga, la humedad o el método de corte.**

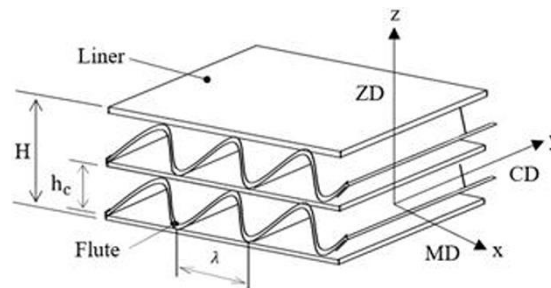


Figura 17. Direcciones ortotrópicas || Fuente: (Zulaikah et al., 2023)

En el estudio de Fadji et al. (2017) se investigan las propiedades mecánicas del cartón corrugado bajo diferentes condiciones ambientales, combinando ensayos experimentales y simulación por elementos finitos. Se demuestra que el cartón es un material ortotrópico cuya **rigidez varía según la orientación (MD, CD y ZD), y que la humedad y la temperatura afectan significativamente su comportamiento estructural.** Además, mediante la prueba de aplastamiento de borde (ECT) y modelado FEM, se confirma que **la onda del cartón es el componente que más influye en la resistencia a compresión.**

En el estudio de Sekulić (2013) se investiga la viabilidad del cartón como material estructural de larga duración en arquitectura, a partir del **análisis de su comportamiento desde una escala microestructural** (Figura 18). El autor destaca que, a pesar de sus buenos resultados en prototipos, el cartón sigue siendo poco fiable en aplicaciones estructurales por la falta de datos coherentes sobre sus propiedades mecánicas. Para corregir esta carencia, la investigación se centra en el análisis de las fibras de celulosa, su principal componente, y cómo el **proceso de fabricación del papel condiciona la resistencia y rigidez del producto final.** Se enfatiza que el **comportamiento ortotrópico del cartón, su sensibilidad a la humedad y la orientación de fibras** influyen directamente

en su capacidad estructural. Además, se señala que los **enlaces entre fibras**, **la geometría de la red de fibras** y **el proceso de secado** determinan las propiedades mecánicas finales del cartón.

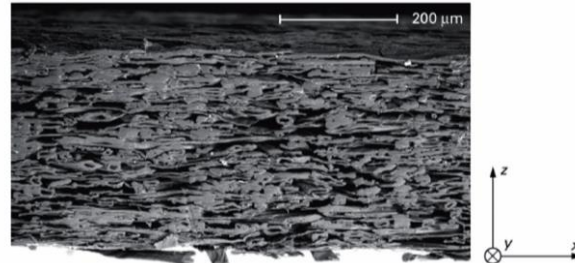


Figura 18. Microestructura cartón || Fuente: (Sekulić, 2013)

En el estudio de Gospodinov et al. (2011) se analiza cómo las propiedades mecánicas de las capas individuales del cartón corrugado (Figura 19) afectan su comportamiento estructural global. Los autores destacan que el comportamiento mecánico está fuertemente influenciado por las **condiciones ambientales**, especialmente la humedad relativa, que **reduce significativamente parámetros como el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción**. Se profundiza en el análisis individual del efecto de las capas exteriores y de la capa ondulada, concluyendo que **las capas exteriores tienen un impacto mucho mayor en la resistencia global del cartón**, mientras que **la influencia de la capa interior es casi despreciable**.

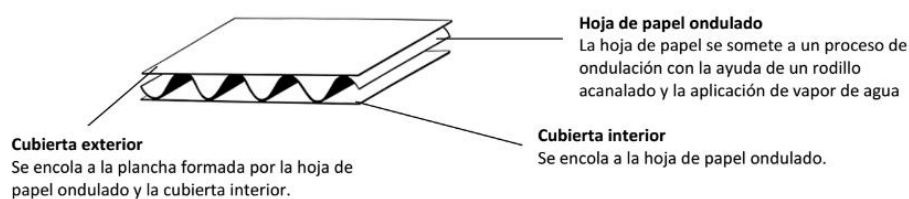


Figura 19. Capas cartón corrugado || Fuente: rajapack.es

El **diseño de uniones** representa uno de los principales desafíos en la aplicación estructural del cartón, dadas su anisotropía y sensibilidad a factores externos. Además de responder a estas exigencias mecánicas, es necesario adoptar enfoques constructivos que optimicen su rendimiento, tomando como referencia tanto soluciones contemporáneas como principios de la **carpintería tradicional**. Esta combinación permite desarrollar uniones más eficientes, resistentes y versátiles para el diseño de mobiliario.

Marco teórico

En el estudio de Šobra et al. (2015), se presenta el desarrollo de una herramienta y una taxonomía específica para la evaluación estructural de **uniones históricas de carpintería en madera**. Esta organización resulta clave para analizar, adaptar o reinterpretar las soluciones constructivas tradicionales en nuevos contextos y materiales. La nueva taxonomía (Figura 20) clasifica las uniones según su **función** (alargar o conectar elementos), su **disposición geométrica** (T, L, X, etc.), su **comportamiento estructural** (tensión, compresión, cortante o mixto), su **forma** y la **presencia de refuerzos**. Las uniones “dentro de miembros” corresponden a empalmes para prolongar o ampliar secciones, mientras que las “entre miembros” conectan varios elementos en un nodo. Algunas uniones, como la de **mortaja y espiga**, pueden cumplir ambas funciones dependiendo de su aplicación.

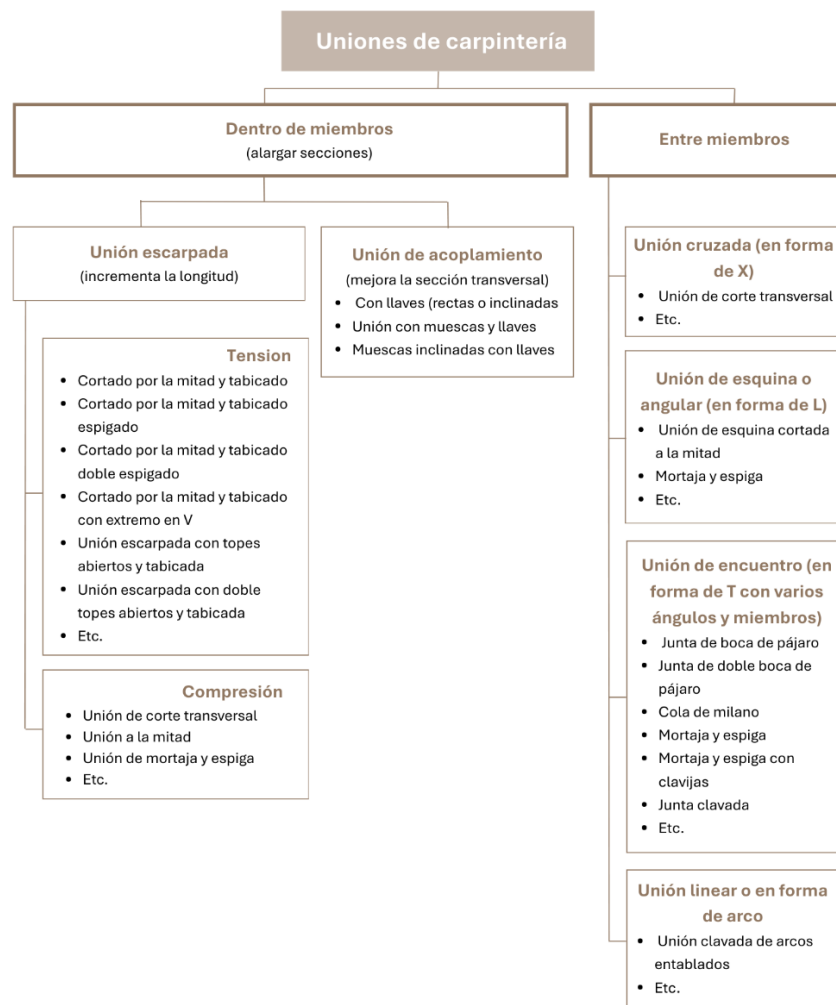


Figura 20. Clasificación uniones de la carpintería tradicional || Fuente: Traducido y adaptado de (Šobra et al., 2015)

Karolak et al. (2020) ofrecen una revisión de diversos elementos estructurales de madera, como empalmes simples, ensambladuras escalonadas o dentadas, y variantes reforzadas con pasadores. Desde el punto de vista estructural, estas uniones no igualan la rigidez ni la capacidad resistente de una pieza continua. Su comportamiento **depende de la geometría de la unión y del tipo de carga aplicada**, ya sea flexión, tracción o corte. Por ejemplo, un **empalme simple** (Figura 21a) **solo transfiere una fracción del momento flector** que soportaría una viga sólida, con variaciones según su orientación. Las **uniones de empalme reforzadas** (Figura 21b) **son más eficaces**, pero continúan presentando limitaciones.

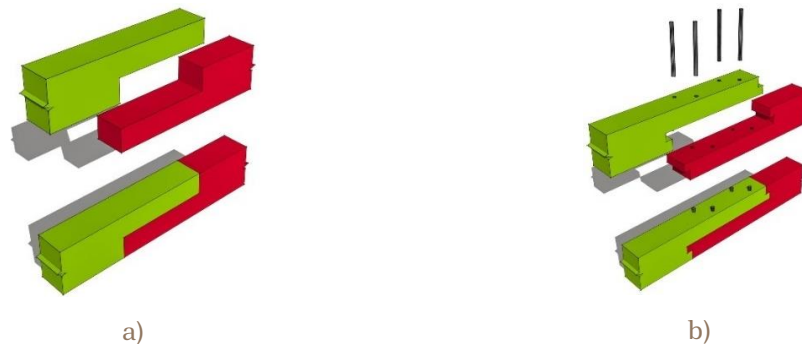


Figura 21. a) Empalme simple b) Empalme con refuerzos || Fuente: timberframehq.com

En la investigación de Aira (2013) se analiza la unión **empalme de llave** (Figura 22). Se identifican **tres zonas críticas** (Figura 23) donde puede fallar: el **encaje** (por compresión), la **sección rasante** (por cortante) y la **sección reducida** (por tracción perpendicular). Esto permite comprender mejor los mecanismos de fallo y establecer criterios de diseño más seguros, destacando la importancia de una correcta distribución de esfuerzos y del ajuste geométrico en este tipo de uniones tradicionales.

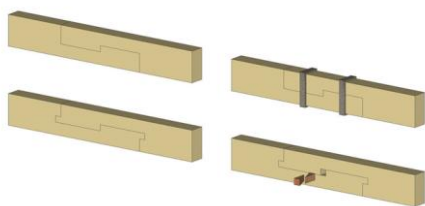


Figura 22. Disposiciones del empalme de llave || Fuente: (Aira, 2013)

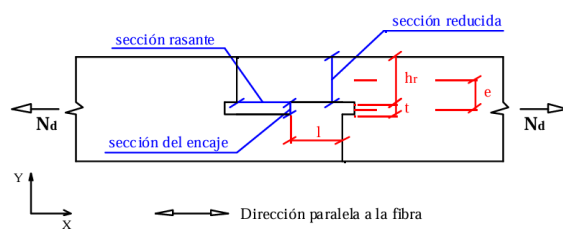


Figura 23. Zonas críticas empalme de llave || Fuente: (Aira, 2013)

Marco teórico

Wu y Ho (2015) muestran cómo la elección del tipo de unión en muebles influye directamente en su comportamiento estructural. Se comparan dos enfoques: las **uniones tradicionales**, que destacan por su flexibilidad y capacidad para absorber impactos, aunque no resisten bien cargas elevadas o repetidas; y las **uniones modernas**, como la cola de milano y la mortaja y espiga, que permiten cortes precisos y ofrecen mayor rigidez y resistencia a tracción, compresión y corte. La **cola de milano** (Figura 24) es especialmente eficaz, ya que su forma entrelazada impide el deslizamiento incluso bajo cargas elevadas. Por su parte, la **mortaja y espiga** (Figura 25) transmite eficientemente esfuerzos axiales y laterales, reforzando la estabilidad general del mueble. Estas uniones no solo mejoran la capacidad de carga, sino que también garantizan una mayor resistencia frente a tensiones repetidas.

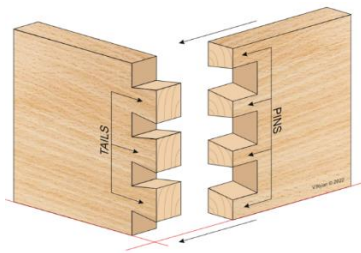


Figura 24. Cola de milano || Fuente: technologystudent.com

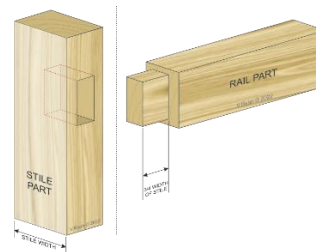


Figura 25. Mortaja y espiga || Fuente: technologystudent.com

Branco y Descamps (2015) analizan el comportamiento estructural de uniones tradicionales en entramados de madera antiguos, con énfasis en los **esfuerzos**, los **ensayos** y su **caracterización mecánica**. Las uniones responden de forma diferenciada según el **tipo de carga aplicada**, ya sea tracción, compresión o flexión, y su resistencia depende en gran medida de la **presión de contacto entre superficies**, aunque esta es difícil de cuantificar por la geometría irregular y la distribución no uniforme de tensiones. En particular, **la resistencia a compresión varía en función de la orientación de las fibras respecto a la carga**, siendo distinta cuando esta actúa paralela o perpendicularmente. Los ensayos a escala real muestran que su capacidad resistente al momento está influenciada por factores como la **compresión**, el **ancho de las piezas**, la **fricción**, el **ángulo** y la **profundidad del entalle**.

La exploración de **nuevas soluciones de unión** en el mobiliario tiene como objetivo reforzar la resistencia y rigidez estructural, así como mejorar la desmontabilidad y la eficiencia en los procesos de fabricación. En esta línea, diversas investigaciones proponen **alternativas que reformulan las uniones tradicionales** mediante innovaciones técnicas.

La investigación de Branowski et al. (2018) presenta un análisis experimental de dos nuevos tipos de uniones para muebles: una con **sujetador plano cruzado adhesivo** (Figura 26a) y otra con **sujetador excéntrico friccional** (Figura 26b), comparadas con la unión tradicional de rosca cónica. El estudio evalúa la capacidad máxima de carga, la rigidez y los mecanismos de fallo bajo cargas de flexión. La unión con sujetador plano cruzado adhesivo emplea placas de contrachapado unidas con **adhesivo y ranuras**, logrando **alta rigidez y resistencia**. La unión con sujetador excéntrico friccional, que permite el desmontaje, utiliza pasadores cilíndricos. Los resultados indican que **ambas nuevas uniones superan en capacidad de carga y rigidez a la unión de rosca cónica**.

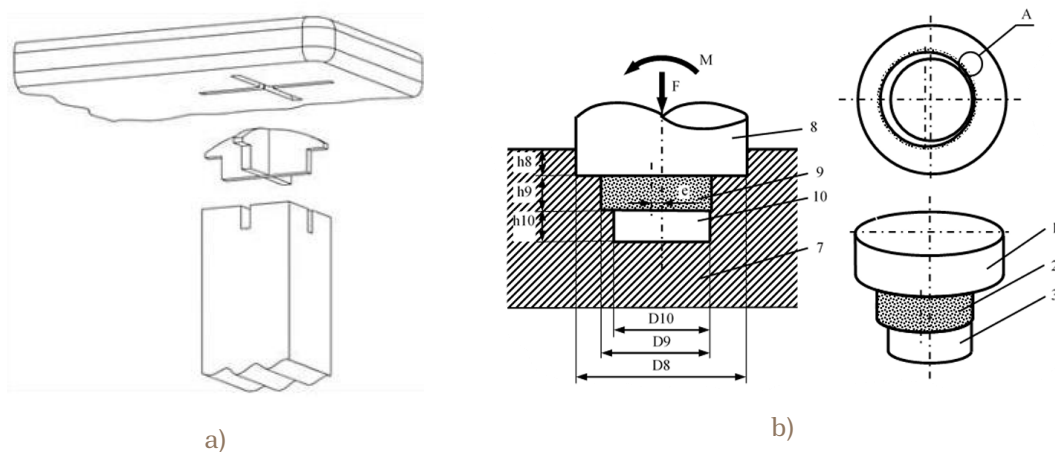


Figura 26. a) Unión con sujetador plano cruzado adhesivo, b) Unión con sujetador excéntrico friccional || Fuente: (Branowski et al., 2018)

El estudio de Nandanwar et al. (2013) presenta el desarrollo de métodos estandarizados para ensayar la resistencia mecánica de uniones en mobiliario de madera (Figura 27). Se diseñan ensayos para evaluar uniones **bajo distintos tipos de carga** (tracción, compresión, corte), utilizando configuraciones

Marco teórico

comunes como **espigas, tornillos y adhesivos**, permitiendo comparar el desempeño de las uniones, identificando cuáles ofrecen mayor resistencia y rigidez. El comportamiento de las uniones estructurales está fuertemente condicionado por el **tipo y orientación** de la madera, la **geometría del ensamblaje**, así como las **zonas de contacto**, el tipo de refuerzo y las propiedades del **adhesivo** empleado.

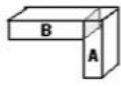
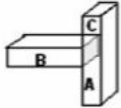
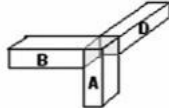

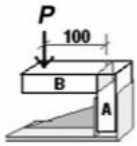
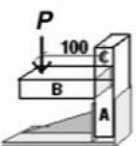
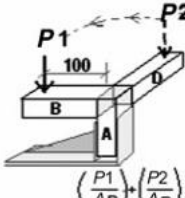
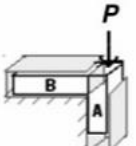
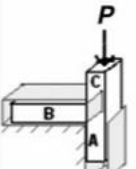
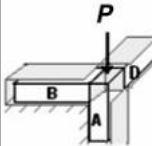
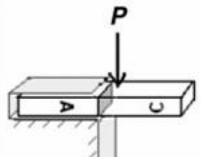

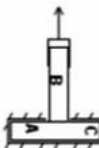
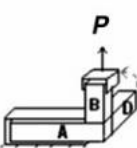

<p>BASIC SHAPE →</p>	 <p>a. L-TYPE</p>	 <p>b. T-TYPE</p>	 <p>c. CORNER-TYPE</p>	 <p>d. STRAIGHT TYPE</p>
<p>CANTILEVER BENDING TEST</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'B' in mm^2</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'B' in mm^2</p>	 <p>Strength = $\frac{(P1/A_B) + (P2/A_D)}{2}$ Where, $P1$ and $P2$ are Max. Load at Failure, while testing members 'B' & 'D' resp. A_B and A_D are cross sectional area of members 'B' & 'D' resp.</p>	<p>N/A</p>
<p>SHEAR STRENGTH TEST</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'B' in mm^2</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'B' in mm^2</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = Sum of cross Sectional area of members B and D in mm^2</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'A' in mm^2</p>
<p>TENSILE STRENGTH TEST</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'B' in mm^2</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'B' in mm^2</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'B' in mm^2</p>	 <p>Strength = P/A Where, P = Max. Load at failure in N A = cross sectional area of member 'A' in mm^2</p>

Figura 27. Tipo de unión y su método ensayo correspondiente || Fuente: (Nandanwar et al., 2013)

En el estudio de Fasabi Pashanasi et al. (2016) se analiza el comportamiento estructural de dos tipos de uniones: **espiga con tornillos** y **espiga con adhesivo**, aplicadas en la fabricación de una silla, evaluando su estabilidad y resistencia mediante ensayos mecánicos normalizados. Los resultados muestran que **la unión espiga con tornillos presenta un mejor rendimiento estructural** frente a esfuerzos estáticos, de impacto y de fatiga, mientras que la unión con adhesivo mostró fallos estructurales y pérdida de funcionalidad en varios ensayos. Este hallazgo sugiere que **el refuerzo mecánico adicional** (como tornillos o elementos equivalentes) **puede mejorar significativamente la durabilidad de las uniones** frente a cargas repetitivas o bruscas.

Tal como señalan Adams et al. (1997), su obra se enfoca en proporcionar una comprensión detallada sobre el diseño y la producción de **uniones adhesivas** para aplicaciones que deben soportar cargas significativas. Se compara la unión adhesiva con otros métodos de ensamblaje destacando la importancia de comprender las propiedades de los adhesivos y diseñar uniones adecuadas para un uso estructural eficiente. Subrayan que el comportamiento estructural de las uniones depende no solo de las **propiedades del adhesivo**, sino también de factores como la **adherencia al sustrato**, la **geometría de la unión** y las **condiciones de carga**.

Van Nimwegen y Latteur (2023) ofrecen una visión detallada sobre el diseño, comportamiento y evolución de las **uniones madera-madera** (Figura 28), destacando aspectos especialmente relevantes para conjuntos estructurales que **prescinden de adhesivos y elementos metálicos**. En primer lugar, se analizan los principios estructurales de las uniones tradicionales de carpintería, basadas en geometrías precisas que permiten la transmisión de cargas mediante **encaje y fricción**. Además, resalta las ventajas mecánicas y funcionales de estas uniones, como su **desmontabilidad**, posibilidad de **reutilización**, **bajo impacto ambiental** y capacidad para **transmitir cargas en diferentes direcciones**.

Marco teórico

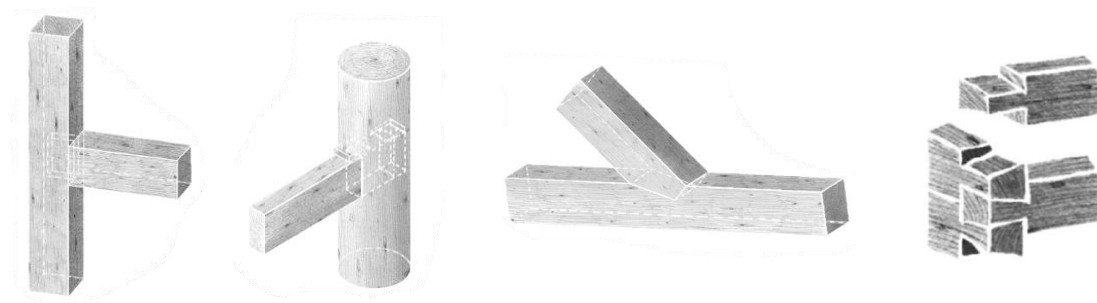


Figura 28. Ejemplos de uniones madera-madera || Fuente: (Van Nimwegen y Latteur, 2023)

Una vez conocidas las **propiedades del cartón** y los **principios estructurales de las uniones**, es necesario conocer cómo se comportan estas uniones cuando se aplican a este material. Si bien los estudios en este ámbito son limitados, se presentan a continuación aquellos que aportan claves sobre el comportamiento del cartón en contextos estructurales, especialmente en el diseño y evaluación de uniones.

En el estudio de Rudawska et al. (2024) se compara el comportamiento mecánico de dos tipos de uniones aplicadas en cartón corrugado: **uniones adhesivas con cola PVAc** y **uniones conformadas por presión**. El análisis se realizó sobre cartón de tres capas (canal B) (Figura 29a) y de cinco capas (B+B) (Figura 29b). Los resultados muestran que las **uniones adhesivas presentan una resistencia superior**. También se analizó la deformación máxima, observándose que las **uniones conformadas por presión permiten mayor deformación en cartón de tres capas**, mientras que **en cartón de cinco capas son las uniones adhesivas las que presentan mayor deformabilidad**.

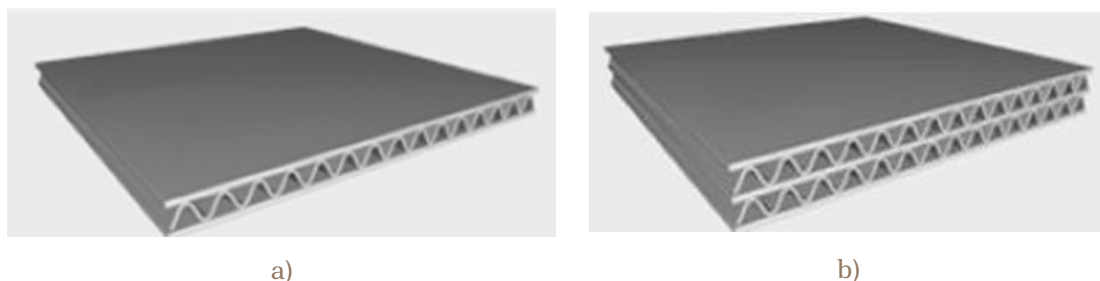


Figura 29. a) Cartón de 3 capas, b) Cartón de 5 capas|| Fuente: (Rudawska et al., 2024)

El estudio de Neira Ribes (2016) subraya la relevancia de las uniones en la fabricación de objetos de cartón, ya que este define no solo la estructura sino también la forma y funcionalidad del producto final. Se analizan distintos métodos como los **encajes sin adhesivos** (Figura 30a), que aprovechan cortes y pliegues del material para generar uniones resistentes y desmontables; **uniones con adhesivos**, que, aunque eficaces pueden dificultar el reciclaje; el uso de **refuerzos** (Figura 30b) que actúan como bisagras o elementos de conexión; y la **extracción de material** (Figura 30c) para facilitar curvaturas sin dañar las capas externas del cartón.

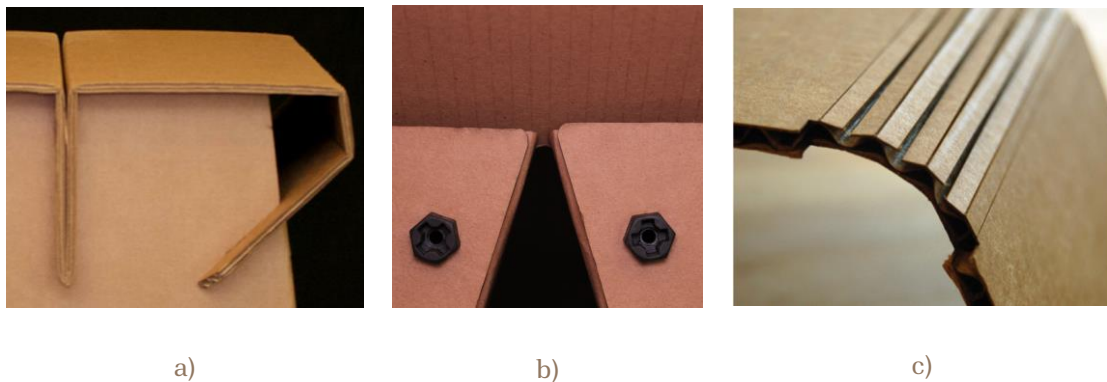


Figura 30. a) Encaje sin adhesivos, b) Unión con refuerzos, c) Extracción de material || **Fuente:** (Neira Ribes, 2016)

El estudio de Conde et al. (2012) presenta y valida una metodología para modelar **uniones adhesivas de cartón corrugado sometidas a esfuerzos de corte**, que es la carga principal en la mayoría de estas uniones. Se usa cartón de doble canal y un adhesivo, y se realizan ensayos para caracterizar su comportamiento mecánico. **El fallo más común es la delaminación del papel** (Figura 36). El adhesivo trabaja en régimen elástico, y el cartón muestra comportamiento elástico lineal fuera del plano (en la dirección del espesor).

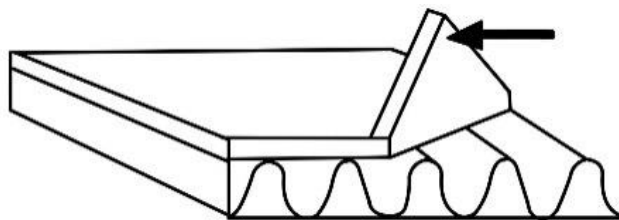


Figura 31. Delaminación del papel || **Fuente:** Elaboración propia

Marco teórico

Una vez conocidas las propiedades del cartón y los principios estructurales de las uniones, así como su comportamiento al ser aplicadas en este material, es importante considerar el **marco normativo que respalda dichas propiedades**. Antes de abordar cualquier análisis específico sobre el comportamiento estructural del cartón, es esencial comprender las normativas que regulan sus características físicas y mecánicas. Estas normativas establecen los métodos para medir características fundamentales como la **resistencia a la tracción, rigidez a la flexión, resistencia al aplastamiento y al estallido**, asegurando que el material cumpla con los estándares de calidad y seguridad en cualquier aplicación. Aunque este estudio no se centra en la realización directa de estas pruebas, es fundamental comprender las normativas que las respaldan, ya que establecen los **estándares de calidad y seguridad** necesarios para asegurar un rendimiento adecuado del cartón en sus diversas aplicaciones:

- **UNE-EN ISO 287:2018.** Papel y cartón. Determinación del contenido de humedad de un lote. Método de secado en estufa.
- **UNE-EN ISO 536:2021.** Papel y cartón. Determinación del gramaje.
- **UNE-EN ISO 1924-2:2009.** Papel y cartón — Determinación de las propiedades de tracción. Parte 2: Método con gradiente de alargamiento constante (20 mm/min). (ISO 1924-2:2008)
- **UNE-EN ISO 2759:2014.** Cartón. Determinación de la resistencia al estallido.
- **UNE-EN ISO 3037:2023.** Cartón ondulado. Determinación de la resistencia al aplastamiento sobre el canto (método sin impregnación de parafina).
- **ISO 5628:2019. Papel y cartón** — Determinación de la rigidez a la flexión — Principios generales para los métodos de dos, tres y cuatro puntos.

Una vez establecidas las normativas que definen las propiedades del cartón como material, es necesario ampliar el enfoque hacia las normativas que regulan el **comportamiento mecánico** del producto final en el que se emplea. En este caso, al tratarse de **mobiliario**, entran en juego una serie de estándares específicos que permiten evaluar su resistencia y durabilidad en condiciones de uso real:

- **UNE-EN 1728:2013.** *Mobiliario. Asientos. Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia y la durabilidad.*
- **UNE-EN 12520:2016.** *Mobiliario. Resistencia, durabilidad y seguridad. Requisitos para asientos de uso doméstico.*

Como resultado del estudio bibliográfico, se determina que los factores más influyentes a considerar en el diseño de uniones aplicadas al cartón son múltiples y complementarios. La **dirección de la onda** es determinante para la resistencia, ya que el cartón corrugado presenta un comportamiento ortotrópico que varía significativamente en función de la orientación. El **tipo de adhesivo**, su comportamiento frente a distintos esfuerzos y su adherencia al sustrato afectan directamente a la rigidez y durabilidad de la unión. La **humedad y las condiciones ambientales** influyen de forma crítica en la estabilidad del material, modificando propiedades como el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión. La **geometría de las uniones**, tanto en propuestas tradicionales como modernas, condiciona la capacidad para resistir diferentes tipos de carga (tracción, compresión, corte o flexión), destacando la importancia del diseño preciso de encajes y ensamblajes. También resulta relevante la incorporación de **refuerzos mecánicos** a las uniones, como pasadores, ya que contribuyen a mejorar la resistencia frente a cargas dinámicas o repetidas. Además, se evidencia la necesidad de adaptar soluciones de carpintería tradicionales a materiales contemporáneos como el cartón, desarrollando uniones desmontables, sostenibles y eficientes.

2.1. Objetivos

El **objetivo principal** de este trabajo de investigación es analizar el comportamiento estructural de diferentes tipos de uniones fabricadas en cartón, mediante ensayos experimentales y simulaciones por el Método de Elementos Finitos (MEF).

Para alcanzar el objetivo principal se plantea la necesidad de lograr previamente los siguientes **objetivos específicos**:

- Identificación y clasificación de uniones viables para ser replicadas en cartón, a partir de uniones utilizadas en madera.
- Selección y análisis comparativo de un conjunto representativo de uniones viables para su aplicación en mobiliario de cartón, considerando variantes reforzadas mediante piezas auxiliares y elementos tubulares, frente a uniones ensambladas mediante encaje y con adhesivo.
- Adaptación geométrica de dichas uniones al material cartón, considerando sus propiedades mecánicas (ortotrópico).
- Simulación de las uniones mediante el MEF con el fin de predecir su comportamiento estructural y obtener datos comparativos preliminares.
- Realización de ensayos experimentales sobre las uniones en cartón para contrastar los resultados obtenidos por simulación y validar su comportamiento real bajo carga.

METODOLOGÍA

3

Para la realización de este estudio, se analizarán las **propiedades del cartón**. Paralelamente, se examinarán diversas tipologías de **uniones empleadas en madera que puedan ser adaptadas al cartón**, considerando las similitudes formales y estructurales que ambos materiales presentan en determinados aspectos.

Para llevar a cabo el análisis, se escoge una silla como caso de estudio, ya que su estructura permite identificar una variedad de uniones según su orientación —**verticales, horizontales o planchas**— y resulta representativa de otros ejemplos de mobiliario. Esta elección se justifica en tanto que el objetivo final de la investigación es obtener conclusiones aplicables al diseño de mobiliario a partir de uniones en cartón.

Una vez determinados el tipo de cartón y las uniones a considerar, se procede a establecer todas las **tipologías de uniones posibles**. Se analizan los **esfuerzos** a los que estará sometido cada tipo de unión, lo que permite establecer **la dirección óptima del núcleo del cartón** en función de la resistencia requerida. Con esta información, se **modelan digitalmente las uniones** —inspiradas en las utilizadas en madera— y se estudian sus **comportamientos estructurales**.

Posteriormente, se realiza una **comparación** entre las distintas configuraciones de uniones posibles, a fin de seleccionar aquellas que presenten mayor viabilidad y relevancia para el estudio. Finalmente, se analiza el **esfuerzo más desfavorable** que actúa sobre cada unión mediante simulaciones basadas en el **método de elementos finitos**, con el propósito de establecer expectativas realistas respecto al comportamiento de las uniones durante los **futuros ensayos físicos**.

En la Figura 32 se presenta un esquema del enfoque metodológico desarrollado en este proyecto.

Metodología

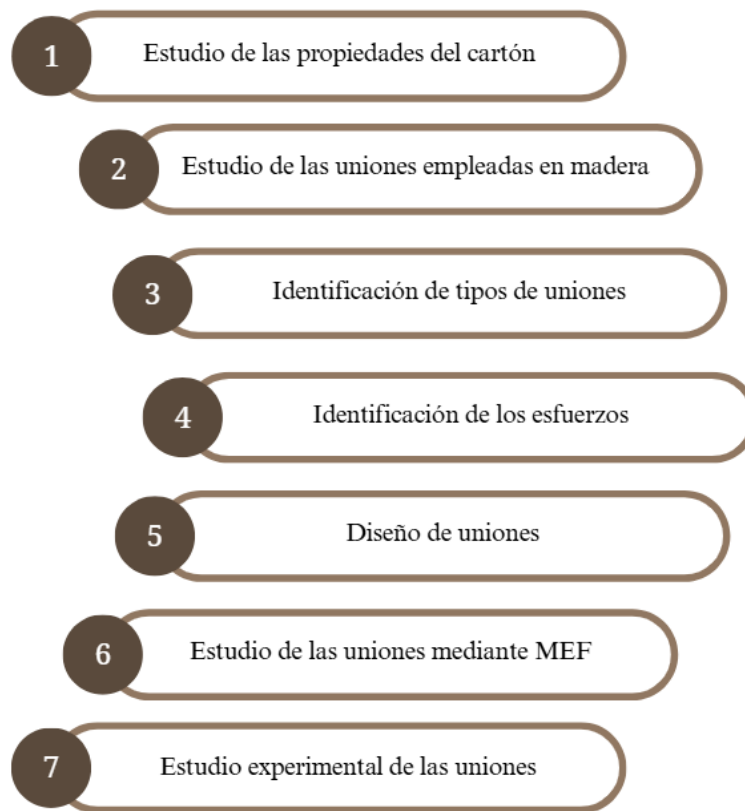


Figura 32. Esquema metodología desarrollada || Fuente: Elaboración propia

3.1. El cartón como material

El cartón deja de ser papel y es considerado como tal a partir de un **gramaje superior a 160g/m²**, debido a que es el mínimo espesor en el que un material fibroso es lo suficientemente rígido. El **gramaje** es una de las propiedades más características de este material debido a que es el nombre concreto que se le da al peso del cartón.

Otra de las propiedades que distinguen físicamente un cartón de otro es el **grosor**, que comprende la distancia existente entre las dos superficies de una plancha. Se mide, por lo general, en milésimas de milímetro y sus valores comerciales se encuentran entre los **350 y los 800 µm**.

El cartón también viene determinado por un grado de compactación que se mide a través de la **densidad**, cuya unidad de medida es el kilogramo por metro cúbico; y por su **volumen** que clasifica un cartón de alto o de bajo volumen.

Teniendo en cuenta la orientación que toma la fibra que compone este material, se perciben **tres direcciones**, una de ellas es la que toman las fibras **paralelas** a la dirección de la máquina, que es más rígida y fuerte. La otra es la **perpendicular** a la máquina y está considerada como la anchura de la plancha. Y por último la dirección del **espesor**.

El cartón se fabrica de **diversos grosores y gramajes** ya que debe soportar diferentes pesos conservando su forma. Mientras que el grosor es la distancia que separa la plancha superior de la inferior, el gramaje es una medida del peso del cartón y se expresa en gramos por metro cuadrado (g/m^2).

3.1.1. Cartón corrugado

El cartón corrugado constituye la **variante más ampliamente utilizada** en el ámbito del **embalaje**, debido a sus destacadas propiedades de absorción de impactos durante el transporte y almacenamiento. Asimismo, presenta una elevada facilidad para la **impresión** y es completamente **reciclable**, lo que refuerza su idoneidad en aplicaciones sostenibles.

Su estructura básica (Figura 33) se compone de una lámina interior conformada en **forma de onda**, a la cual se le adhieren dos capas exteriores planas denominadas **cubiertas o liners**. La resistencia mecánica de este material proviene de la interacción conjunta y vertical entre estas tres capas, lo que le permite soportar esfuerzos significativos con un bajo peso estructural.

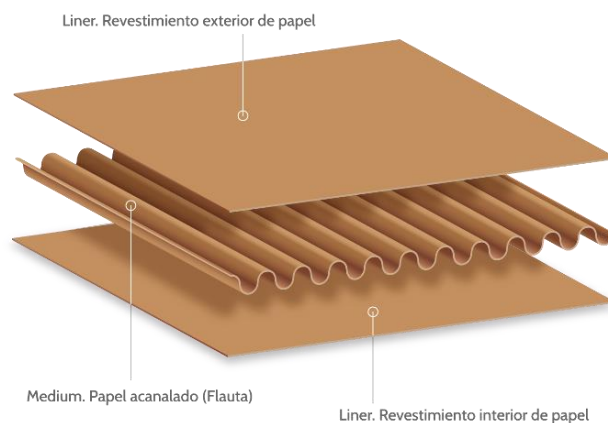


Figura 33. Estructura cartón corrugado || Fuente: agse.com

El cartón corrugado puede clasificarse, además, en función del **número de capas** (Figura 34a) que lo componen, así como del **tipo de onda** (Figura 34b) que incorpora y del **nivel de resistencia** requerido para su uso específico.

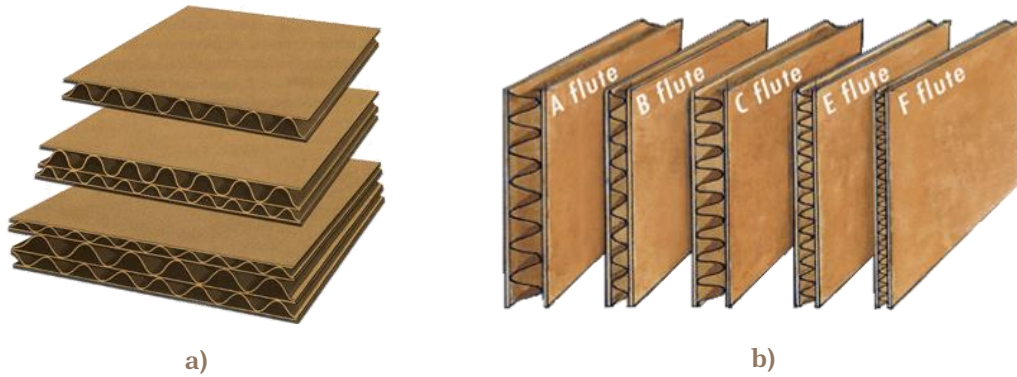


Figura 34. Clasificación cartón corrugado según a) número de capas, b) tipo de onda || Fuente: cartonexpress.com

La **flauta**, también denominada **canal**, es un componente fundamental en la estructura del cartón corrugado, ya que determina en gran medida sus propiedades mecánicas y su idoneidad para distintas aplicaciones.





El **canal C** es el más utilizado en la fabricación de cajas de cartón, debido a su equilibrio entre resistencia y versatilidad. Por su parte, el **canal A** destaca por ofrecer la **mayor resistencia a la compresión vertical**, lo que lo convierte en una opción adecuada para embalajes que requieren soportar cargas apiladas.

En cuanto al **canal B**, presenta la **mayor resistencia al aplastamiento plano**, siendo especialmente apropiado para cajas troqueladas empleadas en el transporte de productos agrícolas, como frutas y verduras.

Finalmente, el **canal E**, de geometría más fina, se utiliza preferentemente en **envases unitarios o cajas de exhibición (display)**, donde se requiere una buena presentación visual sin comprometer la rigidez estructural.

En la Tabla 1 se sintetizan los distintos tipos de cartón corrugado basado en el número de capas, así como en el tipo de canal y sus principales características.

Tabla 1. Tipos de cartón corrugado

	Tipo de cartón ondulado	Tipos de canales (Altura de la onda)	Resistencia ECT (en KN/m)	Maleabilidad
	Simple cara (single face – SF)	Canal E – 1.6 mm Canal B – 2.5 mm Gramaje 300 – 500 g/m ²	MUY BAJA < 3 KN/m	MUY ALTA
	Doble cara (double face – DF)	Canal E – 1.8 mm Canal B – 2.7 mm Canal C – 3.5 mm Canal A – 6 mm Gramaje 400 – 700 g/m ²	BAJA 3-8 KN/m	MEDIA-ALTA
	Doble-Doble cara (double-double – DD)	Canal EB – 4 mm Canal EC – 5 mm Canal BC – 7 mm Canal AC – 8 mm Gramaje 600 – 1200 g/m ²	MEDIA 6-15 KN/m	MEDIA-BAJA
	Triple ondulado	Canal ACC – 13 mm Canal AAC – 16 mm Gramaje 1000 – 2000 g/m ²	ALTA > 15 KN/m	NO MALEABLE

Información extraída del Manual de Calidad 2012 de la Asociación Española de Fabricantes de Embalajes de Cartón Ondulado

La **resistencia** del cartón corrugado está determinada por **dos factores clave**: el **gramaje del papel** y la **altura de la onda**. Ambos parámetros inciden directamente en propiedades mecánicas esenciales, como la resistencia a la compresión del borde (Edge Crush Test, ECT) (Figura 35a) y la resistencia a la compresión vertical (Box Compression Test, BCT) (Figura 35b), las cuales son determinantes para evaluar el rendimiento estructural del material en aplicaciones de embalaje y almacenamiento.



Figura 35. Resistencia a) ECT b) BCT || Fuente: inovacor.mx

3.1.2. Cartón tubular

El **cartón tubular** (Figura 36a) es un tipo de cartón que se presenta en forma de tubos huecos, generalmente fabricados a partir de varias capas de papel kraft. Estos tubos se utilizan principalmente por **su ligereza, resistencia y capacidad para soportar cargas**, lo que los hace ideales para aplicaciones como embalaje (Figura 36b), almacenamiento o incluso como componente estructural en el diseño de muebles (Figura 36c) o productos. El cartón tubular se caracteriza por su forma cilíndrica, que le otorga rigidez y durabilidad, además de su facilidad para ser **reciclado**, lo que lo convierte en una opción sostenible.



Figura 36. Cartón tubular: a) tipos, b) como embalaje, c) como componente estructural en el diseño de muebles || Fuente: a) mexipack.com, b) artbendix.net, c) joiadecasa.com

Los tubos de cartón poseen una **resistencia a la compresión axial** significativa, lo que les permite soportar cargas verticales en aplicaciones estructurales y de embalaje.

Aportan ligereza y una resistencia estructural significativa, especialmente a compresión. La resistencia a **compresión** de un tubo de cartón de 75 cm de diámetro y 1'5 cm de grosor es de unos **10 N/mm²**.

La Tabla 2 presenta una clasificación basada en las dimensiones estándar de los tubos según su sector de uso, mostrando los rangos de diámetros y longitudes más habituales en usos como envíos, alimentación, cosmética, papelería e industria.

Tabla 2. Clasificación cartón tubular

Industria	Tamaño (Diámetro x Longitud) [mm]	Usos típicos
Envíos	50 – 100 x 300 – 900	Documentos, posters, planos
Alimentación	38 – 76 x 100 – 250	Té, café, aperitivos
Cosmética	13 – 38 x 50 – 127	Productos de cuidado de la piel
Papelería	25 – 50 x 150 – 300	Bolígrafos, lápices, accesorios pequeños
Industrial	76 – 200 x 600 o más	Núcleos textiles, construcción, embalaje industrial

Información extraída de (EsyTube, 2024)

3.1.3. Comportamiento mecánico y clasificación de fallos

El cartón corrugado presenta un **comportamiento ortotrópico**, lo que significa que sus propiedades mecánicas varían en función de la dirección de carga. Esta anisotropía estructural se debe a la orientación de las fibras de celulosa durante el proceso de fabricación, y se manifiesta principalmente en tres direcciones ortogonales (Figura 37) conocidas como: **dirección de la máquina** (MD, *Machine Direction*), **dirección transversal** (CD, *Cross Direction*) y **dirección del espesor** (ZD, *Thickness Direction*).

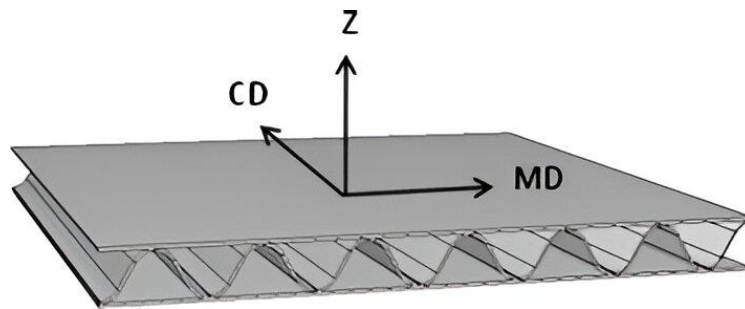


Figura 37. Direcciones ortogonales cartón corrugado || Fuente: (Namasivayam Navaranjan et al., 2013)

La **dirección de la máquina (MD)** corresponde al sentido en el que se forma y avanza el papel en la línea de producción, y es la dirección en la que las fibras están alineadas. Debido a esta orientación, el cartón presenta su mayor rigidez y resistencia a la tracción en esta dirección.

La **dirección transversal (CD)**, perpendicular a la anterior, refleja el comportamiento del material en sentido lateral. Al no seguir la alineación de las fibras, su módulo elástico y resistencia son inferiores a los de la MD.

Finalmente, la **dirección del espesor (ZD)**, también denominada fuera del plano, representa el eje a través del grosor del cartón. Es la dirección menos resistente de las tres, ya que la estructura fibrosa apenas ofrece continuidad en ese sentido, y es particularmente relevante para estudiar fenómenos de compresión y pandeo.

Profundizando en el estudio de **las propiedades ortotrópicas del cartón**, Siti Zulaikah (Zulaikah et al., 2023) evaluó el **comportamiento mecánico** del cartón corrugado de doble pared (Bi-Wall, tipo AA-flute) sometido a cargas de tracción y compresión en tres direcciones principales: MD, CD y ZD. Los resultados revelaron un **comportamiento no lineal** tanto en tracción como en compresión, **influenciado principalmente por la configuración estructural del cartón y la orientación de las ondas internas**. Bajo carga de tracción, en la **dirección MD se obtuvo la mayor resistencia última**. En comparación, la **dirección CD mostró una resistencia última menor**. Se observó además que un aumento en la velocidad de carga provocó una disminución en las resistencias y un incremento en la deformación, evidenciando la sensibilidad del material a la tasa de carga. En compresión, el cartón mostró un comportamiento dividido en dos fases: una inicial **elástica-lineal** y una segunda con **deformaciones irregulares hasta el colapso**. Solo las muestras en **dirección CD alcanzaron un colapso completo**. Esta dirección también presentó la **mayor resistencia a compresión**, seguida por MD y por ZD. La **mayor capacidad de absorción de energía también se registró en CD**, lo que la hace favorable frente a cargas de aplastamiento. Finalmente, se destacó la importancia de controlar variables como la geometría de la muestra, la velocidad de ensayo y las condiciones ambientales, particularmente la humedad, ya que su incremento reduce significativamente la resistencia a la compresión del cartón.

La geometría característica del cartón corrugado, compuesta por un núcleo ondulado (fluting) adherido entre láminas planas, le otorga propiedades mecánicas útiles para soportar cargas, especialmente en **dirección perpendicular a las ondas**. No obstante, su comportamiento estructural está condicionado por factores como la **calidad del adhesivo, el espesor del material, la forma del fluting y el tipo de carga aplicada**. La identificación de estos modos de fallo permite anticipar posibles problemas de estabilidad,

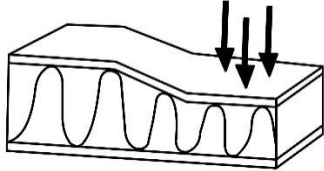
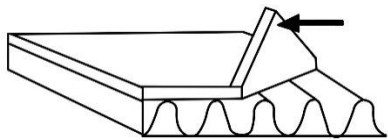
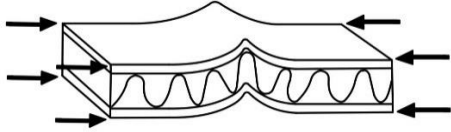
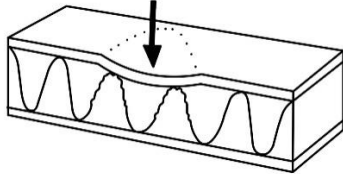
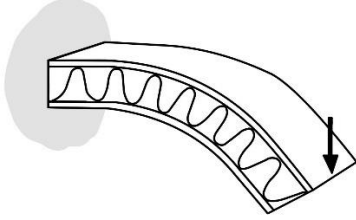
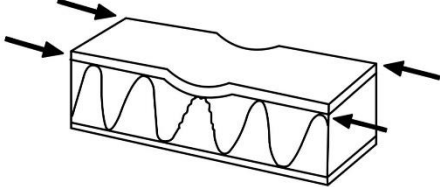
Metodología

resistencia o durabilidad en el diseño y uso del cartón corrugado como elemento estructural.

Entre los modos de fallo que pueden producirse, el más frecuentes es el **aplastamiento del fluting**, provocado por cargas de compresión vertical que colapsan las ondas internas. También es común el **fallo por delaminación**, en el que se produce una separación entre la piel exterior y el núcleo ondulado debido a una adhesión deficiente o a una carga excesiva. En condiciones de carga compresiva global, puede observarse el **pandeo lateral del conjunto**, característico del **fallo por pandeo global**. Por otro lado, las cargas puntuales pueden generar una **indentación local**, una deformación localizada sin comprometer toda la estructura. Asimismo, la **deflexión excesiva** aparece cuando el cartón pierde rigidez y se curva de forma significativa sin llegar a fracturarse. Finalmente, en casos de compresión longitudinal de la piel exterior, puede manifestarse el **fallo por arrugamiento de la piel**, similar al pandeo de una lámina delgada.

A continuación, en la Tabla 3, se resumen los tipos de fallos que pueden producirse en cartón corrugado.

Tabla 3. Tipos de fallos en cartón corrugado

Denominación	Descripción	Ilustración
Fallo por aplastamiento del fluting	El fluting (ondulado) se deforma por compresión vertical, colapsando las ondas	
Fallo por delaminación	Separación entre la piel y el fluting debido a adhesión insuficiente o carga excesiva	
Fallo por pandeo global	El cartón completo se deforma lateralmente cuando está sometido a carga de compresión	
Fallo por indentación local	Las cargas concentradas causan una hendidura local sin dañar toda la estructura	
Fallo por deflexión excesiva	El cartón se curva en exceso por falta de rigidez, deformándose sin romper	
Fallo por piel arrugada	La piel superior se arruga por compresión longitudinal, similar al pandeo de una lámina	

3.1.4. Elección del material

Tras al estudio previo realizado sobre el comportamiento mecánico del cartón corrugado, así como el análisis de los modos de fallo más frecuentes en aplicaciones estructurales, el material seleccionado para la fabricación de las uniones es cartón corrugado de **doble onda**, con un espesor nominal de **6 mm por plancha**. Para alcanzar una mayor rigidez estructural y simular condiciones de carga más representativas en elementos de mobiliario, se ha optado por **laminar tres planchas mediante encolado**, obteniendo así un **espesor total de 18 mm**. Esta configuración (Figura 38) permite mantener la naturaleza del material base, a la vez que mejora su resistencia mecánica y estabilidad dimensional, condiciones necesarias para garantizar la fiabilidad de los ensayos y la validez de los resultados obtenidos tanto en simulación como en la posterior validación física.

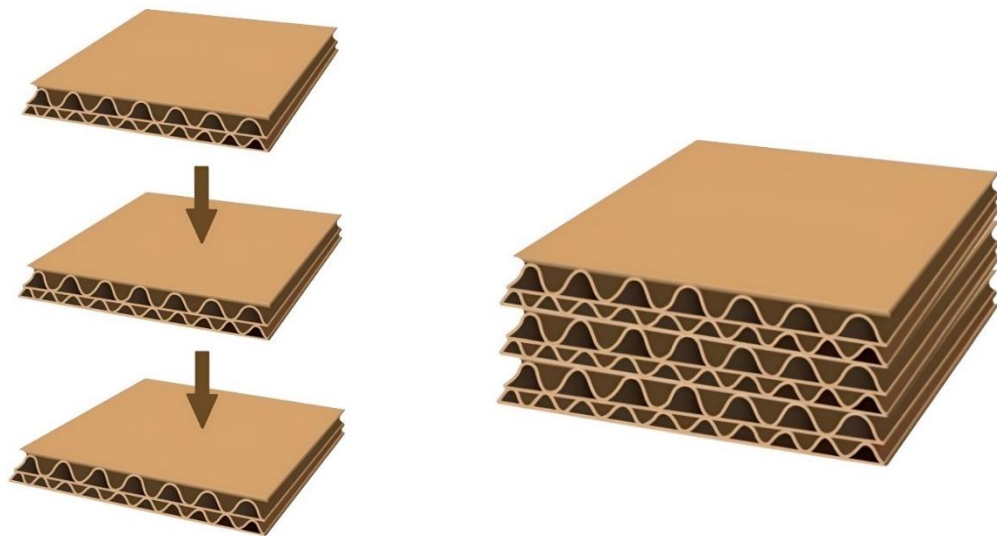


Figura 38. Elección del material || Fuente: Elaboración propia

Complementariamente al uso del cartón corrugado, se ha seleccionado también **cartón tubular** como material estructural. Este material se presenta en forma de cilindros huecos con un **diámetro exterior de 54 mm**, un **diámetro interior de 50 mm** y un **espesor de pared de 2 mm**.

3.2. Diseño de uniones

En esta etapa del trabajo se lleva a cabo el diseño de uniones específicas adaptadas al cartón, tomando como referencia uniones tradicionales en madera que **prescinden del uso de elementos metálicos** como tornillos o clavos.

La investigación se ha apoyado en fuentes especializadas como el artículo de Van Nimwegen y Latteur (Van Nimwegen & Latteur, 2023), que analiza la capacidad estructural de uniones tradicionales, y el libro *The Complete Japanese Joinery* (Sato, Nakahara, & Nii, 2000), donde se documenta en profundidad la carpintería japonesa, caracterizado por la precisión, el encaje milimétrico y la resistencia sin refuerzos externos.

Estas uniones, originalmente concebidas para madera maciza, presentan un alto grado de sofisticación técnica que puede ser transferido al cartón, especialmente si se consideran ciertos paralelismos entre ambos materiales. Aunque el cartón posee una resistencia y rigidez inferiores, su comportamiento estructural puede optimizarse mediante el aprovechamiento de su **orientación direccional**, el diseño de **encajes que distribuyan las cargas** y el empleo de **cortes precisos que eviten la concentración de tensiones**. Además, al tratarse de un material laminar que admite fácilmente el corte y el doblado, el cartón permite replicar geometrías similares a las que se utilizan en uniones de carpintería tradicional.

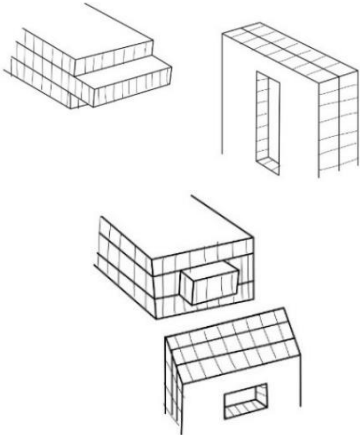
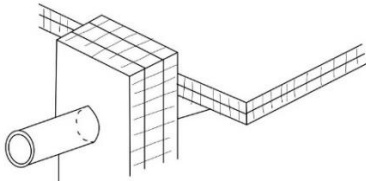
Para ello, se realiza una recopilación de estas uniones explicadas anteriormente. Para el estudio, las uniones se agrupan en tres categorías: **Cartón - Cartón**, **Cartón - Cola** y **Cartón - Soporte**, que reflejan distintos tipos de conexiones estructurales en las que varían tanto los materiales como los elementos necesarios para garantizar la viabilidad de la unión.

Metodología

La categoría **Cartón - Cartón** hace referencia a uniones en las que únicamente se utiliza cartón como material para formar la conexión, sin necesidad de elementos adicionales como adhesivos o refuerzos externos, ya que la unión se logra mediante la precisión en los cortes y encajes del cartón, lo que asegura la estabilidad y funcionalidad de la conexión.

En la Tabla 4 se presentan distintas tipologías de uniones tradicionales de carpintería adaptadas a cartón ondulado, considerando las limitaciones estructurales y capacidades del material. Entre las variantes incluidas se encuentran configuraciones como la **unión de caja y espiga**, la **unión escalonada**, el **triple ensamble**, la **unión en T**, la **unión de horquilla**, o el **ensamble por ranura en cruz**, entre otras. Asimismo, se han desarrollado uniones específicas para elementos tubulares, como la **unión de encastre en tubos cilíndricos**, que permiten vincular componentes fabricados en cartón tubular de forma precisa y estable.

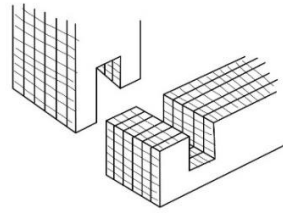
Tabla 4. Uniones en madera adaptadas al cartón. Cartón - Cartón

Unión en madera	Unión en cartón
<p data-bbox="288 1496 512 1570">Unión de caja y espiga</p>	
<p data-bbox="261 1868 539 1942">Unión con pasador cilíndrico</p>	

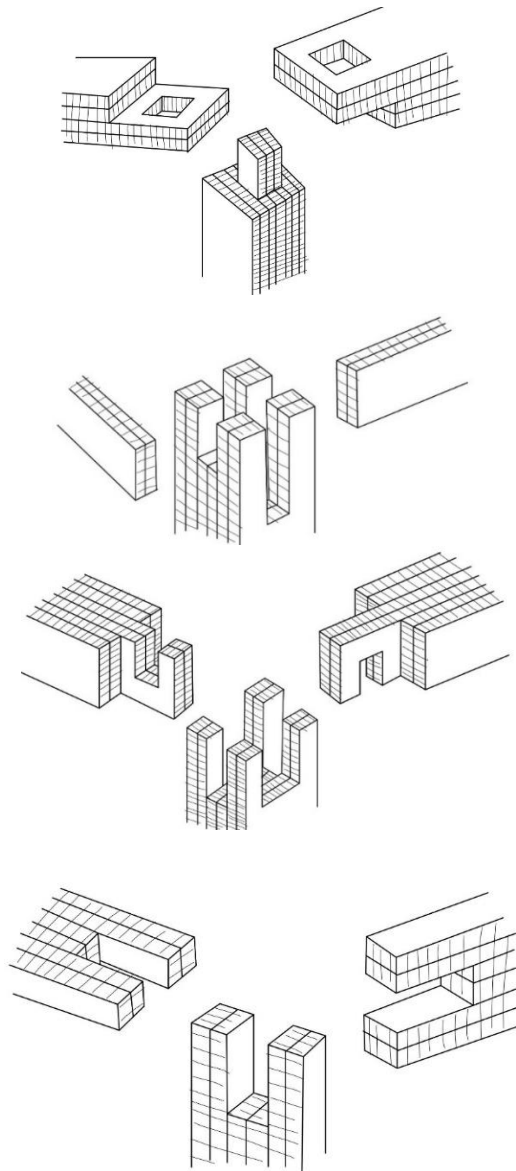
Unión en madera

Unión en cartón

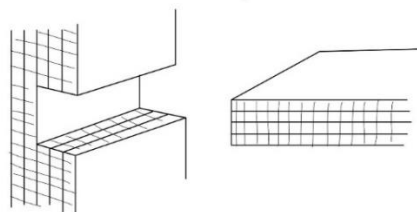
Unión escalonada



Unión de triple
ensamble



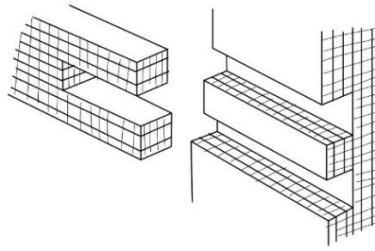
Unión por ranura



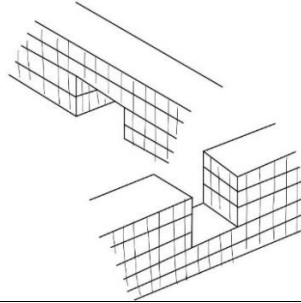
Unión en madera

Unión en cartón

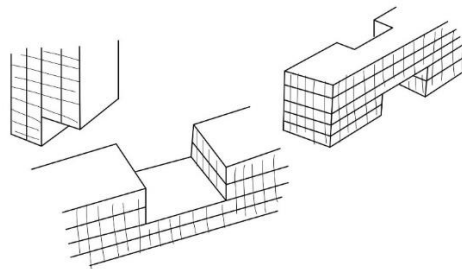
Unión por ranura



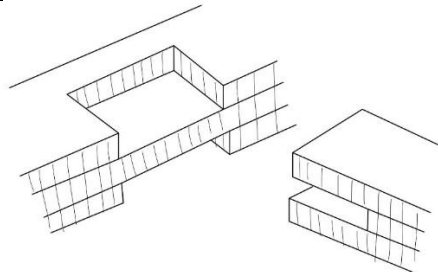
Unión a media
madera en cruz



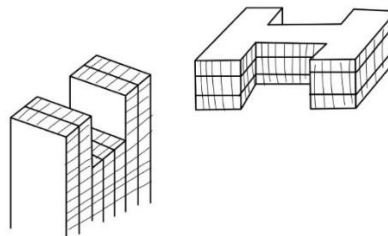
Unión triple a media
madera



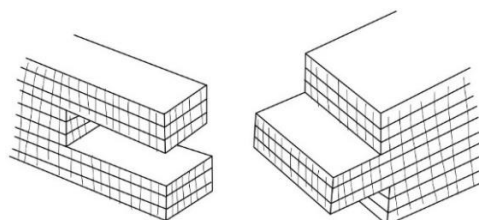
Unión en T



Unión de horquilla



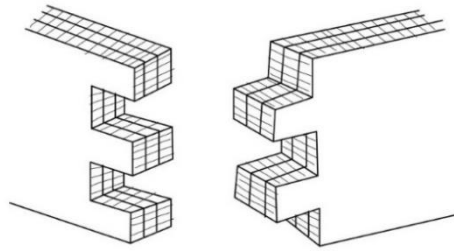
Ensamble de
horquilla en esquina



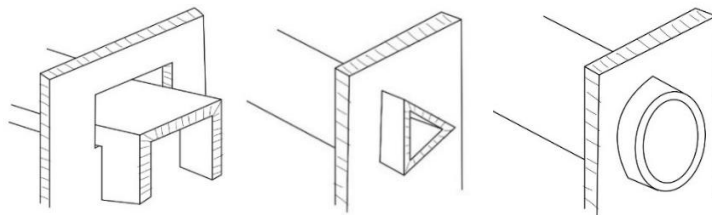
Unión en madera

Unión en cartón

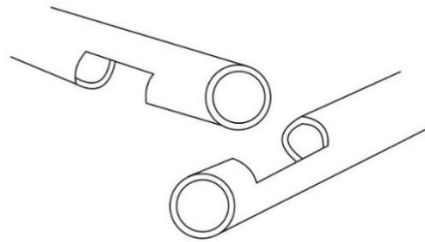
Unión de cola de milano



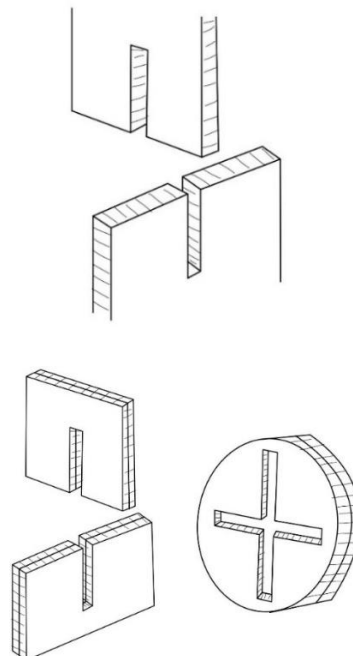
Unión por encastre



Unión de encastre en tubos cilíndricos



Unión de encastre en cruz

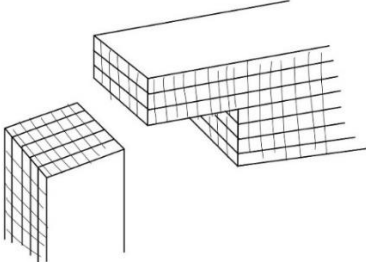
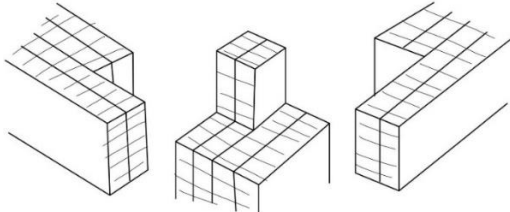


Metodología

En la categoría **Cartón - Cola**, para que la unión sea viable, es necesario el uso de un adhesivo, ya que el adhesivo actúa como el agente que permite que las piezas se adhieran correctamente y resistan las fuerzas y tensiones sin comprometer la integridad del material. Este tipo de uniones resulta idóneo para aplicaciones donde el desmontaje no es prioritario y donde se busca una alta capacidad de resistencia a sollicitaciones estáticas, garantizando además una distribución homogénea de tensiones en el área de contacto encolada.

En la Tabla 5 se ilustran ejemplos de uniones de carpintería tradicionales adaptadas al cartón mediante el uso de adhesivo, como el **ensamble a media madera** y el **ensamble a media madera triple**, seleccionadas por su simplicidad geométrica, facilidad de fabricación y capacidad para generar superficies de contacto amplias que optimizan la distribución del adhesivo.

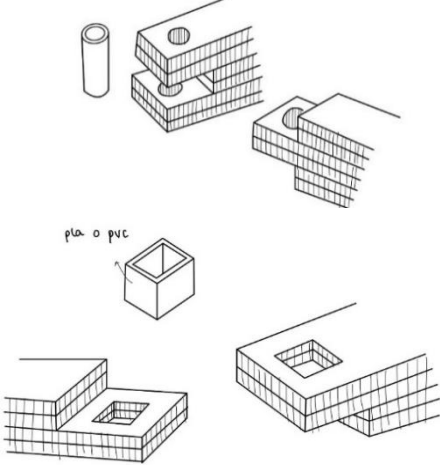
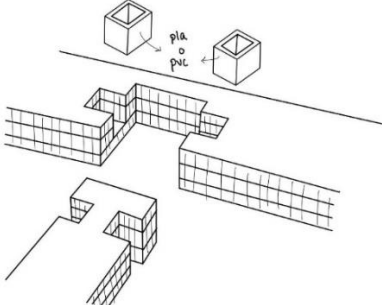
Tabla 5. Uniones en madera adaptadas al cartón. Cartón - Cola

Unión en madera	Unión en cartón
Ensamble a media madera	
Ensamble a media madera triple	

Por último, en la categoría **Cartón - Soporte**, se necesita una pieza externa ya sea de cartón o de un material complementario como PVC o PLA, que actúa como refuerzo estructural para mejorar la resistencia y durabilidad de la unión.

En la Tabla 6 se muestran diversos ejemplos de este tipo de uniones, como la **unión caja y espiga pasante**, la **unión en T con pasadores** o la **unión con conectores para ensamblaje**, entre otras. Estas configuraciones han sido diseñadas específicamente para aprovechar la geometría del cartón corrugado y compensar sus limitaciones mecánicas mediante el uso de refuerzos insertados. En algunos casos, los elementos de soporte se introducen a presión o mediante sistemas de enclavamiento, mientras que en otros se utilizan pasadores o cuñas que aseguran la estabilidad de la unión.

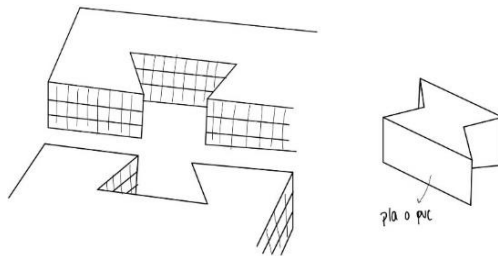
Tabla 6. Uniones en madera adaptadas al cartón. Cartón - Soporte

Unión en madera	Unión en cartón
<p data-bbox="272 1397 528 1464">Unión caja y espiga pasante</p>	
<p data-bbox="300 1816 501 1883">Unión en T con pasadores</p>	

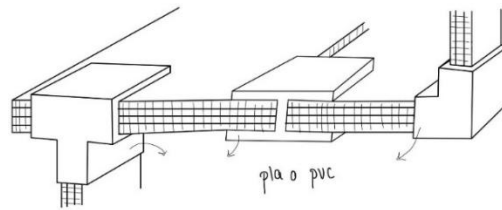
Unión en madera

Unión en cartón

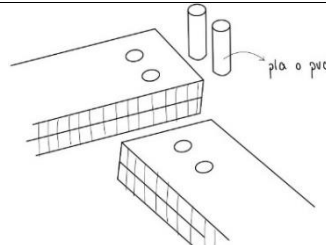
Unión con llave de mariposa



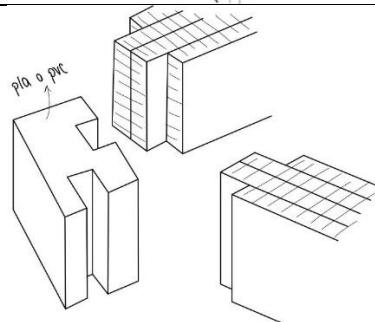
Unión con conectores para ensamblaje



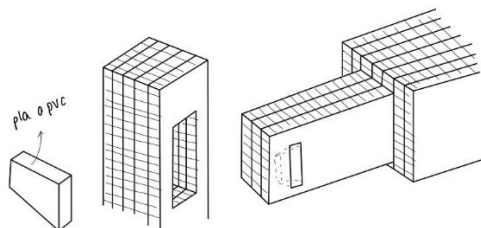
Unión con espigas



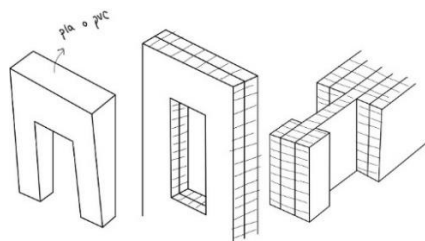
Unión por encastre con conector



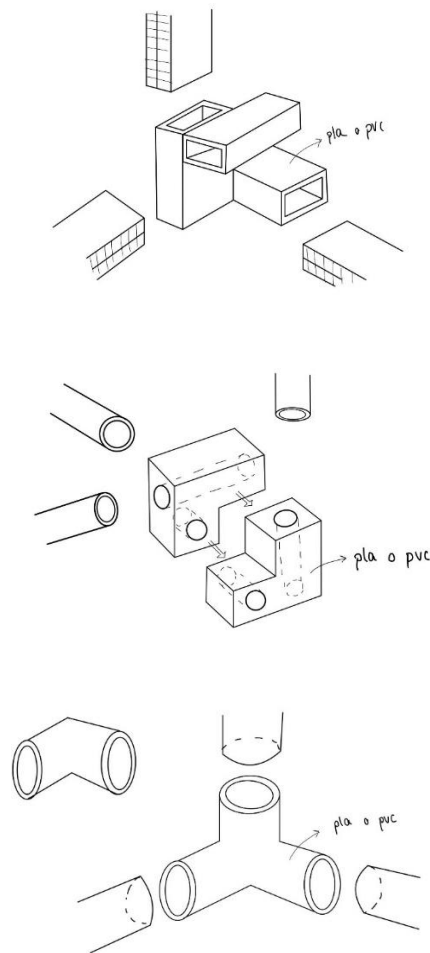
Unión de caja y espiga con cuña



Unión con cuña bifurcada



Unión en madera**Unión en cartón**

Unión con conectores

Las uniones descritas anteriormente sirven como base para el desarrollo de nuevas soluciones estructurales que se explorarán en las fases posteriores del trabajo.

A partir de este repertorio, se realizará una selección de las **uniones más adecuadas**, las cuales serán sometidas a un análisis más profundo para determinar su **viabilidad** en el contexto de mobiliario de cartón. En este sentido, se llevará a cabo una **evaluación comparativa**, con el fin de seleccionar las más eficientes y apropiadas.

3.3. Identificación de las diferentes uniones

Con el fin de establecer un marco práctico y aplicable para el estudio de uniones en cartón, se ha tomado como referencia formal una **silla**, al tratarse de un objeto representativo del mobiliario cotidiano que presenta una gran **variedad de encuentros estructurales**. Esta elección permite identificar con claridad los principales tipos de uniones que se generan en estructuras tridimensionales simples, lo que facilita su análisis, adaptación y posterior generalización a otros elementos de mobiliario.

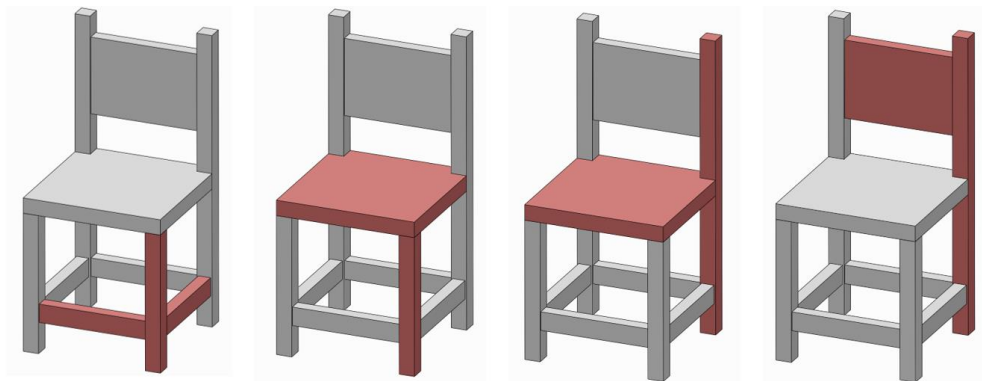


Figura 39. Identificación de uniones en una silla || Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis geométrico y funcional de la silla seleccionada (Figura 39), se han extraído **cinco configuraciones principales de unión**:

- horizontal + vertical
- horizontal + horizontal
- horizontal + horizontal + vertical
- plancha + horizontal
- plancha + vertical

Estas combinaciones responden a los diferentes encuentros entre elementos estructurales según su disposición en el espacio, siendo relevantes tanto desde el punto de vista mecánico como constructivo.

La **unión horizontal + vertical** (Figura 40) se localiza entre los **laterales del asiento y las patas**, siendo fundamental para la estabilidad de la superficie de apoyo.

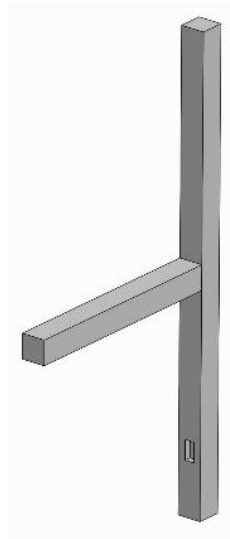


Figura 40. Unión horizontal + vertical || Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la **unión horizontal + horizontal** (Figura 41) aparece en dos zonas significativas: en la **parte superior del respaldo donde se conecta con las patas traseras**, y en los **bordes laterales del asiento donde se encuentra con los refuerzos longitudinales**. Estas uniones suelen soportar cargas laterales y transmitir esfuerzos de flexión.

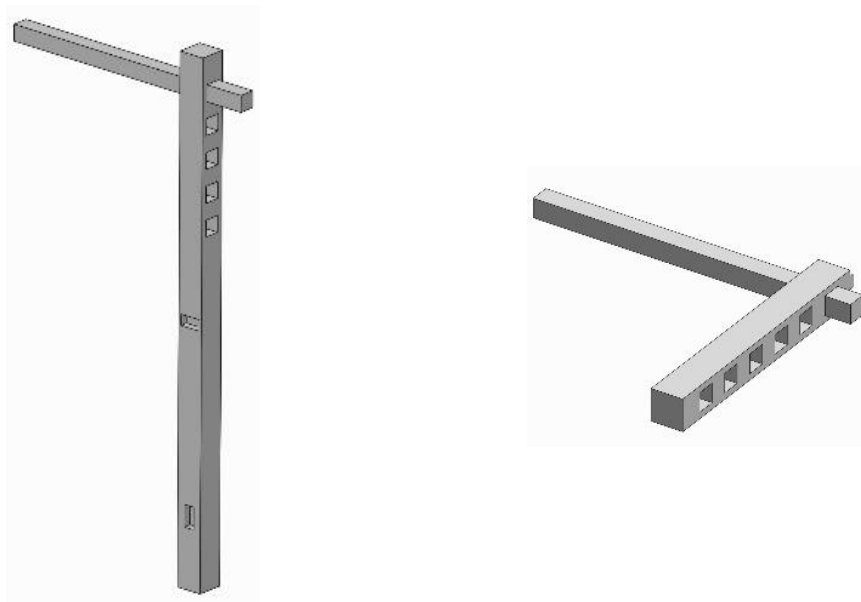


Figura 41. Unión horizontal + horizontal || Fuente: Elaboración propia

Metodología

La unión **horizontal + horizontal + vertical** (Figura 42) se presenta en las **intersecciones entre los travesaños y las patas**, así como en la **conexión entre los bordes del asiento y las patas**. Se trata de una unión estructural clave, ya que reúne tres direcciones ortogonales en un solo punto, lo que exige una solución robusta y estable.

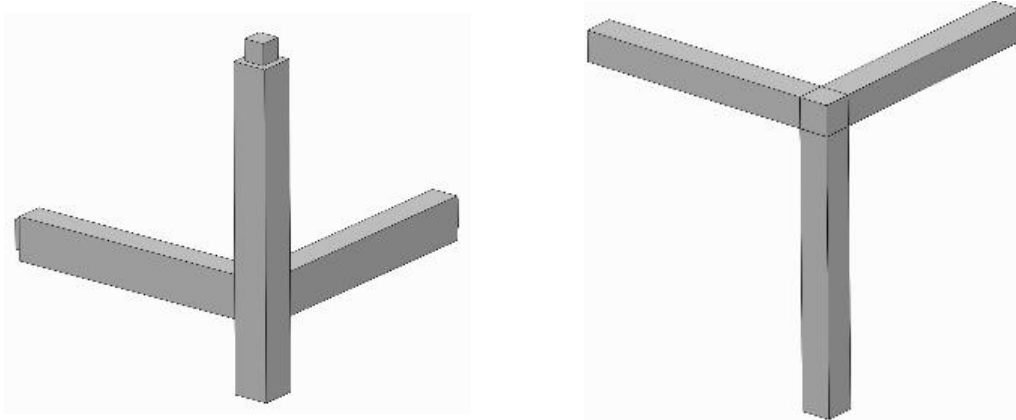


Figura 42. Unión horizontal + horizontal + vertical || **Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a la configuración **plancha + horizontal** (Figura 43), esta se observa en la **conexión del respaldo con las patas traseras**, donde una superficie laminar entra en contacto con elementos longitudinales horizontales.

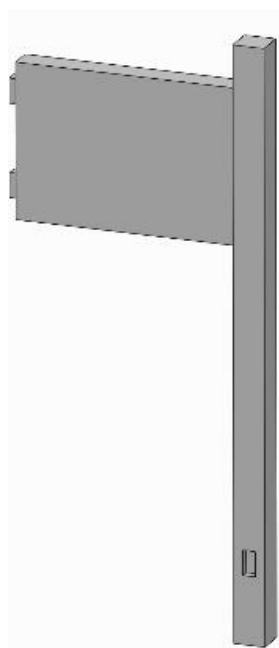


Figura 43. Unión plancha + horizontal || **Fuente:** Elaboración propia

Finalmente, la unión **plancha + vertical** (Figura 44) se da en el **encuentro del asiento con las patas delanteras y traseras**. En el caso de las patas delanteras, el asiento se apoya directamente sobre el extremo superior del elemento vertical. En cambio, en las patas traseras, la unión se realiza en un punto intermedio de la pieza vertical, lo que implica una distribución diferente del esfuerzo y requiere un tipo de encaje que garantice la continuidad estructural a pesar de no encontrarse en el extremo del elemento.

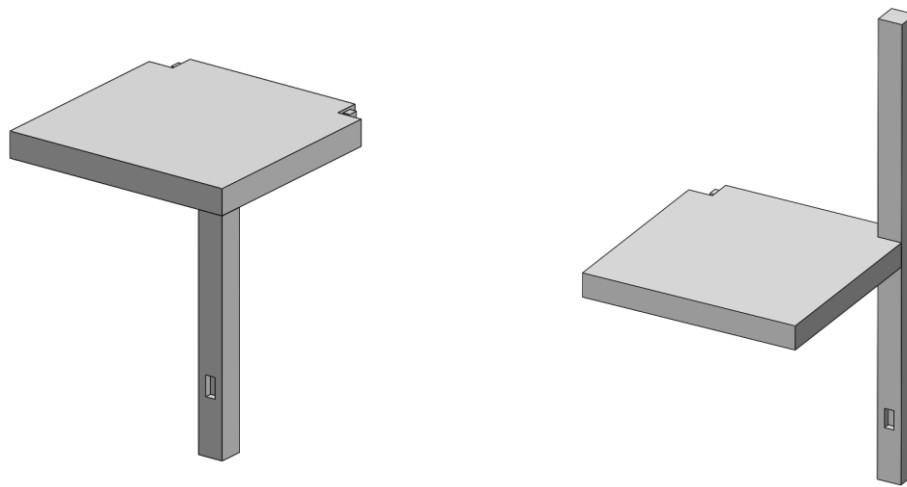
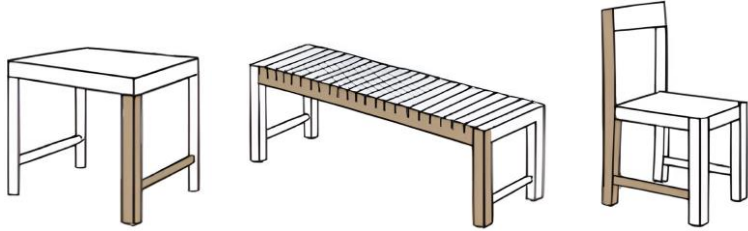
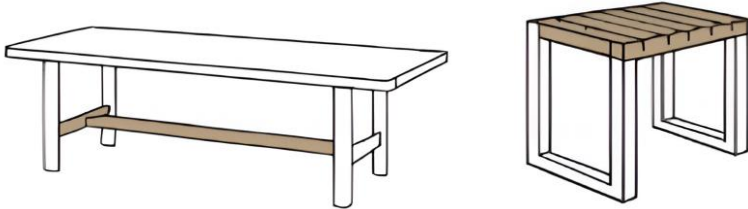
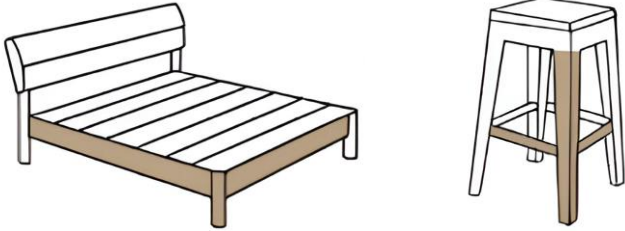
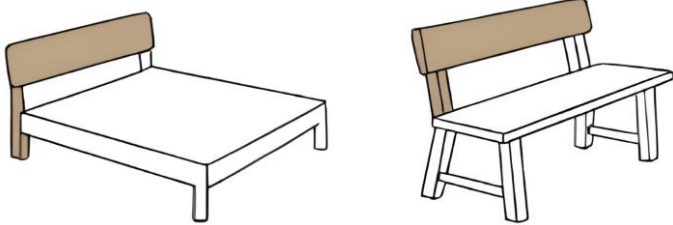
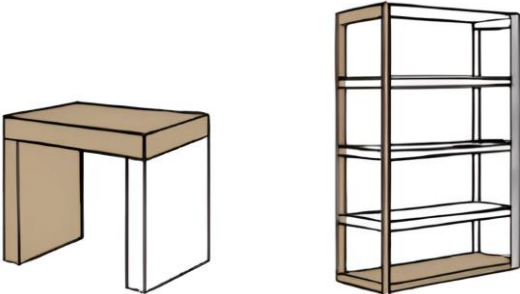


Figura 44. Unión plancha + vertical || Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7 recoge una selección representativa de configuraciones de unión que aparecen de forma recurrente en el **diseño y fabricación de mobiliario**, proporcionando una base funcional para la elección de las tipologías analizadas en el presente trabajo. Se presentan las diferentes combinaciones estructurales explicadas anteriormente, y todas ellas son aplicadas en ejemplos reales de mobiliario como **camas, sillas, bancos, mesas o estanterías**. Esta clasificación permite observar cómo estas uniones no solo son frecuentes, sino también esenciales para garantizar la estabilidad estructural de los elementos.

Tabla 7. Tipos de unión en madera

TIPOS DE UNIÓN EN MADERA	
Tipo de unión	Ejemplo de uso
<i>Horizontal + Vertical</i>	
<i>Horizontal + Horizontal</i>	
<i>Horizontal + Horizontal + Vertical</i>	
<i>Plancha + Horizontal</i>	
<i>Plancha + Vertical</i>	

3.4. Tipo de unión y sus esfuerzos

En el análisis estructural de uniones aplicadas al mobiliario, es fundamental comprender los tipos de esfuerzos mecánicos que actúan sobre cada encuentro. En general, las uniones en estructuras como una silla están sometidas a combinaciones de fuerzas de **compresión**, **tracción** y, principalmente, **flexión**. Estos esfuerzos varían en función de la orientación de los elementos que se encuentran (horizontales, verticales o planos) y del uso funcional que recibe cada parte del mobiliario.

Identificar correctamente la naturaleza de los esfuerzos implicados permite no solo anticipar el comportamiento estructural de la unión, sino también adaptar de forma precisa el diseño y la orientación del cartón, teniendo en cuenta la dirección del núcleo para optimizar la resistencia del material.

En la Figura 45 se analiza el comportamiento estructural de una unión de tipo *horizontal + vertical*. Esta configuración está sometida principalmente a **esfuerzos de flexión y compresión**. La pieza horizontal (asiento) sufre un momento flector debido a la carga vertical ejercida por el usuario, generando tensiones de tracción en la parte inferior y compresión en la parte superior. Simultáneamente, la pieza vertical (pata) recibe una **fuerza de compresión** descendente que transmite parte de la carga hacia el suelo.

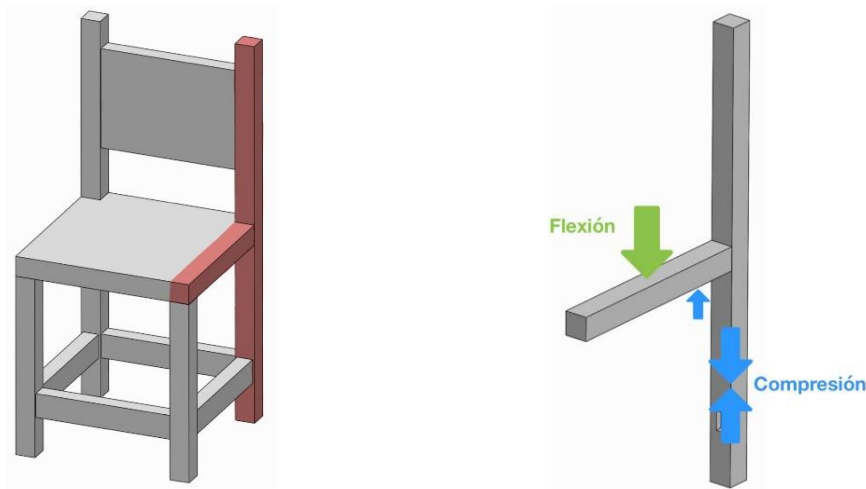


Figura 45. Esfuerzos unión horizontal + vertical || Fuente: Elaboración propia

Metodología

En la Figura 46 se representa una unión de tipo *horizontal + horizontal*. Ambas piezas horizontales están sometidas a **esfuerzos de flexión** generados por la aplicación de cargas ejercidas por el usuario en el respaldo. Como se observa en el diagrama, se producen momentos flectores tanto en el travesaño como en el montante, siendo crítico el punto de conexión entre ambas piezas.

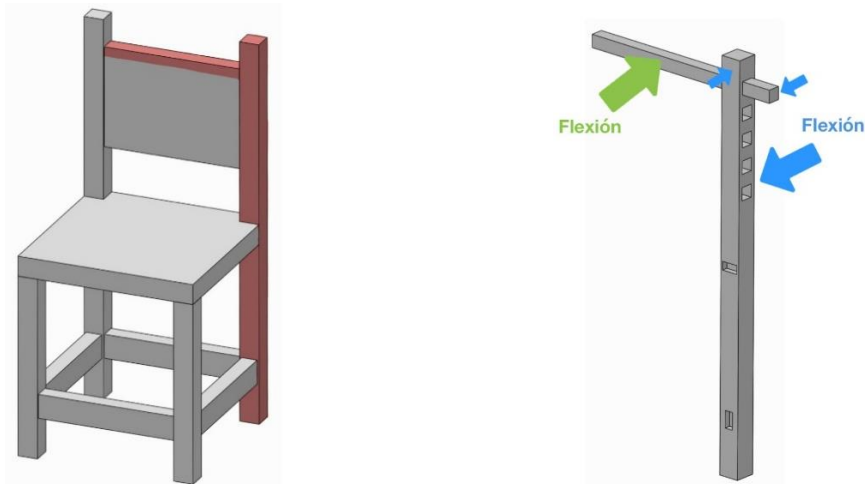


Figura 46. Esfuerzos unión horizontal + horizontal || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47 se analiza una unión de tipo *horizontal + horizontal*. Esta unión está principalmente sometida a **esfuerzos de flexión** debidos al peso del usuario que actúa perpendicularmente sobre la superficie del asiento. Ambas piezas horizontales —tanto el asiento como el travesaño lateral— experimentan momentos flectores. Además, el contacto entre elementos puede generar esfuerzos adicionales por **corte y aplastamiento** en la zona de unión si la distribución de cargas no está correctamente resuelta.

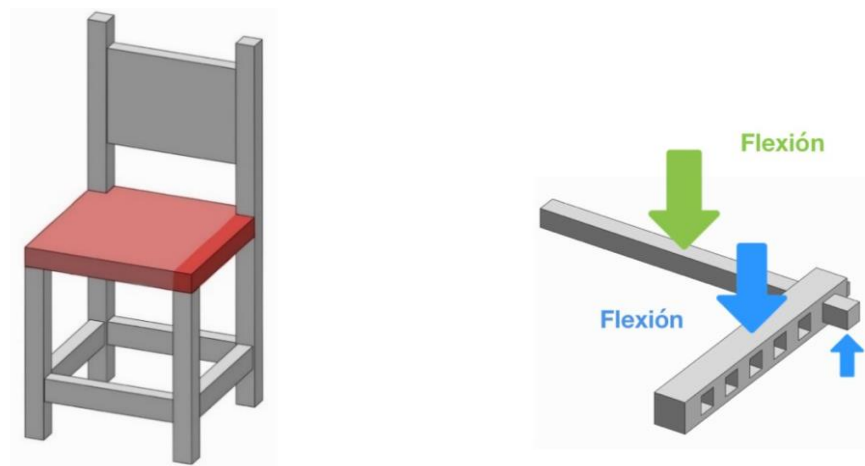


Figura 47. Esfuerzos unión horizontal + horizontal || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 48 se representa una unión del tipo *horizontal + horizontal + vertical*. Esta configuración está sometida simultáneamente a **compresión axial** en el elemento vertical (pata), debido al peso que soporta, y a **flexión** en los elementos horizontales, que actúan como arriostramiento estructural.

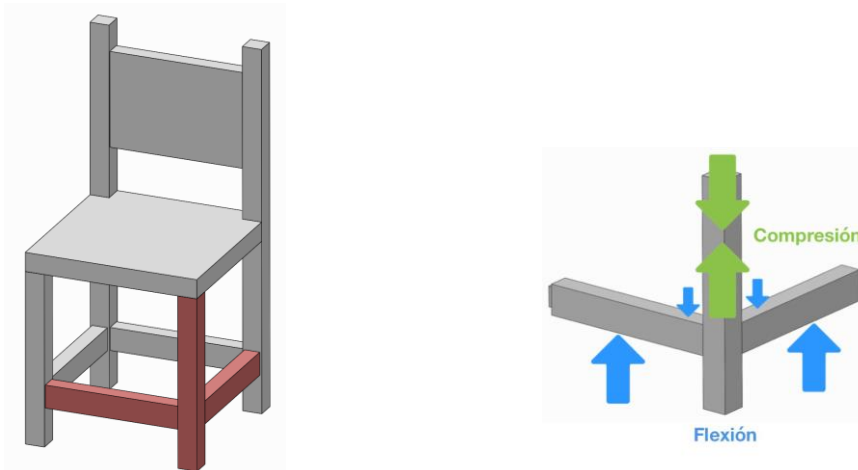


Figura 48. Esfuerzos unión horizontal + horizontal + vertical || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 49 se analiza una unión del tipo *horizontal + horizontal + vertical*. Esta configuración está sometida a **flexión** en ambos elementos horizontales, debido a la carga vertical que ejerce el peso del usuario sobre la superficie del asiento. A su vez, el componente vertical (pata) experimenta un **esfuerzo de compresión**, ya que actúa como soporte estructural que transmite el peso hacia el suelo.

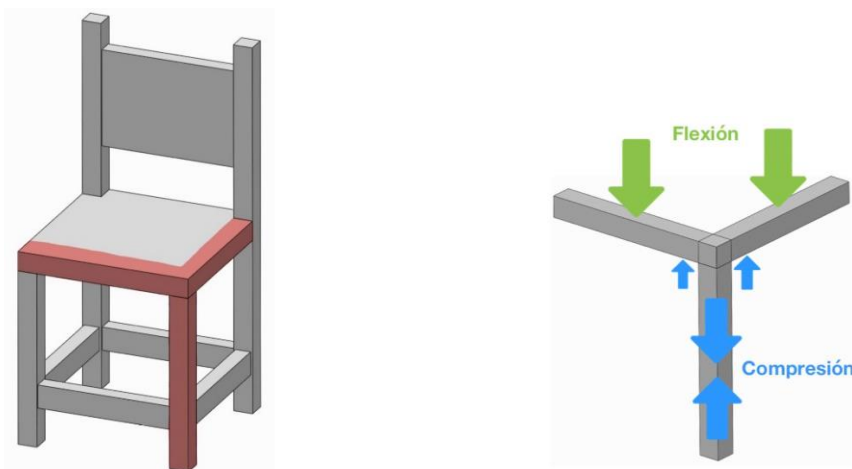


Figura 49. Esfuerzos unión horizontal + horizontal + vertical || Fuente: Elaboración propia

Metodología

La Figura 50 representa una unión del tipo *plancha + horizontal*. En esta configuración, la plancha está sometida a **esfuerzos de flexión**. La flexión en la plancha aparece cuando el usuario se apoya o reclina contra el respaldo, generando un momento en el plano de la plancha. Simultáneamente, la estructura horizontal que soporta dicha plancha también sufre **flexión**.

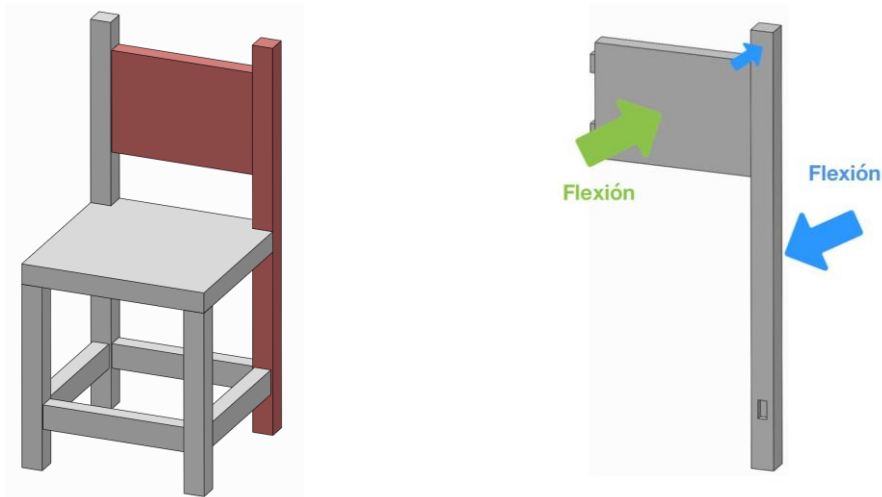


Figura 50. Esfuerzos unión plancha + horizontal || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 51 muestra una unión del tipo *plancha + vertical*. En esta configuración, el **asiento está sometido a un esfuerzo de flexión** generado por el peso del usuario que se distribuye sobre la superficie. Esta carga produce una deformación en el plano de la plancha, especialmente en zonas alejadas del soporte inmediato. Simultáneamente, las **patas verticales experimentan compresión** al soportar y transmitir la carga hacia el suelo.

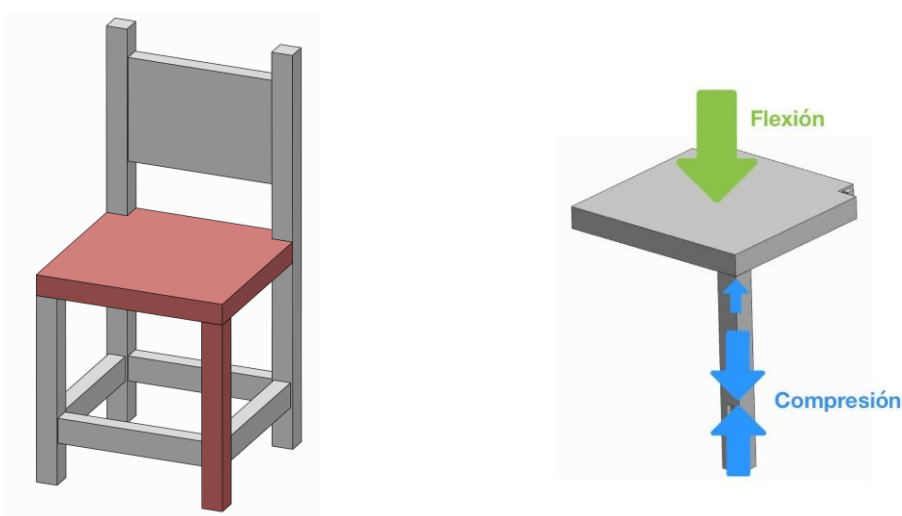


Figura 51. Esfuerzos unión plancha + vertical || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 52 representa nuevamente una unión del tipo *plancha + vertical*. Tal como se indica en el esquema de esfuerzos, la **plancha horizontal está sometida a flexión** debido a la carga vertical que actúa sobre su superficie (el peso del usuario). Esta carga tiende a provocar una deformación descendente del tablero. Por su parte, la **estructura vertical absorbe esa carga en forma de compresión**, ya que transmite el peso hacia el suelo.

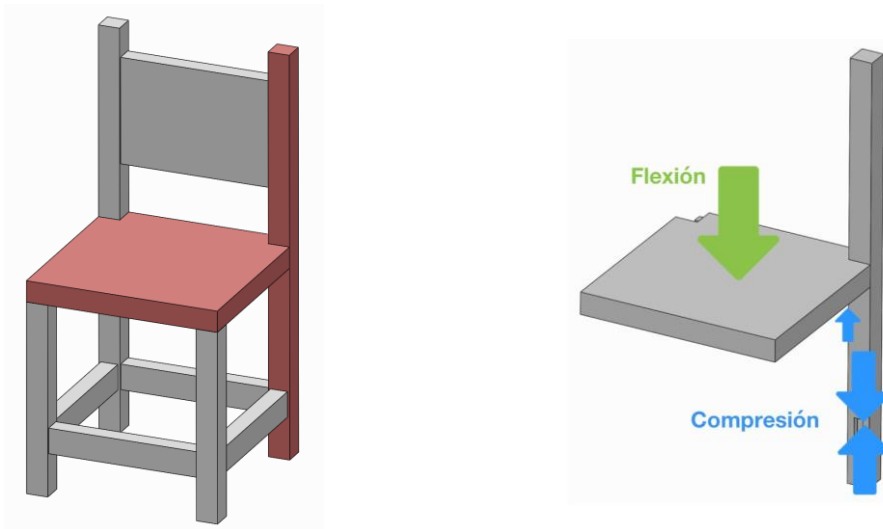


Figura 52. Esfuerzos unión plancha + vertical || Fuente: Elaboración propia

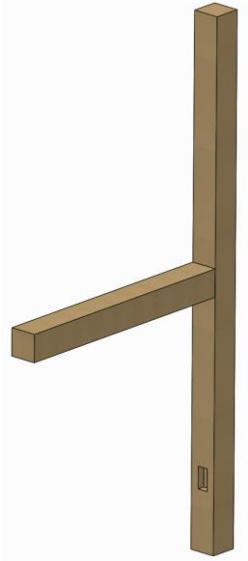

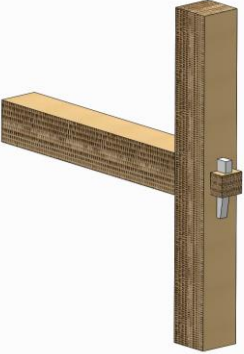


3.5. Tipo y forma de unión aplicadas al cartón

Una vez identificados los esfuerzos predominantes en cada tipo de unión, se procede a definir la **orientación más adecuada del núcleo del cartón**, ya que su disposición interna influye directamente en la resistencia estructural frente a cargas de compresión o flexión. Esta decisión resulta clave para garantizar la estabilidad y durabilidad del conjunto, especialmente en un material como el cartón, cuya anisotropía condiciona notablemente su comportamiento mecánico.

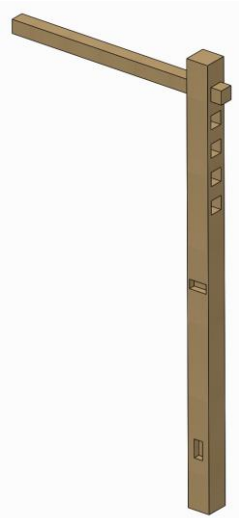





A partir de esta base, y haciendo uso de la recopilación previa de uniones tradicionales en madera adaptadas al cartón, se procede al **modelado digital de las uniones**. Estas se reinterpretan formal y dimensionalmente considerando las propiedades específicas del cartón como material base. El desarrollo de estas geometrías se ha realizado mediante el software **SolidWorks**. La adaptación de estas uniones no solo requiere una transformación material, sino también una adecuación funcional que contemple los límites técnicos y las posibilidades estructurales del cartón.

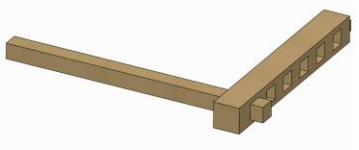



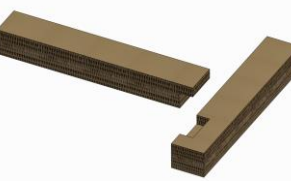
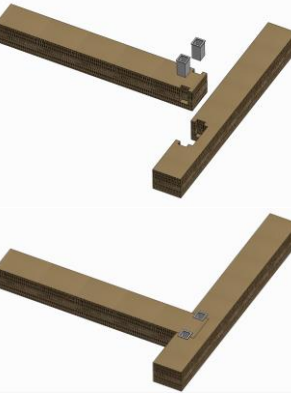
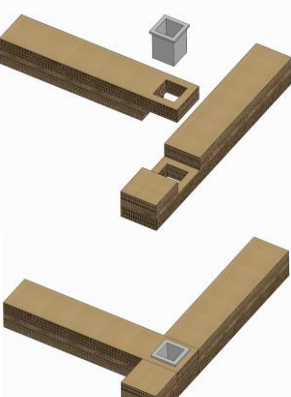
Para visualizar esta relación entre tipo y forma de unión, en la Tabla 8 se presenta una comparativa que recoge los distintos casos analizados. En su elaboración se ha empleado la recopilación previa de uniones tradicionales en madera adaptadas al cartón (caja y espiga, unión con pasador cilíndrico, etc.), considerando además las tres categorías definidas (cartón – cartón, cartón – cola y cartón – soporte). Para cada tipo de conexión (horizontal + vertical, horizontal + horizontal, etc.) se han diseñado aquellas uniones estructuralmente viables, especificando en cada caso si están realizadas exclusivamente en cartón, si requieren adhesivo o si precisan de un elemento de soporte adicional.

Tabla 8. Tipo y forma de unión en cartón

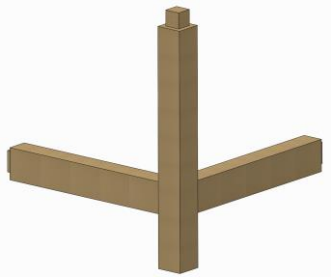




		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola	Unión cartón - soporte
<p>Horizontal + Vertical</p> 		✓	✓	
				✓
		✓	✓	
		✓	✓	






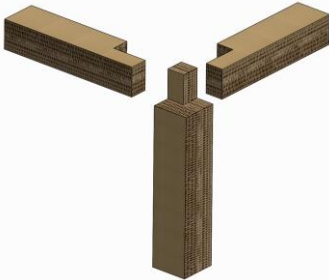
Metodología

		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola	Unión cartón - soporte
<p>Horizontal + Horizontal</p> 		✓	✓	
				✓
		✓	✓	
			✓	
				✓







		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola	Unión cartón - soporte
<p>Horizontal + Horizontal</p> 		✓	✓	
		✓	✓	
		✓	✓	
			✓	
				✓
				✓





Metodología

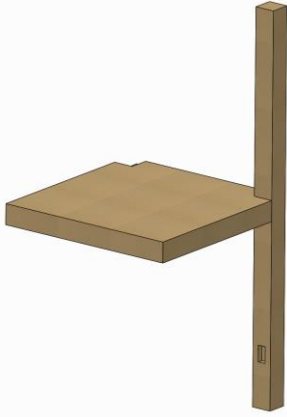



		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola	Unión cartón - soporte
<p>Horizontal + Horizontal + Vertical</p> 		✓	✓	
		✓	✓	
				✓
			✓	

		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola n	Unión cartón - soporte
<p>Horizontal + Horizontal + Vertical</p> 		✓	✓	
		✓	✓	
		✓	✓	
				✓
			✓	

Metodología

		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola	Unión cartón - soporte
<p>Plancha + Horizontal</p> 		✓	✓	
				✓
			✓	
		✓	✓	
				✓

		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola	Unión cartón - soporte
<p>Plancha + Vertical</p> 		✓	✓	
		✓		✓
		✓	✓	

		Unión cartón - cartón	Unión cartón - cola	Unión cartón - soporte
<p>Plancha + Vertical</p> 		✓	✓	
		✓		✓
		✓	✓	

La Tabla 9 constituye una síntesis de las distintas tipologías de unión analizadas, organizadas según la **configuración geométrica** de los elementos implicados (horizontal + vertical, horizontal + horizontal, etc.), el tipo de encaje o **solución constructiva** adoptada (por ejemplo, caja y espiga, unión con pasador cilíndrico, etc.), y su viabilidad técnica para su ejecución en cartón. Esta sistematización permite establecer una base comparativa rigurosa entre las distintas alternativas, facilitando la identificación de aquellas configuraciones que presentan una **mayor compatibilidad** con las propiedades mecánicas y limitaciones del material, así como su **potencial de implementación** en contextos reales de diseño estructural.

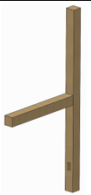








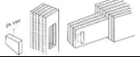


Tabla 9. Tipo de unión y forma su aplicación

	Horizontal + Vertical	Horizontal + Horizontal		Horizontal + Horizontal + Vertical		Plancha + Horizontal	Plancha + Vertical	
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
							✓	✓
					✓			
				✓	✓			
	✓						✓	✓
	✓							
			✓					
		✓	✓			✓		
		✓	✓			✓		
				✓	✓			
			✓					
		✓	✓			✓		
	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

Metodología

Tras analizar diversas uniones y formas de encaje, en la Tabla 10 se presentan las opciones seleccionadas que se estudiarán y compararán en detalle.

Tabla 10. Selección de uniones a comparar

	Horizontal + Vertical	Horizontal + Horizontal	Horizontal + Horizontal + Vertical		Plancha + Horizontal		Plancha + Vertical	
								
Caja y espiga 	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Caja y espiga con cuña 	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Caja y espiga 							✓	✓
Unión con pasador cilíndrico 							✓	✓

Se han considerado dos soluciones constructivas principales para las configuraciones de unión entre elementos horizontales y/o verticales: la unión tipo **caja y espiga**, y su variante **caja y espiga con cuña**, incorporando esta última un mecanismo de bloqueo adicional que mejora el ajuste y la transmisión de esfuerzos. Estas dos tipologías se han aplicado a las siguientes configuraciones geométricas: **horizontal + vertical**, **horizontal + horizontal**, **horizontal + horizontal + vertical** y **plancha + horizontal**, permitiendo comparar su rendimiento bajo distintas condiciones de carga y orientación de las piezas.

Por otro lado, para el caso particular de la configuración **plancha + vertical**, se han contrastado dos estrategias de ensamblaje diferenciadas: la unión tipo **caja y espiga** y la **unión mediante pasador cilíndrico**, esta última basada en la incorporación de un elemento cilíndrico transversal que actúa como refuerzo adicional.

3.6. Determinación de uniones a partir del análisis estructural y proceso de diseño de probetas

Para definir las configuraciones de unión a ensayar, se ha llevado a cabo un análisis estructural de una silla mediante el método de elementos finitos (MEF), con el objetivo de **identificar las solicitaciones más críticas** en distintas zonas del mueble. Este análisis completo, así como los ensayos simulados y los criterios de selección del esfuerzo más desfavorable, se desarrollan en el **Anexo 1 - Análisis por el Método de Elementos Finitos**.

A partir del análisis realizado, se diseñan **probetas que reproducen a escala las condiciones geométricas y funcionales** de cada una de estas uniones. Las dimensiones y configuraciones responden a la necesidad de reflejar de forma precisa las zonas de contacto, dirección de esfuerzos y tipo de sollicitación dominante (tracción, compresión, flexión o corte), asegurando así la validez del ensayo.

Las dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos han sido definidas en función de las características geométricas representativas de cada tipo de unión estructural, adaptadas a escala según su ubicación funcional dentro de una silla. Dado que el objetivo es analizar el comportamiento mecánico de uniones realizadas en cartón aplicadas a mobiliario, se ha considerado esencial que las probetas reflejen de forma precisa las **zonas de contacto y transmisión de esfuerzos** propias de cada configuración de unión.

Si bien existen normas técnicas destinadas a la caracterización del cartón, como la **ISO 5628** (rigidez a la flexión) o la **ISO 1924** (resistencia a tracción), estas se centran en materiales homogéneos y en formato plano, sin considerar geometrías complejas ni ensamblajes estructurales como los que se abordan en este estudio. Por este motivo, se ha optado por un enfoque más representativo, que parte del diseño específico de cada unión para establecer las dimensiones de las probetas.

Metodología

En la Figura 53 se representan las tres direcciones principales del cartón corrugado: la dirección de la máquina (MD), correspondiente al **eje X**; la dirección transversal (CD), alineada con el **eje Y**; y la dirección a través del espesor (ZD), asociada al **eje Z**. La orientación del eje X ha sido asignada estratégicamente en cada una de las piezas, priorizando su resistencia estructural, ya que el cartón presenta una mayor capacidad para soportar esfuerzos mecánicos en la dirección de la máquina, debido a la alineación de las fibras y la geometría de la onda en dicha dirección.

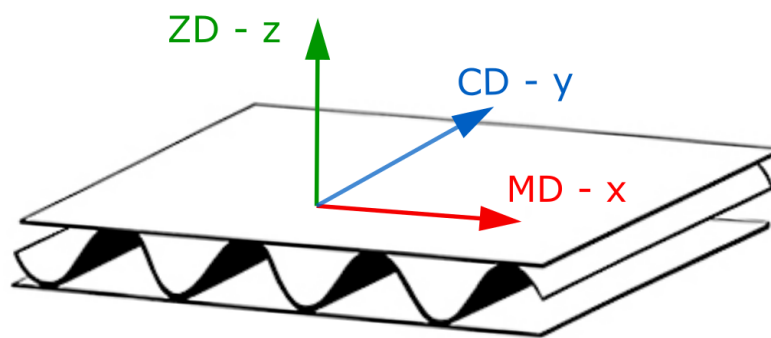
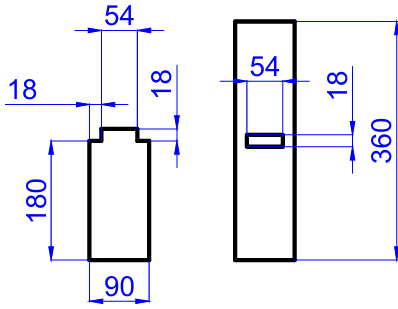
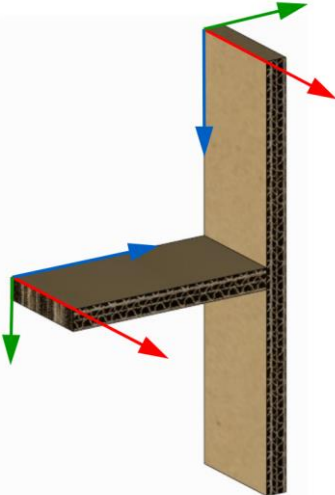
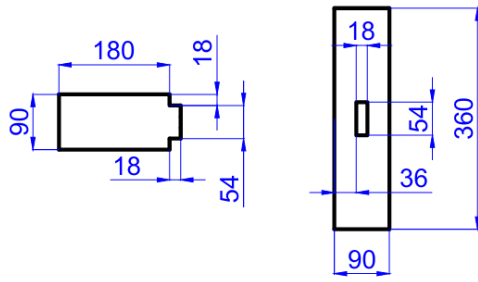
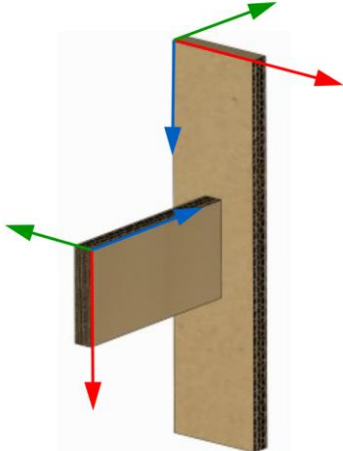
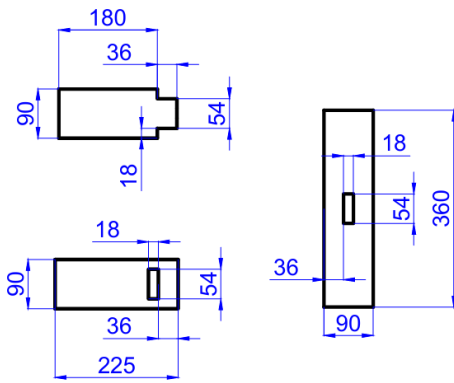
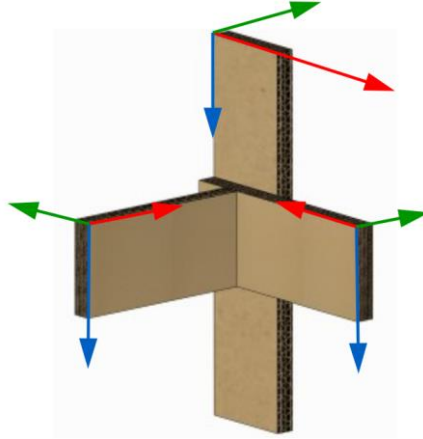


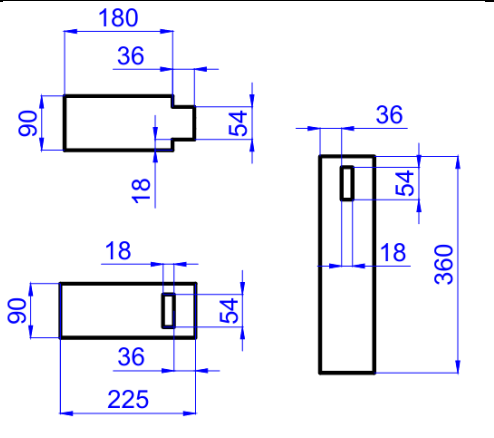
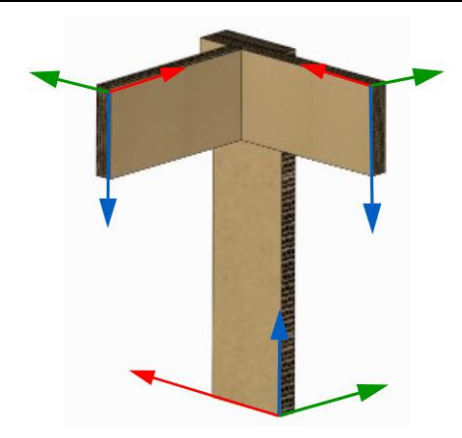
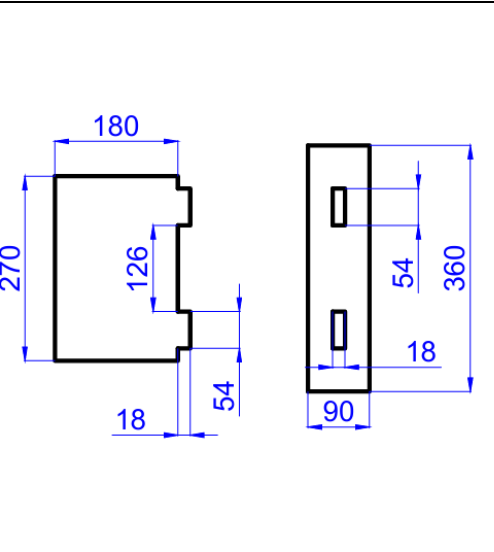
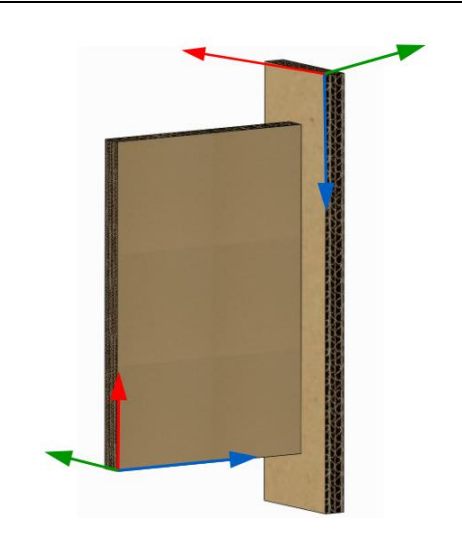
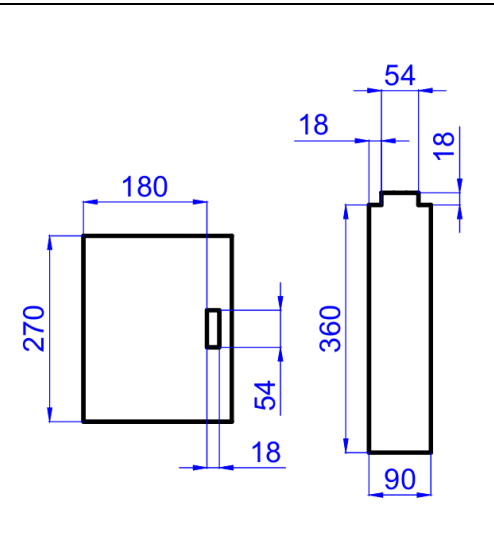
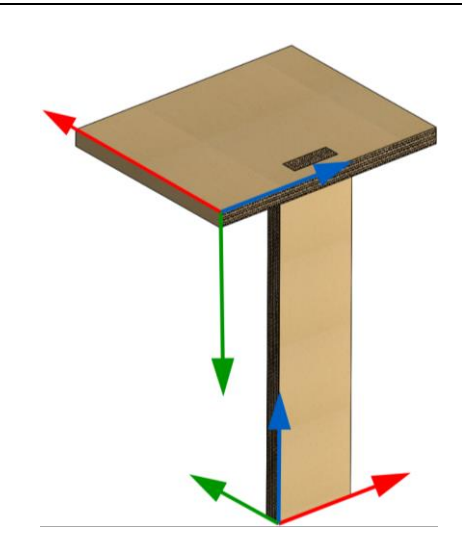
Figura 53. Direcciones principales || **Fuente:** Elaboración propia

En las Tablas 11, 12 y 13 se detallan las uniones seleccionadas —caja y espiga, caja y espiga con cuña, y unión con pasador cilíndrico—, sus dimensiones, así como la orientación de la onda de cada componente que las conforma, expresada en relación con los ejes X, Y y Z anteriormente definidos.

Tabla 11. Dimensiones probetas caja y espiga

Unión	Dimensiones	Dirección de la onda
Horizontal + Vertical		
Horizontal + Horizontal		
Horizontal + Horizontal + Vertical		

Metodología

Unión	Dimensiones	Dirección de la onda
<p>Horizontal + Horizontal + Vertical</p>		
<p>Plancha + Horizontal</p>		
<p>Plancha + Vertical</p>		

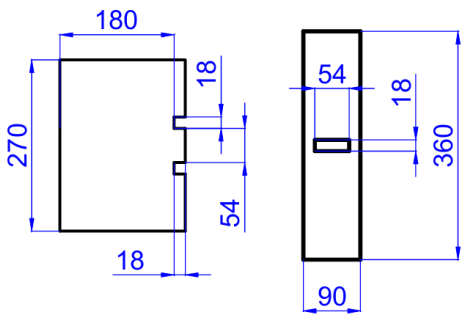
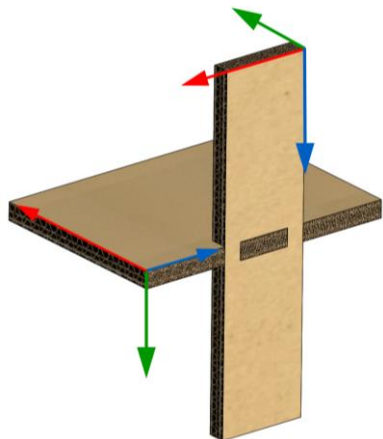
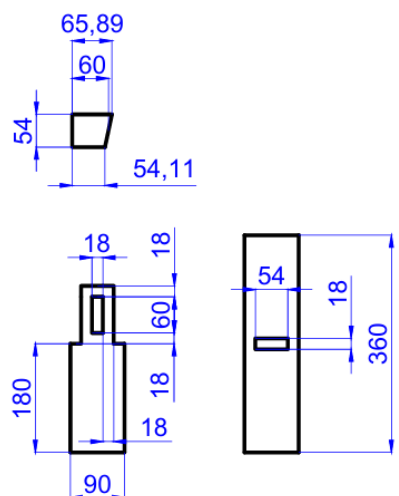
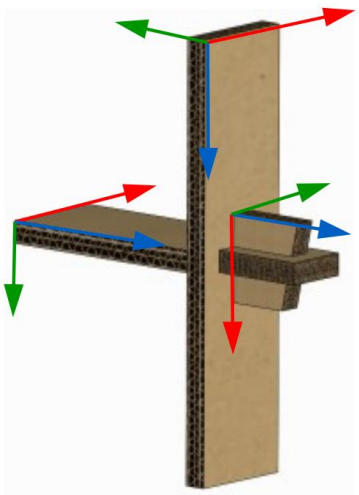
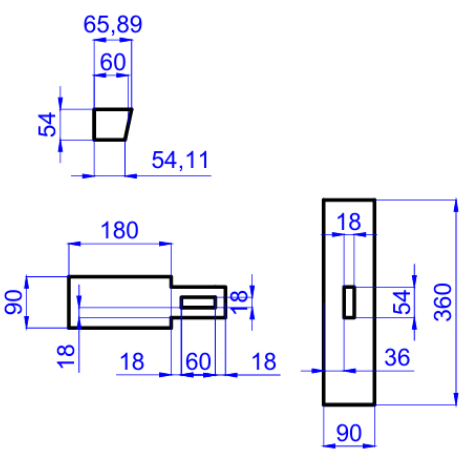
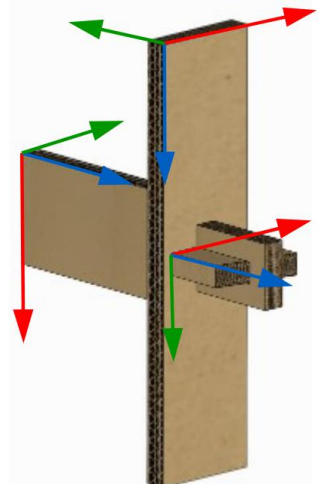
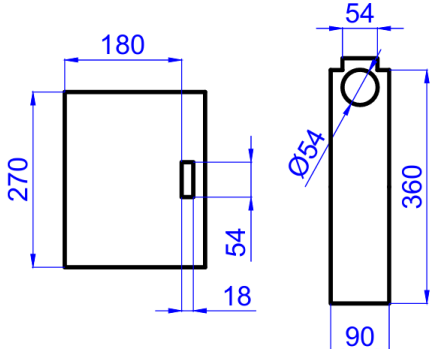
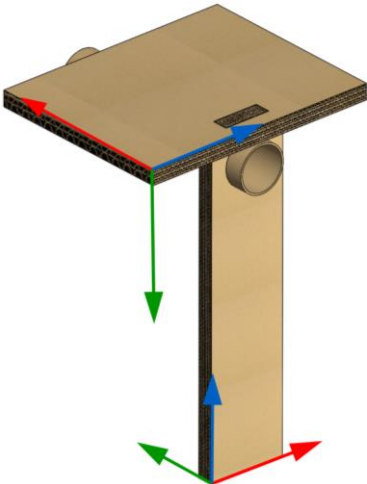
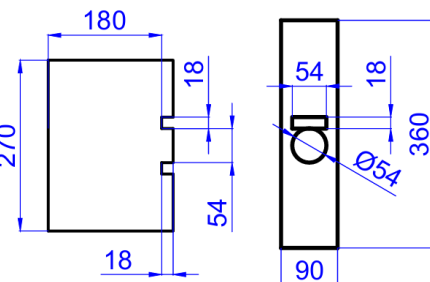
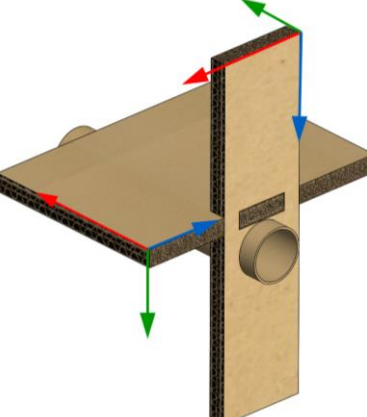
Unión	Dimensiones	Dirección de la onda
<p>Plancha + Vertical</p>		

Tabla 12. Dimensiones probetas caja y espiga con cuña

Unión	Dimensiones	Dirección de la onda
<p>Horizontal + Vertical</p>		
<p>Horizontal + Horizontal</p>		

Unión	Dimensiones	Dirección de la onda
<p>Horizontal + Horizontal + Vertical</p>		
<p>Horizontal + Horizontal + Vertical</p>		
<p>Plancha + Horizontal</p>		

Tabla 13. Dimensiones probetas con pasador cilíndrico

Unión	Dimensiones	Dirección de la onda
Plancha + Vertical		
Plancha + Vertical		

En la Tabla 14 se muestran todas las uniones consideradas para su estudio y comparación. No obstante, dado el alcance del proyecto y la viabilidad en términos de recursos, no se procederá a la fabricación y ensayo físico de la totalidad de las uniones recogidas. En su lugar, se ha optado por seleccionar un conjunto de uniones consideradas **más representativas**, atendiendo tanto a su recurrencia en estructuras de mobiliario real como a su relevancia funcional y estructural. En concreto, se priorizan aquellas uniones que se encuentran comúnmente en el diseño y construcción de una **silla**, ya que este tipo de mueble constituye el caso de estudio en el que se evaluará la aplicabilidad y el rendimiento de las soluciones propuestas.

Metodología

Para ello, en el **Anexo 1 - Análisis por el Método de Elementos Finitos** se desarrolla un análisis detallado mediante simulaciones en SolidWorks, aplicado tanto al modelo completo de una **silla** como a **cada una de las uniones individualmente**. En dicho anexo se evalúan, bajo condiciones de carga específicas, los **valores máximos de tensión y desplazamiento resultante** en cada caso, para así identificar las uniones más críticas desde el punto de vista mecánico.

Tabla 14. Resultados obtenidos en la simulación

Unión	Tipo	Tensión [MPa]	Desplazamiento [mm]
Horizontal + vertical	Caja y espiga	4,651	56,21
	Caja y espiga con cuña	5,885	56,225
Horizontal + horizontal	Caja y espiga	0,723	0,04317
	Caja y espiga con cuña	0,768	2,539
Horizontal + horizontal + vertical 1	Caja y espiga	1,305	3,067
	Caja y espiga con cuña	1,253	3,066
Horizontal + horizontal + vertical 2	Caja y espiga	1,557	3,105
	Caja y espiga con cuña	1,700	3,103
Plancha + horizontal	Caja y espiga	2,780	20,030
	Caja y espiga con cuña	2,700	20,05
Plancha + vertical 1	Caja y espiga	9,899	45,83
	Caja y espiga con pasador cilíndrico	6,474	10,57
Plancha + vertical 2	Caja y espiga	12,13	21,56
	Caja y espiga con pasador cilíndrico	7,953	6,287

Con base en los resultados obtenidos y reflejados en la Tabla 14 desarrollada en el **Anexo 1 - Análisis por el Método de Elementos Finitos**, se han seleccionado tres configuraciones de unión —**horizontal + horizontal + vertical 1; plancha + horizontal; y plancha + vertical 2**— por considerarse las más **estructuralmente desfavorables y representativas** de las condiciones de carga típicas en aplicaciones de mobiliario.

Estas uniones, así como los criterios de comparación que se emplearán en su análisis, se recogen en la Tabla 15.

Tabla 15. Uniones seleccionadas para ensayo físico

	Horizontal + Vertical	Horizontal + Horizontal	Horizontal + Horizontal + Vertical	Plancha + Horizontal	Plancha + Vertical
Caja y espiga					
Caja y espiga con cuña					
Caja y espiga					
Caja y espiga con pasador cilíndrico					

La fabricación de las uniones se ha realizado mediante **corte láser**. La cortadora láser es una herramienta de fabricación digital que permite cortar o grabar materiales mediante un haz de luz láser de alta precisión. Su funcionamiento se basa en la emisión de un rayo láser focalizado que funde, quema o vaporiza el material siguiendo un recorrido previamente definido mediante un archivo vectorial. En este proyecto se ha utilizado el modelo *Ibero Laser 1390 o IL1390* (Figura 54), una cortadora láser de tipo CO₂ que permite trabajar con distintos materiales, entre ellos el cartón.



Figura 54. Cortadora láser modelo Ibero Laser 1390 || Fuente: iberolaser.com

Esta máquina es compatible con varios tipos de archivos vectoriales, entre ellos el formato **.dxf**, ampliamente utilizado en entornos de diseño asistido por ordenador. En este caso, las uniones se han diseñado en **AutoCAD** (Figura 55), y posteriormente exportadas a dicho formato para su procesamiento.

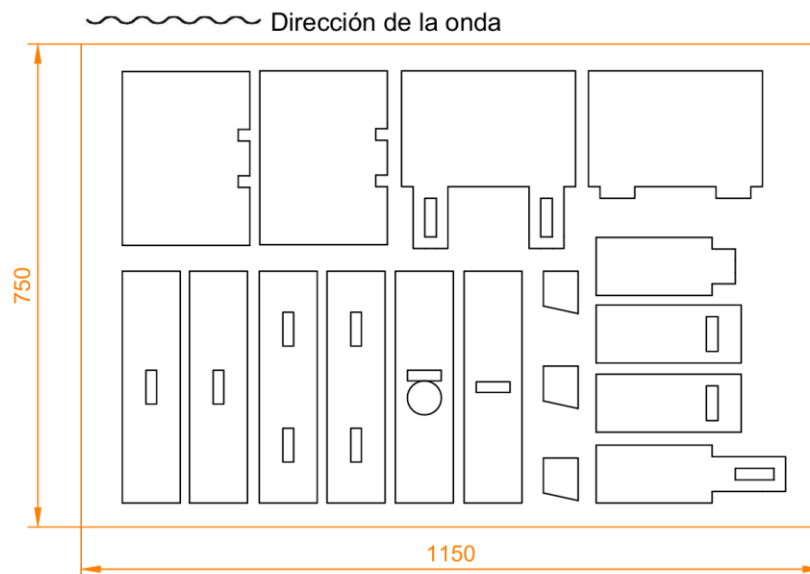


Figura 55. Archivo **.dxf** con el diseño de las uniones seleccionadas para ensayo || Fuente: Elaboración propia

Además, se han utilizado planchas de cartón de dimensiones **1150 × 750 mm**, adaptadas al área de trabajo de la cortadora, que es de **1300 × 900 mm**.

Se han realizado pruebas preliminares con diferentes valores de potencia y velocidad de corte, con el objetivo de identificar los parámetros óptimos que permiten un corte limpio sin causar quemaduras en el material. Estas pruebas se llevaron a cabo utilizando cartón de espesores 12 mm, 16 mm

y 18 mm. La combinación que permitió obtener un buen corte correspondió a una potencia mínima y máxima de 80%, y una velocidad de 60 mm/s, aplicando el número de pasadas necesarias en función del espesor del material. En la Figura 56 se recopilan los parámetros mencionados en función del espesor.



Figura 56. Parámetros de corte para distintos espesores || Fuente: Elaboración propia

Los parámetros técnicos empleados en el proceso de corte láser para la fabricación de las uniones realizadas en cartón con un espesor de 18 mm son los siguientes: una distancia focal (Figura 57) de **8 mm**, con una **potencia mínima y máxima del 80%**, una **velocidad de corte de 60 mm/s** y un total de **9 pasadas** por cada trayectoria. La elección de estos parámetros responde a la necesidad de garantizar un corte limpio y preciso en un material de elevado grosor, asegurando al mismo tiempo la integridad estructural de las piezas resultantes.

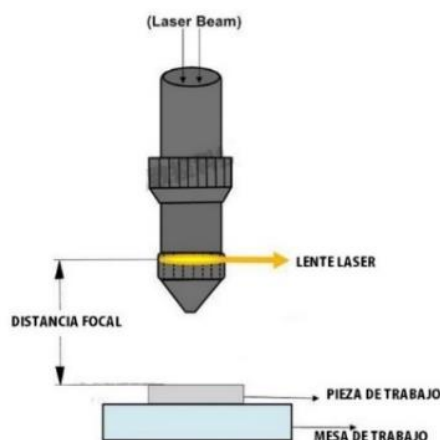


Figura 57. Distancia focal de la cortadora láser || Fuente: importecol.com

Metodología

En la Tabla 16 se recogen estos parámetros.

Tabla 16. Parámetros de la cortadora láser

Material	Espesor del material [mm]	Distancia focal [mm]	Potencia mínima [%]	Potencia máxima [%]	Velocidad [mm/s]	Pasadas
Cartón corrugado	18	8	80	80	60	9

Sin embargo, debido al funcionamiento del láser, que realiza múltiples pasadas sobre la misma trayectoria para completar el corte, puede producirse un ligero sobre corte del material, eliminando más cantidad del deseado. Esto se debe a la anchura del haz y a la acumulación de energía en los bordes. Por este motivo, se realizaron **pruebas de tolerancia** para ajustar correctamente las dimensiones de las piezas. Para garantizar la compatibilidad dimensional, las piezas salientes se han mantenido con sus medidas nominales de **54 × 18 mm**, mientras que las dimensiones de los alojamientos se han reducido. En concreto, el tamaño del orificio se ha ajustado a **52,5 × 16,5 mm**, lo que implica una compensación de tolerancia de **-1,5 mm** en ambas direcciones, para garantizar un ajuste adecuado.

Del mismo modo, en elementos circulares, como los tubos de encaje, se ha observado que el agujero correspondiente debía pasar de **54 mm a 53 mm** de diámetro para lograr un ajuste preciso. Estos resultados permiten definir con mayor exactitud las dimensiones de corte en función de la geometría y asegurar la correcta unión entre piezas.

En la Figura 58 se presentan los resultados de dichas pruebas de tolerancia.

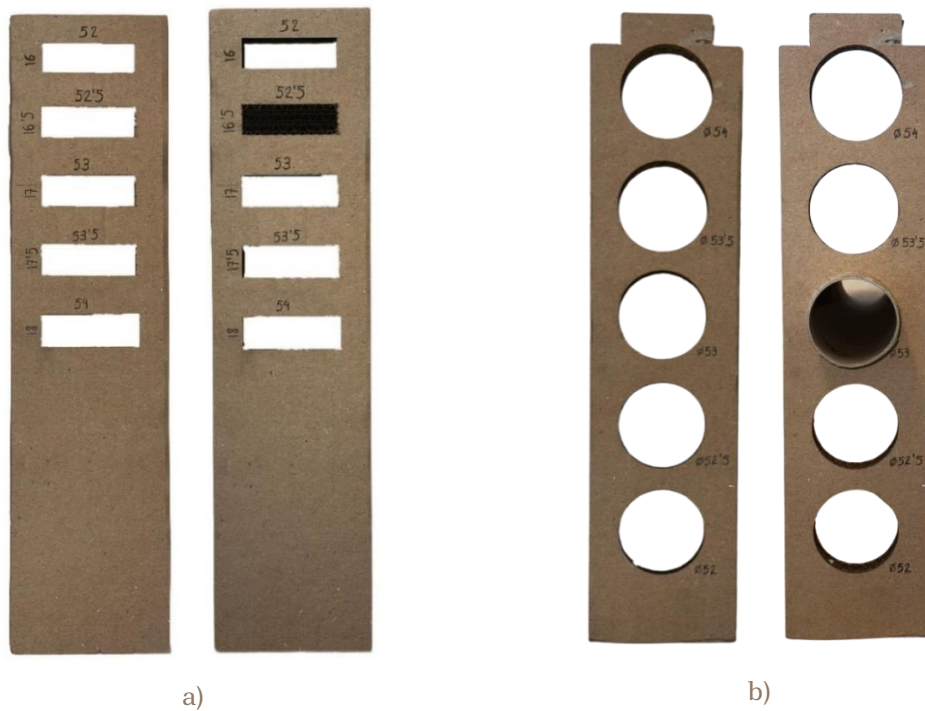


Figura 58. Prueba de tolerancia a) caja y espiga b) elemento tubular || Fuente: Elaboración propia

Una vez conseguido un ajuste óptimo en las uniones que garantice un encaje preciso entre las piezas, se procede a realizar el corte láser para la fabricación de las uniones. En la Figura 59 se muestra el proceso de corte.

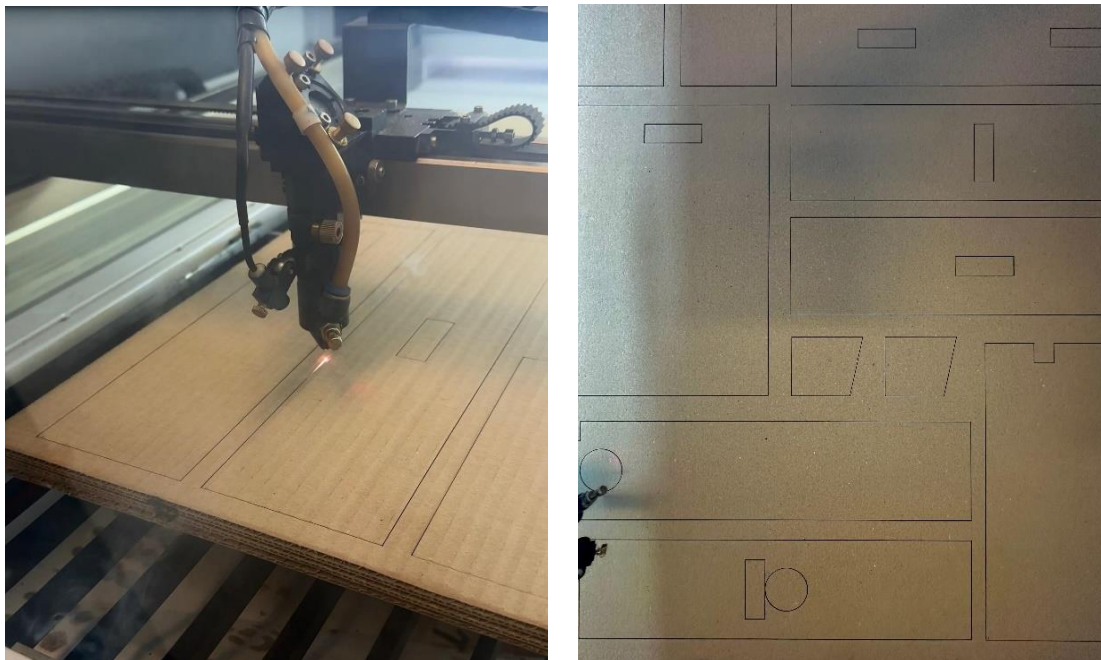


Figura 59. Proceso de corte || Fuente: Elaboración propia

3.7. Estudio experimental de las uniones

Para el estudio experimental de las uniones en cartón, se ha desarrollado un procedimiento orientado a evaluar su comportamiento estructural mediante ensayos físicos. En este apartado se detalla el **material necesario para la realización de los ensayos**, así como la **configuración de los mismos** y los elementos auxiliares diseñados específicamente para su ejecución.

Las muestras de cartón se fijarán a la **mesa de trabajo** (Figura 60) mediante **tornillos de apriete** (Figura 61), con el fin de mantenerlas estables durante la aplicación de carga. Sobre estas muestras se aplicará un **esfuerzo de flexión** mediante una pieza auxiliar de **carga suspendida**, diseñado específicamente para este estudio.



Figura 60. Mesa de trabajo extensible ||

Fuente: bauhaus.es



Figura 61. Tornillos de apriete || Fuente:

teminsa.com

La fuerza se ejercerá a través de un cable, del que colgará un peso adicional y una célula de carga, cuya función es registrar con precisión la fuerza aplicada sobre la muestra en el momento del fallo. Para ello, se utiliza una **célula de carga Daysensor DYLY-102** (Figura 62), con una capacidad máxima de **50 kg** y una sensibilidad de **2 mV/V**.



Figura 62. Célula de carga Daysensor DYLY-102 || Fuente: [amazon.com](https://www.amazon.com)

Una vez analizados de forma individual los distintos elementos que componen el sistema —mesa de trabajo, tornillos de apriete, carga y célula de carga—, en la Figura 63 se muestra cómo se disponen estos componentes en el montaje final del ensayo.

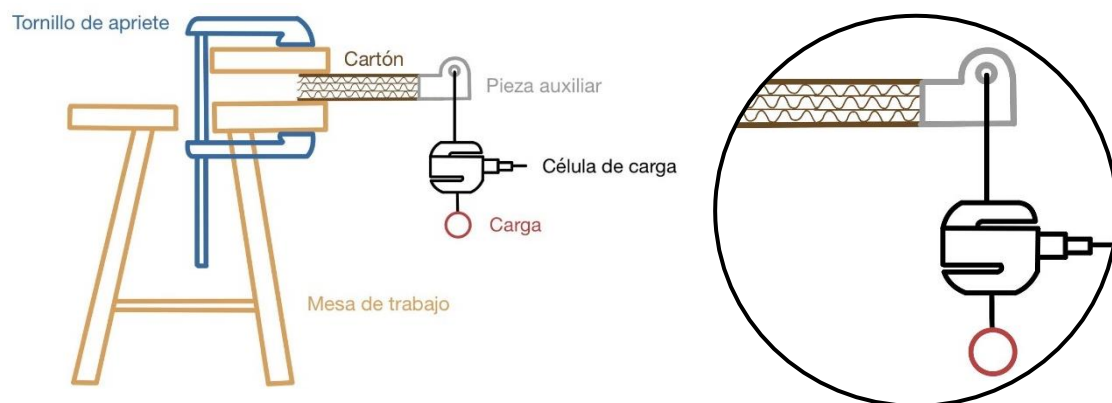


Figura 63. Configuración general de los ensayos || Fuente: Elaboración propia

Se han realizado dos tipos de ensayos con el objetivo de evaluar previamente la resistencia del cartón: el **ensayo de flexión biempotrado** (Figura 64a), en el que la muestra se apoya en dos puntos situados en sus extremos y la carga se aplica en el punto medio, y el **ensayo de flexión en voladizo** (Figura 64b), en el que la muestra se sujeta firmemente en un extremo mientras la carga se aplica en el extremo opuesto. Estos ensayos han permitido analizar el comportamiento estructural del cartón frente a diferentes condiciones de flexión.

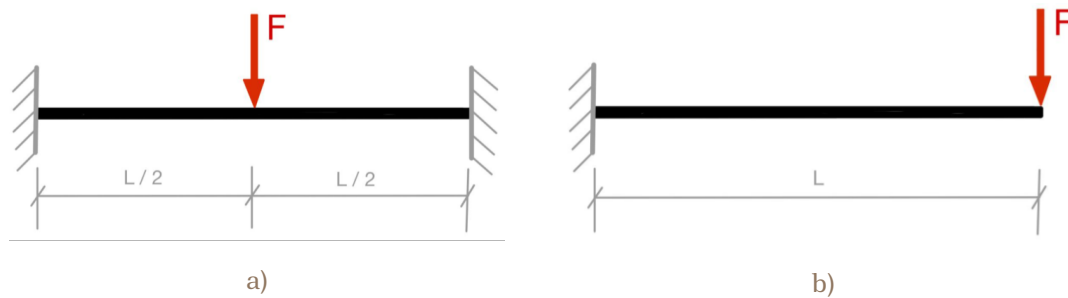


Figura 64. Ensayo de flexión a) biempotrado, b) en voladizo || Fuente: Elaboración propia

Para ello, se han diseñado y fabricado mediante **impresión 3D** las **piezas auxiliares** que permiten aplicar la fuerza directamente sobre el punto deseado. Estas piezas actúan como puntos de anclaje que aseguran la correcta integración de la célula de carga en el montaje experimental, facilitando así la medición precisa de la fuerza aplicada. Su fabricación se ha realizado con la impresora **Ultimaker S5** (Figura 65), empleando **PLA (ácido poliláctico)** como material.

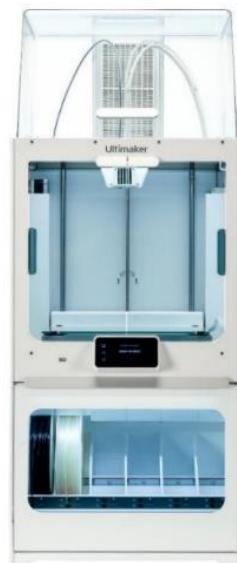


Figura 65. Impresora 3D Ultimaker S5 || Fuente: [farnell.com](https://www.farnell.com)

El diseño de las piezas se ha llevado a cabo mediante el software SolidWorks, lo que ha permitido ajustar su geometría a las necesidades del montaje, así como las dimensiones de las uniones. Se han desarrollado **cuatro modelos diferentes**, adaptados a los tipos de ensayo planteados:

- Una pieza diseñada para integrarse en el ensayo de **flexión biempotrado**, donde la pieza se sitúa en el centro de la muestra (Figura 66).

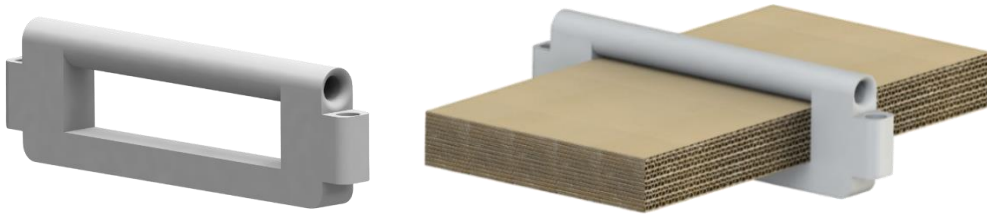


Figura 66. Pieza para el ensayo de flexión biempotrado || Fuente: Elaboración propia

La Figura 67 presenta las dimensiones generales de la pieza de sujeción diseñada para los ensayos de flexión biempotrada. Su geometría consta de una longitud total de **142 mm**, una altura de **28 mm** y un grosor de **12 mm**. La ranura central, donde se inserta la probeta de cartón, tiene una altura de **18 mm** y una longitud de **90 mm**, aunque la **zona de contacto real** con el cartón no corresponde a una superficie plana. La cara superior de dicha ranura tiene una forma cilíndrica, concentrando la carga en una línea de apoyo en lugar de una superficie plana.

En cuanto a su funcionalidad, la pieza incorpora un orificio transversal de **7 mm de diámetro** en su parte superior, diseñado para introducir un **cable** al que se acopla una **célula de carga y la carga**.

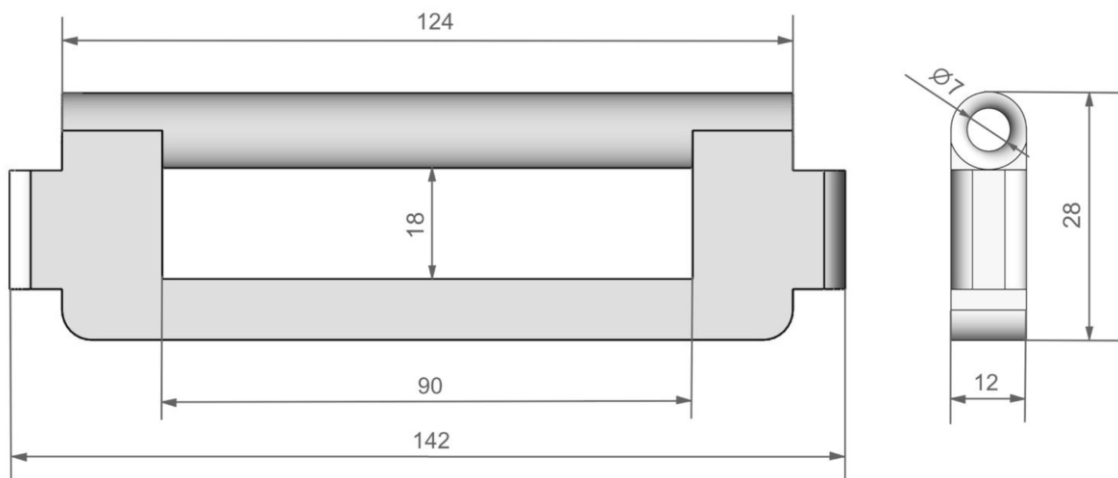


Figura 67. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión biempotrado || Fuente: Elaboración propia

Metodología

- Una segunda pieza orientada a ensayos **en configuración de voladizo**, colocada en el extremo del cartón (Figura 68).



Figura 68. Pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 1 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 69 muestra las dimensiones generales de la pieza de sujeción diseñada para ensayos de flexión en configuración de voladizo. Presenta una longitud total de **124 mm**, una altura de **28 mm** y un ancho de **32 mm**. La ranura central, que permite el alojamiento de la probeta de cartón, cuenta con una altura de **18 mm** y una longitud de **90 mm**, aunque la **zona de contacto real** concentra la carga en una línea de apoyo en lugar de una superficie plana.

Para garantizar un contacto firme durante el ensayo y evitar desplazamientos indeseados, la pieza incorpora **dos tornillos M5** en sus extremos, equipados con **tuercas**.

En la parte superior se encuentra un orificio transversal de **7 mm de diámetro**, diseñado para el paso del **cable** al que se fijará la **célula de carga** y la **carga**.

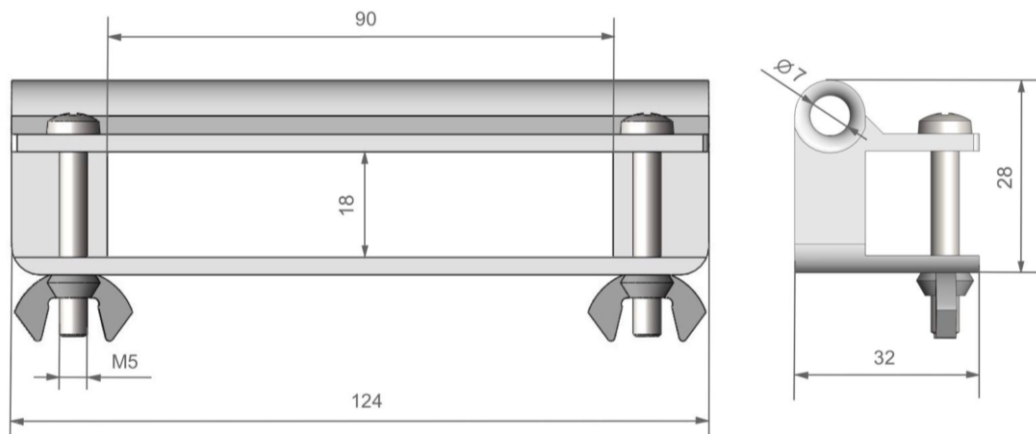


Figura 69. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 1 || **Fuente:** Elaboración propia

- Una tercera pieza también orientada a ensayos **en configuración de voladizo** y colocada en el extremo del cartón, pero para dimensiones mayores (Figura 70).

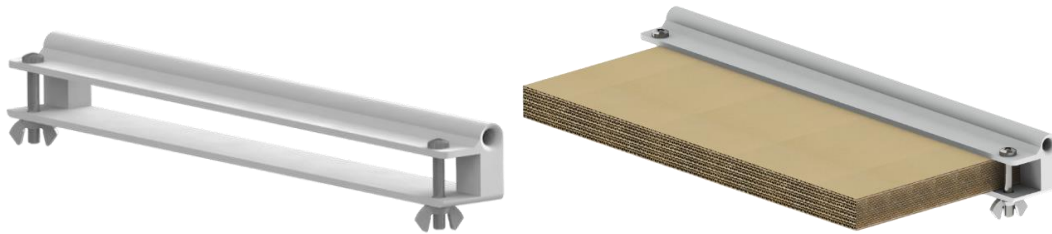


Figura 70. Pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 2 || Fuente:

Elaboración propia

La Figura 71 presenta las dimensiones generales de la pieza de sujeción diseñada para los ensayos de flexión en configuración de voladizo con probetas de mayor tamaño. Esta variante conserva la misma lógica de funcionamiento que el modelo anterior, pero con una longitud de sujeción de **270 mm** y una longitud total de **304 mm**, lo que permite adaptarse a cartones de mayor ancho. La altura interna de la ranura de inserción es de **18 mm**, mientras que el conjunto alcanza una altura de **28 mm** y un ancho de **32 mm**.

Al igual que en el modelo reducido, esta pieza incorpora **tornillos M5** con **tuercas** en sus extremos. También integra en la parte superior un orificio transversal de **7 mm de diámetro**, por donde se introduce un **cable** que conecta la **célula de carga** y la **carga**.

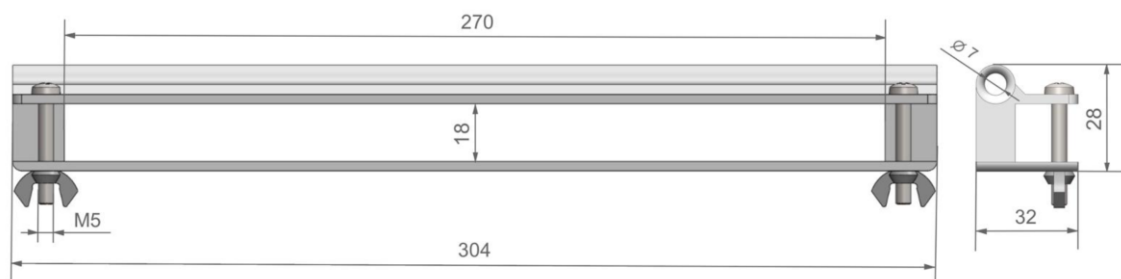


Figura 71. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 2 ||

Fuente: Elaboración propia

Metodología

- Una cuarta pieza, también destinada a ensayos **en configuración de voladizo** y colocada en el extremo del cartón, diseñada para una orientación del cartón diferente a la empleada en las piezas anteriores. (Figura 72).



Figura 72. Pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 3 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 73 muestra las dimensiones generales de la pieza de sujeción desarrollada para los ensayos de flexión en voladizo. Las dimensiones principales incluyen una longitud total de **115 mm** y un grosor total de **24 mm**, una altura interna de sujeción de **90 mm** y un ancho interno adaptado al espesor de las probetas **de 18 mm**. Al igual que los anteriores modelos, incorpora tornillos **M4** con **tuercas**, situados en los extremos. Además, en el orificio transversal de **7 mm de diámetro** se introduce el cable al que se conecta la **célula de carga** y la carga.

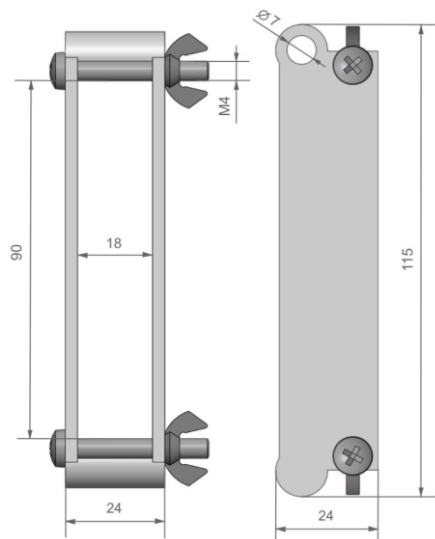


Figura 73. Dimensiones pieza para el ensayo de flexión en configuración de voladizo 3 || **Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 74 se muestra la configuración experimental diseñada para los ensayos de las **uniones tipo A-HHV y B-HHV**, que incluye tanto las uniones ensambladas como la pieza de sujeción personalizada desarrollada para aplicar la fuerza de forma controlada durante los ensayos. En este caso, se incorporará una pieza auxiliar de madera entre los extremos de cartón, que se acopla a ambas piezas horizontales para permitir una transmisión de fuerza durante el ensayo. Esta disposición reproduce un **sistema en voladizo**.

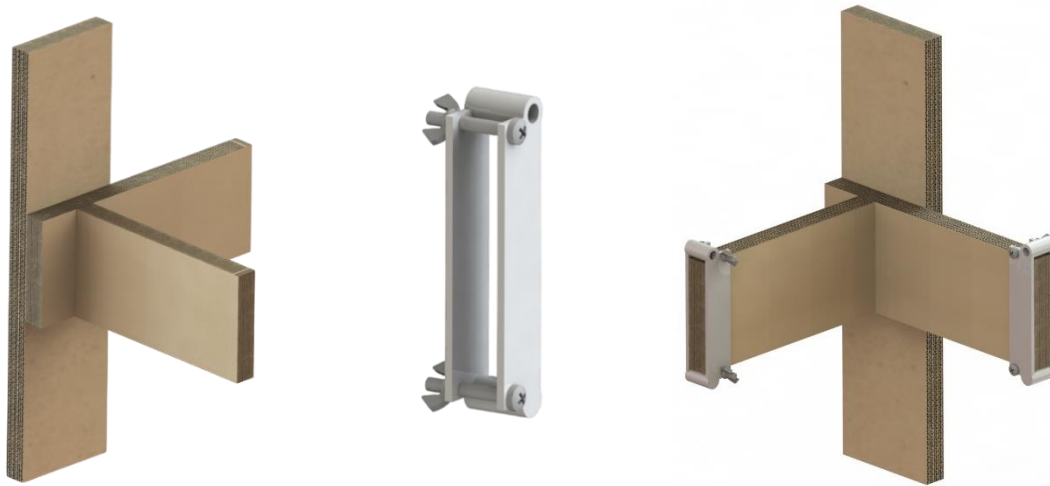


Figura 74. Configuración de los ensayos para las uniones tipo A-HHV y B-HHV || **Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 75 se muestra la configuración experimental diseñada para los ensayos de las **uniones tipo A-PH y B-PH**, que incluye tanto las uniones ensambladas como la pieza de sujeción personalizada, desarrollada para una aplicación controlada de la carga. Esta pieza se coloca en el extremo libre de la plancha de cartón y actúa como punto de aplicación de la fuerza, simulando así el comportamiento estructural de un **sistema en voladizo**.

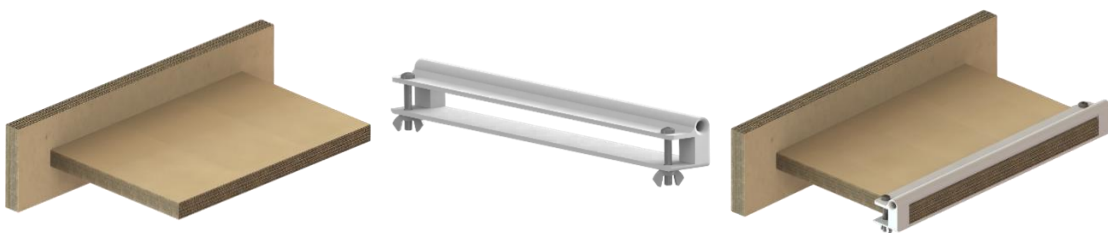


Figura 75. Configuración de los ensayos para las uniones tipo A-PH y B-PH || **Fuente:** Elaboración propia

Metodología

En la Figura 76 se presenta la configuración experimental desarrollada para ensayar las **uniones tipo A-PV y C-PV**, la cual integra tanto las uniones ensambladas como el dispositivo de sujeción diseñado para una aplicación controlada de la carga. Este elemento se fija al extremo de la plancha de cartón, permitiendo aplicar la fuerza en **voladizo**.



Figura 76. Configuración de los ensayos para las uniones tipo A-PV y C-PV || **Fuente:**
Elaboración propia

Con el fin de analizar de manera preliminar el comportamiento estructural del cartón empleado en las uniones, se han realizado ensayos específicos sobre probetas simples, diseñadas para valorar su resistencia según la dirección de la onda del cartón y el tipo de carga aplicada. Para ello se han fabricado cuatro probetas con dimensiones iguales (**90x225 mm**), y se ha establecido una nomenclatura que permite identificar las variables consideradas: **L1, T1, L2 y T2**.

Las letras **L** y **T** indican la orientación de la onda del cartón respecto a la dirección longitudinal de la probeta: en los casos **L**, la onda se dispone longitudinalmente, mientras que en los casos **T**, la onda se encuentra en disposición transversal. Por su parte, el número **1** identifica aquellas probetas sometidas a una carga en el centro, con los extremos fijados, correspondiente al **ensayo de flexión biempotrado** utilizando la **pieza para ensayo de flexión biempotrado**; mientras que el número **2** se refiere a probetas en voladizo, fijadas por un solo extremo y con la carga aplicada en el opuesto, siguiendo el **ensayo en configuración de voladizo** con la **pieza para ensayo en voladizo 1**. Esta nomenclatura se recoge en la Tabla 17.

Tabla 17. Nomenclatura de las probetas del estudio previo del cartón

Probeta	Orientación de la onda	Tipo de carga aplicada
L1	Longitudinal	Carga central
T1	Transversal	Carga central
L2	Longitudinal	Carga en voladizo
T2	Transversal	Carga en voladizo

Se compararán **L1 con T1**, para analizar la influencia de la orientación de la onda frente a una carga central, y **L2 con T2**, para observar ese mismo efecto bajo carga en voladizo. Asimismo, se compararán los pares **L1-L2** y **T1-T2**, con el objetivo de evaluar cómo varía el comportamiento estructural del cartón manteniendo la dirección de la onda constante, pero modificando el tipo de esfuerzo aplicado. Las comparaciones que se van a realizar entre las distintas configuraciones de probetas se recogen en la Tabla 18.

Tabla 18. Ensayos para la caracterización previa del cartón

Probetas comparadas	Orientación de la onda	Tipo de carga aplicada
L1/T1	Longitudinal/Transversal	Carga central
L2/T2	Longitudinal/Transversal	Carga en voladizo
L1/L2	Longitudinal	Carga central/Carga en voladizo
T1/T2	Transversal	Carga central/Carga en voladizo

Metodología

Con el objetivo de analizar el comportamiento estructural del cartón antes de ensayar las uniones, se ha realizado una representación visual para cada una de las probetas sometidas a carga. En cada caso se incluye un esquema que muestra la geometría de la muestra, el tipo de apoyo sobre el banco de trabajo y el punto donde se aplica la carga.

En todos los casos, las probetas presentan una longitud total de **225 mm**. Para las probetas **L1** y **T1**, sometidas a una configuración **biempotrada**, se ha realizado el anclaje en ambos extremos, fijando **30 mm por lado**. En cambio, en las probetas **L2** y **T2**, ensayadas en configuración en **voladizo**, se ha fijado únicamente un extremo, con una longitud de anclaje de **30 mm**. Estas condiciones de sujeción se ilustran en la Figura 77.

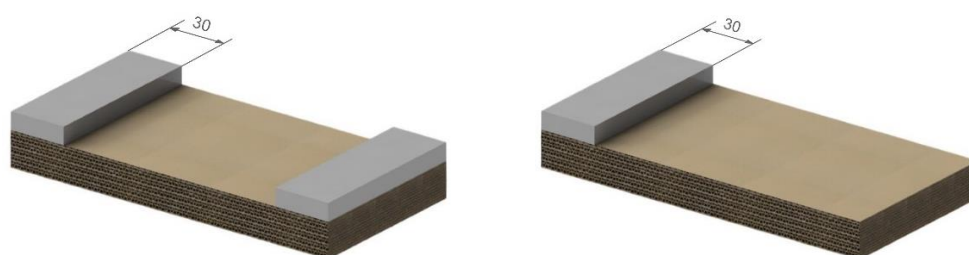


Figura 77. Sujeción probetas tipo L1/T1 y L2/T2 || Fuente: Elaboración propia

Esta información se complementa con una imagen del desarrollo del ensayo, que permite observar cómo se ha ejecutado cada prueba en condiciones reales. Todo ello se recoge en la Tabla 19 y 20.

Tabla 19. Configuración de los ensayos para L1 y T1


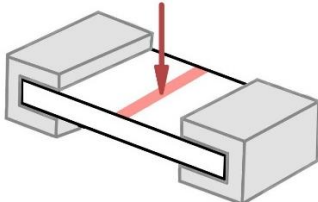
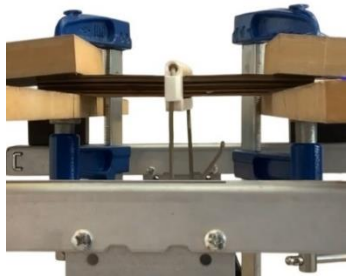

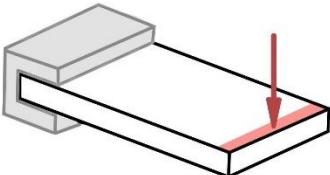

L1/T1		
Probeta	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		

Tabla 20. Configuración de los ensayos para L2 y T2

L2/T2		
Probeta	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		

Una vez caracterizado el comportamiento del cartón en estado simple, se procede al análisis de las uniones estructurales diseñadas para este estudio. Estos ensayos permiten evaluar la resistencia y el modo de fallo de cada configuración, en función tanto del tipo de unión empleada como de su geometría. Con el fin de organizar los ensayos y facilitar la identificación de las distintas configuraciones estructurales, se ha establecido un sistema de nomenclatura que combina tres componentes: **grupo de unión, subtipo geométrico y número de réplica.**

En relación al grupo de unión, el **grupo A** corresponde a uniones de **caja y espiga unidas con adhesivo**. El **grupo B** incluye uniones de **caja y espiga con una pieza en forma de cuña**. Por último, el **grupo C** representa las uniones de **caja y espiga con un pasador cilíndrico**.

En cuanto a la geometría de las uniones, se han clasificado en tres subtipos, que describen la orientación de las piezas que conforman la unión: **HHV**, que es una combinación de dos piezas horizontales y una vertical; **PH**, siendo una plancha principal unida a una pieza horizontal; **PV** una plancha principal unida a una pieza vertical.

Cada combinación de grupo y subtipo está identificada con una serie numérica (**1, 2 y 3**) que indica la **réplica de la probeta**. Se han fabricado y

Metodología

ensayado tres ejemplares de cada configuración con el objetivo de obtener resultados más representativos y reducir la influencia de posibles irregularidades del material o errores en el montaje.

En los ensayos se han comparado únicamente las probetas que comparten el mismo subtipo geométrico, pero que difieren en el tipo de unión. Así, se comparan las uniones **A** y **B** en los subtipos **HHV** y **PH**, y las uniones **A** y **C** en el subtipo **PV**.

En la Tabla 21 se recopila la nomenclatura de las diferentes probetas ensayadas, así como las combinaciones que han sido objeto de comparación.

Tabla 21. Comparación de las probetas ensayadas según tipo de unión y subtipo geométrico

Subtipo geométrico	Unión A	Unión B y C	Comparación
HHV	A-HHV-1	B-HHV-1	A/B (HHV)
	A-HHV-2	B-HHV-2	
	A-HHV-3	B-HHV-3	
PH	A-PH-1	B-PH-1	A/B (PH)
	A-PH-2	B-PH-2	
	A-PH-3	B-PH-3	
PV	A-PV-1	C-PV-1	A/C (PV)
	A-PV-2	C-PV-2	
	A-PV-3	C-PV-3	

Para analizar de forma aislada el comportamiento estructural de las uniones, se ha optado por reproducir una configuración de **voladizo** en los ensayos experimentales. Esta disposición permite aplicar una carga concentrada en un extremo de la probeta, mientras que el otro extremo se encuentra fijado, facilitando la identificación de deformaciones y modos de fallo. En todos los casos, la geometría de la zona a fijar ha sido diseñada para **maximizar el área de contacto** con el sistema de sujeción.

En el caso de las uniones tipo **A-HHV** y **B-HHV** la longitud total de la zona que integra la unión es de 360 mm. De esta longitud, se han empotrado dos tercios del total, es decir, **120 mm en cada extremo** (Figura 78).

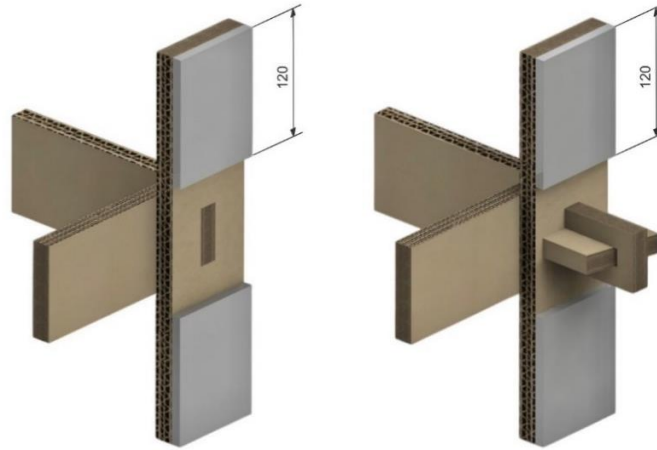


Figura 78. Sujeción uniones tipo A-HHV y B-HHV || Fuente: Elaboración propia

Por su parte, para las uniones tipo **A-PH** y **B-PH** la longitud total de 360 mm se mantiene. En este caso, se ha fijado solo un sexto de la longitud total, lo que equivale a **30 mm por lado** (Figura 79).

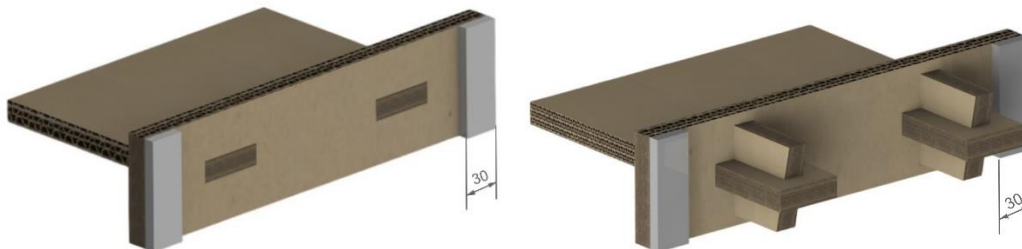


Figura 79. Sujeción uniones tipo A-PH y B-PH || Fuente: Elaboración propia

En el caso de las uniones **A-PV** y **C-PV**, se ha seguido el mismo criterio que en las uniones tipo HHV, fijando **120 mm en cada extremo** (Figura 80).

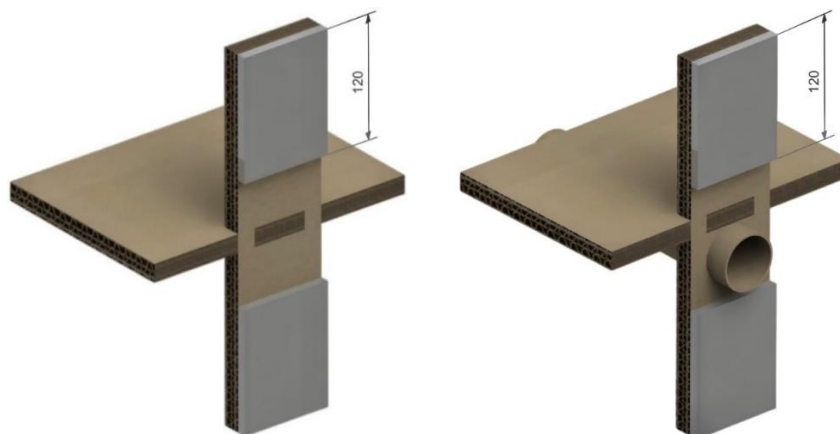


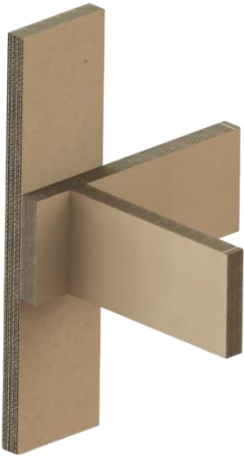
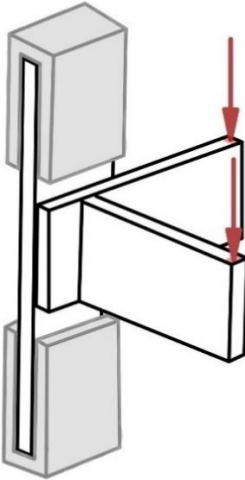

Figura 80. Sujeción uniones tipo A-PV y C-PV || Fuente: Elaboración propia

Metodología

Con el objetivo de ofrecer una comprensión más precisa de las configuraciones analizadas, se ha elaborado una descripción gráfica para cada tipo de unión ensayada. En cada caso se presenta un esquema que ilustra tanto la **geometría de la unión** como el **sistema de anclaje empleado y la aplicación de la carga**. A ello se suma una representación visual del **desarrollo del ensayo** en condiciones reales, que permite observar cómo ha sido llevada a cabo la prueba en el banco de trabajo. De este modo, las tablas siguientes reúnen la información gráfica para interpretar la disposición experimental de cada unión analizada.

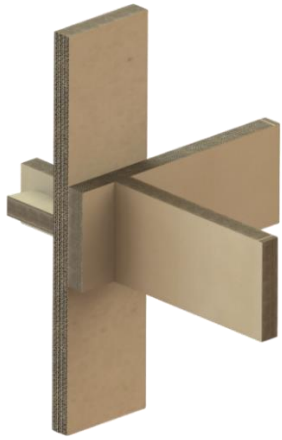
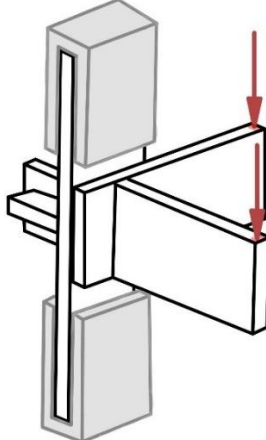

En la Tabla 22 se presenta la configuración de los ensayos correspondientes a la unión tipo **A-HHV**, donde se usa adhesivo como medio de unión, sometida a carga vertical en voladizo y anclando dos tercios de la longitud total.

Tabla 22. Configuración de los ensayos para la unión tipo A-HHV

A-HHV-1/2/3		
Unión	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		


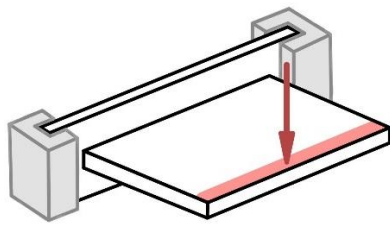

La Tabla 23 muestra la configuración de la unión **B-HHV**, que mantiene una geometría similar a la anterior, pero sustituye el adhesivo por un sistema de acoplamiento con pieza auxiliar. Es sometida a carga vertical en voladizo y se anclan dos tercios de la longitud total.

Tabla 23. Configuración de los ensayos para la unión tipo B-HHV

B-HHV-1/2/3		
Unión	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		

En la Tabla 24 se recoge la disposición de la unión **A-PH**, donde se adhiere un componente horizontal y una plancha principal, que se somete a una carga vertical en voladizo y anclando un sexto de la longitud total.


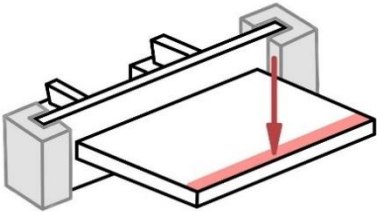

Tabla 24. Configuración de los ensayos para la unión tipo A-PH

A-PH-1/2/3		
Unión	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		

Metodología


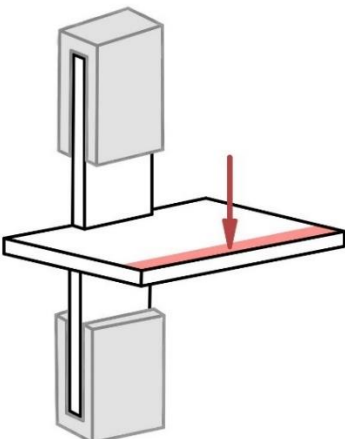

La Tabla 25 muestra la configuración de la unión **B-PH**, que mantiene una geometría similar a la anterior, pero sustituye el adhesivo por una pieza auxiliar de encaje, y es sometida a carga vertical en voladizo con un sexto de la longitud total anclada.

Tabla 25. Configuración de los ensayos para la unión tipo B-PH

B-PH-1/2/3		
Unión	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		

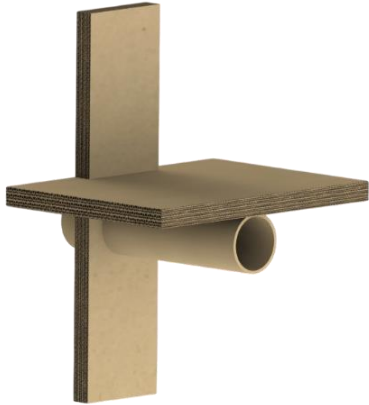
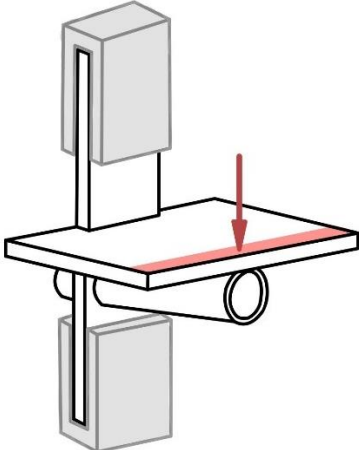
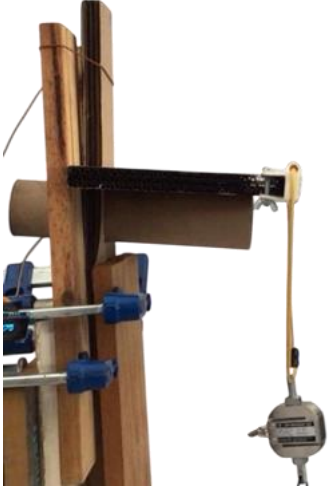
La Tabla 26 presenta la unión **A-PV**, cuya configuración se basa en uniones adhesivas de una pieza vertical y una plancha, donde se le aplica una carga vertical en voladizo con dos tercios de la longitud total anclados.

Tabla 26. Configuración de los ensayos para la unión tipo A-PV

A-PV-1/2/3		
Unión	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		

Finalmente, en la Tabla 27 se ilustra la unión **C-PV**, con una geometría similar a la anterior pero que incorpora un pasador cilíndrico como elemento de refuerzo, y es sometida a una carga vertical con dos tercios de la longitud total anclados.

Tabla 27. Configuración de los ensayos para la unión tipo C-PV

C-PV-1/2/3		
Unión	Esquema de anclaje y carga	Configuración del ensayo
		

A partir de los ensayos experimentales realizados, se han obtenido dos fuentes principales de datos. En primer lugar, un archivo en formato **Excel** (Figura 81) que contiene el registro temporal de la fuerza aplicada, permitiendo representar gráficamente la evolución de la carga durante el ensayo mediante curvas fuerza-tiempo.

Metodología

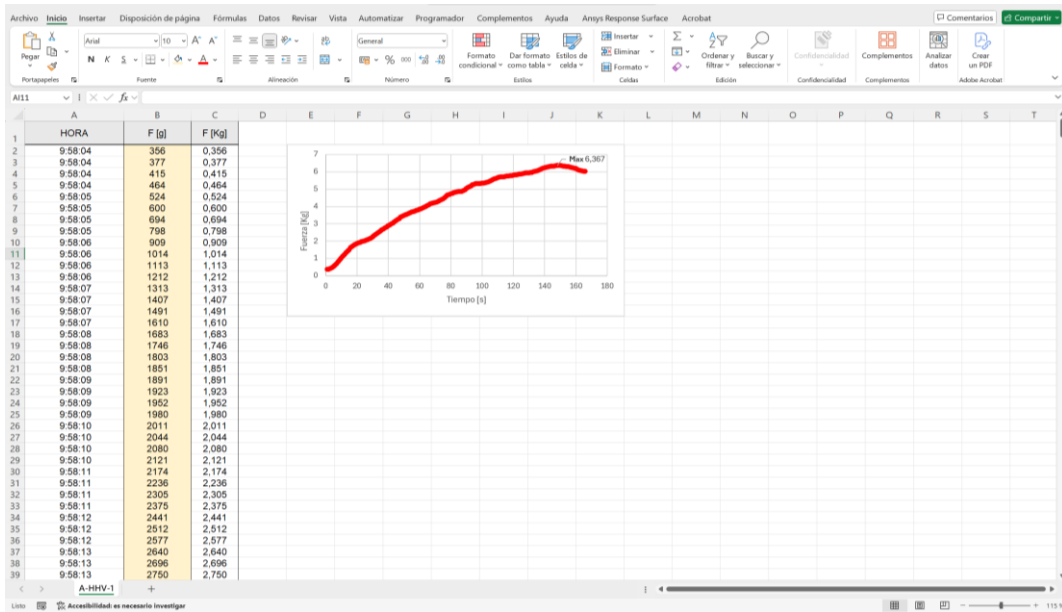


Figura 81. Registro en Excel de los datos obtenidos en los ensayos || Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se dispone de una grabación en vídeo de cada ensayo, que ha sido analizada utilizando el software Tracker (Figura 82), una herramienta de análisis de movimiento basada en vídeo. En este caso, el programa se ha empleado para determinar la flecha máxima de la probeta, previamente calibrado con una escala de referencia.

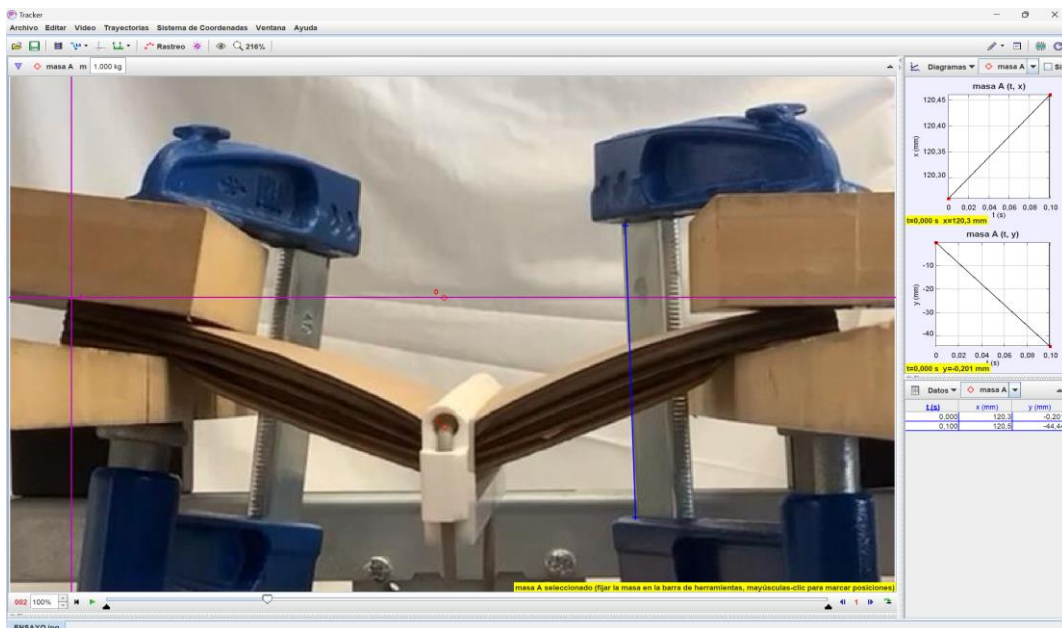


Figura 82. Software Tracker para la medición del desplazamiento || Fuente: Elaboración propia

Como aclaración importante respecto a las gráficas obtenidas, debe señalarse que estas no presentan un comportamiento lineal continuo, sino que muestran una **evolución escalonada de la fuerza aplicada**. Este fenómeno puede explicarse por dos factores principales que deben considerarse en la interpretación de los resultados.

Por un lado, **la aplicación de la carga se ha realizado de forma manual**, lo que implica que el incremento de la fuerza no ha sido completamente continuo ni uniforme en el tiempo. En consecuencia, la gráfica refleja estos incrementos puntuales como tramos horizontales seguidos de ascensos abruptos, en lugar de una pendiente continua. Por otro lado, la **estructura interna del cartón corrugado** también influye. Este material, al estar formado por capas exteriores y una onda central, presenta una respuesta no lineal frente a los esfuerzos. En las primeras fases del ensayo, la onda puede absorber pequeñas cargas mediante deformaciones locales sin que se produzca una deformación apreciable en el conjunto, lo que genera tramos planos. Y solo cuando se supera un umbral de carga, el cartón responde de forma global, generando un salto repentino en la curva.

Asimismo, en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**, y a partir de los valores obtenidos de **fuerza máxima, flecha máxima** y las **dimensiones geométricas** de las probetas (longitud, ancho y espesor), se desarrollan los cálculos necesarios para la caracterización mecánica de las uniones. Se determina el **momento flector máximo** aplicado sobre cada muestra, se calcula el **momento de inercia** de la sección transversal y la **tensión máxima de flexión**.

RESULTADOS

4

4.1. Ensayos de caracterización mecánica del cartón

4.1.1. Probeta L1

4.1.1.1. Gráfica fuerza-tiempo

Se ha llevado a cabo un ensayo de flexión en configuración biempotrada sobre la probeta L1 (Figura 83), con la dirección de la onda orientada longitudinalmente.

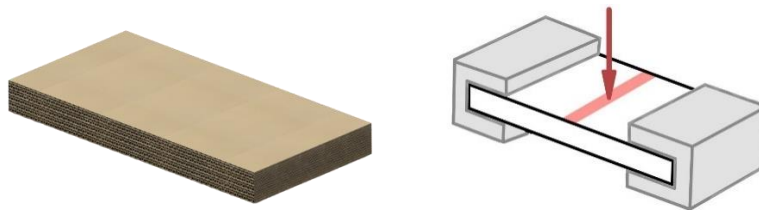


Figura 83. Probeta L1 || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 84 se muestra la probeta L1 en su estado inicial, correspondiente al **inicio del ensayo experimental**.

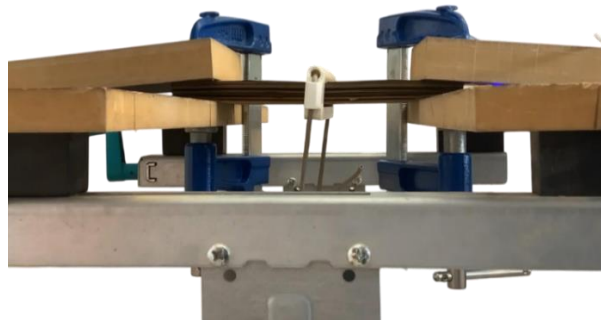


Figura 84. Probeta L1 antes del ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

La Figura 85 recoge el estado final de la probeta L1 **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian tanto las deformaciones acumuladas como el modo de fallo característico de la configuración.

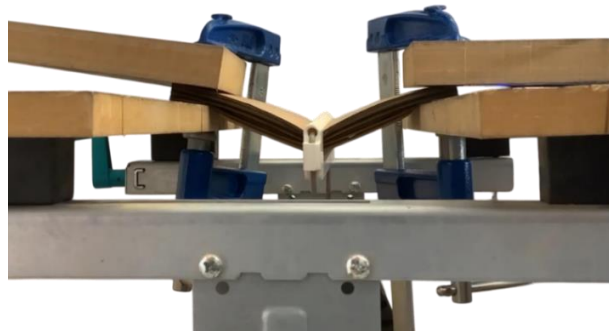


Figura 85. Probeta L1 tras el ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 86 se muestra la gráfica fuerza-tiempo correspondiente a la probeta L1. La curva presenta una pendiente ascendente constante hasta alcanzar una **carga máxima de 17,883 kg**, momento a partir del cual se inicia un descenso progresivo de la fuerza. Antes del valor pico, se aprecia una zona de aumento más lento de la carga, indicando una fase de deformación plástica. La pérdida de capacidad portante posterior sugiere un fallo gradual del material sin una rotura súbita.

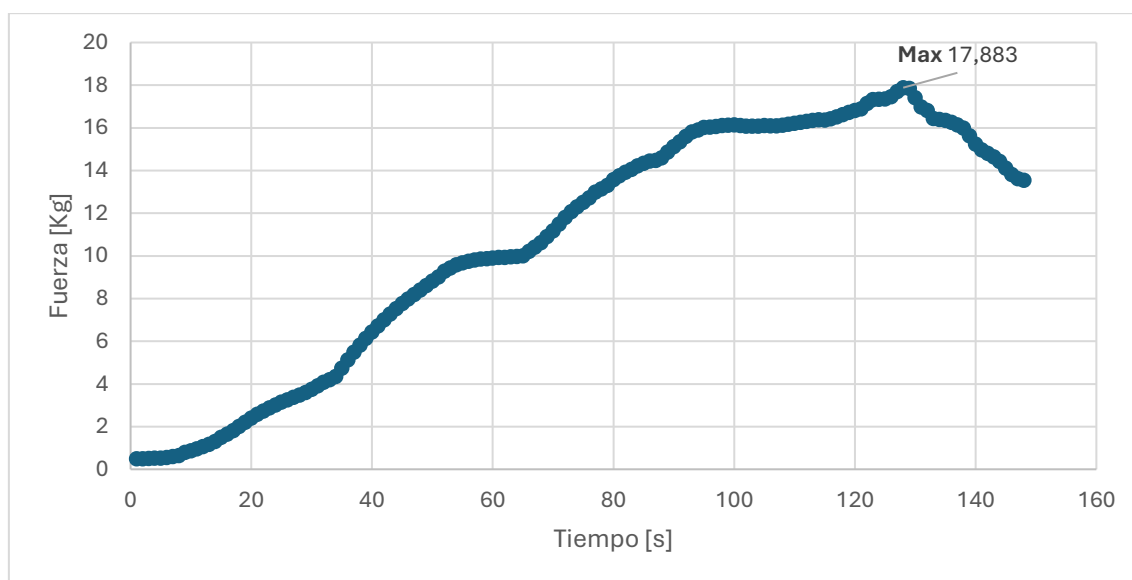


Figura 86. Gráfica fuerza-tiempo L1 || Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2. Resultado del desplazamiento máximo

La probeta L1 presentó un comportamiento progresivo de deformación, alcanzando un **desplazamiento máximo de 37 mm** antes de producirse el fallo. El desplazamiento máximo se registró en el momento en que se alcanzó una **fuerza máxima de 17,883 kg**, tras **129 segundos de aplicación de carga**. Esta combinación de parámetros sugiere un comportamiento estructural estable durante la primera fase del ensayo, seguido de un colapso gradual. El tipo de fallo ha sido clasificado como **deflexión excesiva**, caracterizado por una pérdida de rigidez progresiva sin separación completa de las capas constitutivas. Estos valores se recogen en la Tabla 28.

Tabla 28. Resultados del desplazamiento máximo L1

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
L1	37	17,883	129	Deflexión excesiva

En la Figura 87 se presenta la probeta tras haber sido sometida al ensayo.



Figura 87. Probeta L1 tras el ensayo de flexión || Fuente: Elaboración propia

La Tabla 29 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para la probeta L1. En ella se presenta la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 29. Parámetros calculados para L1

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
L1	175,432	3618,24	43740	0,744

Resultados

4.1.2. Probeta L2

4.1.2.1. Gráfica fuerza-tiempo

Se ha llevado a cabo un ensayo de flexión en configuración voladizo sobre la probeta L2 (Figura 88), con la dirección de la onda orientada longitudinalmente.

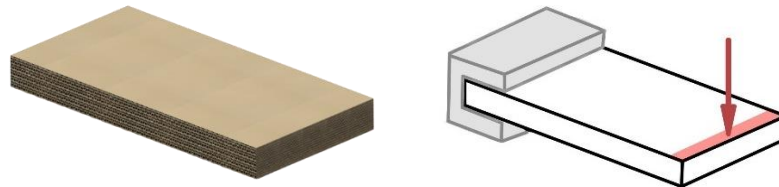


Figura 88. Probeta L2 || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 89 se muestra la probeta L2 en su estado inicial, correspondiente al **inicio del ensayo experimental**.



Figura 89. Probeta L2 antes del ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

La Figura 90 recoge el estado final de la probeta L2 **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian tanto las deformaciones acumuladas como el modo de fallo característico de la configuración.



Figura 90. Probeta L2 tras el ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 91 se representa la gráfica fuerza-tiempo de la probeta L2. La evolución de la fuerza muestra un incremento continuo hasta alcanzar una **carga máxima de 1,980 kg**, tras la cual se observa una disminución progresiva de la resistencia. A lo largo de la curva se distingue una transición gradual entre el aumento inicial y la estabilización previa al pico, lo que sugiere un comportamiento dúctil moderado. La caída posterior de la carga indica un fallo progresivo del material, sin evidencia de colapso brusco.

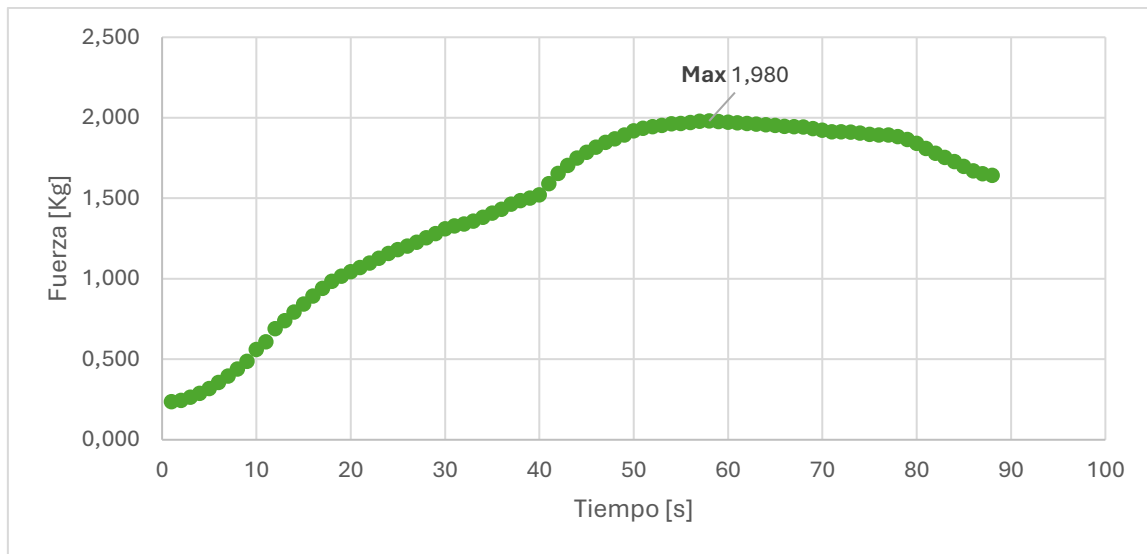


Figura 91. Gráfica fuerza-tiempo L2 || **Fuente:** Elaboración propia

4.1.2.2. Resultado del desplazamiento máximo

La probeta L2 alcanzó un desplazamiento máximo de **158 mm**, indicando una elevada capacidad de deformación antes del fallo. La **fuerza máxima registrada** fue de **1,980 kg**, mientras que el **tiempo al fallo** fue de **59 segundos**. El tipo de fallo identificado corresponde a una **deflexión excesiva**, evidenciando la pérdida de rigidez del conjunto una vez superado el umbral de resistencia. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultados del desplazamiento máximo L2

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
L2	158	1,980	59	Deflexión excesiva

Resultados

En la Figura 92 se presenta la probeta tras haber sido sometida al ensayo.



Figura 92. Probeta L2 tras el ensayo de flexión || **Fuente:** Elaboración propia

La Tabla 31 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para la probeta L2. En ella se presenta la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 31. Parámetros calculados para L2

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm⁴]	Tensión máx. [MPa]
L2	19,424	3787,68	43740	0,779

4.1.3. Probeta T1

4.1.3.1. Gráficas fuerza-tiempo

Se ha llevado a cabo un ensayo de flexión en configuración biempotrado sobre la probeta T1 (Figura 93), con la dirección de la onda orientada transversalmente.

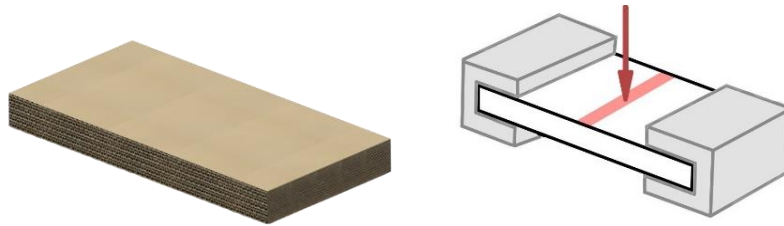


Figura 93. Probeta T1 || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 94 se muestra la probeta T1 en su estado inicial, correspondiente al **inicio del ensayo experimental**.

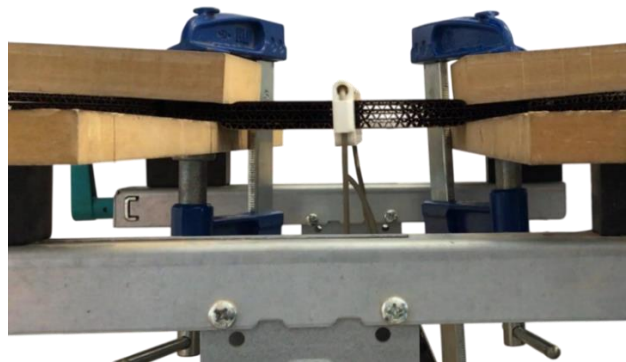


Figura 94. Probeta T1 antes del ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

La Figura 95 recoge el estado final de la probeta T1 **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian tanto las deformaciones acumuladas como el modo de fallo característico de la configuración.



Figura 95. Probeta T1 tras el ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 96 se presenta la gráfica fuerza-tiempo obtenida para la probeta T1. La curva muestra una subida continua de la carga hasta alcanzar un máximo de **9,699 kg**, seguido por un descenso progresivo. Se distingue una fase inicial con pendiente pronunciada, que posteriormente se reduce conforme el material comienza a deformarse. La pérdida progresiva de capacidad de carga tras el pico sugiere un modo de fallo gradual, característico de un comportamiento más flexible respecto a la configuración longitudinal.

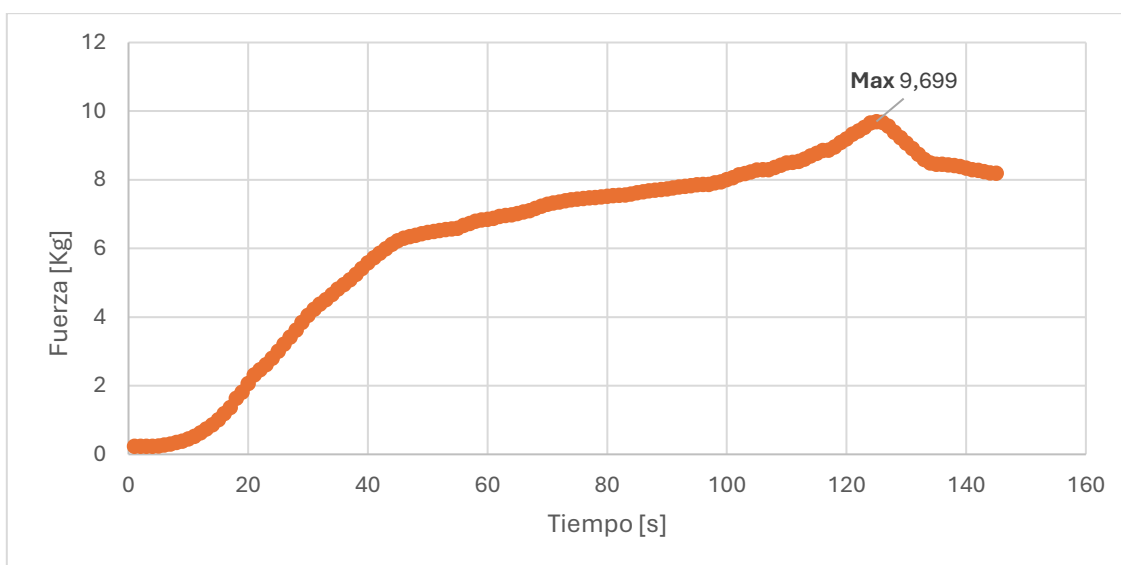


Figura 96. Gráfica fuerza-tiempo T1 || **Fuente:** Elaboración propia

4.1.3.2. Resultado del desplazamiento máximo

La probeta T1 experimentó un desplazamiento máximo de **49 mm** antes de alcanzar su límite de resistencia. La fuerza máxima registrada fue de **9,699 kg**. El fallo estructural se produjo tras **126 segundos** de sollicitación. El modo de fallo observado correspondió a una deflexión excesiva, reflejando una pérdida progresiva de rigidez en la estructura. Estos resultados se recogen en la Tabla 32.

Tabla 32. Resultados del desplazamiento máximo T1

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
T1	49	9,699	126	Deflexión excesiva

En la Figura 97 se presenta la probeta tras haber sido sometida al ensayo.



Figura 97. Probeta T1 tras el ensayo de flexión || Fuente: Elaboración propia

La Tabla 33 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para la probeta T1. En ella se presenta la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 33. Parámetros calculados para T1

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
T1	95,147	1962,41	43740	0,404

Resultados

4.1.4. Probeta T2

4.1.4.1. Gráfica fuerza-tiempo

Se ha llevado a cabo un ensayo de flexión en configuración voladizo sobre la probeta T2 (Figura 98), con la dirección de la onda orientada transversalmente.

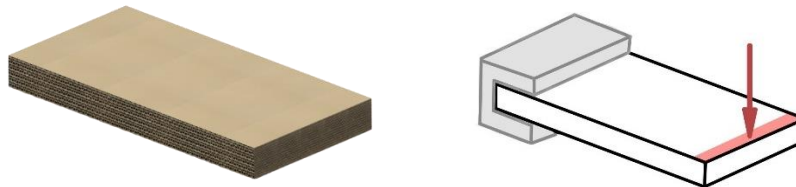


Figura 98. Probeta T2 || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 99 se muestra la probeta T2 en su estado inicial, correspondiente al **inicio del ensayo experimental**.



Figura 99. Probeta T2 antes del ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

La Figura 100 recoge el estado final de la probeta T2 **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian tanto las deformaciones acumuladas como el modo de fallo característico de la configuración.



Figura 100. Probeta T2 tras el ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 101 se muestra la gráfica fuerza-tiempo correspondiente a la probeta T2. La curva refleja una evolución ascendente de la fuerza a lo largo del tiempo, alcanzando un valor máximo de **1,440 kg** antes de experimentar un descenso. Este comportamiento sugiere una respuesta progresiva del material frente a la carga, sin evidencias de rotura abrupta ni colapso inmediato. La transición hacia el pico de carga se produce de forma sostenida, lo que indica cierta capacidad del material para redistribuir esfuerzos antes de ceder.

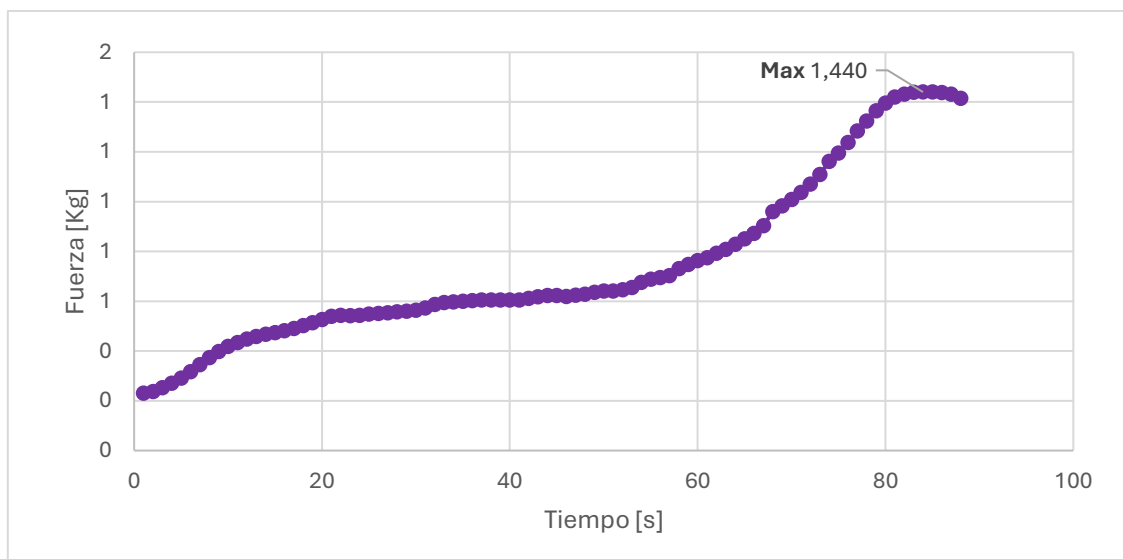


Figura 101. Gráfica fuerza-tiempo T2 || Fuente: Elaboración propia

4.1.4.2. Resultado del desplazamiento máximo

La probeta T2 alcanzó un desplazamiento máximo de **196 mm** durante el ensayo, lo que refleja una notable capacidad de deformación. La fuerza máxima registrada fue de **1,440 kg**, tras lo cual se produjo el fallo estructural. Esto se evidenció a los **85 segundos** del ensayo, momento en que la probeta presentó una deflexión excesiva como modo de fallo predominante. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34. Resultados del desplazamiento máximo T2

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
T2	196	1,440	85	Deflexión excesiva

Resultados

En la Figura 102 se presenta la probeta tras haber sido sometida al ensayo.



Figura 102. Probeta T2 tras el ensayo de flexión || **Fuente:** Elaboración propia

La Tabla 35 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para la probeta T2. En ella se presenta la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 35. Parámetros calculados para T2

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm⁴]	Tensión máx. [MPa]
T2	14,126	2754,57	43740	0,567

4.1.5. Comparativa entre L1 y T1

En la Figura 103 se representa la configuración de las probetas **L1** y **T1** sometidas a un **ensayo de flexión biempotrado** para evaluar la influencia de la orientación de la onda en su comportamiento estructural.

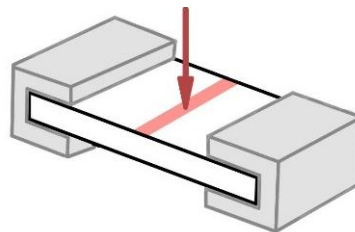


Figura 103. Configuración ensayo de flexión biempotrado || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 104 se comparan las curvas fuerza-tiempo de las probetas **L1** y **T1**, en el que la carga se aplica en el centro de la probeta. La diferencia entre ambas radica en la **orientación de la onda del cartón**: longitudinal en L1 y transversal en T1. Esta comparación permite analizar cómo influye la disposición estructural del material en su comportamiento mecánico, manteniendo constante la configuración del ensayo. Al tratarse del mismo tipo de sollicitación, cualquier variación en la respuesta se atribuye a la dirección interna de la onda.

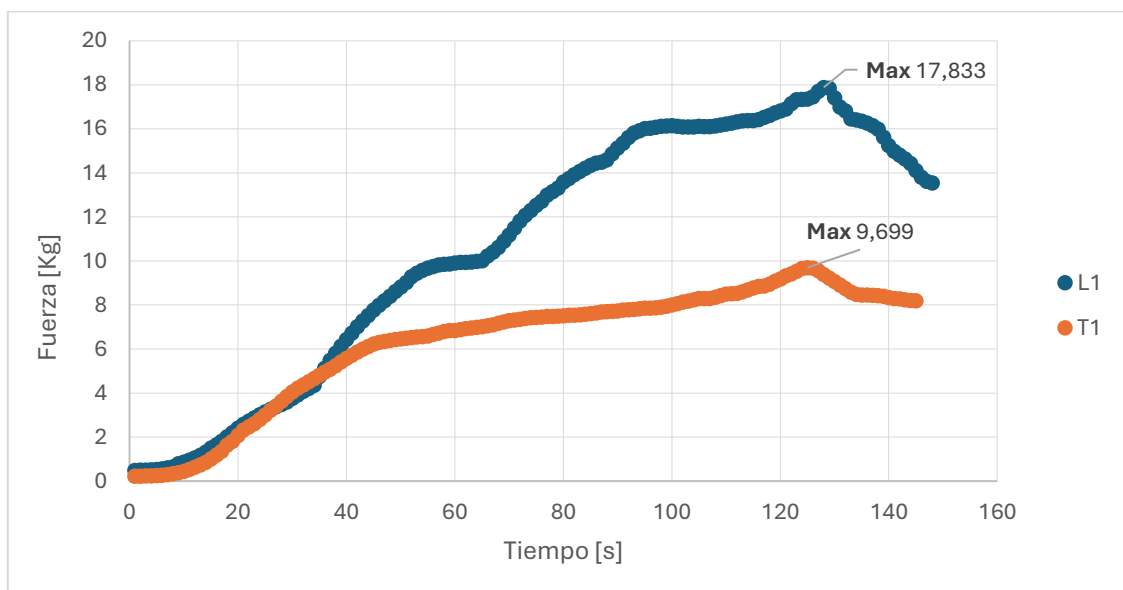


Figura 104. Gráfica comparativa fuerza-tiempo L1 y T1 || Fuente: Elaboración propia

Resultados

La curva correspondiente a la probeta **L1** muestra una progresión constante de la fuerza hasta alcanzar un valor máximo de **17,833 kg**, seguido de una disminución sostenida que indica el inicio del fallo. En cambio, **T1** alcanza una carga máxima de **9,699 kg**, evidenciando una resistencia significativamente menor. La evolución de ambas curvas refleja una respuesta estable del material, aunque con pendientes y niveles de carga distintos. Esta diferencia confirma el papel determinante que juega la orientación de la onda en la **resistencia a flexión**, siendo más favorable la disposición longitudinal en este tipo de ensayo.

La Tabla 36 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para las probetas L1 y T1. En ella se presentan, para cada probeta, la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 36. Parámetros calculados para L1 y T1

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
L1	175,432	3618,24	43740	0,744
T1	95,147	1962,41	43740	0,404

Se observa que la tensión máxima de L1 es aproximadamente el doble que la registrada en T1, lo cual sugiere una **mayor resistencia mecánica del cartón cuando la carga se aplica en la dirección longitudinal de la onda**, en comparación con la orientación transversal.

4.1.6. Comparativa entre L2 y T2

En la Figura 105 se representa la configuración de las probetas **L2** y **T2** sometidas a un **ensayo de flexión en voladizo** para evaluar la influencia de la orientación de la onda en su comportamiento estructural.

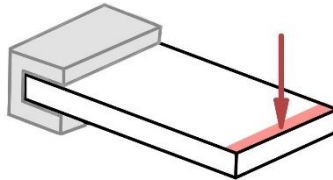


Figura 105. Configuración ensayo de flexión en voladizo || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 106 se representan las curvas fuerza-tiempo de las probetas **L2** y **T2**, en la que un extremo permanece fijado mientras la carga se aplica en el opuesto. La principal diferencia entre ambas radica en la **orientación de la onda del cartón**: longitudinal en el caso de **L2** y transversal en **T2**. Esta comparación permite examinar la influencia de la estructura interna del material cuando se encuentra sometido a una carga excéntrica, manteniendo constante la configuración del ensayo.

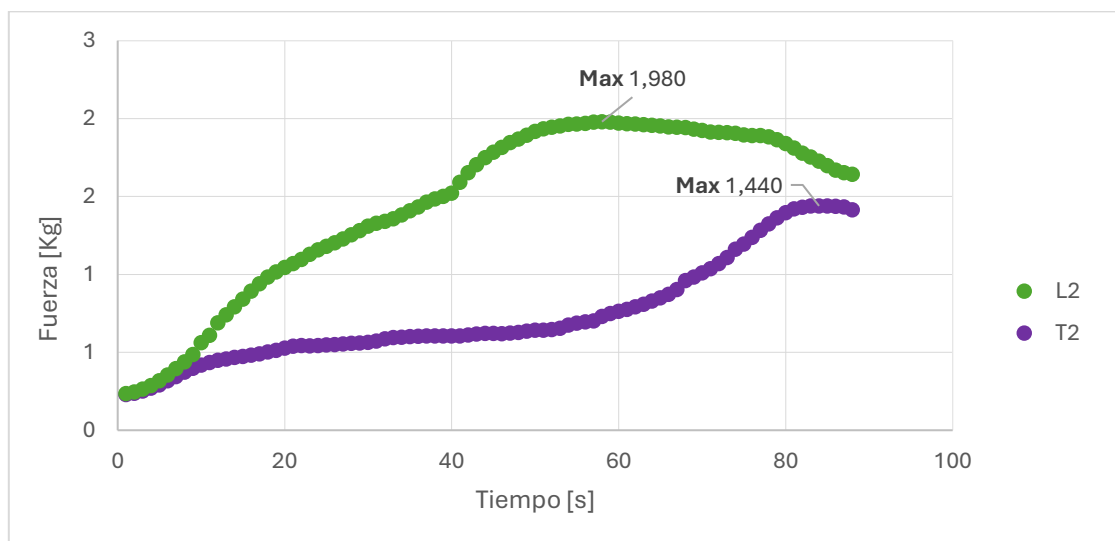


Figura 106. Gráfica comparativa fuerza-tiempo L2 y T2 || Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la probeta **L2** alcanza una carga máxima de **1,980 kg**, mientras que **T2** llega a **1,440 kg**. En ambos casos, la evolución de la

Resultados

fuerza presenta un crecimiento progresivo, aunque con distinta pendiente y capacidad resistente. En la probeta **L2**, la pendiente de la curva se mantiene prácticamente constante debido a que la carga se aplica **perpendicular a la dirección de la onda**, lo que favorece una **distribución más uniforme de las tensiones**, retrasando la aparición de puntos críticos de fallo y otorgando al material una respuesta más estable. En cambio, en la probeta **T2**, la carga se introduce **alineada con el espacio entre ondas**, lo que genera una transmisión de esfuerzos discontinua y concentraciones de tensión localizadas. Por ello, la pérdida de capacidad portante se produce de manera más **abrupta**, reflejando un comportamiento menos estable que en la orientación longitudinal. La respuesta observada en L2 confirma que la orientación longitudinal de la onda confiere al material una mayor rigidez estructural frente a este tipo de sollicitación, en comparación con la orientación transversal.

La Tabla 37 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para las probetas L2 y T2. En ella se presentan, para cada probeta, la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 37. Parámetros calculados para L2 y T2

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
L2	19,424	3787,68	43740	0,779
T2	14,126	2754,57	43740	0,567

Se observa que la tensión máxima de L2 es mayor que la registrada en T2, lo cual sugiere una **mayor resistencia mecánica del cartón cuando la carga se aplica en la dirección longitudinal de la onda**, en comparación con la orientación transversal.

4.1.7. Comparativa entre L1 y L2

La Figura 107a muestra la probeta L1 ensayada en **flexión biempotrada** y la Figura 107b la probeta L2 en **configuración de voladizo**, permitiendo evaluar la influencia del modo de aplicación de la carga sobre la respuesta estructural del cartón.

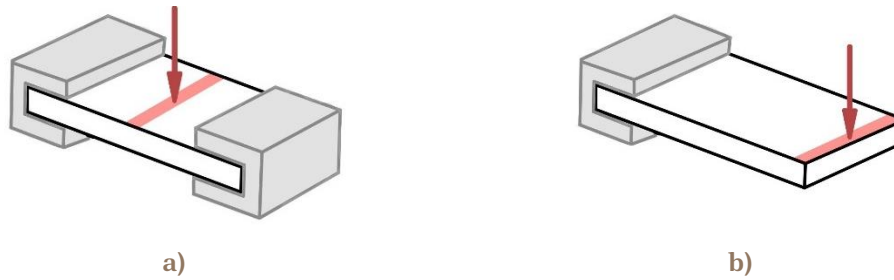


Figura 107. Configuración ensayo de flexión a) biempotrado, b) en voladizo || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 108 se muestran las curvas fuerza-tiempo correspondientes a las probetas L1 y L2, ambas con la onda del cartón orientada en **sentido longitudinal**. La diferencia entre ellas se encuentra en el tipo de ensayo: L1 ha sido sometida a flexión con la **carga aplicada en el centro y en configuración biempotrada**, mientras que L2 se ha ensayado en voladizo, aplicando la **carga en el extremo libre**.

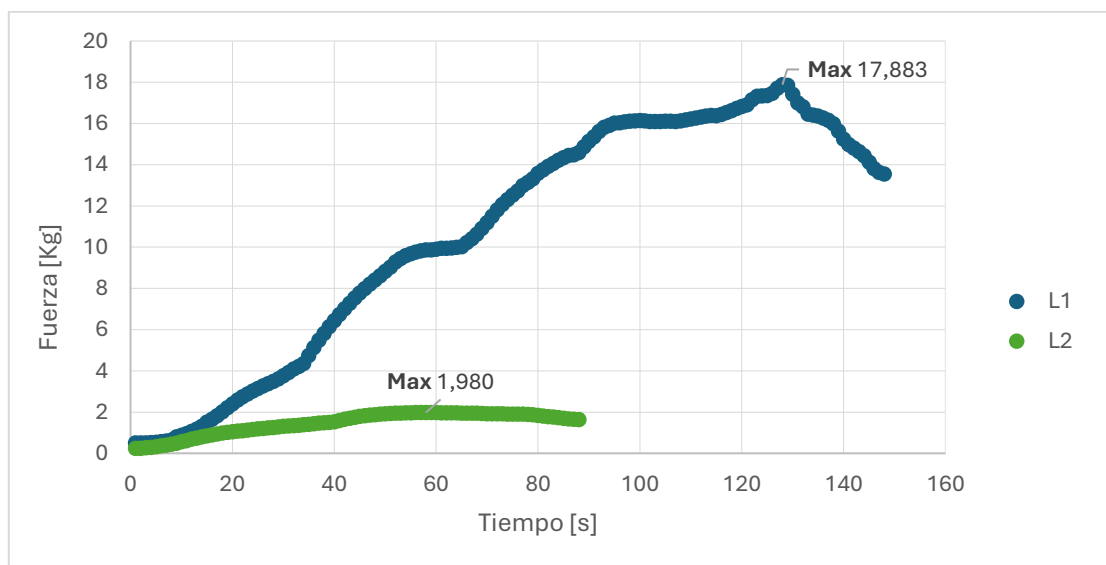


Figura 108. Gráfica comparativa fuerza-tiempo L1 y L2 || Fuente: Elaboración propia

Resultados

Se observa que la probeta L1 alcanza una carga máxima de **17,883 kg**, frente a los **1,980 kg** registrados por L2. La pendiente de la curva de L1 es también considerablemente mayor, lo que indica una respuesta más rígida y una mayor capacidad resistente. Estos resultados evidencian que, para una misma orientación de la onda, el cartón ofrece un **mejor comportamiento mecánico cuando la carga se aplica en el centro** del tramo que cuando se aplica de forma excéntrica y en voladizo.

La Tabla 38 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para las probetas L1 y L2. En ella se presentan, para cada probeta, la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 38. Parámetros calculados para L1 y L2

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
L1	175,432	3618,24	43740	0,744
L2	19,424	3787,68	43740	0,779

Se observa que la tensión máxima de L2 es mayor que la registrada en L1, lo cual sugiere que manteniendo constante la dirección de la onda, la **disposición de la carga influye en el comportamiento tensional del material**. En particular, la **configuración en voladizo resulta más exigente** para el material.

4.1.8. Comparativa entre T1 y T2

La Figura 109a muestra la probeta T1 ensayada en **flexión biempotrada** y la Figura 109b la probeta T2 en **configuración de voladizo**, permitiendo evaluar la influencia del modo de aplicación de la carga sobre la respuesta estructural del cartón.

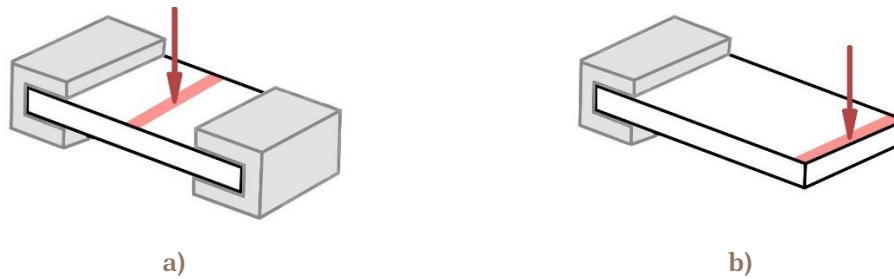


Figura 109. Configuración ensayo de flexión a) biempotrado, b) en voladizo || Fuente: Elaboración propia

La Figura 110 muestra las curvas fuerza-tiempo correspondientes a las probetas T1 y T2, ambas con la onda orientada en dirección transversal. La probeta T1 fue ensayada aplicando una **carga en el centro en configuración biempotrada**, mientras que T2 se evaluó en configuración de **voladizo**.

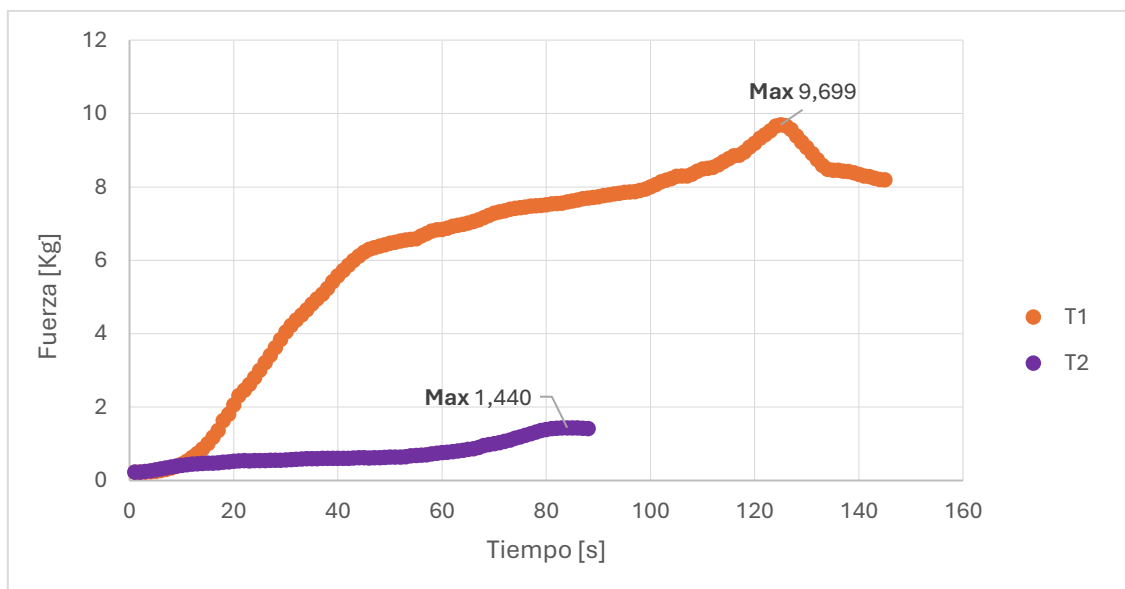


Figura 110. Gráfica comparativa fuerza-tiempo T1 y T2 || Fuente: Elaboración propia

Resultados

Los datos obtenidos reflejan una diferencia significativa en la capacidad de carga entre ambas configuraciones. La probeta T1 alcanza una carga máxima de **9,699 kg**, mientras que T2 registra un valor de **1,440 kg**. Asimismo, la pendiente de la curva de T1 es mayor, indicando una respuesta más rígida ante la sollicitación aplicada. Esta comparación permite observar que, para una misma orientación de la onda, **la aplicación de la carga en el centro resulta en una mayor resistencia**, en comparación con la carga en un extremo.

La Tabla 39 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión para las probetas T1 y T2. En ella se presentan, para cada probeta, la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección, y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 39. Parámetros calculados para T1 y T2

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
T1	95,147	1962,41	43740	0,404
T2	14,126	2754,57	43740	0,567

Se observa que la tensión máxima de T2 es mayor que la registrada en T1, lo cual sugiere que, en el caso de la orientación transversal, la **configuración en voladizo resulta más exigente** para el material.

4.2. Ensayos de caracterización mecánica de las uniones A/B (HHV)

4.2.1. Unión A-HHV-1/2/3

4.2.1.1. Gráficas fuerza-tiempo

Se han realizado tres ensayos de flexión sobre la unión A-HHV (Figura 111), compuesta por elementos unidos mediante un adhesivo.

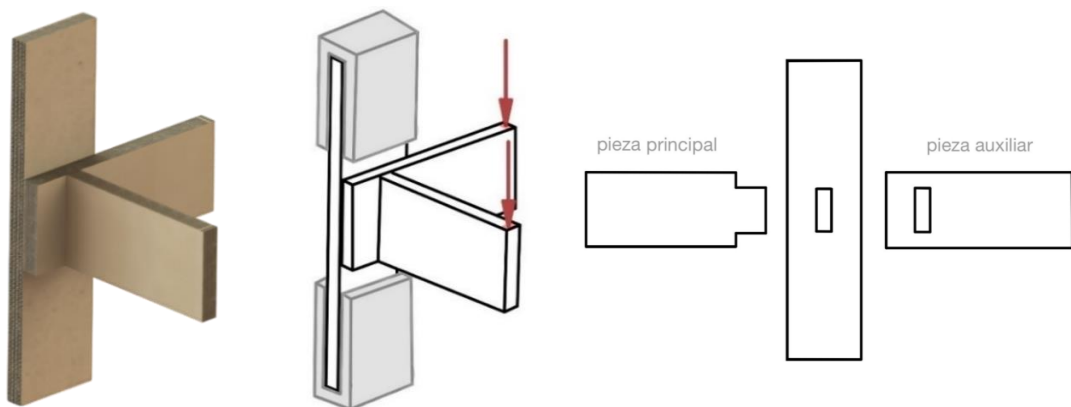


Figura 111. Unión tipo A-HHV || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 112a se muestra la probeta A-HHV en su estado inicial, **antes de la aplicación de carga**, mientras que en la Figura 112b se presenta su estado final **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian las deformaciones generadas y el modo de fallo característico de la configuración analizada.



Figura 112. Probeta A-HHV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental || Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 113 correspondiente a la unión **A-HHV-1** se alcanzó una fuerza máxima de **6,367 kg**.

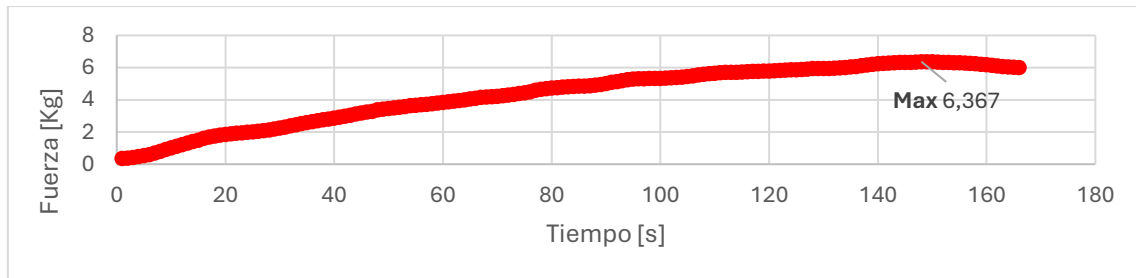


Figura 113. Gráfica fuerza-tiempo unión A-HHV-1 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 114 muestra que **A-HHV-2** obtuvo el mayor valor, con **6,415 kg**.

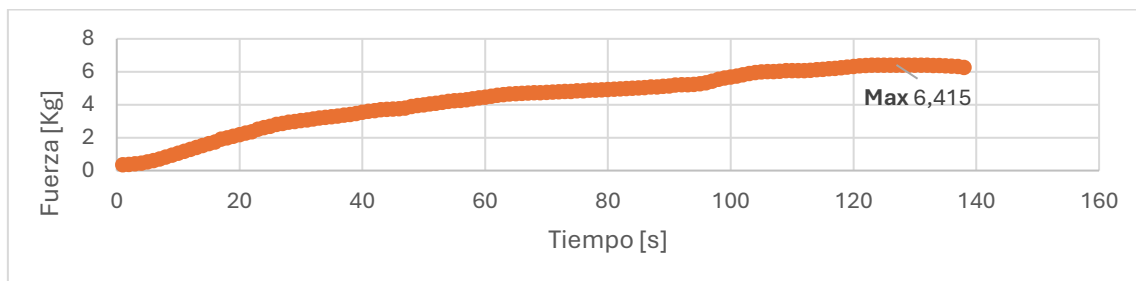


Figura 114. Gráfica fuerza-tiempo unión A-HHV-2 || **Fuente:** Elaboración propia

Por su parte, la Figura 115 indica que **A-HHV-3** alcanzó una fuerza máxima de **5,136 kg**.

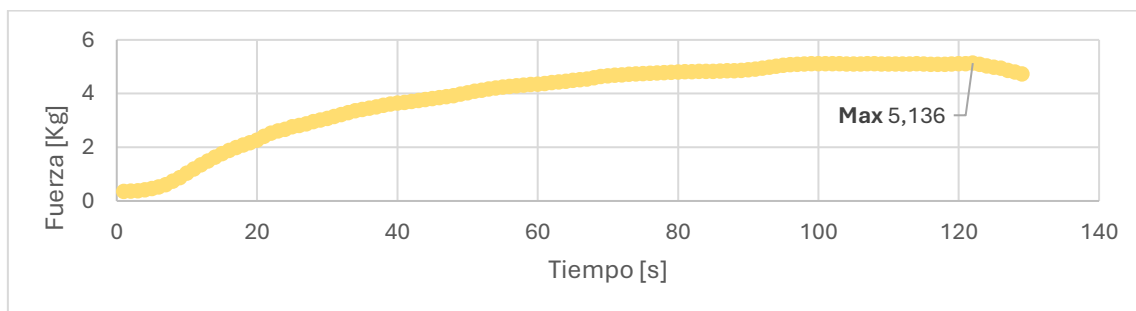


Figura 115. Gráfica fuerza-tiempo unión A-HHV-3 || **Fuente:** Elaboración propia

En los tres casos se observa un incremento progresivo de la fuerza hasta un punto máximo, seguido de un descenso que marca el fallo de la unión.

La Figura 116 compara las curvas de fuerza-tiempo de los tres ensayos realizados sobre la unión A-HHV. Las tres muestras presentan un comportamiento similar en la fase inicial, con un aumento progresivo de la fuerza, siendo en el momento de la rotura donde se producen las mayores

variaciones. La curva de A-HHV-3 muestra un descenso más prematuro y pronunciado, lo que sugiere un fallo más frágil. En cambio, A-HHV-1 y A-HHV-2 presentan una mayor estabilidad antes de la rotura, lo que podría indicar una mejor capacidad de deformación o redistribución de esfuerzos.

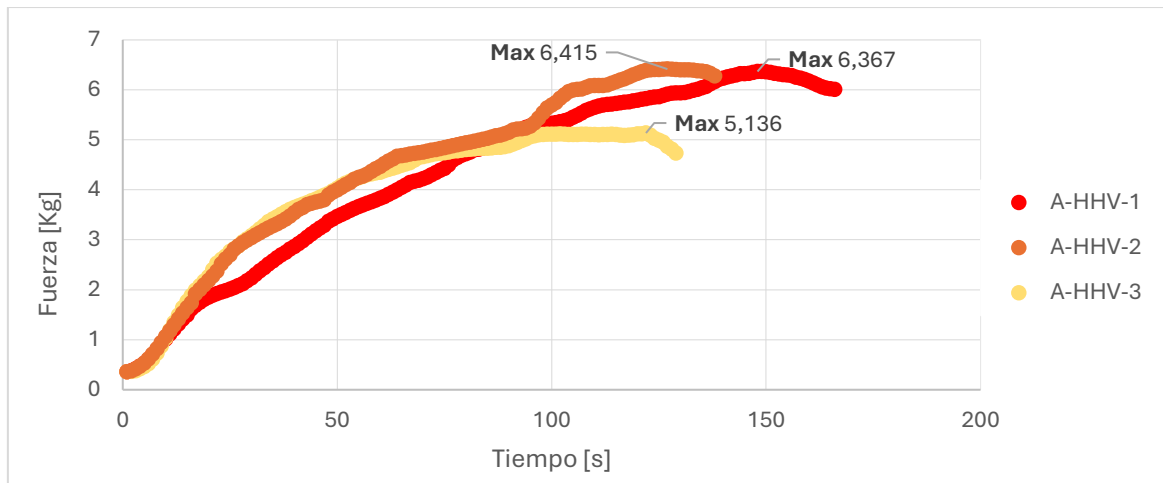


Figura 116. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-HHV-1/2/3 || **Fuente:** Elaboración propia

4.2.1.2. Resultado del desplazamiento máximo

En el caso de la unión A-HHV-1, se registró una flecha máxima de **39 mm** en la pieza principal y de **5 mm** en la pieza auxiliar. La fuerza máxima alcanzada fue de **6,367 kg**, con un tiempo al fallo de **149 segundos**. El fallo se produjo por **deflexión excesiva**, donde la probeta experimentó una deformación fuera del límite admisible, sin llegar a fracturarse de forma brusca.

Para la unión A-HHV-2, se observó una flecha de **28 mm** en la pieza principal y de **2 mm** en la auxiliar. Esta alcanzó una fuerza máxima de **6,415 kg** y falló a los **128 segundos**. En este caso, el fallo correspondió a un proceso de **delaminación**, donde se produjo la separación y rotura entre las láminas de cartón que conformaban la unión.

Por último, la unión A-HHV-3 presentó una flecha máxima de **23 mm** en la pieza principal y **2 mm** en la auxiliar, con una resistencia máxima de **5,136 kg** y un fallo a los **123 segundos**, también por **delaminación** entre planchas.

Resultados

En la Tabla 40 se presentan estos resultados.

Tabla 40. Resultados del desplazamiento máximo A-HHV-1/2/3

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
A-HHV-1	Principal: 39 Auxiliar: 5	6,367	149	Deflexión excesiva
A-HHV-2	Principal: 28 Auxiliar: 2	6,415	128	Delaminación
A-HHV-3	Principal: 23 Auxiliar: 2	5,136	123	Delaminación

En la Figura 117a, 117b y 117c (A-HHV-1, A-HHV-2, A-HHV-3, respectivamente) se presentan las uniones tras haber sido sometidas al ensayo. Por otro lado, la Figura 117d, 117e y 117f muestran en detalle la zona de contacto entre los componentes de la unión (A-HHV-1, A-HHV-2, A-HHV-3, respectivamente), así como la rotura producida.

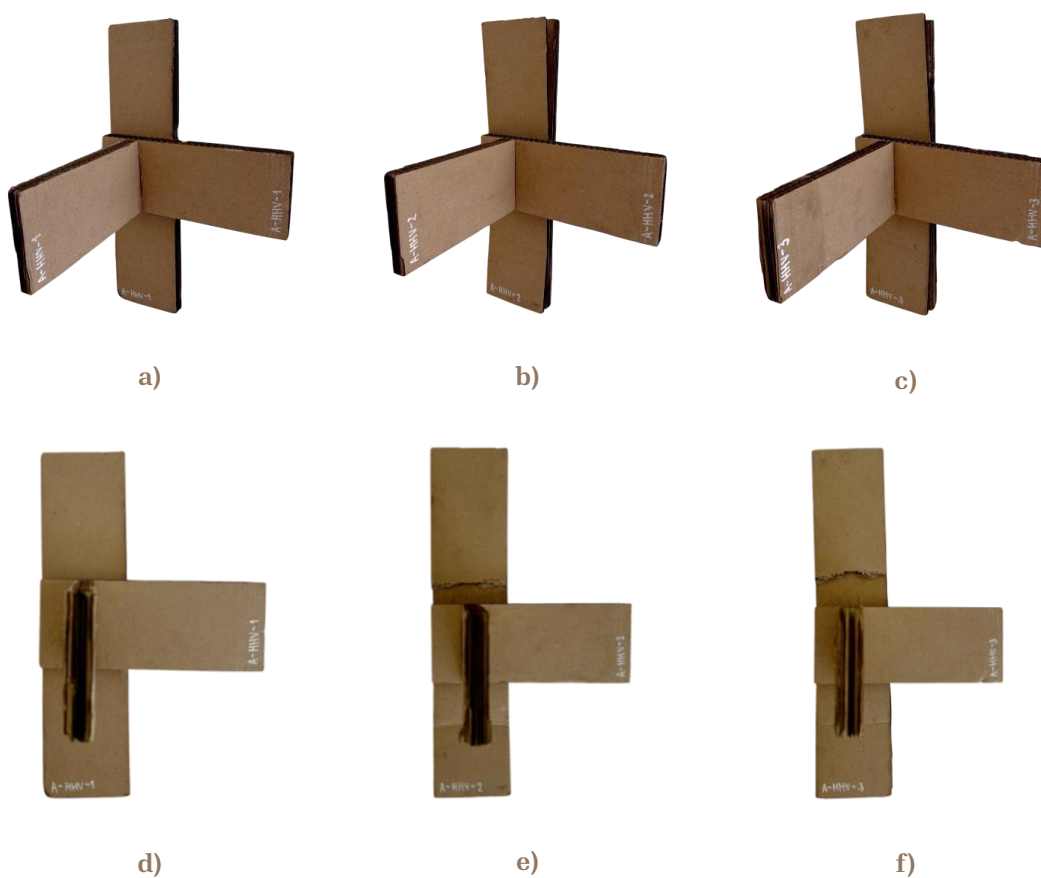


Figura 117. Probetas A-HHV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Unión B-HHV-1/2/3

4.2.2.1. Gráficas fuerza-tiempo

Se han realizado tres ensayos de flexión sobre la unión B-HHV (Figura 118), la cual incorpora una pieza auxiliar en su configuración.

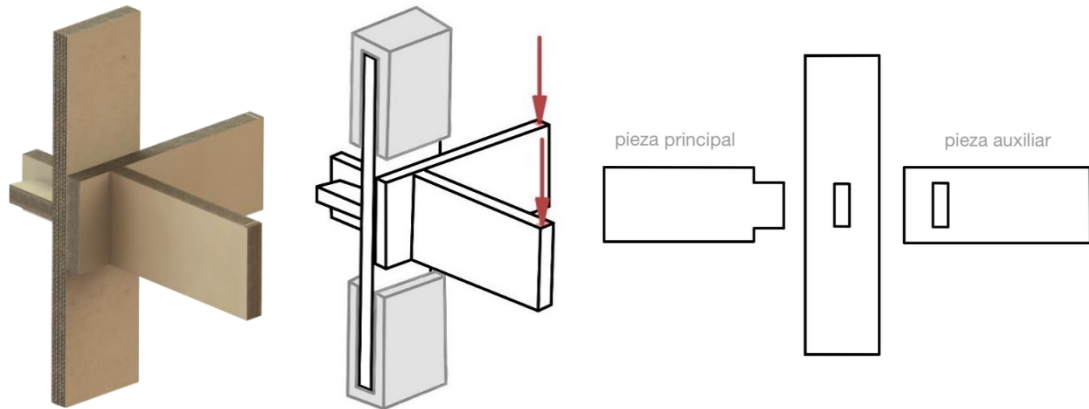


Figura 118. Unión tipo B-HHV || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 119a se muestra la probeta B-HHV en su estado inicial, **antes de la aplicación de carga**, mientras que en la Figura 119b se presenta su estado final **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian las deformaciones generadas y el modo de fallo característico de la configuración analizada.

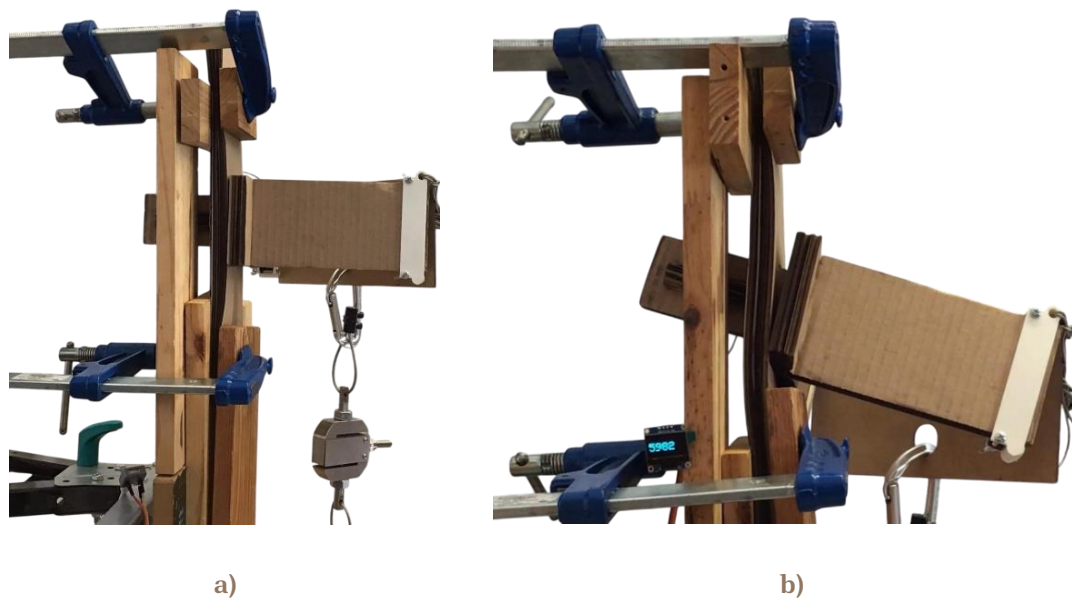


Figura 119. Probeta B-HHV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental ||

Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 120, correspondiente a la unión **B-HHV-1**, se observa una fuerza máxima que alcanza un valor de **6,350 kg**.

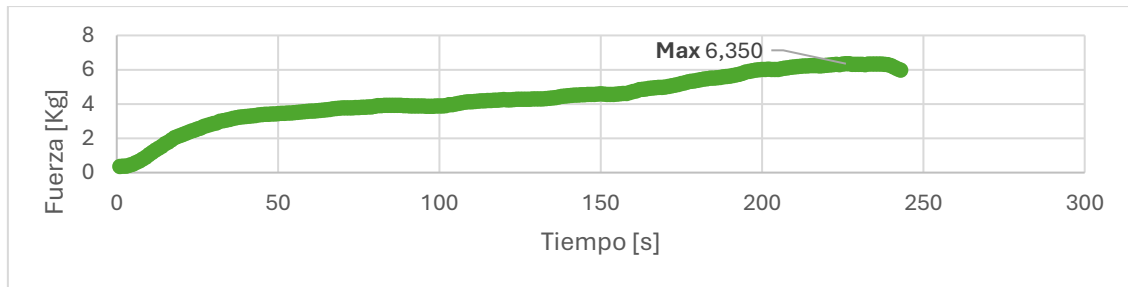


Figura 120. Gráfica fuerza-tiempo unión B-HHV-1 || **Fuente:** Elaboración propia

Por su parte, la Figura 121 muestra el comportamiento de la unión **B-HHV-2**, que registra una fuerza máxima de **5,984 kg**.

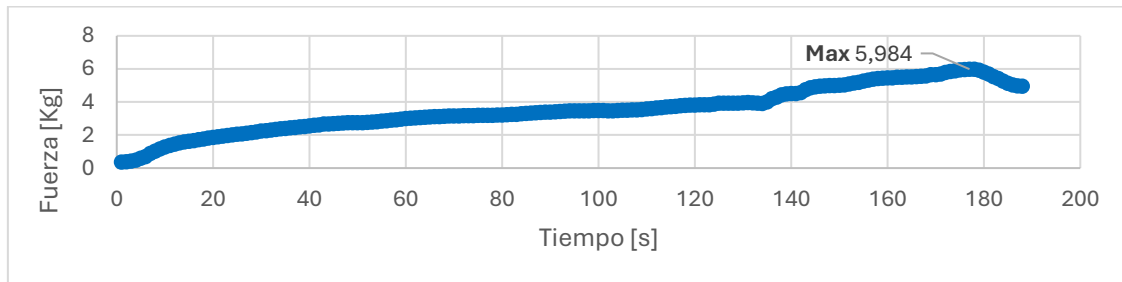


Figura 121. Gráfica fuerza-tiempo unión B-HHV-2 || **Fuente:** Elaboración propia

Finalmente, la Figura 122 corresponde a la unión **B-HHV-3**, la cual alcanza un valor máximo de **5,468 kg**, siendo esta la más baja de las tres.

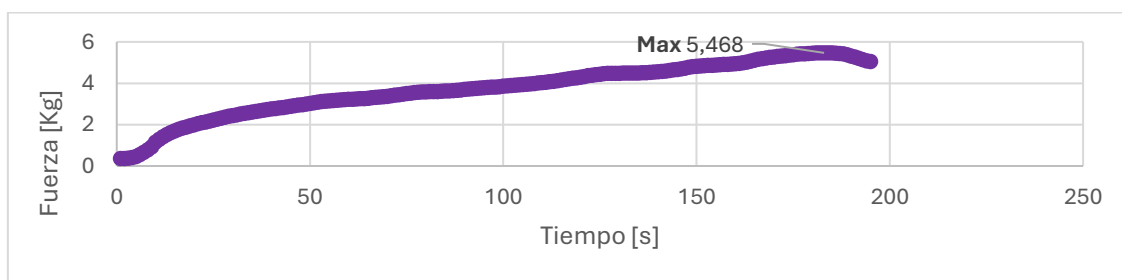


Figura 122. Gráfica fuerza-tiempo unión B-HHV-3 || **Fuente:** Elaboración propia

Las tres curvas comparten un comportamiento común de incremento gradual de la carga hasta el punto de fallo, aunque con variaciones en la magnitud máxima alcanzada y en la duración del ensayo.

La Figura 123 compara las curvas de fuerza-tiempo de los tres ensayos realizados sobre la unión B-HHV, caracterizada por la incorporación de una

pieza auxiliar. En la fase inicial, las tres muestras tienen un incremento progresivo de la fuerza. No obstante, se aprecian diferencias en la pendiente media y en la estabilidad del tramo final. La curva correspondiente a **B-HHV-2** presenta una caída más abrupta tras alcanzar su punto máximo. Por el contrario, **B-HHV-1** mantiene una evolución más continua y estable, lo cual podría reflejar una mayor capacidad de absorción de carga antes del fallo. **B-HHV-3** muestra un comportamiento intermedio, con una transición más gradual hacia el fallo.

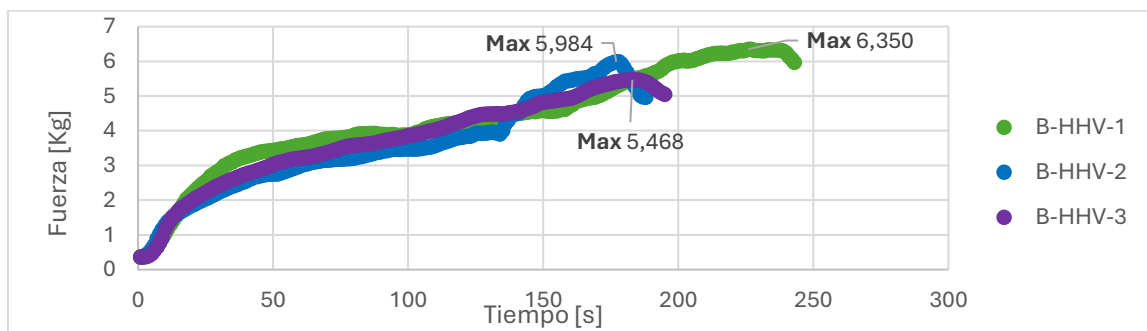


Figura 123. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión B-HHV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2. Resultado del desplazamiento máximo

En la unión B-HHV-1, la flecha máxima alcanzó los **108 mm** en la pieza principal y **125 mm** en la auxiliar. La fuerza máxima registrada fue de **6,350 kg**, con un tiempo al fallo de **221 segundos**. El tipo de fallo identificado fue por **deflexión excesiva**, lo que indica que la muestra se deformó notablemente sin llegar a fracturarse de manera brusca.

En la unión B-HHV-2, se midió una flecha de **42 mm** en la pieza principal y **34 mm** en la auxiliar, alcanzando una fuerza de **5,984 kg** y un fallo a los **178 segundos**. El fallo también fue debido a **deflexión excesiva**, con deformaciones significativas en el cartón.

Por otro lado, la unión B-HHV-3 presentó una flecha máxima de **74 mm** en la pieza principal y **92 mm** en la auxiliar. La fuerza máxima alcanzada fue de **5,468 kg**, fallando a los **184 segundos**. En este caso, el fallo correspondió a una **rotura** del material, lo que implica una fractura completa de la probeta durante el ensayo.

Resultados

La Tabla 41 recoge los resultados obtenidos en el ensayo.

Tabla 41. Resultados del desplazamiento máximo B-HHV-1/2/3

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
B-HHV-1	Principal: 108 Auxiliar: 125	6,350	221	Deflexión excesiva
B-HHV-2	Principal: 42 Auxiliar: 34	5,984	178	Deflexión excesiva
B-HHV-3	Principal: 74 Auxiliar: 92	5,468	184	Rotura

En la Figura 124a, 124b y 124c (B-HHV-1, B-HHV-2, B-HHV-3, respectivamente) se presentan las uniones tras haber sido sometidas al ensayo. Por otro lado, la Figura 124d, 124e y 124f (B-HHV-1, B-HHV-2, B-HHV-3, respectivamente) muestran en detalle la zona de contacto entre los componentes de la unión, así como la rotura producida.

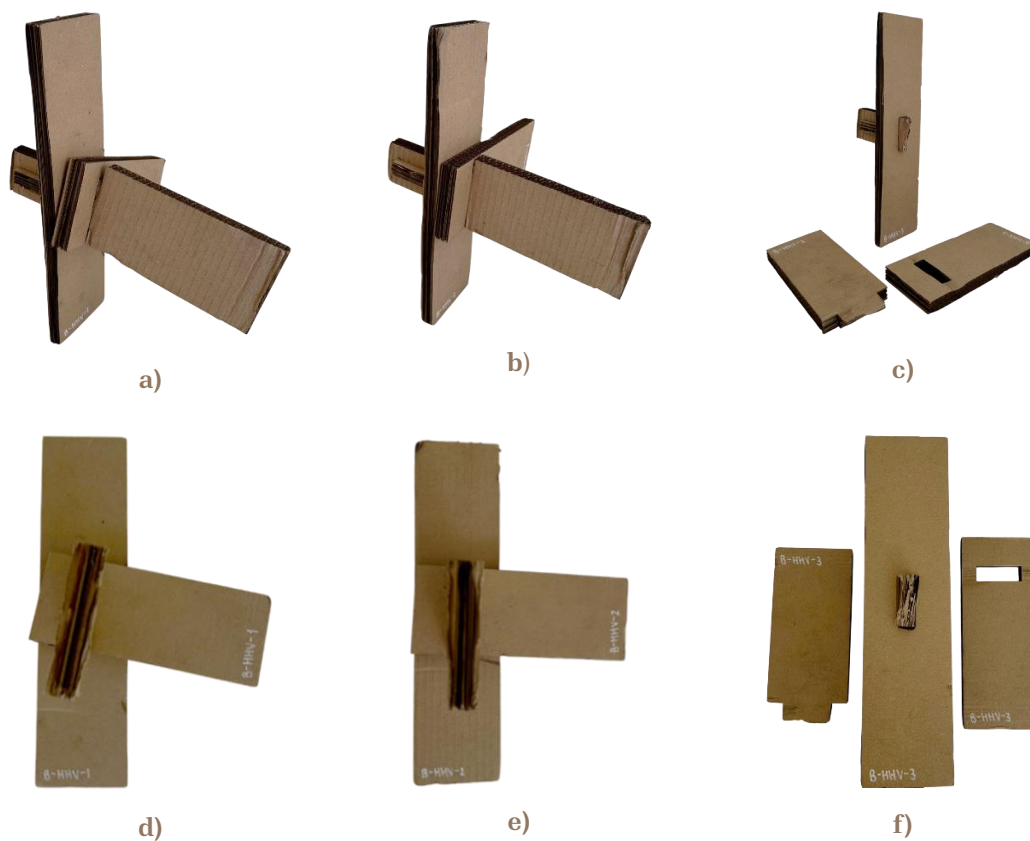


Figura 124. Probetas B-HHV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Comparativa entre uniones A-HHV y B-HHV

La Figura 125 muestra respectivamente las uniones de tipo A-HHV y B-HHV permitiendo visualizar su diferencia estructural.

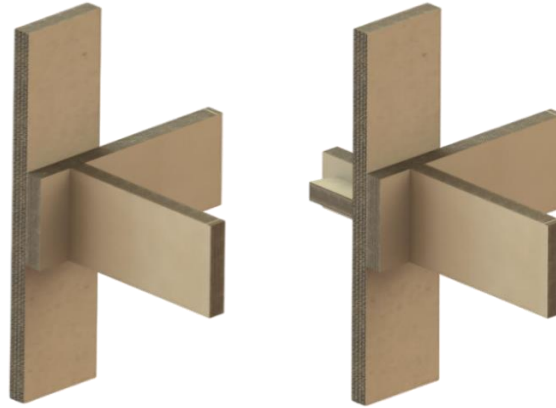


Figura 125. Uniones tipo A-HHV y B-HHV || Fuente: Elaboración propia

En el caso de las uniones A-HHV (Figura 126), los valores máximos de fuerza se sitúan en un rango comprendido entre 5,136 kg y 6,415 kg. Las curvas presentan un aumento progresivo de la carga con ligeras diferencias en la pendiente y en el momento del fallo, lo que indica cierta variabilidad entre muestras.

Por su parte, las uniones B-HHV (Figura 126) muestran valores máximos similares, en un rango de 5,468 kg a 6,350 kg. Las curvas de este tipo de unión son más homogéneas entre sí, con pendientes más estables y un desarrollo más gradual antes del fallo.

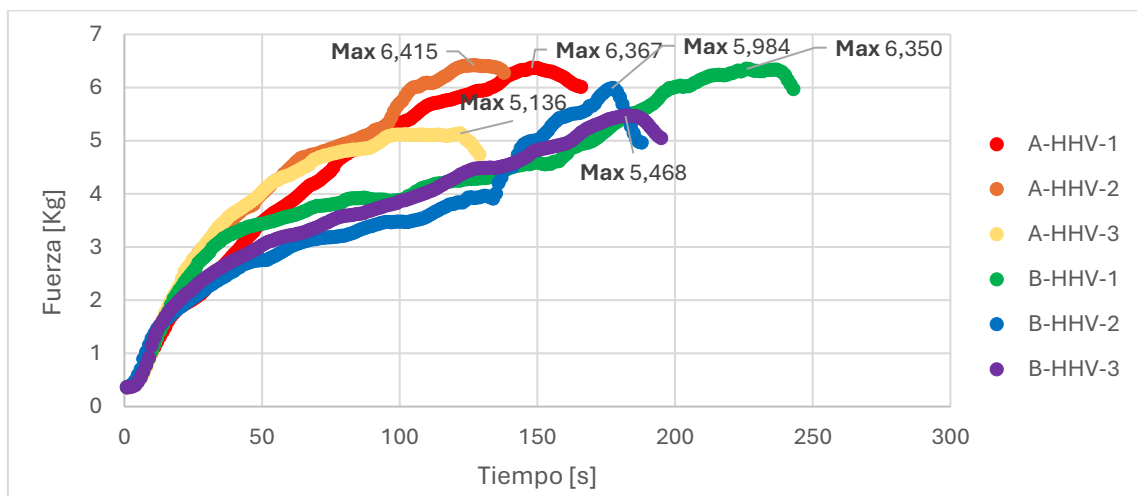


Figura 126. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-HHV y B-HHV || Fuente: Elaboración propia

Resultados

Ambas configuraciones ofrecen niveles de resistencia elevados y relativamente próximos. Sin embargo, las uniones **A-HHV** tienden a alcanzar cargas máximas ligeramente superiores, mientras que las **B-HHV** destacan por su mayor estabilidad y repetibilidad durante el ensayo.

La Tabla 42 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión en configuración de voladizo para las uniones tipo **A-HHV** y **B-HHV**. En ella se presentan, para cada probeta, la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** y **torsor** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección (común a todas las muestras por compartir geometría), y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 42. Parámetros calculados para A-HHV y B-HHV

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento máx. [N·mm]	Momento inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
A-HHV-1	62,460	M _f : 1951,88 T: 5621,40	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,394 Auxiliar: 0,08
A-HHV-2	62,931	M _f : 1966,59 T: 5663,79	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,397 Auxiliar: 0,081
A-HHV-3	50,384	M _f : 1574,50 T: 4534,56	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,317 Auxiliar: 0,065
B-HHV-1	62,294	M _f : 1946,69 T: 5606,46	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,393 Auxiliar: 0,080
B-HHV-2	58,703	M _f : 1834,47 T: 5283,27	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,370 Auxiliar: 0,075
B-HHV-3	53,641	M _f : 1676,28 T: 4827,69	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,338 Auxiliar: 0,069

En ambos casos, las tensiones registradas en la pieza principal son **superiores** a las de la pieza auxiliar, lo que confirma que la principal es la más solicitada estructuralmente al estar sometida a **momento flector** y a **torsión**, a diferencia de la auxiliar, que solo experimenta flexión. Además, **no existen diferencias significativas** entre ambas, lo que sugiere que el tipo de unión no afecta de forma relevante a la distribución de tensiones bajo esta configuración.

4.3. Ensayos de caracterización mecánica de las uniones A/B (PH)

4.3.1. Unión A-PH-1/2/3

4.3.1.1. Gráficas fuerza-tiempo

Se han realizado tres ensayos de flexión sobre la unión A-PH (Figura 127), compuesta por elementos de cartón adheridos.

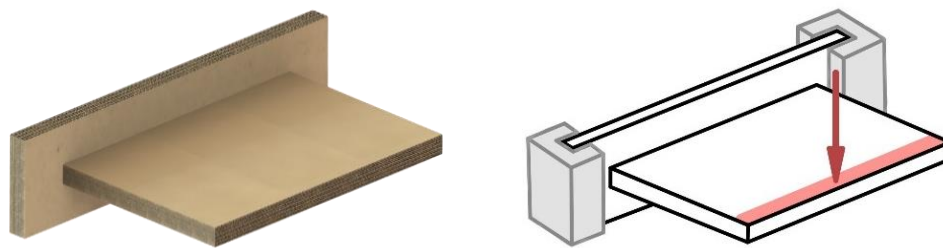


Figura 127. Unión tipo A-PH || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 128a se muestra la probeta A-PH en su estado inicial, **antes de la aplicación de carga**, mientras que en la Figura 128b se presenta su estado final **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian las deformaciones generadas y el modo de fallo característico de la configuración analizada.

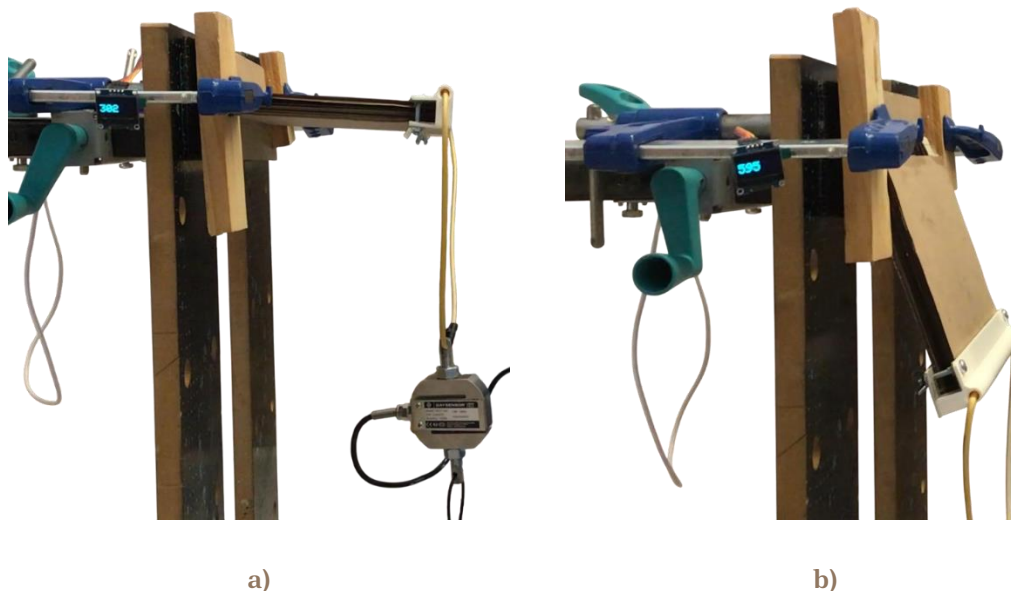


Figura 128. Probeta A-PH a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental ||

Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 129, correspondiente a la unión **A-PH-1**, alcanzó una fuerza máxima de **2,712 kg**.

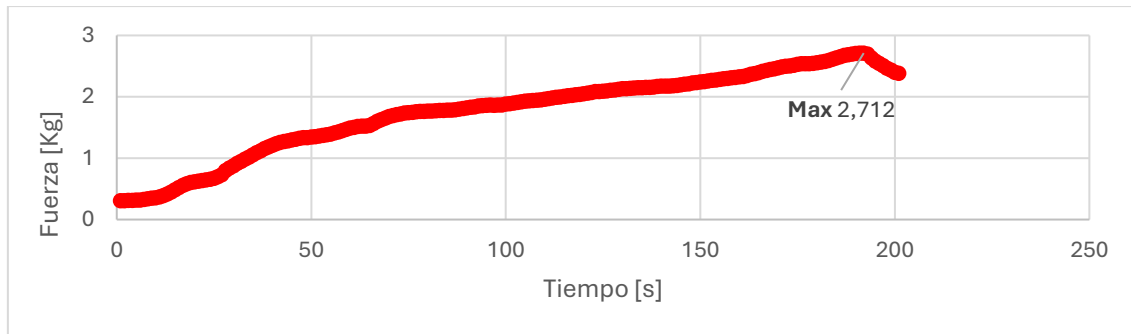


Figura 129. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PH-1 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 130 muestra que **A-PH-2** obtuvo el menor valor, con **1,650 kg**.

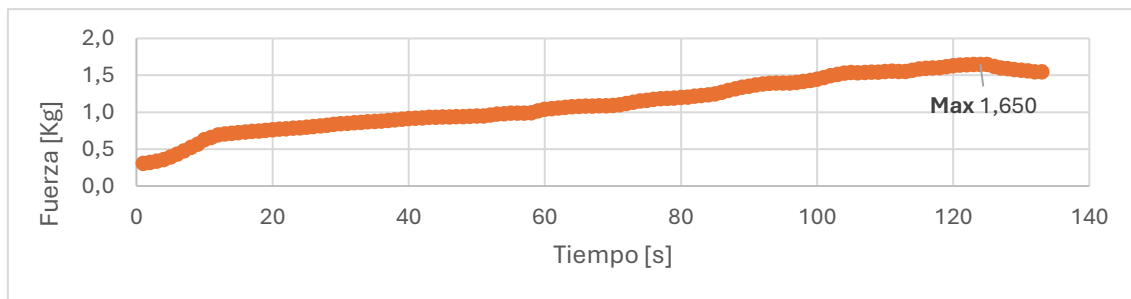


Figura 130. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PH-2 || **Fuente:** Elaboración propia

Por su parte, la Figura 131 indica que **A-PH-3** alcanzó una fuerza máxima de **2,669 kg**.

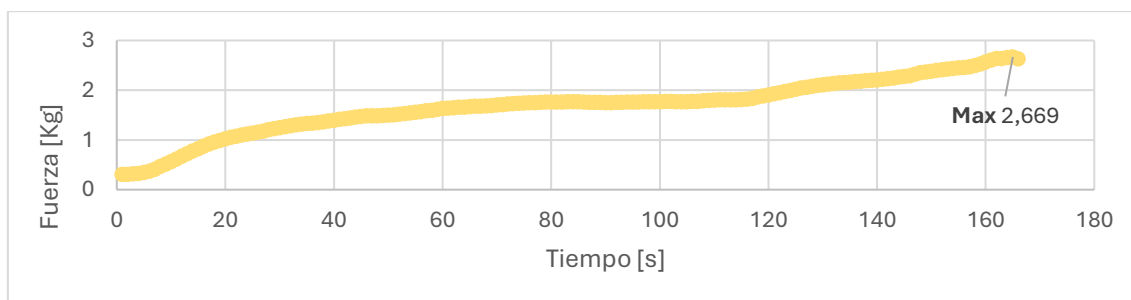


Figura 131. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PH-3 || **Fuente:** Elaboración propia

En los tres casos se observa una evolución progresiva de la fuerza hasta un valor máximo, seguido de un ligero descenso que marca el fallo de la unión.

La Figura 132 muestra la superposición de las curvas fuerza-tiempo correspondientes a los tres ensayos realizados sobre la unión **A-PH**. En todos los casos se observa un crecimiento progresivo de la carga durante la fase inicial

del ensayo, aunque con diferentes tasas de incremento. La curva de **A-PH-2** presenta una menor pendiente y una estabilización temprana, lo que indica un comportamiento menos resistente y posiblemente una menor rigidez. En contraste, las uniones **A-PH-1** y **A-PH-3** muestran una mayor pendiente y alcanzan niveles de carga más altos, con un ascenso más sostenido hasta el punto de fallo. En particular, **A-PH-1** mantiene la carga elevada durante un mayor intervalo de tiempo antes de presentar una caída, lo que podría reflejar una mejor respuesta estructural bajo flexión.

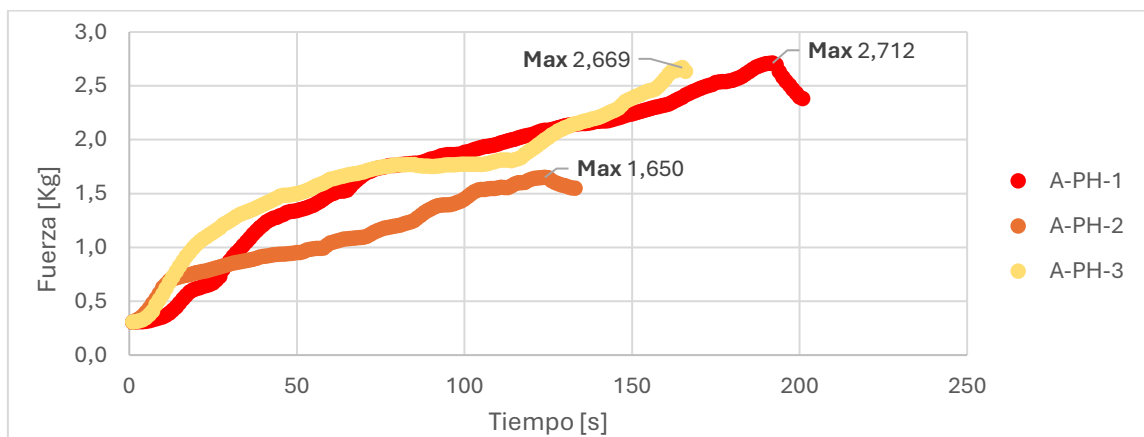


Figura 132. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PH-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.3.1.2. Resultado del desplazamiento máximo

En el caso de la probeta A-PH-1, se alcanzó una flecha máxima de **128 mm**, con una fuerza de **2,712 kg** y un tiempo al fallo de **193 segundos**. El tipo de fallo fue por **deflexión excesiva**, lo que indica que la unión presentó una deformación progresiva sin llegar a una rotura abrupta.

Por su parte, la probeta A-PH-2 presentó una flecha máxima de **175 mm**, soportó una fuerza de **1,650 kg** y falló a los **125 segundos**. En este caso, el fallo fue por **rotura** de la unión, produciéndose la separación de las piezas ensambladas debido al colapso del área de contacto.

Finalmente, la probeta A-PH-3 alcanzó una flecha de **167 mm**, con una fuerza de **2,669 kg** y un tiempo al fallo de **166 segundos**, presentando también un fallo por **rotura** de la unión, evidenciado por el desprendimiento entre los elementos unidos.

Resultados

La Tabla 43 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 43. Resultados del desplazamiento máximo A-PH-1/2/3

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
A-PH-1	128	2,712	193	Deflexión excesiva
A-PH-2	175	1,650	125	Rotura
A-PH-3	167	2,669	166	Rotura

En la Figura 133a, 133b y 133c (A-PH-1, A-PH-2, A-PH-3, respectivamente) se presentan las uniones tras haber sido sometidas al ensayo. Por otro lado, la Figura 133d, 133e y 133f (A-PH-1, A-PH-2, A-PH-3, respectivamente) muestran en detalle la zona de contacto entre los componentes de la unión, así como la rotura producida.

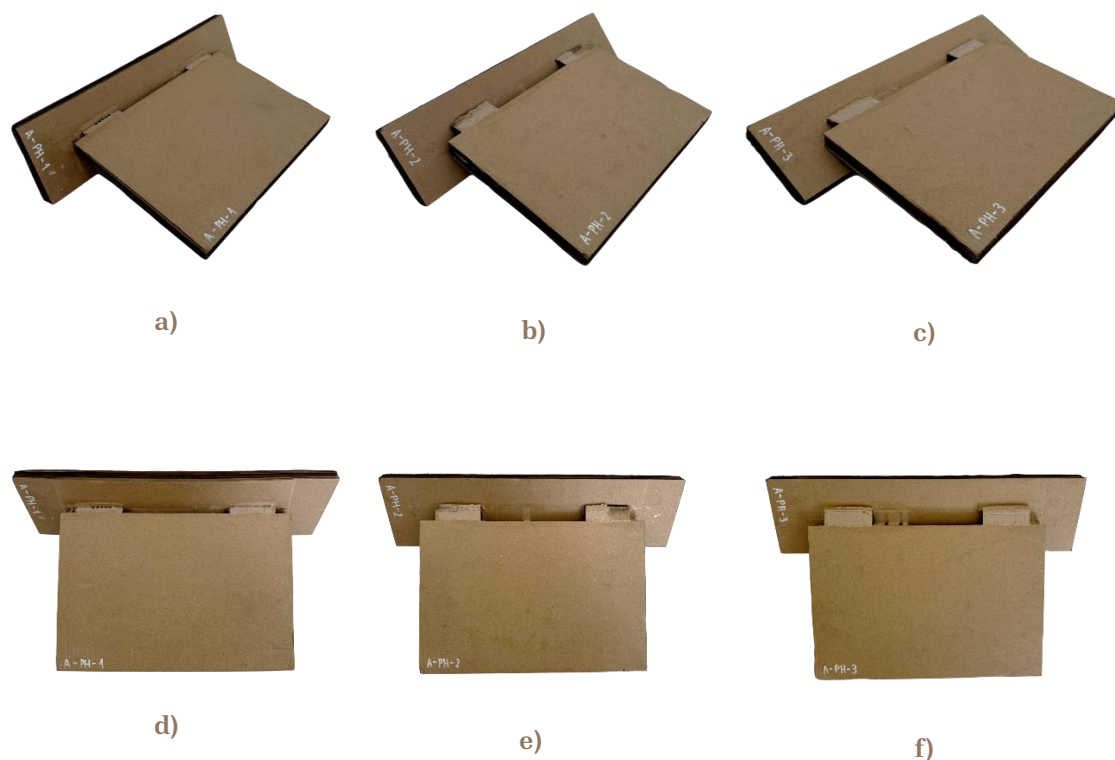


Figura 133. Probetas A-PH-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Unión B-PH-1/2/3

4.3.2.1. Gráficas fuerza-tiempo

Se han realizado tres ensayos de flexión sobre la unión **B-PH** (Figura 134), que incorpora una pieza auxiliar como parte de su configuración estructural.

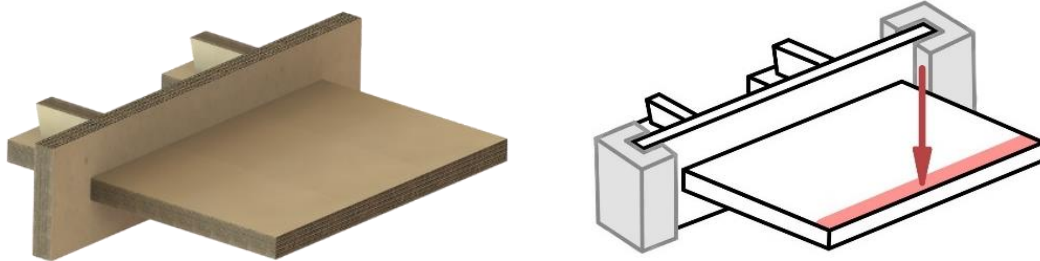


Figura 134. Unión tipo B-PH || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 135a se muestra la probeta B-PH en su estado inicial, **antes de la aplicación de carga**, mientras que en la Figura 135b se presenta su estado final **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian las deformaciones generadas y el modo de fallo característico de la configuración analizada.

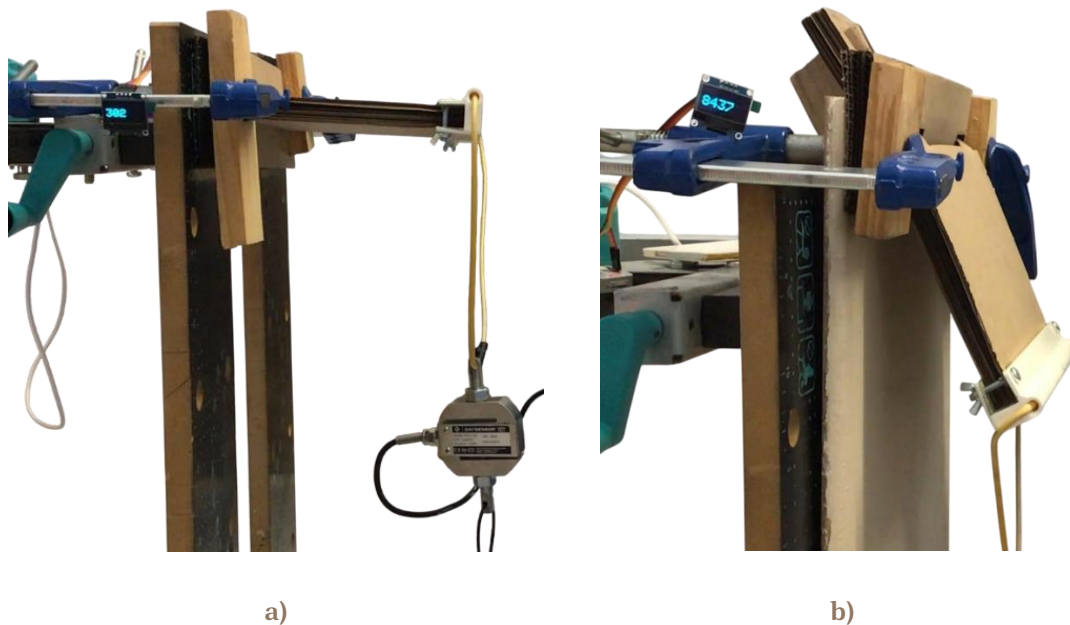


Figura 135. Probeta B-PH a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental ||

Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 136, correspondiente a la unión **B-PH-1**, alcanzó una fuerza máxima de **3,773 kg**,

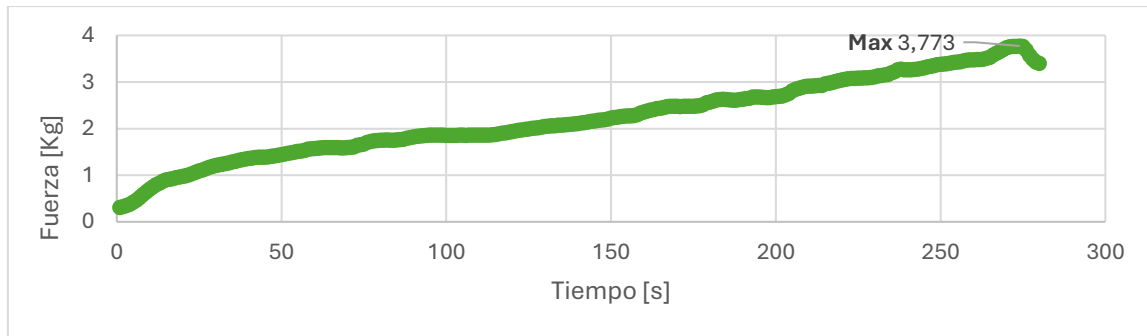


Figura 136. Gráfica fuerza-tiempo unión B-PH-1 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 137 muestra que **B-PH-2** alcanzó **5,734 kg**.

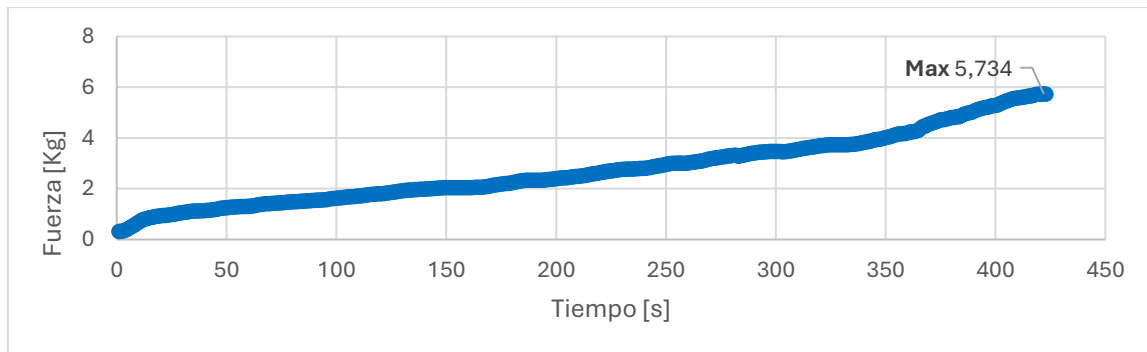


Figura 137. Gráfica fuerza-tiempo unión B-PH-2 || **Fuente:** Elaboración propia

Finalmente, la Figura 138 indica que **B-PH-3** obtuvo el valor más alto, con una fuerza máxima de **8,774 kg**.

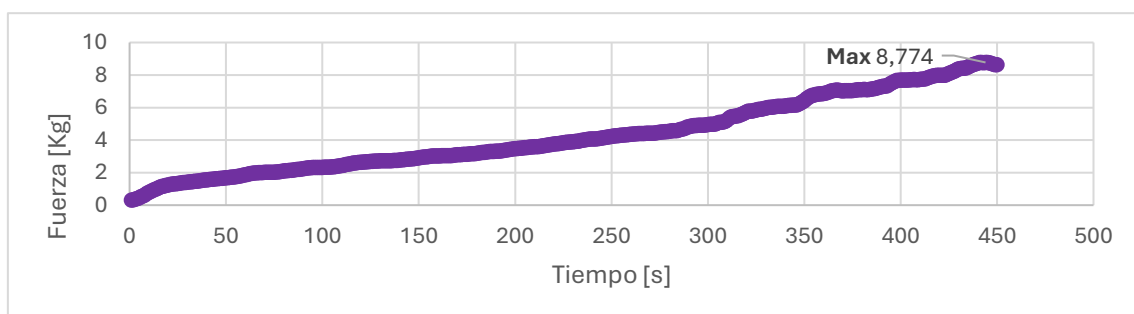


Figura 138. Gráfica fuerza-tiempo unión B-PH-3 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 139 presenta la comparación de las curvas fuerza-tiempo obtenidas en los tres ensayos realizados sobre la unión **B-PH**, la cual incluye una pieza auxiliar en su configuración. Aunque las tres curvas comparten una

tendencia inicial de incremento progresivo de la carga, se aprecian diferencias notables tanto en la pendiente de crecimiento como en el valor máximo alcanzado y el momento del fallo.

Estas variaciones pueden deberse a factores como: pequeñas diferencias en la **aplicación del adhesivo** como la cantidad o distribución, ligeras **desviaciones en el montaje** ya sea la presión o alineación de las piezas. Además, al tratarse de materiales como el cartón, con **propiedades anisotrópicas y estructura interna irregular**, es posible que existan diferencias locales en resistencia mecánica.

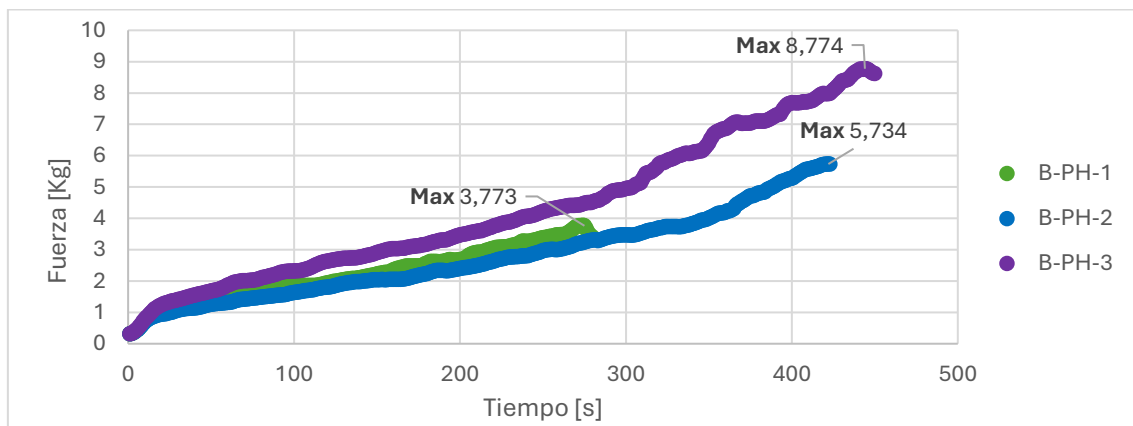


Figura 139. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión B-PH-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2. Resultado del desplazamiento máximo

En el caso de la probeta B-PH-1, se alcanzó una flecha máxima de **178 mm**, soportando una fuerza máxima de **3,773 kg** antes de fallar a los **275 segundos**. El fallo registrado fue por **rotura** de una de las partes de la unión.

Por su parte, la probeta B-PH-2 alcanzó una flecha máxima de **162 mm**, con una carga máxima de **5,734 kg** y un tiempo al fallo de **423 segundos**. El tipo de fallo fue una **deflexión excesiva**, reflejando una deformación gradual de la unión sin una rotura repentina.

En la probeta B-PH-3, se observó un comportamiento similar, con una flecha máxima de **161 mm**, una carga de **8,774 kg** y un fallo a los **445 segundos**, también causado por una deflexión excesiva que comprometió la integridad estructural de la unión.

Resultados

La Tabla 44 muestra los resultados obtenidos en los ensayos.

Tabla 44. Resultados del desplazamiento máximo B-PH-1/2/3

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
B-PH-1	178	3,773	275	Rotura
B-PH-2	162	5,734	423	Deflexión excesiva
B-PH-3	161	8,774	445	Deflexión excesiva

En la Figura 140a, 140b y 140c (B-PH-1, B-PH-2, B-PH-3, respectivamente) se presentan las uniones tras haber sido sometidas al ensayo. Por otro lado, la Figura 140d, 140e y 140f (B-PH-1, B-PH-2, B-PH-3, respectivamente) muestran en detalle la zona de contacto entre los componentes de la unión, así como la rotura producida.

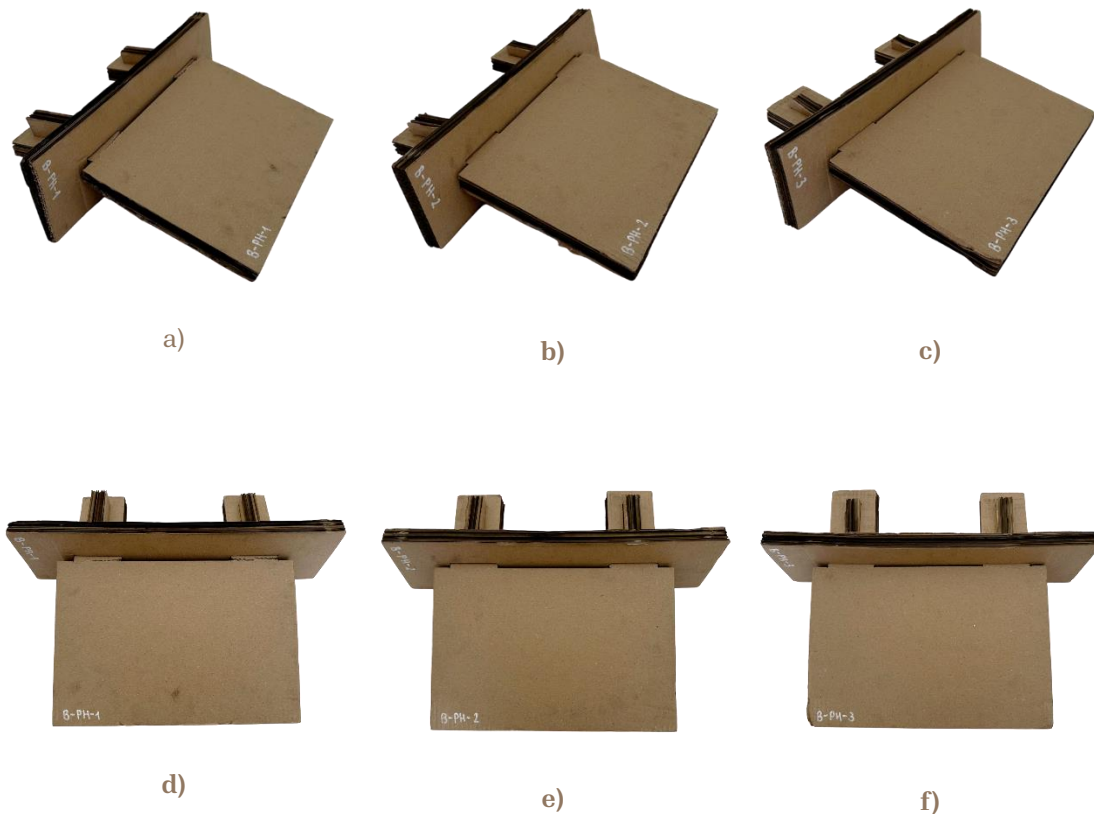


Figura 140. Probetas B-PH-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Comparativa entre uniones A-PH y B-PH

La Figura 141 muestra respectivamente las uniones de tipo A-PH y B-PH permitiendo visualizar su diferencia estructural.

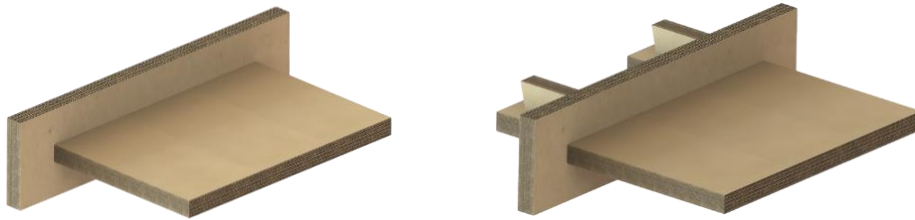


Figura 141. Uniones tipo A-PH y B-PH || Fuente: Elaboración propia

En el caso de las uniones A-PH, los valores máximos de fuerza se encuentran en un rango que va desde **1,650 kg hasta 2,712 kg**. Las curvas (Figura 142) muestran un ascenso progresivo de la carga con una duración de ensayo relativamente corta.

Por otro lado, las uniones B-PH presentan un rendimiento significativamente superior, con valores máximos de fuerza que oscilan entre **3,773 kg y 8,774 kg**. Además de mostrar una mayor capacidad de carga, las curvas (Figura 142) se desarrollan durante un tiempo considerablemente mayor, reflejando una mayor ductilidad o capacidad de deformación progresiva antes del fallo.

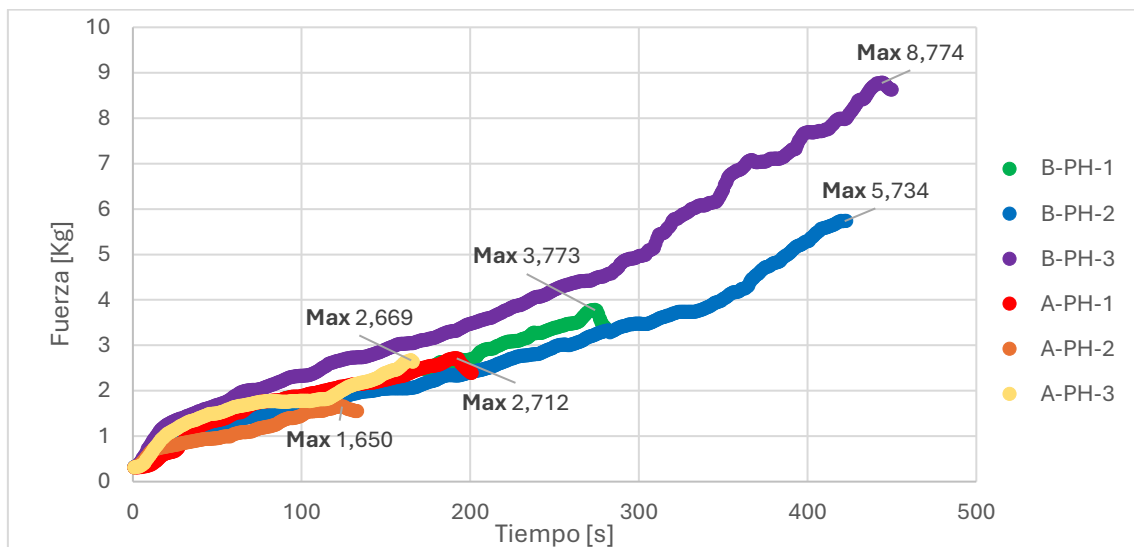


Figura 142. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PH-1/2/3 y B-PH-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

Resultados

La Tabla 45 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión en configuración de voladizo para las uniones tipo **A-PH** y **B-PH**. En ella se presentan, para cada probeta, la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección (común a todas las muestras por compartir geometría), y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 45. Parámetros calculados para A-PH y B-PH

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
A-PH-1	26,605	4788,90	131220	0,328
A-PH-2	16,187	2913,66	131220	0,200
A-PH-3	26,183	4712,94	131220	0,323
B-PH-1	37,013	6662,34	131220	0,457
B-PH-2	56,251	10125,18	131220	0,694
B-PH-3	86,073	15493,14	131220	1,063

Se observa que las uniones B-PH alcanzan tensiones máximas significativamente superiores respecto a las A-PH, lo cual sugiere una **mayor eficacia estructural en su diseño y en la transmisión de esfuerzos**.

4.4. Ensayos de caracterización mecánica de las uniones A/C (PV)

4.4.1. Unión A-PV-1/2/3

4.4.1.1. Gráficas fuerza-tiempo

Se han realizado tres ensayos de flexión sobre la unión A-PV (Figura 143), formada por elementos de cartón adheridos.

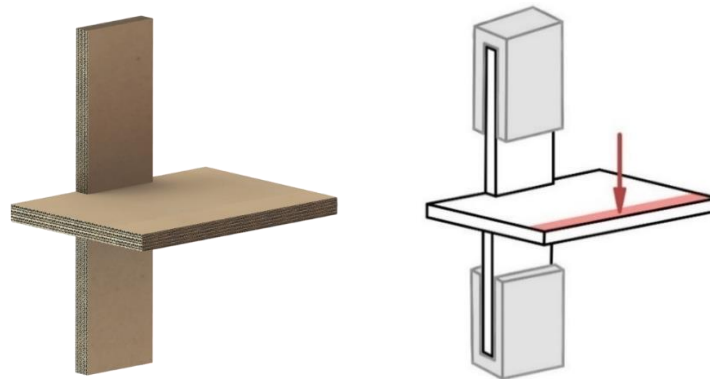


Figura 143. Unión tipo A-PV || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 144a se muestra la probeta A-PV en su estado inicial, **antes de la aplicación de carga**, mientras que en la Figura 144b se presenta su estado final **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian las deformaciones generadas y el modo de fallo característico de la configuración analizada.

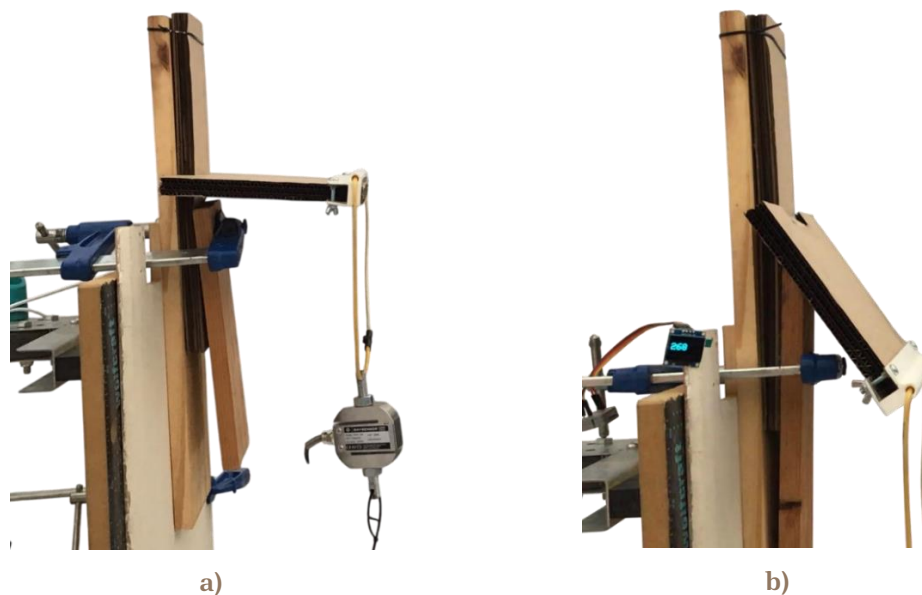


Figura 144. Probeta A-PV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental ||

Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 145, correspondiente a la unión **A-PV-1**, alcanzó una fuerza máxima de **3,364 kg**.

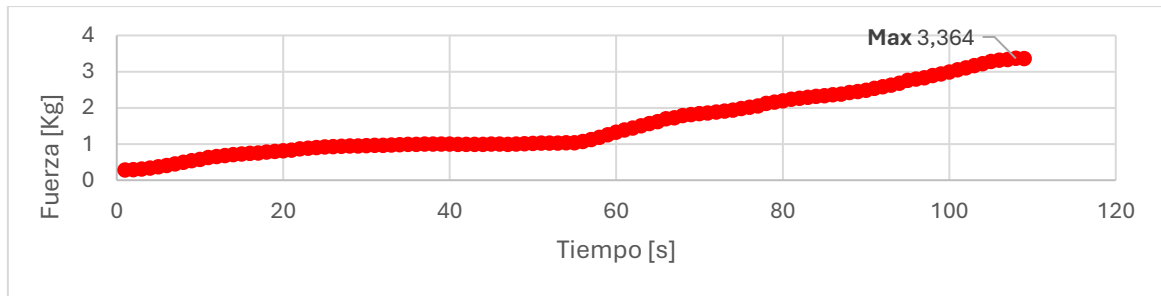


Figura 145. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PV-1 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 146 muestra que **A-PV-2** obtuvo un valor inferior, con **1,981 kg**.

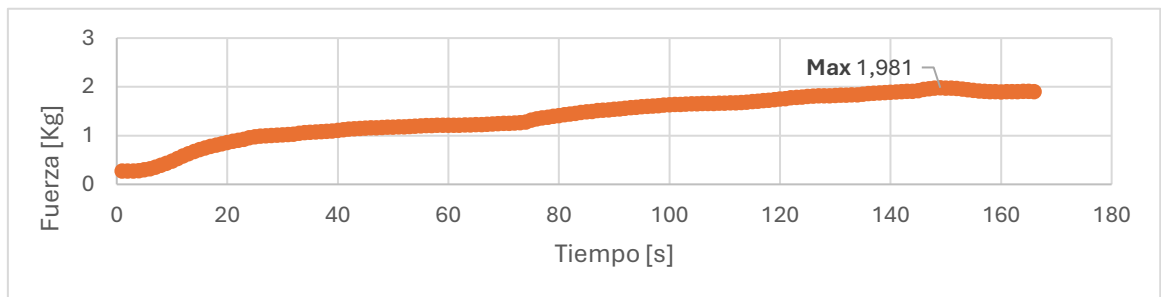


Figura 146. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PV-2 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 147 indica que **A-PV-3** presentó un rendimiento notablemente más bajo, alcanzando solo **0,764 kg**.

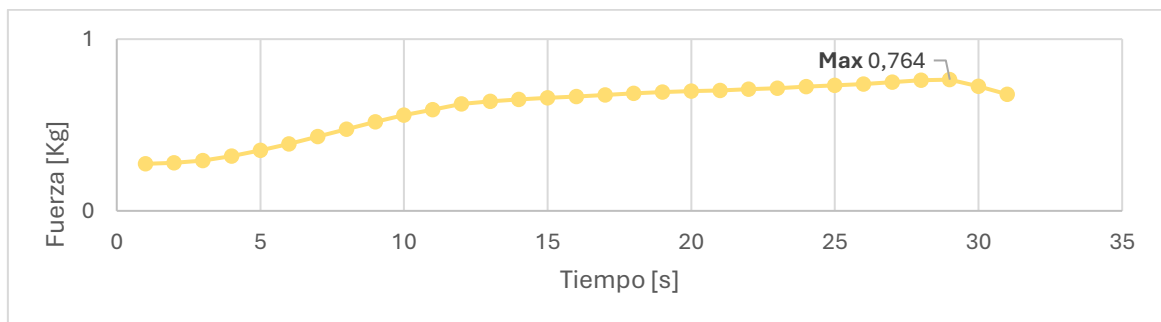


Figura 147. Gráfica fuerza-tiempo unión A-PV-3 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 148 presenta la comparación de las curvas fuerza-tiempo obtenidas en los tres ensayos realizados sobre la unión **A-PV**. Si bien todas las muestras indican un incremento inicial de la fuerza, se observan diferencias muy marcadas en el comportamiento mecánico general. **A-PV-1** muestra una respuesta robusta con una pendiente pronunciada y un fallo tardío, mientras

que A-PV-2 exhibe una evolución más gradual y una menor capacidad de carga. En cambio, la curva de A-PV-3 presenta un ascenso limitado y una caída temprana, lo que podría indicar un fallo prematuro o incluso un defecto puntual en la muestra.

La elevada dispersión entre los resultados sugiere que, además de la variabilidad normal en el montaje o los materiales (como diferencias en la cantidad de adhesivo, presión de unión o propiedades del cartón), en el caso de A-PV-3 podría haber ocurrido un fallo localizado, como una mala adherencia o una debilidad estructural no detectada.

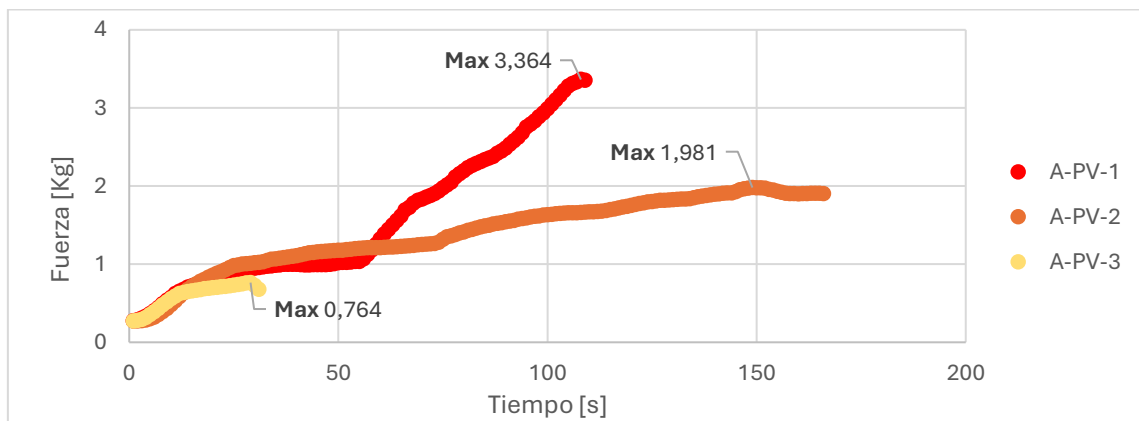


Figura 148. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.4.1.2. Resultado del desplazamiento máximo

La probeta A-PV-1 alcanzó una flecha máxima de **125 mm** antes de fallar a los **109 segundos** bajo una carga de **3,364 kg**. El tipo de fallo registrado fue una deflexión excesiva, evidenciando una deformación significativa de la estructura sin una rotura inmediata.

En el caso de A-PV-2, la muestra soportó una carga máxima de **1,981 kg**, alcanzando una flecha máxima de **142 mm** antes de presentar fallo a los **150 segundos**. Este fallo se produjo por la **rotura** de uno de los componentes que conformaban la unión.

Por último, A-PV-3 presentó un fallo por rotura a los **30 segundos**, con una flecha máxima de **144 mm** y una carga de **0,764 kg**, lo cual sugiere una pérdida prematura de integridad en la unión adhesiva.

Resultados

En la Tabla 46 se recogen los resultados obtenidos.

Tabla 46. Resultados del desplazamiento máximo A-PV-1/2/3

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
A-PV-1	125	3,364	109	Deflexión excesiva
A-PV-2	142	1,981	150	Rotura
A-PV-3	144	0,764	30	Rotura

En la Figura 149a, 149b y 149c (A-PV-1, A-PV-2, A-PV-3, respectivamente) se presentan las uniones tras haber sido sometidas al ensayo. Por otro lado, la Figura 149d, 149e y 149f (A-PV-1, A-PV-2, A-PV-3, respectivamente) muestran en detalle la zona de contacto entre los componentes de la unión, así como la rotura producida.

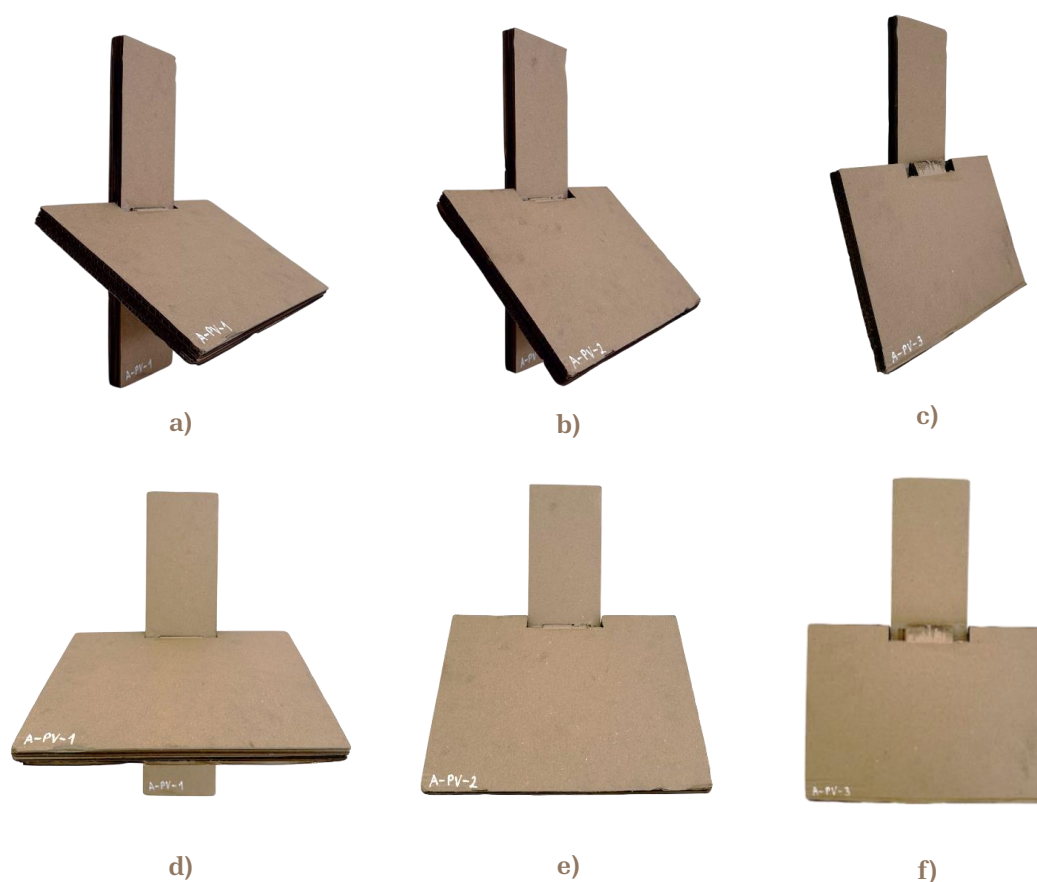


Figura 149. Probetas A-PV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Unión C-PV-1/2/3

4.4.2.1. Gráficas fuerza-tiempo

Se han realizado tres ensayos de flexión sobre la unión C-PV (Figura 150), la cual incorpora un pasador cilíndrico como elemento de refuerzo mecánico.

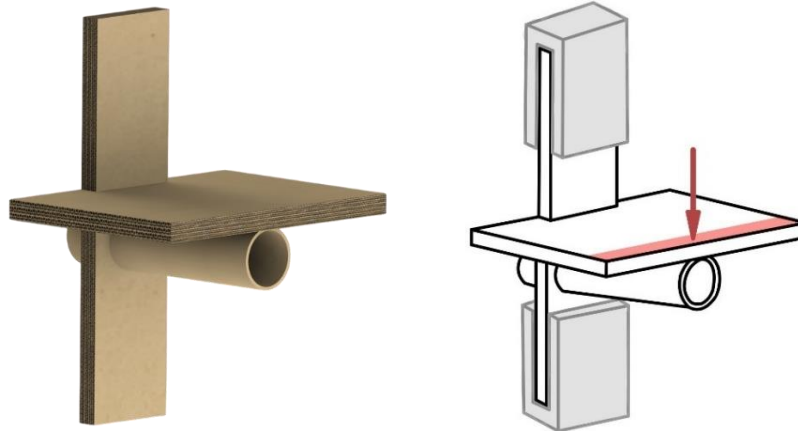


Figura 150. Unión tipo C-PV || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 151a se muestra la probeta C-PV en su estado inicial, **antes de la aplicación de carga**, mientras que en la Figura 151b se presenta su estado final **tras el ensayo experimental**, donde se aprecian las deformaciones generadas y el modo de fallo característico de la configuración analizada.

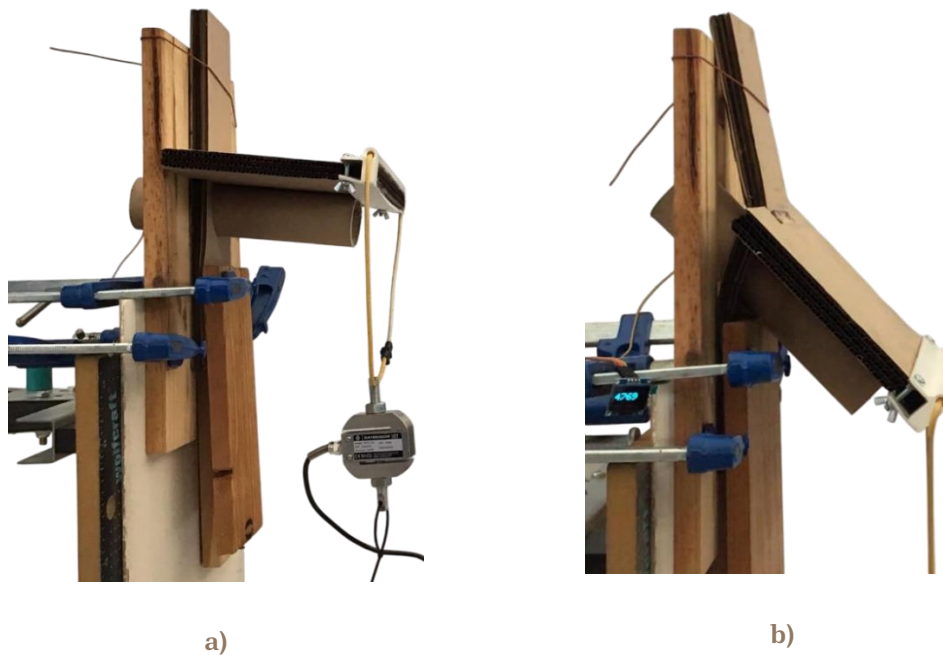


Figura 151. Probeta C-PV a) antes del ensayo experimental, b) tras el ensayo experimental ||

Fuente: Elaboración propia

Resultados

En la Figura 152, correspondiente a la unión **C-PV-1**, alcanzó una fuerza máxima de **2,547 kg**.

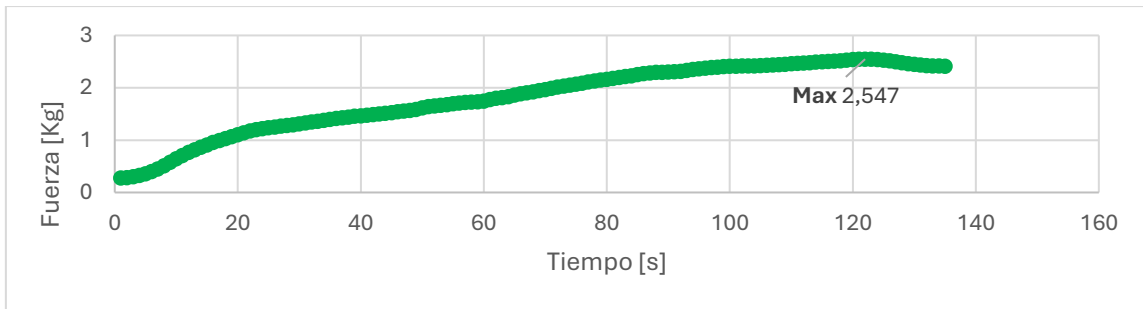


Figura 152. Gráfica fuerza-tiempo unión C-PV-1 || **Fuente:** Elaboración propia

En la Figura 153 la unión **C-PV-2** obtuvo el valor más alto, con **4,942 kg**.

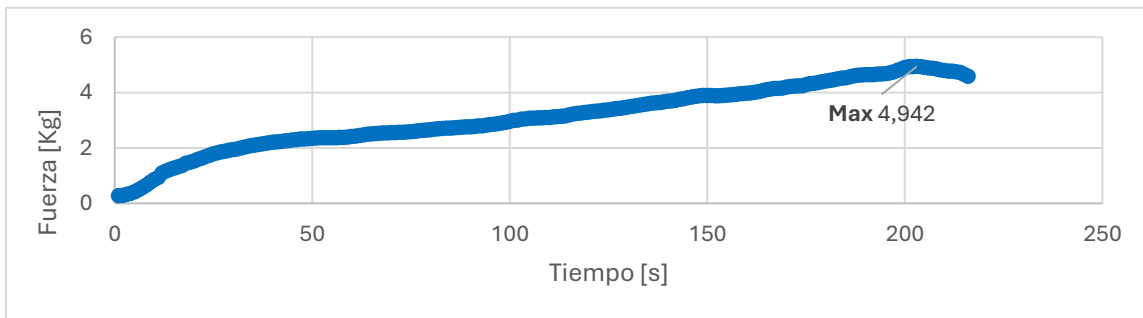


Figura 153. Gráfica fuerza-tiempo unión C-PV-2 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 154 indica que **C-PV-3** presentó un resultado intermedio, con **3,964 kg**.

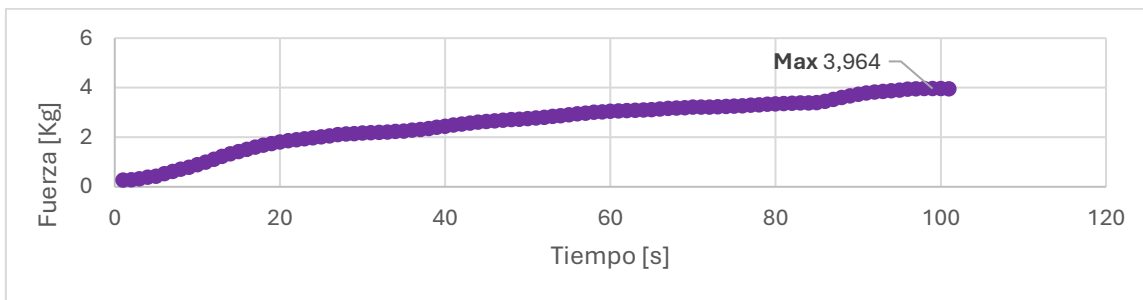


Figura 154. Gráfica fuerza-tiempo unión C-PV-3 || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 155 muestra la comparación de las curvas fuerza-tiempo obtenidas en los tres ensayos realizados sobre la unión **C-PV**, que incorpora un pasador cilíndrico. Las tres muestras presentan un incremento progresivo de la carga hasta alcanzar un valor máximo, seguido de un descenso que indica el fallo de la unión.

A pesar de compartir la misma configuración, se observan diferencias en el comportamiento de cada probeta, tanto en la pendiente de crecimiento como en el tiempo y valor de la carga máxima. Esta variabilidad puede estar relacionada con factores como la **alineación del pasador**, el **ajuste entre las piezas**, pequeñas **diferencias en el montaje** o en la **distribución del adhesivo**. La **geometría de la unión** hace que la transmisión de la carga dependa de la correcta alineación entre el pasador y las planchas. Cualquier **desviación en perpendicularidad o falta de planicidad** introduce excentricidades geométricas que alteran la transferencia uniforme de esfuerzos, provocando concentraciones de tensión y variaciones en la rigidez efectiva. Esto explica que probetas de una misma tipología presenten diferencias en la pendiente de la curva, la deformación y la carga máxima alcanzada

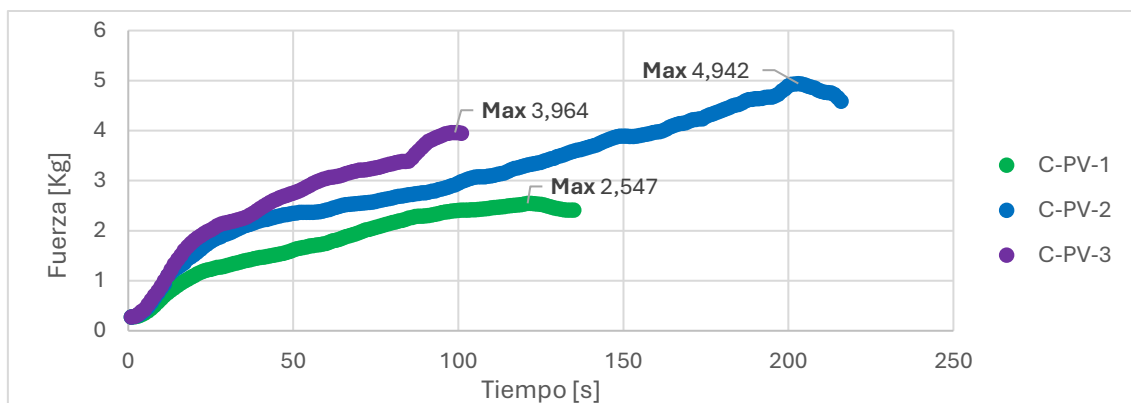


Figura 155. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión C-PV-1/2/3 || **Fuente:** Elaboración propia

4.4.2.2. Resultado del desplazamiento máximo

En el caso de C-PV-1, se alcanzó una flecha máxima de **124 mm** bajo una carga de **2,547 kg**, produciéndose el fallo a los **122 segundos**. El tipo de fallo fue una **deflexión excesiva**, lo cual indica que la unión cedió tras una deformación progresiva y acumulada sin llegar a producirse una rotura directa de los componentes estructurales.

Para la probeta C-PV-2, la flecha máxima registrada fue de **138 mm**, soportando una fuerza de **4,942 kg** y fallando a los **204 segundos**. El fallo se manifestó como una **rotura** de una de las partes de la unión, lo que provocó su colapso.

Resultados

Por último, la probeta C-PV-3 experimentó un fallo a los **99 segundos**, tras alcanzar una flecha de **126 mm** y una carga máxima de **3,964 kg**. En este caso el fallo se produjo por una **deflexión excesiva**.

En la Tabla 47 se presentan los resultados.

Tabla 47. Resultados del desplazamiento máximo C-PV-1/2/3

Probeta	Flecha máx. [mm]	Fuerza máx. [Kg]	Tiempo al fallo [s]	Tipo de fallo
C-PV-1	124	2,547	122	Deflexión excesiva
C-PV-2	138	4,942	204	Rotura
C-PV-3	126	3,964	99	Deflexión excesiva

En la Figura 156a, 156b y 156c (C-PV-1, C-PV-2, C-PV-3, respectivamente) se presentan las uniones tras haber sido sometidas al ensayo. Por otro lado, la Figura 156d, 156e y 156f (C-PV-1, C-PV-2, C-PV-3, respectivamente) muestran en detalle la zona de contacto entre los componentes de la unión, así como la rotura producida.

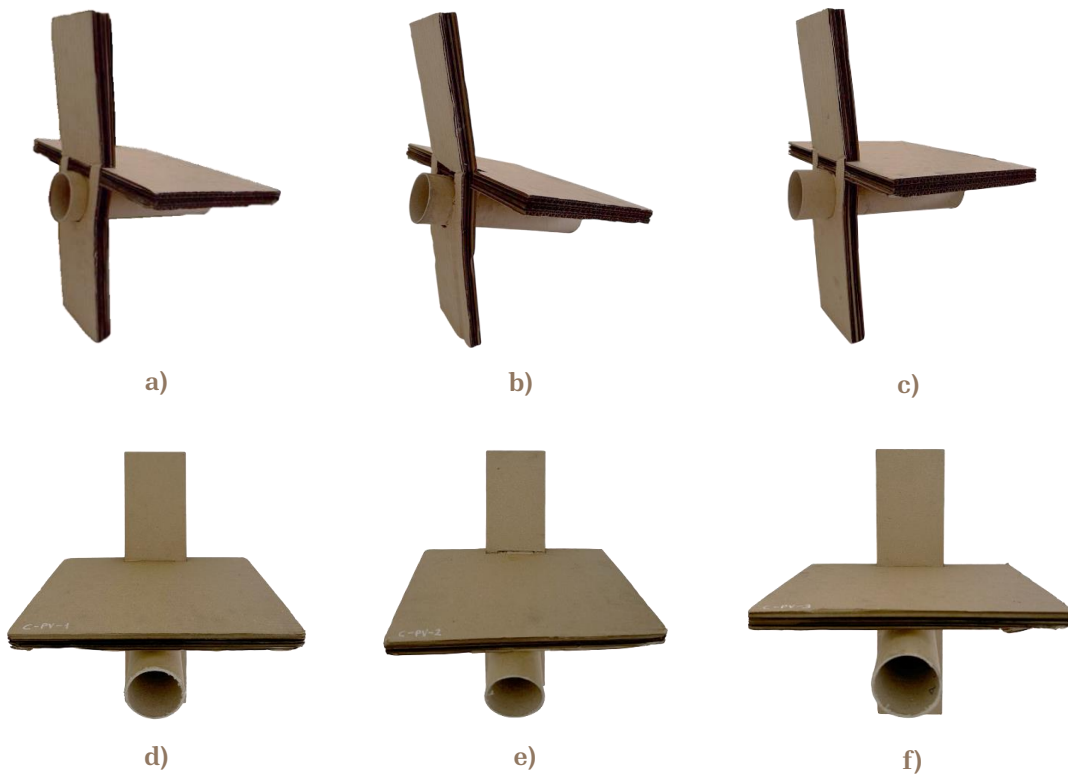


Figura 156. Probetas C-PV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Comparativa entre uniones A-PV y C-PV

La Figura 157 muestra respectivamente las uniones de tipo A-PV y C-PV permitiendo visualizar su diferencia estructural.



Figura 157. Uniones tipo A-PV y C-PV || Fuente: Elaboración propia

En el caso de las uniones A-PV, los valores máximos de fuerza se sitúan en un rango comprendido entre **0,764 kg** y **3,364 kg**, observándose la mayor resistencia en la unión A-PV-1 y la menor en A-PV-3. Las curvas (Figura 158) reflejan una dispersión significativa entre las tres muestras, tanto en la pendiente como en la duración del ensayo y el punto de fallo.

Por otro lado, las uniones C-PV, que incorporan un pasador cilíndrico, presentan una respuesta mecánica más elevada. Los valores máximos de fuerza se encuentran entre **2,547 kg** y **4,942 kg**, siendo este último el valor más alto registrado entre todas las uniones analizadas. Las curvas (Figura 158) correspondientes a C-PV muestran pendientes más estables en comparación con las A-PV, lo que indica un mejor rendimiento estructural.

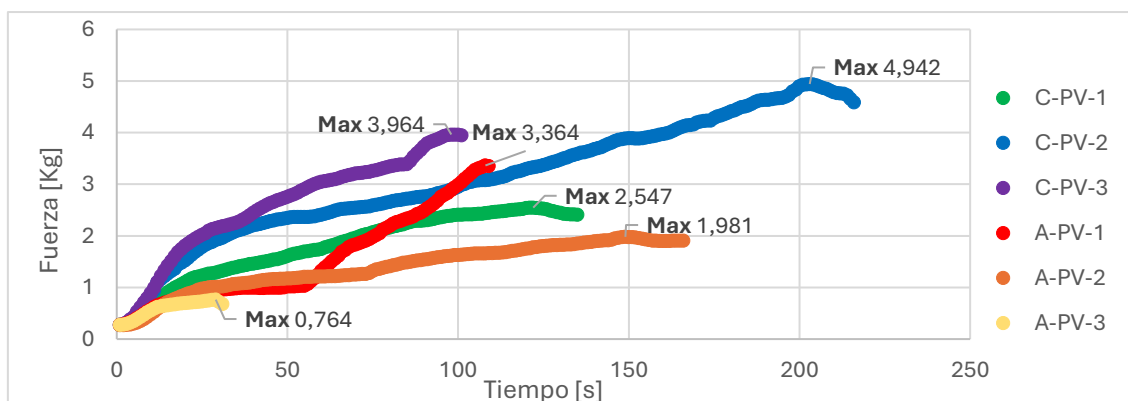


Figura 158. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PV-1/2/3 y C-PV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

Resultados

La Tabla 48 recoge los resultados obtenidos a partir de los ensayos de flexión en configuración de voladizo para las uniones tipo A-PV y C-PV. En ella se presentan, para cada probeta, la **fuerza máxima** registrada durante el ensayo, el **momento flector** correspondiente, el **momento de inercia** de la sección (común a todas las muestras por compartir geometría), y la **tensión máxima de flexión** calculada. El desarrollo detallado de los cálculos realizados se expone en el **Anexo 3 - Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones**.

Tabla 48. Parámetros calculados para A-PV y C-PV

Probeta	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
A-PV-1	33,001	5940,18	131220	0,407
A-PV-2	19,434	3498,12	131220	0,240
A-PV-3	7,495	1349,10	131220	0,093
C-PV-1	24,986	4497,48	131220	0,308
C-PV-2	48,481	8726,58	131220	0,599
C-PV-3	38,887	6999,66	131220	0,480

Se aprecia una clara diferencia entre ambas configuraciones: **las uniones C-PV alcanzan tensiones máximas superiores respecto a las A-PV**. Esta diferencia sugiere una mayor capacidad resistente y, potencialmente, una mejor eficiencia estructural en el diseño de las uniones C-PV.

4.5. Tratamiento estadístico de los resultados

4.5.1. Cálculo de parámetros estadísticos

Con el objetivo de analizar la consistencia de los datos obtenidos en los ensayos experimentales de flexión y garantizar la validez de las conclusiones extraídas, se ha aplicado un tratamiento estadístico conforme a la norma **UNE 66040:2003**. Esta norma establece el procedimiento para la evaluación de propiedades físicas mediante estadísticos descriptivos, definiendo los criterios para el cálculo de:

- Media aritmética
- Desviación típica
- Coeficiente de variación (%)
- Límites superior e inferior estimados

Media aritmética

Después de descartar cualquier resultado dudoso, la serie comprende n medidas x_i (con $i = 1, 2, 3, \dots, n$), algunas de las cuales pueden tener el mismo valor. La media m de la distribución normal se estima mediante la media aritmética \bar{x} de los n datos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Desviación típica

La estimación de la desviación típica s , calculada mediante la suma de los cuadrados de las desviaciones respecto de la media aritmética, viene dada por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Resultados

donde:

x_i es el valor de la medida i-ésima ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

n es el número total de medidas;

\bar{x} es la media aritmética de las n medidas.

Coefficiente de variación

Indica la dispersión relativa; si es $<10\%$ se considera buena repetibilidad.

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$CV = \left(\frac{\bar{x}}{s}\right) \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Intervalo de confianza del 95% (límite superior e inferior)

El intervalo de confianza bilateral para la media de una población se define mediante:

$$IC = \bar{x} \pm t_{(0,975,n-1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde los valores de $t_{0,975}$ se obtienen de la Tabla 49.

Tabla 49. Valores de $t_{1-\alpha}$ extraído de la norma UNE 66040:2003

	Nivel de confianza caso bilateral		Nivel de confianza caso unilateral	
	95%	99%	95%	99%
n	$t_{0,975}$	$t_{0,995}$	$t_{0,95}$	$t_{0,99}$
2	12,71	63,66	6,314	31,82
3	4,303	9,925	2,920	6,965
4	3,182	5,841	2,353	4,541
5	2,776	4,604	2,132	3,747
6	2,571	4,032	2,015	3,365

4.5.2. Unión A-HHV

A continuación, se presenta el tratamiento estadístico para las uniones tipo A-HHV, aplicando las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente, donde el subgrupo 1 corresponde a la pieza principal y el subgrupo 2 a la pieza auxiliar:

Media aritmética

$$\bar{x}_1 = \frac{0,394 + 0,397 + 0,317}{3} = 0,369 \text{ MPa}$$

$$\bar{x}_2 = \frac{0,08 + 0,081 + 0,065}{3} = 0,075 \text{ MPa}$$

Desviación típica

$$s_1 = \sqrt{\frac{(0,394 - 0,369)^2 + (0,397 - 0,369)^2 + (0,317 - 0,369)^2}{2}} = 0,0453 \text{ MPa}$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{(0,08 - 0,075)^2 + (0,081 - 0,075)^2 + (0,065 - 0,075)^2}{2}} = 0,009 \text{ MPa}$$

Coefficiente de variación

$$CV_1 = \left(\frac{0,0453}{0,369} \right) \times 100 = 12,29 \%$$

$$CV_2 = \left(\frac{0,009}{0,075} \right) \times 100 = 11,96 \%$$

Los coeficientes de variación superan ligeramente el umbral del 10 %, lo que indica una repetibilidad algo limitada.

Intervalo de confianza del 95% (límite superior e inferior)

$$IC_1 = 0,369 \pm 4,303 \cdot \frac{0,0453}{\sqrt{3}}$$

$$IC_2 = 0,075 \pm 4,303 \cdot \frac{0,009}{\sqrt{3}}$$

Límite inferior 1 = 0,256 MPa; Límite superior 1 = 0,482MPa

Límite inferior 2 = 0,053 MPa; Límite superior 2 = 0,097 MPa

Resultados**4.5.3. Unión B-HHV**

A continuación, se presenta el tratamiento estadístico para las uniones tipo B-HHV, aplicando las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente, donde el subgrupo 1 corresponde a la pieza principal y el subgrupo 2 a la pieza auxiliar:

Media aritmética

$$\bar{x}_1 = \frac{0,393 + 0,370 + 0,338}{3} = 0,367 \text{ MPa}$$

$$\bar{x}_2 = \frac{0,08 + 0,075 + 0,069}{3} = 0,075 \text{ MPa}$$

Desviación típica

$$s_1 = \sqrt{\frac{(0,393 - 0,367)^2 + (0,370 - 0,367)^2 + (0,338 - 0,367)^2}{2}} = 0,0276 \text{ MPa}$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{(0,08 - 0,075)^2 + (0,075 - 0,075)^2 + (0,069 - 0,075)^2}{2}} = 0,0055 \text{ MPa}$$

Coefficiente de variación

$$CV_1 = \left(\frac{0,0276}{0,367} \right) \times 100 = 7,53 \%$$

$$CV_2 = \left(\frac{0,0055}{0,075} \right) \times 100 = 7,36 \%$$

Los valores son inferiores 10%, lo que indica una repetibilidad aceptable.

Intervalo de confianza del 95% (límite superior e inferior)

$$IC_1 = 0,367 \pm 4,303 \cdot \frac{0,0276}{\sqrt{3}}$$

$$IC_2 = 0,075 \pm 4,303 \cdot \frac{0,0055}{\sqrt{3}}$$

Límite inferior 1 = 0,298 MPa; Límite superior 1 = 0,436 MPa

Límite inferior 2 = 0,061 MPa; Límite superior 2 = 0,089 MPa

4.5.4. Unión A-PH

A continuación, se presenta el tratamiento estadístico para las uniones tipo A-PH, aplicando las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente:

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{0,328 + 0,200 + 0,323}{3} = 0,2837 \text{ MPa}$$

Desviación típica

$$s = \sqrt{\frac{(0,328 - 0,2837)^2 + (0,200 - 0,2837)^2 + (0,323 - 0,2837)^2}{2}} = 0,0725 \text{ MPa}$$

Coefficiente de variación

$$CV = \left(\frac{0,0725}{0,2837} \right) \times 100 = 25,55 \%$$

Este valor supera el 10%, lo que indica una repetibilidad moderadamente baja.

Intervalo de confianza del 95% (límite superior e inferior)

$$IC = 0,2837 \pm 4,303 \cdot \frac{0,0725}{\sqrt{3}}$$

Límite inferior = 0,104 MPa; Límite superior = 0,464 MPa

Resultados

4.5.5. Unión B-PH

A continuación, se presenta el tratamiento estadístico para las uniones tipo B-PH, aplicando las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente:

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{0,457 + 0,694 + 1,063}{3} = 0,738 \text{ MPa}$$

Desviación típica

$$s = \sqrt{\frac{(0,457 - 0,738)^2 + (0,694 - 0,738)^2 + (1,063 - 0,738)^2}{2}} = 0,3054 \text{ MPa}$$

Coefficiente de variación

$$CV = \left(\frac{0,3054}{0,738} \right) \times 100 = 41,39 \%$$

Se observa una dispersión alta entre los resultados de las probetas.

Intervalo de confianza del 95% (límite superior e inferior)

$$IC = 0,738 \pm 4,303 \cdot \frac{0,3054}{\sqrt{3}}$$

Límite inferior = -0,104 ≈ 0 MPa; Límite superior = 1,497 MPa

Nota: En el cálculo del intervalo de confianza al 95%, el límite inferior resulta negativo (-0,104 MPa). Dado que este valor no tiene significado físico en el contexto de esfuerzos de flexión, se aproxima a 0 MPa.

4.5.6. Unión A-PV

A continuación, se presenta el tratamiento estadístico para las uniones tipo A-PV, aplicando las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente:

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{0,407 + 0,240 + 0,093}{3} = 0,247 \text{ MPa}$$

Desviación típica

$$s = \sqrt{\frac{(0,407 - 0,247)^2 + (0,240 - 0,247)^2 + (0,093 - 0,247)^2}{2}} = 0,1571 \text{ MPa}$$

Coefficiente de variación

$$CV = \left(\frac{0,1571}{0,247} \right) \times 100 = 63,60 \%$$

El coeficiente de variación supera el 10%, lo que indica baja repetibilidad de los ensayos para este tipo de unión.

Intervalo de confianza del 95% (límite superior e inferior)

$$IC = 0,247 \pm 4,303 \cdot \frac{0,1571}{\sqrt{3}}$$

Límite inferior = -0.143 ≈ 0 MPa; Límite superior = 0,637 MPa

Nota: En el cálculo del intervalo de confianza al 95%, el límite inferior resulta negativo (-0,143 MPa). Dado que este valor no tiene significado físico en el contexto de esfuerzos de flexión, se aproxima a 0 MPa.

Resultados**4.5.7. Unión C-PV**

A continuación, se presenta el tratamiento estadístico para las uniones tipo C-PV, aplicando las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente:

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{0,308 + 0,599 + 0,480}{3} = 0,462 \text{ MPa}$$

Desviación típica

$$s = \sqrt{\frac{(0,308 - 0,462)^2 + (0,599 - 0,462)^2 + (0,480 - 0,462)^2}{2}} = 0,1463 \text{ MPa}$$

Coefficiente de variación

$$CV = \left(\frac{0,1463}{0,462} \right) \times 100 = 31,67 \%$$

El coeficiente de variación es superior al 10%, lo que indica una dispersión significativa.

Intervalo de confianza del 95% (límite superior e inferior)

$$IC = 0,462 \pm 4,303 \cdot \frac{0,1463}{\sqrt{3}}$$

Límite inferior = 0,099 MPa; Límite superior = 0,825 MPa

4.6. Comparativa entre resultados experimentales y el modelo de simulación

En este apartado se presenta un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en los **ensayos físicos** y los valores derivados de las **simulaciones virtuales** realizadas mediante **SolidWorks (Anexo 2 - Modelado MEF basado en resultados experimentales)**. El objetivo es validar la precisión del modelo numérico, evaluando su capacidad para predecir el comportamiento estructural real de las distintas configuraciones de unión ensayadas.

Dado que para cada tipo de unión estructural se han realizado tres ensayos físicos independientes, se utilizará el **valor medio** tanto de la **fuerza máxima** como de la **flecha máxima** como referencia experimental representativa.

Con el fin de cuantificar las diferencias entre los datos experimentales y los resultados numéricos, se calculará el **error relativo** mediante la siguiente fórmula:

$$Error (\%) = \frac{(|Valor\ experimental - Valor\ simulado|)}{Valor\ experimental} \times 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Las simulaciones desarrolladas en el entorno SolidWorks se describen en detalle en el **Anexo 2 - Modelado MEF basado en resultados experimentales**.

En la Tabla 50 se sintetizan los resultados obtenidos tanto en los ensayos experimentales como en las simulaciones numéricas, permitiendo su comparación directa y el análisis de las discrepancias mediante el cálculo del error relativo.

Resultados**Tabla 50.** Comparativa resultados experimentales y simulados

Unión	Fuerza aplicada [N]	Flecha real [mm]	Flecha simulada [mm]	Error [%]
A-HHV	58,532	30	3,72	87,60
B-HHV	58,153	83,67	3,63	95,66
A-PH	22,968	156,67	9,3	94,06
B-PH	59,718	167	24,56	85,29
A-PV	19,956	137	8,46	93,82
C-PV	37,413	129,33	5,38	95,84

Aunque en el entorno de SolidWorks se ha definido el cartón como un material ortotrópico, asignando propiedades diferenciadas por dirección, los resultados obtenidos presentan desviaciones significativas respecto a los valores experimentales, como refleja la Tabla 50. Los errores porcentuales, superiores al 85 % en todos los casos, evidencian las limitaciones del modelo virtual.

Estas discrepancias pueden atribuirse a múltiples factores: la **simplificación geométrica y material** del modelo frente a la estructura real multicapa del cartón (tres láminas y seis ondas internas unidas mediante adhesivo), la posible imprecisión en los parámetros utilizados, y el tipo de **interacción entre los elementos** de las uniones asumido en la simulación, que no reproduce fenómenos como pequeñas holguras.

Además, el cartón corrugado presenta un comportamiento no lineal desde fases tempranas de carga, con efectos como **plastificación localizada o pandeo interno**, que no se reflejan en modelos estáticos lineales.

Un análisis detallado de estas limitaciones y sus implicaciones se incluye en el **Anexo 2 - Modelado MEF basado en resultados experimentales**.

DISCUSIONES

5

Esta discusión busca contextualizar los resultados obtenidos, partiendo de un **contraste con la literatura técnica existente**, con el objetivo de identificar puntos de coincidencia o divergencia respecto a estudios previos, donde se abordan aspectos como la influencia de la geometría, el tipo de refuerzo o la orientación de la onda, entre otros. Tras ello, se establecerá un **análisis comparativo entre las distintas configuraciones de uniones** estructurales ensayadas. Finalmente, se expondrán las principales **limitaciones del estudio**, y se propondrán **recomendaciones para trabajos futuros** que permitan mejorar la caracterización del cartón como material estructural, optimizar el diseño de uniones, y avanzar hacia aplicaciones prácticas en el ámbito del mobiliario.

5.1. Comparación de los resultados con estudios previos

Para entender en profundidad el alcance de los resultados es necesario contrastar los resultados obtenidos con teorías existentes y estudios previos. A través de este contraste, se busca evaluar la validez de las hipótesis planteadas e identificar coincidencias o divergencias relevantes. El análisis, estructurado de forma progresiva **desde el comportamiento del material base hasta las implicaciones funcionales**, permite establecer relaciones entre la experimentación y el conocimiento consolidado, ofreciendo nuevas evidencias que pueden confirmar, ampliar o desafiar los marcos teóricos consultados.

Para comprender adecuadamente el rendimiento de las uniones, es necesario comenzar por el análisis del **cartón como material estructural**. Su **naturaleza ortotrópica**, la **sensibilidad a la humedad** y la **variabilidad de su composición** influyen directamente en los resultados. La **geometría ondulada**, la **orientación de las fibras** y la **disposición multicapa** determinan en gran medida la **rigidez**, la **deformabilidad** y la **repetibilidad** de los ensayos. Los resultados experimentales han puesto de manifiesto que, incluso en configuraciones geométricas similares, existen **diferencias sustanciales en carga máxima y deformación**, lo cual refuerza lo señalado por Garbowski et al. (2020), Zulaikah et al. (2023) y Sekulić (2013) sobre la necesidad de tratar el

Discusiones

cartón como un **sistema multicapa anisotrópico**. La **sensibilidad ambiental**, evidenciada en la posible absorción de humedad, también se refleja en los comportamientos observados, alineándose con lo descrito por Fadji et al. (2017) y Gospodinov et al. (2011).

Los resultados apuntan, además, a que la **orientación de las cargas respecto a la dirección de la onda del cartón** afecta la rigidez y la resistencia. En algunas configuraciones se ha observado una **deformación progresiva seguida de una rotura abrupta o delaminación**, lo que remite a un **comportamiento no lineal característico**, también descrito por Zulaikah et al. (2023). Estas observaciones reafirman que un diseño eficaz no solo debe atender a la **geometría de la unión**, sino también a la **dirección del material** y al **tipo de carga esperada**. Esta influencia ha quedado reflejada en los ensayos de las probetas **L1, L2, T1 y T2**, donde se ha estudiado el efecto combinado de la **dirección de la onda** (L para longitudinal, T para transversal) y del tipo de sujeción y aplicación de la carga (1 para configuración biempotrada, 2 para voladizo). En la Figura 159 se representa comparativamente la fuerza máxima alcanzada en estos cuatro casos, lo que permite visualizar el impacto de la orientación de las cargas respecto a la dirección de la onda en el comportamiento estructural del cartón.

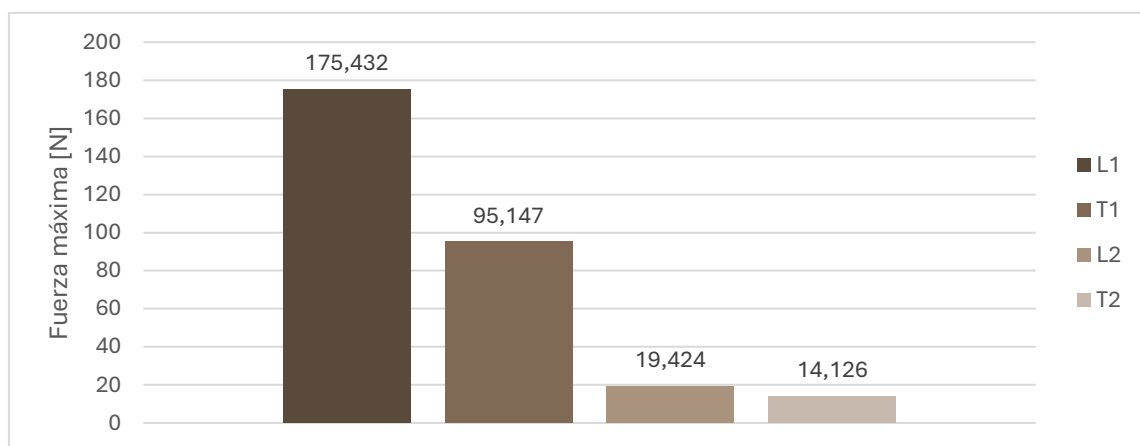


Figura 159. Gráfica comparativa L1, T1, L2 y T2 || Fuente: Elaboración propia

Sobre esta base material, una de las primeras comparaciones realizadas ha sido entre las **piezas continuas de cartón** (L1/2 y T1/2) y aquellas que incorporan **uniones estructurales** (A/B-HHV, A/B-PH Y A/C-PV). Esta diferenciación permite observar el impacto de introducir **discontinuidades en un material frágil**. Las probetas sin uniones L1 y T1 han resistido **cargas significativamente mayores** antes de alcanzar la rotura, en comparación con aquellas que incorporan uniones estructurales, incluso en versiones reforzadas. Esta observación coincide con lo expuesto por Karolak et al. (2020), quien destaca que los **empalmes, aunque reforzados, no igualan el rendimiento de una pieza íntegra**. No obstante, configuraciones reforzadas como las que incorporan **pasadores** (C-PV) logran mejorar notablemente su capacidad respecto a versiones simples (A-PV). La comparativa de la fuerza máxima alcanzada en cada caso se puede observar en la Figura 160.

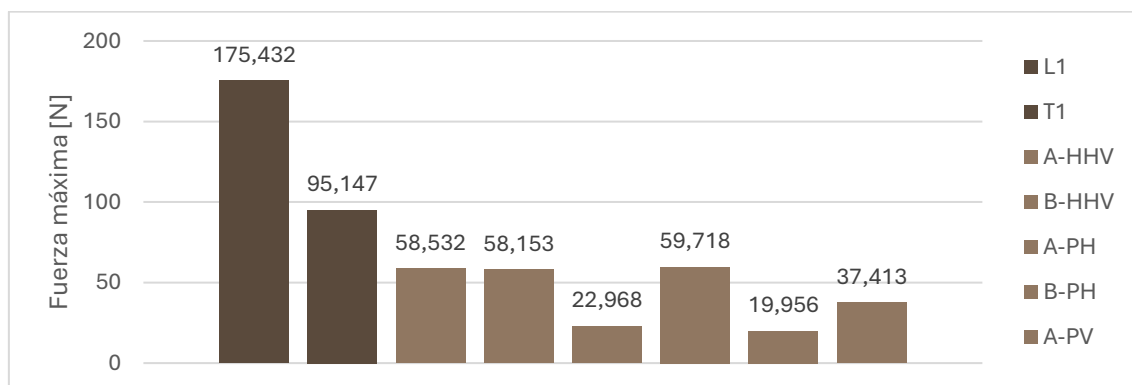


Figura 160. Gráfica comparativa de la fuerza máxima en probetas continuas y probetas con uniones || **Fuente:** Elaboración propia

En las uniones analizadas, los mecanismos de fallo predominantes han sido la **delaminación de las capas del cartón**, la **rotura súbita de la sección** y la **flexión excesiva**, con deformaciones permanentes. Estas tipologías de fallo varían según la geometría de la unión y el sistema de ensamblaje empleado. Por ejemplo, las **uniones adheridas**, como las tipo **A-HHV**, han mostrado fallos por delaminación en la zona de unión, lo cual coincide con lo descrito por Conde et al. (2012), quienes relacionan este tipo de colapso con una baja resistencia interlaminar del cartón. En cambio, en uniones como **B-HHV** o **C-PV**, donde el montaje se realiza mediante piezas o encajes, se ha observado una **rotura**

Discusiones

localizada en las zonas más delgadas o solicitadas, con escasa capacidad de redistribución de carga. Asimismo, en configuraciones como **A-PH**, se detecta una deformación progresiva sin rotura inmediata, lo que evidencia **una baja rigidez global y un colapso por flexión acumulada**. En conjunto, estos modos de fallo reflejan tanto las **limitaciones del material multicapa** como la **influencia del método de ensamblaje**. En la Figura 161 se ilustran algunos ejemplos representativos: fallo por delaminación en A-HHV, flexión excesiva en A-PH y rotura súbita en B-HHV.

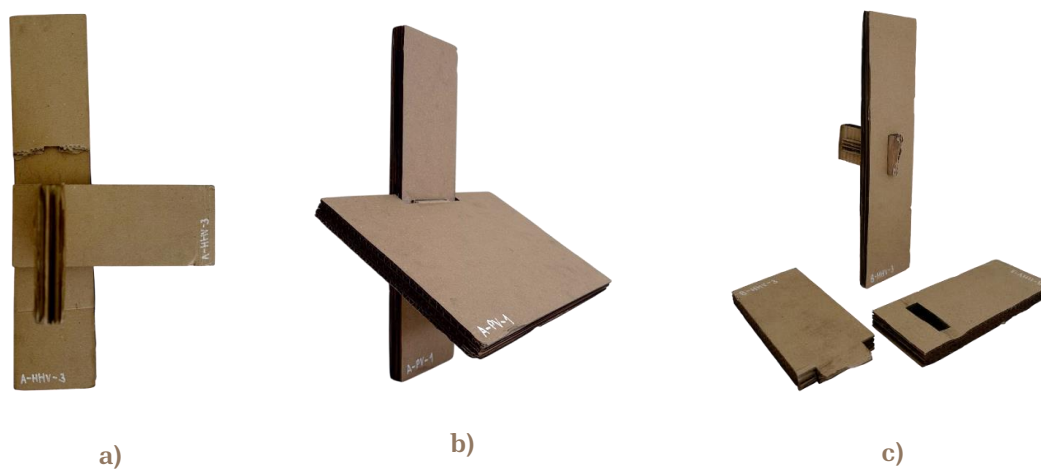


Figura 161. Modos de fallo en uniones a) A-HHV, b) A-PH, c) B-HHV || **Fuente:** Elaboración propia

El **diseño geométrico de las uniones** ha demostrado ser un factor determinante en su rendimiento estructural. La inclusión de **refuerzos**, ya sean pasadores o piezas, mejora la **distribución de esfuerzos**, la **rigidez** y la **estabilidad general** del sistema. Esta observación es consistente con lo planteado por Branco y Descamps (2015), quienes subrayan la importancia del **contacto y la fricción entre piezas** para la transmisión de cargas. Del mismo modo, los ensayos han corroborado lo expuesto por Branowski et al. (2018), donde las **uniones reforzadas** muestran un **comportamiento más estable** y una mayor capacidad de carga frente a las más simples. En la Figura 162 se compara la fuerza máxima alcanzada por las uniones sin refuerzos (A-HHV, A-PH y A-PV) frente a las uniones reforzadas (B-HHV, B-PH y C-PV), observándose que, de forma general, **las configuraciones con refuerzos presentan una mayor capacidad resistente**.

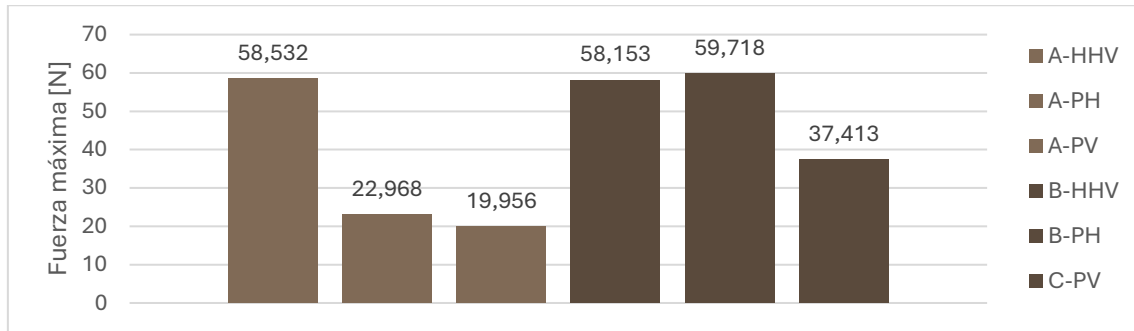


Figura 162. Gráfica comparativa de la fuerza máxima en uniones sin refuerzos y uniones reforzadas || **Fuente:** Elaboración propia

Este enfoque experimental se alinea también con la metodología de Nandanwar et al. (2013), orientada a evaluar de forma sistemática configuraciones estructurales. Los resultados de las uniones con **pasador** (C-PV) o con **piezas auxiliares** (B-PH) muestran un rendimiento superior comparado con sus versiones no reforzadas, validando la necesidad de considerar elementos de refuerzo incluso en sistemas con materiales de baja rigidez. Fasabi Pashanasi et al. (2016) también apuntan en esta línea, mostrando cómo los **refuerzos mecánicos simples** pueden extender la **vida útil de la unión** y mitigar el **fallo prematuro bajo cargas variables**.

El uso de adhesivos desempeña un papel fundamental en el comportamiento estructural de las uniones, por lo que resulta importante examinar su influencia directa en la resistencia y rigidez estructural de cada configuración. Aunque algunas uniones bien adheridas muestran buenos resultados, otras fallan de forma temprana por una **adherencia deficiente** o un **contacto superficial inadecuado**. Estas diferencias dan soporte a las ideas de Adams et al. (1997), que señalan que el rendimiento de uniones adhesivas depende no solo del tipo de adhesivo, sino del **diseño, la geometría y el contacto efectivo** entre piezas. Un ejemplo representativo es la unión A-PV, cuya elevada variabilidad en los resultados puede atribuirse, en parte, a una aplicación imprecisa del adhesivo o a deficiencias en el ensamblaje, lo que refuerza la necesidad de procedimientos más precisos. En la Figura 163 se observa la gráfica comparativa fuerza-tiempo de las probetas ensayadas de la unión A-PV y como se ha producido un fallo prematuro para la probeta A-PV-3.

Discusiones

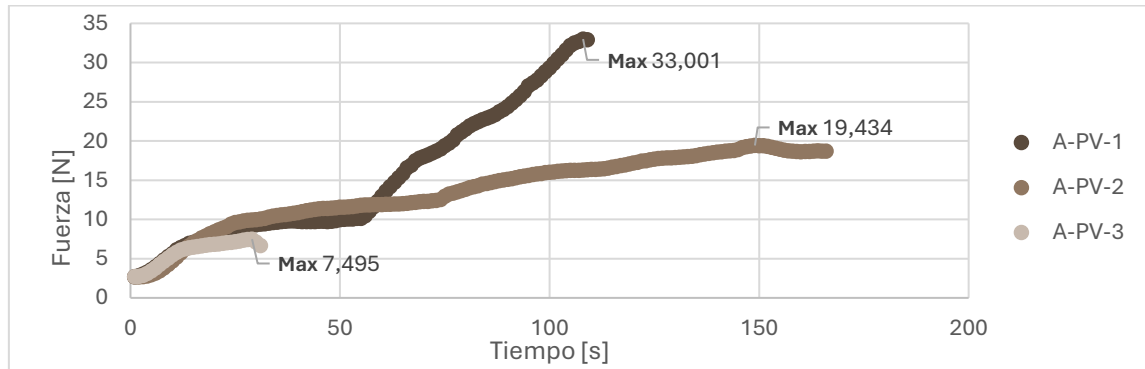


Figura 163. Gráfica comparativa fuerza-tiempo unión A-PV-1/2/3 || Fuente: Elaboración propia

Algunas de las configuraciones ensayadas se inspiran en los principios de la **carpintería tradicional**, adaptados al cartón como material estructural. Este enfoque se refleja especialmente en las **uniones tipo B**, que prescinden de adhesivos y emplean ensamblajes geométricos por presión o encaje para lograr la conexión entre piezas. Esta estrategia se alinea con la categoría de uniones “entre miembros” descrita por Šobra et al. (2015), caracterizadas por su **desmontabilidad, bajo impacto ambiental y facilidad de reutilización**. En términos conceptuales, los resultados muestran cierta coincidencia con la distinción formulada por Wu y Ho (2015) entre uniones tradicionales, generalmente más flexibles, y uniones modernas, diseñadas para ser más rígidas. Las uniones reforzadas tipo B (**B-HHV** y **B-PH**) muestran una **mayor capacidad portante** que sus versiones no reforzadas (**A-HHV** y **A-PH**), lo que respalda la idea de que el refuerzo geométrico mejora la resistencia. Sin embargo, en contraposición a lo que cabría esperar según Wu y Ho, **la flecha medida en estas uniones es mayor**, lo que indica que la rigidez estructural no siempre aumenta con el refuerzo. Esta discrepancia puede explicarse por **holguras en el ajuste de las piezas o una menor continuidad en la transmisión de esfuerzos al prescindir del adhesivo**. Por otro lado, en el caso de la unión **C-PV**, el uso de un pasador cilíndrico ha mejorado no solo la resistencia frente a su versión sin pasador (**A-PV**), sino también reduce ligeramente la flecha, mostrando un comportamiento más equilibrado. Esta comparativa se puede observar en la Figura 164, donde se representa gráficamente la flecha máxima media alcanzada en cada tipo de unión.

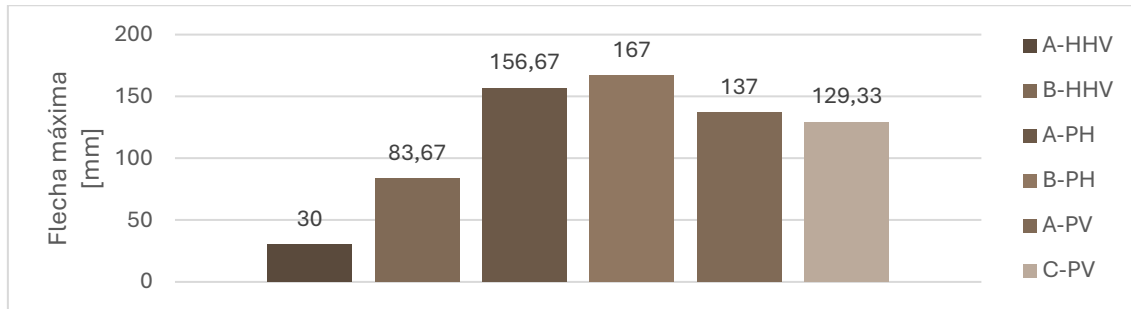


Figura 164. Gráfica comparativa de la flecha máxima media en uniones sin refuerzos y uniones reforzadas || **Fuente:** Elaboración propia

Todos estos hallazgos adquieren especial relevancia al considerar su aplicación en el **diseño de mobiliario**. Tal como destacan Zhu (2015) y Fleming (2010), este tipo de mobiliario requiere soluciones que sean **ligeras, desmontables, resistentes y sostenibles**. Las configuraciones estudiadas, especialmente aquellas sin adhesivos, que en este caso son las uniones tipo B, cumplen con estos criterios y ofrecen ventajas en términos de **montaje, coste y reciclabilidad**. Neira Ribes (2016) destaca que las uniones no solo condicionan el comportamiento estructural, sino que **definen la forma, la adaptabilidad y la sostenibilidad** del conjunto. Las uniones **sin adhesivo (tipo B)** permiten ensamblajes resistentes y reutilizables, mientras que los **refuerzos estructurales simples (tipo C)** aportan robustez sin comprometer la desmontabilidad.

En conjunto, los hallazgos experimentales permiten validar parcialmente las hipótesis planteadas, demostrando que **ciertas configuraciones inspiradas en la carpintería tradicional**, adaptadas al cartón, pueden ofrecer **un comportamiento mecánico adecuado** bajo condiciones controladas. Sin embargo, la variabilidad observada también evidencia la necesidad de seguir profundizando en **aspectos como la precisión de corte, la calidad del encolado y la orientación de las fibras**, para así optimizar el diseño de uniones y garantizar **mayor fiabilidad estructural**. Estos aspectos son clave para avanzar hacia el desarrollo de un **mobiliario fabricado íntegramente en cartón**.

5.2. Comportamiento mecánico observado en los ensayos

Una vez contextualizados los resultados en el marco teórico de referencia, procede examinar en detalle su comportamiento estructural específico dentro del estudio. Con el objetivo de identificar cuáles son las configuraciones más eficientes desde el punto de vista estructural, a continuación, se analiza comparativamente el comportamiento mecánico de las diferentes uniones ensayadas. Este análisis se basa en los resultados obtenidos en los ensayos físicos, resumidos en la Tabla 51, y considera parámetros clave como la fuerza máxima soportada, la tensión generada y la flecha experimentada por cada probeta. Dado que para cada tipo de unión estructural se han realizado tres ensayos físicos independientes, se utilizará el valor medio de los parámetros obtenidos.

Tabla 51. Resultados de los ensayos experimentales

Tipo unión	Fuerza máx. [N]	Tensión máx. [MPa]	Flecha máx. [mm]
A-HHV	58,532	0,369	30
B-HHV	58,153	0,367	83,67
A-PH	22,968	0,284	156,67
B-PH	59,718	0,738	167
A-PV	19,956	0,247	137
C-PV	37,413	0,462	129,33

La unión **A-HHV** muestra el **comportamiento más rígido del conjunto**. Soporta una **fuerza máxima de 58,532 N**, con una **tensión de 0,369 MPa** y una **flecha de 30 milímetros**. Esta combinación evidencia un sistema con alta eficiencia estructural, en el que se alcanza un **equilibrio óptimo entre resistencia y rigidez**. La baja deformación sugiere una adecuada transmisión de esfuerzos y una buena adhesión en la unión. Por su parte, la unión **B-HHV**

registra una **fuerza máxima similar (58,153 N)** y una **tensión prácticamente idéntica (0,367 MPa)**, pero con una **flecha considerablemente mayor (83,67 mm)**. Aunque ambas comparten un buen comportamiento resistente, la diferencia en rigidez apunta a un comportamiento menos estable en B-HHV, debido al ensamblaje. En la unión A-HHV se utiliza **adhesivo** para fijar las piezas, lo que permite una distribución más homogénea de los esfuerzos y un contacto continuo entre superficies. En cambio, la unión B-HHV recurre a una **pieza auxiliar** para el acoplamiento entre elementos, prescindiendo del uso de adhesivo. Este tipo de ensamblaje puede dar lugar a ligeras holguras reduciendo la capacidad del sistema para transmitir cargas de forma eficiente. Adicionalmente, la configuración de la unión B-HHV exige un **vaciado en la espiga** para insertar la pieza auxiliar, lo que disminuye el área resistente efectiva respecto a A-HHV. Esta reducción de superficie limita la capacidad de la unión para transmitir los esfuerzos de forma uniforme. A ello se suma que la cuña concentra la carga en zonas específicas de apoyo, en lugar de distribuirla de manera continua como ocurre en la unión adherida. Como consecuencia, la transferencia de esfuerzos resulta más localizada y la rigidez global del sistema se ve reducida, aun cuando la resistencia máxima registrada se mantenga prácticamente equivalente a la de la configuración con adhesivo.

La unión **B-PH** registra la **mayor fuerza máxima (59,718 N)** y la **tensión más elevada (0,738 MPa)**, lo que pone de manifiesto una elevada capacidad portante. No obstante, presenta también la **flecha más alta (167 mm)**, lo cual indica una menor rigidez estructural. En comparación, la unión **A-PH**, perteneciente a la misma categoría, pero sin elementos de refuerzo, presenta una **capacidad resistente considerablemente inferior (22,968 N y 0,284 MPa)**, aunque conserva una **flecha igualmente elevada (156,67 mm)**. La notable diferencia en carga soportada entre ambas pone de relieve el efecto del refuerzo en la mejora de la resistencia, aun cuando la deformabilidad se mantiene elevada en ambos casos.

Discusiones

Las uniones tipo PV muestran un comportamiento menos favorable en términos de resistencia. La configuración A-PV alcanza la **menor fuerza máxima del conjunto (19,956 N)** y una de las **tensiones más bajas (0,247 MPa)**, acompañadas de una **flecha elevada (137 mm)**. Este rendimiento sugiere un diseño con limitaciones tanto en resistencia como en rigidez, posiblemente vinculado a una unión adhesiva deficiente o a una configuración poco eficiente. La unión C-PV, que incluye un pasador como refuerzo, mejora su comportamiento respecto a A-PV. Registra una **fuerza máxima de 37,413 N** y una **tensión de 0,462 MPa**, casi duplicando la capacidad de su equivalente sin refuerzo. No obstante, mantiene una **flecha considerable (129,33 mm)**, lo que indica que, si bien el refuerzo con pasador incrementa la capacidad de carga, no logra reducir de manera significativa la deformabilidad del sistema, evidenciando que el diseño sigue presentando una **rigidez limitada**.

En términos globales, **las uniones reforzadas (B-HHV, B-PH, C-PV) superan a sus versiones no reforzadas (A-HHV, A-PH, A-PV)** en términos de resistencia y tensión máxima, aunque no siempre presentan una reducción significativa en la deformación. La unión A-HHV constituye una excepción, logrando simultáneamente **alta resistencia y baja flecha**, lo que la posiciona como la solución más equilibrada y eficiente del estudio. En conjunto, estos resultados evidencian la influencia decisiva de la geometría de la unión, el tipo de refuerzo y el método de ensamblaje en el comportamiento estructural de sistemas contruidos con cartón.

A partir del análisis detallado de cada configuración, donde se han puesto de manifiesto las diferencias en resistencia y rigidez entre uniones reforzadas y no reforzadas, se procede a sintetizar estos resultados de forma gráfica. Con el objetivo de clasificar las uniones ensayadas en función de su desempeño estructural, se han definido dos valores de referencia. Para establecer los límites de los cuadrantes se han utilizado valores de referencia derivados de la propia distribución experimental, tomando la **mediana (Q2)** como criterio en ambos ejes. Esta elección se justifica porque la mediana es una

medida robusta frente a valores extremos y, en conjuntos de tamaño reducido como el presente ($n = 6$), proporciona un valor central más representativo que la media.

En el caso de la **fuerza máxima**, los valores obtenidos son: 19,956 N – 22,968 N – 37,413 N – 58,153 N – 58,532 N – 59,718 N. La mediana corresponde al promedio de los dos valores centrales, es decir, $(37,413 + 58,153) / 2 = 47,783$ N (≈ 48 N). Para la **flecha máxima**, los resultados ordenados son: 30,00 mm – 83,67 mm – 129,33 mm – 137,00 mm – 156,67 mm – 167,00 mm. La mediana se obtiene igualmente como el promedio de los dos valores centrales: $(129,33 + 137,00) / 2 = 133,165$ mm (≈ 133 mm).

En la Figura 165 se representa un gráfico de cuadrantes que relaciona la fuerza máxima con la flecha máxima de cada unión, permitiendo clasificar su comportamiento estructural según la combinación de resistencia y rigidez alcanzada. Se representan los dos parámetros fundamentales del estudio: la **fuerza máxima** en el eje Y, que define la capacidad resistente de cada unión, y la **flecha máxima** en el eje X, que refleja su rigidez estructural. Valores elevados en el eje Y corresponden a uniones capaces de soportar mayores cargas, mientras que valores reducidos en el eje X indican una menor deformabilidad y, por tanto, un mejor control de la rigidez. La combinación de ambos ejes permite clasificar los resultados en cuatro escenarios diferenciados: El **cuadrante superior izquierdo** agrupa las configuraciones óptimas, caracterizadas por **alta resistencia y baja deformación**, que representan el equilibrio entre rigidez y capacidad portante. En el **cuadrante superior derecho** se sitúan las uniones **resistentes pero deformables**, capaces de soportar cargas elevadas, aunque una elevada flecha. El **cuadrante inferior izquierdo** corresponde a uniones **rígidas, pero poco resistentes**, que limitan adecuadamente la deformación, pero no alcanzan niveles suficientes de resistencia estructural. Finalmente, el **cuadrante inferior derecho** integra las configuraciones más desfavorables, que combinan **baja resistencia con alta deformabilidad** y se consideran, por tanto, el peor escenario desde el punto de vista estructural.

Discusiones

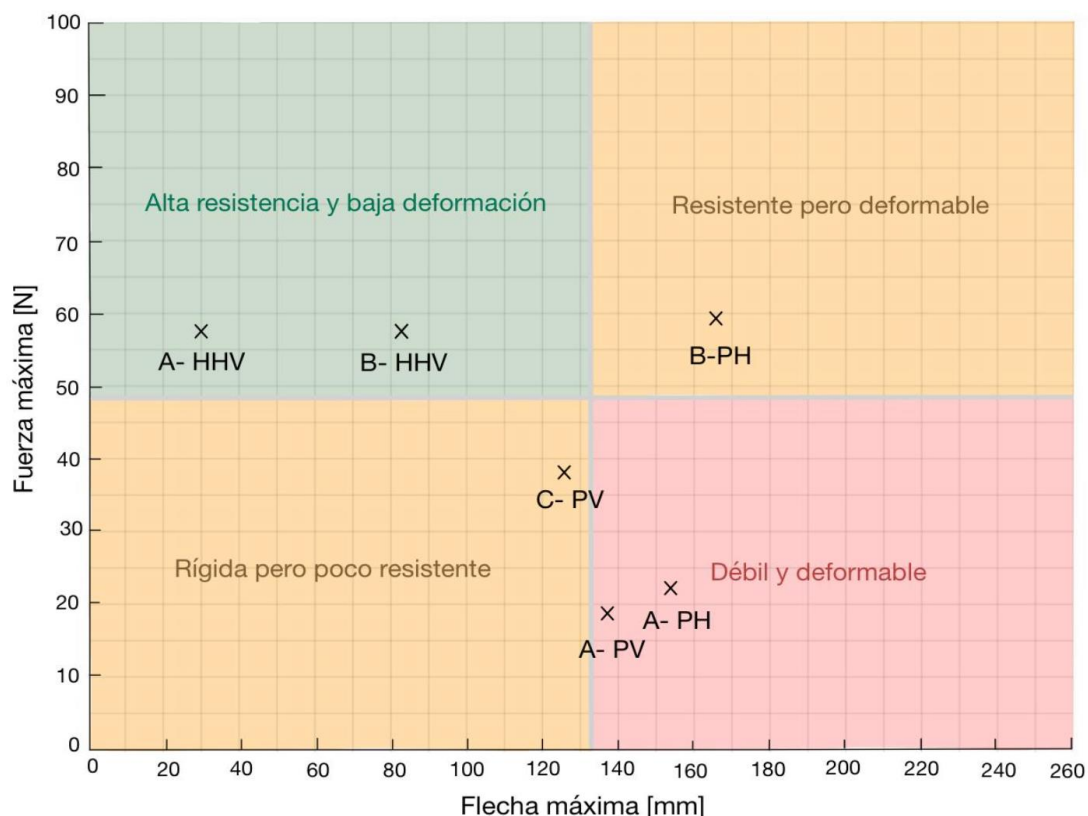


Figura 165. Clasificación del comportamiento estructural de las uniones en función de la fuerza y la flecha máximas || Fuente: Elaboración propia

Las uniones **A-HHV** y **B-HHV** se ubican en la zona óptima, combinando elevada resistencia con una deformación reducida, lo que las convierte en las configuraciones más equilibradas del conjunto. En el extremo superior derecho se encuentra la unión **B-PH**, que alcanza la mayor capacidad portante, pero acompañada de la deformación más elevada, reflejando un compromiso entre alta resistencia y baja rigidez. Por su parte, la unión **C-PV** se ubica en el cuadrante de configuraciones rígidas, pero con baja resistencia. En comparación con la versión **A-PV**, el refuerzo con pasador incrementa de manera significativa la capacidad resistente, aunque la deformación máxima se mantiene en valores similares. Esto evidencia que, si bien el pasador mejora la transmisión de esfuerzos y retrasa el fallo, no logra modificar de forma sustancial la deformabilidad global del sistema. Finalmente, las uniones **A-PH** y **A-PV** se localizan en el cuadrante inferior derecho, lo que evidencia un desempeño estructural desfavorable, con baja resistencia y elevada deformabilidad.

5.3. Limitaciones del estudio

Pese a los avances obtenidos y la validez parcial de las hipótesis planteadas, este estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, el cartón corrugado, por su propia naturaleza, muestra una variabilidad que afecta directamente a los resultados experimentales. Factores como la **humedad ambiental**, la **densidad del papel**, la **orientación de las fibras** o incluso diferencias entre lotes del mismo fabricante pueden influir en el comportamiento mecánico, afectando la repetibilidad y la comparabilidad entre muestras.

Asimismo, el **montaje manual de las uniones** introduce una posible fuente de variación en los resultados. La **aplicación del adhesivo**, al no haberse realizado bajo condiciones técnicas controladas (como presión constante o cantidad dosificada), ha podido generar **zonas de contacto irregulares** o **fallos interlaminares** prematuros. Esto se refleja en la **dispersión de los resultados** observada en algunos casos, como las uniones B-PH y A-PV, donde la **fuerza máxima alcanzada varió considerablemente entre las tres repeticiones**.

Desde el punto de vista de la simulación, también se identifican restricciones relevantes. Aunque el modelo numérico ha considerado un **material ortotrópico lineal**, el comportamiento real del cartón corrugado es **altamente no lineal** e incluye fenómenos como **pandeo local**, **plastificación progresiva** o **interacciones complejas en las zonas de contacto**, difíciles de replicar con precisión mediante un análisis estático lineal en SolidWorks. Además, el software no permite simular de forma detallada ciertos **efectos** como **microdeslizamientos**, **holguras de ensamblaje** o **fallos adhesivos localizados**, los cuales sí pueden tener un impacto considerable en el comportamiento estructural observado en los ensayos físicos.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero sí sugieren la necesidad de **profundizar en futuras investigaciones** con un mayor control experimental y modelos de simulación más avanzados, para lograr una mayor precisión y fiabilidad.

5.4. Recomendaciones para trabajos futuros

A partir de las limitaciones detectadas y los hallazgos alcanzados, se proponen varias líneas de trabajo para futuras investigaciones que busquen optimizar el diseño estructural con cartón corrugado:

- **Mejorar el control experimental:** Se recomienda estandarizar el proceso de montaje, especialmente en lo relativo a la aplicación del adhesivo (cantidad, presión y tiempo de curado), para reducir la variabilidad entre probetas y obtener resultados más consistentes.
- **Incrementar el número de repeticiones por configuración:** Un mayor número de muestras por tipo de unión permitiría realizar análisis estadísticos más robustos y detectar patrones de fallo.
- **Explorar nuevas geometrías de unión:** Investigar otras soluciones que puedan mejorar la rigidez sin necesidad de adhesivos ni refuerzos.
- **Optimizar el método de corte del cartón:** El corte láser genera ligeras holguras que afectan al ajuste de las uniones, por lo que se recomienda explorar métodos alternativos como el troquelado mecánico o el corte por presión, más habituales en la fabricación industrial de cartón.
- **Ampliar el estudio a solicitaciones dinámicas o cíclicas:** Los ensayos realizados han sido estáticos. Evaluar el comportamiento de las uniones frente a cargas repetitivas o impactos permitiría determinar su durabilidad y adecuación para usos reales en mobiliario.
- **Mejorar la modelización numérica:** Hacer uso de modelos no lineales que consideren el comportamiento multicapa, así como una representación más realista de las uniones con contacto, fricción y posibles fallos adhesivo.
- **Evaluar el comportamiento estructural de conjuntos completos:** Aplicar los tipos de unión estudiados a estructuras completas de mobiliario y evaluar su comportamiento global bajo cargas reales de uso.

CONCLUSIONES

6

El estudio realizado ha tenido como finalidad **evaluar el comportamiento mecánico de diferentes configuraciones de uniones estructurales en cartón corrugado**, con el fin de identificar soluciones viables para su aplicación en mobiliario. Para ello, se han diseñado y ensayado **seis tipologías de unión** bajo condiciones controladas, analizando parámetros clave como la fuerza máxima alcanzada, la tensión generada y la flecha experimentada por cada probeta.

El desarrollo experimental ha permitido constatar que **las uniones reforzadas han mostrado en general una mayor resistencia que las no reforzadas**, confirmando la relevancia del refuerzo geométrico en la mejora del desempeño estructural. Sin embargo, se ha comprobado que este incremento de resistencia no siempre se ha acompañado de una reducción en la deformabilidad, lo que refleja la complejidad de alcanzar simultáneamente altos niveles de capacidad portante y rigidez en un material como el cartón.

De manera particular, se ha identificado que la unión **A-HHV ha sido la configuración más equilibrada y eficiente del estudio**, al lograr soportar una elevada carga (58,532 N) con una flecha de 30 mm. Este comportamiento ha puesto de manifiesto la importancia del adhesivo como elemento de transmisión continua de esfuerzos, garantizando tanto la resistencia como la rigidez de la unión. Por el contrario, la unión **B-PH**, aunque ha alcanzado la mayor fuerza máxima (59,718 N), se ha visto penalizada por presentar la flecha más elevada (167 mm), lo que la convierte en una solución **resistente pero excesivamente flexible**. Las uniones **A-PH y A-PV se han situado como las menos favorables**, al combinar baja resistencia con elevada deformación, mientras que la unión **C-PV ha mostrado una mejora parcial respecto a A-PV**, duplicando su capacidad de carga, aunque sin abandonar el rango de deformabilidad excesiva.

Asimismo, se ha puesto de manifiesto que la geometría, el método de ensamblaje y la orientación de la onda del cartón han influido de forma decisiva en los resultados. Las uniones adheridas han mostrado fallos por delaminación,

Conclusiones

mientras que las ensambladas mediante presión o refuerzos mecánicos han fallado por roturas localizadas o flexión acumulada. Estas observaciones han permitido confirmar que la variabilidad intrínseca del cartón, junto con la precisión en el montaje, condiciona en gran medida el comportamiento estructural de las uniones.

El estudio ha aportado un valor añadido al demostrar que el cartón corrugado, cuando se diseña con uniones adecuadas, puede constituir una alternativa viable para estructuras ligeras y sostenibles. Estos hallazgos han permitido validar parcialmente la hipótesis inicial y sientan las bases para continuar avanzando en el diseño de mobiliario de cartón, incorporando mejoras en la precisión de corte, la estandarización del montaje y la exploración de nuevas geometrías inspiradas en la carpintería tradicional.

No obstante, para valorar la aplicabilidad real de las uniones ensayadas en el contexto del mobiliario, resulta pertinente contrastar los resultados con los requisitos normativos que regulan la resistencia de las sillas de uso doméstico. La comparación con la **norma UNE-EN 12520**, relativa a la resistencia y durabilidad de asientos de uso doméstico, debe interpretarse con cautela, dado que los ensayos realizados en este trabajo no reproducen el comportamiento global de una silla completa, sino únicamente el de uniones aisladas sometidas a carga en configuración de voladizo. La norma establece, entre otros requisitos, la aplicación de cargas verticales de hasta **1300 N** sobre el asiento. En un escenario simplificado, dicha carga se transmite y reparte entre las cuatro patas, lo que implica que cada nudo de unión debería ser capaz de resistir del orden de **325 N** para garantizar la integridad estructural del conjunto.

Si se toma este valor como referencia, la comparación se realiza calculando el cociente entre la fuerza máxima alcanzada experimentalmente por cada unión y la carga normativa estimada de 325 N. De este modo, las uniones más eficientes del estudio, como **B-PH (59,718 N)**, **A-HHV (58,532 N)** y **B-HHV (58,153 N)**, alcanzan aproximadamente un **18 % del valor requerido**

($59 / 325 \approx 0,18$). La unión **C-PV**, con **37,413 N**, se sitúa en torno al **11 %**, mientras que las configuraciones menos favorables (**A-PH** con **22,968 N** y **A-PV** con **19,956 N**) no superan el **7 %** y **6 %**, respectivamente. De este modo, incluso las configuraciones más eficientes apenas alcanzan una quinta parte (**≈60 N frente a los 325 N de referencia**) de la resistencia mínima que debería garantizar cada unión en una silla convencional. Este resultado indica que, para alcanzar la aplicabilidad normativa, la capacidad portante de las uniones debería **incrementarse en un factor del orden de 5 a 6 veces** sobre los valores obtenidos en los ensayos.

Es importante señalar que esta comparación no puede considerarse estrictamente equivalente, ya que el **ensayo en voladizo** concentra toda la sollicitación en un único plano de unión, generando un **momento flector y un estado tensional más severo** que el que se produciría en el uso real de la silla, donde la carga se redistribuye entre varios apoyos y uniones simultáneamente. Aun teniendo en cuenta esta diferencia, los resultados evidencian que las configuraciones actuales se sitúan por debajo de los niveles de resistencia requeridos para su empleo como uniones portantes principales.

De este modo, las conclusiones apuntan a que la aplicabilidad práctica de las uniones ensayadas en mobiliario estructural requiere incrementar su capacidad portante mediante estrategias como: (i) **reducir holguras de montaje**, (ii) **optimizar la aplicación del adhesivo** e (iii) **implementar configuraciones con múltiples uniones que actúen simultáneamente, permitiendo una distribución más equilibrada de los esfuerzos**. Estas mejoras serían imprescindibles para aproximar el comportamiento observado a los niveles de carga que establece la normativa y avanzar hacia la viabilidad de sillas u otros elementos de mobiliario fabricados íntegramente en cartón corrugado.

BIBLIOGRAFÍA

7

- Adams, R. D., Comyn, J., & Wake, W. C. (1997).** *Structural adhesive joints in engineering*. Springer.
- Aira, J. R. (2013).** Análisis experimental y por el método de los elementos finitos del estado de tensiones en uniones carpinteras de empalme de llave (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- Asociación Española de Normalización. (2009).** *UNE-EN ISO 1924-2:2009. Papel y cartón — Determinación de las propiedades de tracción. Parte 2: Método con gradiente de alargamiento constante (20 mm/min) (ISO 1924-2:2008)*. AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (2023).** *UNE-EN ISO 3037:2023. Cartón ondulado. Determinación de la resistencia al aplastamiento sobre el canto (método sin impregnación de parafina)*. AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (2021).** *UNE-EN ISO 536:2021. Papel y cartón. Determinación del gramaje*. AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (2018).** *UNE-EN ISO 287:2018. Papel y cartón. Determinación del contenido de humedad de un lote. Método de secado en estufa*. AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (2014).** *UNE-EN ISO 2759:2014. Cartón. Determinación de la resistencia al estallido*. AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (2016).** *UNE-EN 12520:2016. Mobiliario. Resistencia, durabilidad y seguridad. Requisitos para asientos de uso doméstico*. AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (2013).** *UNE-EN 1728:2013. Mobiliario. Asientos. Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia y la durabilidad*. AENOR.
- Branco, J. M., & Descamps, T. (2015).** Analysis and strengthening of carpentry joints. *Construction and Building Materials*, 97, 34-47.

Bibliografía

- Branowski, B., Zabłocki, M., & Sydor, M. (2018).** Experimental analysis of new furniture joints. *BioResources*, 13(1), 370-382.
- Castañeda Aller, L. (2017).** Arquitectura para neonómadas. Reflexión sobre el habitar contemporáneo.
- Conde, I., García, B., Liarte, E., & Jiménez, M. A. (2012).** Analysis of adhesive joints in corrugated board under shear loading. *International journal of adhesion and adhesives*, 38, 50-57.
- Diarte, J., & Shaffer, M. (2021).** Cardboard Architecture: Eight Decades of Exploration in Academic Research and Professional Practice 1940-2019. *Enquiry The ARCC Journal for Architectural Research*, 18(1).
- Erdil, Y. Z., Kasal, A., & Eckelman, C. A. (2005).** Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints. *Forest products journal*, 55(12), 209.
- EsyTube. (2024).** *Choosing correct paper tube size: standard packaging options*. Recuperado de <https://esytube.com/blogs/news/choosing-correct-paper-tube-size-standard-packaging-options>
- Fadiji, T., Berry, T., Coetzee, C. J., & Opara, L. (2017).** Investigating the mechanical properties of paperboard packaging material for handling fresh produce under different environmental conditions: Experimental analysis and finite element modelling. *Journal of Applied Packaging Research*, 9(2), 3.
- Fasabi Pashanasi, H., Reyes Inca, P. P., & Angulo Ruíz, W. E. (2016).** Ensayos mecánicos para la fabricación de sillones rústicos a partir de Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) usando dos tipos de uniones.
- Fleming, E.D. (2010).** Ritsy: Flat-Pack Furniture for the Urban Nomad.
- Garbowski, T., Gajewski, T., & Grabski, J.K. (2020).** The Role of Buckling in the Estimation of Compressive Strength of Corrugated Cardboard Boxes. *Materials*, 13.

- Gospodinov, D., Stefanov, S., & Hadjiiski, V. (2011).** Use of the finite element method in studying the influence of different layers on mechanical characteristics of corrugated paperboard. *Tehnicki Vjesnik*, 18(3), 357-361.
- Hennessey, J., & Papanek, V. (1973).** *Nomadic furniture: How to build and where to buy lightweight furniture that folds, inflates, knocks down, stacks, or is disposable and can be recycled.* Pantheon Books.
- International Organization for Standardization. (2019).** *ISO 5628:2019. Paper and board — Determination of bending stiffness — General principles for two-point, three-point and four-point methods.* ISO.
- Karolak, A., Jasieńko, J., & Raszczuk, K. (2020).** Historical scarf and splice carpentry joints: state of the art. *Heritage Science*, 8, 1-19.
- Ledesma, R. G. (2013).** Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- Melo Robert, P. M. (2016).** *Cartón corrugado en el diseño de mobiliario para eventos masivos* (Bachelor's thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato).
- Nandanwar, A., Naidu, M. V., & Pandey, C. N. (2013).** Development of test methods for wooden furniture joints. *Wood Material Science & Engineering*, 8(3), 188-197.
- Neira Ribes, F. P. (2016).** *Mobiliario de cartón diseñado para ser fabricado bajo los sistemas de producción de cajas de cartón.* (Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica de Chile).
- Rudawska, A., Penkała, P., Gaska, D., Sawosz, K., & Stančeková, D. (2024).** Strength Parameters of Corrugated Cardboard and Corrugated Cardboard Joints. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(8), 333-340.

Bibliografía

- Ruiz Merino, I. (2014).** Diseño de un modelo de silla en cartón.
- Sato, H., Nakahara, Y., & Nii, K. P. (Eds.). (2000).** The complete Japanese joinery A handbook for joiners and carpentry. Hartley & Marks Publishers.
- Sekulic, B. (2013).** Structural cardboard: feasibility study of cardboard as a long-term structural material in architecture (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Šobra, K., Fonseca Ferreira, C., Riggio, M., D'Ayala, D., Arriaga, F., & Aira, J. R. (2015, September).** A new tool for the structural assessment of historic carpentry joints. In Proceedings of the 3rd international conference on structural health assessment of timber structures—SHATIS (Vol. 15).
- Van Nimwegen, S. E., & Latteur, P. (2023).** A state-of-the-art review of carpentry connections: From traditional designs to emerging trends in wood-wood structural joints. *Journal of Building Engineering*, 78, 107089.
- Wu, S. H., & Ho, M. C. (2015).** A study of the technique combining traditional bamboo furniture and carpentry. *International Journal of Social Science and Humanity*, 5(11), 985.
- Zhang, Z., Qiu, T., Song, R., & Sun, Y. (2014).** Nonlinear finite element analysis of the fluted corrugated sheet in the corrugated cardboard. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014(1), 654012.
- Zhu, Q. (2015).** Nomadic product furniture design for the modern urban nomad. Rochester Institute of Technology.
- Zulaikah, S., Triawan, F., Budiman, B. A., Romadhon, Y., & Kamaludin, D. (2023, July).** Study on the mechanical properties and behavior of corrugated cardboard under tensile and compression loads. In *Materials Science Forum* (Vol. 1092, pp. 45-54). Trans Tech Publications Ltd.

ANEXO

1

ANEXO 1. Análisis por el Método de Elementos Finitos

Este anexo recoge el desarrollo completo del análisis estructural realizado mediante el **Método de Elementos Finitos (MEF)**, empleando el software **SolidWorks Simulation** como herramienta de cálculo. El objetivo de este estudio numérico es evaluar el comportamiento mecánico de las diferentes uniones estructurales empleadas en mobiliario, con el fin de identificar aquellas configuraciones más **desfavorables** que, por su criticidad estructural, serán seleccionadas para su posterior **ensayo físico**.

Las condiciones de carga y contorno aplicadas en las simulaciones han sido establecidas conforme a las directrices recogidas en las normas **UNE-EN 12520:2016** (Requisitos de seguridad, resistencia y durabilidad para asientos de uso doméstico) y **UNE-EN 1728:2013** (Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia y durabilidad). En este contexto, se han modelado tanto los **útiles de carga** como los **valores de fuerza normalizados**.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la estructura global del modelo (silla), y posteriormente se realiza un análisis individualizado de cada una de las uniones estudiadas, evaluando sus **tensiones máximas** y **desplazamientos**. Este análisis comparativo permite establecer qué uniones presentan el comportamiento más crítico y, por tanto, deben considerarse como **candidatas para su estudio experimental**.

1.1. Estudio estructural del conjunto

1.1.1. Descripción del modelo

La silla analizada ha sido modelada en el software **SolidWorks**, replicando proporciones y geometría propias (Figura 166). El objetivo del modelo es servir como base para el análisis estructural tanto del conjunto como de sus uniones específicas. La configuración del modelo busca representar condiciones de uso habituales, permitiendo así evaluar la viabilidad del material y el comportamiento mecánico de las uniones en un entorno estructural.

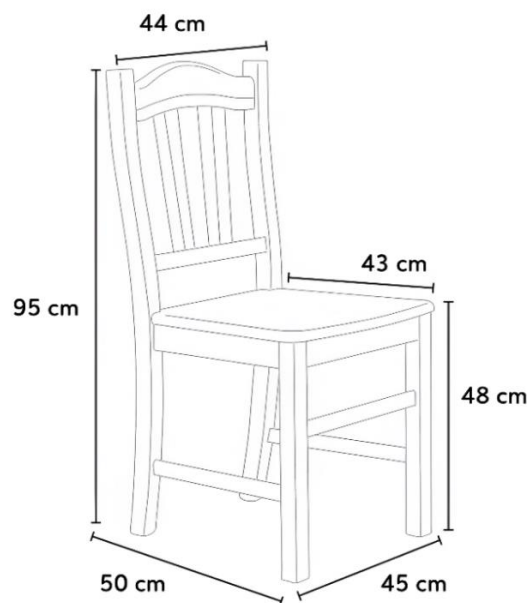


Figura 166. Dimensiones silla || Fuente: produceshop.es

En el modelo se ha asignado como material el cartón corrugado, definiendo sus propiedades mecánicas según valores experimentales y datos bibliográficos (Zhang et al., 2014). Estas propiedades incluyen, la densidad de masa, el módulo elástico, el límite elástico, el coeficiente de Poisson y el módulo cortante. Dichos parámetros se resumen en la Tabla 52, sirviendo de base para los cálculos y simulaciones realizados.

Tabla 52. Parámetros para cartón corrugado

Denominación		Valor numérico	Unidades
Densidad de masa		404.5	Kg/m ³
Módulo elástico	E_x	7600	MPa
	E_y	4020	MPa
	E_z	38	MPa
Límite elástico		40	MPa
Coeficiente de Poisson	V_{xy}	0.34	-
	V_{xz}	0.01	-
	V_{yz}	0.01	-
Módulo cortante	G_{xy}	2140	MPa
	G_{xz}	20	MPa
	G_{yz}	70	MPa

Las condiciones de contorno se han definido considerando los apoyos reales: se han fijado las superficies de contacto con el suelo y aplicado cargas en zonas críticas siguiendo la norma **UNE-EN 12520**, que establece procedimientos para evaluar la resistencia de sillas de uso doméstico. Esta configuración permite simular situaciones de carga realistas y analizar la distribución de esfuerzos y deformaciones en el conjunto.

Adicionalmente, se ha seguido lo dispuesto en la norma **UNE-EN 1728**, que complementa la anterior y especifica los útiles de carga, la aplicación de la carga, así como los detalles constructivos de cada ensayo.

1.1.2. Ensayos según norma UNE-EN-12520:2016

Se ha tomado como referencia la norma **UNE-EN 12520:2016**, relativa a los requisitos de seguridad, resistencia y durabilidad de las sillas de uso doméstico. Esta norma establece una serie de ensayos mecánicos normalizados que permiten evaluar el comportamiento del conjunto del asiento frente a diferentes sollicitaciones. Si bien el material de fabricación propuesto (cartón corrugado) difiere del habitual en mobiliario tradicional, la norma sirve como marco técnico para definir configuraciones de carga, condiciones de contorno y puntos críticos de aplicación.

La norma contempla un amplio conjunto de ensayos físicos destinados a verificar la resistencia estática, la estabilidad y la durabilidad del mobiliario de asiento destinado a uso doméstico. Cada uno de estos ensayos busca simular diferentes tipos de sollicitaciones que una silla puede experimentar durante su vida útil, tales como cargas verticales, impactos, esfuerzos laterales o deformaciones por fatiga.

No obstante, dado el objetivo específico del presente estudio —centrado en el análisis del comportamiento mecánico de uniones estructurales fabricadas en cartón—, se ha optado por seleccionar únicamente aquellos ensayos de la norma que resultan más representativos para evaluar la resistencia de las conexiones sometidas a esfuerzos relevantes.

En particular, se han considerado los siguientes ensayos por su capacidad de generar tensiones críticas en las zonas de unión y reflejar condiciones de carga realistas en un contexto de uso habitual:

- Ensayo de carga estática sobre el asiento y el respaldo
- Ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento
- Ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies
- Ensayo de carga estática sobre las patas delanteras
- Ensayo de carga estática sobre las patas laterales

En la Tabla 53 se recogen dichos ensayos propuestos en la norma, así como las magnitudes de carga, tipo de esfuerzo y posición de aplicación. Esta tabla ha servido como referencia para establecer las condiciones de contorno en las simulaciones desarrolladas en SolidWorks.

Tabla 53. Ensayos y parámetros de ensayo según la norma UNE-EN 12520

Ensayo	Parámetros de ensayo
Ensayo de carga estática sobre el asiento y el respaldo	Asiento 1300 N Respaldo 450 N
Ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento	1300 N
Ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies	1000 N Carga del asiento 750 N
Ensayo de carga estática sobre las patas delanteras	400 N Carga del asiento 1000 N
Ensayo de carga estática sobre las patas laterales	300 N Carga del asiento 1000 N

Previamente, se incluyen la **plantilla de posicionamiento de la carga** para asiento y respaldo, así como los **útiles de carga** empleados en los distintos ensayos: asiento, respaldo y carga local, tal como se establece en la norma UNE-EN 1728:2013. La plantilla tiene como finalidad establecer con precisión los puntos donde deben aplicarse las cargas, garantizando una distribución estandarizada y reproducible conforme a la norma. Por su parte, los útiles de carga permiten aplicar la fuerza de manera adecuada sobre las superficies del mobiliario, simulando el contacto que tendría el cuerpo humano en condiciones reales de uso, y asegurando una transmisión uniforme de esfuerzos. Estos útiles han sido también reproducidos en los modelos de simulación en

Anexo 1

SolidWorks, con el objetivo de representar con la mayor fidelidad posible las condiciones del ensayo físico.

La **plantilla de posición de la carga** está formada por dos elementos con una forma determinada (Figura 167) unidos por un extremo mediante un eje de articulación.

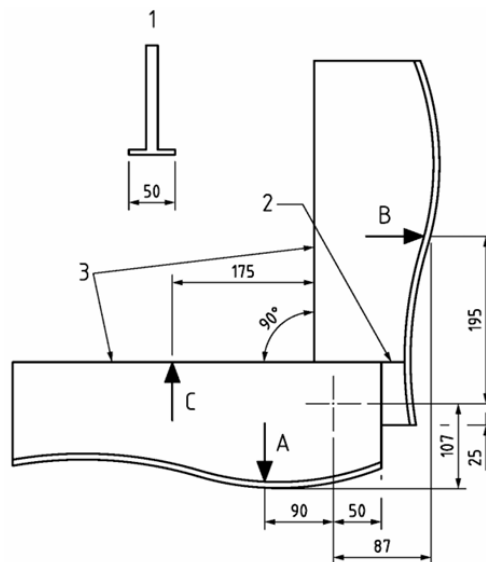


Figura 167. Plantilla de posición de la carga || Fuente: UNE-EN 1728:2013

El **útil de carga del asiento** es un útil rígido de forma anatómica con una superficie de contacto dura y lisa, y cuyas dimensiones generales se encuentran dentro de los límites señalados en la Figura 168.

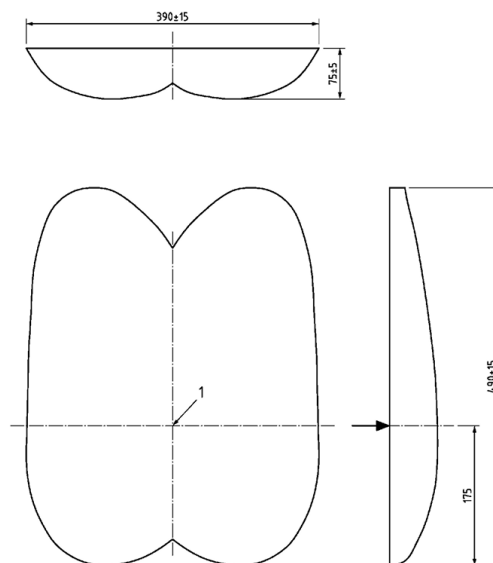


Figura 168. Útil de carga del asiento || Fuente: UNE-EN 1728:2013

El **útil de carga del respaldo** es un objeto rectangular y rígido de 200 mm de altura y 250 mm de anchura, cuya superficie de carga se curva a lo largo de la anchura del útil, con un radio de curvatura cilíndrica convexa de 450 mm, y cuyo borde periférico está redondeado con un radio de 12 mm (Figura 169).

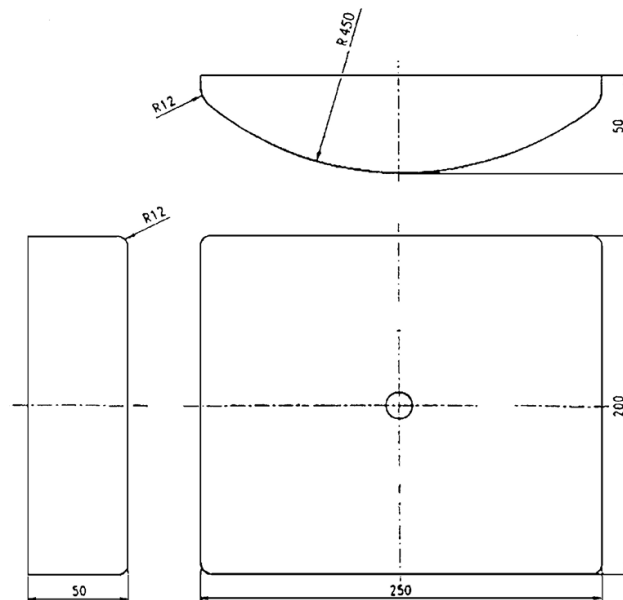


Figura 169. Útil de carga del respaldo || Fuente: UNE-EN 1728:2013

El **útil de carga local** es un objeto cilíndrico y rígido de 100 mm de diámetro, con una superficie de contacto plana y con el borde periférico redondeado con un radio de 12 mm.

A continuación, se presenta una descripción individual de los ensayos seleccionados, centrada en la configuración de cada uno. Se detallan las zonas de aplicación de la fuerza, la orientación de la carga, los puntos de apoyo o restricción (topes) establecidos durante el ensayo. Esta información permite comprender cómo se ha estructurado cada caso de carga sobre la silla para poder reproducirlo posteriormente en las simulaciones.

Ensayo de carga estática sobre el asiento y el respaldo

Los puntos de carga del asiento y del respaldo deben determinarse mediante la plantilla de posición de carga. En algunos casos, puede que no sea posible determinar los puntos de carga mediante la plantilla. En estos casos, el punto de carga del asiento debe estar situado a 175 mm de la línea de unión asiento/respaldo, o en el punto más próximo a esta posición que permita aplicar la fuerza sobre el asiento.

Cuando la geometría del asiento no permita aplicar la fuerza sobre el respaldo en el punto definido en el método anterior, la fuerza debe aplicarse en el punto más próximo (hacia arriba o hacia abajo del respaldo).

En el caso de asientos rígidos, se ajusta la posición de la plantilla empujando su parte dorsal hacia el respaldo del asiento hasta que esté totalmente en contacto con este, asegurando que el punto A de la plantilla esté en contacto con la superficie del asiento (Figura 170).

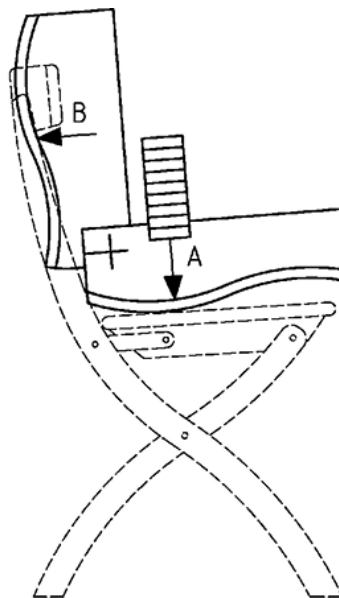


Figura 170. Posicionamiento plantilla de carga || Fuente: UNE-EN 1728:2013

Se aplica la fuerza hacia abajo F_1 , mediante el útil de carga del asiento, a las plazas de asiento. Manteniendo la fuerza sobre el asiento, se aplica la fuerza del respaldo F_2 mediante el útil de carga del respaldo (Figura 171).

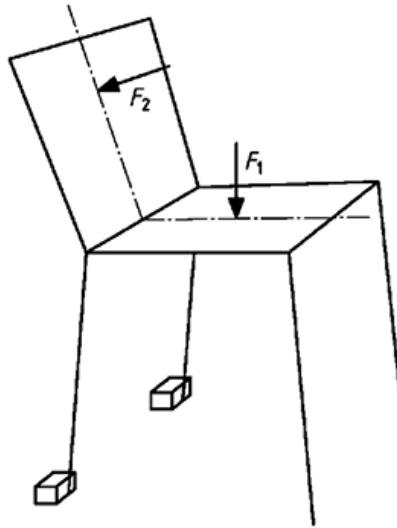


Figura 171. Aplicación de la carga sobre el asiento y respaldo || **Fuente:** UNE-EN 1728:2013

Ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento

Se aplica la fuerza especificada mediante el útil de carga del asiento, en un punto del eje central del asiento, a 100 mm hacia dentro del borde delantero de la estructura.

Ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies

Se aplica la fuerza hacia abajo especificada sobre el asiento, en el punto de carga del asiento. Mediante el útil de carga local, se aplica una fuerza vertical a una distancia de 80 mm del borde delantero de la estructura que soporta la carga del reposapiés, en aquellos puntos que se considere más desfavorables.

Ensayo de carga estática sobre las patas delanteras

Se coloca topes en las patas delanteras para evitar que el asiento se mueva. Se aplica la carga del asiento especificada en el punto de carga del asiento determinado por la plantilla.

Anexo 1

En el caso de asientos de una sola plaza, se aplica una fuerza horizontal hacia delante en el centro de la parte posterior del asiento, y a la altura del asiento (Figura 172), por medio del útil de carga local.

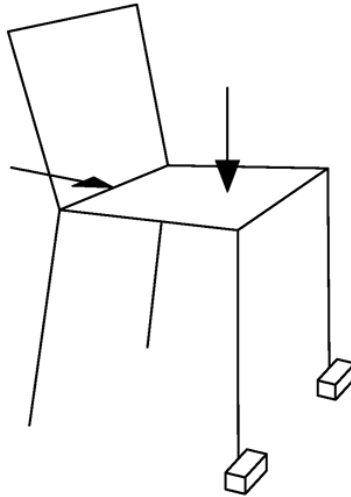


Figura 172. Aplicación de la carga sobre las patas delanteras || Fuente: UNE-EN 1728:2013

Ensayo de carga estática sobre las patas laterales

Se coloca topes en un par de patas, delantera y trasera, para evitar que el asiento se mueva. Se aplica la carga vertical especificada sobre el asiento, en una posición adecuada del mismo, pero no a más de 150 mm del borde sin carga del asiento. Se aplica, una fuerza horizontal a la altura del asiento, en el centro del lateral no inmovilizado del asiento, en dirección a las patas inmovilizadas por los topes (Figura 173).

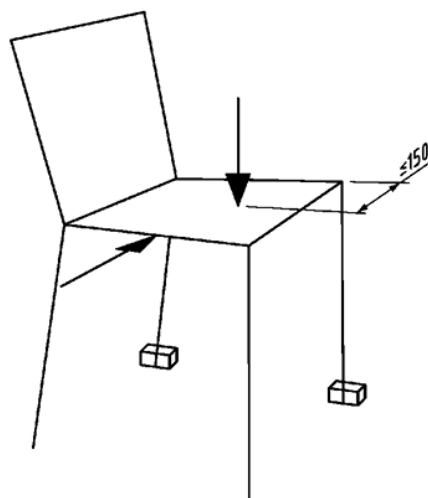


Figura 173. Aplicación de la carga sobre las patas laterales || Fuente: UNE-EN 1728:2013

1.1.3. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los distintos ensayos simulados sobre el modelo estructural de la silla. Para todos los casos, se ha adoptado una misma escala de visualización con el fin de facilitar la comparación entre configuraciones. En concreto, la **escala de tensiones de von Mises** se ha establecido en el rango de **0 a 23,1 MPa**, mientras que la **escala de desplazamientos resultantes** se ha fijado entre **0 y 370 mm**.

La Figura 174a muestra la **escala de tensiones de von Mises**, expresada en **MPa**, utilizada para interpretar la distribución de esfuerzos.

Por su parte, la Figura 174b recoge la **escala de desplazamientos resultantes (URES)**, expresados en **milímetros**, permitiendo evaluar la deformación global del sistema.

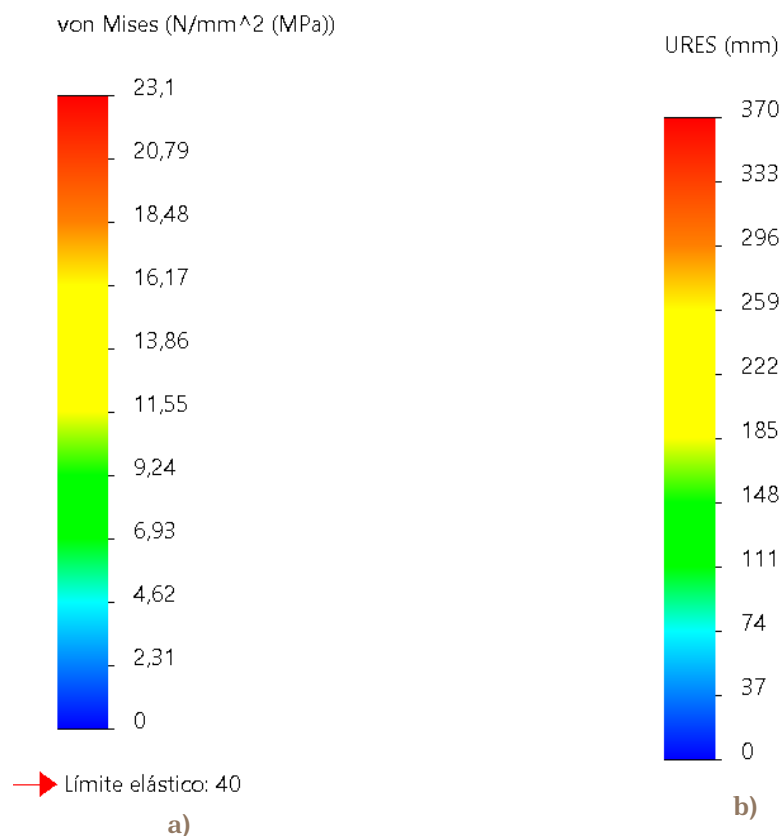


Figura 174. Modelo estructural de la silla, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

Anexo 1

La discretización del modelo de la silla se ha realizado mediante una **mallado sólido de elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 27,4 mm**, obteniéndose un total de **8.276 elementos** y **18.086 nodos**. Esta misma mallado se ha utilizado en los cinco ensayos efectuados sobre la silla. En la Figura 175 se muestra el mallado aplicado sobre la geometría de la silla.

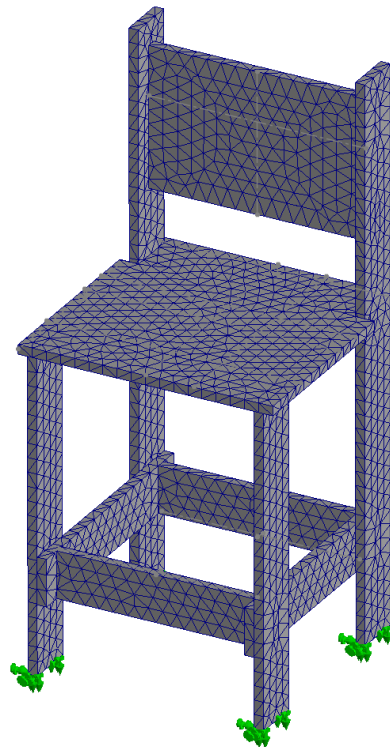


Figura 175. Malla generada para el modelo estructural de la silla || **Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a la interacción entre componentes, se ha definido una condición global de **unión rígida**, de manera que todas las piezas del ensamblaje se consideran solidariamente unidas. Esta configuración implica que las superficies en contacto no presentan deslizamiento relativo ni separación, garantizando la transferencia íntegra de esfuerzos entre elementos y la continuidad estructural del modelo.

1.1.3.1. Ensayo de carga estática sobre el asiento y el respaldo

La Figura 176 muestra la configuración aplicada en el análisis estructural de la silla sometida a una combinación de cargas sobre el asiento y el respaldo.

Las **condiciones de contorno** se han definido mediante la fijación completa de los extremos inferiores de las patas, impidiendo cualquier desplazamiento o rotación. Esta estrategia busca simular el **contacto con el suelo**, garantizando que las deformaciones y tensiones generadas en la estructura correspondan únicamente a los efectos de la carga aplicada, sin interferencias externas.

La aplicación de las cargas se ha realizado mediante **útiles de carga** normalizados. Para el **asiento**, se ha utilizado un útil que permite distribuir uniformemente una carga vertical descendente de **1300 N** sobre la superficie. En el caso del **respaldo**, la fuerza de **450 N** se ha transmitido a través de un útil, generando una carga horizontal hacia atrás.

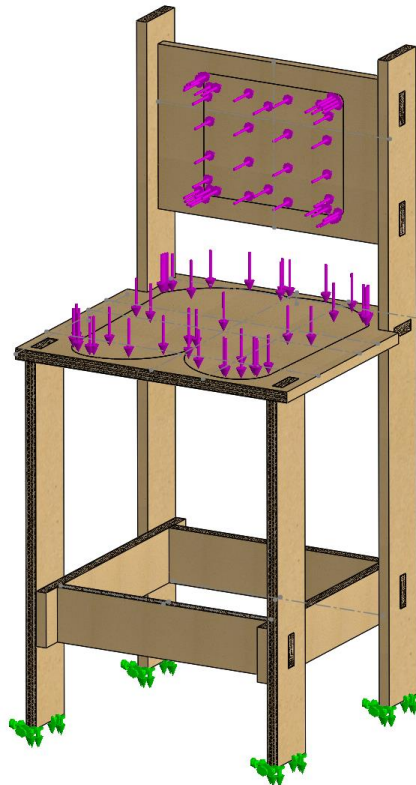


Figura 176. Configuración ensayo de carga estática sobre el asiento y respaldo || Fuente:

Elaboración propia

Anexo 1

La Figura 177 muestra los resultados de tensión del ensayo combinado sobre asiento y respaldo. El valor máximo alcanzado es de **17,21 MPa**, localizado en la unión entre el asiento y la pata trasera.

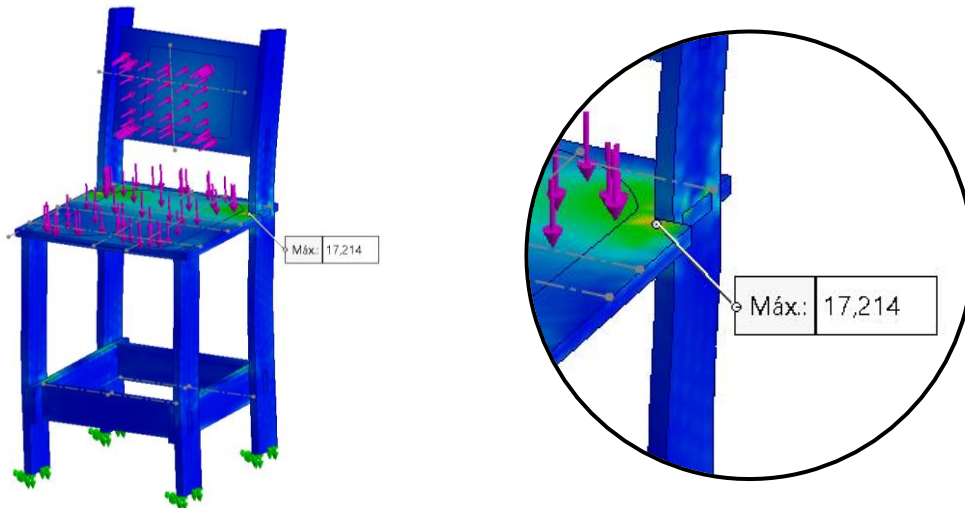


Figura 177. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre el asiento y respaldo ||

Fuente: Elaboración propia

La Figura 178 presenta los desplazamientos resultantes del ensayo de carga estática sobre el asiento y respaldo. El **desplazamiento máximo** es de **128,35 mm**, localizado en el extremo superior del respaldo, zona más alejada de las fijaciones y por tanto más propensa a deformación, y que está directamente sometida a la carga horizontal aplicada.

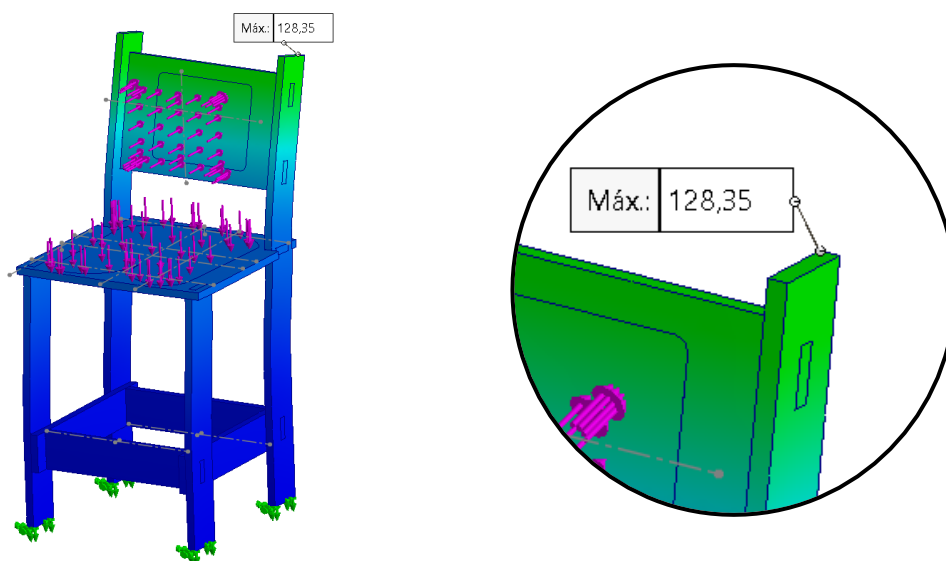


Figura 178. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre el asiento y respaldo

|| Fuente: Elaboración propia

1.1.3.2. Ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento

La Figura 179 representa la configuración del análisis estructural correspondiente al ensayo de carga vertical sobre el borde frontal del asiento.

Las **condiciones de contorno** se han definido mediante la **fijación completa de los extremos inferiores de las patas**, impidiendo cualquier desplazamiento o rotación, con el objetivo de simular el contacto con el suelo de forma realista.

En este caso, la carga se ha aplicado mediante un útil de carga que distribuye uniformemente una fuerza total de **1300 N sobre el asiento**.

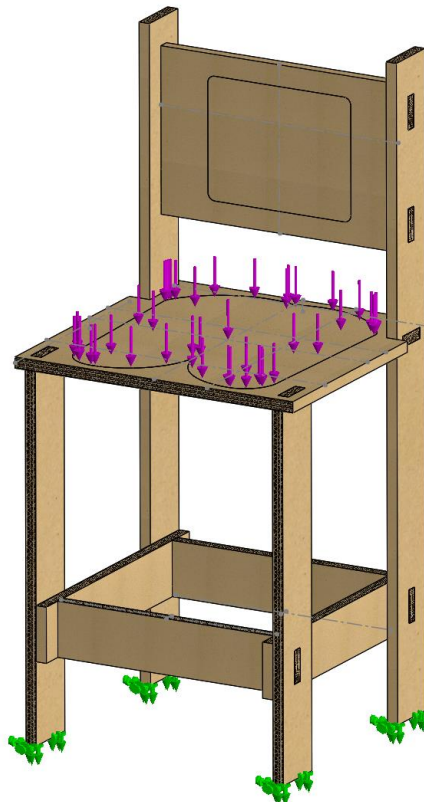


Figura 179. Configuración ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento || **Fuente:**

Elaboración propia

La Figura 180 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática aplicada sobre el borde frontal del asiento. La **tensión máxima es de 3,53 MPa** y se localiza en la parte posterior del asiento.

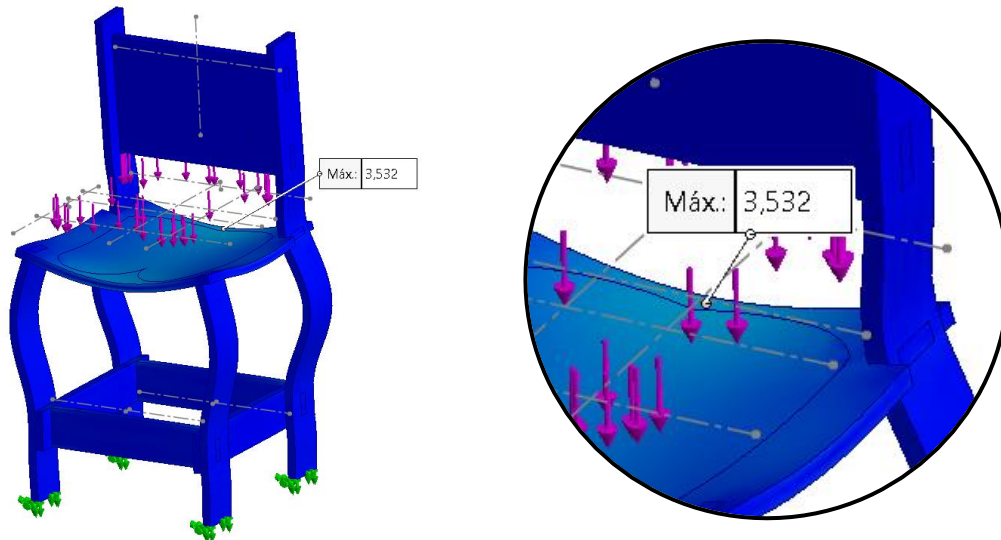


Figura 180. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre el borde frontal del asiento

|| Fuente: Elaboración propia

La Figura 181 representa los desplazamientos generados en el ensayo de carga estática aplicada sobre el borde frontal del asiento. El **desplazamiento máximo registrado es de 5,25 mm**, y se localiza en la parte central del asiento.

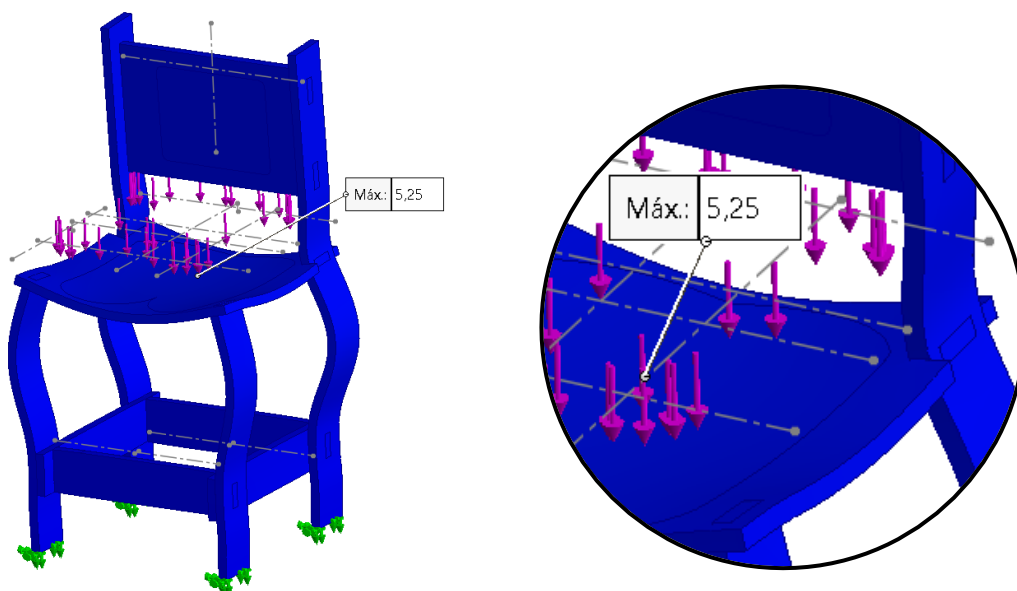


Figura 181. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre el borde frontal del

asiento || Fuente: Elaboración propia

1.1.3.3. Ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para pies

La Figura 182 muestra la configuración aplicada en el análisis estructural de la silla sometida a una carga estática sobre el reposapiés.

Las **condiciones de contorno** se han definido mediante la **fijación completa de los extremos inferiores de las patas**, con el fin de replicar adecuadamente el contacto con el suelo.

La carga sobre el **asiento** se ha aplicado mediante un útil de carga que distribuye uniformemente una fuerza vertical descendente de **750 N**. Simultáneamente, se ha utilizado un útil de carga local para introducir una fuerza vertical de **1000 N** en la zona del **travesaño** frontal, situada a una distancia de 80 mm del borde delantero.

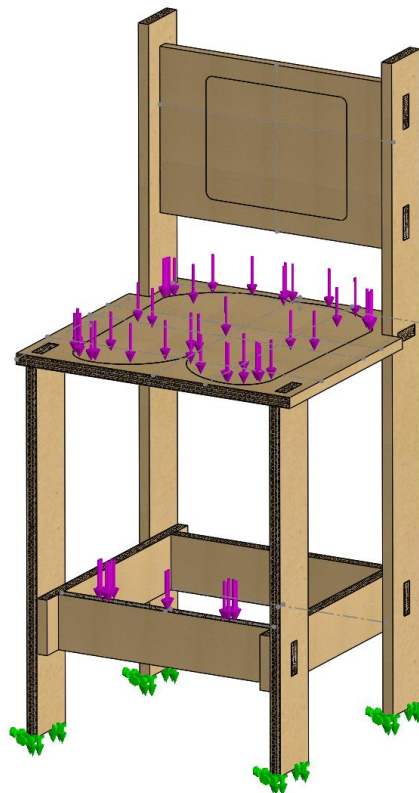


Figura 182. Configuración ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies ||

Fuente: Elaboración propia

Anexo 1

La Figura 183 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática aplicada sobre la de apoyo para los pies. La tensión máxima obtenida es de **4,337 MPa**, localizada en la zona central de la barra.

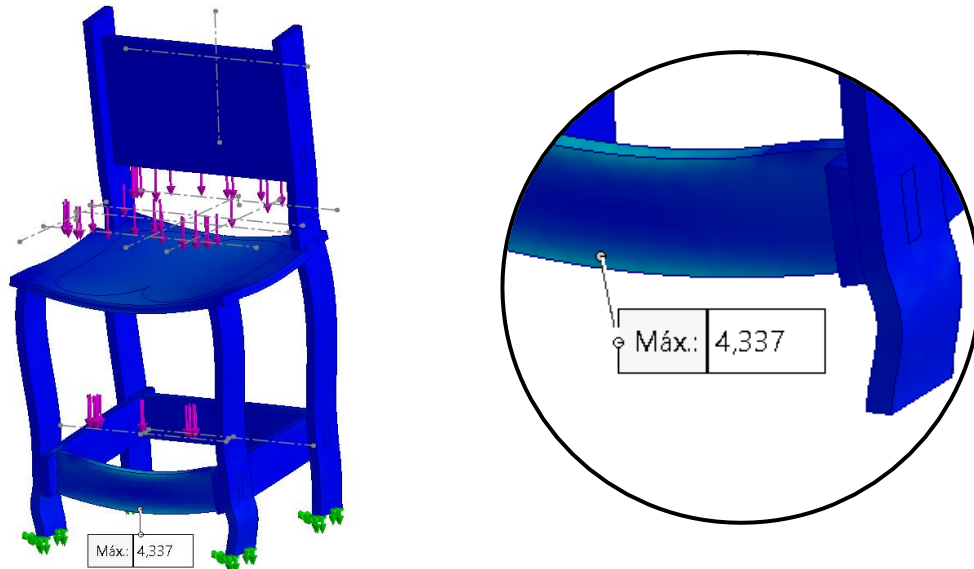


Figura 183. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 184 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática aplicada sobre la barra de apoyo para los pies. El desplazamiento máximo alcanzado es de **4,45 mm**, ubicado en la parte superior del respaldo.

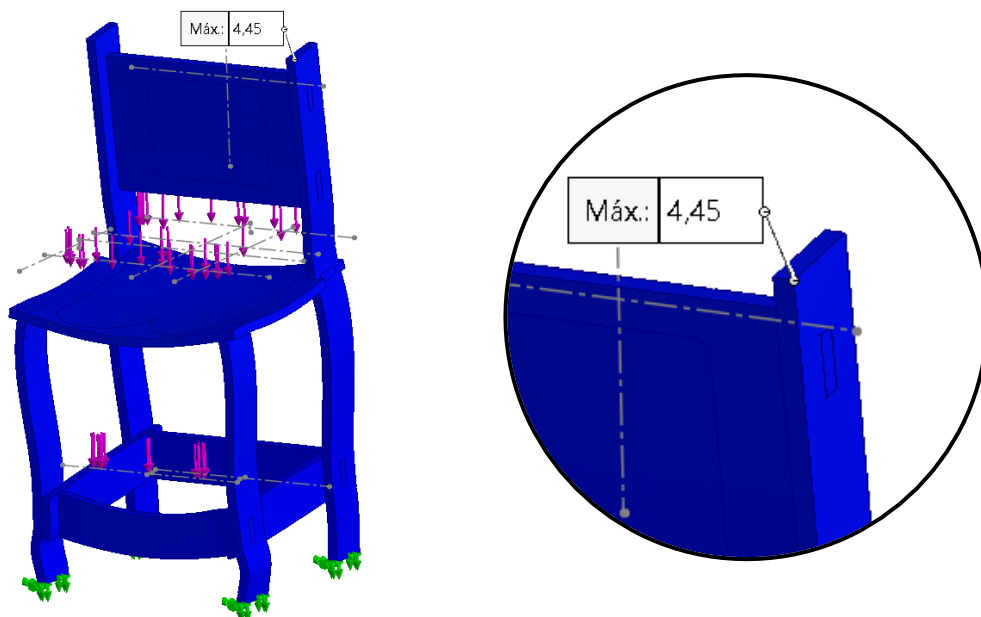


Figura 184. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre la barra de apoyo para los pies || **Fuente:** Elaboración propia

1.1.3.4. Ensayo de carga estática sobre las patas delanteras

La Figura 185 muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la silla ante un ensayo de carga estática sobre las patas delanteras.

Las **condiciones de contorno** incluyen la **fijación completa de los extremos inferiores de las patas**.

La **carga vertical sobre el asiento**, con un valor de **1000 N**, se distribuye uniformemente a través de un útil de carga específico, posicionada según la plantilla. Adicionalmente, se aplica una **fuerza horizontal hacia delante en el centro de la parte posterior del asiento**, a la misma altura que la superficie del asiento, y con un valor de **400 N**. Esta carga se introduce mediante un útil de carga local.

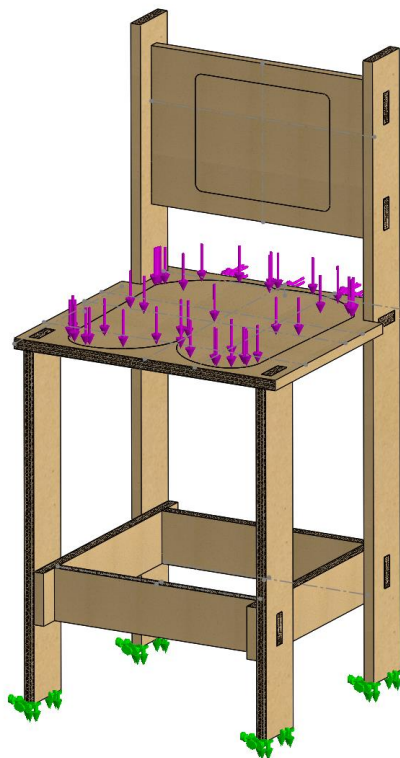


Figura 185. Configuración ensayo de carga estática sobre las patas delanteras || Fuente:

Elaboración propia

Anexo 1

La Figura 186 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática aplicada sobre las patas delanteras de la silla. La tensión máxima registrada es de **5,888 MPa**, localizada en la unión entre la pata delantera y el travesaño.

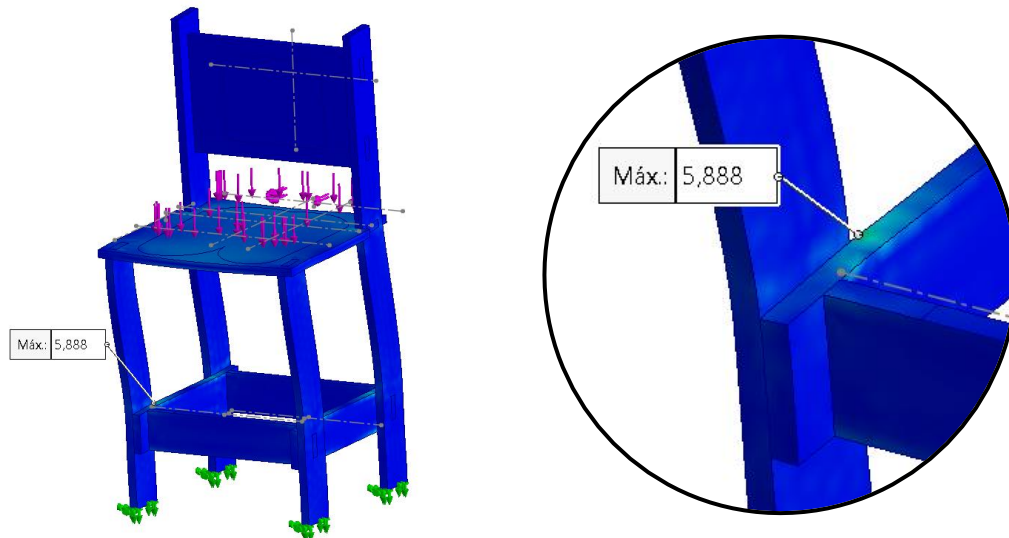


Figura 186. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre las patas delanteras ||
Fuente: Elaboración propia

La Figura 187 presenta el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática aplicada sobre las patas delanteras. El desplazamiento máximo registrado es de **28,4 mm** y se localiza en el extremo superior del respaldo.

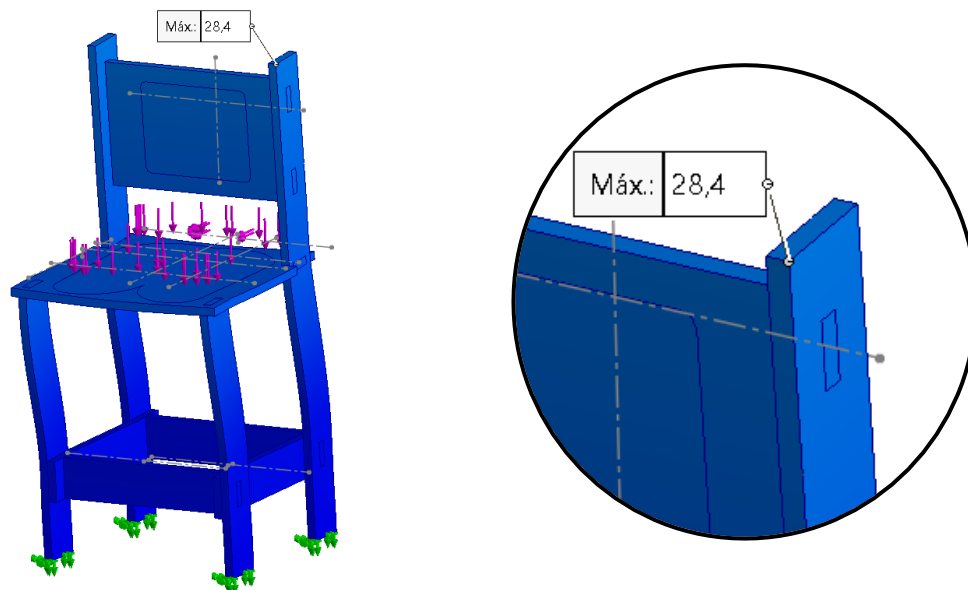


Figura 187. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre las patas delanteras ||
Fuente: Elaboración propia

1.1.3.5. Ensayo de carga estática sobre las patas laterales

La Figura 188 representa la configuración aplicada en el análisis del ensayo de carga sobre las patas laterales.

Las **condiciones de contorno** incluyen la **fijación de los extremos inferiores de las patas**.

La **carga vertical de 1000 N** se aplica mediante un útil que la distribuye uniformemente sobre una región del **asiento** situada a no más de 150 mm del borde opuesto al punto de aplicación de la fuerza lateral. Paralelamente, se introduce una **carga horizontal de 300 N** mediante un útil de carga local, a la altura del asiento y centrada en el lateral.

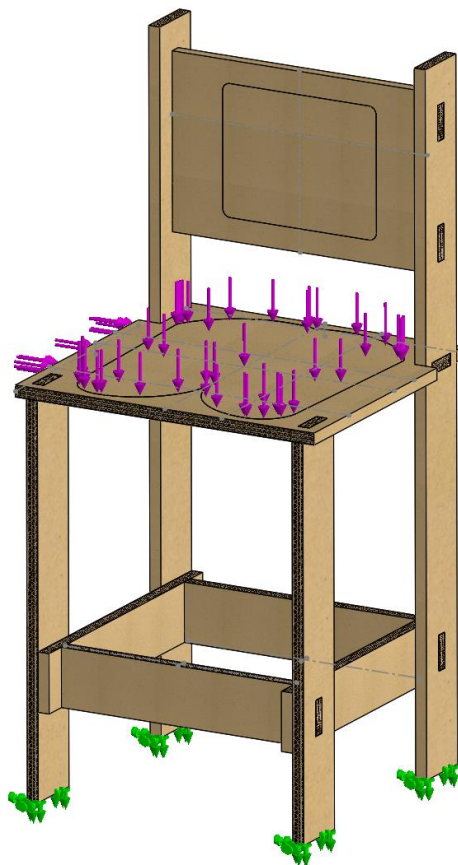


Figura 188. Configuración ensayo de carga estática sobre las patas laterales || Fuente:

Elaboración propia

Anexo 1

La Figura 189 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática aplicada sobre las patas laterales de la silla. La tensión máxima es de **23,026 MPa**, y se localiza en la unión de la pata delantera con los travesaños.

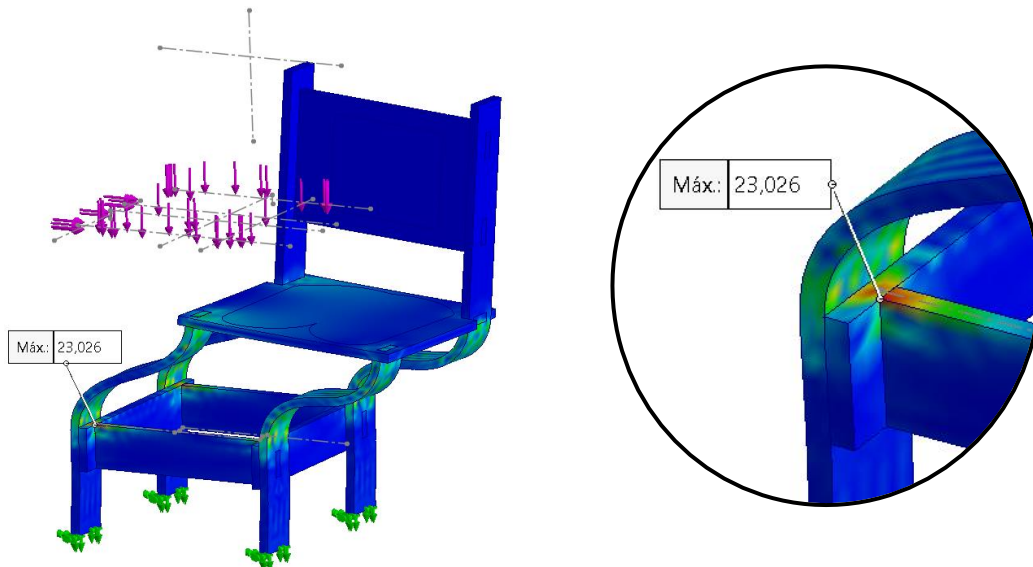


Figura 189. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre las patas laterales || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 190 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática aplicada sobre las patas laterales de la silla. El desplazamiento máximo es de **366,21 mm**, localizado en el extremo superior del respaldo.

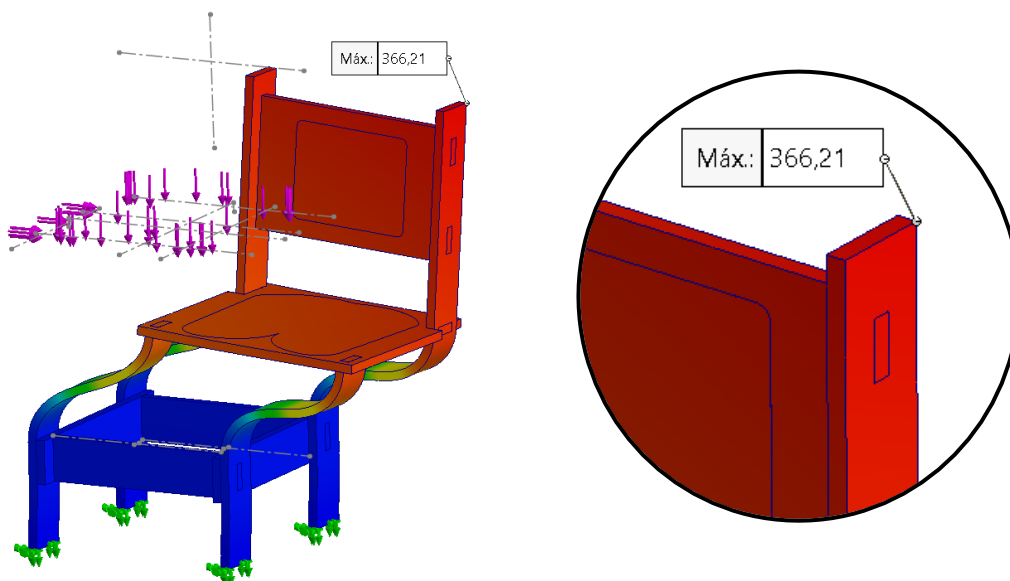


Figura 190. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre las patas laterales || **Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 54 se recogen los valores máximos de tensión (en MPa) y desplazamiento (en mm) obtenidos en cada uno de los casos simulados.

Tabla 54. Resultados tensiones y desplazamientos de los ensayos según la norma UNE-EN 1728:2013

Ensayo	Tensión máx. [MPa]	Desplazamiento [mm]
Asiento y respaldo	17,214	128,3
Borde frontal del asiento	3,532	5,25
Barra de apoyo para pies	4,337	4,45
Patas delanteras	5,888	28,40
Patas laterales	23,026	366,21

Se observa que las **mayores tensiones** se generan en el ensayo sobre las **patas laterales**, alcanzando un valor máximo de **23,03 MPa**, seguido del ensayo combinado sobre **asiento y respaldo**, con **17,21 MPa**. Ambos valores se sitúan por debajo del **límite elástico del material** (40 MPa), indicando que no se produciría fallo por plastificación bajo las condiciones simuladas. No obstante, debido a su proximidad relativa a dicho límite se debe prestar atención al diseño estructural en estas zonas, particularmente en la geometría y tipo de unión.

En cuanto a los **desplazamientos**, el valor más elevado se registra también en las **patas laterales (366,21 mm)**, lo cual sugiere una menor rigidez estructural en esta región. Este comportamiento se atribuye a la orientación de la onda del cartón, que en dicha zona se dispone de manera desfavorable frente a la dirección principal de la carga, reduciendo así la capacidad portante y aumentando la deformabilidad del conjunto. Por el contrario, los **ensayos sobre la barra de apoyo para los pies y el borde frontal del asiento** presentan tanto tensiones como desplazamientos significativamente inferiores.

Es fundamental conocer la influencia que ejercen tanto la **geometría de los componentes** como el **tipo de uniones utilizadas** en el comportamiento estructural global. Estos factores condicionan la distribución de esfuerzos y la

capacidad de resistencia frente a las cargas aplicadas. Además, la **orientación de la onda del cartón** corrugado constituye un parámetro técnico clave, ya que afecta directamente a la rigidez y a la forma en que el material responde ante sollicitaciones mecánicas. Una alineación desfavorable respecto a la dirección principal de carga puede comprometer significativamente la rigidez global del sistema, reduciendo su capacidad portante y aumentando los desplazamientos.

1.2. Estudio individual de las uniones

1.2.1. Metodología general

Para el análisis individual de las uniones, se ha aplicado **una carga constante de 50 N** en cada simulación. Este valor ha sido seleccionado como referencia común, permitiendo una comparación entre los distintos tipos de unión, evaluando la capacidad de cada una para resistir tensiones bajo las mismas condiciones de carga. La carga elegida representa un esfuerzo moderado, suficiente para inducir deformaciones representativas sin alcanzar fallos extremos, facilitando así el estudio comparativo.

En cuanto a las condiciones de contorno, se ha optado por una configuración tipo **voladizo**, en la que una de las piezas que conforman la unión se encuentra completamente empotrada, mientras que la otra recibe la carga. Esta disposición ha sido seleccionada con el objetivo de **aislar la respuesta mecánica de la unión** frente a la carga aplicada, evitando que esfuerzos adicionales afecten al análisis. De este modo, las tensiones y deformaciones obtenidas se deben solo a la eficiencia estructural de la unión en cuestión.

En lo relativo a la interacción entre componentes, en todos los modelos de uniones se ha aplicado una condición global de **unión rígida**. De este modo, las piezas se han considerado solidariamente unidas, sin permitir deslizamiento relativo ni separación en las superficies de contacto. Esta configuración garantiza la transferencia completa de esfuerzos entre los elementos y asegura la continuidad estructural de cada ensamblaje analizado.

1.2.2. Análisis por unión tipo horizontal + vertical

Para las uniones con configuración **horizontal + vertical**, se ha empleado una **escala de tensiones de von Mises** comprendida entre **0 MPa** y **5,88 MPa**, mostrada en la Figura 191a. En cuanto a la representación de los **desplazamientos resultantes (URES)**, se ha utilizado una escala con valores comprendidos entre **0 mm** y **56,3 mm**, detallada en la Figura 191b.

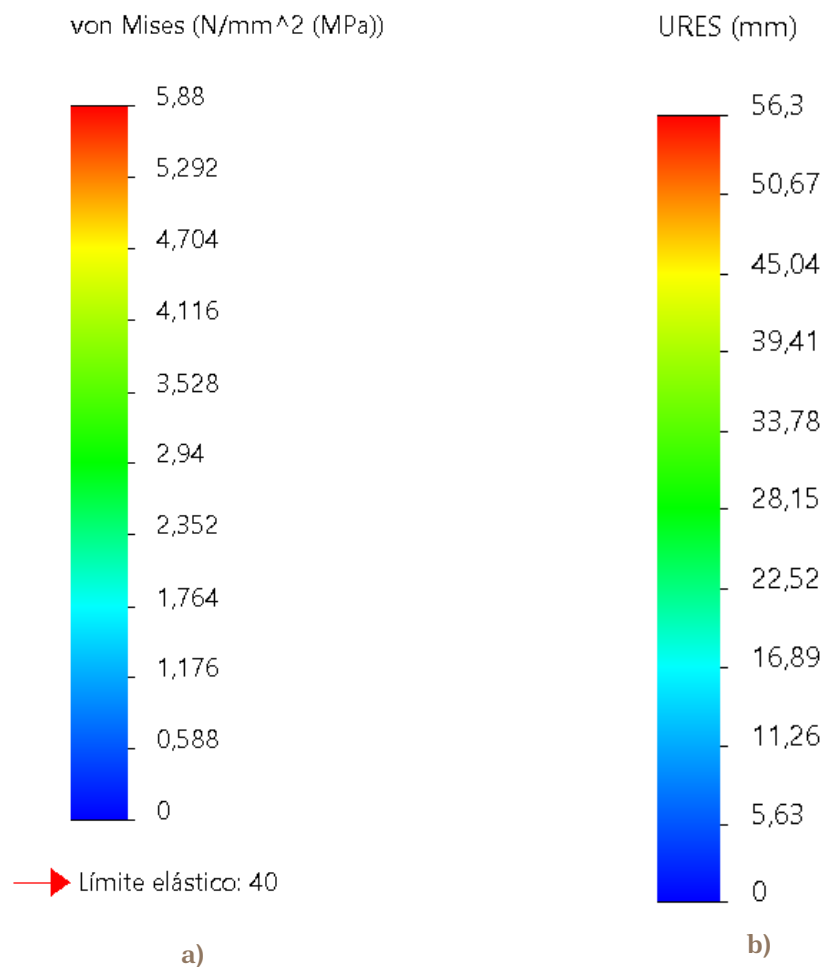


Figura 191. Unión horizontal + vertical, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.2.1. Unión caja y espiga

La Figura 192a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + vertical** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento horizontal queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 9,57 mm**, obteniéndose un total de **8.098 elementos** y **14.093 nodos**. La Figura 192b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

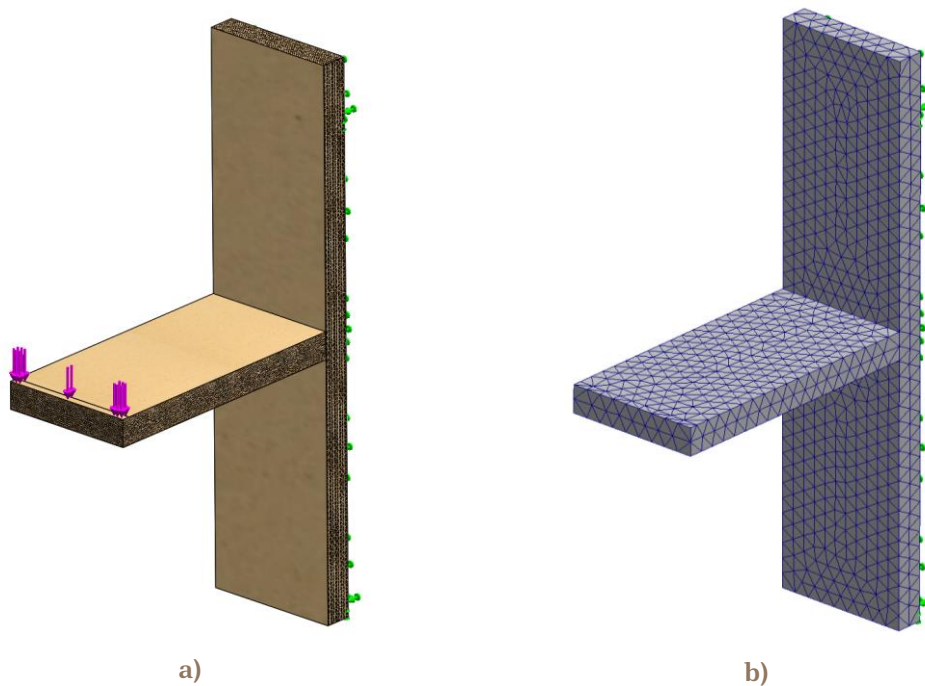


Figura 192. Unión horizontal + vertical tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 193 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **4,651 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

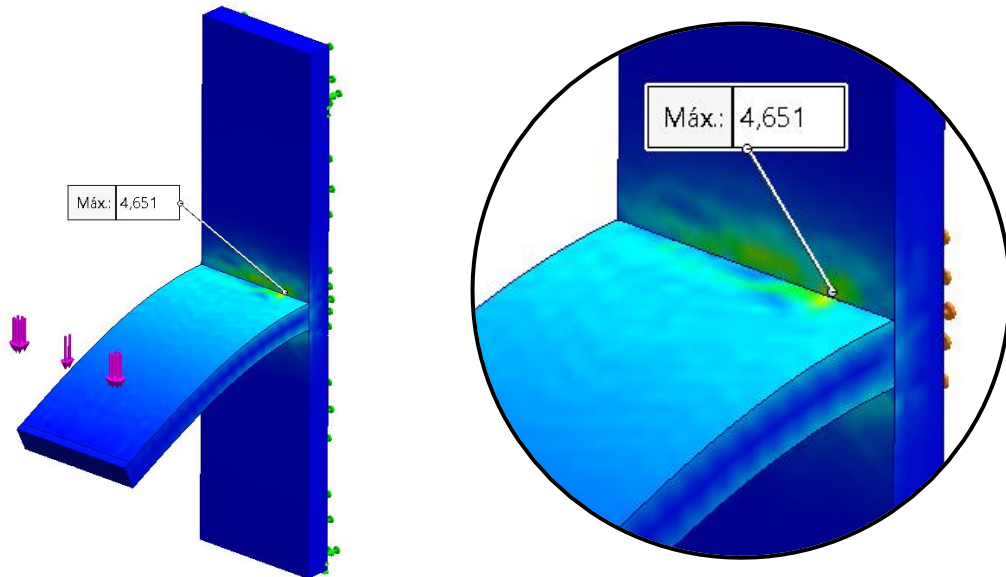


Figura 193. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 194 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **56,21 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

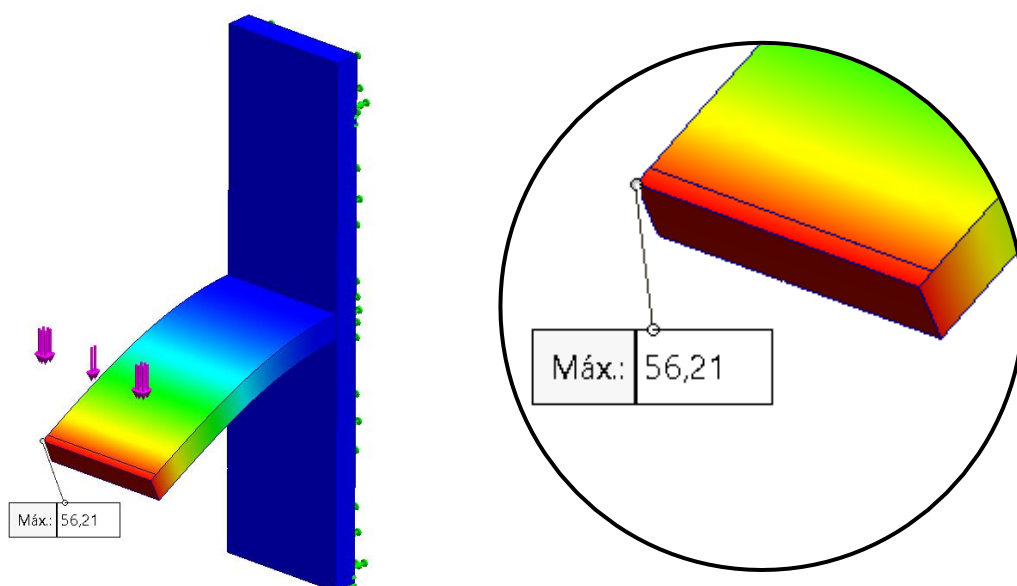


Figura 194. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.2.2. Unión caja y espiga con cuña

La Figura 195a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + vertical** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento horizontal queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 10,02 mm**, obteniéndose un total de **7.847 elementos** y **14.056 nodos**. La Figura 195b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

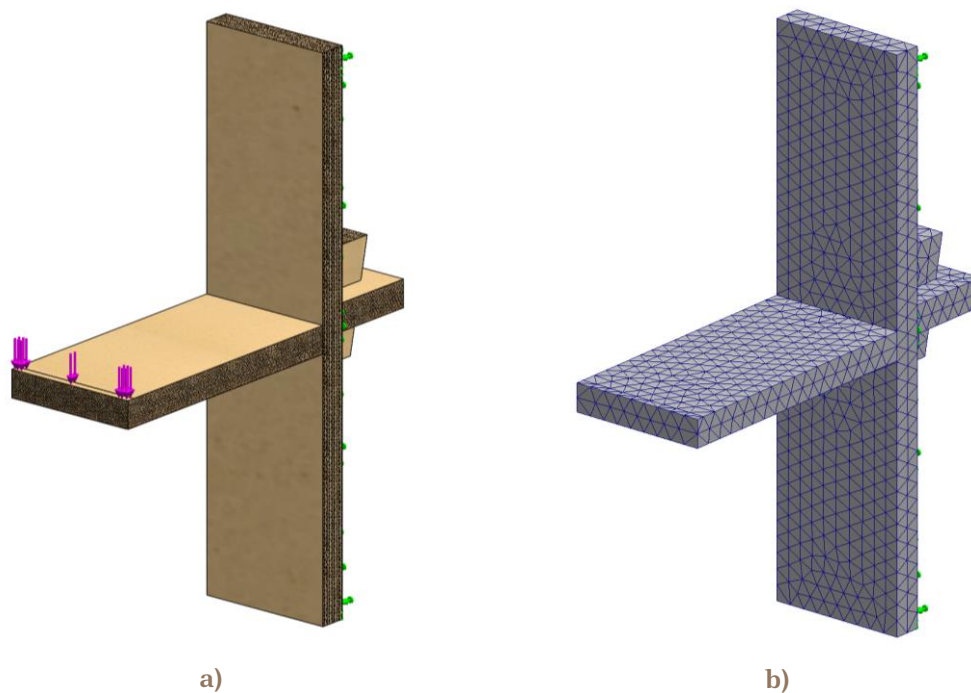


Figura 195. Unión horizontal + vertical tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 196 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **5,885 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

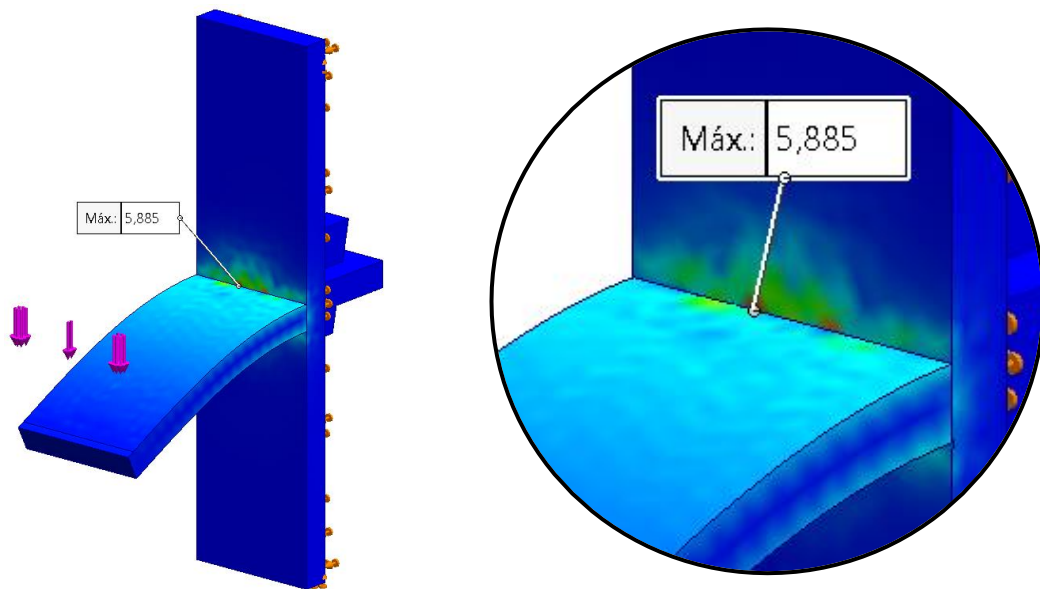


Figura 196. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 197 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **56,225 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

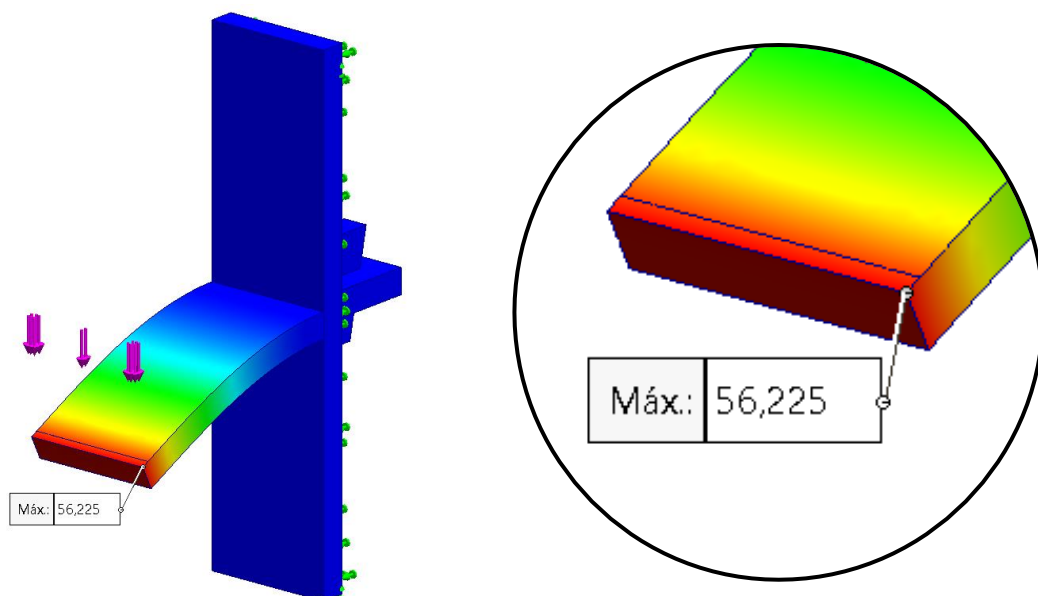


Figura 197. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + vertical tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.3. Análisis por unión tipo horizontal + horizontal

Para las uniones con configuración **horizontal + horizontal**, se ha empleado una **escala de tensiones de von Mises** comprendida entre **0 MPa** y **0,768 MPa**, mostrada en la Figura 198a. En cuanto a la representación de los **desplazamientos resultantes (URES)**, se ha utilizado una escala con valores comprendidos entre **0 mm** y **2,539 mm**, detallada en la Figura 198b.

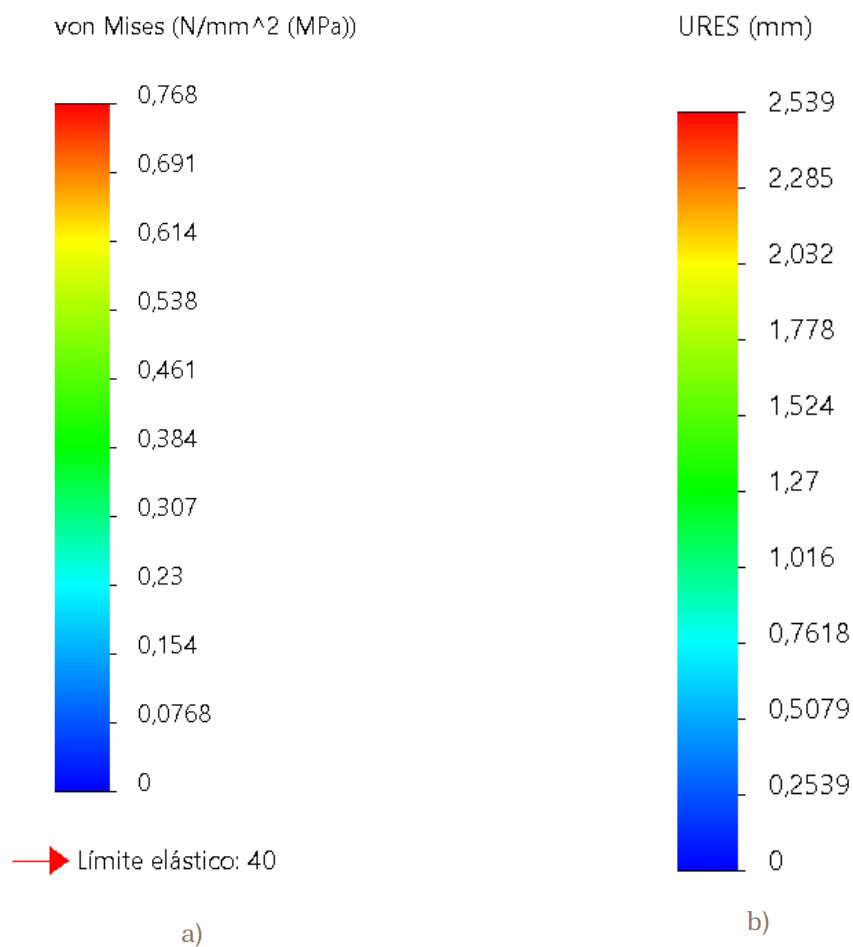


Figura 198. Unión horizontal + horizontal, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.3.1. Unión caja y espiga

La Figura 199a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + horizontal** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento horizontal**, simulando un **empotramiento**, de manera que el otro elemento horizontal queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical de 50 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 10,02 mm**, obteniéndose un total de **6.653 elementos** y **11.807 nodos**. La Figura 199b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

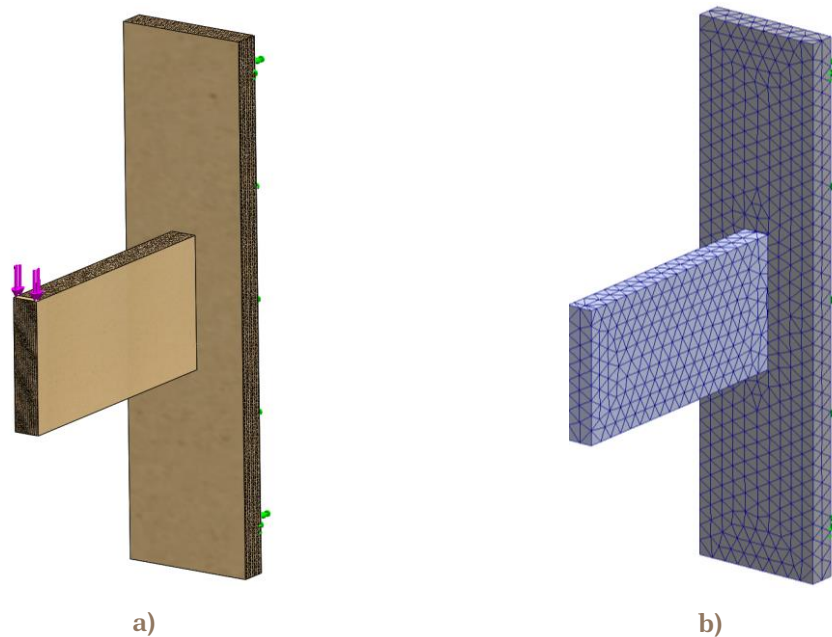


Figura 199. Unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || Fuente: Elaboración propia

Anexo 1

La Figura 200 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **0,723 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

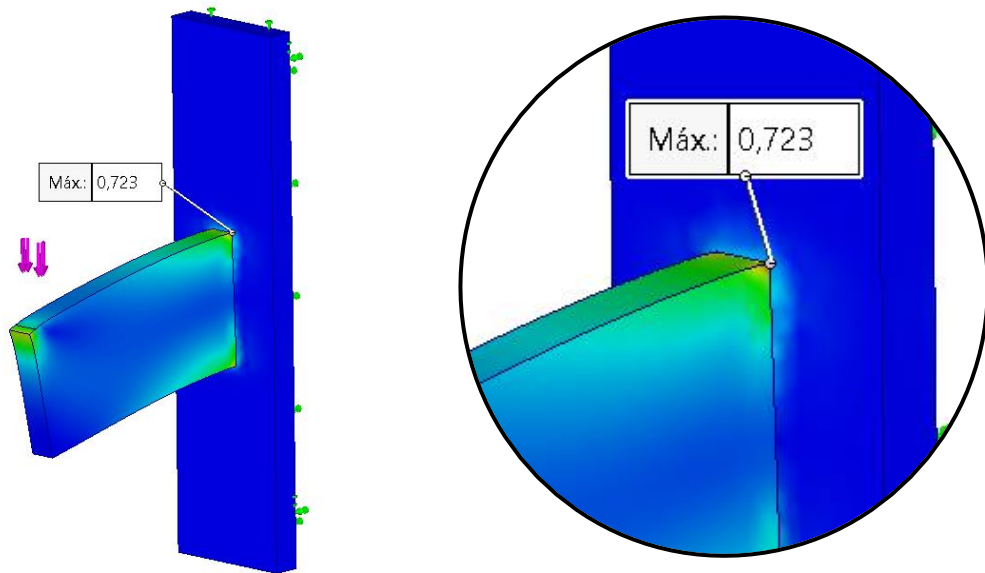


Figura 200. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga || Fuente: Elaboración propia

La Figura 201 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **0,0435 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

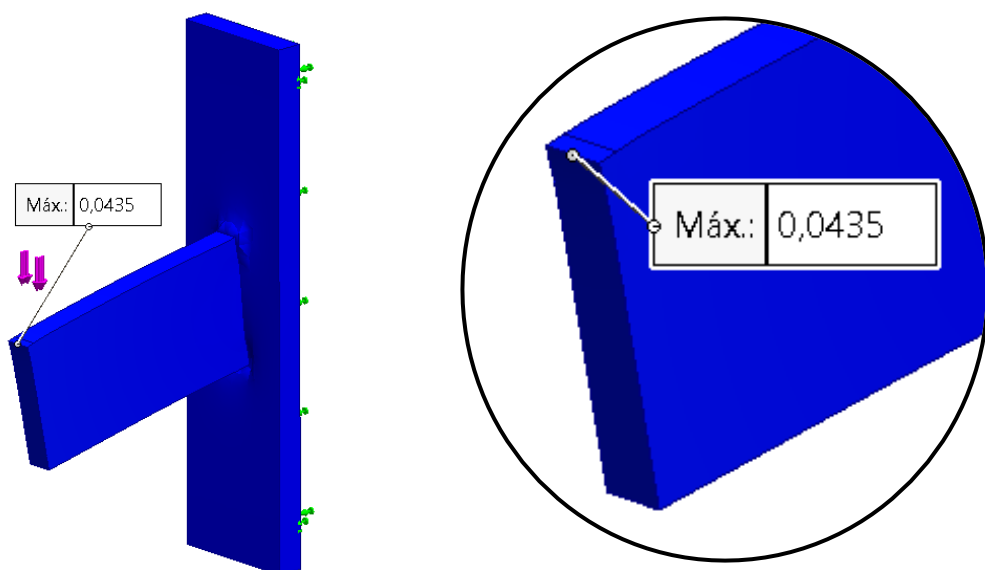


Figura 201. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga || Fuente: Elaboración propia

1.2.3.2. Unión caja y espiga con cuña

La Figura 202a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + horizontal** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento horizontal**, simulando un **empotramiento**, de manera que el otro elemento horizontal queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical de 50 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 10,02 mm**, obteniéndose un total de **7.647 elementos** y **13.750 nodos**. La Figura 202b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

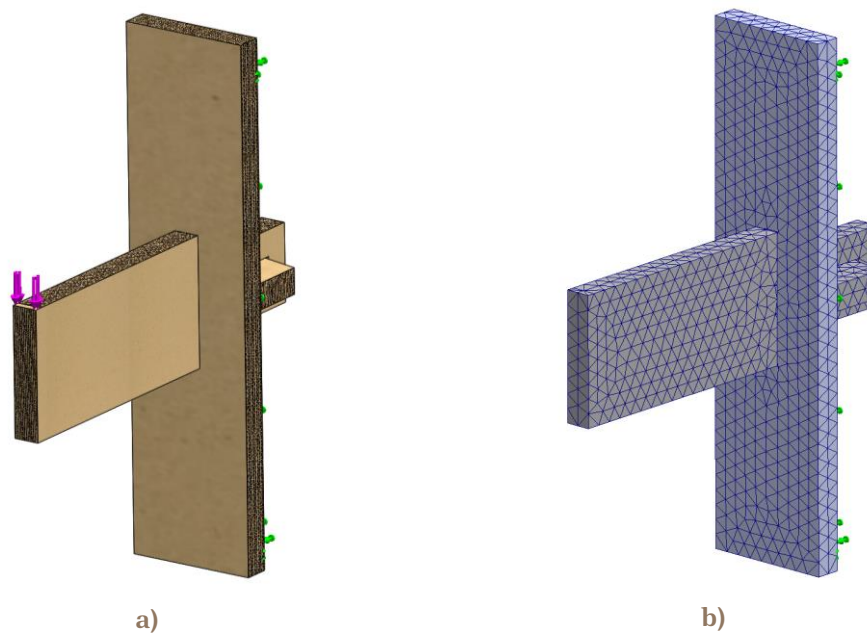


Figura 202. Unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

Anexo 1

La Figura 203 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **0,768 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

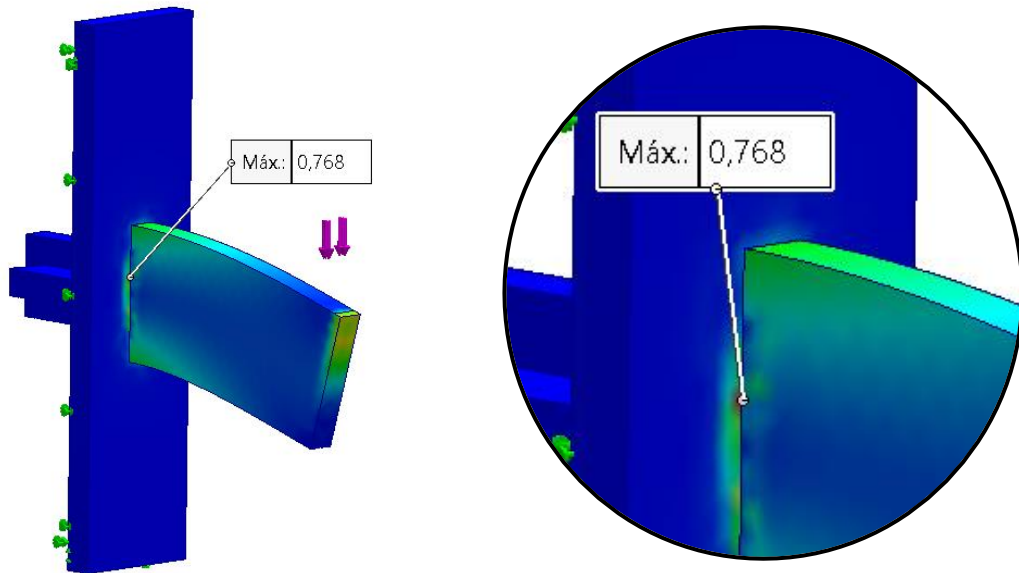


Figura 203. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga con cuña || Fuente: Elaboración propia

La Figura 204 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **2,539 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

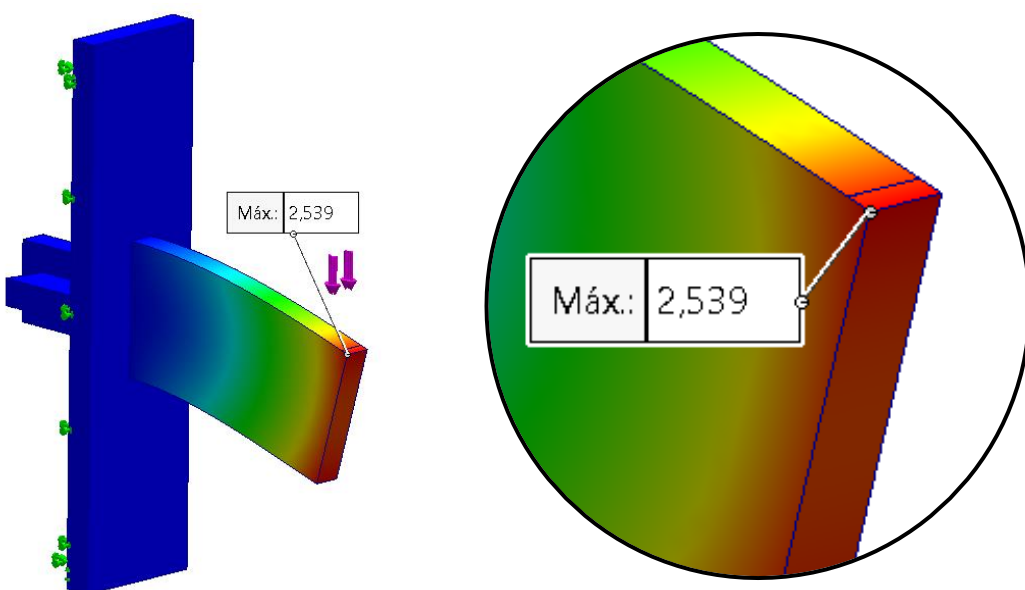


Figura 204. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal tipo caja y espiga con cuña || Fuente: Elaboración propia

1.2.4. Análisis por unión tipo horizontal + horizontal + vertical 1

Para las uniones con configuración **horizontal + horizontal + vertical 1**, se ha empleado una **escala de tensiones de von Mises** comprendida entre **0 MPa** y **1,305 MPa**, mostrada en la Figura 205a. En cuanto a la representación de los **desplazamientos resultantes (URES)**, se ha utilizado una escala con valores comprendidos entre **0 mm** y **3,067 mm**, detallada en la Figura 205b.

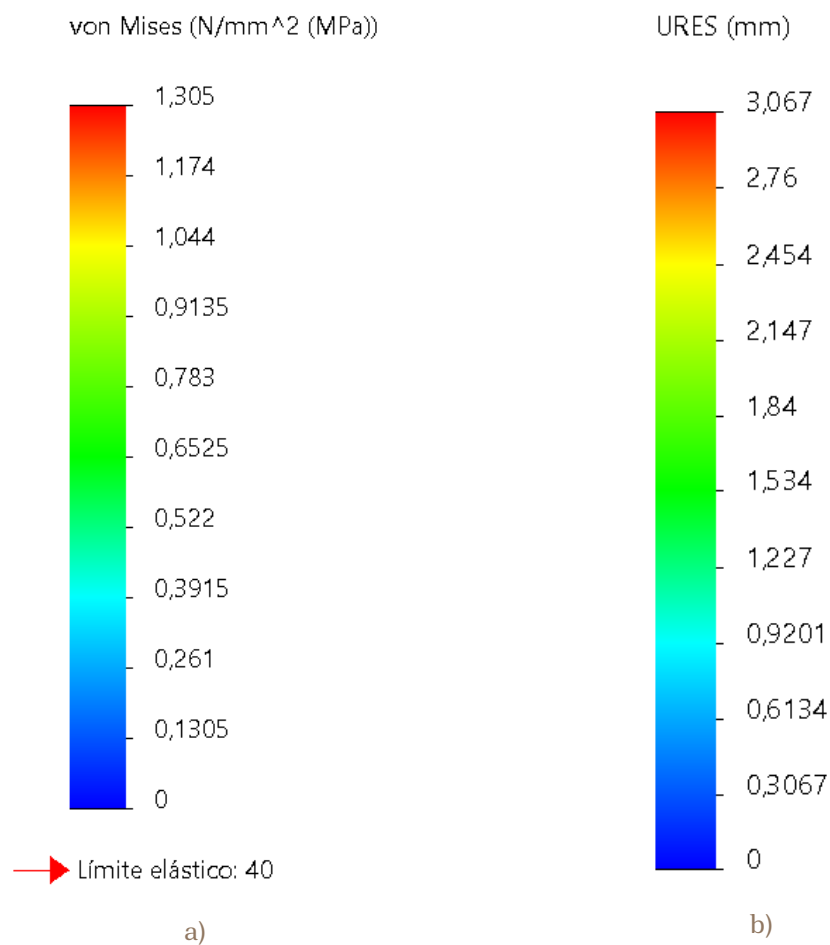


Figura 205. Unión horizontal + horizontal + vertical 1, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.4.1. Unión caja y espiga

La Figura 206a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + horizontal + vertical 1** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que los elementos horizontales quedan en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical de 50 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 10,74 mm**, obteniéndose un total de **8.494 elementos y 15.209 nodos**. La Figura 206b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

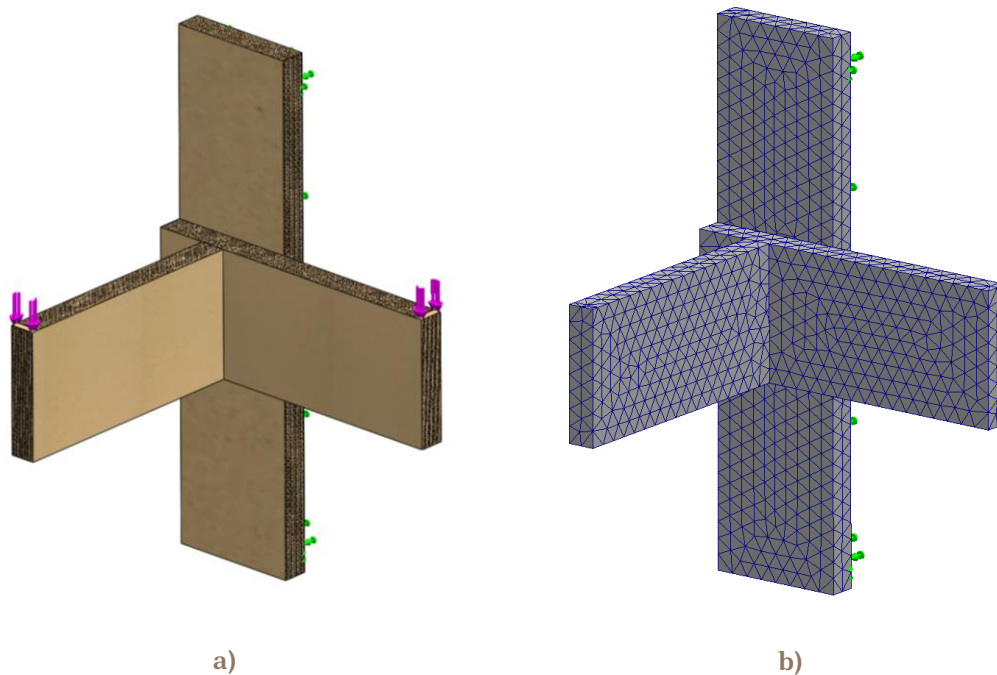


Figura 206. Unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 207 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **1,305 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los componentes**.

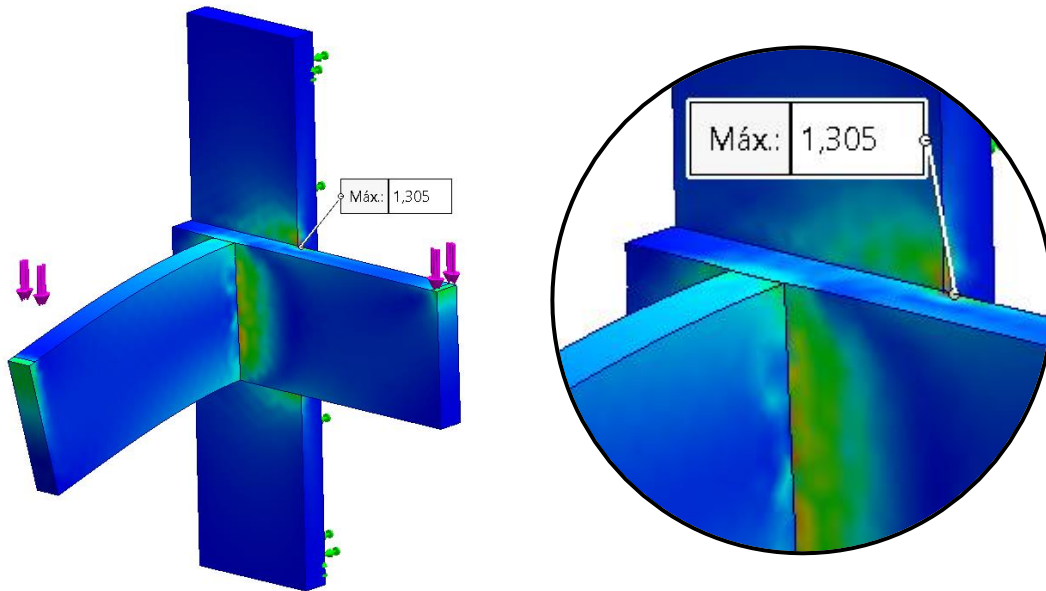


Figura 207. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 208 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **3,067 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

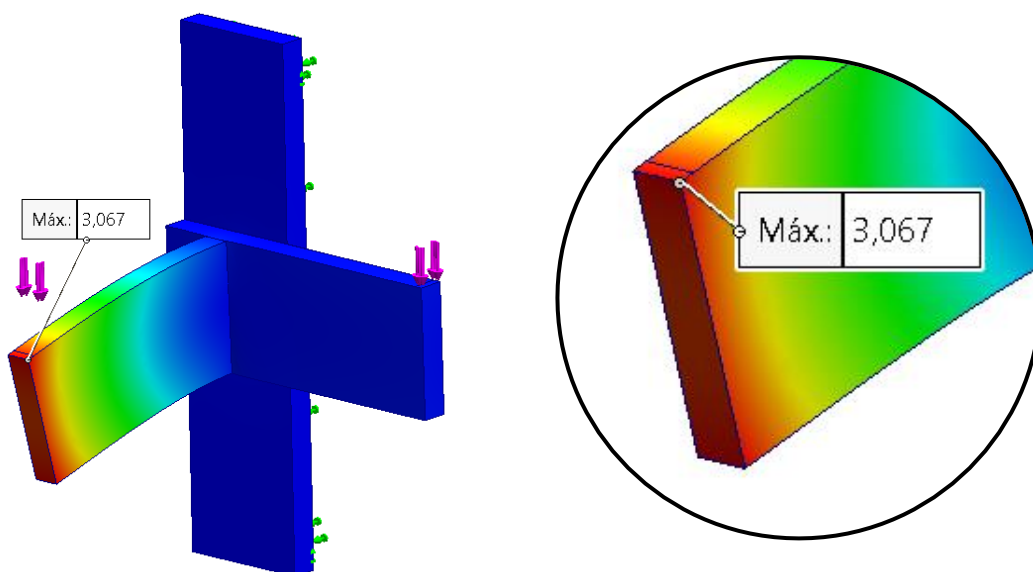


Figura 208. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.4.2. Unión caja y espiga con cuña

La Figura 209a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + horizontal + vertical 1** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que los elementos horizontales quedan en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 11,11 mm**, obteniéndose un total de **8.567 elementos** y **15.550 nodos**. La Figura 209b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

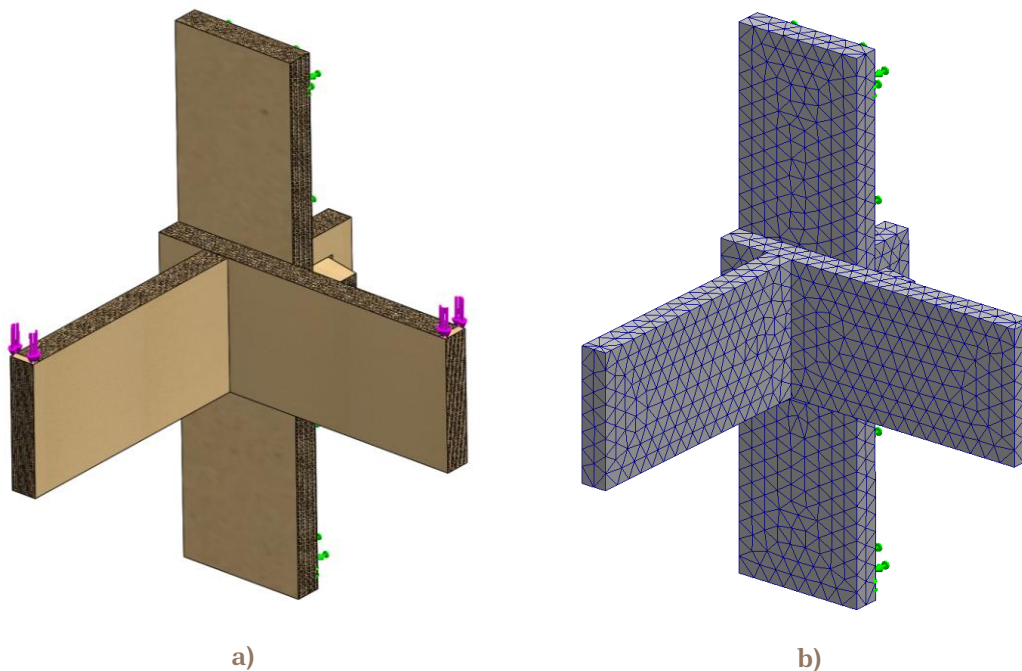


Figura 209. Unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 210 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **1,253 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los componentes**.

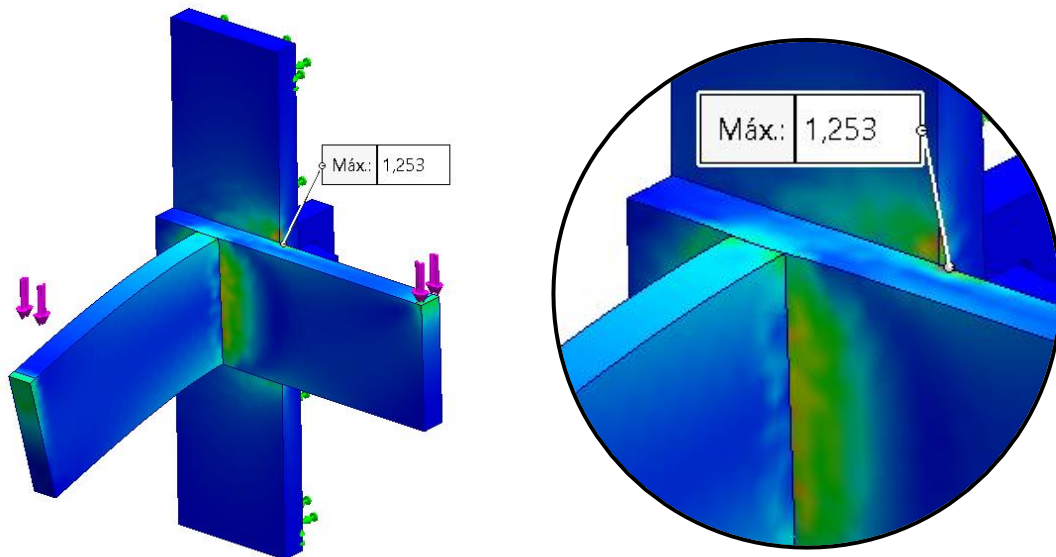


Figura 210. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 211 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **3,066 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

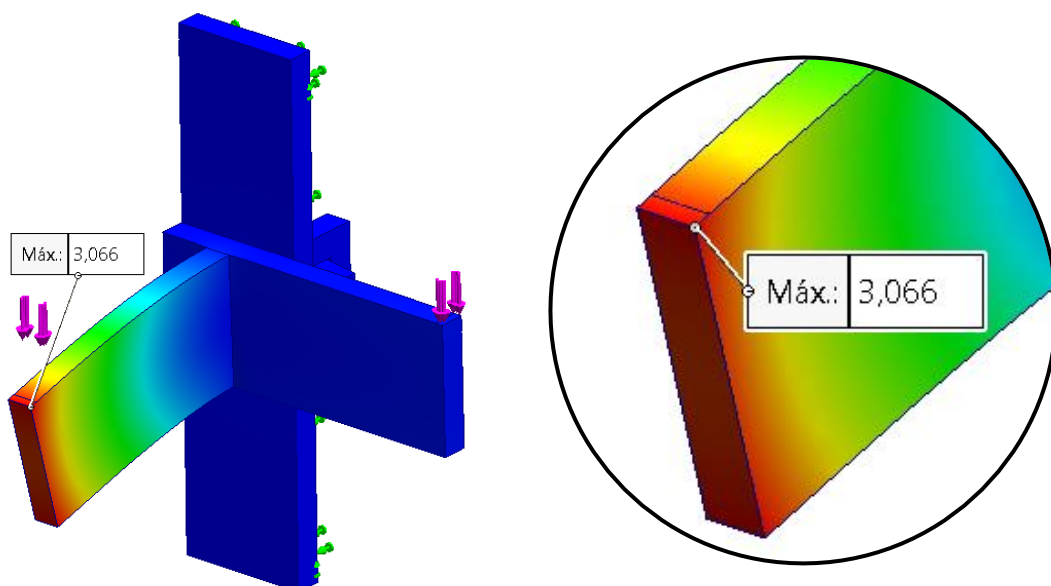


Figura 211. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 1 tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.5. Análisis por unión tipo horizontal + horizontal + vertical 2

Para las uniones con configuración **horizontal + horizontal + vertical 2**, se ha empleado una **escala de tensiones de von Mises** comprendida entre **0 MPa y 1,7 MPa**, mostrada en la Figura 212a. En cuanto a la representación de los **desplazamientos resultantes (URES)**, se ha utilizado una escala con valores comprendidos entre **0 mm y 3,105 mm**, detallada en la Figura 212b.

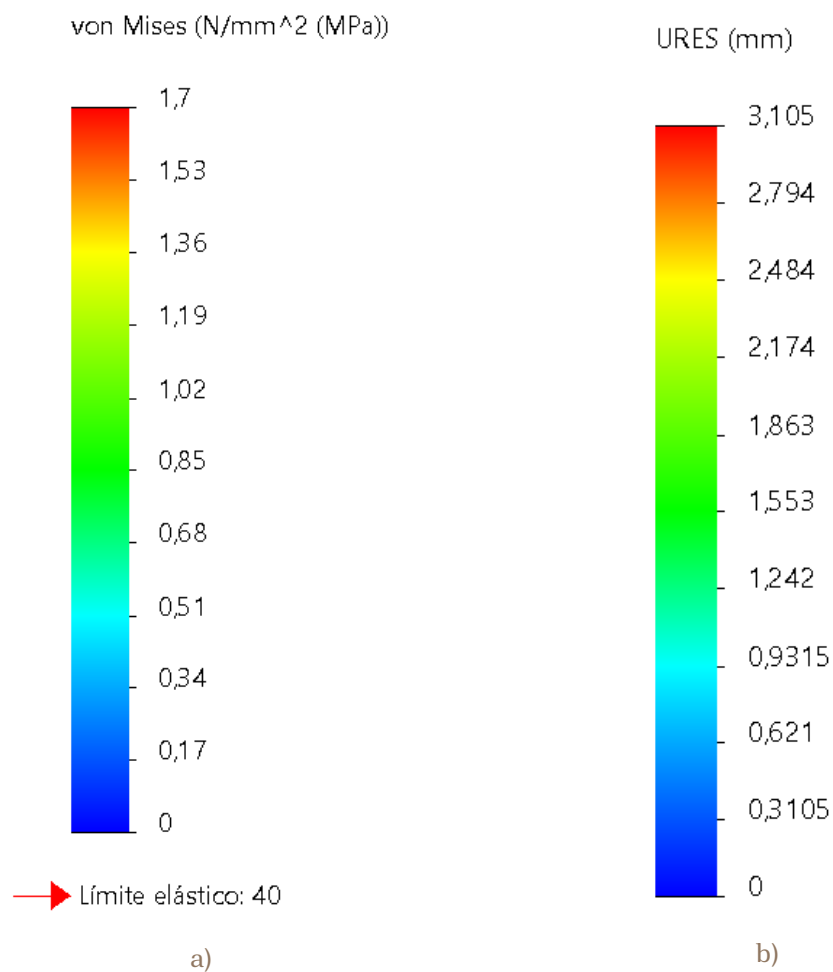


Figura 212. Unión horizontal + horizontal + vertical 2, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.5.1. Unión caja y espiga

La Figura 213a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + horizontal + vertical 2** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que los elementos horizontales quedan en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical de 50 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 10,74 mm**, obteniéndose un total de **8.666 elementos y 15.472 nodos**. La Figura 213b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

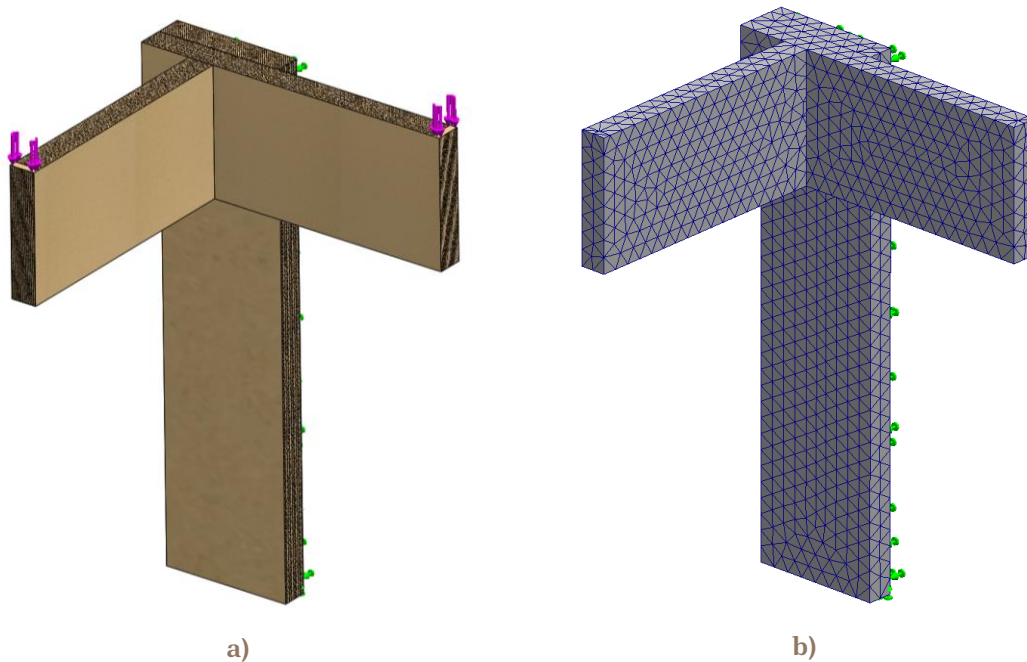


Figura 213. Unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 214 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **1,557 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los componentes**.

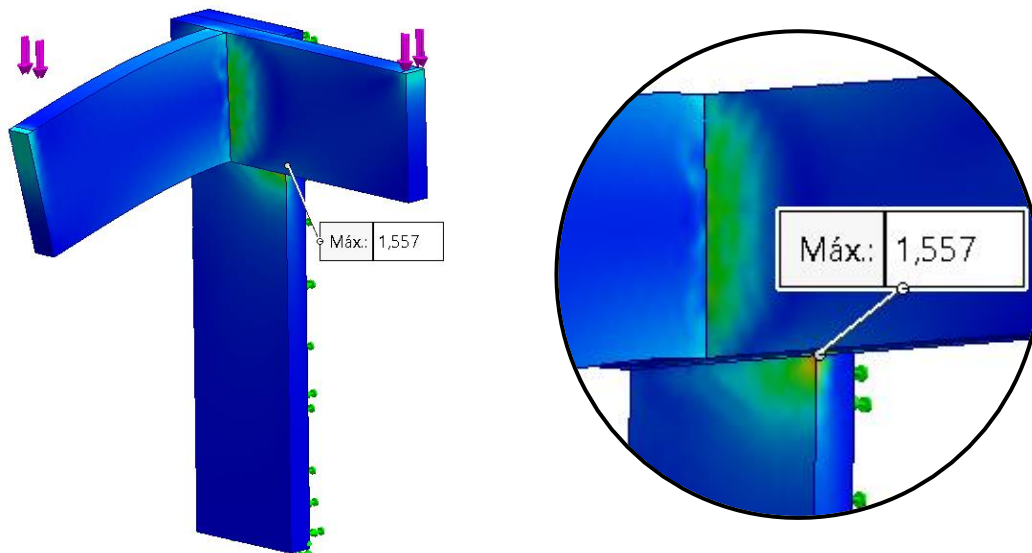


Figura 214. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 215 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **3,105 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

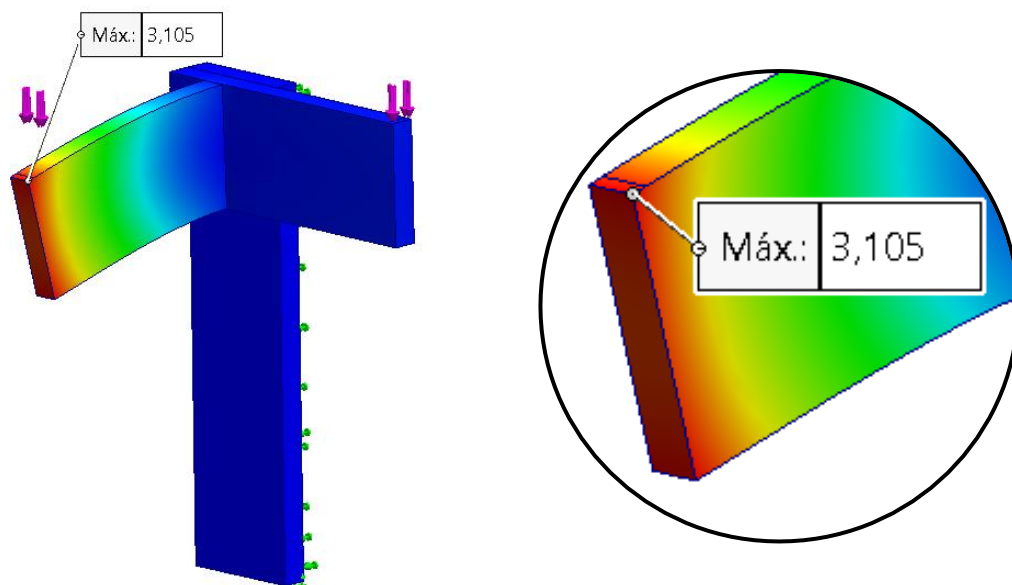


Figura 215. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.5.2. Unión caja y espiga con cuña

La Figura 216a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo horizontal + horizontal + vertical 2** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que los elementos horizontales quedan en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 11,11 mm**, obteniéndose un total de **8.532 elementos** y **15.505 nodos**. La Figura 216b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

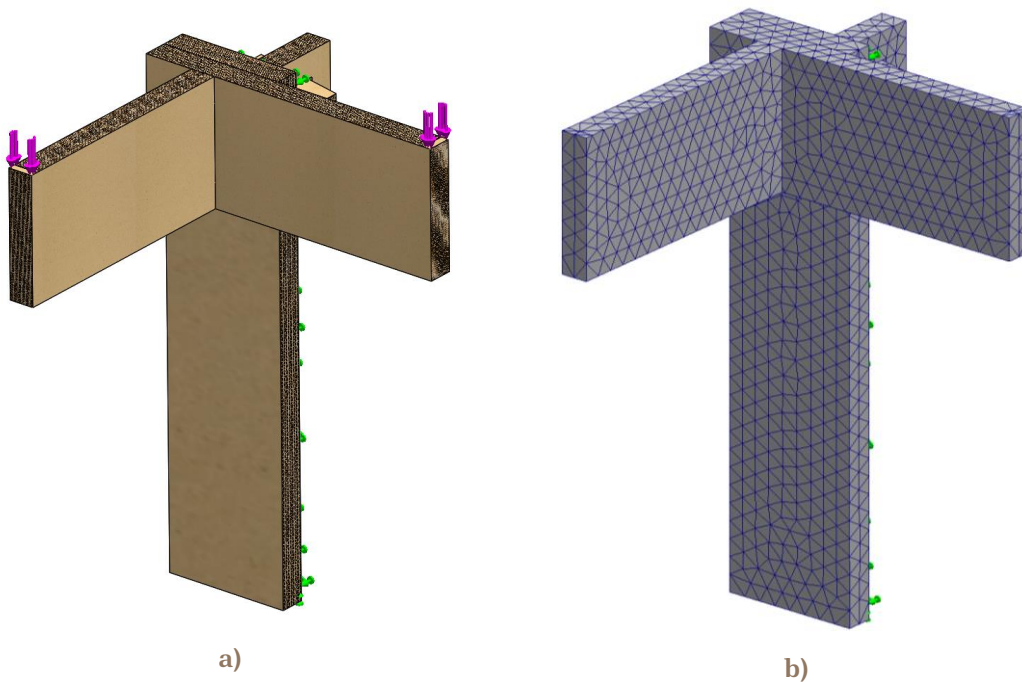


Figura 216. Unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 217 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **1,700 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los componentes**.

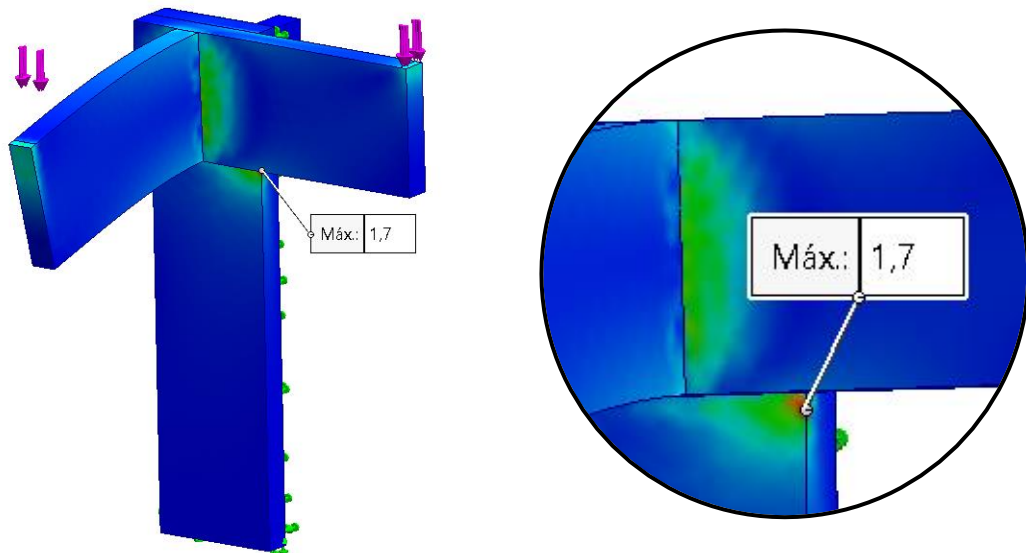


Figura 217. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 218 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **3,103 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

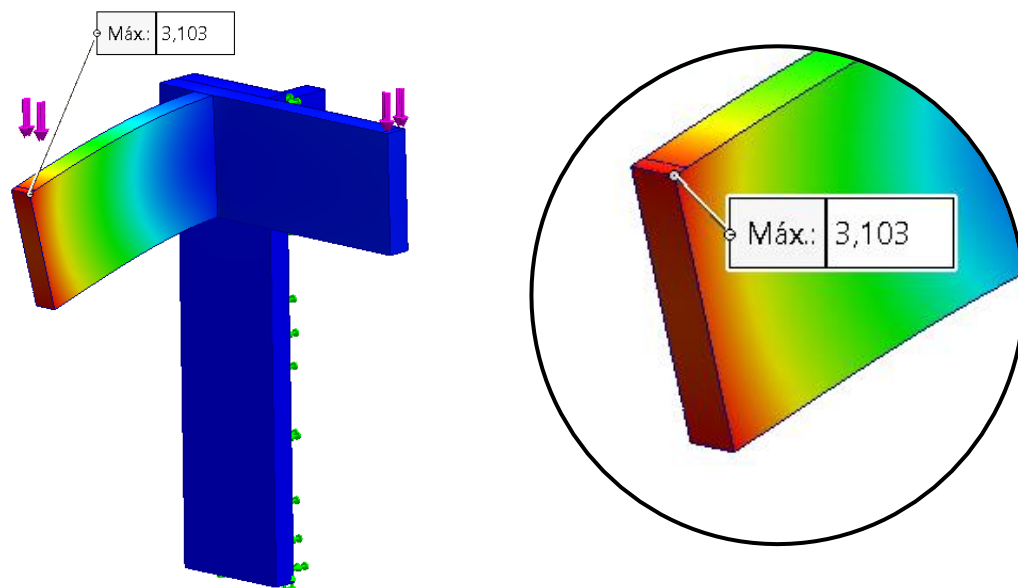


Figura 218. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión horizontal + horizontal + vertical 2 tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.6. Análisis por unión tipo plancha + horizontal

Para las uniones con configuración **plancha + horizontal**, se ha empleado una **escala de tensiones de von Mises** comprendida entre **0 MPa** y **2,78 MPa**, mostrada en la Figura 219a. En cuanto a la representación de los **desplazamientos resultantes (URES)**, se ha utilizado una escala con valores comprendidos entre **0 mm** y **20,05 mm**, detallada en la Figura 219b.

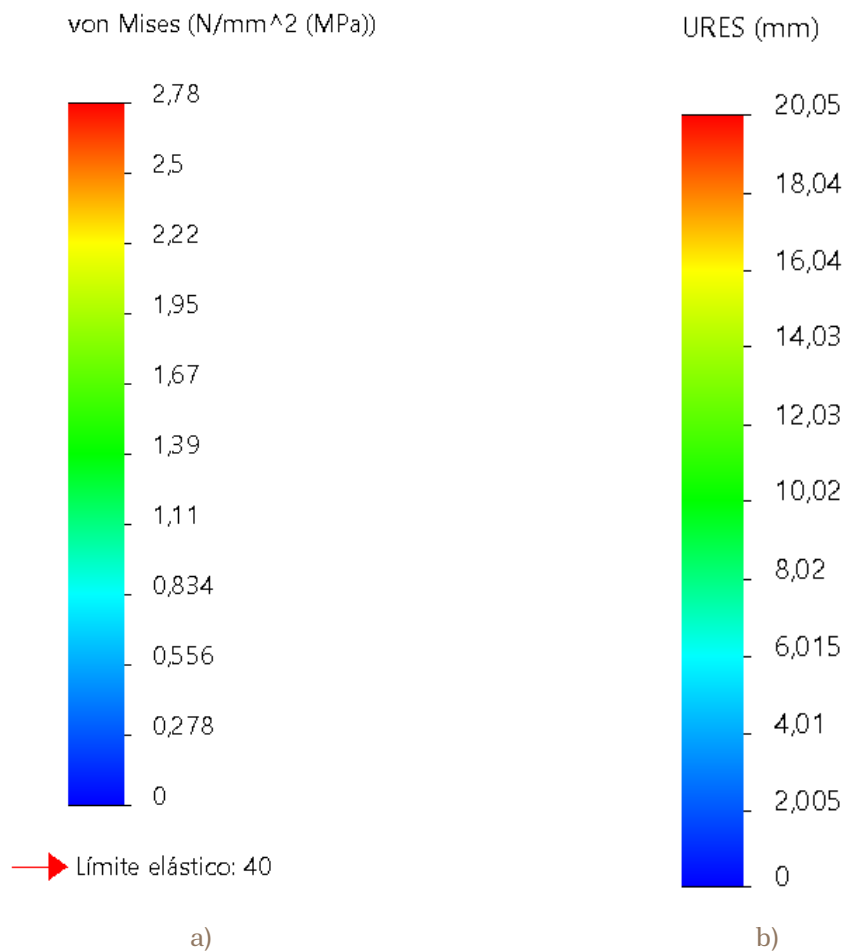


Figura 219. Unión plancha + horizontal, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.6.1. Unión caja y espiga

La Figura 220a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo plancha + horizontal** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento horizontal**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento plancha queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical de 50 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 11,34 mm**, obteniéndose un total de **8.816 elementos** y **15.598 nodos**. La Figura 220b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

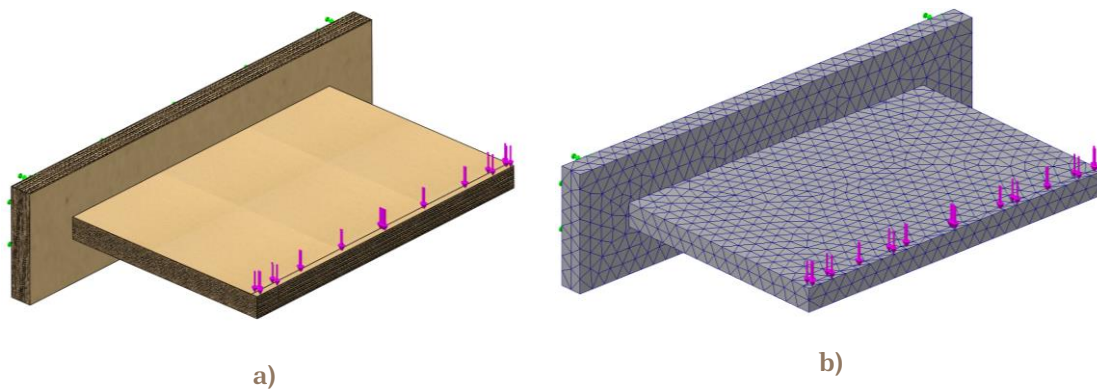


Figura 220. Unión plancha + horizontal tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || Fuente: Elaboración propia

La Figura 221 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **2,780 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

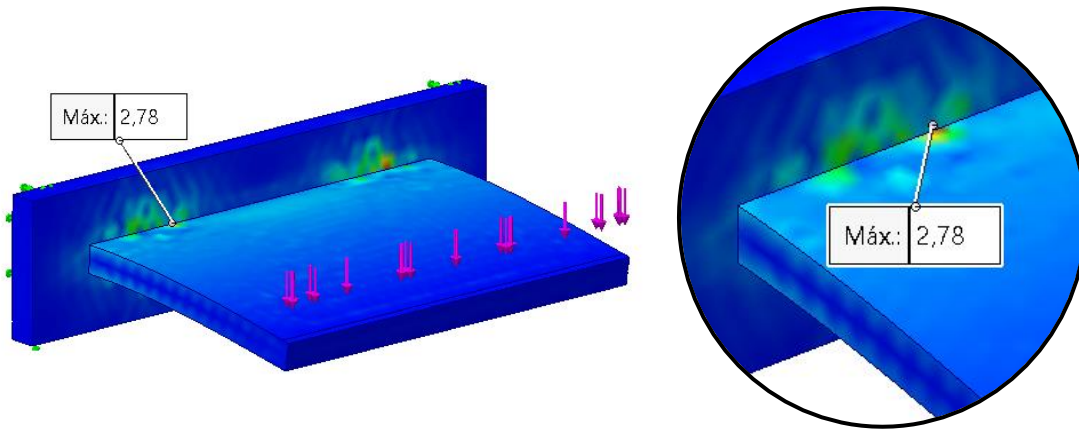


Figura 221. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 222 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **20,03 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

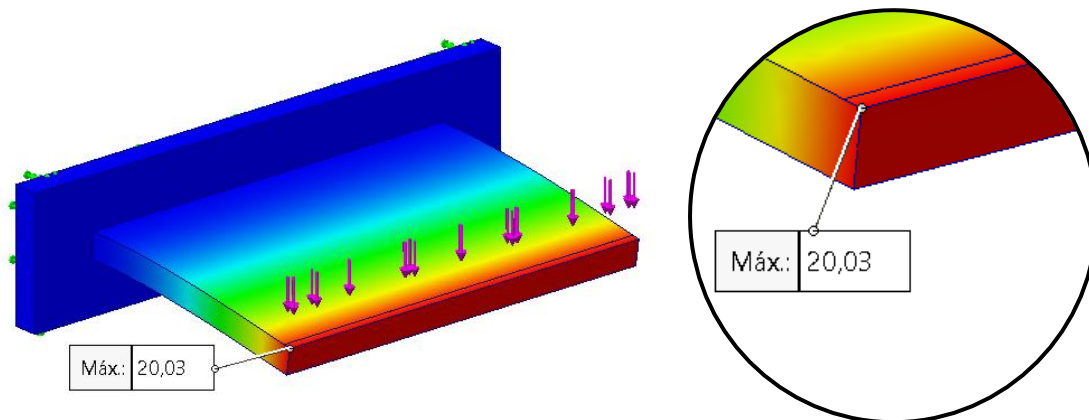


Figura 222. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.6.2. Unión caja y espiga con cuña

La Figura 223a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo plancha + horizontal** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento horizontal**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento plancha queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical de 50 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 11,99 mm**, obteniéndose un total de **9.616 elementos** y **17.292 nodos**. La Figura 223b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

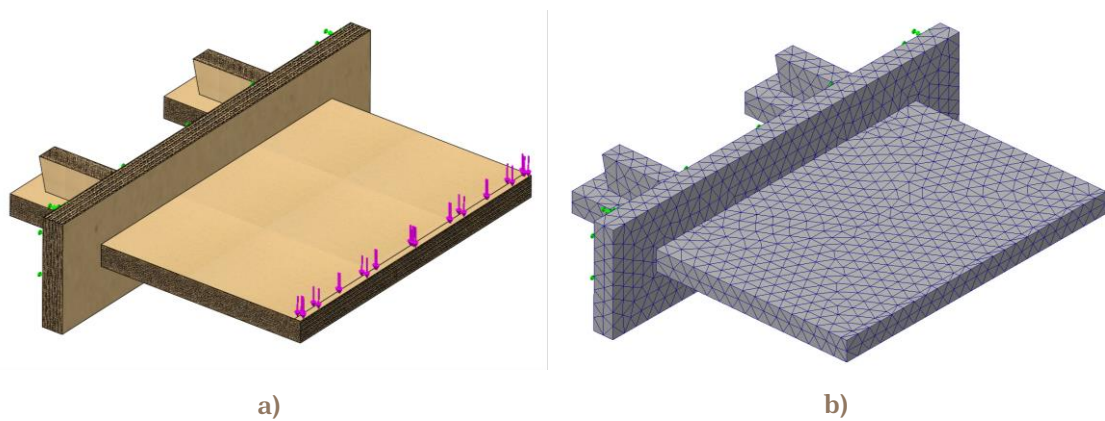


Figura 223. Unión plancha + horizontal tipo caja y espiga con cuña: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || Fuente: Elaboración propia

La Figura 224 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **2,700 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

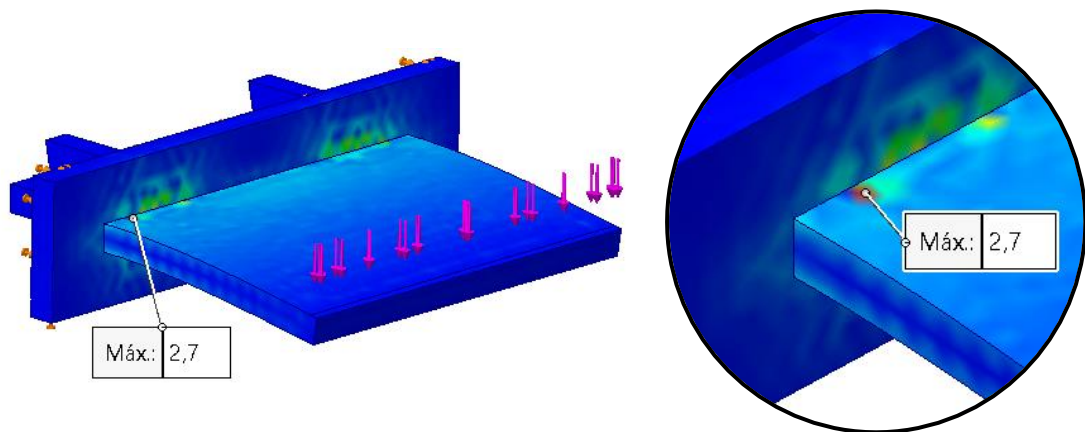


Figura 224. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 225 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **20,05 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

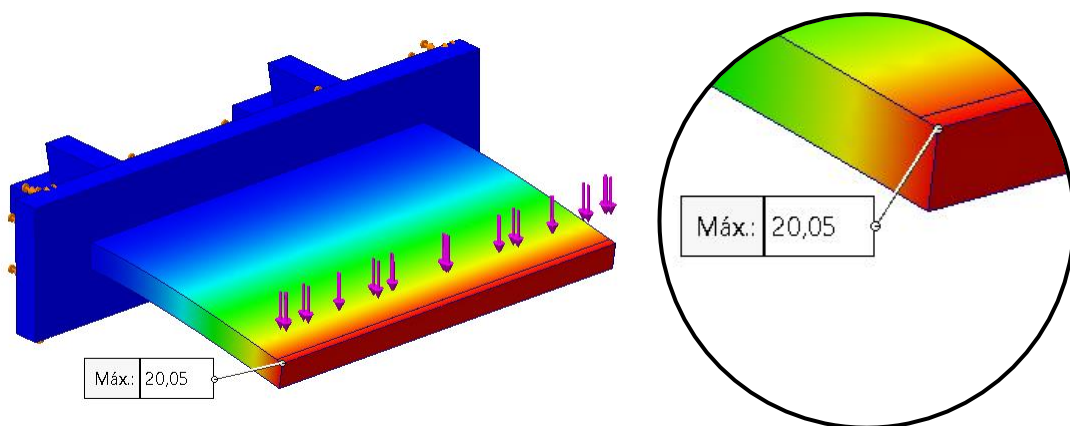


Figura 225. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + horizontal tipo caja y espiga con cuña || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.7. Análisis por unión tipo plancha + vertical 1

Para las uniones con configuración **plancha + vertical 1**, se ha empleado una **escala de tensiones de von Mises** comprendida entre **0 MPa y 9,899 MPa**, mostrada en la Figura 226a. En cuanto a la representación de los **desplazamientos resultantes (URES)**, se ha utilizado una escala con valores comprendidos entre **0 mm y 45,83 mm**, detallada en la Figura 226b.

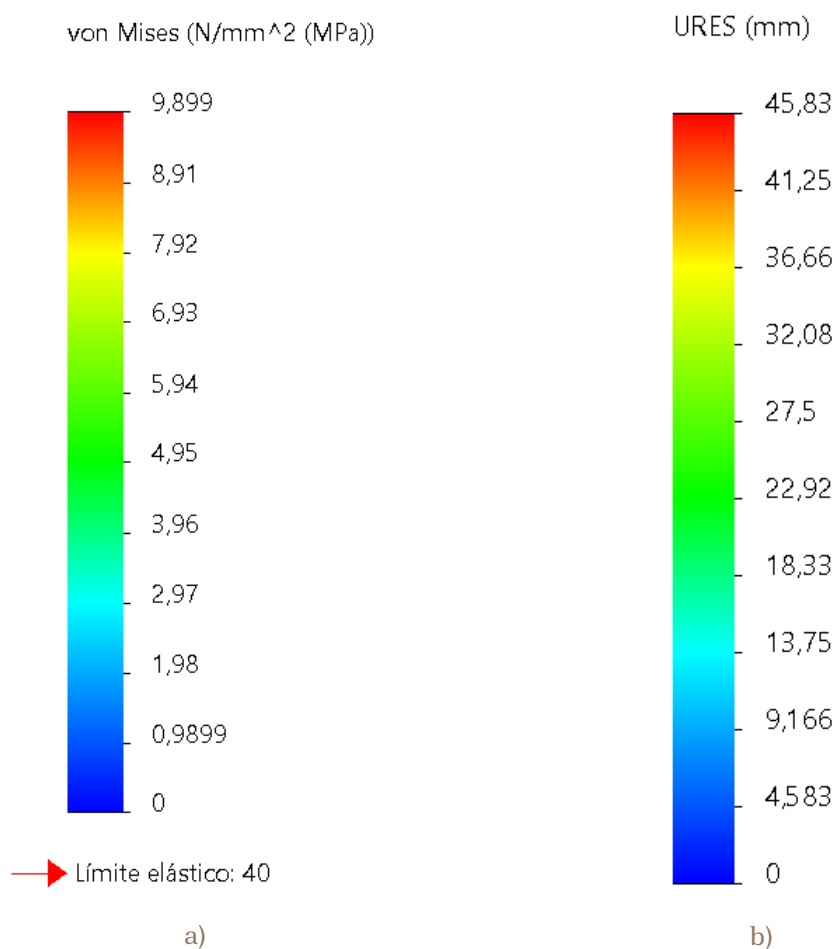


Figura 226. Unión plancha + vertical 1, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.7.1. Unión caja y espiga

La Figura 227a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo plancha + vertical 1** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento plancha queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 12,38 mm**, obteniéndose un total de **9.588 elementos** y **16.787 nodos**. La Figura 227b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

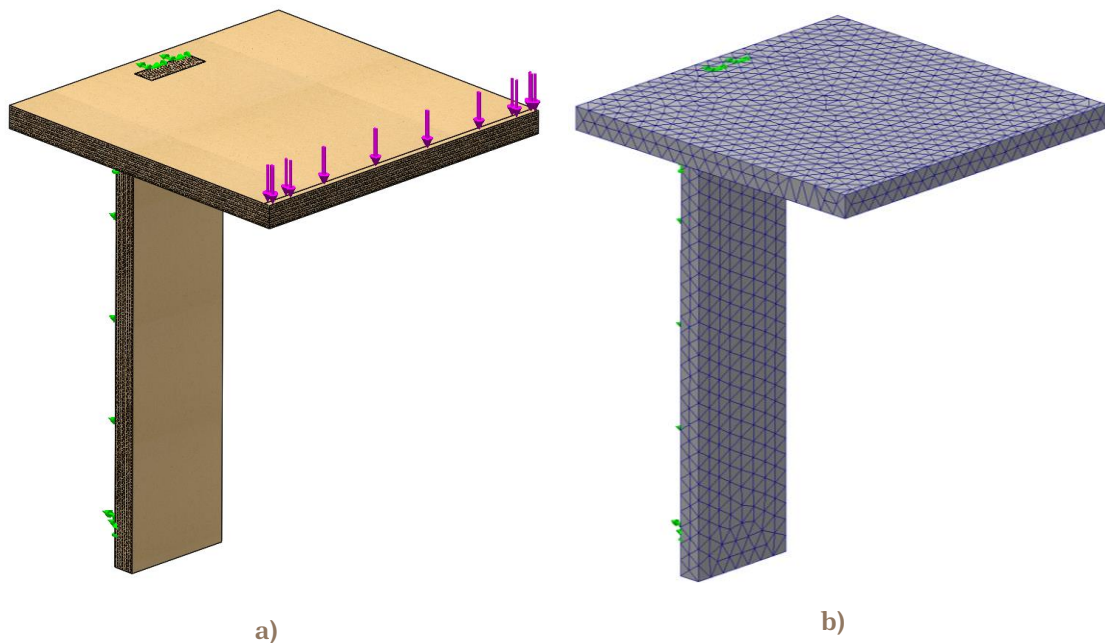


Figura 227. Unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || Fuente: Elaboración propia

Anexo 1

La Figura 228 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **9,899 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

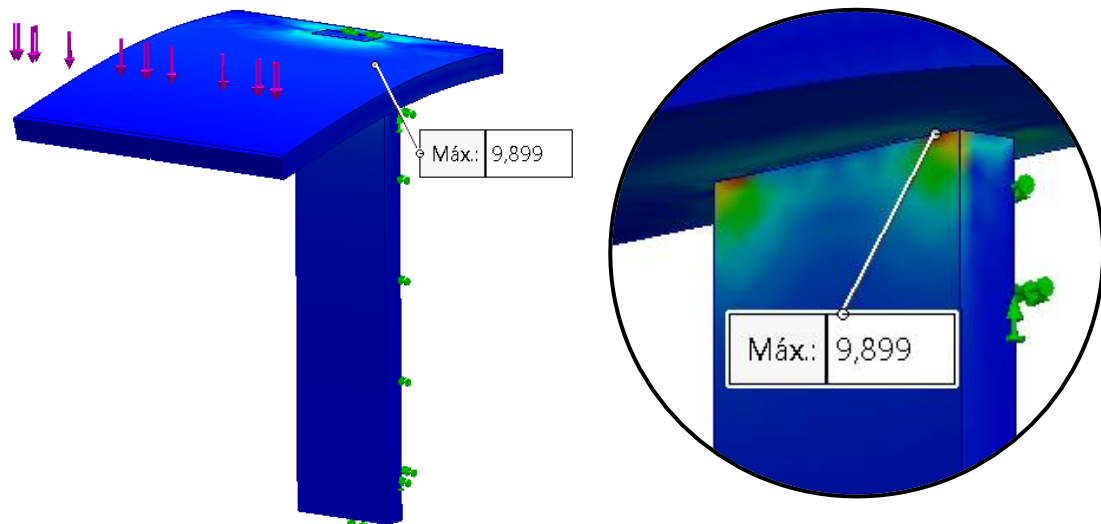


Figura 228. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga || Fuente: Elaboración propia

La Figura 229 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **45,83 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

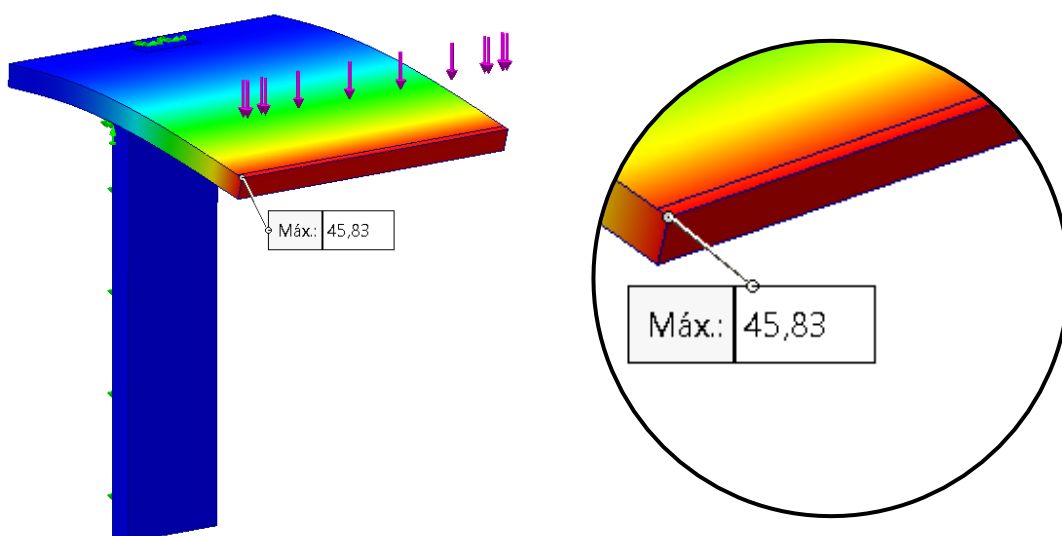


Figura 229. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga || Fuente: Elaboración propia

1.2.7.2. Unión caja y espiga con pasador cilíndrico

La Figura 230a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo plancha + vertical 1** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento plancha queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 12,54 mm**, obteniéndose un total de **11.081 elementos** y **19.984 nodos**. La Figura 230b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

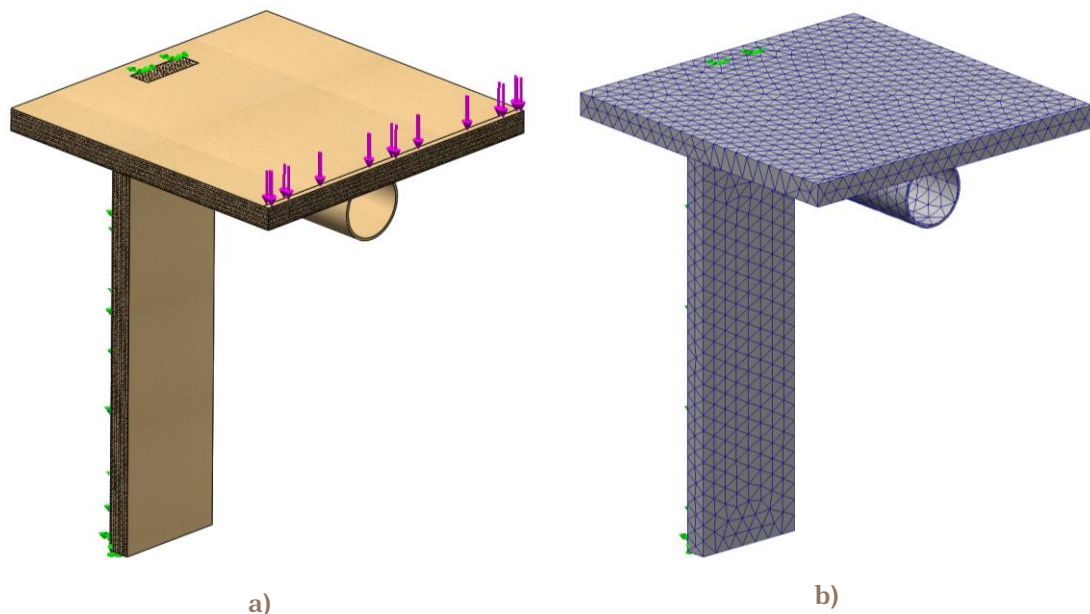


Figura 230. Unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 231 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **6,474 MPa**, y se localiza en el **extremo del pasador cilíndrico**.

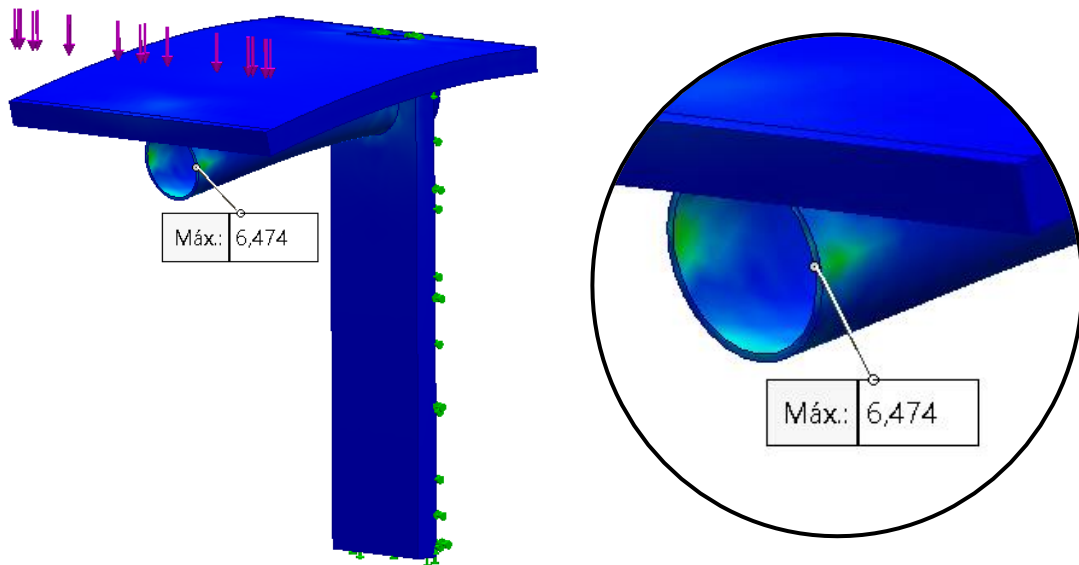


Figura 231. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 232 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **10,57 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

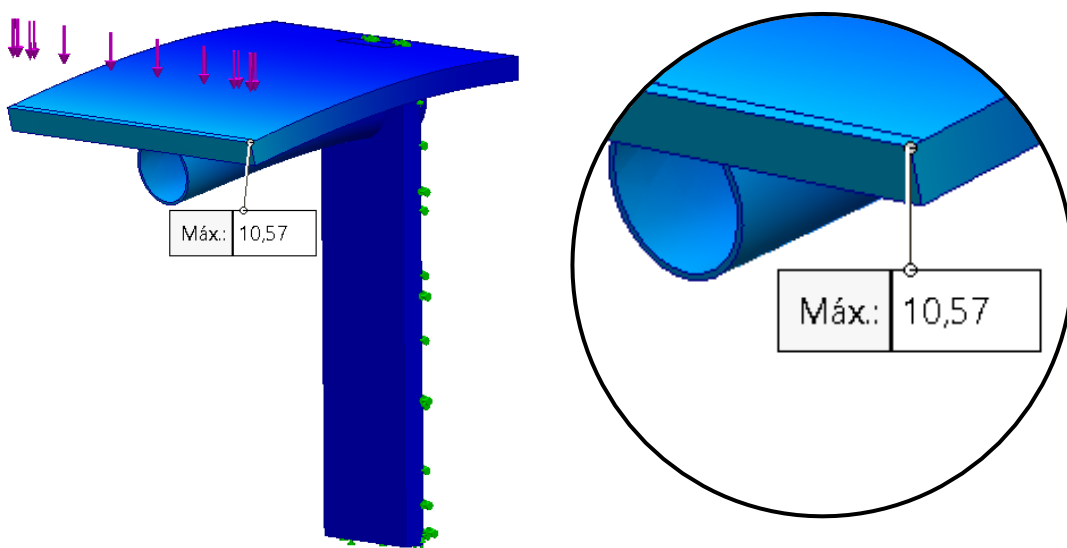


Figura 232. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 1 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.8. Análisis por unión tipo plancha + vertical 2

Para las uniones con configuración **plancha + vertical 2**, se ha empleado una **escala de tensiones de von Mises** comprendida entre **0 MPa y 12,13 MPa**, mostrada en la Figura 233a. En cuanto a la representación de los **desplazamientos resultantes (URES)**, se ha utilizado una escala con valores comprendidos entre **0 mm y 21,56 mm**, detallada en la Figura 233b.

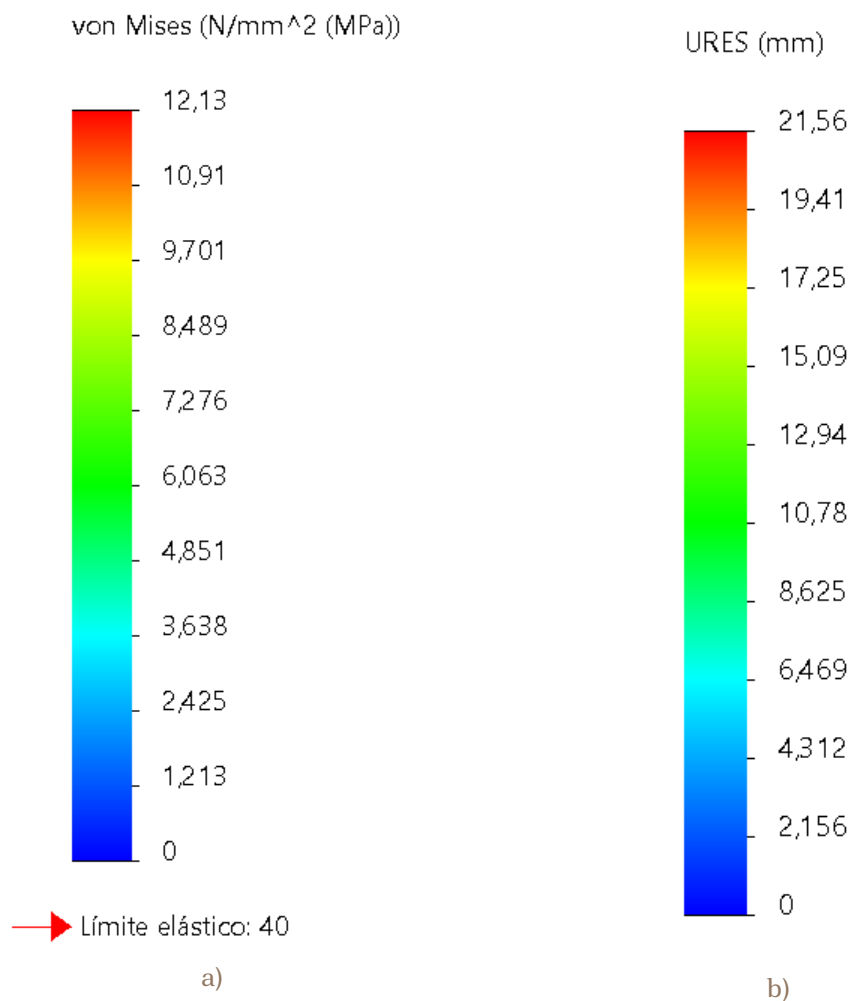


Figura 233. Unión plancha + vertical 2, escala: a) de tensiones von Mises, b) de desplazamientos resultantes || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.8.1. Unión caja y espiga

La Figura 234a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo plancha + vertical 2** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento plancha queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 11,49 mm**, obteniéndose un total de **8.887 elementos** y **15.670 nodos**. La Figura 234b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

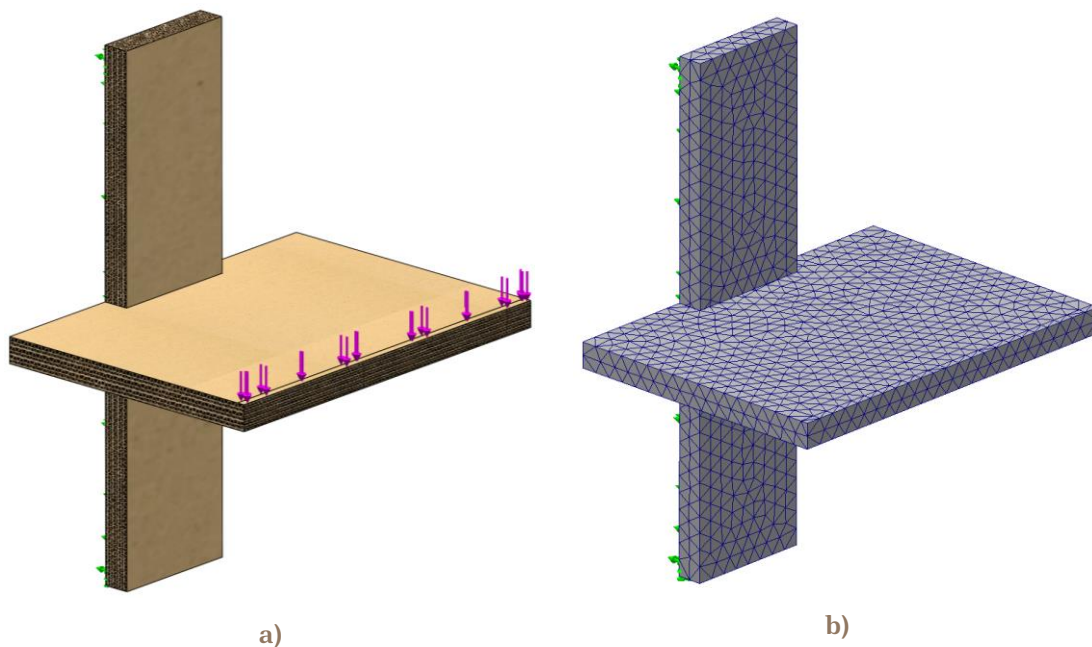


Figura 234. Unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || Fuente: Elaboración propia

La Figura 235 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **12,130 MPa**, y se localiza en la **zona de unión entre los dos componentes**.

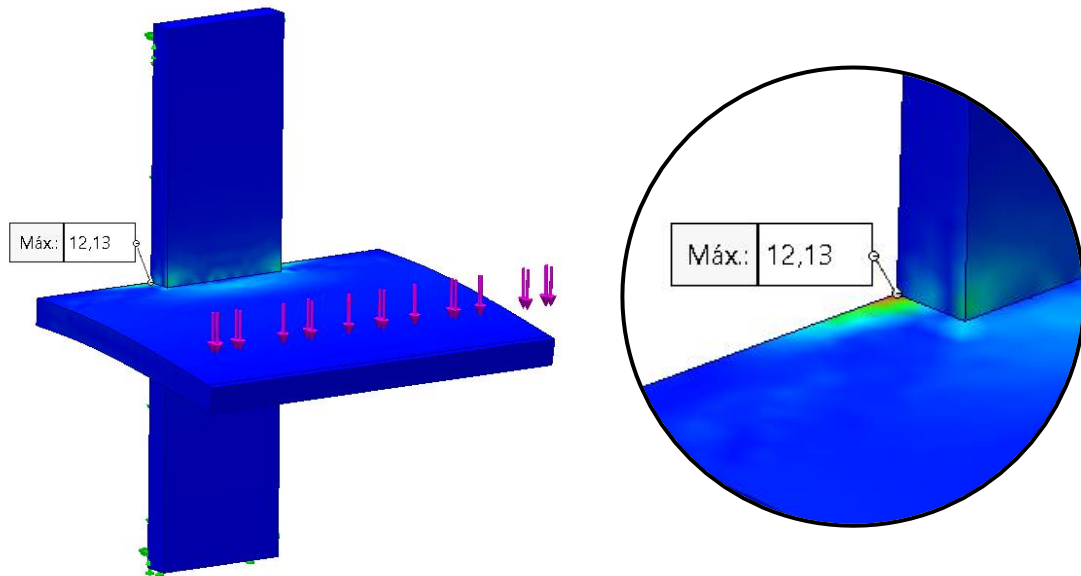


Figura 235. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión placa + vertical 2 tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 236 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **21,56 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

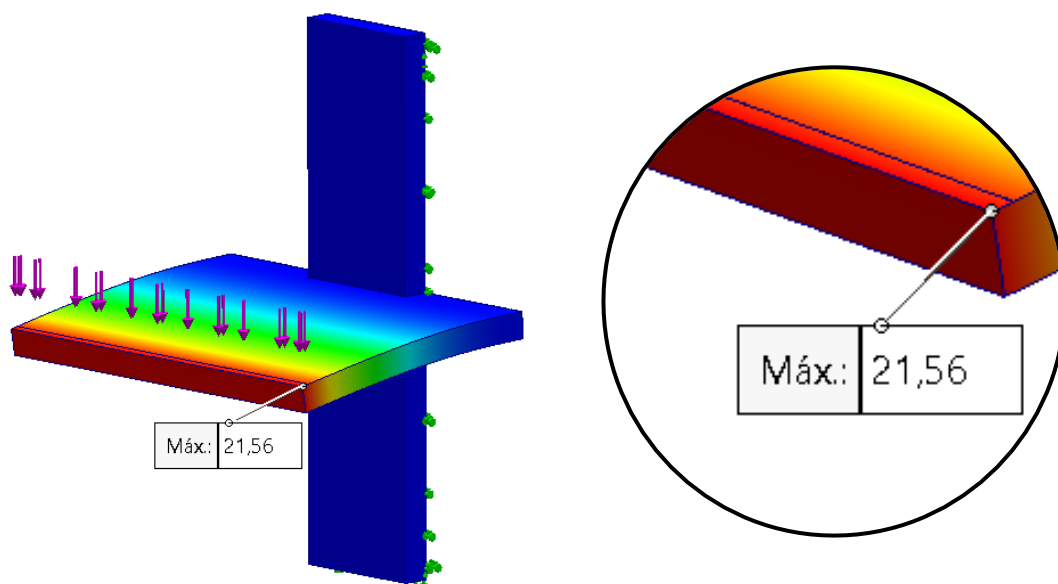


Figura 236. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión placa + vertical 2 tipo caja y espiga || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.8.2. Unión caja y espiga con pasador cilíndrico

La Figura 237a muestra la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo plancha + vertical 2** ante una **carga estática en voladizo**.

Las **condiciones de contorno** consisten en la **fijación completa de una de las caras del elemento vertical**, simulando un **empotramiento**, de manera que el elemento plancha queda en configuración de **voladizo libre**.

La **carga aplicada** consiste en una **fuerza vertical** de 50 N, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, localizada en el extremo libre del voladizo.

La malla generada para esta unión se ha realizado con **elementos tetraédricos cuadráticos de segundo orden**. Se ha empleado un **tamaño característico de elemento de 11,66 mm**, obteniéndose un total de **19.036 elementos** y **14.093 nodos**. La Figura 237b muestra la malla aplicada sobre la unión analizada.

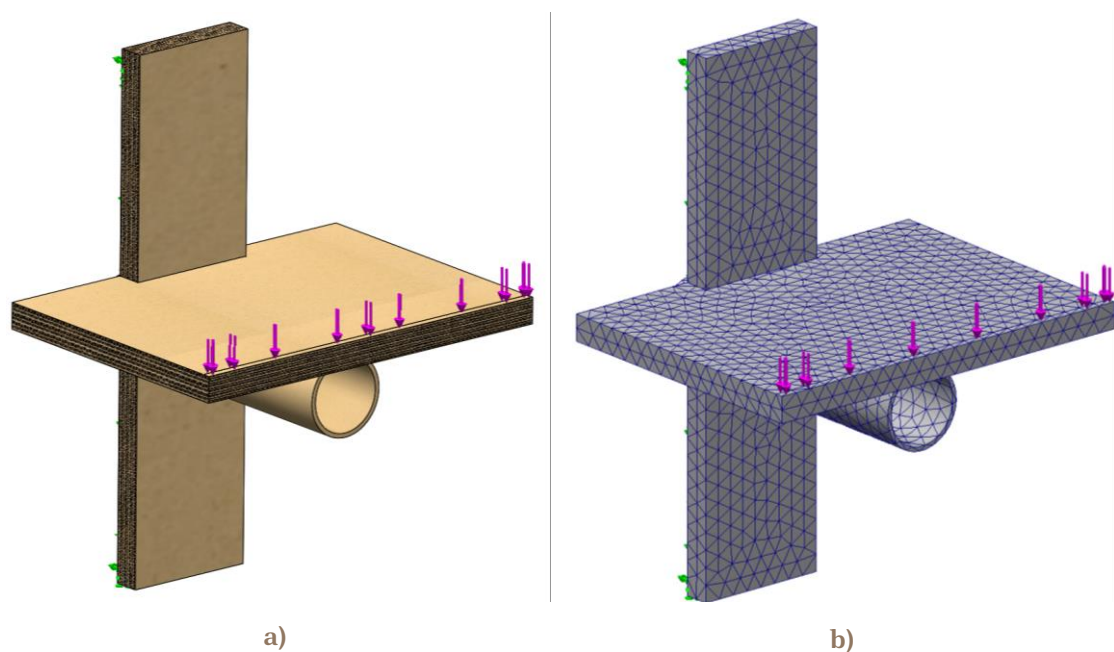


Figura 237. Unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico: a) configuración del ensayo de carga estática, b) malla generada || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 238 muestra el resultado de tensiones en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. La tensión máxima es de **7,953 MPa**, y se localiza en el **extremo del pasador cilíndrico**.

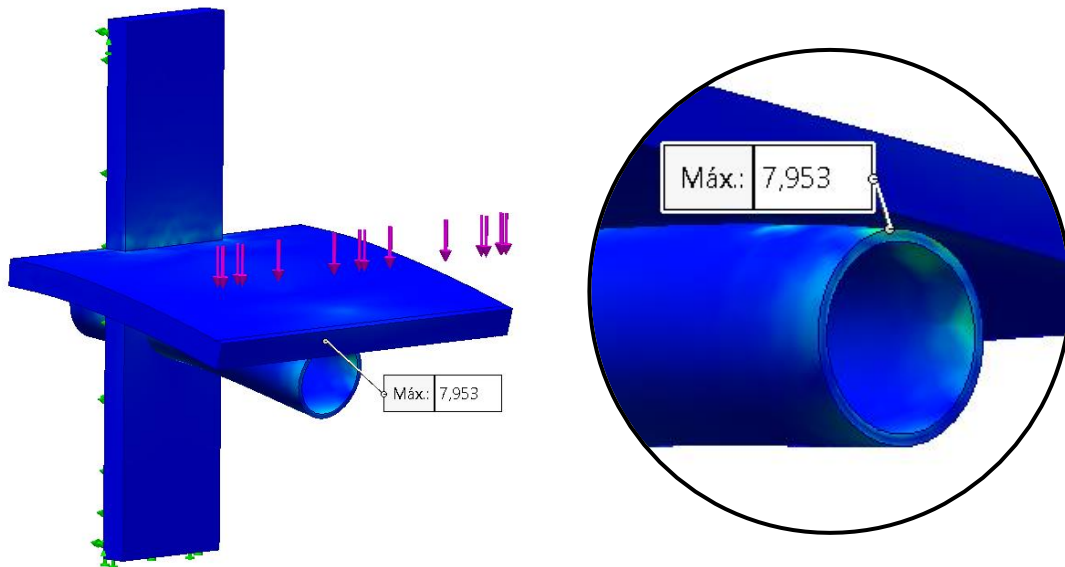


Figura 238. Resultado tensiones ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 239 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **6,287 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

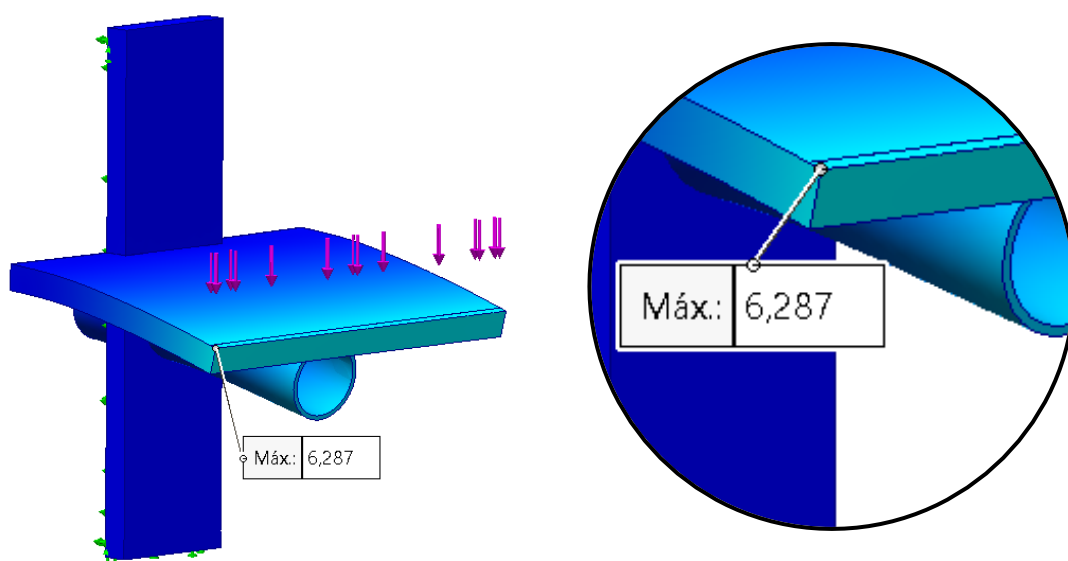


Figura 239. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión plancha + vertical 2 tipo caja y espiga con pasador cilíndrico || **Fuente:** Elaboración propia

1.2.9. Comparativa de resultados

En la Tabla 55 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones.

Tabla 55. Resultados obtenidos en la simulación

Unión	Tipo	Tensión [MPa]	Desplazamiento [mm]
Horizontal + vertical	Caja y espiga	4,651	56,21
	Caja y espiga con cuña	5,885	56,225
Horizontal + horizontal	Caja y espiga	0,723	0,04317
	Caja y espiga con cuña	0,768	2,539
Horizontal + horizontal + vertical 1	Caja y espiga	1,305	3,067
	Caja y espiga con cuña	1,253	3,066
Horizontal + horizontal + vertical 2	Caja y espiga	1,557	3,105
	Caja y espiga con cuña	1,700	3,103
Plancha + horizontal	Caja y espiga	2,780	20,030
	Caja y espiga con cuña	2,700	20,05
Plancha + vertical 1	Caja y espiga	9,899	45,83
	Caja y espiga con pasador cilíndrico	6,474	10,57
Plancha + vertical 2	Caja y espiga	12,13	21,56
	Caja y espiga con pasador cilíndrico	7,953	6,287










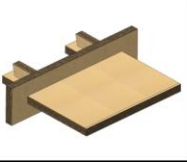

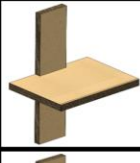


En primer lugar, la unión **horizontal + horizontal + vertical 1** se caracteriza por una **composición geométrica compleja**, representativa de configuraciones de nudo estructural frecuentes en estructuras de mobiliario. A pesar de mostrar tensiones moderadas (**1,305 MPa**) y desplazamientos controlados (**3,067 mm**), esta unión resulta esencial para estudiar el comportamiento multiaxial bajo cargas combinadas y la interacción entre elementos ortogonales.

La unión **plancha + horizontal** presenta valores de **tensión moderados** (2,78 MPa) pero un **desplazamiento significativamente alto** (20,03 mm), evidenciando una **baja rigidez estructural** frente a esfuerzos de flexión transversal. Esta condición es relevante para evaluar uniones expuestas a cargas distribuidas o no centradas, especialmente en componentes horizontales de gran longitud.

Por su parte, la unión **plancha + vertical 2** presenta la **tensión máxima más elevada** de todos los ensayos (12,13 MPa), lo cual indica una alta concentración de esfuerzos en la unión, con un desplazamiento asociado de **21,56 mm**. Esta configuración refleja un **escenario crítico de transmisión de carga vertical con flexión importante**.

Con base en los resultados obtenidos, se han seleccionado tres configuraciones —**horizontal + horizontal + vertical 1**, **plancha + horizontal** y **plancha + vertical 2**— por considerarse las más **estructuralmente desfavorables** y **representativas** de las condiciones de carga típicas en aplicaciones de mobiliario. Esta selección queda reflejada en la Tabla 56.

Tabla 56. Uniones seleccionadas para los ensayos físicos

	Horizontal + Vertical	Horizontal + Horizontal	Horizontal + Horizontal + Vertical	Horizontal + Horizontal + Vertical	Plancha + Horizontal	Plancha + Horizontal	Plancha + Vertical	Plancha + Vertical
Caja y espiga								
Caja y espiga con cuña								
Caja y espiga								
Caja y espiga con pasador cilindrico								

ANEXO

2

ANEXO 2. Modelado MEF basado en resultados experimentales

A partir de los **ensayos físicos de flexión** realizados sobre las distintas configuraciones de uniones estructurales en cartón, se ha obtenido un conjunto de **valores experimentales** que permiten caracterizar el comportamiento mecánico de cada tipo de unión. Entre estos valores, se ha seleccionado la **fuerza máxima** alcanzada en cada caso como dato de referencia para la aplicación de cargas en los modelos de simulación.

Este anexo desarrolla una serie de simulaciones basadas en el Método de Elementos Finitos (MEF), con el objetivo de replicar las condiciones de carga reales a las que han sido sometidas las probetas durante los ensayos experimentales. Para cada tipo de unión analizada, se ha diseñado un modelo tridimensional que reproduce tanto la geometría como las condiciones de contorno y los puntos de aplicación de carga utilizados en los ensayos físicos.

El enfoque adoptado consiste en aplicar a cada simulación el **valor medio de la fuerza máxima** obtenida experimentalmente a partir de las tres probetas ensayadas para cada tipología de unión. A partir de esta carga, el software calcula la **deformación máxima (flecha)** esperada. Este valor simulado se recoge con el propósito de ser comparado con la **flecha media** calculada a partir de las tres probetas ensayadas en cada tipología de unión, permitiendo así realizar una evaluación cuantitativa de la **coherencia entre el modelo virtual y la respuesta física del material**. Este proceso también permite **validar la fiabilidad de las simulaciones virtuales** como herramienta predictiva.

2.1. Unión tipo A-HHV

La Figura 240 presenta la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo A-HHV** sometida a una carga estática en voladizo. Las condiciones de contorno se definen mediante la **fijación de una superficie de 120 × 90 mm en cada uno de los extremos del elemento vertical**. La carga aplicada consiste en una **fuerza vertical de 58,532 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, ubicada en el extremo libre de los elementos horizontales.

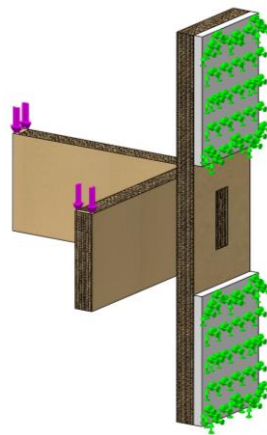


Figura 240. Configuración ensayo de carga estática sobre unión A-HHV || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 241 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **3,72 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

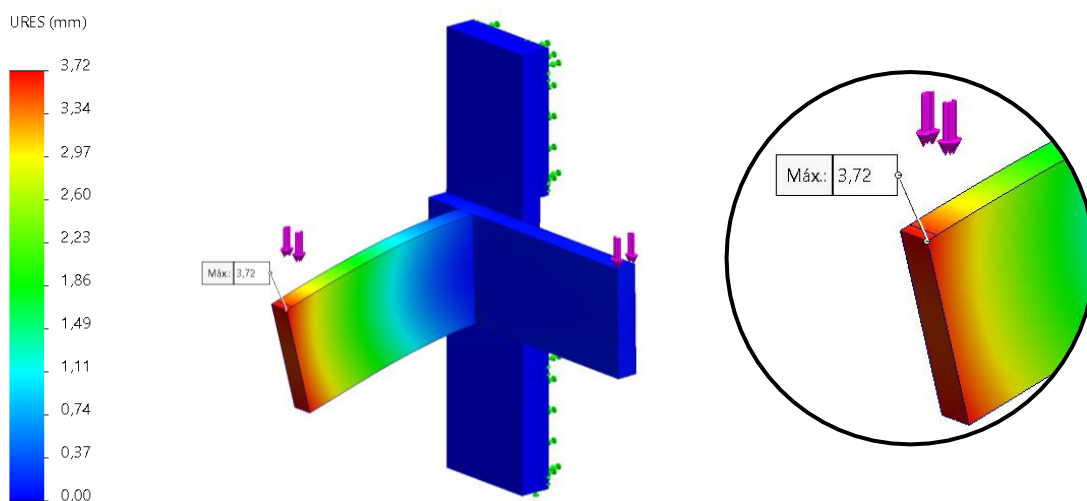


Figura 241. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión A-HHV || **Fuente:** Elaboración propia

2.2. Unión tipo B-HHV

La Figura 242 presenta la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo B-HHV** sometida a una carga estática en voladizo. Las condiciones de contorno se definen mediante la **fijación de una superficie de 120 × 90 mm en cada uno de los extremos del elemento vertical**. La carga aplicada consiste en una **fuerza vertical de 58,153 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, ubicada en el extremo libre de los elementos horizontales.

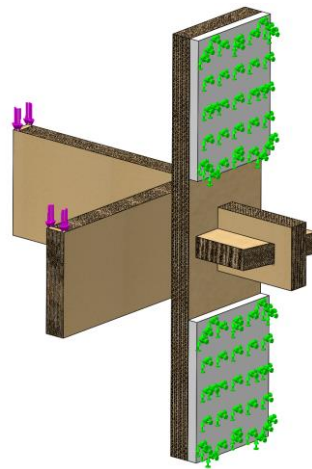


Figura 242. Configuración ensayo de carga estática sobre unión B-HHV || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 243 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **3,63 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

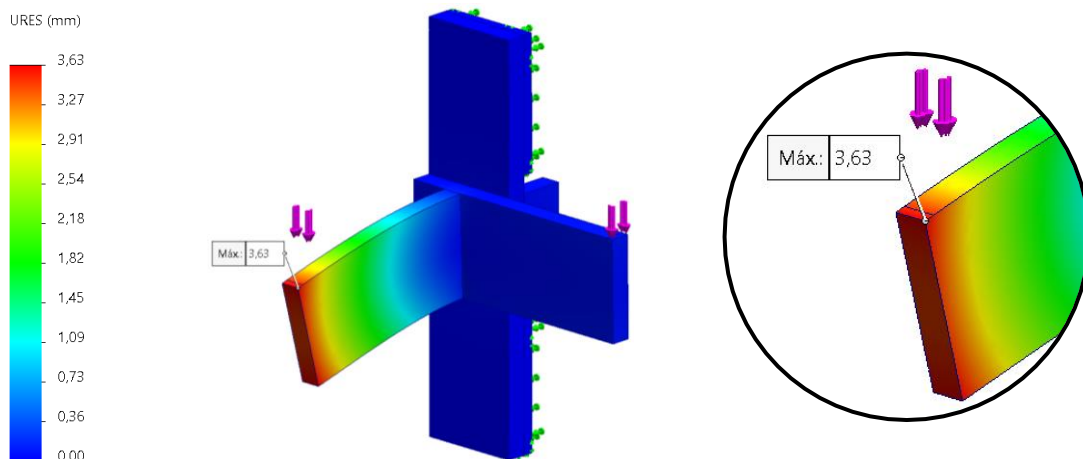


Figura 243. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión B-HHV || **Fuente:** Elaboración propia

2.3. Unión tipo A-PH

La Figura 244 presenta la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo A-PH** sometida a una carga estática en voladizo. Las condiciones de contorno se definen mediante la **fijación de una superficie de 30 × 90 mm** en cada uno de los extremos del **elemento horizontal**. La carga aplicada consiste en una **fuerza vertical de 22,968 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, ubicada en el extremo libre del elemento plancha.

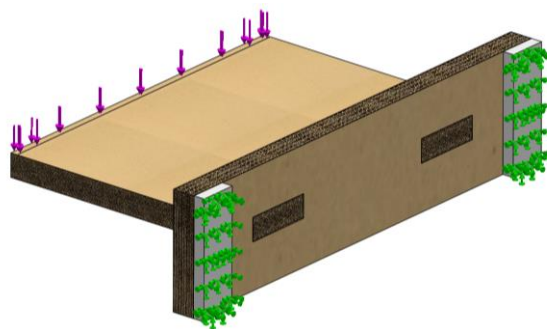


Figura 244. Configuración ensayo de carga estática sobre unión A-PH || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 245 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **9,30 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

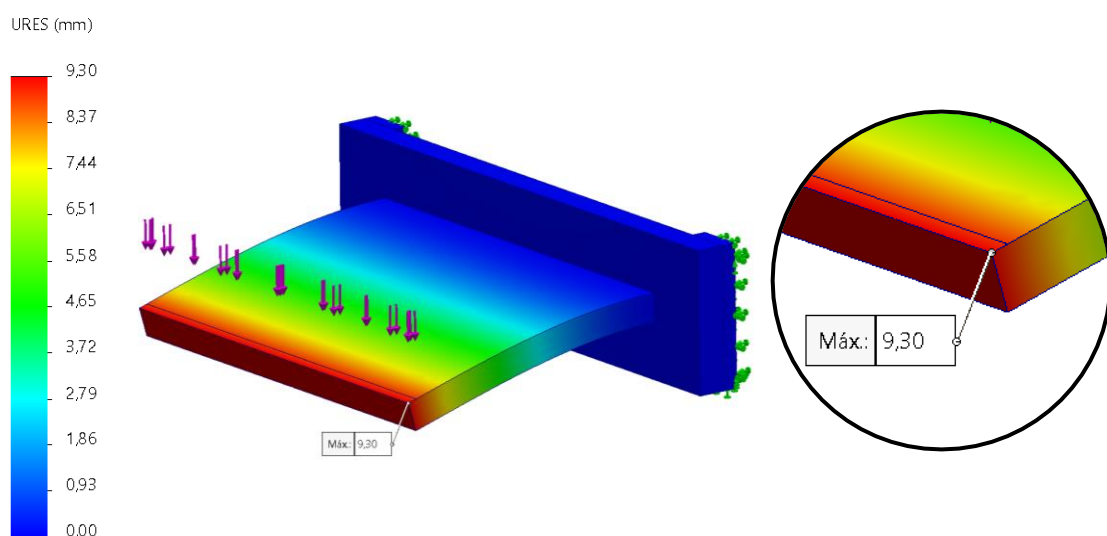


Figura 245. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión A-PH || **Fuente:** Elaboración propia

2.4. Unión tipo B-PH

La Figura 246 presenta la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo B-PH** sometida a una carga estática en voladizo. Las condiciones de contorno se definen mediante la **fijación de una superficie de 30 × 90 mm** en cada uno de los extremos del **elemento horizontal**. La carga aplicada consiste en una **fuerza vertical de 59,718 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, ubicada en el extremo libre del elemento plancha.

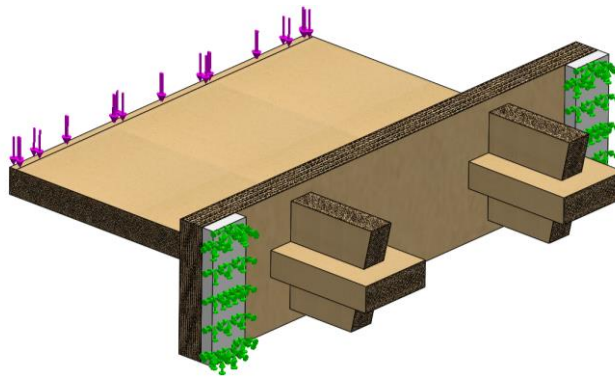


Figura 246. Configuración ensayo de carga estática sobre unión B-PH || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 247 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **24,56 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

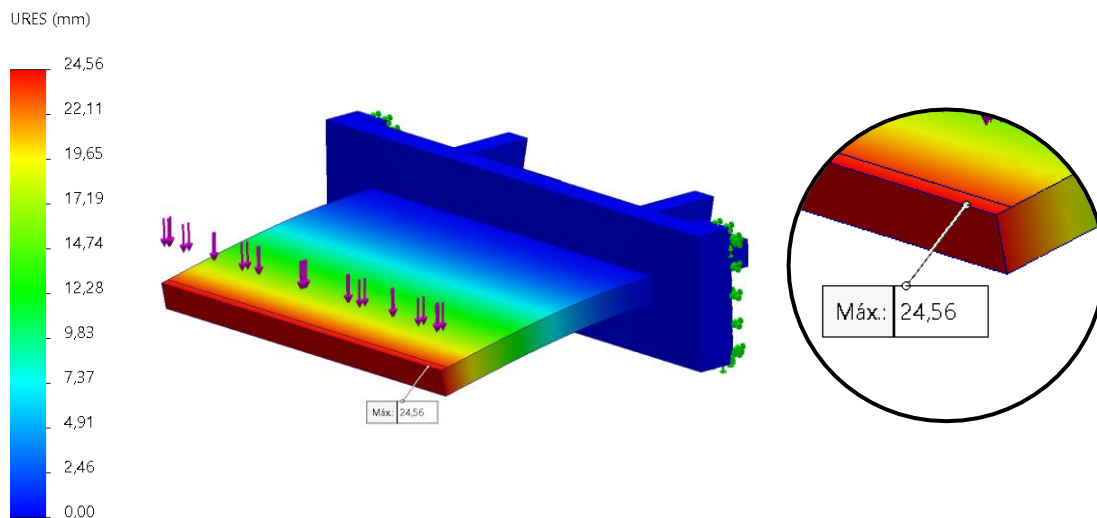


Figura 247. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión B-PH || **Fuente:** Elaboración propia

2.5. Unión tipo A-PV

La Figura 248 presenta la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo A-PV** sometida a una carga estática en voladizo. Las condiciones de contorno se definen mediante la **fijación de una superficie de 120 × 90 mm en cada uno de los extremos del elemento vertical**. La carga aplicada consiste en una **fuerza vertical de 19,956 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, ubicada en el extremo libre del elemento plancha.

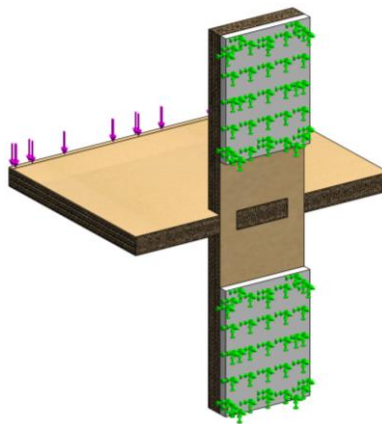


Figura 248. Configuración ensayo de carga estática sobre unión A-PV || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 249 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **8,46 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

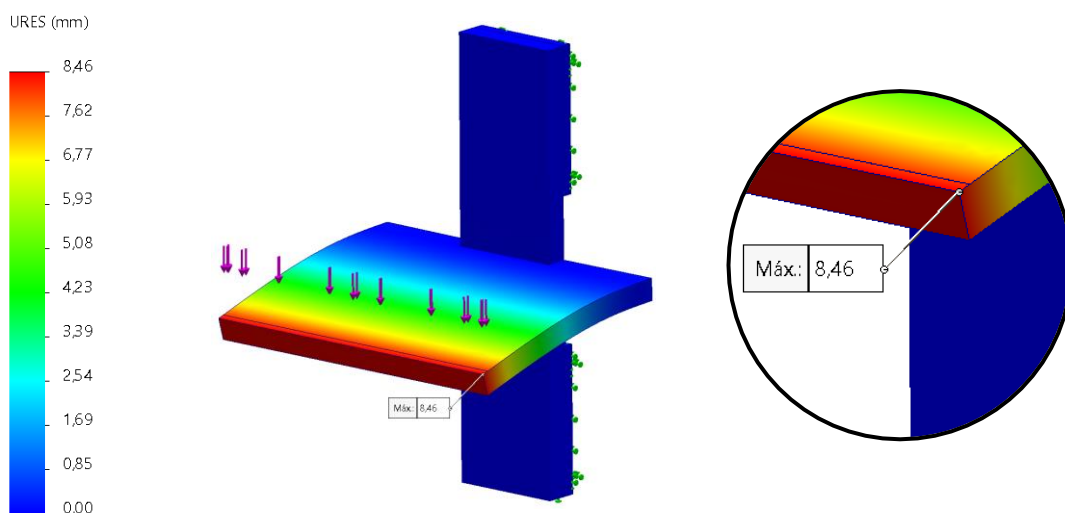


Figura 249. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión A-PV || **Fuente:** Elaboración propia

2.6. Unión tipo C-PV

La Figura 250 presenta la configuración empleada para el análisis del comportamiento estructural de la **unión tipo C-PV** sometida a una carga estática en voladizo. Las condiciones de contorno se definen mediante la **fijación de una superficie de 120 × 90 mm en cada uno de los extremos del elemento vertical**. La carga aplicada consiste en una **fuerza vertical de 37,413 N**, distribuida uniformemente sobre una **sección rectangular de 5,5 mm de anchura**, ubicada en el extremo libre del elemento plancha.

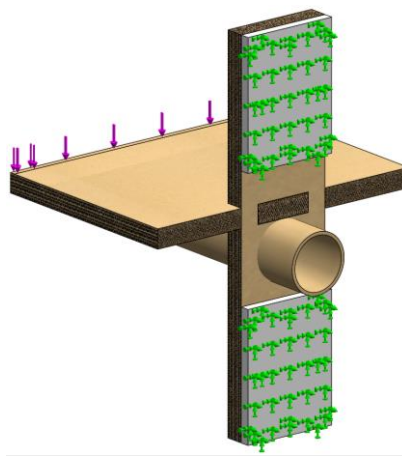


Figura 250. Configuración ensayo de carga estática sobre unión C-PV || **Fuente:** Elaboración propia

La Figura 251 muestra el resultado de desplazamientos en el ensayo de carga estática de la unión en voladizo. El desplazamiento máximo es de **5,38 mm**, localizado en el extremo del voladizo.

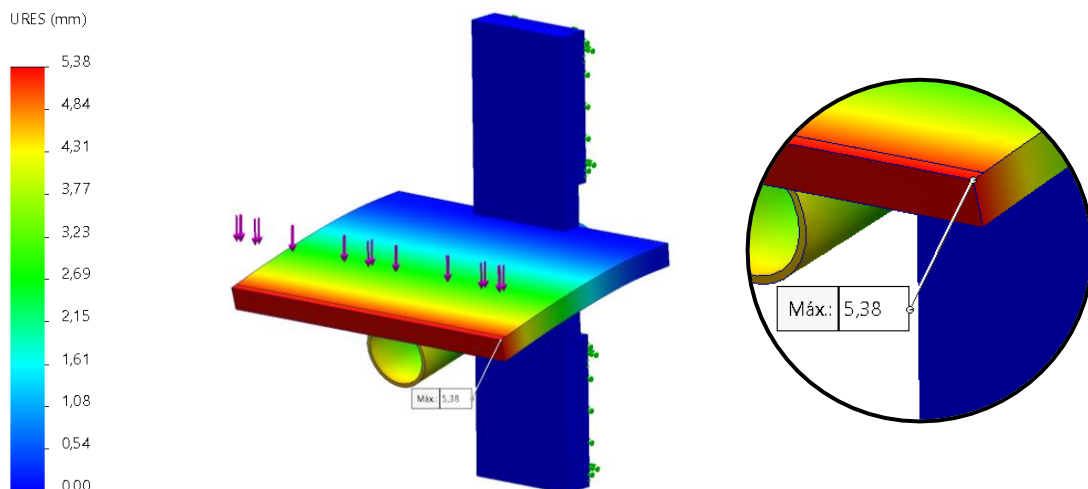


Figura 251. Resultado desplazamientos ensayo de carga estática sobre unión C-PV || **Fuente:** Elaboración propia

Anexo 2

A pesar de haber implementado una definición ortotrópica del material en el entorno de SolidWorks —asignando propiedades mecánicas diferenciadas en cada dirección principal—, se observa una discrepancia notable entre las **flechas obtenidas experimentalmente** y las **simuladas**, tal como se refleja en la Tabla 57. Los errores porcentuales, que superan el 85 %, evidencian que el modelo virtual no reproduce con suficiente precisión la respuesta real de las uniones ensayadas.

Tabla 57. Comparativa resultados experimentales y simulados

Unión	Fuerza aplicada [N]	Flecha real [mm]	Flecha simulada [mm]	Error [%]
A-HHV	58,532	30	3,72	87,60
B-HHV	58,153	83,67	3,63	95,66
A-PH	22,968	156,67	9,3	94,06
B-PH	59,718	167	24,56	85,29
A-PV	19,956	137	8,46	93,82
C-PV	37,413	129,33	5,38	95,84

Una posible causa de estas diferencias radica en la **complejidad real de la muestra** frente a la simplificación necesaria en la simulación. En los ensayos físicos, las probetas estaban formadas por **tres capas de cartón corrugado unidas mediante adhesivo**, lo que se traduce en una estructura compuesta con **seis ondas internas**. Esta configuración multicapa introduce una **interacción interlaminar** entre capas, una distribución de tensiones y fenómenos locales como micro compresiones, delaminaciones parciales o ajustes por deformación localizada, que difícilmente pueden ser replicados con fidelidad en un entorno virtual convencional.

Además, aunque el comportamiento ortotrópico del material base ha sido modelado, las **propiedades mecánicas asignadas** (módulos de elasticidad, coeficientes de Poisson, etc.) pueden no reflejar con exactitud los valores reales del cartón específico utilizado, ya que estos dependen de múltiples factores: orientación de la onda, densidad del papel, humedad relativa, fabricante, etc. Sin una caracterización mecánica específica del cartón utilizado, los parámetros introducidos en el modelo —aunque ortotrópicos— se basan en estimaciones genéricas, lo cual limita la capacidad del modelo para reproducir con precisión el comportamiento real del material en las simulaciones.

Otra fuente crítica de error proviene de la modelización de las **interacciones entre los elementos de las uniones**. En los ensayos físicos, algunas configuraciones se han realizado mediante **adhesivo**, lo que genera uniones relativamente rígidas pero susceptibles de presentar flexibilidad localizada, imperfecciones de contacto o deslizamientos. En cambio, otras configuraciones se han ensamblado mediante **elementos geométricos o pasadores**, donde las condiciones reales incluyen juegos de ajuste. Sin embargo, en el entorno virtual, dichas uniones se han representado como **contactos rígidos**, lo que dificulta la representación fiel de fenómenos reales como la redistribución de cargas y las tolerancias geométricas presentes en el montaje físico. Esta simplificación puede conducir a una subestimación de la deformación total, afectando directamente a la comparación con los resultados experimentales.

Por último, cabe recordar que, aunque se ha modelado el cartón como un material ortotrópico para reflejar su comportamiento direccional, este enfoque no captura por completo su naturaleza **no lineal**. Bajo cargas moderadas, el cartón corrugado puede experimentar **plastificación localizada, pandeo de las ondas internas y pérdida progresiva de rigidez** —comportamientos que no se reflejan adecuadamente en modelos estáticos lineales basados únicamente en propiedades elásticas.

En conjunto, aunque se han seguido criterios avanzados de simulación, los **modelos virtuales utilizados representan una idealización significativa** de la muestra real. Esto justifica la elevada diferencia entre los resultados experimentales y simulados, y pone de manifiesto la necesidad de ajustar parámetros materiales, condiciones de contacto y, en su caso, adoptar modelos de comportamiento no lineal o de materiales compuestos más sofisticados.

ANEXO

3

ANEXO 3. Procedimiento y análisis para ensayos de flexión en diferentes configuraciones

En los ensayos de flexión se han empleado dos configuraciones distintas: una configuración **biempotrada**, utilizada para las probetas **L1** y **T1**, y una configuración en **voladizo**, aplicada a las probetas **L2**, **T2**, **A-HHV**, **B-HHV**, **A-PH**, **B-PH**, **A-PV** y **C-PV**.

Este anexo recoge el desarrollo teórico y el procedimiento correspondiente a ambas configuraciones, así como el cálculo del **momento flector máximo**, el **momento de inercia** de cada sección y la **tensión máxima** alcanzada durante los ensayos. A continuación, se presentan los resultados específicos de cada probeta, utilizando los valores experimentales obtenidos (fuerza máxima y deflexión) para determinar su comportamiento estructural frente a flexión.

El objetivo de estos ensayos es **caracterizar mecánicamente el cartón** como material estructural y evaluar el **comportamiento de distintas soluciones de unión** frente a esfuerzos de flexión, cuantificando la influencia de cada unión en términos de rigidez, resistencia máxima y deformabilidad, con el fin de seleccionar las opciones más eficientes.

3.1. Ensayo de flexión tipo biempotrado

En esta sección se presenta el procedimiento aplicado para analizar el comportamiento mecánico del cartón mediante ensayos de flexión biempotrado. Este análisis preliminar se realiza sobre las probetas **L1** y **T1**, que corresponden a muestras de cartón sin uniones, con una configuración básica, con el propósito de caracterizar la respuesta mecánica intrínseca del material antes de evaluar uniones más complejas (Figura 252).

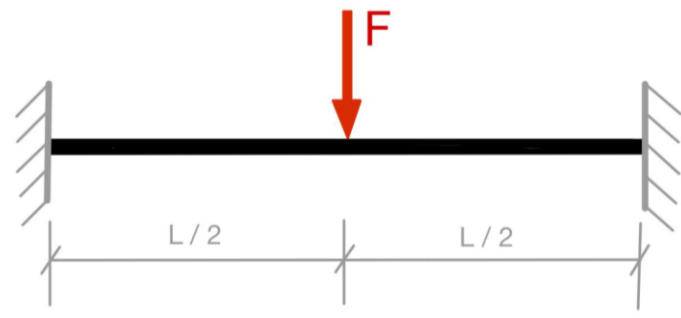


Figura 252. Configuración ensayo biempotrado || Fuente: Elaboración propia

La Figura 253a recoge el ensayo experimental de la probeta L1 y la Figura 253b el correspondiente a la probeta T1, mostrando el desarrollo de la prueba de flexión biempotrada para caracterizar el comportamiento mecánico del cartón.

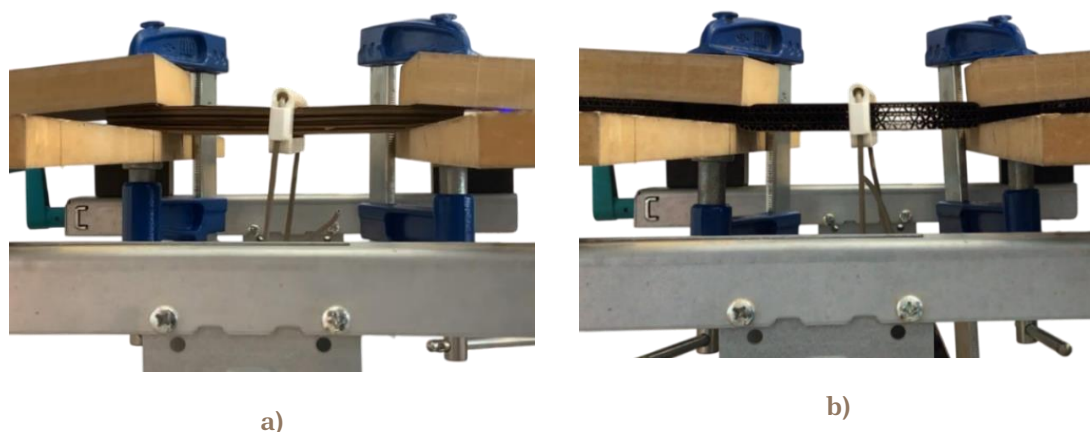


Figura 253. Ensayos experimentales de las probetas a) L1, b) T1 || Fuente: Elaboración propia

Datos experimentales recopilados

Durante el ensayo, se registra la **carga aplicada** F (en kilogramos) en función del **tiempo** t (en segundos), obteniéndose la **curva** $F-t$, que representa la evolución de la carga aplicada en función del tiempo. Paralelamente, mediante el análisis del video del ensayo, se mide la **deflexión central** δ (en milímetros).

Asimismo, se registran las dimensiones geométricas de las probetas ensayadas, imprescindibles para el análisis mecánico: la luz entre apoyos L , el ancho b y el espesor e del cartón.

Representación gráfica de resultados

Para una adecuada interpretación de los resultados, se ha elaborado un gráfico de **fuerza en función del tiempo**. Esta representación permite observar la evolución de la carga aplicada sobre la probeta, identificando si la aplicación ha sido progresiva y continua, o si se han producido variaciones abruptas. El análisis de esta curva es esencial para validar la calidad del ensayo, así como para detectar posibles irregularidades en la aplicación de la carga, como fluctuaciones no deseadas o fallos prematuros.

Cálculos y metodología

Cálculo del momento flector máximo

En un ensayo de flexión biempotrado, el momento flector máximo M se localiza en el punto medio de la probeta y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M = \frac{F \times L}{8} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde F representa la carga aplicada y L la distancia entre los apoyos.

Anexo 3

Este valor permite determinar las tensiones internas máximas que actúan sobre la probeta durante la flexión.

Cálculo del momento de inercia

Para una sección rectangular, se calcula como:

$$I = \frac{b \times e^3}{12} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde b corresponde al ancho y e al espesor de la muestra.

Este valor cuantifica la resistencia geométrica de la sección frente a la flexión.

Cálculo de la tensión máxima de flexión

La tensión máxima en la fibra externa, lugar donde se concentran los mayores esfuerzos, se determina mediante:

$$\sigma = \frac{M \times c}{I} = \frac{M \times \frac{e}{2}}{I} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde $c = \frac{e}{2}$ es la distancia desde el eje neutro hasta la fibra más alejada.

3.2. Ensayo de flexión tipo voladizo

Para las probetas **L2** y **T2**, así como para las **uniones**, el ensayo se realiza mediante una configuración de flexión tipo voladizo, donde la muestra se fija en un extremo y la carga se aplica en el extremo libre (Figura 254). Este método se utiliza para analizar el comportamiento del cartón y sus posibles uniones bajo condiciones diferentes de carga y apoyo, complementando el ensayo biempotrado.



Figura 254. Configuración ensayo voladizo || Fuente: Elaboración propia

La Figura 255a recoge el ensayo experimental de la probeta L2 y la Figura 255b el correspondiente a la probeta T2, mostrando el desarrollo de la prueba de flexión en voladizo para caracterizar el comportamiento mecánico del cartón.



Figura 255. Ensayos experimentales de las probetas a) L2, b) T2 || Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, las Figuras 256a–f representan los ensayos experimentales realizados sobre las distintas configuraciones de uniones analizadas: A-HHV, A-PH, A-PV, B-HHV, B-PH y C-PV, respectivamente. Se visualiza la disposición de cada probeta durante la prueba de flexión en voladizo.

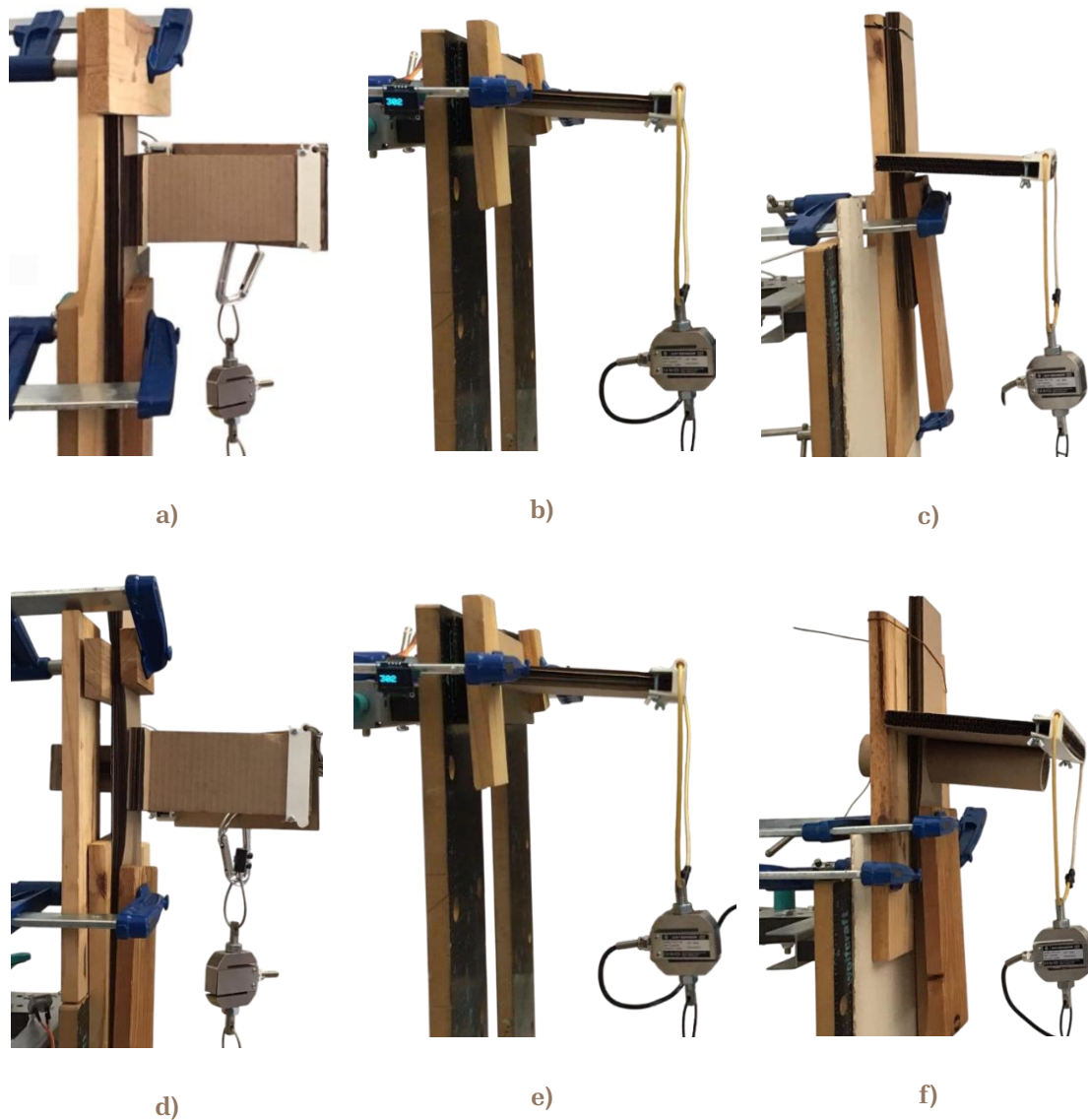


Figura 256. Ensayos experimentales de las uniones a) A-HHV, b) A-PH, c) A-PV, d) B-HHV, e) B-PH, f) C-PV || Fuente: Elaboración propia

Datos experimentales

Se registran la **carga aplicada** F (en kilogramos) y el **tiempo** t (en segundos), obteniéndose la **curva** $F-t$, que representa la evolución de la carga aplicada en función del tiempo. También se mide la **deflexión** δ (en milímetros) en el extremo libre de la probeta mediante el análisis del video realizado durante el ensayo. Las dimensiones geométricas de las probetas, ancho b , espesor e y longitud del voladizo L , se registran para el análisis.

Representación gráfica

Para una adecuada interpretación de los resultados, se ha elaborado un gráfico de **fuerza en función del tiempo**. Esta representación permite observar la evolución de la carga aplicada sobre la probeta, identificando si la aplicación ha sido progresiva y continua, o si se han producido variaciones abruptas. El análisis de esta curva es esencial para validar la calidad del ensayo, así como para detectar posibles irregularidades en la aplicación de la carga, como fluctuaciones no deseadas o fallos prematuros.

Cálculos y metodología

Momento flector máximo

En la configuración de voladizo, el momento máximo se produce en el punto fijo y se calcula como:

$$M = F \times L \quad \text{Ecuación 9}$$

donde F es la carga aplicada en el extremo libre y L es la longitud del voladizo.

Momento de inercia

Para una sección rectangular, se calcula como:

$$I = \frac{b \times e^3}{12} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde b corresponde al ancho y e al espesor de la muestra.

Tensión máxima de flexión

La tensión máxima en la fibra más alejada se obtiene mediante:

$$\sigma = \frac{M \times c}{I} = \frac{M \times \frac{e}{2}}{I} \quad \text{Ecuación 11}$$

3.3. Ensayo de flexión tipo voladizo en una unión triple

En el caso de la unión triple, la carga se aplica sobre una madera auxiliar posicionada de forma transversal entre la **pieza principal** (horizontal) y la **pieza auxiliar** (también horizontal, en perpendicular a la anterior) (Figura 257).

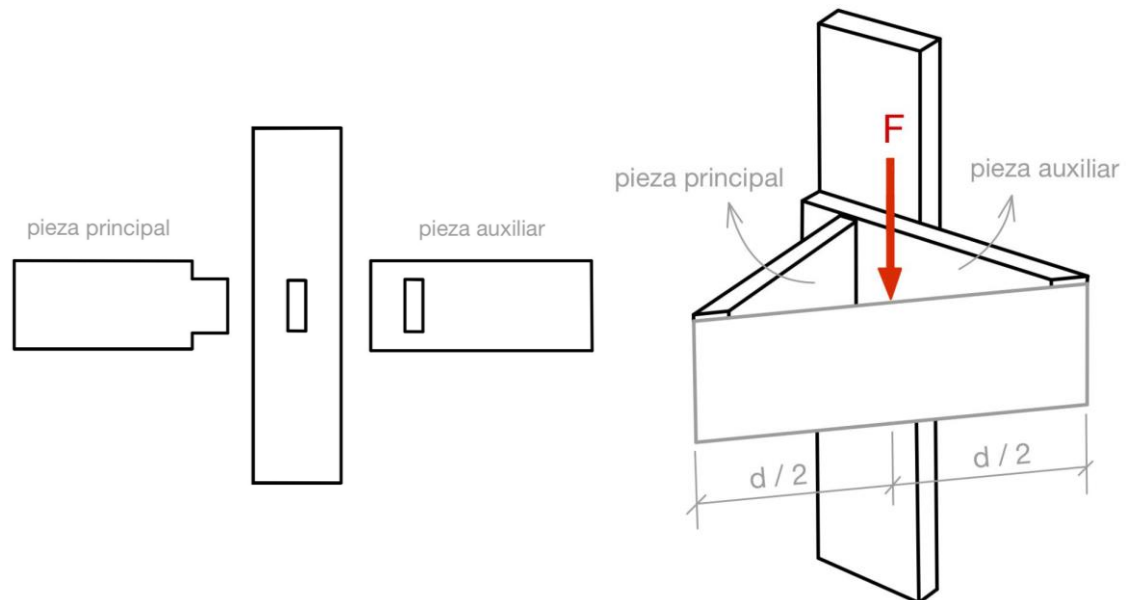


Figura 257. Configuración ensayo A-HHV y B-HHV || Fuente: Elaboración propia

Se ha asumido que la **pieza auxiliar de madera** actúa como una **viga biempotrada**, ya que se encuentra firmemente encajada entre las piezas principal y auxiliar mediante uniones rígidas que impiden tanto el giro como el desplazamiento en sus extremos. Bajo esta hipótesis, la aplicación de una carga vertical centrada sobre la pieza de madera genera un **momento flector máximo en los extremos** de la misma. Este momento en los extremos de la pieza auxiliar se considera **totalmente transferido al extremo libre de cada una de las piezas en voladizo** (principal y auxiliar).

Además, la **pieza principal** presenta un **saliente en uno de sus extremos**, diseñado para insertarse en un encaje en la **pieza vertical**, conformando así una unión tipo **caja y espiga** que asegura su fijación estructural. Por su parte, la **pieza auxiliar** incorpora un **vaciamiento parcial** que le permite acoplarse por **encastre** a la pieza principal, transmitiéndole parte de los esfuerzos.

La Figura 258 muestra el esquema de la unión, donde en la **pieza principal** actúan un **momento flector** y un **momento torsor**, mientras que en la **pieza auxiliar** se aplica únicamente un **momento flector**.

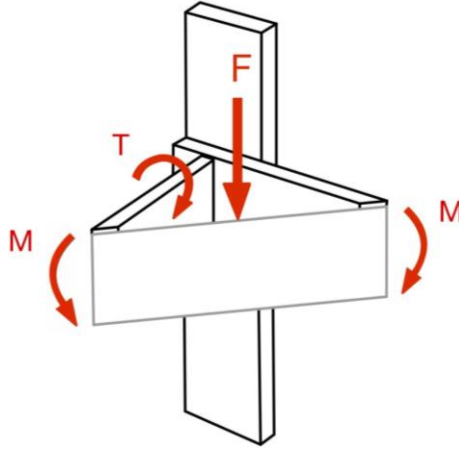


Figura 258. Esquema de solicitaciones en la unión || Fuente: Elaboración propia

Debido a la naturaleza del montaje, la **pieza principal** (Figura 259) está sometida simultáneamente a un **momento**, generado por la pieza de madera encajada y transmitido directamente a su extremo en voladizo. Además, está sometido a un **esfuerzo de torsión** generado por la reacción transmitida por la **pieza auxiliar**, que está encajada perpendicularmente mediante una ranura.



Figura 259. Configuración ensayo voladizo en una unión triple 1 || Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la **pieza auxiliar** (Figura 260) únicamente experimenta un **momento flector**, generado por la pieza de madera encajada, y es transmitido directamente a su extremo en voladizo.



Figura 260. Configuración ensayo voladizo en una unión triple 2 || Fuente: Elaboración propia

Datos experimentales

Se registran la **carga aplicada** F (en kilogramos) y el **tiempo** t (en segundos), obteniéndose la **curva** $F-t$, que representa la evolución de la carga aplicada en función del tiempo. También se mide la **deflexión** δ (en milímetros) en los extremos libres de la probeta mediante el análisis del video realizado durante el ensayo. Las dimensiones geométricas de las probetas, ancho b , espesor e , distancia entre los extremos libres d y longitud del voladizo L , se registran para el análisis.

Representación gráfica

Para una adecuada interpretación de los resultados, se ha elaborado un gráfico de **fuerza en función del tiempo**. Esta representación permite observar la evolución de la carga aplicada sobre la probeta, identificando si la aplicación ha sido progresiva y continua, o si se han producido variaciones abruptas. El análisis de esta curva es esencial para validar la calidad del ensayo, así como para detectar posibles irregularidades en la aplicación de la carga, como fluctuaciones no deseadas o fallos prematuros.

Cálculos y metodología

Momento flector máximo

El momento en la pieza de madera auxiliar puede calcularse mediante la expresión de vigas biempotradas con carga puntual centrada:

$$M_f = \frac{F \times d}{8} \quad \text{Ecuación 12}$$

donde F es la carga máxima aplicada y d es la longitud entre los apoyos.

Además, se debe considerar un momento torsor T , que se estima como:

$$T = \frac{F}{2} \times L \quad \text{Ecuación 13}$$

donde L es la distancia perpendicular desde el eje longitudinal hasta el punto de aplicación de la fuerza.

Momento de inercia

El momento de inercia para una sección rectangular, se calcula como:

$$I = \frac{b \times e^3}{12} \quad \text{Ecuación 14}$$

donde b corresponde al ancho y e al espesor de la muestra.

El momento polar de inercia para una sección rectangular, se calcula:

$$J = \frac{b \times e^3}{12} + \frac{e \times b^3}{12} \quad \text{Ecuación 15}$$

donde b corresponde al ancho y e al espesor de la muestra.

Tensión máxima de flexión

La tensión máxima provocada por la **flexión** se calcula mediante:

$$\sigma_f = \frac{M_f \times c_f}{I} = \frac{M_f \times \frac{e}{2}}{I} \quad \text{Ecuación 16}$$

La tensión cortante máxima debida a **torsión** se calcula como:

$$\tau_t = \frac{T \times r}{J} = \frac{T \times \frac{e}{2}}{J} \quad \text{Ecuación 17}$$

donde T es el momento torsor y r la distancia desde el centroide hasta la cara externa donde la torsión genera su efecto máximo.

La tensión máxima equivalente se puede estimar mediante el **criterio de von Mises** para tensiones combinadas:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau_t^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

3.4. Desarrollo de cálculos para cada ensayo

3.4.1. Probeta L1 y T1

La configuración de ensayo para las probetas L1 y T1 corresponde a un sistema biempotrado, donde la carga se aplica en el centro. Las probetas presentan una longitud total de **225 mm**, y se fijan **30 mm** por lado. En la Figura 261 se representa la configuración tridimensional del ensayo para dichas probetas.

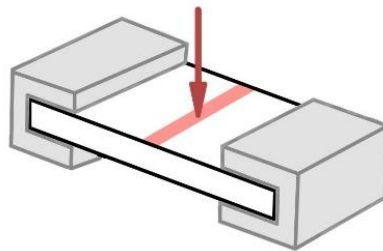


Figura 261. Configuración 3D probetas L1 y T1 || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 262 se representa dicha configuración, donde los datos geométricos son: $L = 165 \text{ mm}$, el ancho de la sección transversal $b = 90 \text{ mm}$ y el espesor $e = 18 \text{ mm}$. La fuerza F representa el valor máximo registrado para cada una de las probetas durante el ensayo.

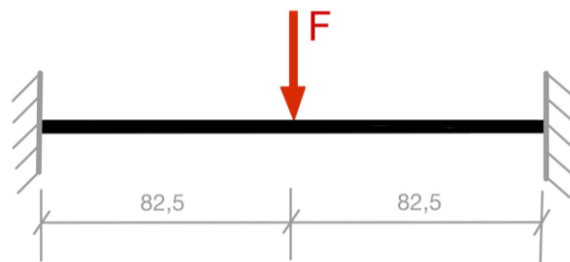


Figura 262. Configuración 2D ensayo L1 y T1 || Fuente: Elaboración propia

Momento flector máximo

Aplicando la Ecuación 6 y utilizando el valor de $L = 165 \text{ mm}$, junto con la fuerza máxima registrada para cada probeta, se obtienen los siguientes momentos flectores máximos:

Para **L1**:

$$M = \frac{175,430 \times 165}{8} = 3618,24 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para **T1**:

$$M = \frac{95,147 \times 165}{8} = 1962,41 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento de inercia

Aplicando la Ecuación 7, y utilizando los valores $b = 90 \text{ mm}$ y $e = 18 \text{ mm}$, se obtiene el siguiente momento de inercia:

$$I = \frac{90 \times 18^3}{12} = 43740 \text{ mm}^4$$

Tensión máxima

Aplicando la Ecuación 8 y tomando como valores el momento flector máximo de cada probeta y $e = 18 \text{ mm}$, se obtienen las siguientes tensiones máximas:

Para **L1**:

$$\sigma = \frac{3618,24 \times \frac{18}{2}}{43740} = 0,744 \text{ MPa}$$

Para **T1**:

$$\sigma = \frac{1962,41 \times \frac{18}{2}}{43740} = 0,404 \text{ MPa}$$

Estos parámetros calculados se recogen en la Tabla 58.

Tabla 58. Parámetros calculados para L1 y T1

Probeta	L [mm]	b [mm]	e [mm]	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
L1	165	90	18	175,432	3618,24	43740	0,744
T1	165	90	18	95,147	1962,41	43740	0,404

3.4.2. Probeta L2 y T2

La configuración de ensayo para las probetas L2 y T2 corresponde a un sistema en voladizo. Las probetas presentan una longitud total de **225 mm**, y se fija **30 mm** en el extremo. En la Figura 263 se representa la configuración tridimensional del ensayo para dichas probetas.

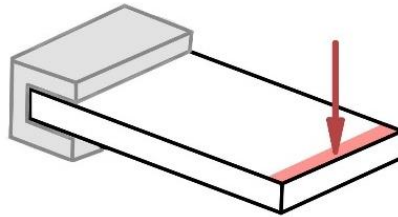


Figura 263. Configuración 3D probetas L2 y T2 || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 264 se muestra la representación esquemática de dicha configuración, donde los datos geométricos son: $L = 195 \text{ mm}$, el ancho de la sección transversal $b = 90 \text{ mm}$ y el espesor $e = 18 \text{ mm}$. La fuerza F representa el valor máximo registrado para cada una de las probetas durante el ensayo.



Figura 264. Configuración 2D ensayo L2 y T2 || Fuente: Elaboración propia

Momento flector máximo

Aplicando la Ecuación 9 y utilizando el valor de $L = 195 \text{ mm}$, junto con la fuerza máxima registrada para cada probeta, se obtienen los siguientes momentos flectores máximos:

Para **L2**:

$$M = 19,424 \times 195 = 3787,68 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para **T2**:

$$M = 14,126 \times 195 = 2754,57 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento de inercia

Aplicando la Ecuación 10, y utilizando los valores $b = 90 \text{ mm}$ y $e = 18 \text{ mm}$, se obtiene el siguiente momento de inercia:

$$I = \frac{90 \times 18^3}{12} = 43740 \text{ mm}^4$$

Tensión máxima

Aplicando la Ecuación 11 y tomando como valores el momento flector máximo de cada probeta y $e = 18 \text{ mm}$, se obtienen las siguientes tensiones máximas:

Para **L2**:

$$\sigma = \frac{3787,68 \times \frac{18}{2}}{43740} = 0,779 \text{ MPa}$$

Para **T2**:

$$\sigma = \frac{2754,57 \times \frac{18}{2}}{43740} = 0,567 \text{ MPa}$$

Estos parámetros calculados se recogen en la Tabla 59.

Tabla 59. Parámetros calculados para L2 y T2

Probeta	L [mm]	b [mm]	e [mm]	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento de inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
L2	195	90	18	19,424	3787,68	43740	0,779
T2	195	90	18	14,126	2754,57	43740	0,567

3.4.3. Unión A-HHV y B-HHV

La configuración de ensayo para las uniones A-HHV y B-HHV corresponde a un sistema en voladizo. En la Figura 265 se representa la configuración tridimensional del ensayo para dichas uniones.

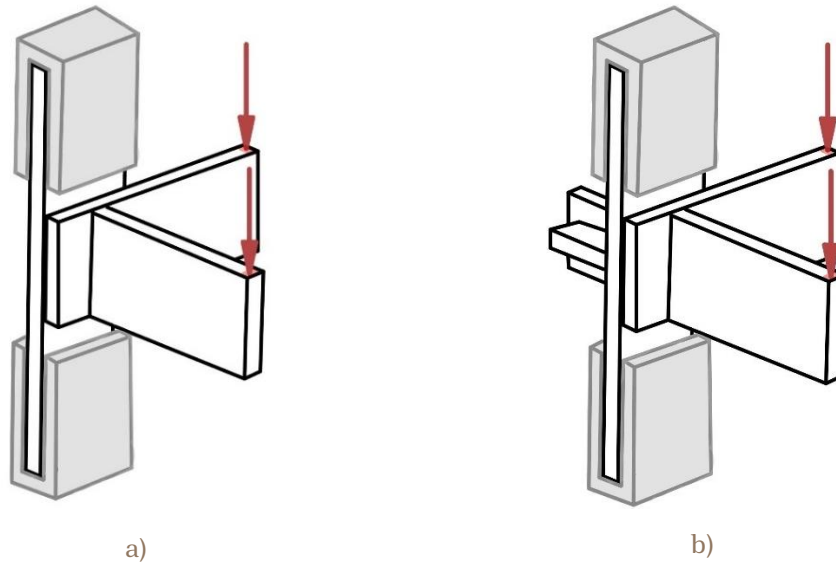


Figura 265. Configuración 3D ensayo a) A-HHV, b) B-HHV || Fuente: Elaboración propia

Los datos geométricos son: $L = 180$ mm, el ancho de la sección transversal $b = 18$ mm, el espesor $e = 90$ mm y distancia entre los extremos libres $d = 250$ mm. La fuerza F representa el valor máximo registrado para cada una de las probetas durante el ensayo. En este caso, esta carga se aplica sobre una madera auxiliar posicionada de forma transversal entre la **pieza principal** y la **pieza auxiliar**. La Figura 266 muestra la representación esquemática de dicha configuración para la pieza principal, así como la configuración de la pieza auxiliar en la Figura 267.

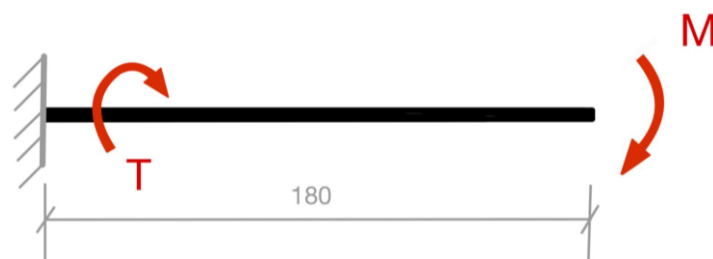


Figura 266. Configuración 2D ensayo A-HHV y B-HHV pieza principal || Fuente: Elaboración propia



Figura 267. Configuración 2D ensayo A-HHV y B-HHV pieza auxiliar || **Fuente:** Elaboración propia

Momento flector máximo

Aplicando la Ecuación 12 y 13 y utilizando el valor de $L = 180$ mm y $d = 250$ mm, junto con la fuerza máxima registrada para cada probeta, se obtienen los siguientes momentos flectores y torsores máximos:

Para A-HHV-1:

$$M_f = \frac{62,460 \times 250}{8} = 1951,88 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$T = \frac{62,460}{2} \times 180 = 5621,40 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para A-HHV-2:

$$M_f = \frac{62,931 \times 250}{8} = 1966,59 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$T = \frac{62,931}{2} \times 180 = 5663,79 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para A-HHV-3:

$$M_f = \frac{50,384 \times 250}{8} = 1574,50 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$T = \frac{50,384}{2} \times 180 = 4534,56 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para B-HHV-1:

$$M_f = \frac{62,294 \times 250}{8} = 1946,69 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$T = \frac{62,294}{2} \times 180 = 5606,46 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para **B-HHV-2**:

$$M_f = \frac{58,703 \times 250}{8} = 1834,47 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$T = \frac{58,703}{2} \times 180 = 5283,27 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para **B-HHV-3**:

$$M_f = \frac{53,641 \times 250}{8} = 1676,28 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$T = \frac{53,641}{2} \times 180 = 4827,69 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento de inercia

Aplicando la Ecuación 14 y 15, y utilizando los valores $b = 18 \text{ mm}$ y $e = 90 \text{ mm}$, se obtiene el siguiente momento de inercia y momento polar de inercia:

$$I = \frac{18 \times 90^3}{12} = 1093500 \text{ mm}^4$$

$$J = \frac{18 \times 90^3}{12} + \frac{90 \times 18^3}{12} = 1137240 \text{ mm}^4$$

Tensión máxima

Aplicando la Ecuación 16, 17 y 18 y tomando como valores el momento flector máximo de cada probeta y $e = 90 \text{ mm}$, se obtienen las siguientes tensiones máximas tanto para la pieza principal y la auxiliar:

Para **A-HHV-1**:

$$\text{Principal: } \sigma = \sqrt{\left(\frac{1951,88 \times \frac{90}{2}}{1093500}\right)^2 + 3 \left(\frac{5621,40 \times \frac{90}{2}}{1137240}\right)^2} = 0,394 \text{ MPa}$$

$$\text{Auxiliar: } \sigma = \frac{1951,88 \times \frac{90}{2}}{1093500} = 0,08 \text{ MPa}$$

Para A-HHV-2:

$$\text{Principal: } \sigma = \sqrt{\left(\frac{1966,59 \times \frac{90}{2}}{1093500}\right)^2 + 3 \left(\frac{5663,79 \times \frac{90}{2}}{1137240}\right)^2} = 0,397 \text{ MPa}$$

$$\text{Auxiliar: } \sigma = \frac{1966,59 \times \frac{90}{2}}{1093500} = 0,081 \text{ MPa}$$

Para A-HHV-3:

$$\text{Principal: } \sigma = \sqrt{\left(\frac{1574,50 \times \frac{90}{2}}{1093500}\right)^2 + 3 \left(\frac{4534,56 \times \frac{90}{2}}{1137240}\right)^2} = 0,317 \text{ MPa}$$

$$\text{Auxiliar: } \sigma = \frac{1574,50 \times \frac{90}{2}}{1093500} = 0,065 \text{ MPa}$$

Para B-HHV-1:

$$\text{Principal: } \sigma = \sqrt{\left(\frac{1946,69 \times \frac{90}{2}}{1093500}\right)^2 + 3 \left(\frac{5606,46 \times \frac{90}{2}}{1137240}\right)^2} = 0,393 \text{ MPa}$$

$$\text{Auxiliar: } \sigma = \frac{1946,69 \times \frac{90}{2}}{1093500} = 0,08 \text{ MPa}$$

Para B-HHV-2:

$$\text{Principal: } \sigma = \sqrt{\left(\frac{1834,47 \times \frac{90}{2}}{1093500}\right)^2 + 3 \left(\frac{5283,27 \times \frac{90}{2}}{1137240}\right)^2} = 0,370 \text{ MPa}$$

$$\text{Auxiliar: } \sigma = \frac{1834,47 \times \frac{90}{2}}{1093500} = 0,075 \text{ MPa}$$

Para B-HHV-3:

$$\text{Principal: } \sigma = \sqrt{\left(\frac{1676,28 \times \frac{90}{2}}{1093500}\right)^2 + 3 \left(\frac{4827,69 \times \frac{90}{2}}{1137240}\right)^2} = 0,338 \text{ MPa}$$

$$\text{Auxiliar: } \sigma = \frac{1676,28 \times \frac{90}{2}}{1093500} = 0,069 \text{ MPa}$$

Anexo 3

Estos parámetros calculados se recogen en la Tabla 60.

Tabla 60. Parámetros calculados para A-HHV y B-HHV

Probeta	L [mm]	b [mm]	e [mm]	Fuerza máx. [N]	Momento máx. [N·mm]	Momento inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
A-HHV- 1	180	18	90	62,460	M _f : 1951,88 T: 5621,40	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,394 Auxiliar: 0,08
A-HHV- 2	180	18	90	62,931	M _f : 1966,59 T: 5663,79	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,397 Auxiliar: 0,081
A-HHV- 3	180	18	90	50,384	M _f : 1574,50 T: 4534,56	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,317 Auxiliar: 0,065
B-HHV- 1	180	18	90	62,294	M _f : 1946,69 T: 5606,46	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,393 Auxiliar: 0,080
B-HHV- 2	180	18	90	58,703	M _f : 1834,47 T: 5283,27	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,370 Auxiliar: 0,075
B-HHV- 3	180	18	90	53,641	M _f : 1676,28 T: 4827,69	I: 1093500 J: 1137240	Principal: 0,338 Auxiliar: 0,069

3.4.4. Unión A-PH y B-PH

La configuración de ensayo para las uniones A-PH y B-PH corresponde a un sistema en voladizo. En la Figura 268 se representa la configuración tridimensional del ensayo para dichas uniones.

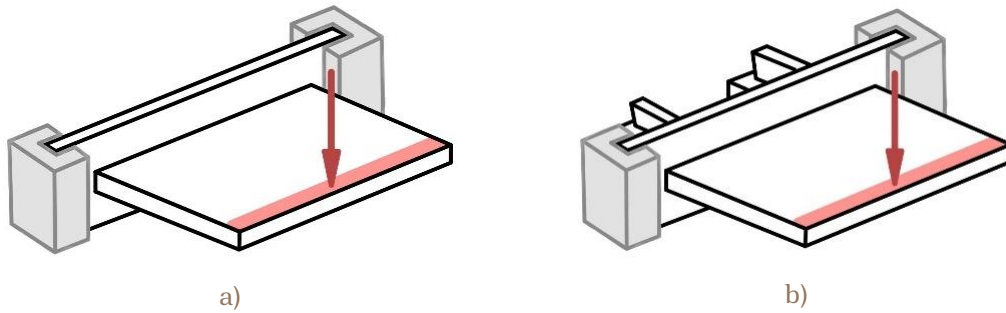


Figura 268. Configuración 3D ensayo a) A-PH, b) B-PH || Fuente: Elaboración propia

La Figura 269 muestra la representación esquemática de dicha configuración, donde los datos geométricos son: $L = 180$ mm, el ancho de la sección transversal $b = 270$ mm y el espesor $e = 18$ mm. La fuerza F representa el valor máximo registrado para cada una de las probetas durante el ensayo.

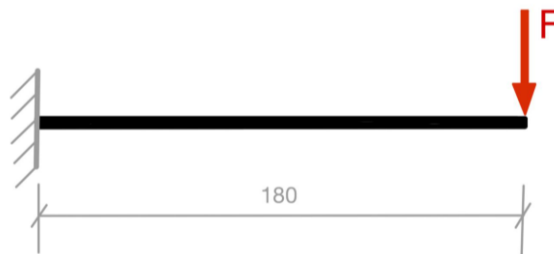


Figura 269. Configuración 2D ensayo A-PH y B-PH || Fuente: Elaboración propia

Momento flector máximo

Aplicando la Ecuación 9 y utilizando el valor de $L = 180$ mm, junto con la fuerza máxima registrada para cada probeta, se obtienen los siguientes momentos flectores máximos:

Para A-PH-1:

$$M = 26,605 \times 180 = 4788,90 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para A-PH-2:

$$M = 16,187 \times 180 = 2913,66 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Anexo 3

Para **A-PH-3**:

$$M = 26,183 \times 180 = 4712,94 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para **B-PH-1**:

$$M = 37,013 \times 180 = 6662,34 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para **B-PH-2**:

$$M = 56,251 \times 180 = 10125,18 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para **B-PH-3**:

$$M = 86,073 \times 180 = 15493,14 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento de inercia

Aplicando la Ecuación 10, y utilizando los valores $b = 270 \text{ mm}$ y $e = 18 \text{ mm}$, se obtiene el siguiente momento de inercia:

$$I = \frac{270 \times 18^3}{12} = 131220 \text{ mm}^4$$

Tensión máxima

Aplicando la Ecuación 11 y tomando como valores el momento flector máximo de cada probeta y $e = 18 \text{ mm}$, se obtienen las siguientes tensiones máximas:

Para **A-PH-1**:

$$\sigma = \frac{4788,90 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,328 \text{ MPa}$$

Para **A-PH-2**:

$$\sigma = \frac{2913,66 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,200 \text{ MPa}$$

Para **A-PH-3**:

$$\sigma = \frac{4712,94 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,323 \text{ MPa}$$

Para **B-PH-1**:

$$\sigma = \frac{6662,34 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,457 \text{ MPa}$$

Para **B-PH-2**:

$$\sigma = \frac{10125,18 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,694 \text{ MPa}$$

Para **B-PH-3**:

$$\sigma = \frac{15493,14 \times \frac{18}{2}}{131220} = 1,063 \text{ MPa}$$

Estos parámetros calculados se recogen en la Tabla 61.

Tabla 61. Parámetros calculados para A-PH y B-PH

Probeta	L [mm]	b [mm]	e [mm]	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
A-PH-1	180	270	18	26,605	4788,90	131220	0,328
A-PH-2	180	270	18	16,187	2913,66	131220	0,200
A-PH-3	180	270	18	26,183	4712,94	131220	0,323
B-PH-1	180	270	18	37,013	6662,34	131220	0,457
B-PH-2	180	270	18	56,251	10125,18	131220	0,694
B-PH-3	180	270	18	86,073	15493,14	131220	1,063

3.4.5. Unión A-PV y C-PV

La configuración de ensayo para las uniones A-PV y C-PV corresponde a un sistema en voladizo. En la Figura 270 se representa la configuración tridimensional del ensayo para dichas uniones.

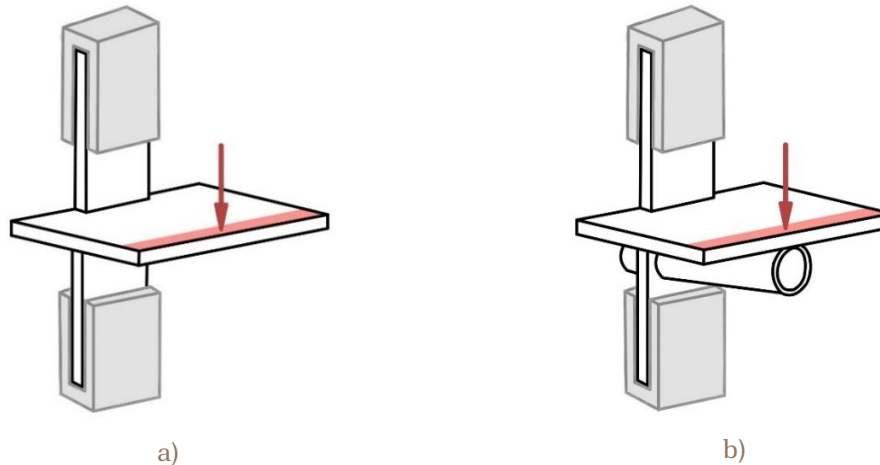


Figura 270. Configuración 3D ensayo a) A-PV b) C-PV || Fuente: Elaboración propia

En la Figura 271 se representa dicha configuración, donde los datos geométricos son: $L = 180 \text{ mm}$, el ancho de la sección transversal $b = 270 \text{ mm}$ y el espesor $e = 18 \text{ mm}$. La fuerza F representa el valor máximo registrado para cada una de las probetas durante el ensayo.



Figura 271. Configuración 2D ensayo A-PV y C-PV || Fuente: Elaboración propia

Momento flector máximo

Aplicando la Ecuación 9 y utilizando el valor de $L = 180 \text{ mm}$, junto con la fuerza máxima registrada para cada probeta, se obtienen los siguientes momentos flectores máximos:

Para A-PV-1:

$$M = 33,001 \times 180 = 5940,18 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para A-PV-2:

$$M = 19,434 \times 180 = 3498,12 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para A-PV-3:

$$M = 7,495 \times 180 = 1349,10 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para C-PV-1:

$$M = 24,986 \times 180 = 4497,48 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para C-PV-2:

$$M = 48,481 \times 180 = 8726,58 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Para C-PV-3:

$$M = 38,887 \times 180 = 6999,66 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento de inercia

Aplicando la Ecuación 10, y utilizando los valores $b = 270 \text{ mm}$ y $e = 18 \text{ mm}$, se obtiene el siguiente momento de inercia:

$$I = \frac{270 \times 18^3}{12} = 131220 \text{ mm}^4$$

Tensión máxima

Aplicando la Ecuación 11 y tomando como valores el momento flector máximo de cada probeta y $e = 18 \text{ mm}$, se obtienen las siguientes tensiones máximas:

Para A-PV-1:

$$\sigma = \frac{5940,18 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,407 \text{ MPa}$$

Para A-PV-2:

$$\sigma = \frac{3498,12 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,240 \text{ MPa}$$

Anexo 3

Para A-PV-3:

$$\sigma = \frac{1349,10 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,093 \text{ MPa}$$

Para C-PV-1:

$$\sigma = \frac{4497,48 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,308 \text{ MPa}$$

Para C-PV-2:

$$\sigma = \frac{8726,58 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,599 \text{ MPa}$$

Para C-PV-3:

$$\sigma = \frac{6999,66 \times \frac{18}{2}}{131220} = 0,480 \text{ MPa}$$

Estos parámetros calculados se recogen en la Tabla 62.

Tabla 62. Parámetros calculados para A-PV y C-PV

Probeta	L [mm]	b [mm]	e [mm]	Fuerza máx. [N]	Momento flector máx. [N·mm]	Momento inercia [mm ⁴]	Tensión máx. [MPa]
A-PV-1	180	270	18	33,001	5940,18	131220	0,407
A-PV-2	180	270	18	19,434	3498,12	131220	0,240
A-PV-3	180	270	18	7,495	1349,10	131220	0,093
C-PV-1	180	270	18	24,986	4497,48	131220	0,308
C-PV-2	180	270	18	48,481	8726,58	131220	0,599
C-PV-3	180	270	18	38,887	6999,66	131220	0,480

