



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**

**IMPACTO DE LAS CONFIGURACIONES DE KERFING EN LA  
FLEXIBILIDAD Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO APLICADO  
AL MDF: UN ESTUDIO EXPERIMENTAL**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autora: Laura Barrera Muñoz

Tutora: María Alonso García

Cotutor: Javier Martín Domínguez

Málaga, octubre de 2025






## TRABAJO FIN DE GRADO

### Impacto de las Configuraciones de Kerfing en la Flexibilidad y Comportamiento Mecánico aplicado al MDF: Un estudio experimental

Autora: Laura Barrera Muñoz

Tutora: María Alonso García

Cotutor: Javier Martín Domínguez





## Resumen

Este estudio se centra en el análisis experimental y digital de la técnica *kerfing* aplicada a tableros de fibra de densidad media (MDF), con el objetivo de evaluar la influencia de distintos patrones de corte en el comportamiento mecánico del material. El interés principal radica en comprender cómo la geometría de los cortes modifica propiedades como la flexibilidad, la resistencia y la capacidad de curvatura.

Para ello, se realizaron ensayos mecánicos de tracción y de flexión con extremos fijos, aplicando normativas UNE y ASTM. Asimismo, se llevó a cabo una caracterización microscópica de las probetas con el fin de observar el efecto de los cortes. Los patrones de corte analizados fueron lineales, inclinados y de sustracción de material, diseñados y fabricados mediante cortadora láser.

Posteriormente, se analizaron parámetros como la resistencia máxima soportada, el módulo de elasticidad equivalente y la deformación alcanzada de cada configuración. Complementariamente, se desarrollaron simulaciones mediante el método de elementos finitos, lo que permitió constatar y validar los ensayos físicos.

Los resultados demuestran que la geometría del patrón incide directamente a la flexibilidad y la resistencia estructural del MDF, así como el tipo de sollicitación a la que esté expuesta. Estas conclusiones abren la puerta a futuras aplicaciones prácticas en mobiliario y estructuras ligeras, favoreciendo un diseño innovador y sostenible.

**Palabras clave:** “*Kerfing*”, “*MDF*”, “*Propiedades mecánicas*”, “*Ensayo de tracción*”, “*Ensayo de flexión*”, “*Patrones*”, “*Corte láser*”, “*Flexibilidad*”.

## Abstract

This study focuses on the experimental and digital analysis of the *kerfing* technique applied to medium-density fibreboard (MDF), with the aim of evaluating the influence of different cutting patterns on the mechanical behaviour of the material. The main interest lies in understanding how the geometry of the cuts modifies properties such as flexibility, strength, and bending capacity.

To this end, mechanical tests of tensile and fixed-end bending were carried out, following UNE and ASTM standards. In addition, a microscopic characterization of the specimens was conducted to observe the effect of the cuts. Three main patterns were studied: linear, inclined, and rhomboid, designed and manufactured using a laser cutter.

Subsequently parameters such as maximum strength, equivalent modulus of elasticity and the deformation reached by each configuration were examined. Complementarily, simulations were developed using the finite element method, which allowed the experimental test to be verified and validated.

The results highlight significant differences in flexibility, strength, and effective elastic modulus depending on the *kerfing* pattern and load situation. These findings demonstrate the potential of *kerfing* as a design and manufacturing technique, for multiple applications. Overall, the research provides both experimental data and digital validation, contributing to the understanding and practical implementation of *kerfing* in product design.

**Keywords:** “*Kerfing*”, “*MDF*”, “*Mechanical Properties*”, “*Tensile Testing*”, “*Bending Testing*”, “*Patterns*”, “*Laser Cutting*”, “*Flexibility*”.



# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>14</b>
<b>ÍNDICE DE FÓRMULAS .....</b>	<b>15</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>16</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>2. Marco Teórico .....</b>	<b>37</b>
2.1 Objetivo.....	51
<b>3. Metodología y materiales .....</b>	<b>55</b>
3.1 Metodología .....	55
3.2 Material empleado.....	57
3.3 Selección de patrones .....	59
3.4 Selección de ensayos mecánicos y pruebas .....	63
3.5 Ensayo de tracción paralela a la superficie según ASTM D1037 12 .....	65
3.5.1 Preparación de probetas.....	65
3.5.2 Tamaño de la muestra.....	66
3.5.3 Diseño experimental con kerfing.....	67
3.5.4 Equipo de ensayo (servosis ME 405/10) .....	69
3.5.5 Procedimiento de ensayo de tracción según ASTM D1037-12.....	70
3.5.6 Registro y análisis de resultados.....	72
3.6 Ensayo de flexión con extremos empotrados según normas UNE .....	73
3.6.1 Preparación de probetas.....	73
3.6.2 Tamaño de la muestra.....	74
3.6.3 Diseño experimental con kerfing.....	75
3.6.4 Equipo de ensayo (experimental).....	77
3.6.5 Procedimiento del ensayo de flexión con extremos fijos según el seguimiento parcial de la norma UNE EN 310:1994 .....	79
3.6.6 Registro y análisis de resultados.....	79
3.7 Fabricación de probetas .....	83
3.7.1 Despiece y preparación conforme a normativas.....	83
3.7.2 Tecnología de corte empleada: cortadora láser.....	85
3.7.3 Denominación de probetas.....	88
3.8 Equipos adicionales empleados .....	89
3.8.1 Microscopio digital 246S/249S.....	89
3.8.2 Pie de rey.....	90
3.8.3 Micrómetro .....	90
3.9 Ángulo de curvatura .....	92
3.10 Simulación por el Método de Elementos Finitos .....	93
<b>4. Resultados.....</b>	<b>99</b>
4.1 Estudio del <i>kerf</i> y conicidad del corte láser.....	99
4.2 Prueba de estimación del ángulo de curvatura .....	101
4.3 Ensayo de tracción.....	102
4.3.1 Resultados de la probeta sin kerfing .....	102
4.3.2 Resultados del patrón A (lineal) .....	108

4.3.3 Resultados del patrón B (wave o líneas inclinadas).....	115
4.3.4 Resultados del patrón C (romboidal).....	121
4.3.5 Resultados comparativos entre probetas en el ensayo de tracción .....	126
4.4 Ensayo de flexión.....	128
4.4.1 Resultados de la probeta sin kerfing.....	128
4.4.2 Resultados del patrón A (lineal).....	133
4.4.3 Resultados del patrón B (wave o líneas inclinadas).....	136
4.4.4 Resultados del patrón C (romboidal).....	140
4.4.5 Resultados comparativos entre probetas en el ensayo de flexión.....	143
4.5 Simulaciones digitales.....	145
4.5.1 Ensayo de tracción .....	146
4.5.2 Ensayo de flexión .....	154
<b>5. Discusiones .....</b>	<b>165</b>
5.1 Evaluación del cumplimiento de objetivos .....	165
5.2 Comparación de los resultados con estudios previos.....	168
5.3 Correlación ensayo – simulación y correlación entre espesores .....	173
5.4 Interpretación práctica: implicación para el diseño.....	175
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>181</b>
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>187</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>193</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Manufactura aditiva .....	19
<b>Figura 2.</b> Manufactura sustractiva .....	19
<b>Figura 3.</b> Manufactura híbrida.....	20
<b>Figura 4.</b> Comparación manufactura aditiva y sustractiva .....	20
<b>Figura 5.</b> Puente de Alcobendas.....	21
<b>Figura 6.</b> Guggenheim Museum Bilbao, Frank Gehry .....	22
<b>Figura 7.</b> Pabellón puente de Zaragoza, Zaha Hadid .....	22
<b>Figura 8.</b> Ópera de Sydney , Jørn Utzon .....	22
<b>Figura 9.</b> Aplicaciones del Kerfing.....	23
<b>Figura 10.</b> Kerfing artesanal.....	24
<b>Figura 11.</b> Gran exposición de Londres de 1851 .....	25
<b>Figura 12.</b> Silla nº 14 .....	25
<b>Figura 13.</b> Métodos de curvado de la madera .....	26
<b>Figura 14.</b> Kerfing realizado mediante corte láser .....	27
<b>Figura 15.</b> Variantes de incisión de Dukta .....	28
<b>Figura 16.</b> Banco de pruebas de flexibilidad por Gatóo (2020) .....	29
<b>Figura 17.</b> Estructura curva de carbono por Greenberg (2014) .....	30
<b>Figura 18.</b> Paneles acústicos por Holterman (2018) .....	30
<b>Figura 19.</b> Paneles cerrados y abiertos. ....	31
<b>Figura 20.</b> Test de flexibilidad por Gomes (2017).....	32
<b>Figura 21.</b> Probetas enmarcadas y test de flexión por Condoroțeanu et al. (2022) .....	38
<b>Figura 22.</b> Ensayos realizados por Gatóo (2022).....	39
<b>Figura 23.</b> Herramienta para examinar la curvatura .....	41
<b>Figura 24.</b> Análisis comparativo por Lorenzoni y Silva (2022) .....	43
<b>Figura 25.</b> Mesa por Gomes (2017) .....	45
<b>Figura 26.</b> Fuerzas aplicadas a los patrones por Guzelci et al. (2017) .....	47
<b>Figura 27.</b> Rediseño de patrón por Yao (2021) .....	48
<b>Figura 28.</b> Tres principios geométricos clave de Yao (2021) .....	48
<b>Figura 29.</b> Detección de esquinas por Wei y Singh (2017) .....	50
<b>Figura 30.</b> Esquemática de la metodología seguida .....	56
<b>Figura 31.</b> Paneles medidos con pie de rey .....	57
<b>Figura 32.</b> Parámetros geométricos fijos.....	59
<b>Figura 33.</b> Dimensiones de los patrones .....	62
<b>Figura 34.</b> Ensayo de tracción .....	63
<b>Figura 35.</b> Ensayo de flexión con carga central .....	63
<b>Figura 36.</b> Dimensiones estandarizadas probeta ensayo tracción.....	65
<b>Figura 37.</b> Probeta base ensayo tracción .....	66
<b>Figura 38.</b> Despiece de probetas según norma ASTM D1037 .....	67
<b>Figura 39.</b> Zona de aplicación del patrón.....	68
<b>Figura 40.</b> Probetas del ensayo de tracción con patrones aplicado .....	68
<b>Figura 41.</b> Esquema tamaño de la muestra.....	69
<b>Figura 42.</b> Máquina de tracción Servosis ME 405/10 .....	70
<b>Figura 43.</b> Extensómetro axial 3542 series (épsilon) .....	70

<b>Figura 44.</b> Medidas probeta flexión .....	74
<b>Figura 45.</b> Método para medir con el pie de rey.....	74
<b>Figura 46.</b> Número mínimo de probetas de cortadas de cada tablero .....	75
<b>Figura 47.</b> Zona de aplicación del patrón .....	75
<b>Figura 48.</b> Probetas del ensayo de tracción con patrones aplicado y sección central.....	76
<b>Figura 49.</b> Tamaño de la muestra ensayo de flexión .....	76
<b>Figura 50.</b> Dispositivo de anclaje .....	77
<b>Figura 51.</b> Impresora Ultimaker S5.....	77
<b>Figura 52.</b> Ensamblaje patrón y dispositivo de anclaje .....	77
<b>Figura 53.</b> Célula de carga DAYSENSOR .....	78
<b>Figura 54.</b> Esquema del montaje para el ensayo de flexión y fotografía real.....	78
<b>Figura 55.</b> Curva carga-deformación en la zona de deformación elástica .....	79
<b>Figura 56.</b> Situación de carga .....	80
<b>Figura 57.</b> Software Traker para la medición de deflexión máxima.....	81
<b>Figura 58.</b> Despiece de probetas según norma ASTM D1037 .....	83
<b>Figura 59.</b> Despiece de probetas según UNE-EN 326-1 .....	84
<b>Figura 60.</b> Despiece de las probetas en AutoCAD .....	84
<b>Figura 61.</b> Despiece realizado con la cortadora láser .....	85
<b>Figura 62.</b> Cortadora láser modelo IL-1390 .....	86
<b>Figura 63.</b> Corte por láser.....	86
<b>Figura 64.</b> Conicidad en el corte láser.....	87
<b>Figura 65.</b> Distancia Focal.....	87
<b>Figura 66.</b> Dispositivo para ajustar boquilla .....	87
<b>Figura 67.</b> Fabricación de probetas.....	88
<b>Figura 68.</b> Probetas obtenidas y denominación de la primera serie.....	88
<b>Figura 69.</b> Microscopio Digital 246S/249S , Lente L y Lente A.....	90
<b>Figura 70.</b> Pie de rey .....	90
<b>Figura 71.</b> Micrómetro Mitutoyo .....	91
<b>Figura 72.</b> Esquema prueba de curvatura .....	92
<b>Figura 73.</b> Esquema metodología simulaciones MEF .....	93
<b>Figura 74.</b> Modelos 3D probeta de tracción .....	94
<b>Figura 75.</b> Modelos 3D probeta de flexión.....	94
<b>Figura 76.</b> Mallado en general de las probetas.....	95
<b>Figura 77.</b> Puntos de enlace del patrón lineal .....	96
<b>Figura 78.</b> Ángulo de conicidad .....	100
<b>Figura 79.</b> Esquema prueba de curvatura .....	101
<b>Figura 80.</b> Curvas Tensión – Deformación de las probetas sin kerfing.....	102
<b>Figura 81.</b> Media de los valores de tensión máxima de la probeta sin kerf. ....	103
<b>Figura 82.</b> Fotografías del modo de fallo en las cuatro probetas sin patrón en tracción...	105
<b>Figura 83.</b> Rectas de regresión tramo elástico probetas <i>sin kerfing</i> - Módulo de Young. ...	106
<b>Figura 84.</b> Media del módulo de Young. ....	106
<b>Figura 85.</b> Identificación de la zona de enlace y sección mínima en el patrón A.....	108
<b>Figura 86.</b> Curvas Tensión – Deformación de las probetas con patrón A.....	109
<b>Figura 87.</b> Media de los valores de tensión de rotura patrón A. ....	110
<b>Figura 88.</b> Fotografías del modo de fallo en las tres probetas con patrón A en tracción....	111

<b>Figura 89.</b> Rectas de regresión tramo elástico probetas patrón A - Módulo de Young. ....	112
<b>Figura 90.</b> Media del módulo de Young – patrón A.....	113
<b>Figura 91.</b> Curvas Tensión – Deformación de las probetas sin kerfing. ....	115
<b>Figura 92.</b> Media de los valores de tensión máxima patrón B. ....	116
<b>Figura 93.</b> Fotografías del modo de fallo en las tres probetas con patrón B en tracción....	118
<b>Figura 94.</b> Rectas de regresión tramo elástico probetas patrón B - Módulo de Young. ....	119
<b>Figura 95.</b> Media de los valores del módulo de Young del patrón B. ....	119
<b>Figura 96.</b> Curvas Tensión – Deformación de las probetas con patrón C.....	121
<b>Figura 97.</b> Media de los valores de la tensión máxima del patrón C.....	122
<b>Figura 98.</b> Fotografías del modo de fallo en las tres probetas con patrón C en tracción....	123
<b>Figura 99.</b> Rectas de regresión tramo elástico probetas patrón C - Módulo de Young.....	124
<b>Figura 100.</b> Media de los valores del módulo de Young del patrón C. ....	124
<b>Figura 101.</b> Curva Tensión - Deformación del promedio de las probetas con kerfing. ....	127
<b>Figura 102.</b> Curva Fuerza - Tiempo de las probetas sin kerfing en flexión. ....	129
<b>Figura 103.</b> Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas sin patrón. ....	129
<b>Figura 104.</b> Media de los valores del módulo de Young de las probetas sin patrón. ....	130
<b>Figura 105.</b> Fotografías del modo de fallo en las seis probetas sin tras en flexión.....	131
<b>Figura 106.</b> Curva Fuerza - Tiempo de las probetas con el patrón A en flexión. ....	133
<b>Figura 107.</b> Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas con patrón A....	134
<b>Figura 108.</b> Media de los valores del módulo de Young de las probetas con patrón A. ....	134
<b>Figura 109.</b> Fotografías del modo de fallo de las probetas con patrón A. ....	135
<b>Figura 110.</b> Curva Fuerza - Tiempo de las probetas con el patrón B en flexión. ....	136
<b>Figura 111.</b> Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas con patrón B....	137
<b>Figura 112.</b> Media de los valores del módulo de Young de las probetas con patrón B. ....	137
<b>Figura 113.</b> Fotografías del modo de fallo de las probetas con patrón B. ....	139
<b>Figura 114.</b> Curva Fuerza - Tiempo de las probetas con el patrón C en flexión.....	140
<b>Figura 115.</b> Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas con patrón C. ..	140
<b>Figura 116.</b> Media de los valores del módulo de Young de las probetas con patrón C. ....	141
<b>Figura 117.</b> Fotografías del modo de fallo de las probetas con patrón C. ....	142
<b>Figura 118.</b> Curva Fuerza - Tiempo de los valores promedio de cada grupo de probetas. .	144
<b>Figura 119.</b> Distribución de tensiones a tracción de la probeta sin patrón.....	146
<b>Figura 120.</b> Distribución de tensiones a tracción de las probetas con patrón.....	146
<b>Figura 121.</b> Desplazamientos simulados a tracción de la probeta sin patrón.....	147
<b>Figura 122.</b> Desplazamientos simulados a tracción de las probetas con patrón.....	148
<b>Figura 123.</b> Deformación unitaria simulada a tracción de la probeta sin patrón. ....	149
<b>Figura 124.</b> Deformación unitaria simulada a tracción de las probetas con patrón. ....	149
<b>Figura 125.</b> Distribución de tensiones simulados a flexión de la probeta sin patrón.....	154
<b>Figura 126.</b> Distribución de tensiones de la simulación a flexión con patrón.....	155
<b>Figura 127.</b> Resultado de los desplazamientos simulados a flexión sin patrón. ....	156
<b>Figura 128.</b> Resultados de los desplazamientos simulados a flexión con patrón.....	156
<b>Figura 129.</b> Resultado de la deformación unitaria simulada a flexión sin patrón. ....	157
<b>Figura 130.</b> Resultado de la deformación unitaria en flexión de las probetas con patrón..	158
<b>Figura 131.</b> Gráficos resumen de las tendencias de los patrones según la sollicitación ....	167
<b>Figura 132.</b> Gráfico momento de inercia de la sección central de las probetas de flexión	169
<b>Figura 133.</b> Gráfico comparativo grado de curvatura .....	170

<b>Figura 134.</b> Control de la tecnología de corte .....	172
<b>Figura 135.</b> Efecto de la conicidad en las probetas.....	172
<b>Figura 136.</b> Correlación espesor resistencia en ambos ensayos.....	174
<b>Figura 137.</b> Pruebas de caracterización del corte láser .....	205
<b>Figura 138.</b> Error de calibración con potencia 60/60/25 .....	206
<b>Figura 139.</b> Prueba corte láser con distintas potencias .....	209
<b>Figura 140.</b> Reverso prueba corte láser .....	209
<b>Figura 141.</b> Planta grupo 1 (45/45/25) .....	210
<b>Figura 142.</b> Perfil grupo 1 (45/45/25) .....	210
<b>Figura 143.</b> Planta grupo 2 (75/75/25) .....	210
<b>Figura 144.</b> Perfil grupo 2 (75/75/25) .....	210
<b>Figura 145.</b> Planta grupo 3 (100/100/25).....	210
<b>Figura 146.</b> Perfil grupo 3 (100/100/25).....	210
<b>Figura 147.</b> Planta grupo 1, 2, 3.....	210
<b>Figura 148.</b> Perfil grupo 1, 2, 3.....	211
<b>Figura 149.</b> Conicidad en el corte láser.....	212
<b>Figura 150.</b> Demostración empírica conicidad .....	213
<b>Figura 151.</b> Representación de líneas de flujo de fuerzas y concentración de esfuerzos ..	229
<b>Figura 152.</b> Probeta empleada en el ensayo de tracción .....	230
<b>Figura 153.</b> Conjunto de imágenes tomadas durante los ensayos .....	245
<b>Figura 154.</b> Probeta empleada en el ensayo de flexión.....	250
<b>Figura 155.</b> Conjunto de imágenes tomadas durante los ensayos .....	267
<b>Figura 156.</b> Modelo tracción .....	271
<b>Figura 157.</b> Modelo flexión.....	271
<b>Figura 158.</b> Captura propiedades MDF introducidas en SolidWorks .....	272
<b>Figura 159.</b> Condiciones de contorno ensayo de tracción .....	273
<b>Figura 160.</b> Condiciones de contorno ensayo de flexión .....	274
<b>Figura 161.</b> Malla resultante probetas tracción .....	275
<b>Figura 162.</b> Mallas resultantes probetas flexión .....	276

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades mecánicas del MDF .....	58
<b>Tabla 2.</b> Selección de patrones .....	61
<b>Tabla 3.</b> Propiedades MDF para la simulación .....	95
<b>Tabla 4.</b> Resultados control microscópico .....	99
<b>Tabla 5.</b> Resultados estimación del ángulo de curvatura .....	101
<b>Tabla 6.</b> Módulo de Young probetas sin kerfing .....	106
<b>Tabla 7.</b> Tratamiento estadístico probetas sin kerfing .....	107
<b>Tabla 8.</b> Errores porcentuales probetas sin kerf .....	108
<b>Tabla 9.</b> Áreas efectivas empleadas para probetas con patrón A .....	108
<b>Tabla 10.</b> Módulo de Young probetas con patrón A .....	112
<b>Tabla 11.</b> Tratamiento estadístico probetas con patrón A .....	113
<b>Tabla 12.</b> Errores porcentuales de las probetas con patrón A .....	114
<b>Tabla 13.</b> Áreas efectivas empleadas para probetas con patrón B .....	115
<b>Tabla 14.</b> Módulo de Young probetas con patrón B .....	119
<b>Tabla 15.</b> Tratamiento estadístico probetas con patrón B .....	120
<b>Tabla 16.</b> Porcentajes Errores probetas con patrón B .....	120
<b>Tabla 17.</b> Áreas efectivas empleadas para probetas con patrón C .....	121
<b>Tabla 18.</b> Módulo de Young probetas con patrón C .....	124
<b>Tabla 19.</b> Tratamiento estadístico probetas con patrón C .....	125
<b>Tabla 20.</b> Porcentajes Errores probetas con patrón C .....	126
<b>Tabla 21.</b> Resumen de los valores medios obtenidos en el ensayo de tracción .....	127
<b>Tabla 22.</b> Tratamiento estadístico probetas sin patrón .....	130
<b>Tabla 23.</b> Tratamiento estadístico probetas con patrón A .....	134
<b>Tabla 24.</b> Tratamiento estadístico probetas con patrón B .....	138
<b>Tabla 25.</b> Tratamiento estadístico probetas con patrón C .....	141
<b>Tabla 26.</b> Resumen de los valores medios obtenidos en el ensayo de flexión .....	144
<b>Tabla 27.</b> Carga aplicada en cada probeta las simulaciones .....	145
<b>Tabla 28.</b> Tabla resumen de los resultados de las simulaciones para tracción .....	151
<b>Tabla 29.</b> Relación numérica entre tensión y espesor en simulaciones de tracción .....	152
<b>Tabla 30.</b> Tabla comparativa simulación y ensayo de tracción .....	153
<b>Tabla 31.</b> Tabla resumen de los resultados de las simulaciones para flexión .....	159
<b>Tabla 32.</b> Relación numérica entre tensión y espesor en simulaciones de flexión .....	160
<b>Tabla 33.</b> Tabla comparativa simulación y ensayo de flexión .....	161
<b>Tabla 34.</b> Datos organizados .....	176
<b>Tabla 35.</b> Relatividad flexibilidad – resistencia entre patrones .....	177
<b>Tabla 36.</b> Carga aplicada en cada probeta en el ensayo de tracción .....	273
<b>Tabla 37.</b> Carga aplicada en cada probeta en el ensayo de flexión .....	274
<b>Tabla 38.</b> Resultados del ensayo de tracción .....	284
<b>Tabla 39.</b> Tabla resumen de los resultados para el ensayo de flexión .....	303

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula [1] .....	70
Fórmula [2] .....	71
Fórmula [3] .....	71
Fórmula [4] .....	72
Fórmula [5] .....	72
Fórmula [6] .....	72
Fórmula [7] .....	72
Fórmula [8] .....	73
Fórmula [9] .....	80
Fórmula [10] .....	80
Fórmula [11] .....	81
Fórmula [12] .....	212
Fórmula [13] .....	229
Fórmula [15] .....	251
Fórmula [16] .....	251
Fórmula [17] .....	251

## ABREVIATURAS

**CAD:** Computer-Aided Design (Diseño asistido por ordenador)

**CNC:** Computer Numerical Control (Control numérico por computadora)

**FEM:** Finite Element Method

**MEF:** Método de Elementos Finitos

**ISO:** International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)

**MDF:** Medium Density Fibreboard (Tablero de fibra de densidad media)

**MOE:** Modulus of Elasticity (Módulo de elasticidad)

**MOR:** Modulus of Rupture (Módulo de rotura)

**UNE:** Una Norma Española (Norma técnica española)

**ASTM:** American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales)

# **Introducción.**



## 1. Introducción

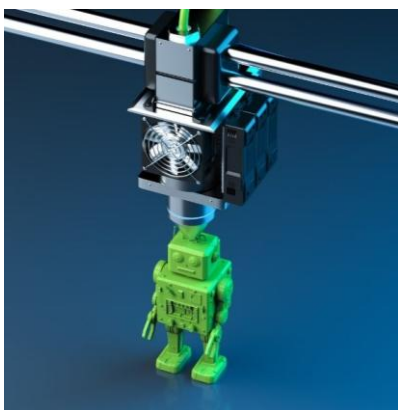
Tradicionalmente, la manufactura ha dependido de **métodos convencionales** como el **mecanizado por arranque de viruta**, el **moldeo** o la **fabricación manual** los cuales presentan limitaciones en términos de rapidez y adaptabilidad (Ikumapayi et al., 2023). No obstante, los avances en tecnologías de fabricación (Muñoz et al., 2011) han permitido la **optimización** de procesos productivos y manufactura en términos de **velocidad, precisión y personalización**, surgiendo así, **nuevas estrategias**.

Entre ellas, se encuentra la **manufactura aditiva** (Gibson et al., 2021), también conocida como **impresión 3D**, que permite fabricar piezas capa por capa a partir de modelos digitales (Figura 1).

Por otro lado, se encuentra la **manufactura sustractiva** (Babu et al., 2024), una de las estrategias abordadas en esta investigación. Engloba tecnologías como el **fresado CNC** (*Control Numérico Computarizado*) o el **corte láser** (Figura 2) y se basa en la **eliminación de material mediante diversas técnicas**, ya sea con una **fresa** (CNC) o con **láser**, este último, funciona separando materiales mediante la aplicación de **energía térmica concentrada** en un punto del material.

Por último, existe la **manufactura híbrida** (Sebbe et al., 2022), combina elementos tanto de la fabricación aditiva como de la sustractiva, integrando lo mejor de ambas tecnologías para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso (Figura 3).

Figura 1. Manufactura aditiva



Nota. Imagen de la tecnología aditiva de impresión 3D. Fuente: [Rotolia.com](https://www.rotolia.com)

Figura 2. Manufactura sustractiva

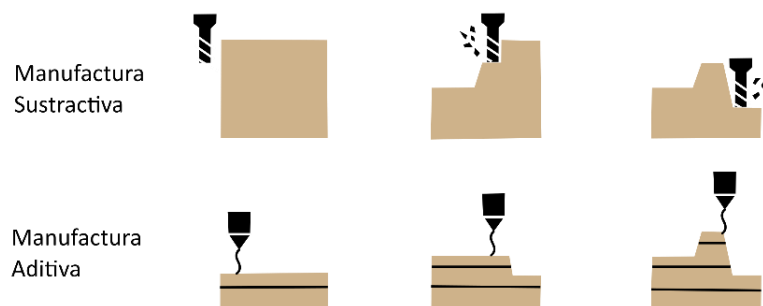


Nota. Imagen de la tecnología sustractiva de corte láser. Fuente: [Proesme.com](https://www.proesme.com)

**Figura 3.** Manufactura híbrida

Nota. A la izquierda, manufactura sustractiva: fresado CNC. A la derecha, manufactura aditiva: Deposición de energía directa, funde el material a la vez que lo deposita en una boquilla. **Fuente:** [Insta3dm.com](https://www.instagram.com/insta3dm.com)

En la *Figura 4* se observa la **diferencia** en el **modo de operación** de las dos estrategias definidas, por un lado, la **manufactura sustractiva** obtiene la pieza eliminando material de un bloque sólido mientras que la **manufactura aditiva**, la construye progresivamente mediante la deposición de material capa por capa.

**Figura 4.** Comparación manufactura aditiva y sustractiva

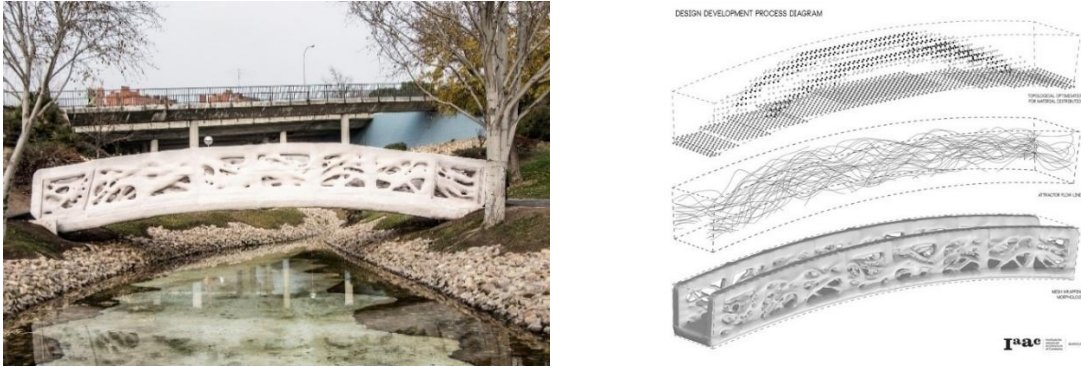
**Fuente:** Adaptado de [Izaro](https://www.izaro.com)

**Las diferentes manufacturas** se han extendido tanto debido a la globalización, que han provocado que el entendimiento sobre los **métodos de fabricación** actuales y las **herramientas de modelado 3D** estén **cambiando y ampliando** la forma de pensar del diseñador (Capone y Lanzara, 2019; Lorenzoni y da Silva, 2021). Todo ello ha impactado en diversas industrias como la del **diseño, la ingeniería y la manufactura** (Muñoz et al., 2011) generando una revolución.

Los avances en las tecnologías no solo permiten que haya **iteraciones más rápidas** y **pruebas funcionales en etapas tempranas** de prototipado, sino que también supone una **ventana hacia la innovación**, por ejemplo, en relación con la **creación de “nuevas formas” estructurales, geometrías inéditas o “nuevos materiales”**. En concreto, el **Puente de Alcobendas** (*Figura 5*) fue construido empleando la manufactura aditiva. Se trata de un proyecto liderado por el **Instituto de Arquitectura**

**Avanzada de Cataluña (IAAC)** que aprovechó el diseño paramétrico y las ventajas de la fabricación digital para optimizar y concebir una morfología optimizada en la distribución del material, reducir los residuos e integrar procesos de **reciclaje** durante la producción (**Archdaily, 2017**).

**Figura 5.** Puente de Alcobendas



Nota: estructura impresa en hormigón micro reforzado de 12 metros de largo y 1,75 de ancho.

Fuente: <https://www.archdaily.cl>

En este contexto de nuevas manufacturas, el prototipado rápido se ha convertido en una herramienta clave. Según **Alonso Rodríguez (2001)**, actualmente es posible generar un prototipo físico en **menos de 24 horas** a partir de un fichero CAD (Computer Aided Design, en español Diseño Asistido por Ordenador). Esta drástica reducción en los tiempos implica que el desarrollo de productos puede acelerarse significativamente, llegando incluso a disminuirse a la mitad, una quinta parte o hasta una décima parte del tiempo requerido en procesos tradicionales.

Una de las líneas de investigación más prometedoras dentro de este ámbito es la **generación de formas orgánicas y complejas** que están transformando la manera de pensar del diseñador (**Lorenzoni y da Silva, 2021**), abriéndole camino hacia lo que se denomina: “**formas de estructura libre<sup>1</sup>**”, difíciles de manufacturar con los sistemas de fabricación tradicionales y que, gracias a técnicas como la manufactura sustractiva de alta precisión, este tipo de diseños se vuelve **viable**.

No obstante, como advierte **Lorenzoni y da Silva (2021)** o **Badoyina (2018)**, para que estas tecnologías sean verdaderamente programables, predecibles y accesibles a diseñadores y arquitectos, es **imprescindible un conocimiento profundo** de su funcionamiento y sus parámetros.

<sup>1</sup> Edificios con formas curvas que no repiten elementos, se caracterizan por tener exteriores fluidos y espacios interiores que se diferencian de las estructuras rectangulares convencionales.

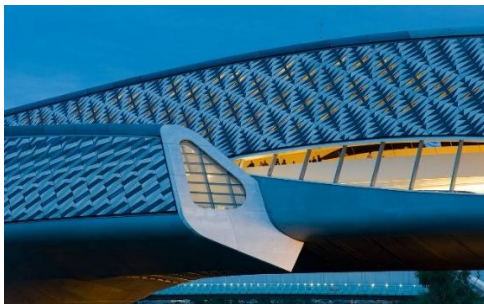
Para ilustrar este tipo de estructuras denominadas como “libres”, pueden citarse ejemplos de la arquitectura contemporánea. Uno de los más representativos es el arquitecto canadiense Frank Owen Goldberg, conocido como **Frank Gehry**, obrador de **El Museo Guggenheim de Bilbao** (1997), cuya forma ondulante se manifiesta en pasarelas curvilíneas, ascensores de titanio y cristal, y torres de escaleras (*Figura 6*). Otra arquitecta que sigue esta tendencia en su lado más extremista es **Zaha Hadid**, responsable de muchos proyectos, entre ellos, el **Pabellón Puente para la Exposición Universal de Zaragoza** (*Figura 7*). Finalmente, otro referente destacado es el danés **Jørn Utzon**, causante del diseño de la **Ópera de Sídney**, proyectada en 1957 e inaugurada en 1973, cuya emblemática silueta puede observarse en la *Figura 8*.

**Figura 6.** Guggenheim Museum Bilbao, Frank Gehry



Fuente: [www.britannica.com](http://www.britannica.com)

**Figura 7.** Pabellón puente de Zaragoza, Zaha Hadid



Fuente: [www.arquitecturaydiseno.es](http://www.arquitecturaydiseno.es)

**Figura 8.** Ópera de Sídney, Jørn Utzon

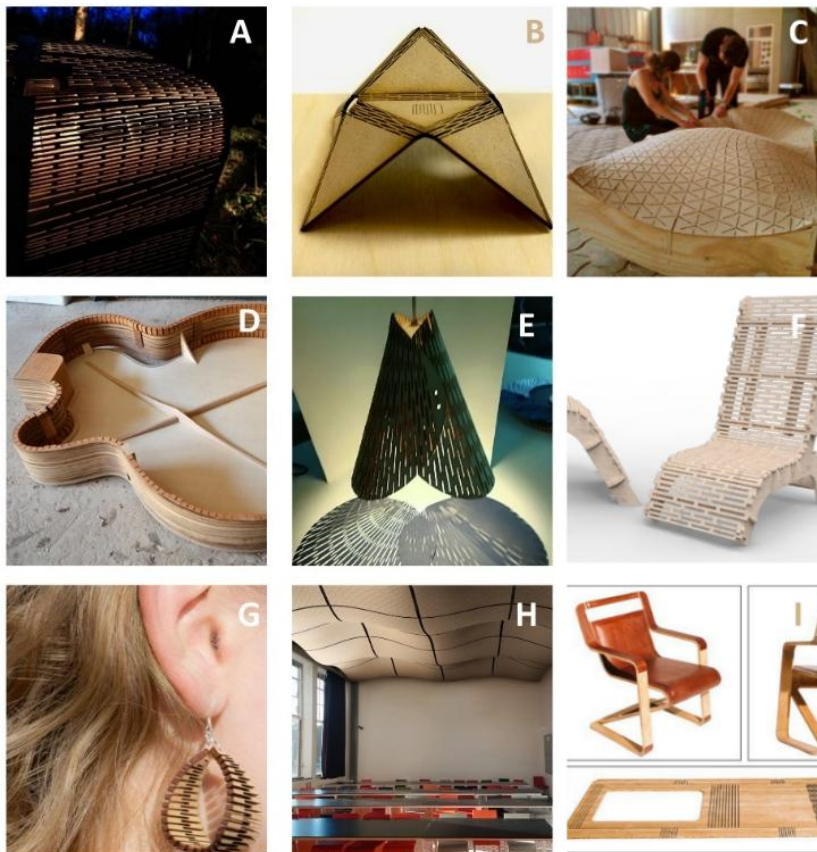


Fuente: [www.viprocosa.com](http://www.viprocosa.com)

Si bien es cierto que la evolución en este campo promueve el **uso experimental** de **nuevos materiales** como los bioplásticos, los compuestos inteligentes o los materiales autorreparables (Addington y Schodek, 2012), también existe un renovado interés por el **uso creativo de materiales tradicionales** como la madera (Capone y Lanzara, 2019). En este marco, la era digital trajo la **tecnología sustractiva** y la **madera** para dar lugar a la técnica denominada **kerfing**, también conocida entre la bibliografía bajo los términos de *bisagra viva*, *bisagra de celosía* y *dukta* y que, a partir de ahora, se utilizará el término *kerfing*.

El *kerfing* ha tomado protagonismo como **técnica** para generar formas tridimensionales orgánicas a partir de paneles bidimensionales. Consiste en **realizar cortes controlados en materiales rígidos como la madera, derivados de la madera o incluso polímeros, para permitir la curvatura del material** (Lorenzoni y da Silva, 2021). Sus **aplicaciones** son amplias y a diferentes escalas, desde **estructuras arquitectónicas** ligeras, flexibles y sostenibles (Greenberg et al., 2014; Gatóo et al., 2020) como se observa en la *Figura 9A y 9B* a **objetos cotidianos** como lámparas (Capone et al., 2019), guitarras (Loyola, Caldera y Rozas, 2017), pendientes (Aullana, 2021) tal y como se observan en las *Figuras 9E, 9D y 9G*; paneles acústicos (Holterman, 2018) como los de la *Figura 9H* hasta **mobiliario y ebanistería** (Fernández, 2019; Gomes, 2017; Silveira et al., 2023; Kang, 2010) tal y como se aprecia en las *Figuras 9F y 9H*.

Figura 9. Aplicaciones del Kerfing

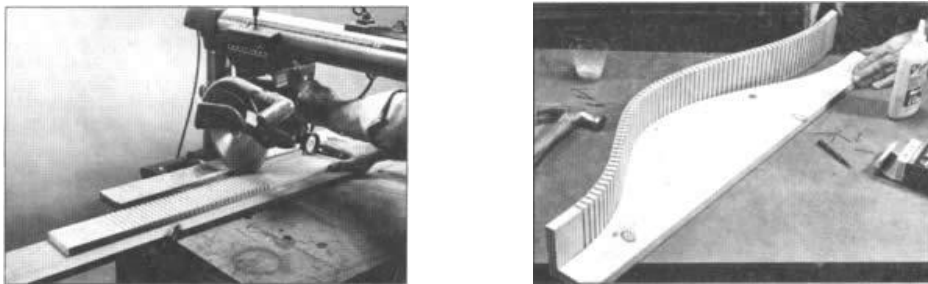


**Fuentes:**

- A) Greenberg et al. (2014)
- B) Gatóo et al. (2020)
- C) Loyola et al. (2017)
- D) Loyola et al. (2017)
- E) Capone et al. (2019)
- F) Fernández (2019)
- G) Aullana (2021)
- H) Holterman (2018)

Históricamente, la técnica del *kerfing* se aplicaba de **forma artesanal** (Figura 10) sobre la **madera**, un material noble, versátil y ampliamente utilizado desde los inicios de la humanidad (Yao, 2021; Kang, 2010). Los cortes se realizaban **manualmente** con una **sierra circular** sin atravesar por completo el espesor y a un **espaciado** entre ranuras **constante**, de esta manera se obtenían **superficies desarrollables**<sup>2</sup>. Esta técnica presentaba limitaciones derivadas de la precisión manual y del esfuerzo requerido para mantener la regularidad de los cortes. **En la actualidad**, el uso de **tecnología láser** ha permitido superar algunas de estas limitaciones: los **cortes** son **ejecutados automáticamente** a partir de un **archivo CAD**, lo que garantiza una **alta precisión** y **repetibilidad**. Además, a diferencia del método tradicional, el corte láser suele **atravesar** por completo el **espesor** del material. Se logra así, una superficie que es capaz de soportar **tensión y compresión** en **dirección perpendicular** a la fuerza aplicada, dependiendo del patrón de corte (Lorenzoni y da Silva, 2021).

Figura 10. Kerfing artesanal



Nota. A la izquierda, sierra radial realizando cortes. A la derecha, encolado de tabla ranurada sobre panel que sirve de molde

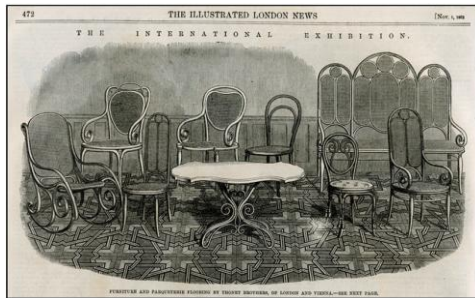
Fuente: [Mimecanicapopular.com](http://Mimecanicapopular.com)

Para comprender la importancia del *kerfing* como **método para curvar madera**, es clave comprender los antecedentes del curvado de la madera. Uno de los **hitos** más significativos en la **evolución del diseño industrial**, fue el trabajo de *Michael Thonet*, galardonado en la **Gran Exposición de Londres de 1851** (Figura 11), por sus sillas curvadas Viena (*Bentwood Chairs*). En este evento, *Thonet* no solo presentó una innovadora **colección de mobiliario**, sino también un **sistema pionero de doblado de madera en caliente**, que eliminaba la necesidad de usar herramientas tradicionales como el cincel (Yao, 2021). Este avance sentó las **bases** para la **fabricación en serie**, al permitir la producción estandarizada de piezas curvas e idénticas sin la necesidad de adhesivos o ensamblajes. Su silla más trascendental es la **Silla nº 14** (Figura 12).

<sup>2</sup> Tipo de superficies que pueden ser "aplanadas" o "desarrolladas" sobre un plano sin deformar las distancias entre sus puntos. Ejemplos comunes incluyen el cono o el cilindro.

La **técnica pionera** consistía en **láminas de madera** de haya, **embebidas en cola**, que **se sometían a calor y humedad** (vapor de agua) en una caja (Yao, 2021). Esto generaba una masa elástica y maleable que podía **moldearse** bajo presión **hasta adquirir la curvatura deseada**. Una vez enfriado el conjunto, **se retiraban los moldes**, obteniendo piezas con formas curvas definidas y repetibles (*Figura 13B*). Esta técnica se denominó **doblado o curvado en caliente** en 1841, (*Figura 13A*).

**Figura 11.** Gran exposición de Londres de 1851



**Nota:** Periódico Londinense donde se anunciaba la Gran exposición internacional de Londres  
**Fuente:** [Muebledeviena.com](http://Muebledeviena.com)

**Figura 12.** Silla nº 14



**Fuente:** [Muebledeviena.com](http://Muebledeviena.com)

A lo largo del tiempo, a raíz de la **técnica de Thonet** han ido surgiendo diversos **métodos** con el **mismo objetivo**, cada uno con particularidades técnicas, ventajas y limitaciones. Entre los **más destacados** se encuentran según **Kang (2010)**, el **curvado por laminación** (*Figura 13C*), en el que se pegan capas delgadas de madera prensada en el marco de un molde, por lo tanto, las capas se pueden curvar con un radio pequeño (*Figura 13D*). Por otro lado, **Kang (2010)** recalca que el uso de **amoníaco líquido** (*Figura 13E*) para el curvado es conocido como una buena manera de plastificar la lignina en la madera, después de una exposición prolongada a los vapores de amoníaco, la madera se ablanda. Una de las ventajas frente al anterior método es que el amoníaco elimina la recuperación elástica existente pudiéndose curvar dependiendo de la fuerza aplicada de una manera extrema (*Figura 13F*). Finalmente, **Kang (2010)** destaca el **curvado por alta frecuencia** (*Figura 13G*), es un método que emplea ondas microondas a partir de un generador de alta frecuencia y permite doblar madera junto con una prensa que ejerce alta presión. Las láminas finas de madera, como la chapa o el MDF se encolan previamente y se colocan en el molde de madera o en el molde metálico para doblar la forma deseada. Cuando las ondas de alta frecuencia atraviesan la madera, se genera calor puesto que el generador de alta frecuencia genera un campo electromagnético alterno, las moléculas de agua y pegamento se mueven a alta velocidad en el campo, lo que impulsa la temperatura

caliente en poco tiempo. Luego, el pegamento se secará y se solidificará con la forma deseada (*Figura 13H*) en varios minutos, ahorrando energía (**Chanscmac, s.f.**).

**Figura 13.** Métodos de curvado de la madera



Curvado en caliente (vapor)  
Fuente: [www.familyhandyman.com](http://www.familyhandyman.com)



Resultado del curvado en caliente  
Fuente: [www.tomraffield.com](http://www.tomraffield.com)



Curvado por laminación  
Fuente: Yao (2021)



Resultado del método de laminación  
Fuente: [www.tomraffield.com](http://www.tomraffield.com)



Curvado con amoniaco líquido  
Fuente: [Applied Science](http://Applied Science)



Resultados empleando el curvado con amoniaco  
Fuente: [Applied Science](http://Applied Science)



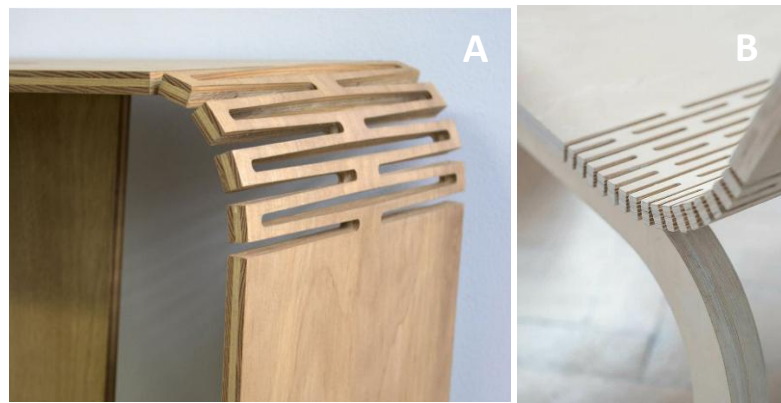
Curvado de alta frecuencia  
Fuente: [www.kuoming.com](http://www.kuoming.com)



Resultado del curvado de alta frecuencia  
Fuente: [www.kuoming.com](http://www.kuoming.com)

Cada uno de estos métodos presenta **soluciones distintas** ante los retos del diseño curvo con madera, sin embargo, **en el contexto de este estudio**, se opta por profundizar en el *kerfing* junto con la **tecnología de fabricación digital sustractiva del corte láser** (Figura 14) ya que supone una **ventaja** en términos de accesibilidad, control formal y compatibilidad con fabricación digital. Esta técnica permite una **aproximación muy precisa al diseño flexible** sin necesidad de **condiciones extremas** de **humedad** o **temperatura** o a la **exposición** a gases perjudiciales para la salud como el **amoniaco**, Además, cuenta con la **posibilidad de corregir el comportamiento mecánico** del material según el patrón de una manera rápida.

Figura 14. Kerfing realizado mediante corte láser



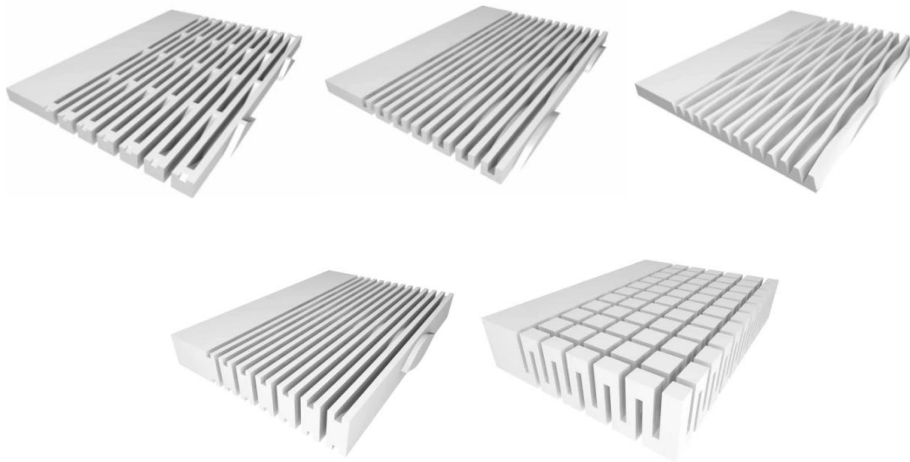
Fuente: A) Yao (2021); B) [Pinterest](#)

Un ejemplo de la situación actual del kerfing viene dado por la empresa *Dukta*, que fue **pionera** en el empleo del *kerfing*. Por este motivo, la técnica también es reconocida bajo el nombre de *dukta*. La compañía es un **ejemplo contemporáneo** de la aplicación del *kerfing* en la industria del diseño y la arquitectura, fue **fundada en 2011** en **Zúrich, Suiza**, por *Serge Lunin* y *Christian Kuhn* y **surgió** a partir de **experimentos** realizados en 2007 en los que buscaban **alternativas a las técnicas tradicionales de curvado de madera**.

Estos experimentos demostraron que **ciertos patrones de incisiones** podían conferir **flexibilidad a la madera sin comprometer su integridad estructural**. Como resultado, *Dukta* desarrolló y patentó un proceso de incisión que consiste en realizar **cortes precisos** en materiales como **contrachapado, MDF y tableros de tres capas**, transformándolos en paneles con propiedades casi textiles. Estos paneles **mantienen su estabilidad estructural** en la dirección de los cortes, mientras que en la dirección opuesta adquieren una **notable flexibilidad** (Dukta, s.f).

En este sentido, la firma ofrece **variantes de incisión**, como SONAR, LINAR, FOLI, JANUS y DUNA (*Figura 15*), que presentan diferencias no solo en cuanto al grado de flexibilidad, sino también en apariencia estética y en proporción. En definitiva, esta técnica permite **aplicaciones versátiles** en diseño interior, incluyendo **sistemas acústicos, tabiques móviles, mobiliario, luminarias y objetos artísticos**.

**Figura 15.** Variantes de incisión de Dukta

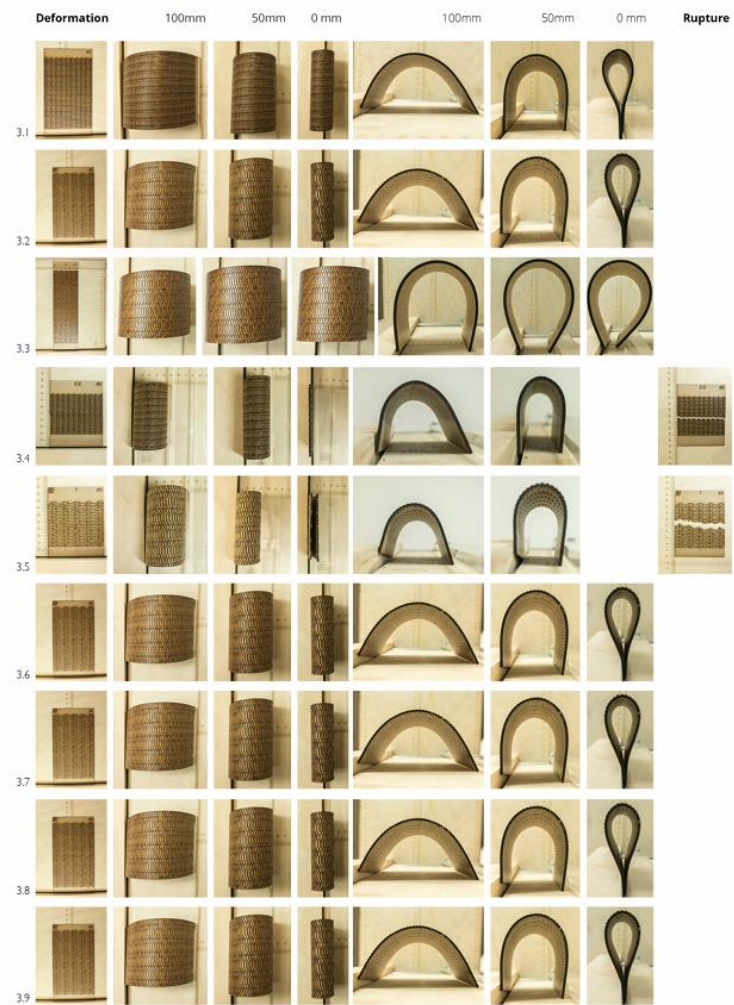


Nota: En orden de aparición de izquierda a derecha y de arriba abajo: Sonar, Linar, Foli, Janus y Duna.

Fuente: [Dukta](#), (s.f.)

Por otro lado, la literatura reciente ha abordado el *kerfing* en múltiples contextos: **Gatío (2020)**, por ejemplo, explora su aplicación en **arquitectura**, según el autor, existe una necesidad urgente de desarrollar **espacios sostenibles y flexibles** para las futuras viviendas urbanas debido a las poblaciones, que van en aumento; y al cambio climático en la vanguardia de la agenda arquitectónica. Así pues, **examina el potencial del uso de la madera** para la producción de viviendas flexibles a través del corte de patrones o *kerfing*, realiza un **banco de pruebas de flexibilidad** (*Figura 16*) a diferentes patrones, encontrando que la **longitud, la escala y la densidad** eran parámetros relevantes a tener en cuenta y concluyendo que los patrones más flexibles son aquellos que presentan una **mayor densidad de corte**.

Figura 16. Banco de pruebas de flexibilidad por Gatóo (2020)



Fuente: Gatóo (2020)

Por otro lado, **Greenberg et al. (2014)**, emplea la **tecnología sustractiva** para realizar **patrones de ranura variable** para crear un **refugio** cuyo diseño se basaba en un tubo de carbono que funcionaba como **techo, pared y suelo** (Figura 17). Para ello **requería de distintas curvaturas** para unir unas secciones con otras, por lo que analizó la orientación y la densidad de los cortes según el valor de la curvatura y los unió por medios mecánicos. Empleó programas de elementos finitos, aunque tuvo que dividir la estructura en partes por las dificultades de software a la hora de crear la malla. **Afirma que es posible controlar el rendimiento estructural** dado que los paneles ranurados permiten curvaturas en una dirección concreta **conocida**: en la dirección perpendicular al patrón ranurado. Los escritores enfatizaron la **importancia de llevar a cabo más investigaciones** para entender la **correlación entre la rigidez y la curvatura** del material con determinados factores, como el material, requerimientos estructurales, longitud de corte, patrón de corte y **distancia entre cortes** (paso de corte).

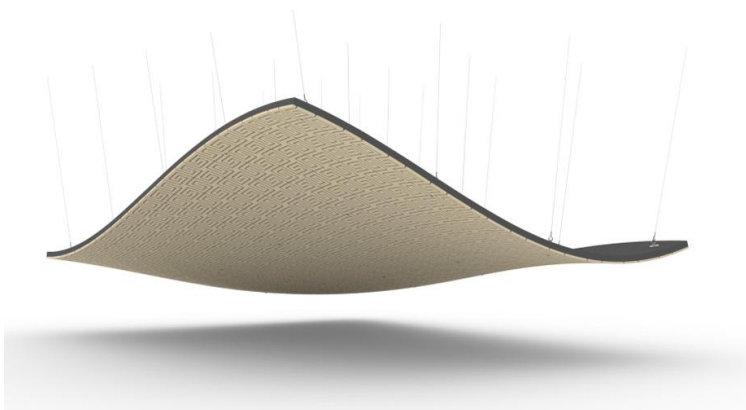
**Figura 17.** Estructura curva de carbono por Greenberg (2014)



**Fuente:** Greenberg et al. (2014)

**Holterman**, en su tesis de máster (**Holterman, 2018**) investiga cómo los patrones de corte aplicados mediante *kerfing* permiten transformar superficies de madera en elementos responsivos, capaces de adaptarse a estímulos externos y modificar su comportamiento físico. Este enfoque no solo aporta **cualidades estéticas y estructurales**, sino que también abre nuevas posibilidades funcionales, como su aplicación en el diseño de **paneles acústicos** (*Figura 18*). Al introducir ranuras cuidadosamente calculadas, se puede alterar la rigidez, la absorción y la reflexión del sonido, generando diferentes soluciones acústicas y visualmente atractivas. Zanja su tesis con que un patrón se puede definir mediante **tres parámetros**: el **tamaño de una unidad**, el **número de iteraciones** y el **ancho de corte**. Sus modelos físicos y teóricos han demostrado que la **flexibilidad controlada** es **posible**, pero que necesita más **investigación** y elaboración.

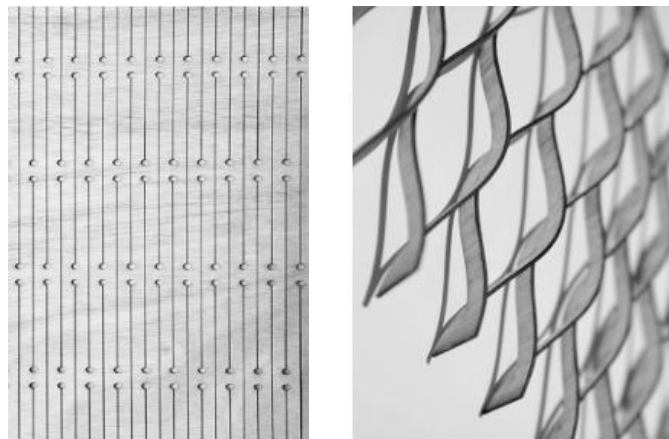
**Figura 18.** Paneles acústicos por Holterman (2018)



**Fuente:** (Holterman, 2018)

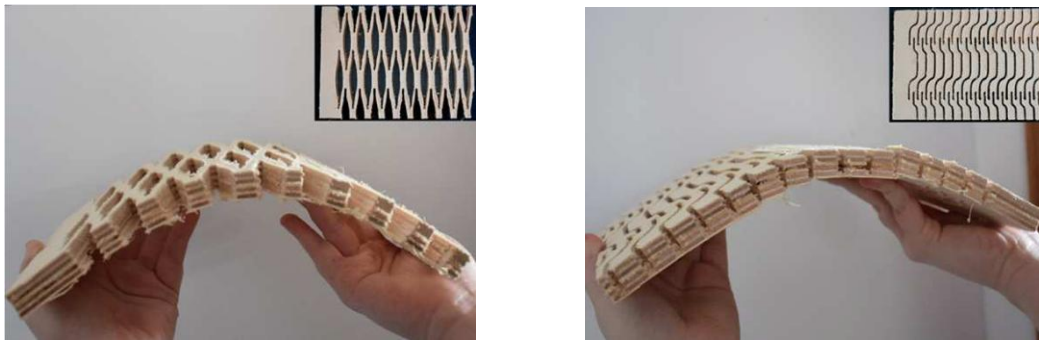
Weston (2012) presenta el uso deliberado de ranurados y cortes alternos (estrategias cercanas al kerfing) como un modo de inducir **anisotropía funcional** en superficies planas: al variar la longitud y separación de las ranuras, las láminas se comportan como una “malla con memoria” que se expande bajo tensión y vuelve a su forma de reposo, haciendo que las láminas giren o se orienten con el material (*Figura 19*). El autor destaca aspectos practicables y curiosos para el diseño: los orificios de alivio de esfuerzo para evitar la propagación de grietas, la posibilidad de sesgar localmente la rotación de cada hoja, la combinación con refuerzos tipo batten (industria de la vela) y la hibridación con materiales de memorias para crear actuadores pasivos sensibles a la humedad. Weston también subraya aplicaciones arquitectónicas como sombras adaptativas, integración de células fotovoltaicas flexibles, etc. Y apunta a la facilidad de fabricación mediante láser o CNC.

**Figura 19.** Paneles cerrados y abiertos.



**Fuente:** (Weston, 2012)

En el diseño de **mobiliario**, siempre ha habido una atracción por las superficies curvas, en esta corriente, **Fernández Álvarez (2019)** desarrolló un **modelo de silla utilizando el kerfing** para curvar el material rígido, demostrando su viabilidad para la **producción de muebles**. Por otro lado, la investigación de **Gomes (2017)** sobre la aplicación del *kerfing* en mobiliario **confirma que esta técnica permite una amplia personalización en el diseño**, adaptándose a muchas necesidades funcionales. Testea aplicando fuerza manualmente la flexibilidad y torsión de paneles de madera contrachapada de 15 mm de espesor en losas de 250 x 200 mm (*Figura 20*), llegando a la conclusión de que hay ciertos patrones con mejores respuestas en relación con resistencia y elasticidad, como el **patrón de líneas rectas, útil para zonas a gran escala** o con curvas **con mayor ángulo**.

**Figura 20.** Test de flexibilidad por Gomes (2017)

Fuente: (Gomes, 2017)

Tras una primera toma de contacto con la bibliografía existente, se conoce que uno de los aspectos clave en la evolución del *kerfing* ha sido la **optimización de los patrones de corte** para tener las mejores condiciones de flexibilidad y resistencia del material. Estudios como el de **Condoroțeanu (2022)** exploran la **variación de los parámetros de corte** para la flexibilización de paneles de madera contrachapada. Emplea un único patrón de líneas rectas y realiza ensayos de flexión apoyada comparando el **comportamiento de probetas estandarizadas**, con probetas con un **marco externo** para evitar que el espécimen se resbalase del banco de ensayo, sin embargo, no ofrece diferencias significativas en cuanto a su comportamiento mecánico. Verifica las afirmaciones de muchos **investigadores** (Darnal et al., 2024; Greenberg y Körner, 2014; Lorenzoni y da Silva, 2021) sobre que un **aumento de la flexibilidad se produce por una mayor densidad de cortes** y que a la vez se traduce en una **disminución de la resistencia mecánica**, sin embargo, **no analiza otro tipo de patrones** cuya influencia ha sido demostrada como **muy significativa** a la hora de las características mecánicas. Asimismo, otras investigaciones sobre el impacto de los parámetros de corte láser han evidenciado que factores como el **espaciado entre cortes** y la **geometría del patrón** afectan significativamente la resistencia a la flexión del material (Loyola et al., 2017).

Guzelci, Alaçam y Bacinoğlu (2017) en su estudio, llevan a cabo una **experimentación en tres fases** con materiales planos rígidos (principalmente **cartón** y **tableros de fibras**) a los que se les aplican **patrones de corte** mediante láser para inducir **curvaturas tridimensionales**. Se integran técnicas analógicas y digitales para explorar cómo los patrones geométricos afectan el comportamiento de flexión del material. Explora **cuatro patrones: lineales inclinados, rectos, circulares y espirales**, con tres **variaciones en cuanto a la escala del patrón** cada uno. Entre las

**conclusiones** destacadas, encuentran que el **aumento de la porosidad**, es decir, la propiedad de un material vinculada a los espacios vacíos en su superficie **no garantiza mayor flexibilidad**, sino que es la organización topológica de los cortes la que genera **comportamientos anisotrópicos** semejantes a tejidos. Además, observa que las **experiencias físicas informan mejor** el proceso de diseño digital que los **modelos exclusivamente computacionales**. Como limitación en su estudio, los modelos generados fueron solo **maquetas a pequeña escala**, que se testearon con las propias manos, lo cual deja abierta la posibilidad de **resultados distintos en condiciones materiales o estructurales más exigentes**, además de que no se obtuvieron resultados numéricos si no simplemente la posibilidad de observar el **comportamiento del material sometido a fuerzas diferentes**.

A pesar de su creciente aplicación, la **literatura existente** sobre su comportamiento mecánico y la influencia de distintos patrones de corte es **limitada**, los **ensayos mecánicos son escasos** y suelen ser para **conocer la flexibilidad** del material tras el corte. Apenas existen artículos que **verifiquen varios patrones** cuando es uno de los aspectos claves (Guzelci et al., 2017; Loyola et al., 2017).

Por tanto, este trabajo se centra en el **análisis experimental** del impacto de diferentes **configuraciones de kerfing** en la **flexibilidad** y el **comportamiento mecánico del MDF**. A través de **pruebas digitales y experimentales** se pretende realizar un **análisis comparativo** y de **caracterización mecánica**, obteniendo resultados numéricos. Además, se busca evaluar **cómo varía el comportamiento** del MDF cuando se aplica una **reducción de su sección** debido al uso de la técnica *kerfing*, se **compararán** de una manera lo más equitativa posible **tres patrones** que mantendrán sus proporciones (en cuanto a distancias vertical y horizontal). Así, se observará como **afectan a la resistencia y deformabilidad** del material el cambio de patrón. Con ello, se intenta aportar información útil para la optimización de diseños y futura aplicabilidad.

Con todo lo expuesto anteriormente surgen varias cuestiones:

- *¿Qué diferencias se observan entre patrones de corte?*
- *¿Cómo afecta el tipo de patrón a la capacidad de flexión y resistencia a la fractura de la madera?*
- *¿Cómo se correlacionan los resultados experimentales con las simulaciones de elementos finitos en términos de distribución de tensiones?*
- *¿Existe una correlación numérica entre la resistencia mecánica y el espesor al aumentar el mismo?*
- *¿Qué limitaciones presenta el kerfing como método de fabricación para piezas funcionales en ingeniería mecánica?*
- *¿Se puede controlar la anisotropía que induce el kerfing?*

**Marco Teórico.**



## 2. Marco Teórico

Tras haber contextualizado en la introducción la relevancia de las tecnologías de fabricación digital y el *kerfing* como **técnica** para la obtención de **superficies flexibles**, este apartado tiene como objetivo establecer una **base teórica sólida** sobre la cual se sustenta el presente trabajo. A través de la **revisión de literatura especializada** que se expondrá a continuación, se persigue **identificar** los **fundamentos clave** que influyen en el **comportamiento del material** ante distintos patrones de corte. Todo ello servirá como marco de referencia para el posterior método experimental entre las configuraciones seleccionadas y guiará la interpretación de los resultados obtenidos.

Tras haber examinado en profundidad una selección de *31 investigaciones* recientes en torno a la técnica del *kerfing*, se puede concluir que tanto la **geometría del patrón** y **frecuencia de los cortes** tienen un impacto significativo en el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas. Estos factores **influyen en múltiples aspectos**, entre los que destacan:

- La **flexibilidad** estructural,
- La **capacidad de curvatura**,
- La **distribución de tensiones** durante la deformación

Además, han proporcionado evidencia de que **ciertas configuraciones** pueden **optimizar** la **resistencia** a la fractura y **facilitar** el **diseño** de estructuras complejas.

Entre los **artículos más sustanciales** encontramos el de **Condoroțeanu et al. (2022)**, este trabajo propone un **método experimental** para analizar cómo la **variación de dos parámetros**: la **longitud** de la **zona cortada** y la **distancia transversal entre cortes** influyen en el comportamiento a flexión de paneles de contrachapado cortados con láser. Para evitar el deslizamiento de las muestras durante los ensayos, diseña un conjunto de **probetas enmarcadas** (*Figura 21*) que permite aislar el comportamiento de la zona central *kerfeada*. A través de ensayos de flexión estática normalizados (según la norma EN 310), el estudio recoge datos de **módulo de elasticidad** (MOE), **módulo de ruptura** (MOR) y **deflexión máxima**, observando una **correlación directa** entre el aumento del área *kerfeada* y la pérdida de rigidez estructural. Sin embargo, los propios autores reconocen ciertas limitaciones metodológicas. Por un lado, el método de ensayo con **probetas simples** (sin marco) resultó **ineficaz**, ya que las muestras más flexibles tendían a deslizarse o no rompían adecuadamente, lo que impedía recoger

datos fiables. Por otro lado, el estudio se centra **exclusivamente** en **patrones de kerf rectos** y cortes perpendiculares a la veta de la madera contrachapada, lo cual limita la comprensión del comportamiento en configuraciones más complejas o en otros tipos de patrones. Además, se trabaja únicamente con **contrachapado de 8 mm** de espesor, sin explorar cómo varían los resultados en espesores diferentes o en otros materiales derivados de la madera, lo que **restringe la generalización** de los resultados.

**Figura 21.** Probetas enmarcadas y test de flexión por Condoroțeanu et al. (2022)

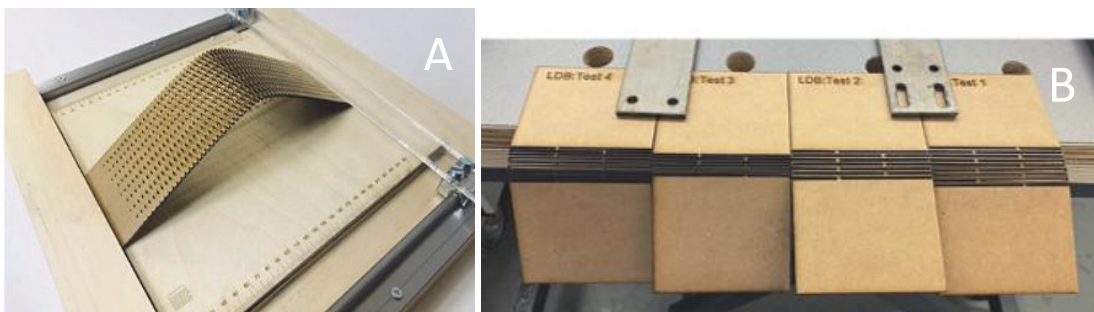


**Fuente:** (Condoroțeanu et al., 2022)

Complementando esta perspectiva con una más estructural, el estudio de **Gatío et al. (2021)** se orienta a la exploración de patrones de *kerf* para el desarrollo de **particiones arquitectónicas plegables, ligeras y sostenibles** a partir de paneles de madera de ingeniería (principalmente MDF, Medium Density Fiberboard o tablero de fibra de densidad media y, en una fase inicial, contrachapado) cortados con láser. Los autores seleccionan **seis patrones** (lineales, entrelazados y de “fillet” o romboidal) y fabrican **probetas a dos escalas** (áreas unitarias de 31 y 124 mm<sup>2</sup>), sujetas en un **banco de ensayo manual** que mide el **ángulo de plegado hasta la fractura**, considerando **variables** como la **longitud del patrón** en celdas unitarias, la **escala** y la **“densidad” del kerf** (área de material eliminado). Entre sus hallazgos, el patrón de **romboides curvo (patrón 6) (Figura 22A)** mostró la **mayor flexibilidad**, mientras que el **patrón recto (patrón 2)** ofreció **mayor estabilidad y uniformidad de tensiones**. Una de las limitaciones es que la mayoría de los ensayos los realiza con tableros de fibras de 2 mm; solo hay algunos datos preliminares con espesores 4–5 mm y contrachapado de 4 mm, y las conclusiones son que la variación de comportamiento es limitada, lo que dificulta extrapolar resultados a otros materiales y espesores. No se evalúan parámetros mecánicos estándar (MOE, MOR, carga de fractura), lo que impide comparar cuantitativamente la rigidez o resistencia de cada patrón, **se centra en el ángulo de rotura**, con un **protocolo de ensayo muy simplificado, plegando el material cortado**.

En un estudio posterior, la misma autora Gatóo et al. (2022), emplea los conocimientos para **aplicar** el *kerfing* a una **estructura** destinada a la vivienda. En esta segunda investigación **realiza un análisis de un patrón** de celosía **recta** debido a su **homogeneidad** y se llevaron a cabo varios experimentos físicos con tableros de fibras de 2 mm de espesor para decidir parámetros de diseño del patrón como la longitud de la línea, la distancia entre líneas, el número de líneas y el grosor de cada una de las líneas con el fin de lograr la flexibilidad requerida (*Figura 22B*). Las pruebas realizadas demostraron que, **cuando se aumentaba el espesor del material, el patrón podía ampliarse de forma lineal**. El mismo principio se demostró al escalar de MDF de 2 mm a madera contrachapada de 6 mm y de madera contrachapada de 6 mm a 18 mm.

**Figura 22.** Ensayos realizados por Gatóo (2022)



Nota: A) Banco de ensayo con patrón romboidal; B) Ensayo de ángulo de curvatura con patrón recto

Fuente: (Gatóo et al., 2021; Gatóo et al., 2022)

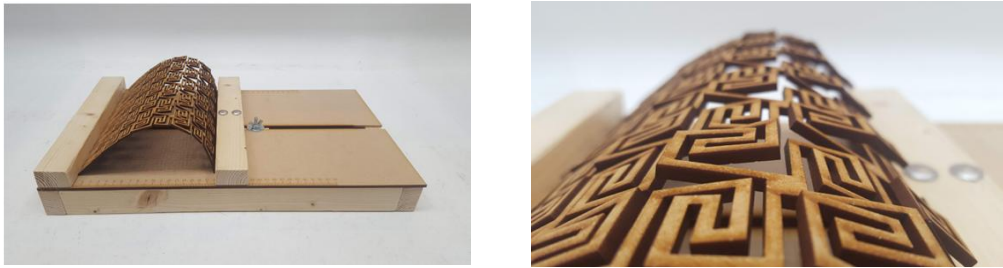
Otro de los trabajos más significativos en el ámbito del *kerfing* aplicado al diseño de superficies curvas en madera es la tesis de **Holterman (2018)**, el autor investiga las posibilidades que ofrece el corte de patrones con técnicas como el corte láser y el fresado CNC para transformar **placas planas en superficies tridimensionales flexibles** con capacidad de **respuesta a condiciones funcionales** como **paneles acústicos** para espacios interiores. Su **objetivo es formalizar un método de diseño y fabricación a partir de un modelo paramétrico** en el entorno de Grasshopper (complemento de *Rhinoceros*), que permite modificar variables como el **tamaño de la unidad de patrón, el número de iteraciones por la línea de patrón y el ancho de corte**. La investigación se articula en **tres líneas fundamentales**: por un lado, la **relación entre los parámetros del patrón de corte y la curvatura alcanzable** de la superficie; en segundo lugar, **la influencia del patrón y la curvatura en el comportamiento acústico del panel**; y finalmente, la aplicación arquitectónica de dichos paneles como **elementos activos y adaptativos en el espacio construido**, para el presente trabajo **resulta de interés la primera línea**.

En ella, **emplea dos tipos de patrones**, uno de **celosía de línea recta** capaz de deformarse en una única dirección y el patrón que denomina **meandro**<sup>3</sup>, descubierto por *Dujam Ivanišević* que, a diferencia del primero, es capaz de **generar doble curvatura**. Una serie de **conclusiones** relevantes son extraídas de su trabajo como el hecho de que **aumentar el ancho del kerf** (la cantidad de material eliminado en el corte), **reduce la anchura** de los segmentos de material entre cortes, esta disminución **reduce la rigidez** de los segmentos, **facilitando su torsión y aumentando la deformabilidad del panel**. No obstante, existe un **límite práctico**: si los cortes son demasiado anchos, el **panel pierde cohesión estructural** y puede debilitarse en exceso. A su vez, en cuanto al **patrón meandro**, un **mayor número de iteraciones**, implica una **división del panel en un mayor número de segmentos**, lo que se traduce en una **mayor capacidad de torsión** y por tanto **mayor flexibilidad** en general (*Figura 23*), sin embargo, puede **afectar negativamente** a la **resistencia** del panel en ciertas zonas. El autor señala además que, este patrón, al partir de una cuadrícula cuadrada con cortes en las dos direcciones principales, permite controlar la flexibilidad del panel en la dirección deseada simplemente con cambiar la configuración de la cuadrícula base. Por último, el tamaño de cada unidad básica del patrón tiene un efecto de escala en la curvatura final obtenida, un **patrón con unidades mayores** tiende a generar **curvaturas más amplias y suaves**, mientras que **patrones más pequeños** permiten curvaturas más **cerradas y localizadas**. Si bien el trabajo de Holterman presenta una contribución significativa, también es posible identificar ciertas **limitaciones** que abren el camino a **nuevas investigaciones**. En primer lugar, no se incorporan **ensayos mecánicos normalizados**, como los de tracción o flexión según normativas estandarizadas (por ejemplo, Unificación de Normas Españolas o UNE, International Organization for Standardization ISO o American Society for Testing and Materials ASTM), que permitan cuantificar con rigor el comportamiento estructural de los paneles. **Las simulaciones estructurales** se llevan a cabo en *Karamba3D*, pero el **propio autor señala** que el módulo utilizado estaba aún **en desarrollo**, por lo que sus resultados **deben interpretarse con cautela**.

---

<sup>3</sup> Diseño que consiste en una serie de curvas o giros sinuosos, que se asemejan a la forma de un río que serpentea

**Figura 23.** Herramienta para examinar la curvatura



**Fuente:** (Holterman, 2018)

En continuidad con la exploración del comportamiento del kerfing, el artículo elaborado por **Lorenzoni y da Silva (2021)** adopta una metodología de **revisión sistemática** para analizar y diferenciar las principales técnicas existentes para inducir una curvatura en materiales planos con patrones de crote, entre las técnicas revisadas, a parte del *kerfing*, incluye los **mecanismos emergentes en láminas (LEMs)**, las **uniones auxéticas**<sup>4</sup> y el **kirigami**<sup>5</sup>. La motivación del trabajo radica en la creciente necesidad de unir la **libertad formal** que ofrecen las herramientas digitales con las **limitaciones físicas y constructivas** que impone la fabricación material. Uno de los aportes más relevantes del artículo es la **identificación de la torsión de los segmentos paralelos al eje de curvatura** como el mecanismo principal que otorga flexibilidad a los paneles con *kerfing*. A este fenómeno se suma una pequeña contribución por parte de la flexión de los segmentos perpendiculares al eje. Según explica, **la curvatura total del panel es el resultado acumulado de los pequeños ángulos de rotación que adopta cada segmento individual y la deformación máxima está limitada por la tensión torsional admisible en dichos segmentos**. El artículo subraya que las **propiedades geométricas del patrón** tales como la longitud, espaciado, orientación y forma de los cortes son **determinantes en el comportamiento final** del material. Las limitaciones del *kerfing* aportadas por la autora radican en que debido a la pérdida de rigidez que conlleva la sustracción de material, **el *kerfing* no resulta adecuado para aplicaciones** que requieran un **alto rendimiento estructural**. A partir de la base conceptual, la misma autora publica los resultados de una nueva investigación en 2022 (Lorenzoni y da Silva, 2022) que a diferencia de estudios anteriores que se han centrado en el **diseño paramétrico o en la visualización de las geometrías obtenidas**, esta investigación plantea una

---

<sup>4</sup> Componentes estructurales que exhiben una relación de Poisson negativa (NPR). Esto significa que, al estirarse, se expanden lateralmente en lugar de adelgazar, como ocurre con la mayoría de los materiales. Este comportamiento inusual se debe a su geometría específica o a la microestructura interna.

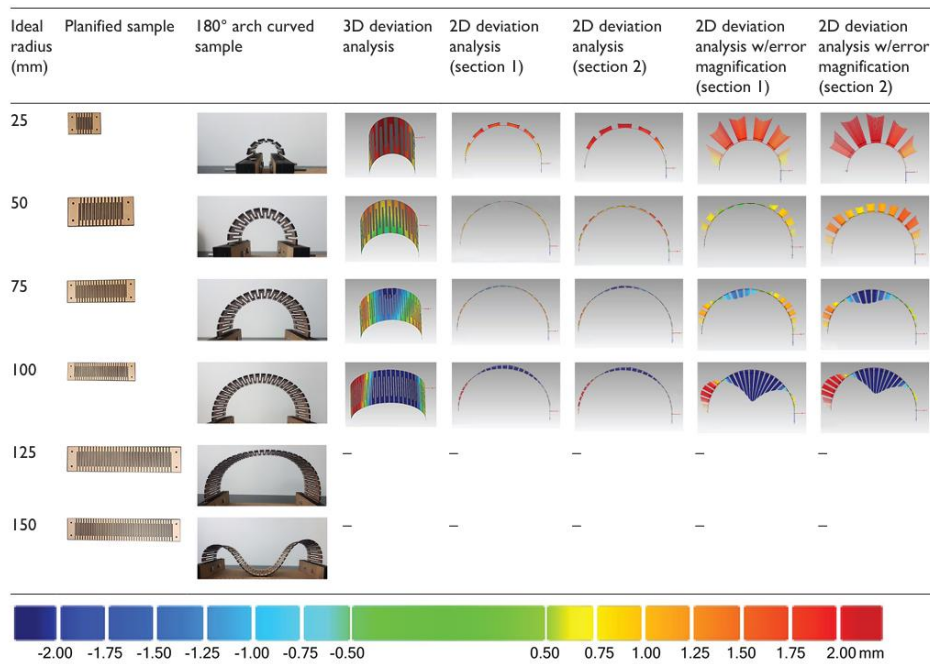
<sup>5</sup> Técnica milenaria que se basa en doblar y cortar papel.

aproximación cuantitativa, basada en la **comparación entre la geometría diseñada digitalmente y la geometría real obtenida** tras el proceso de corte, doblado y escaneo tridimensional. Para ello, los autores definen una **metodología** experimental estructurada en **cinco etapas**: diseño del objetivo geométrico, fabricación de prototipos mediante corte láser, curvado de los paneles en forma de medio cilindro, escaneo tridimensional de las piezas y análisis digital comparativo de las desviaciones respecto a la geometría ideal.

La **muestra experimental** se compone de placas de **MDF de 3 mm de espesor**, a las cuales se les aplica un **patrón de corte lineal** interrumpido. Las **distancias y longitudes** de los cortes se mantienen constantes, mientras que el parámetro que **se varía sistemáticamente es el radio del arco** que se desea alcanzar mediante el curvado. Las muestras fueron dobladas en **radios comprendidos entre los 25 y los 150 mm**. El soporte con el que se realizaba el ensayo era un sencillo sistema que mantenía los extremos fijos de las probetas mediante tornillería. Entre los resultados más relevantes se encuentra la **identificación de un rango óptimo de radios de curvatura, concretamente entre los 50 y 55 mm**, en el cual la geometría final obtenida **guarda mayor fidelidad con la forma diseñada digitalmente**. En radios menores, la rigidez del material impide una correcta adaptación a la forma deseada, provocando protuberancias hacia el exterior determinadas por las dimensiones de las áreas no cortadas. Por el contrario, en radios mayores, la estructura pierde estabilidad, lo que conduce a una pérdida de continuidad en la curvatura e incluso al colapso parcial de la forma.

Asimismo, **el artículo ofrece una metodología que puede ser útil para la evaluación de otros materiales**, patrones de corte y radios de curvatura. La **combinación de diseño paramétrico, fabricación digital, escaneo 3D y análisis comparativo (Figura 24)** mediante mapas de desviación representa una **herramienta de gran utilidad** para la validación geométrica en contextos donde la **precisión dimensional es crítica**.

Figura 24. Análisis comparativo por Lorenzoni y Silva (2022)



Fuente: (Lorenzoni y Silva, 2022)

Finalmente, el trabajo pone de manifiesto que incluso dentro del rango óptimo de curvatura, las muestras presentan pequeñas áreas de deformación hacia el interior o el exterior de la geometría ideal. Esto sugiere que la técnica, aunque eficaz, **no garantiza una precisión absoluta**, especialmente en aplicaciones donde la continuidad superficial sea un requisito exigente, otra debilidad podría ser que solo realiza ensayos de un patrón lineal sin variantes en sus parámetros geométricos, lo que limita la generalización de los resultados, no se incluyen datos sobre el comportamiento mecánico del material (resistencia, esfuerzo, módulo de elasticidad), lo que impide correlacionar las deformaciones observadas con tensiones internas cuantificadas.

Por otro lado, la propuesta de **Loyola (2017)**, surge como respuesta a la dificultad técnica y económica que supone la **construcción de geometrías complejas** en **contextos con recursos limitados**, particularmente en Latinoamérica, donde el acceso a métodos constructivos industrializados o a materiales de alta tecnología no es común. La técnica desarrollada por los autores se fundamenta en el *kerfing*. Incorpora un **proceso algorítmico de optimización** que permite reducir significativamente el número de cortes y ajustar su geometría (ángulo, profundidad, espaciado) en función de la curvatura deseada y de las propiedades mecánicas del material.

El trabajo se desarrolla en **tres fases**, cada una **asociada** a un tipo creciente de **complejidad geométrica**: (1) superficies de curvatura simple (ranuras simples), (2) superficies de doble curvatura anticlástica regladas, y (3) superficies no regladas con curvatura compuesta (emplea un patrón con motivo central en “Y” permite expandir y contraer áreas de la superficie según el sentido de rotación). En cada caso, los autores **diseñan algoritmos específicos** que permiten generar patrones de corte ajustados a las exigencias geométricas y mecánicas de cada tipo de superficie. Estos algoritmos fueron implementados en *Grasshopper 3D*. Las piezas resultantes se fabricaron con máquinas CNC utilizando MDF y madera contrachapada de distintos espesores. Para las **superficies de curvatura simple**, se emplea un algoritmo que localiza las ranuras a partir del análisis de la curva directriz de la superficie, **asegurando un ángulo constante** de deformación en función del módulo de flexión del material. Este método logró reducir hasta en un **75 % el número de cortes en comparación con el *kerfing* tradicional, sin pérdida de precisión** en la forma final. Los prototipos físicos, fabricados a escala real (90 x 200 cm), validan el enfoque propuesto y demuestran la viabilidad de la técnica tanto en términos geométricos como de fabricación. **Además, se llevaron a cabo ensayos mecánicos de flexión a tres puntos sobre 28 probetas de madera ranurada con diferentes configuraciones de corte**. Los resultados muestran que, si bien la **resistencia disminuye significativamente respecto a las piezas no cortadas**, existe una **gran variabilidad según la geometría del patrón**, lo que subraya la **importancia de una correcta parametrización en el diseño**. Entre las conclusiones más importantes del artículo se destaca la **eficacia de los algoritmos de optimización** para reducir el número de cortes sin comprometer la fidelidad geométrica, así como la **viabilidad de la técnica como alternativa de bajo costo para la fabricación de superficies complejas**. También se reconocen varias limitaciones importantes: en primer lugar, **los algoritmos desarrollados resultan computacionalmente exigentes** y con **capacidad limitada** para manejar **superficies altamente complejas**; en segundo lugar, el sistema requiere una subestructura de soporte que actualmente no está del todo resuelta ni optimizada para producción industrial. **Asimismo, los tiempos de corte mediante rúter CNC son elevados, lo que podría comprometer la escalabilidad del sistema** si no se mejora el proceso de fabricación.

Continuando con el marco teórico, esta vez aplicando la técnica *kerfing* para la creación de prototipos de **mobiliarios**, se encuentra el trabajo desarrollado por **Gomes (2017)** avanza con la **aplicación de distintos patrones de corte**: recto, curvo, en forma de panel, entre otros, en paneles de **madera contrachapada**, evaluando su grado de **deformación y resistencia manualmente**. A partir de esta experimentación, se diseña y fabrica un prototipo de escritorio modular con espacios de almacenamiento (*Figura 25*), cuyas curvas se obtienen exclusivamente **mediante *kerfing***, eliminando la necesidad de bisagras o uniones mecánicas tradicionales. Entre las conclusiones más destacables, se encuentra la **validación del *kerfbending* como una estrategia viable** desde el punto de vista estético y funcional, al permitir la **creación de mobiliario fácilmente montable** sin necesidad de herrajes adicionales. La técnica también aporta **ventajas logísticas**, al posibilitar la fabricación de **piezas planas que adquieren volumen y forma tras el montaje**, facilitando el transporte. Sin embargo, el proyecto presenta algunas **restricciones significativas**. En primer lugar, **no se realizan ensayos mecánicos normalizados** que cuantifiquen el comportamiento estructural del material tras el corte, lo cual **impide establecer parámetros objetivos** sobre la **resistencia o durabilidad** del mueble. Del mismo modo, aunque se analiza la geometría de los cortes y su relación con la flexibilidad, **la autora no aborda con profundidad el efecto combinado de otras variables** como la orientación de la veta (madera contrachapada) o la densidad del patrón.

**Figura 25.** Mesa por Gomes (2017)

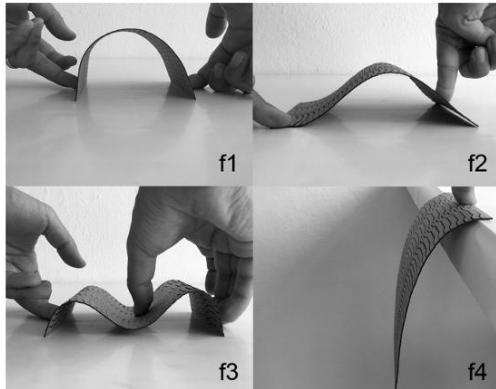


**Fuente:** (Gomes, 2017)

Siguiendo en la misma línea que el artículo previo, el estudio de **Silveira y Ribeiro (2023)** presenta una **investigación preliminar** centrada en el **cálculo de la flexión** de materiales planos mediante la técnica de *kerfing*, con el objetivo de **innovar en el diseño de mobiliario** a través de patrones paramétricos de corte aplicados sobre MDF. La investigación propone una **metodología basada en el uso del método *Rapport*** para generar patrones, introduce una **clasificación tipológica** según el tipo de corte, geometría del patrón y tipo de curvatura resultante, y desarrolla **simulaciones matemáticas** tanto para cortes de traspaso parcial como total. Como resultado, ofrecen una herramienta digital inicial que permite calcular variables como el número de *kerfs* (cortes) necesarios, ángulos de flexión y deformación esperada en función del patrón y del material. No obstante, **el estudio se mantiene en una fase teórica**: no se incluyen ensayos mecánicos normalizados, (como módulo de elasticidad o resistencia a la rotura) únicamente se comprueba la flexibilidad manualmente y no se evalúa el comportamiento estructural a escala real ya que su enfoque está muy centrado en el modelado geométrico y teórico.

Otra contribución relevante es el estudio de **Güzelci et al. (2017)**, que se centra en una **experimentación de tres fases** con el objetivo de explorar cómo diferentes patrones de corte aplicados a materiales planos y rígidos (como cartón o MDF) pueden generar superficies tridimensionales. A través de una **combinación de diseño analógico y digital**, **Güzelci** diseña **cuatro patrones geométricos**, los aplica mediante corte láser y analizan sus efectos en la deformación del material bajo diferentes condiciones donde **cambian variables** como **el tamaño de las unidades del patrón, la distancia y la dirección entre los elementos del patrón y el grosor** para explorar la rigidez cambiante del material, en total ensayan con 4 patrones con 3 variaciones cada uno. Los ensayos que realiza consisten en **aplicar fuerzas con las manos de 4 maneras diferentes** (*Figura 26*). Uno de los hallazgos más relevantes es que **la porosidad o cantidad de material extraído** no guarda relación directamente proporcional con la **flexibilidad**. En la comparación entre dos patrones (perforaciones circulares y meandros en espiral), se observó que, pese a presentar un mayor porcentaje de material extraído mostró una menor capacidad de flexión que el de meandros. Además, afirmó que el comportamiento a flexión y ángulo de curvatura varía según el **espesor** de la plancha.

Figura 26. Fuerzas aplicadas a los patrones por Guzelci et al. (2017)

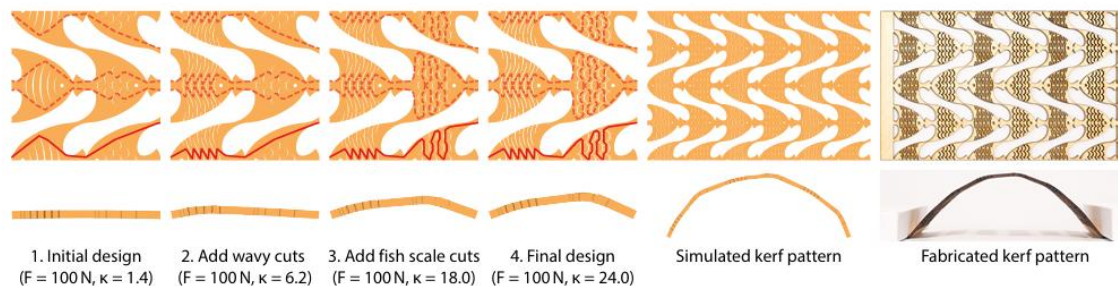


Fuente: (Güzelci et al., 2017)

Además, integran herramientas como *Grasshopper* para programar variaciones del patrón en función de la curvatura deseada. Uno de los **hallazgos clave** es que la **porosidad del patrón no se correlaciona directamente con su capacidad de curvatura**, y que las **relaciones topológicas entre unidades del patrón son fundamentales para generar comportamientos anisotrópicos**. En particular, observaron que los patrones **con interconexiones transversales** o tipo tejido permitían una **mayor curvatura tridimensional** sin romper el material, en **comparación con aquellos formados por celdas independientes o alineaciones simples**. Asimismo, concluye **que la orientación del patrón respecto al esfuerzo de flexión es un factor clave** en el comportamiento del material, ya que **genera anisotropías** que pueden aprovecharse para controlar la dirección y grado de la deformación. También descubren que **incluso variaciones sutiles en el espaciado entre celdas (dx, dy) o el grosor del material modifican sustancialmente la respuesta mecánica**. Otra conclusión importante es que el comportamiento físico observado en el **prototipado manual no siempre coincide** con las **predicciones digitales**, especialmente cuando se introducen fuerzas no simétricas o deformaciones plásticas no previstas. Por eso, los autores **defienden la importancia del ensayo físico** como retroalimentación del diseño digital, destacando un **enfoque de "aprendizaje mediante la fabricación"**. A pesar de su valor como modelo pedagógico y exploratorio, el estudio **no se realizan ensayos** cuantitativos ni pruebas mecánicas estandarizadas, las observaciones se basan en modelos a escala y materiales como cartón, que presentan un comportamiento muy distinto al de maderas industriales, por ello, las conclusiones se centran en aspectos formales más que estructurales, dejando margen para investigaciones complementarias que aborden el rendimiento mecánico del *kerfing* desde una perspectiva ingenieril.

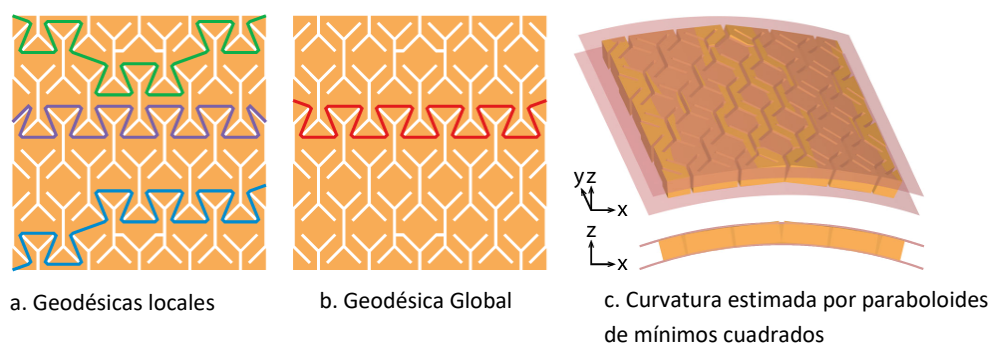
Asimismo, un caso representativo es la tesis doctoral de Yao (2021), ya que propone una **herramienta interactiva** para diseñar patrones de *kerfing* flexibles en tableros rígidos como el contrachapado o el MDF, con el **objetivo de facilitar la creación de formas curvas** sin necesidad de moldes ni conocimientos avanzados en mecánica estructural. El autor desarrolla un **método de simulación basado en elementos finitos** con condiciones de contorno periódicas (Figura 27), lo que permite evaluar en **tiempo real el comportamiento de patrones** unitarios repetidos bajo carga de flexión. A partir del **análisis de 75 patrones diferentes**, Yao identifica **tres principios geométricos clave** (Figura 28) que influyen en la flexibilidad del patrón: la **longitud de la geodésica**, que aquí es simplemente el camino más corto que va de un lado al otro del bloque de patrón, **su orientación**, es decir, si va más hacia arriba o más hacia los lados, y **el número de geodésicas locales o caminos distintos**, ósea si el patrón deja varias rutas cortas. Descubrió que, **cuanto más largo sea el camino, cuanto más verticalmente orientado esté y cuantas menos rutas alternativas haya, más se doblará el tablero**. De hecho, combinando estas tres medidas en una fórmula, puede predecir con gran precisión ( $R^2 \approx 0.9$ ) **cuánto flexiona cada diseño sin necesidad de fabricar prototipos físicos**.

Figura 27. Rediseño de patrón por Yao (2021)



Fuente: (Yao, 2021)

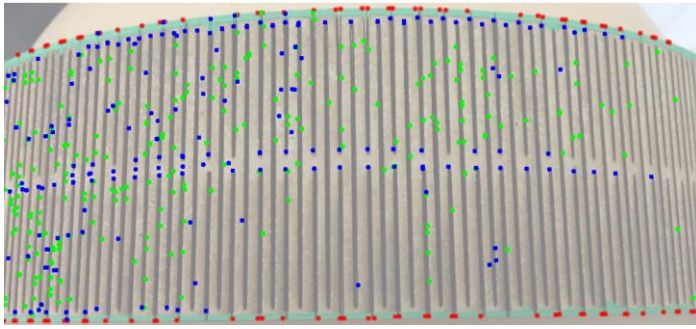
Figura 28. Tres principios geométricos clave de Yao (2021)



Fuente: (Yao, 2021)

No obstante, su enfoque presenta algunas limitaciones relevantes: en primer lugar, el estudio se restringe a patrones periódicos aplicados en superficies planas y no explora cómo estos se comportan a mayor escala o en superficies tridimensionales. Además, aunque las simulaciones permiten predecir la curvatura, **no se analizan parámetros mecánicos fundamentales** como la tensión máxima, el límite elástico o la resistencia a la fractura del material tras el corte, simplemente se analiza la capacidad de deformación de unos patrones con un carácter más inventivo.

Finalmente, el artículo presentado por **Wei y Singh (2017)** halla a través de la fabricación digital, un panel flexible basada en patrones de *kerfing*, los autores proponen una **metodología que combina herramientas físicas sencillas con algoritmos computacionales** para extraer con precisión curvas planas a escala real. El **objetivo** es proporcionar una **solución accesible, precisa y económica** frente a **métodos tradicionales** como el escaneo 3D o la fotogrametría, los cuales suelen ser costosos. El panel se fabrica mediante **corte láser sobre tableros rígidos** (como madera MDF o acrílico), creando un patrón que permite una flexión unidireccional. Luego, a partir de una **única fotografía** tomada con un teléfono móvil, **se segmenta digitalmente la imagen (Figura 29)** y se reconstruye una **curva 3D** utilizando métodos de visión por computadora, homografía e interpolación de curvas. Uno de los principales aportes del artículo es introducir parámetros que afectan directamente su rendimiento: **tamaño de celda, grosor del material, ancho del corte (*kerf*), distancia entre ranuras, entre otros**. Los autores construyen **cuatro versiones con diferentes configuraciones** para comparar su curvatura máxima, resistencia a la torsión y capacidad de elasticidad. El trabajo incluye también una **validación experimental superponiendo** curvas obtenidas con sobre curvas impresas con *kerfing*, demostrando una **precisión significativa**. Una **limitación** podría ser que las imágenes deben capturarse en **condiciones específicas** (desde el frente). Además, la detección de esquinas de las celdas no es del todo robusta frente a **variaciones de luz**, y los algoritmos actuales aún dependen de cierta intervención manual para **corregir errores o eliminar puntos atípicos**. También se asume que las celdas mantienen una forma rectangular durante la deformación, lo cual no siempre ocurre en la práctica debido al estiramiento y la torsión que sufre la estructura.

**Figura 29.** Detección de esquinas por Wei y Singh (2017)

Fuente: (Wei y Singh, 2017)

Tras el análisis del estudio bibliográfico, se demuestra que los **artículos y trabajos sobre el *kerfing*** están basados mayoritariamente en **diseño digital** y a pesar de que muchos incluyen **ensayos**, estos son **realizados con las propias manos, sin seguir ningún estándar**, además de que apenas hay investigadores que obtengan valores objetivos como la **tensión máxima, la tensión de rotura o el módulo de elasticidad**, además, **pocos** estudios han **evaluado la correlación y certeza de la geometría resultante** tras obtener un prototipo físico.

Además, gracias a las investigaciones previas, se llegan a conocer los **factores** que afectan directamente a la **flexibilidad, resistencia** y en resumen a las **características mecánicas** de un panel de MDF con *kerfing*. Entre los factores, destacan: las **propiedades del material en sí**, el **diseño de patrón** (algunos son más adecuados para según qué aplicaciones), la **distancia entre cortes**, así como la **anchura de corte**, la **escala del patrón** y la **densidad** de este sobre el panel.

## 2.1 Objetivo

A partir del análisis de los trabajos previos, el presente trabajo dirige su atención hacia el **intento de resolución de aspectos** que no han sido **suficientemente explorados**.

En este sentido, se tiene como **objetivo fundamental**, la **experimentación y análisis del comportamiento mecánico del MDF** sometido a la técnica de *kerfing*.

Además, este trabajo plantea los siguientes **objetivos específicos**:

- Comparar y evaluar con mayor precisión la **influencia del tipo de patrón** en las propiedades estructurales del material.
- **Evaluar y comparar la influencia del *kerfing* sobre la resistencia a la tracción y la flexión** del MDF.
- **Comparar cuantitativamente** el comportamiento mecánico de distintos patrones mediante resultados experimentales normalizados.
- **Determinar cuál de los tres patrones** seleccionados ofrece un **equilibrio óptimo** entre flexibilidad y resistencia estructural.
- Estudiar **mediante simulación digital cómo varía el comportamiento estructural** de los patrones al modificar el espesor del material.
- Establecer una **base técnica que permita aplicar estos resultados al diseño de productos**, especialmente en el ámbito del mobiliario.

Con estos propósitos, se plantea una metodología de diseño centrada en la experimentación con distintos patrones de corte y la evaluación de su comportamiento mecánico mediante una serie de ensayos y comprobaciones.



# **Metodología y Materiales.**



### 3. Metodología y materiales

A partir de los objetivos planteados y del análisis de trabajos previos recogidos en el marco teórico, este apartado detalla el **enfoque metodológico** para saber cómo abordar la temática. Se expone de manera estructurada la **metodología** empleada, incluyendo tanto el **material utilizado** y sus **propiedades mecánicas**, como el **equipamiento necesario** y **proceso** para llevar a cabo los ensayos.

De esta manera, se describen los **patrones seleccionados**, incluyendo sus dimensiones y relaciones geométricas intrínsecas. Entre los recursos técnicos se encuentran la **tecnología de fabricación sustractiva seleccionada** para la fabricación de probetas (*IberoLáser 1390*), los **equipos de ensayo mecánicos** (la máquina de tracción *Servosis ME 405/10* y un *sistema experimental de fabricación propia*), así como herramientas adicionales como un **microscopio digital**, **micrómetro** y **pie de rey**, todos ellos esenciales para el desarrollo y la caracterización de las probetas, que serán **evaluadas mecánicamente** conforme a la normativa adecuada.

Finalmente, se detalla el procedimiento seguido para la **simulación digital** de las muestras sometidas a las sollicitaciones de tracción y flexión, así como las principales **dificultades encontradas** durante el proceso y las **soluciones adoptadas** para resolverlas.

#### 3.1 Metodología

Para llevar a cabo este trabajo, se ha seguido una metodología estructurada en **7 fases** (*Figura 30*).

En primer lugar, se llevó a cabo una **revisión exhaustiva** de artículos, tesis y normas (1) para determinar tanto los **criterios de selección de patrones kerfing** como la **selección de ensayos** a realizar y sus **normativas asociadas** (2). Teniendo de base dicha revisión se escogieron **tres configuraciones geométricas representativas**, que fueron adaptadas por un lado a **dimensiones comunes entre sí**, y por otro, a **cada probeta estandarizada** para ser diseñadas en AutoCAD (3) y ser exportadas en formato apto para su fabricación con la cortadora láser (*.dxf*).

Antes de la fabricación, entra en juego la **caracterización del corte láser** (4), ajustando velocidad y potencia mediante pruebas para garantizar cortes precisos y reproducibles, todo el procedimiento realizado por la autoría se detalla en el **Anexo II – Caracterización del corte láser**.

Seguidamente, las probetas se **ensayaron mecánicamente a tracción y flexión** (5), en una máquina universal de tracción *Servosis ME 405/10* (probeta según ASTM D1037) y en un *montaje experimental de elaboración propia* donde se ensayará a flexión con extremos fijos (probeta según UNE EN 310), registrando **resistencia máxima a tracción y a flexión, módulo de elasticidad, deformación y desplazamiento vertical**, además, se realizó una prueba de curvatura.

Paralelamente, se desarrollaron **simulaciones** en *SolidWorks* (5) a partir de los modelos 3D de las probetas, se definieron **condiciones de contorno y malla refinada** en las zonas de kerfing con el fin de comparar los resultados obtenidos de los experimentos físicos con las simulaciones digitales, así como para **aumentar información** testeando con diferentes espesores normalizados de material, en concreto, con 3, 9, y 16 milímetros.

Finalmente, los datos experimentales y digitales se obtuvieron y se procesaron (6) en forma de **gráficas tensión-deformación y fuerza-tiempo** para comparar la relación flexibilidad-resistencia de cada probeta con y sin patrón de corte aplicado. A su vez, se comparó con los resultados obtenidos digitalmente. Con todo ello se evaluaron todas las cuestiones expuestas en “Objetivos” (7), como **qué patrón optimiza la flexibilidad** sin comprometer la integridad estructural.

Figura 30. Esquemática de la metodología seguida



Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Material empleado

Un total de **28 probetas** fueron empleadas para el estudio, en el que el material empleado es el **MDF** o *Medium Density Fiberboard*, también conocido como **tablero de fibra de densidad media**. Se trata de un **panel de madera industrializado**, fabricado a partir de fibras de madera aglutinadas mediante un adhesivo basado en resinas sintéticas (Popovska, Iliev y Spiroski, 2016). En el presente proyecto, el MDF se tratará como un **material isotrópico**, una simplificación habitual en aplicaciones prácticas (Ganev et al., 2005). A nivel macroscópico, puede considerarse un material **homogéneo**, ya que sus propiedades físicas y mecánicas se mantienen constantes a lo largo de todo el volumen del tablero (AITIM, s. f.). No obstante, presenta cierta **anisotropía en la dirección del espesor** como consecuencia del proceso de prensado. Aun así, en el plano del tablero, se comporta como un material **cuasi-isotrópico** (Yoshihara, 2011), lo que refuerza la validez de la suposición isotrópica adoptada en este estudio.

El espesor de los paneles de madera es de **3 milímetros**. Dicha dimensión se verificó en con la precisión del micrómetro (*Figura 31*). Es uno de los **espesores más utilizados** en entornos de prototipado y experimentación debido a su **buena respuesta** al corte láser (Luxigo, 2024; Chen et al, 2020) y, además, es el material **disponible en el taller universitario**. Los paneles que vienen de fábrica tienen un tamaño estándar de **2040×900 mm** permitiendo una adecuada planificación de corte de acuerdo con la normativa aplicada en este estudio.

**Figura 31.** Paneles medidos con micrómetro



**Fuente:** Elaboración propia

La *Tabla 1* muestra las **propiedades físicas y mecánicas** de los **tableros de MDF**, los valores de resistencia a flexión, módulo de elasticidad y resistencia a tensión perpendicular a la superficie han sido obtenidas según los valores especificados en la norma ANSI A208.2-2022 (*American National Standards Institute, 2022*).

Los valores de densidad, coeficiente de Poisson y límite elástico han sido obtenidos de los autores **Yang, Haq y Nagarajan (2020)**.

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas del MDF

Espesor nominal	Resistencia a flexión	Módulo de elasticidad (E)	Resistencia a tensión perpendicular a la superficie	Densidad	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Límite elástico
3 mm	21 MPa	2068 MPa	0,6 MPa	750 kg/m <sup>3</sup>	0,25	15 MPa

**Fuente:** Adaptada de ANSI A 208.2-2022

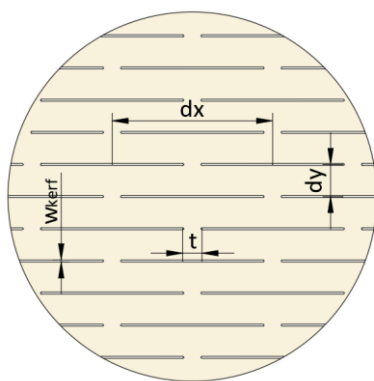
### 3.3 Selección de patrones

Para el presente estudio se han seleccionado **tres patrones de corte**. La elección de estos patrones se fundamenta en criterios funcionales, geométricos y teóricos recogidos en la literatura científica y se expondrán a continuación.

Con el objetivo de controlar las variables independientes del estudio, se ha optado por mantener **constantes las distancias entre cortes** (horizontales y verticales) en los tres patrones, tal como se muestra en la *Figura 32*. Con esta homogeneidad geométrica se garantiza que las **diferencias en el comportamiento mecánico** puedan atribuirse únicamente al **tipo de patrón**. Los valores geométricos utilizados, representados en la *Figura 32*, se han tomado del estudio de **Condoroțeanu et al. (2022)**. Además, según los mismos autores se recomienda que la separación entre cortes no sea menor que el ancho del material, es decir, menor de 3 mm, condición que se cumple.

Finalmente, los **parámetros geométricos de diseño resultantes** para garantizar la comparación equitativa se observan en la *Figura 32*.

**Figura 32.** Parámetros geométricos fijos



Distancia horizontal entre cortes (**dx**): 25 mm

Distancia vertical entre cortes (**dy**): 5 mm

Separación entre cortes (**t**): 3 mm

Ancho de corte o kerf (**w<sub>kerf</sub>**) = 0,31 mm

**Fuente:** Elaboración propia

Como se ha mencionado, la tipología de los tres patrones ha sido seleccionada a partir del análisis de fuentes especializadas en la técnica de *kerfing*. Según **Lorenzoni y da Silva (2021)**, existen **dos grandes familias** de cortes predominantes: los **patrones lineales** con incisiones paralelas (que permiten curvaturas unidireccionales), y los patrones **entrelazados** o en **espiral** (que habilitan curvaturas bidireccionales). Por otro lado, **Holterman (2018)** los clasifica de forma similar, distinguiendo entre patrones lineales y patrones meandro, en función del número de direcciones en las que permiten la deformación. Este proyecto se centrará en las **curvaturas unidireccionales**

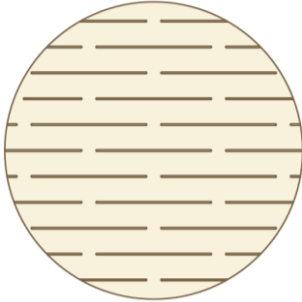
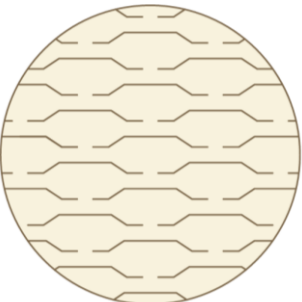
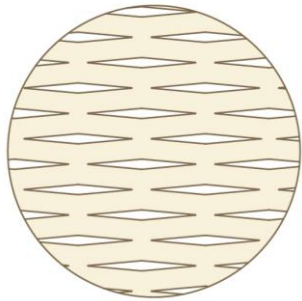
El primer patrón seleccionado, denominado **Patrón A – Lineal Recto**, presenta una geometría sencilla y ampliamente utilizada en la literatura. Su elección responde al interés de validar los resultados obtenidos en investigaciones previas, como las de **Capone et al. (2019)**, **Condoroțeanu et al. (2022)**, **Greenberg et al. (2014)** y **Gomes (2017)**, quienes concluyen que este patrón ofrece un buen equilibrio entre resistencia estructural y flexibilidad.

El segundo patrón escogido, denominado **Patrón B – Lineal Inclinado**, corresponde a una variante del denominado *Wave Lattice*, considerablemente documentado en la literatura bajo ese nombre. Este diseño ha sido referenciado por **Gomes (2017)**, donde a pesar de emplear madera contrachapada destacó su elevada capacidad de flexión, superior a los 90°, antes de presentar fractura, lo que lo convierte en una alternativa interesante para aplicaciones que requieren alta deformabilidad. Por tanto, la elección de este patrón se justifica por su recurrencia en estudios previos y por sus propiedades mecánicas favorables. No obstante, en el presente trabajo, aunque se ha mantenido la misma “unidad de patrón” descrita por **Gomes (2017)**, **Gatóo et al. (2020)** y **Guzelci et al. (2017)**, las restricciones impuestas sobre las distancias horizontales y verticales (homogéneas para todos los patrones del estudio) han dado lugar a una configuración geométrica diferente: una forma particular del patrón *Wave Lattice* que se considera de especial interés para su análisis experimental dentro del contexto de este estudio.

El tercer patrón elegido presenta una geometría **romboidal** por lo que se le ha denominado **Patrón C – Romboidal**, y su elección responde a la necesidad de incluir en el estudio un diseño con un mayor grado de **sustracción de material**. A diferencia de los dos patrones anteriores, este tipo de patrón elimina una proporción significativamente superior de material, lo cual influye directamente en sus propiedades mecánicas, de hecho, una de las afirmaciones más recurrentes en la literatura científica sobre *kerfing* es que, en general, **a mayor eliminación de material, mayor flexibilidad y menor resistencia estructural**. En este sentido, se ha considerado pertinente analizar un patrón representativo de este enfoque para contrastarlo con los patrones de corte anteriores, más conservadores. Entre las tipologías que priorizan la eliminación de material, se ha optado por el patrón romboidal ya que, según el estudio de **Gatóo et al. (2020)**, fue el que presentó **mayor capacidad de flexión** entre los analizados.

En la siguiente *Tabla 2* se observan los patrones junto con la descripción técnica, y la resistencia y flexibilidad esperada de cada patrón en función de la literatura. Además, se incluye el porcentaje de material eliminado.

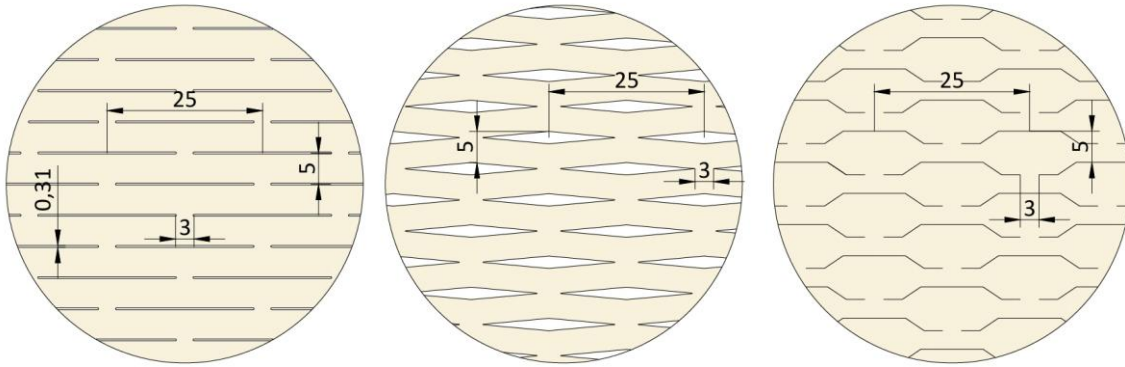
**Tabla 2.** Selección de patrones

Denominación	Descripción técnica	Flexibilidad esperada	Resistencia esperada
<p><b>Patrón A – “Lineal”</b></p>  <p>Mat. Eliminado (%) = 2,25</p>	<p>Este patrón consiste en una serie de <b>cortes paralelos y equidistantes</b>, perpendiculares al eje de curvatura. Se trata de la configuración más simple y ampliamente utilizada. Permite una <b>curvatura unidireccional</b>. La cantidad de material eliminado es de <b>2,25 %</b>, lo que le confiere una <b>alta resistencia mecánica</b>.</p>	Media - Alta	Alta
<p><b>Patrón B – “Lineal Inclinado”</b></p>  <p>Mat. Eliminado (%) = 2,36</p>	<p>El patrón derivado presenta una <b>morfología</b> compuesta por una red de cortes intercalados en función de una unidad base. Esta estructura permite una <b>flexión amplia</b>, y genera una <b>distribución progresiva de tensiones</b> que favorece una deformación continua. La cantidad de material sustraído es de un <b>2,36 %</b>. Su resistencia se sitúa en un nivel <b>intermedio</b>.</p>	Media - Alta	Media
<p><b>Patrón C – “Romboidal”</b></p>  <p>Mat. Eliminado (%) = 6,66</p>	<p>Este patrón se caracteriza por una serie de cortes en forma de <b>rombos</b>. La geometría de cada celda implica una <b>alta sustracción de material (6,66 %)</b>, lo que reduce significativamente la rigidez del tablero. No obstante, esta configuración es una de las que ofrece mayor libertad de deformación.</p>	Alta	Baja

**Fuente:** Elaboración propia

En la *Figura 33* se observan los **patrones extraídos de AutoCAD acotados** con los parámetros geométricos de diseño fijos descritos.

**Figura 33.** Dimensiones de los patrones

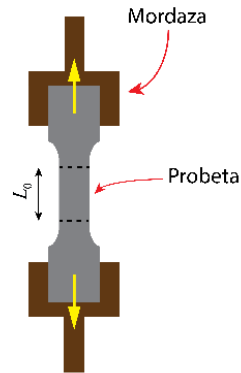


**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4 Selección de ensayos mecánicos y pruebas

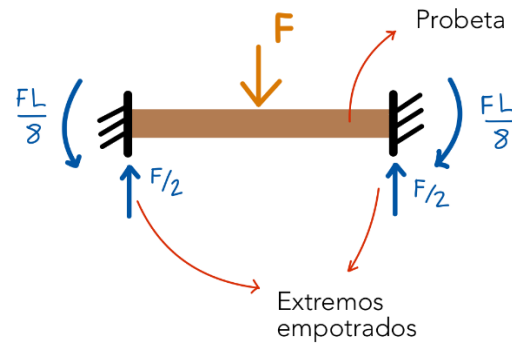
Con el objetivo de caracterizar el **comportamiento mecánico** del material en estudio, se ha optado por la realización de **dos ensayos principales**: un ensayo de flexión y un ensayo de tracción (Figuras 34 y 35), siendo ambas sollicitaciones comunes en cualquier tipo de aplicación.

Figura 34. Ensayo de tracción



Fuente: [lawebdeingeniosos.com](http://lawebdeingeniosos.com)

Figura 35. Ensayo de flexión con carga central



Fuente: Elaboración propia

Durante la revisión bibliográfica, se ha evidenciado una carencia significativa de estudios que sigan metodologías de **ensayo normalizadas** al analizar materiales modificados con *kerfing*. En la mayoría de los casos, los autores optan por métodos empíricos o procedimientos no estandarizados, lo que dificulta la comparación entre resultados y la validación científica de sus conclusiones. En este trabajo se introduce una **mejora metodológica sustancial** mediante el **uso de maquinaria estandarizada** y **procedimientos reproducibles** para el **ensayo de tracción**, lo que permite obtener **datos cuantitativos fiables y comparables**. Dicho ensayo se ha elegido, por tanto, por la posibilidad que brinda de obtener una serie de magnitudes y datos que permiten **caracterizar las propiedades mecánicas del material**, así como la posibilidad de comparar las diferentes versiones de las probetas según estas propiedades mecánicas.

Por otro lado, en cuanto al ensayo de **flexión**, se ha decidido aportar una diferencia, el ensayo se realizará con **extremos empotrados**. A pesar de que este estudio no se centra en una aplicación concreta, muchas configuraciones estructurales reales (como marcos, paneles fijados, o uniones embutidas) presentan restricciones similares al empotramiento. Por tanto, este tipo de ensayo puede ofrecer resultados **más representativos del comportamiento en situaciones reales de anclaje rígido**, a diferencia de la flexión simple con apoyo.

Además, desde el punto de vista práctico, los ensayos de tracción y flexión son **fácilmente reproducibles en laboratorio**. Los medios disponibles condicionan la posibilidad de ampliar el número de ensayos cuyo número, ha sido fijado por normativa y bibliografía.

Por otro lado, para conocer el **grado de curvatura de los tres patrones**, se opta por realizar una prueba en la que los patrones se flexionan manualmente hasta su máxima capacidad, sin alcanzar la rotura para cuantificar el **ángulo de curvatura global máximo**, que se medirá con un transportador de ángulo. Toda la infografía realizada se recogerá en *el epígrafe 2 del Anexo III – Control Microscópico*.

### 3.5 Ensayo de tracción paralela a la superficie según ASTM D1037 12

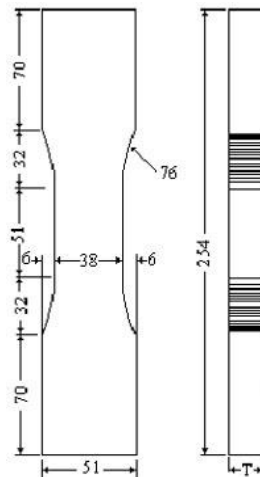
Este ensayo se ha llevado a cabo con el objetivo de determinar la **resistencia a tracción en el plano del material** con patrones de *kerfing*, este ensayo se ha realizado conforme a la norma americana **ASTM D1037 - 12 (2020)** "American Society for Testing and Materials" (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales). Esta norma incluye **métodos de ensayo mecánicos y físicos** aplicables a tableros de fibras y partículas. Se ha empleado esta norma dado que no existe un método normalizado equivalente en la normativa europea (EN) que contemple la determinación de la resistencia a tracción en el plano del panel. La presente metodología estandarizada permite cuantificar tanto la **tensión máxima** como el **módulo de elasticidad**, lo cual resulta fundamental para evaluar el comportamiento mecánico del material en condiciones de **solicitud axial paralela a su superficie**.

Para el correcto **tratamiento estadístico** de los resultados obtenidos, se ha seguido la norma recomendada de la misma asociación: **ASTM D2915 – 17**. Todo ello se recoge en el *Anexo IV – Ensayo de tracción*.

#### 3.5.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS

Se prepararon las probetas a partir del panel con la geometría especificada en la Fig. 6 de la norma, conformando una sección reducida en la zona central (véase *Figura 36*). Como resultado, se definió una probeta con un **ancho de 51 mm**, una **longitud total de 254 mm** y un **espesor de 3 mm**. Se recomienda el empleo de cualquier método que asegure un acabado regular, preciso, con cortes perpendiculares a la probeta.

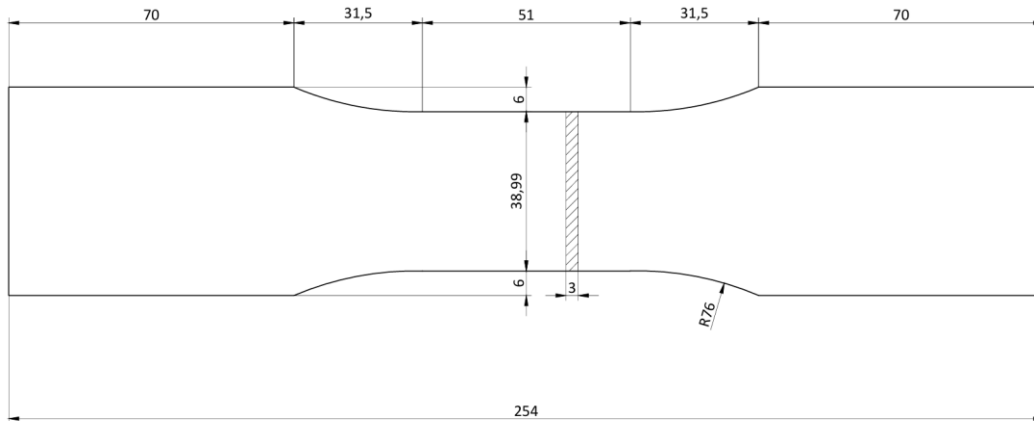
**Figura 36.** Dimensiones estandarizadas probeta ensayo tracción



Fuente: Adaptada de ASTM D1037

A partir de estas dimensiones, se trasladó el diseño a *AutoCAD*, obteniéndose la geometría base mostrada en la *Figura 37*.

**Figura 37.** Probeta base ensayo tracción



**Fuente:** Elaboración propia

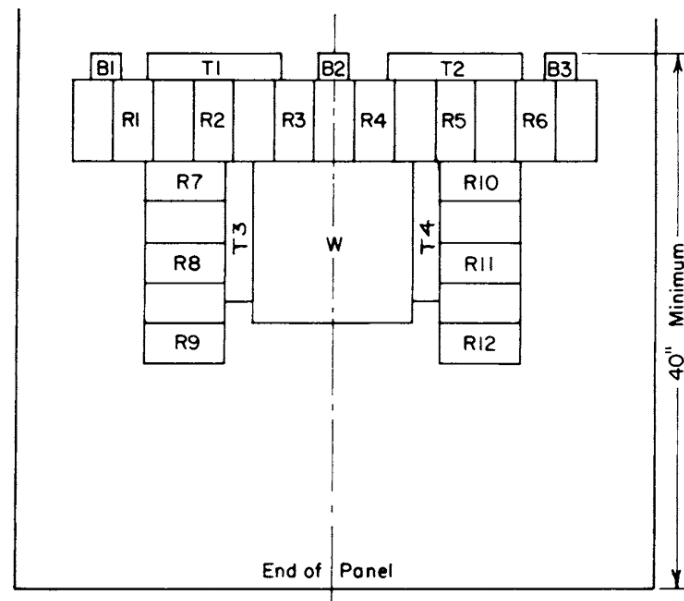
El **ancho mínimo** de la sección se midió con un pie de rey con una precisión de  $\pm 0,02$  mm, cumpliendo así con la exigencia de una exactitud no menor al **0,3 % del ancho** especificado. En cuanto al espesor se midió con un **micrómetro de precisión de 0,025 mm**, tal como exige la norma ASTM D1037 - 12.

Las probetas se ensayaron en condición **seca y estabilizada** (no estaban húmedas ni recién fabricadas), tras un periodo de acondicionamiento a  $20 \pm 3$  °C y  $65 \pm 5$  % de **humedad relativa (HR)**, condiciones que no han sido medidas pero que se reproducen en un entorno típico interior como el de una vivienda a las 24 horas.

### 3.5.2 TAMAÑO DE LA MUESTRA

Para determinar el tamaño de la muestra, en la norma ASTM D1037, se especifica el procedimiento. Se parte de un tablero de prueba de  $1 \times 1,2$  metros siempre cuando sea posible, en este caso se parte de un panel de  $1,02 \times 0,90$  metros como se ha mencionado anteriormente. A partir del panel se plantea el despiece (*Figura 38*).

Figura 38. Despiece de probetas según norma ASTM D1037



Modulus of rupture (R)—twelve 3 by 6 in. (76 by 152 mm)  
 Tension parallel to surface (T)—four 2 by 10 in. (51 by 254 mm)  
 Tension perpendicular to surface (B)—three 2 by 2 in. (51 by 51 mm)  
 Water absorption and swelling (W)—one 12 by 12 in. (304 by 304 mm)

Fuente: ASTM D1037

De la *Figura 38* se extrae que para un ensayo de tensión paralela a la superficie es necesario ensayar **cuatro probetas**.

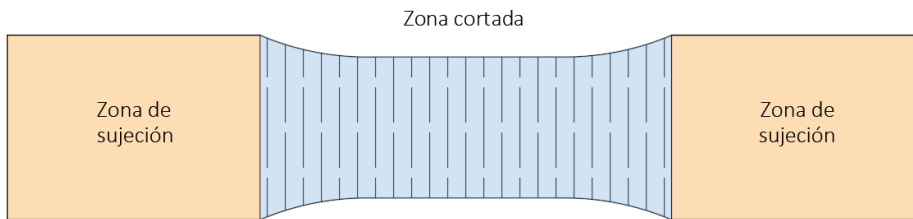
### 3.5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL CON KERFING

Dado que también se van a analizar las probetas con *kerfing* aplicado, fue necesario definir en qué zona de la probeta se colocaría el patrón.

Cada patrón de corte se aplicó en la **parte central de la probeta hasta el final de los cuellos** (*Figura 39*) con el objetivo de analizar cómo influye esta técnica en el **comportamiento mecánico** del material **bajo tracción**. Al aplicarse sobre la zona útil del ensayo, el kerfing modifica intencionadamente la distribución de esfuerzos y la forma en que el material se deforma y fractura, lo cual es pertinente cuando se busca estudiar comparativamente su efecto frente a probetas sin modificar. Esta posición permite observar cómo los cortes afectan al **módulo elástico**, la **deformación** y la **resistencia última**, manteniendo al mismo tiempo zonas intactas en los extremos para asegurar una correcta sujeción durante el ensayo.

Aunque altera los procedimientos estándares del ensayo de tracción, esta disposición es válida en un **contexto experimental** orientado al análisis de estrategias como el *kerfing*.

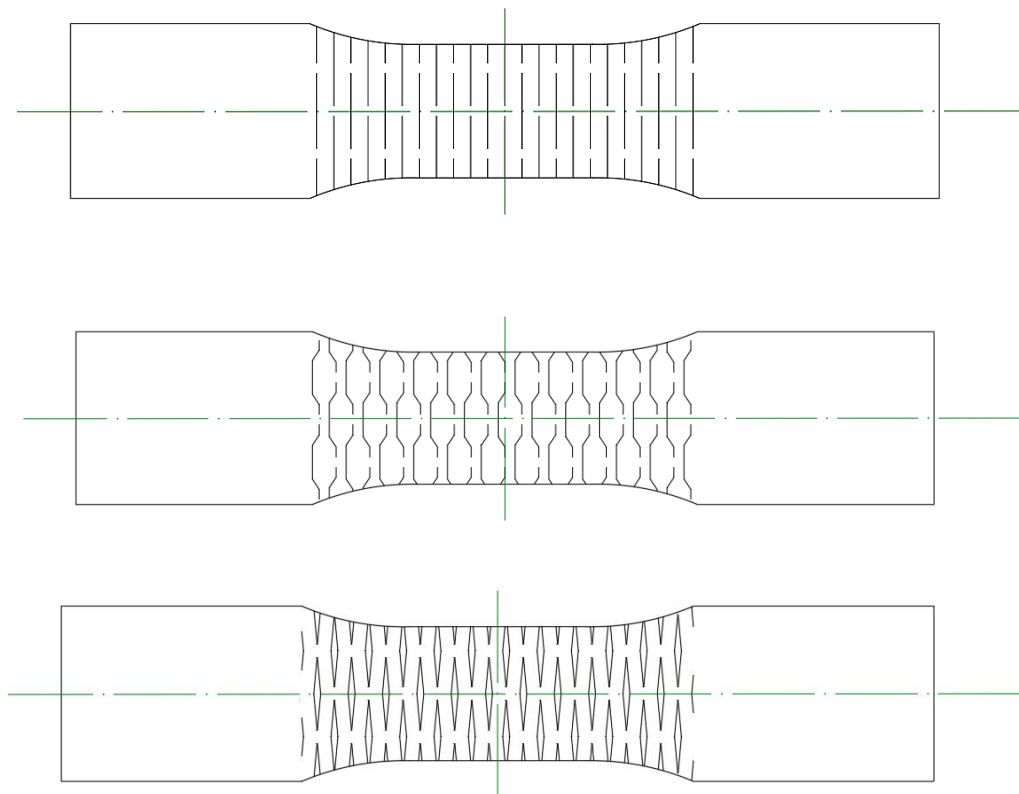
**Figura 39.** Zona de aplicación del patrón



**Fuente:** Elaboración propia

Cada patrón se orientó en dirección **longitudinal al eje de la probeta**, ya que los cortes transversales permiten que el material se **doble en la dirección perpendicular a los mismos**. Dicha orientación se observa en la *Figura 40*.

**Figura 40.** Probetas del ensayo de tracción con patrones aplicado



**Fuente:** Elaboración propia

Además, cada tipo de probeta con patrón de *kerfing* se ensayó **tres veces**, siguiendo el enfoque de **Guzelci et al. (2017)** y **Gatío et al. (2022)**, quienes aplican este número de repeticiones en estudios similares. En la *Figura 41* se incluye un esquema que resume el tamaño de la muestra.

Figura 41. Esquema tamaño de la muestra



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.4 EQUIPO DE ENSAYO (SERVOSIS ME 405/10)

El ensayo de tracción se realizó en una máquina universal de ensayos **Servosis ME 405/10** (Figura 42), un equipo de tracción electromecánico de alta precisión con capacidad nominal de hasta 500 kN y velocidad ajustable hasta 1000 mm/min. En este caso, se utilizó una célula de carga nominal de 500 kg y mordazas **manuales autoalineantes y autotensantes**, tras descartarse las hidráulicas por su peso excesivo para el tipo de material ensayado.

Asimismo, se colocó **papel de lija entre las mordazas y las probetas** como medida correctiva frente a los deslizamientos observados en ensayos preliminares de prueba, garantizando así una sujeción uniforme y segura durante la aplicación de la carga. Las **superficies de agarre** eran de un área mínima de **50×50 mm, que garantizan una transmisión homogénea del esfuerzo**, tal y como exige la norma ASTM D1037 - 12. La carga se aplicó **axialmente**, sin inducir flexión ni desviaciones.

La máquina permite **registrar datos en tiempo real** mediante el software de control **PCD2K** que permitió recoger la **fuerza** y la **deformación** en tiempo real, tomando 10 lecturas por segundo. Los datos se exportaron a una hoja *Excel* para su análisis posterior en gráficas **Fuerza–Desplazamiento** y **Tensión–Deformación**, expuestas en el *Anexo IV – Ensayo de tracción*, de elaboración propia.

La máquina de ensayo utilizada posee su correspondiente **Declaración de Conformidad según la Directiva 2006/42/CE** (directiva de máquinas), la cual se adjunta en el *Anexo I – Documentación de la maquinaria*.

Figura 42. Máquina de tracción Servosis ME 405/10



Fuente: Servosis (s.f.)

### 3.5.5 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE TRACCIÓN SEGÚN ASTM D1037-12

La carga se aplicó axialmente, sin inducir flexión, a una **velocidad constante de 4 mm/min**, con una tolerancia del  $\pm 50\%$ , tal como se indica. Como se requirió obtener el módulo de elasticidad, **se instaló un extensómetro axial** (Figura 43) con puntos de medición ubicados en la sección reducida, separados 50 mm y que registró la deformación [1] con una resolución mínima de 0,0025 milímetros.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} = \frac{\text{Lectura extensómetro}}{\text{Distancia extensómetro}} \quad [1]$$

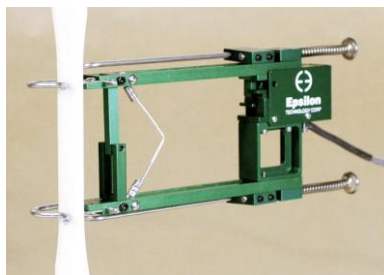
Donde,

$\varepsilon$ , deformación unitaria (mm/mm)

$\delta$ , Deformación total (mm)

$l_0$ , longitud inicial

Figura 43. Extensómetro axial 3542 series (épsilon)



Fuente: [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)

Una **regresión lineal de la curva de carga-deflexión entre el 10 % y el 40 % de fuerza máxima** generalmente produce resultados satisfactorios para hallar la pendiente de la curva y, por tanto, hallar el módulo de elasticidad.

Los **cálculos** se realizaron según las expresiones normativas, determinando la **tensión máxima** ( $\sigma_{t-m\acute{a}x}$ ) mediante la relación entre la carga máxima y el área de la sección reducida [2]; y el **módulo de elasticidad (E)** a partir de la pendiente de la curva carga-deformación en su tramo lineal o con la fórmula [3].

**Tensión máxima ( $\sigma_{t-m\acute{a}x}$ , en N/mm<sup>2</sup>)**

$$\sigma_{t-m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{b \cdot e} \quad [2]$$

Donde,

$\sigma_{sup}$ , tensión máxima

$b$ , ancho de la probeta

$e$ , espesor de la probeta

**Módulo de elasticidad ( $E_t$ , en N/mm<sup>2</sup>)**

$$E_t = \frac{l_g}{b \cdot e} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad [3]$$

Donde,

$l_g$ , longitud de medida entre puntos del extensómetro (50 mm)

$b$ , ancho de la probeta

$e$ , espesor de la probeta

$\Delta F/\Delta y$ , pendiente de la curva carga-deformación en la zona elástica

En las **probetas ensayadas que presentan patrones de corte (kerfing)**, la sección transversal no permanece constante a lo largo de la longitud de la probeta, sino que varía según la geometría del patrón aplicado. Esta variación en la sección resistente introduce la necesidad de definir un valor representativo del área transversal para el cálculo de la tensión de tracción.

Para caracterizar correctamente la resistencia de estas probetas, se ha considerado el concepto de **área neta efectiva**, definida como la sección transversal mínima que queda entre los puntos de enlace del patrón. El uso del área neta permite

calcular la **tensión máxima** en la zona crítica de la probeta, donde previsiblemente se concentra la fractura debida a la concentración de esfuerzos por el estrechamiento de la sección. Este enfoque proporciona una medida representativa de la capacidad real del material en los puntos más solicitados.

Se desestimaron aquellos ensayos cuya rotura se produjera **a menos de 12 mm de la zona de sujeción de las mordazas, considerándose inválido** por exigencia de la normativa americana.

### 3.5.6 REGISTRO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de cada ensayo, se documentó visualmente la **zona de rotura** mediante fotografías, incluyendo observaciones sobre el **tipo de rotura** y su localización exacta. Los resultados promedio obtenidos de las probetas del panel fueron **redondeados al múltiplo más cercano de 0,5 MPa**, conforme a la norma ASTM D1037. Además, se incluye el cálculo de la media [5], la desviación estándar [6], el intervalo de confianza del 95 % de la media [7] y el coeficiente de variación [8] según la directriz **ASTM D2915 – 17**, así como la presentación de los resultados individuales y resumidos.

<b>Media</b>	$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i$	[4]
--------------	--	-----

*Donde,*

*n, tamaño de la muestra*

*x, valor numérico*

<b>Desviación estándar</b>	$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n}}$	[5]
----------------------------	--	-----

<b>Intervalo de confianza</b>	$IC = \bar{X} \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$	[6]
-------------------------------	---	-----

<b>Coeficiente de variación</b>	$CV = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100$	[7]
---------------------------------	------------------------------------	-----

### 3.6 Ensayo de flexión con extremos empotrados según normas UNE

El **ensayo de flexión con extremos fijos** se ha llevado a cabo con el propósito de determinar el comportamiento estructural de los tableros modificados y no modificados mediante *kerfing*, bajo condiciones de sollicitación combinada de flexión y cortante. Si bien la norma UNE-EN 310:1994 establece el método estándar para evaluar el **módulo de elasticidad en flexión** y la **resistencia a la flexión** de tableros derivados de la madera **apoyados en dos puntos**, en este trabajo se introduce esta **variación experimental justificada**, sustituyendo dichos apoyos por **condiciones de extremos empotrados o fijos**, con el fin de aproximar mejor a las **condiciones reales de uso**, como en mobiliario, baldas, estantes, etc.

#### 3.6.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS

Según lo que establece la norma **UNE EN 310:1994**, la longitud de la probeta para el ensayo de flexión debe calcularse con la fórmula [8]:

$$L = 20 \cdot e + 50 \quad [8]$$

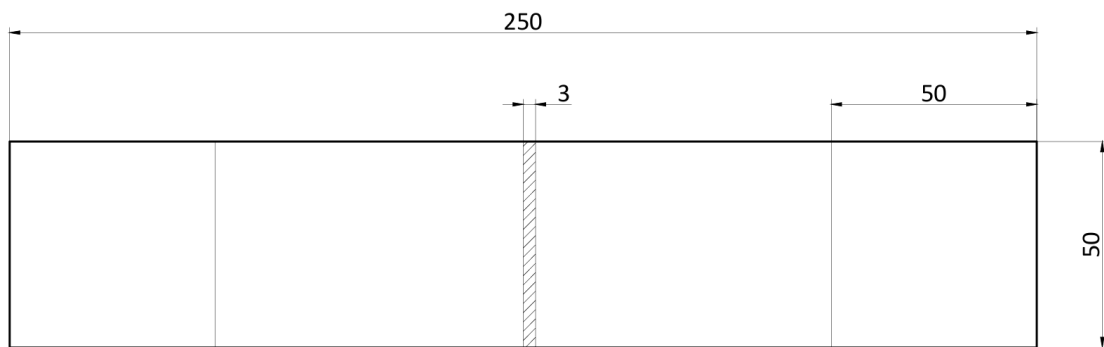
Donde,

*e*, espesor del material

Dado que el tablero tiene un **espesor de 3 mm**, la longitud resultante sería 110 milímetros. Sin embargo, la norma también establece una longitud **mínima de 150 mm**, por lo que se adoptó ese valor como longitud. De este modo, se definió la probeta rectangular con unas dimensiones de **150×50×3 mm** (largo × ancho × espesor).

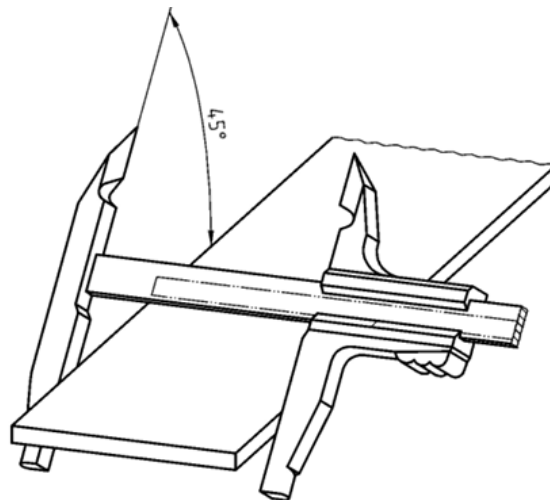
Además, como **adaptación específica del presente estudio**, se añadieron **50 mm adicionales en cada extremo** de la probeta. Estas zonas se añadieron porque permiten una **sujeción firme mediante gatos manuales**, sin comprometer las dimensiones útiles requeridas por el estándar. Así, se garantiza tanto la **representatividad del montaje como la validez dimensional** de la probeta conforme a la normativa.

A partir de estas dimensiones, se realizó el **diseño en AutoCAD**, obteniéndose la geometría base mostrada en la *Figura 44*.

**Figura 44.** Medidas probeta flexión

Fuente: Elaboración propia

La **medición de las probetas se debe realizar de manera precisa** en los puntos definidos por la norma, con un pie de rey ( $\pm 0,02$  mm) de acuerdo con la norma UNE EN 325 (*Figura 45*). En cuanto a la **aplicación de la carga en el eje central**, se sitúa de forma perpendicular a la cara de la probeta, utilizando una célula de carga calibrada con una precisión del 1 % para recoger datos.

**Figura 45.** Método para medir con el pie de rey

Fuente: UNE EN 325

### 3.6.2 TAMAÑO DE LA MUESTRA

En cuanto al tamaño de la muestra, la norma **UNE-EN 362-1**, ofrece criterios concretos debido a la **variabilidad del material en el mismo tablero**. Por ello, se observa en la *Figura 46* los ejemplos del número mínimo de probetas ( $m$ ) requerido según el tipo de ensayo.

**Figura 46.** Número mínimo de probetas de cortadas de cada tablero

Propiedades del tablero	Norma EN	m
Contenido de humedad	EN 322	4
Estabilidad dimensional	EN 318	
Densidad	EN 323	6
Resistencia a la flexión y Módulo de elasticidad en flexión	EN 310	
Resistencia a la tracción perpendicular a las caras	EN 319	8
Hinchazón del grosor después de su inmersión en agua	EN 317	
Resistencia al arranque de la superficie	EN 311	
Calidad del encolado de los tableros contrachapados	EN 314-2	10

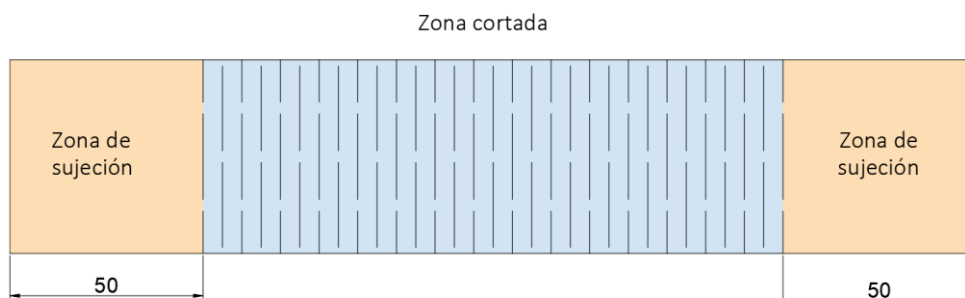
**Fuente:** UNE EN 326-1

De la figura anterior se extrae que, para el ensayo de flexión, se establece un mínimo de **6 probetas por tablero**.

### 3.6.3 DISEÑO EXPERIMENTAL CON KERFING

Al igual que en el ensayo de tracción fue necesario decidir en qué área se colocarían los patrones *kerfing*, finalmente, se optó por aplicar cada diseño sobre **la totalidad de la probeta base** (Figura 47), es decir, sobre el rectángulo central de **150×50 mm**, manteniendo intactas las zonas añadidas para sujeción.

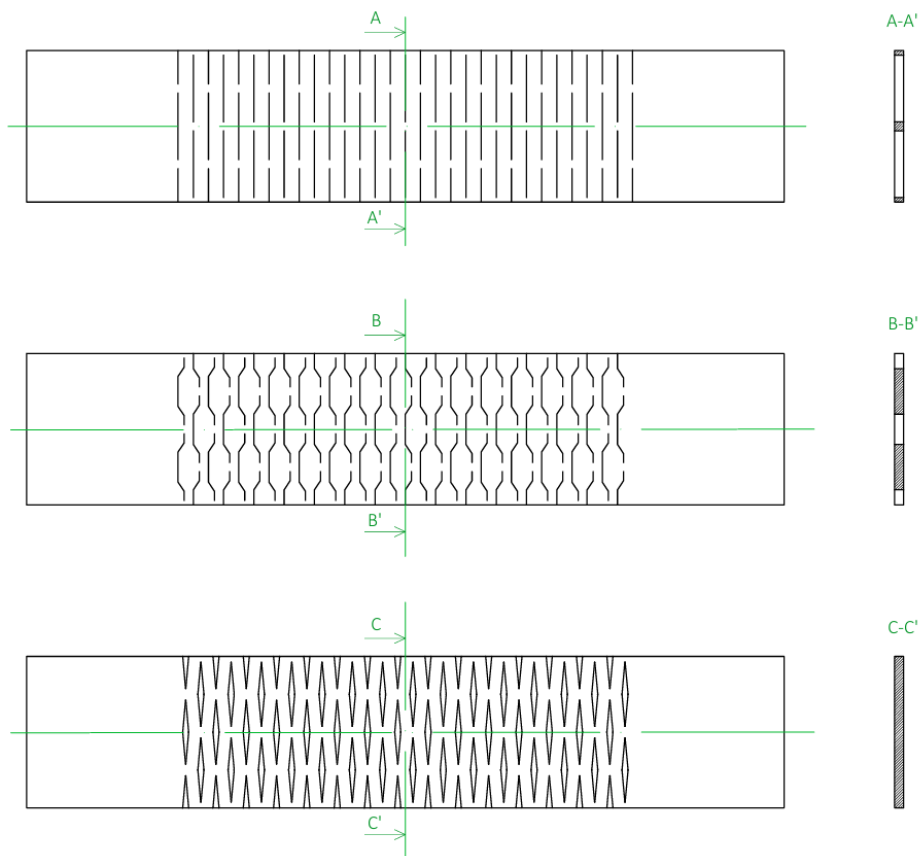
**Figura 47.** Zona de aplicación del patrón



**Fuente:** Elaboración propia

En cuanto a la orientación de los cortes, se decidieron aplicar los patrones de *kerfing* **perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta** (Figura 48), es decir, en la misma dirección en la que se pretende inducir la curvatura. Esta decisión responde al principio funcional del *kerfing*. Por otro lado, se ha añadido a la figura 48 la sección transversal central de cada probeta, dicha porción, es la que estará sometida al mayor momento flector en todos los casos y la que se empleará para los cálculos.

**Figura 48.** Probetas del ensayo de tracción con patrones aplicado y sección central



Fuente: Elaboración propia

Cada tipología de patrón fue ensayada un total de **tres veces**, siguiendo la misma línea de la metodología de trabajos previos como los de **Guzelci et al. (2017)** y **Gatío et al. (2022)**. En la *Figura 49* se incluye un esquema ilustrativo que resume el tamaño de muestra utilizado y su distribución por grupos, según el patrón.

**Figura 49.** Tamaño de la muestra ensayo de flexión

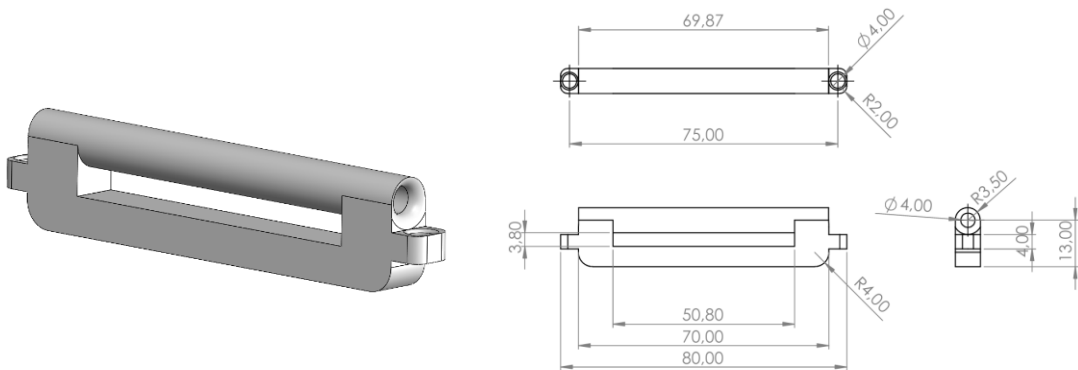


Fuente: Elaboración propia

### 3.6.4 EQUIPO DE ENSAYO (EXPERIMENTAL)

El ensayo se realizó con un montaje experimental que consistió en **fixar las probetas por sus extremos** mediante gatos de sujeción a una mesa abatible, usando tacos de madera de 2 cm para asegurar una transmisión de fuerza uniforme. **La carga se aplicó en el punto medio** mediante un **sistema de elaboración propia** (Figura 50) diseñado específicamente para este ensayo: un anclaje impreso en 3D con filamento de PLA blanco (Ultimaker S5, Figura 51), que **asegura una distribución simétrica y homogénea de la carga sin dañar el MDF**. El mismo dispositivo incluye un paso de 50,80×3,80 mm para la probeta y un tubo de 4 mm de diámetro para el paso del cable (Figura 52). El montaje definitivo se puede apreciar en la Figura 54.

Figura 50. Dispositivo de anclaje



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Impresora Ultimaker S5



Fuente: Universidad de Málaga (s.f.)

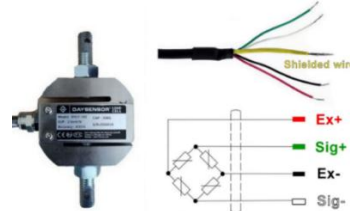
Figura 52. Ensamblaje patrón y dispositivo de anclaje



Fuente: Elaboración propia

La **fuerza aplicada** fue transmitida mediante un **cable unido a la célula de carga DYLY-102** (Figura 53), calibrada con precisión del 1 % y conectada a un sistema de adquisición de datos. Este sistema permitía convertir la carga aplicada en una señal eléctrica medible, que posteriormente iba a ser exportada para su manipulación en *Excel*.

**Figura 53.** Célula de carga DAYSENSOR

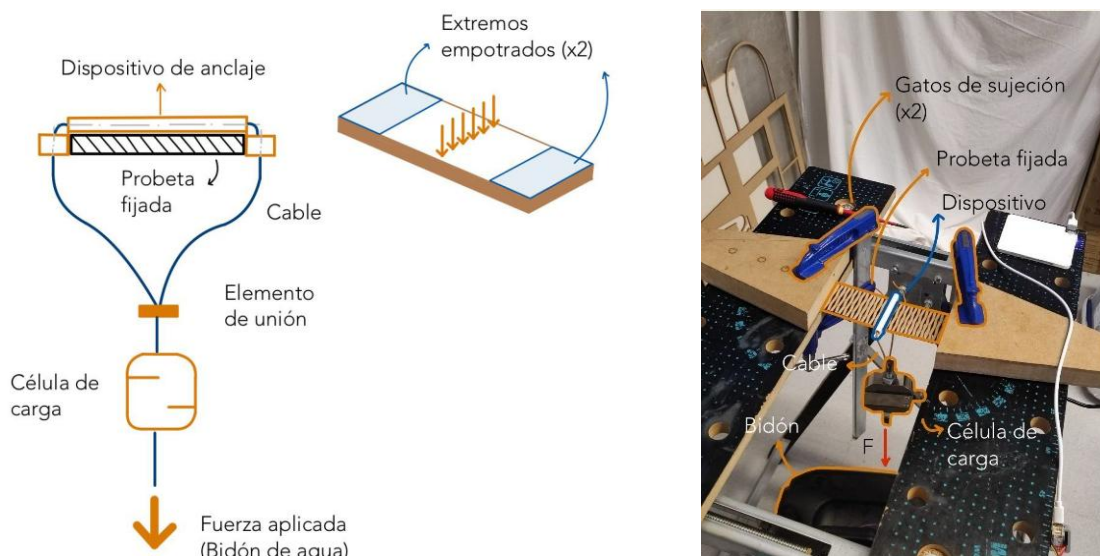


Fuente: Elaboración propia

El **desplazamiento en el centro de la probeta** (deflexión) fue registrado mediante un vídeo grabado con teléfono móvil fijado en un trípode, analizado posteriormente con **software de análisis cuadro a cuadro denominado Traker**. A través de la calibración de la escala en **mm/píxel** mediante una regla física incorporada en la imagen se pudo registrar la **flecha máxima antes de la rotura**.

Para la aplicación controlada de la carga, se utilizó **agua como medio**, lo que permitió que la fuerza aplicada aumentara gradualmente, evitando impactos bruscos sobre la probeta, que igualmente sucedieron. El sistema consistió en un embudo, un tubo y dos bidones de 50 litros, a través de los cuales el agua fue transferida desde el bidón 1 al bidón 2 (unido a la célula de carga y en consecuencia a la probeta), asegurando así, la carga progresiva (Figura 54).

**Figura 54.** Esquema del montaje para el ensayo de flexión y fotografía real



Fuente: Elaboración propia

### 3.6.5 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE FLEXIÓN CON EXTREMOS FIJOS SEGÚN EL SEGUIMIENTO PARCIAL DE LA NORMA UNE EN 310:1994

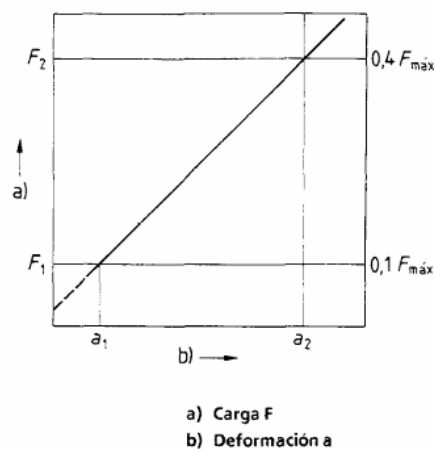
Aunque se introduce la variación del tipo de apoyo (de biapoyado a extremos empotrados), se han respetado y adaptado **múltiples aspectos del procedimiento descrito en la norma**, tales como la **preparación de probetas** con dimensiones proporcionales al espesor del tablero, coincidiendo con los valores que también establece la norma americana ASTM D1037-12.

La **velocidad de ensayo** es ajustada para alcanzar la carga máxima en un intervalo de  $60 \pm 30$  segundos (desde los 30 y 90 segundos desde el inicio del ensayo), asegurando una deformación progresiva. Se registró la **deformación vertical en el centro de la probeta**, directamente bajo la cabeza de carga, con una resolución de  $\pm 0,1$  mm como mínimo.

### 3.6.6 REGISTRO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la obtención de resultados, se registró la carga máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) para hallar la resistencia a flexión se calcula con la relación entre el momento flector correspondiente a esa carga y a los extremos empotrados y el módulo resistente de la sección transversal de la probeta [9]. Para el módulo de elasticidad se considera su obtención o bien gráficamente por medio de la pendiente del tramo **lineal de la curva tensión-deformación**, entre el **10 % y el 40 % de  $F_{\text{máx}}$**  (Figura 55) [10] o bien la fórmula [11]. Debido al carácter experimental, extraer el módulo de Young gráficamente resulta complejo, por tanto, se emplea la fórmula [11].

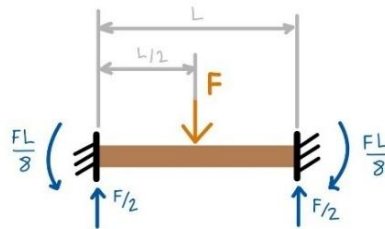
Figura 55. Curva carga-deformación en la zona de deformación elástica



Fuente: UNE-EN 310:1994

Dado que en el presente ensayo se han utilizado condiciones de apoyo con extremos empotrados (**Figura 56**), se ha adaptado la formulación de cálculo de la tensión y del módulo de elasticidad respecto a la establecida en la norma UNE-EN 310, con el fin de reflejar correctamente el comportamiento estructural específico de la configuración empleada. Se emplearán los datos geométricos asociados a la **sección central** de cada probeta.

**Figura 56.** Situación de carga



**Fuente:** Elaboración propia

**Resistencia a flexión ( $\sigma_{f-max}$ , en  $N/mm^2$  o MPa):**

$$\sigma_{f-max} = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M \cdot e}{2 \cdot I} = \frac{M \cdot e}{2 \cdot \frac{b \cdot e^3}{12}} = \frac{6 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot l_1}{8 \cdot b \cdot e^2} = \frac{3 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot l_1}{4 \cdot b \cdot e^2} \quad [9]$$

Donde,

$I$ , es el momento de inercia de una sección rectangular, en  $mm^4$

$c$ , es la distancia desde el eje neutro a la fibra externa, en  $mm$

$F_{m\acute{a}x}$ , es la carga máxima, en  $N$

$l_1$ , distancia entre los ejes de los apoyos en milímetros

$b$ , anchura de la probeta, en milímetros

$e$ , espesor de la probeta, en milímetros

**Módulo de elasticidad ( $E_f$ , en  $N/mm^2$  o MPa)**

$$E_f = \frac{l_1^3 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot b \cdot e^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad [10]$$

Donde,

$l_1, b, t$  se expresan en milímetros

$a_1 - a_2$ , incremento de la deformación en la mitad de la longitud de la probeta

$F_2 - F_1$ , es el incremento de la carga en el tramo lineal de la curva de carga-deformación, en Newtons. El valor de  $F_1$  deberá ser aproximadamente el correspondiente a un 10 % del valor de la carga máxima y el de  $F_2$  el correspondiente a un 40 %.

$$E_f = \frac{F \cdot L^3}{192 \cdot I^3 \cdot \delta_{m\acute{a}x}} \quad [11]$$

Donde,

$L$ , distancia entre vanos en mm

$I$ , momento de inercia de la sección transversal en  $mm^4$

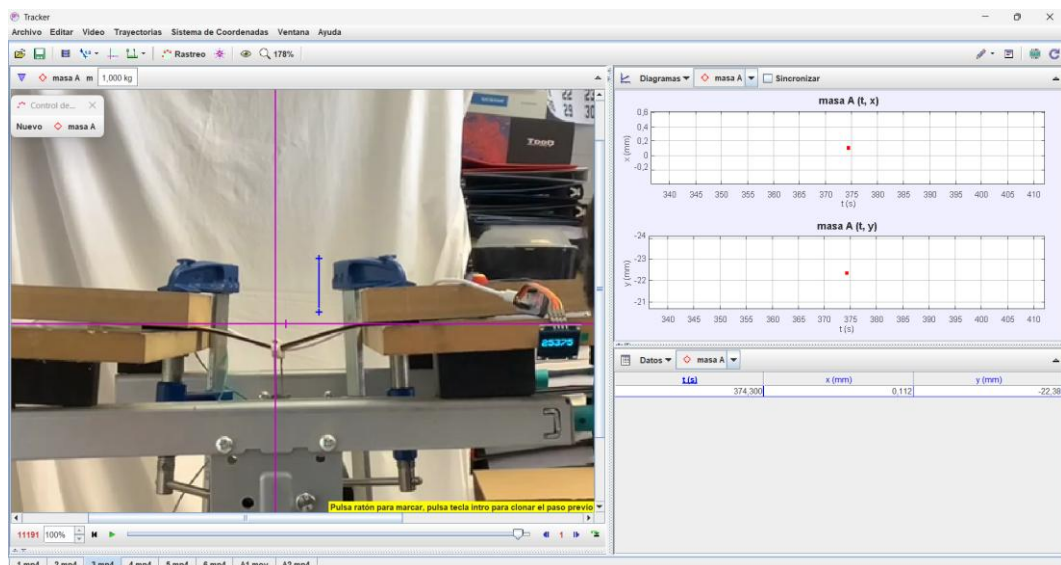
$F$ , carga central en N

$\delta_{m\acute{a}x}$ , la deflexión máxima en la sección central en mm

El desplazamiento vertical se medirá en el **centro de la probeta** (debajo de la cabeza de carga) con una precisión de 0,1 mm y se registrarán en un diagrama los valores correspondientes de la deformación y de la carga aplicada, esta última con una precisión de un 1 % del valor medido.

La **medición de la deflexión o desplazamiento vertical máximo en el centro de la probeta** se realizó a partir de **vídeos grabados con un teléfono móvil** fijado en trípode, en una disposición perpendicular al perfil del tablero. Posteriormente, los vídeos fueron analizados mediante el **software de análisis de movimiento en vídeos “Traker” (Figura 57)**, lo que permitió estimar el desplazamiento vertical del punto medio. Para garantizar la fiabilidad de la medición, se incorporó una **regla de escala física** en el plano de la deformación, lo que permitió realizar una calibración en unidades reales (mm/píxel). Esta solución, si bien alternativa respecto a la instrumentación tradicional, ha demostrado ser adecuada en ensayos experimentales de laboratorio y permite una **lectura visual directa y objetiva del desplazamiento**.

Figura 57. Software Traker para la medición de deflexión máxima



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para el tratamiento estadístico de datos, se ha seguido el procedimiento descrito en la norma **UNE-EN 326-1** y **UNE-EN 326-2**, que establecen las directrices para la evaluación estadística de datos de ensayo en productos derivados de la madera. Complementariamente, se han aplicado los principios recogidos en la norma **UNE 66040**. De este modo, se ha calculado la **media**, la **desviación estándar**, **intervalos de confianza bilaterales** para las propiedades mecánicas evaluadas, así como **coeficiente de variación**, empleando **las fórmulas descritas anteriormente en el ensayo de tracción [5,6,7,8]**.

Se ha representado mediante un **histograma** la distribución de los valores individuales obtenidos en el ensayo de resistencia a flexión, con el fin de visualizar la dispersión de los resultados y analizar el comportamiento estadístico de la muestra ensayada.

Todas las particularidades del ensayo se recogen en el **Anexo V – Ensayo de flexión**.

### 3.7 Fabricación de probetas

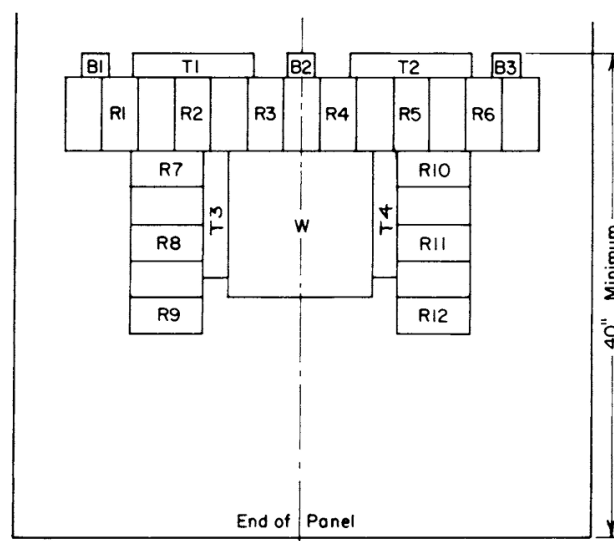
Para la fabricación de las probetas se ha seguido una estrategia de trabajo común basada en la geometría de las normativas, combinada con herramientas de diseño y corte de alta precisión. Cada geometría fue diseñada utilizando el software **AutoCAD**, asegurando la correcta definición de las dimensiones según los estándares aplicables. Posteriormente, los archivos fueron exportados en formato **.dxf**, compatible con la **cortadora láser CO<sub>2</sub> modelo IL1390**, con la que se realizaron las tareas de corte sobre paneles de MDF de 3 mm de espesor.

#### 3.7.1 DESPIECE Y PREPARACIÓN CONFORME A NORMATIVAS

El proceso de despiece y corte de las probetas se llevó a cabo conforme a las directrices establecidas en la **norma europea UNE-EN 326-1** y la norma americana **ASTM D1037-12**, las cuales garantizan una selección aleatoria representativa del material, considerando la posible variabilidad interna de los tableros. Ambas normativas proponen un ejemplo de despiece (*Figura 58 y 59*) sobre los que se basó la planificación en AutoCAD (*Figura 59*).

Se respetó en todo momento la distancia mínima de **100 mm entre probetas del mismo ensayo**, tal como especifica la norma **UNE-EN 326-1**, la cual establece directrices más restrictivas en este aspecto, con el fin de minimizar posibles interferencias debidas a la naturaleza del material.

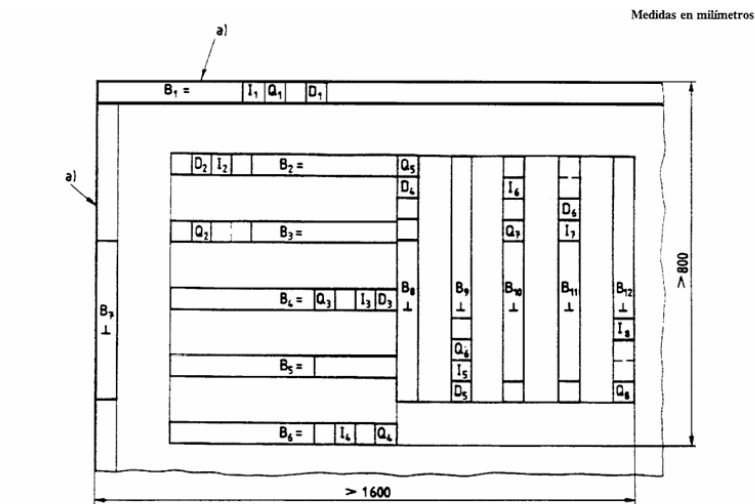
**Figura 58.** Despiece de probetas según norma ASTM D1037



Modulus of rupture (*R*)—twelve 3 by 6 in. (76 by 152 mm)  
 Tension parallel to surface (*T*)—four 2 by 10 in. (51 by 254 mm)  
 Tension perpendicular to surface (*B*)—three 2 by 2 in. (51 by 51 mm)  
 Water absorption and swelling (*W*)—one 12 by 12 in. (304 by 304 mm)

**Fuente:** ASTM D1037

Figura 59. Despiece de probetas según UNE-EN 326-1



= Dirección del eje longitudinal de la probeta paralelo a la dirección longitudinal del tablero contrachapado o a la dirección de fabricación para los otros tipos de tablero.

⊥ Dirección del eje longitudinal de la probeta perpendicular a la dirección longitudinal del tablero contrachapado o a la dirección de fabricación para los otros tipos de tablero.

a) Canto exterior de corte.

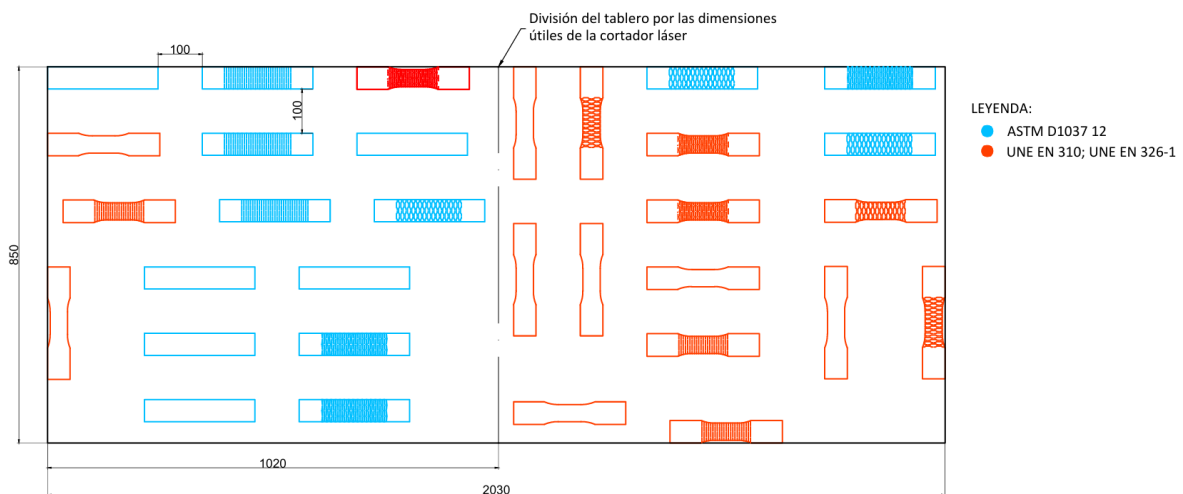
NOTA - Para las propiedades independientes de la orientación, (por ejemplo: D, I y Q), se requiere una probeta por cada orientación, que se extraerán de los cantos exteriores de los tableros despiezados, siempre que se puedan identificar.

Ensayo	Número de la probeta de ensayo
Densidad	D 1 a D 6
Flexión	B 1 a B 12
Hinchazón del grosor	Q 1 a Q 8
Tracción perpendicular a las caras del tablero	I 1 a I 8

Fuente: UNE-EN 326-1

Se procuró que al menos una probeta por grupo procediera del **borde saneado** del tablero, eliminando previamente el canto mecanizado. En la *Figura 60* se observa el despiece finalmente adoptado, con una leyenda que especifica a que ensayo pertenece. Una vez realizado, se exportó a formato *DXF* y se mecanizó con la cortadora láser (*Figura 61*).

Figura 60. Despiece de las probetas en AutoCAD



Fuente: Elaboración propia

**Figura 61.** Despiece realizado con la cortadora láser



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7.2 TECNOLOGÍA DE CORTE EMPLEADA: CORTADORA LÁSER

El corte se realizó utilizando una **cortadora láser de CO<sub>2</sub> modelo IL1390** (Figura 62), equipada para realizar tareas de  **corte, grabado y marcado** sobre materiales no metálicos (Iberoláser, s.f.). La cortadora láser está equipada con un **tubo láser de CO<sub>2</sub> de 100 W**, con enfoque manual, lo que permite un control preciso de la distancia focal en función del espesor del material. Y un área de trabajo útil de **1300 × 900 mm**.

Debido a que los tableros originales tenían unas dimensiones de **2040×900 mm**, fue necesario cortarlos previamente por la mitad, obteniendo paneles base de **1020×900 mm**. Toda la información técnica relevante a la cortadora se encuentra en el *Anexo I – Documentación de la maquinaria*.

Esta tecnología fue seleccionada por su alta **precisión, capacidad de repetibilidad** de patrones complejos con alta fidelidad (tolerancias estrictas) y la **calidad del acabado** que ofrece sobre materiales como el MDF (Baison Laser, s.f.) una vez se tienen claro los parámetros a utilizar.

Gracias a este método, se obtuvieron bordes limpios, sin desviaciones y prácticamente perpendiculares al plano del material, conforme a lo establecido en el apartado 6.5 de la norma *UNE-EN 326-1:1995*.

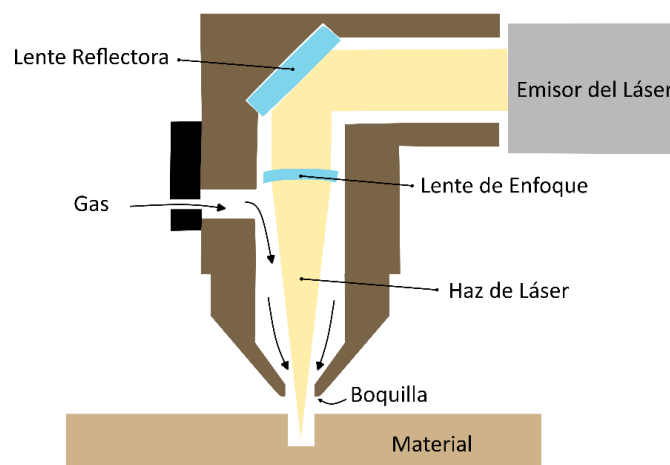
Figura 62. Cortadora láser modelo IL-1390



Fuente: Elaboración propia

En este tipo de corte láser (*Figura 63*), se hace **pasar electricidad** a través de un **tubo lleno de gases** (normalmente dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y helio), lo que genera **luz**. Las moléculas de nitrógeno se excitan con la corriente eléctrica y transfieren su energía al dióxido de carbono, que emite la **radiación láser**. El tubo cuenta con **dos espejos** en los extremos: uno totalmente reflectante, y otro parcialmente reflectante, por donde escapa el rayo láser **cuando alcanza suficiente intensidad**. El proceso comienza **perforando** el material en un punto inicial, y luego el haz avanza, **fundiendo** el material a lo largo de su recorrido (**Badoniya, 2018**).

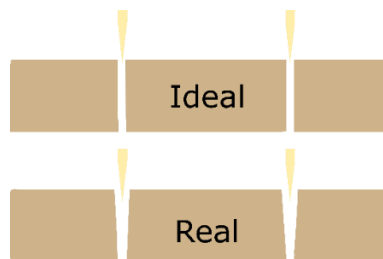
Figura 63. Corte por láser



Fuente: Adaptada de Van Der Linden (2022)

Cabe mencionar que, aunque la cortadora proporciona una excelente calidad de corte, no es perfectamente perpendicular, sino que puede presentar una **ligera conicidad** (el ancho del corte es mayor en la cara superior que en la inferior), esto es debido al **enfoque del haz** y a su **dispersión energética** al atravesar el espesor del panel (*Figura 64*). Este fenómeno se tuvo en cuenta en el diseño de las probetas, donde para evitar imprecisiones en los ensayos, se llevaron a cabo pruebas experimentales personalmente elaboradas y recogidas en el *Anexo III – Control microscópico*.

**Figura 64.** Conicidad en el corte láser

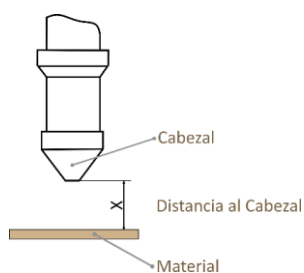


**Fuente:** Adaptada de Stanford Product Realization Lab. (s.f.).

En cuanto a la configuración de corte, se fijó una **distancia focal de 8 mm**, una **velocidad de corte de 25 mm/s** y una **potencia del 60 %**, valores obtenidos tras realizar **pruebas experimentales preliminares personalmente** (*Anexo II – Caracterización del corte láser*). Estas pruebas fueron necesarias para ajustar los parámetros frente a las recomendaciones del fabricante (*Anexo I – Documentación de la maquinaria*), ya que el comportamiento del MDF frente al láser depende de múltiples factores: humedad, densidad, composición interna o posibles errores de enfoque y colocación, pudiendo ser un proceso complicado (**Eltawahni et al., 2011**).

Para asegurar que la **distancia al cabezal** (*Figura 65*) sea la adecuada, se utiliza un dispositivo de calibración (*Figura 66*) que posee una altura exacta de 8 mm, éste se coloca entre el material y el cabezal asegurando el espacio mínimo necesario para evitar que la pieza quede atrapada, se consigue así la distancia focal adecuada.

**Figura 65.** Distancia Focal



**Fuente:** Elaboración propia

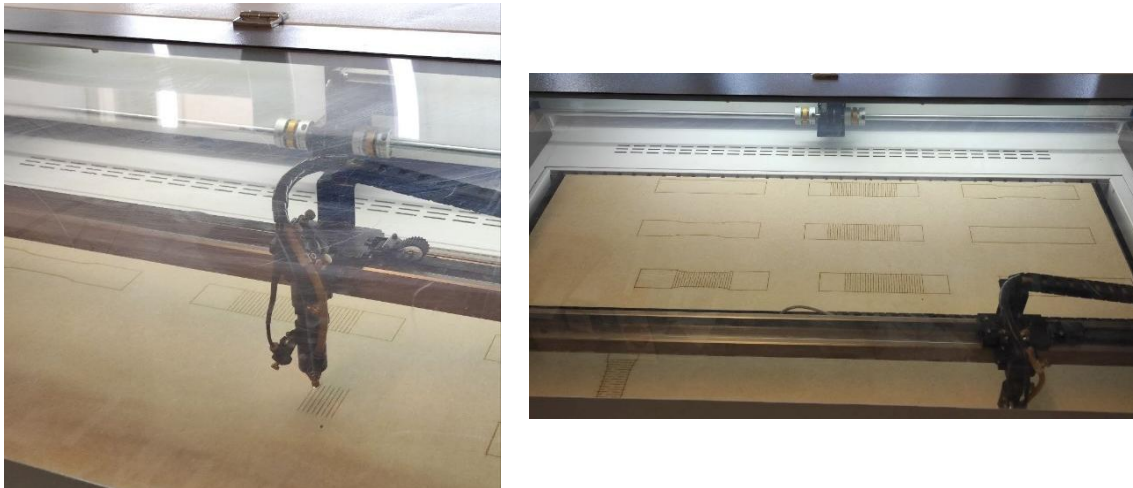
**Figura 66.** Dispositivo para ajustar boquilla



**Fuente:** Elaboración propia

Para el procesamiento de los archivos, se utilizó el software *RDWorks*, en el que se configuraron todos los parámetros antes de enviarlos a la máquina. Asimismo, se realizaron tareas de **limpieza de lentes** y se garantizó una **ventilación y extracción de humos adecuadas** durante el proceso de corte, minimizando riesgos para la seguridad del operario y del equipo.

**Figura 67.** Fabricación de probetas

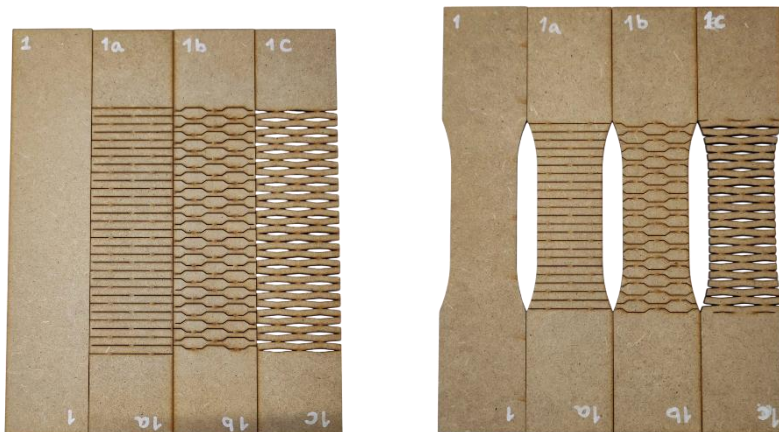


**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7.3 DENOMINACIÓN DE PROBETAS

Todas las probetas fueron marcadas (*Figura 68*) con un **número**, que representa el **número de probeta** dentro de la muestra seguido de **una letra (a, b, c o Ø)** para identificar el **patrón**, acorde a la denominación anteriormente expuesta en el epígrafe **3.3 Selección de patrones**.

**Figura 68.** Probetas obtenidas y denominación de la primera serie



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8 Equipos adicionales empleados

Además de los equipos ya mencionados en apartados anteriores, se usaron otros para tareas complementarias como los que se citan a continuación.

#### 3.8.1 MICROSCOPIO DIGITAL 246S/249S

Como se ha mencionado anteriormente, el corte realizado mediante láser **no es completamente perpendicular**, presenta una **ligera conicidad**. Este fenómeno puede tener un impacto significativo en la precisión de las probetas, especialmente en aquellas destinadas a ensayos mecánicos o simulaciones digitales y **en su capacidad de curvatura**. Por esta razón, se llevaron a cabo **pruebas específicas variando los niveles de potencia**, con el **objetivo de analizar la aparición de conicidad y determinar el *kerf***, es decir, el ancho efectivo del corte producido por el haz láser.

El **valor del *kerf***, es un **dato fundamental** para la elaboración de los modelos digitales posteriores. Este ancho puede verse influido por múltiples factores como la potencia, velocidad, enfoque del haz y espesor del material, por lo que su medición precisa resulta esencial.

Para ello, se empleó un **microscopio digital modelo 246S/249S** (*Figura 69*), que permite la observación detallada y medición precisa de los cantos y superficies cortadas. Se utilizó la **lente “L”** que dispone de una **magnificación de entre 60x a 240x** para la vista en planta y **correcta medición del *kerf***. La **lente “A”** se usó para la observación del perfil del corte (efecto de conicidad), con una magnificación de **18x a 720x**.

Este equipo dispone de una precisión de medición de aproximadamente **±0,01 mm** en el software integrado *Microscope Measure* (**Andonstar, s.f.**).

Gracias a este equipo fue posible observar directamente la **conicidad del corte desde el canto**, así como **determinar el valor del *kerf* desde la superficie superior**. Ambas mediciones se incorporaron como referencia clave en el diseño CAD de las probetas y para la realización y validación de los modelos digitales. Los resultados obtenidos se incluyen en el **Anexo III – Control microscópico**.

**Figura 69.** Microscopio Digital 246S/249S , Lente L y Lente A

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.8.2 PIE DE REY

Para la medición del ancho de las probetas se utilizó un **pie de rey de metal** (Figura 70), instrumento de medición de uso clásico en talleres e investigaciones experimentales. El dispositivo permite realizar lecturas con una precisión típica de  $\pm 0,02$  mm, suficiente para **garantizar la exactitud** requerida en las dimensiones de las probetas. Su uso facilita **mediciones rápidas y repetibles** en superficies planas y cantos, asegurando la **trazabilidad de los valores registrados**.

**Figura 70.** Pie de rey

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.8.3 MICRÓMETRO

El espesor de las probetas fue determinado mediante un **micrómetro** de la marca **Mitutoyo** (Figura 71), instrumento de alta precisión ampliamente utilizado en términos de caracterización dimensional. El micrómetro empleado cuenta con una **resolución de 0,01 mm** y un **rango de medición adecuado para los espesores analizados**. Al igual que el pie de rey, este equipo garantiza una elevada exactitud y repetibilidad en las mediciones.

**Figura 71.** Micrómetro Mitutoyo



**Fuente:** Elaboración propia

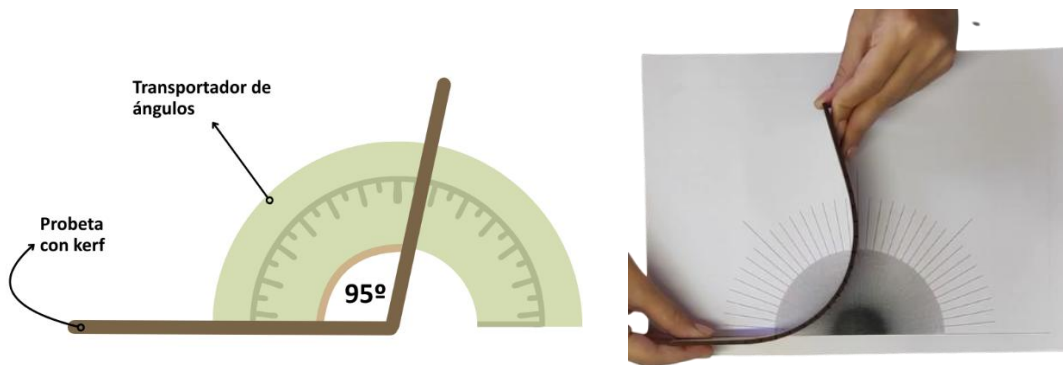
### 3.9 Ángulo de curvatura

Otro de los pilares de la técnica *kerfing* es conocer que grado de curvatura pueden alcanzar los distintos patrones, para determinarlo, se lleva a cabo una prueba experimental que consiste en flexionar manualmente la probeta sobre un transportador de ángulos, hasta aproximarse a su capacidad máxima de flexión, sin alcanzar la rotura, y medir en ese punto el ángulo alcanzado. Esta prueba se realizará con los tres patrones con el objetivo de comparar sus respectivos comportamientos y se encuentra con mayor detalle en *el epígrafe 2 del Anexo III – Control Microscópico*.

El montaje empleado requiere únicamente de una hoja de papel impresa con un transportador de ángulos y las probetas fabricadas. El procedimiento se **repetirá tres veces para cada patrón**, tomando como valor final la media de las mediciones obtenidas.

El **criterio adoptado** para la medición establece que, a menor ángulo registrado, mayor es la curvatura alcanzada por la probeta, dado que el ángulo considerado corresponde al interior de esta, tal y como se ilustra en la *Figura 72*.

**Figura 72.** Esquema prueba de curvatura y foto real



**Fuente:** Elaboración propia

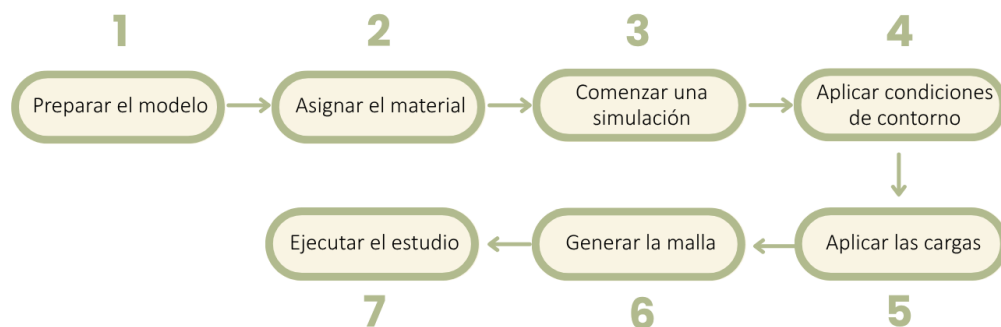
Una vez obtenidos los datos, se compararán entre ellos.

### 3.10 Simulación por el Método de Elementos Finitos

Con el fin de complementar y contrastar los ensayos experimentales anteriormente descritos, se han llevado a cabo una serie de simulaciones mediante el **Método de Elementos Finitos (MEF)**, un método numérico utilizado para predecir el comportamiento de una estructura, el MEF subdivide un gran problema en partes más pequeñas y simples llamadas **elementos finitos**. Posteriormente se van ensamblando las ecuaciones simples que modelan estos elementos en un sistema más grande de ecuaciones. Durante una simulación, el MEF permite calcular la **rigidez y resistencia** de la estructura y visualizar el **desplazamiento y distribución de tensiones** dentro de él (Madier, 2020).

El software empleado para la realización de estas simulaciones ha sido **SolidWorks**, este programa permite **modelar la geometría, asignar propiedades de material, aplicar condiciones de contorno y cargas**, así como realizar un **control detallado del mallado y análisis de resultados**. El tipo de análisis efectuado ha sido un **análisis estructural estático lineal**, adecuado para estudiar el comportamiento de la probeta bajo cargas dentro del rango elástico del material. Se ha considerado una hipótesis de **material homogéneo, isótropo y linealmente elástico** (Ganev et al., 2005). La metodología seguida responde al esquema secuencial de la *Figura 73*.

Figura 73. Esquema metodología simulaciones MEF

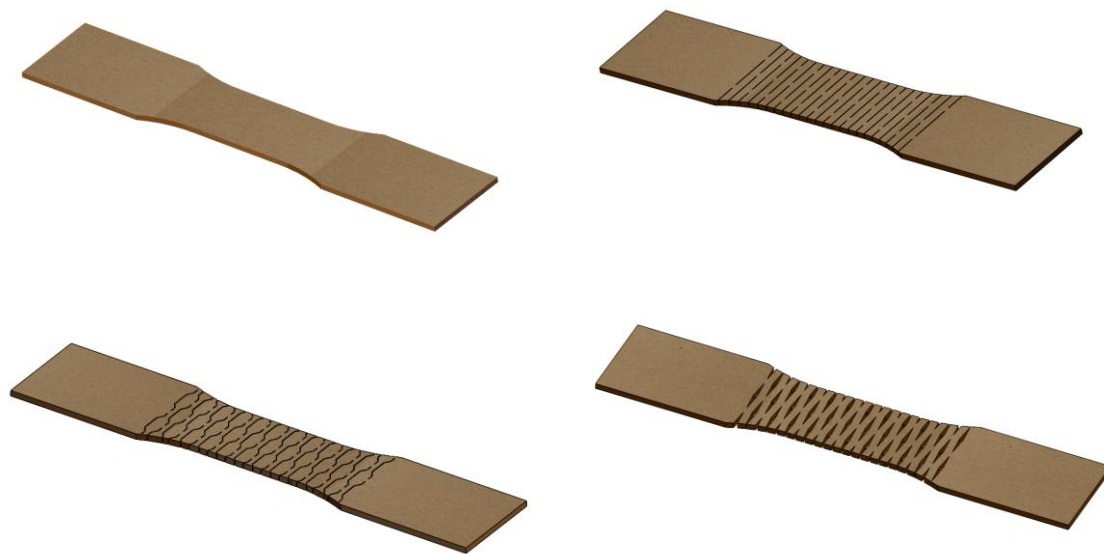


Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, **se preparó el modelo 3D (1)** de las probetas de tracción y flexión incluyendo los cortes derivados de los patrones seleccionados. Uno de los parámetros fundamentales para definir los modelos y para el correcto transcurso de las simulaciones digitales fue el ancho de corte (*kerf*). Para su determinación, se seleccionó una de las probetas finales y se analizó con el microscopio digital

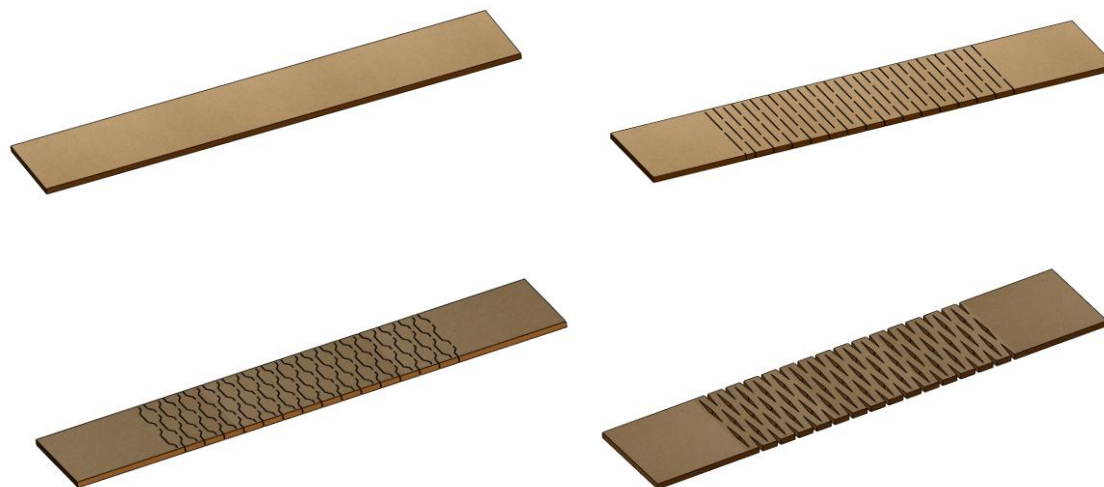
anteriormente especificado (*Anexo III – Control microscópico*). Utilizando el software *Microscope Measure*, previamente calibrado a 1 mm tal y como especificaba el manual. Se tomaron un total de **20 mediciones** del *kerf*. A partir de estos valores, se calculó un promedio, obteniéndose un ancho de corte efectivo ( $w_{\text{efectivo}}$ ) de **0,31435 mm**, que se redondeará a **0,31 mm**. Este ancho de corte será el extruido en los modelos 3D (*Figuras 74 y 75*).

**Figura 74.** Modelos 3D probeta de tracción



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 75.** Modelos 3D probeta de flexión



**Fuente:** Elaboración propia

Posteriormente se introducen las **propiedades del material (2)** correspondiente a fuentes bibliográficas y normativas especializadas (*Tabla 3*), incluyendo parámetros como el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y la densidad ( $\rho$ ). Estos valores se han contrastado con los datos experimentales para asegurar su validez.

**Tabla 3.** Propiedades MDF para la simulación

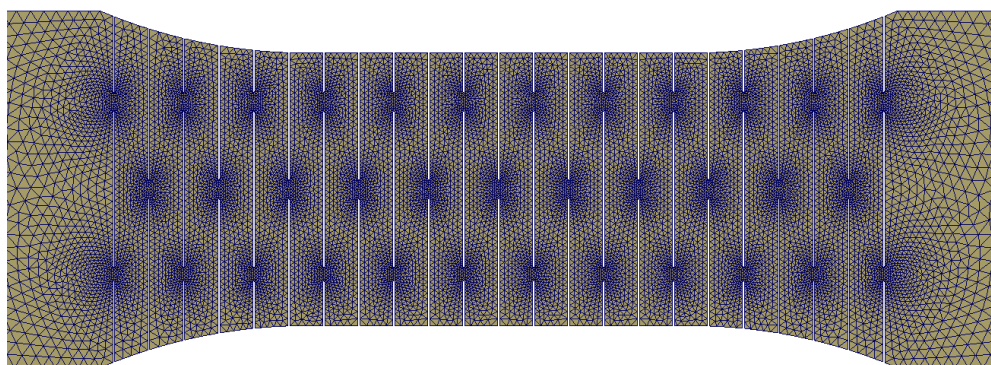
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Módulo de elasticidad (E)	2500	MPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,25	-
Densidad	750	kg/m <sup>3</sup>
Límite elástico	15	MPa

**Fuente:** SolidWorks

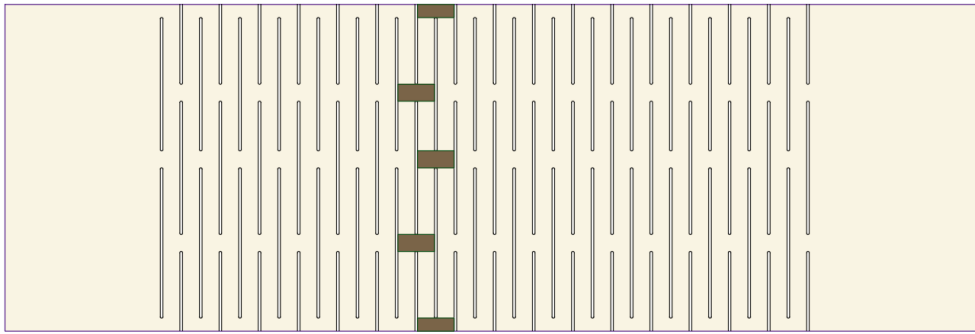
Para **comenzar con la simulación (3)** se procede a definir las **condiciones de contorno (4)** y la **aplicación de las cargas externas (5)** características de cada ensayo. Se genera la **mallado (6)** y se **ejecuta el estudio (7)**.

En lo referente al mallado, se ha optado por una **mallado de tipo triangular**, con un tamaño de elemento optimizado (*Figura 76*). Se ha realizado un control de calidad y, en los casos necesarios, se han aplicado **refinamientos locales en zonas de interés**, especialmente en aquellas con previsión de concentración de tensiones (en los puntos de enlace del patrón, *Figura 77*).

**Figura 76.** Mallado en general de las probetas



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 77.** Puntos de enlace del patrón lineal

**Fuente:** Elaboración propia

Adicionalmente, se han realizado **simulaciones considerando distintas configuraciones de espesor del material**, con el fin de estudiar su influencia en el comportamiento estructural. Los **espesores incluidos en el estudio han sido de 9, 12 y 16 mm**, abarcando un rango representativo de los espesores estandarizados de los tableros.

Una vez generada la malla, **se ejecuta la simulación (7)** y se procede a la validación de los resultados. La validación se realiza mediante la **comparación directa de los valores de desplazamiento y tensiones obtenidos en la simulación con los valores registrados en los ensayos experimentales**. Esta comparación ha permitido identificar posibles desviaciones y validar las hipótesis de partida.

Finalmente, cabe señalar que el modelo presenta ciertas **limitaciones inherentes a la simulación**, tales como la idealización geométrica, la hipótesis de linealidad y la ausencia de efectos dinámicos o térmicos, los cuales no se han considerado por quedar fuera del alcance del presente estudio.

Los resultados obtenidos del proceso de simulación, así como los gráficos e interpretaciones correspondientes, se encuentran recogidos en el **Anexo VI – Simulaciones digitales**.

**Resultados.**



## 4. Resultados

En este apartado se presentan los **resultados obtenidos**, tanto del **control microscópico** y **prueba de curvatura**, como de los **ensayos de tracción y flexión con extremos fijos**, ambos realizados sobre **probetas de MDF “compactas” o sin cortes aplicados** y con **patrones o kerfing aplicado**. En ellos, se han evaluado variables como la **tensión axial máxima**, la **resistencia máxima a flexión**, el **módulo de elasticidad en tracción**, así como **deformaciones axiales** y **desplazamientos máximos verticales**. Los datos se muestran en forma de gráficos, tablas y diagramas de barras. De esta manera se pretende **comparar el comportamiento** de los **patrones** bajo las distintas sollicitaciones.

### 4.1 Estudio del kerf y conicidad del corte láser

El objetivo de este estudio es **analizar** cómo la **potencia** y la **velocidad** de la cortadora láser influyen en la **conicidad** y en el **ancho efectivo de corte (kerf)**, así como emplear estas mediciones en las simulaciones.

Se realizó una prueba en la que se realizaron **18 cortes** distribuidos en **cuatro grupos**. Los tres primeros grupos incluían **cinco cortes cada uno**. Cada grupo estaba realizado **con una potencia distinta** (baja, media y alta) e **igual velocidad**, mientras que el **cuarto grupo reunía un corte representativo de cada configuración de potencia** para su posterior observación microscópica conjunta. Posteriormente, se realizaron mediciones con el software *Microscope Measure* del **ancho de corte** en ambas caras y se calculó el **ángulo de conicidad**. Todo el estudio propio realizado se materializa en el *Anexo III – Control microscópico*.

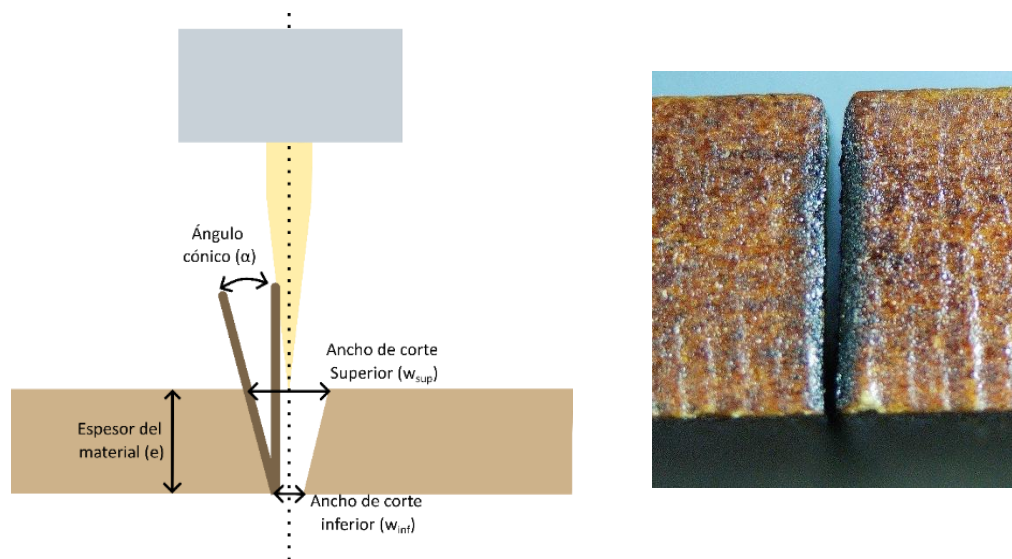
Los resultados se exponen en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Resultados control microscópico

Grupo	Potencia (%)	Velocidad (mm/s)	Kerf medio (mm)	Conicidad $\alpha$ (°)	Observaciones
Grupo 1	45	25	0,2627	0,88°	Corte incompleto en el reverso; menor penetración del haz.
Grupo 2	75	25	0,2974	0,98°	Corte más uniforme; aumento del kerf y de la conicidad.
Grupo 3	100	25	0,3189	0,44°	Corte más amplio y completo; bordes quemados por sobrefusión.

Fuente: Elaboración propia

El **ángulo Alpha** referido en la **Tabla 4** se ilustra en la **Figura 78**.

**Figura 78.** Ángulo de conicidad y foto tomada con el microscopio

**Fuente:** Elaboración propia

Este comportamiento tiene implicaciones directas sobre la **flexibilidad de las piezas mecanizadas** ya que en una muestra sometida a un patrón de *kerfing* lineal, se evidenció una **curvatura diferente al aplicar flexión en cada sentido**, siendo **mayor hacia el lado del corte más ancho**. Este comportamiento confirma que la **conicidad del corte genera una geometría asimétrica en sección**, lo que influye en la respuesta mecánica del material frente a sollicitaciones de flexión.

## 4.2 Prueba de estimación del ángulo de curvatura

El fin de esta prueba es conocer a grandes rasgos la **capacidad de curvatura de cada patrón previa a la fractura** y posteriormente, medirla con un **transportador de ángulos** tal y como se argumentaba en *Metodología*. Las mediciones detalladas se encuentran recogidas en *el epígrafe 2 del Anexo III – Control microscópico*.

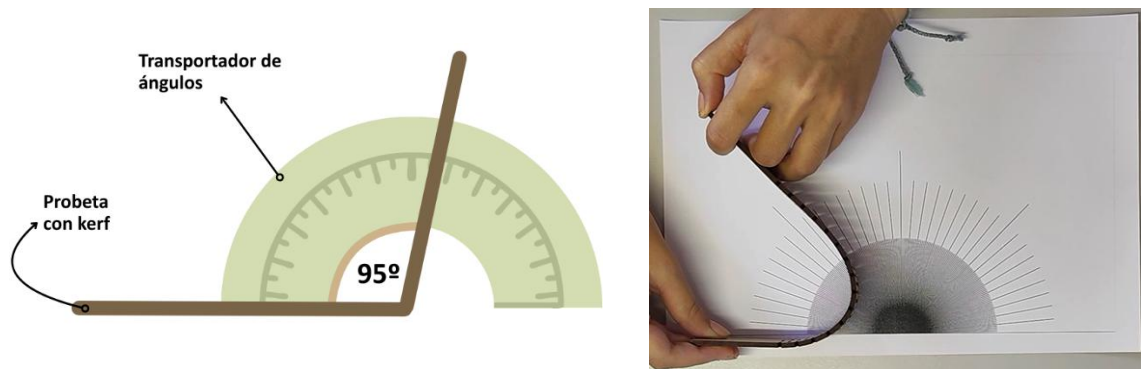
Los **resultados** se exponen en la **Tabla 5** donde se observa que los valores de ángulo más reducidos corresponden a las probetas con mayor capacidad de curvatura, puesto que la medición se realiza sobre el **ángulo interior de la probeta (Figura 79)**.

**Tabla 5.** Resultados estimación del ángulo de curvatura

	Ángulo mínimo de curvatura	Observaciones
<b>Patrón A</b>	87,5 °	Curvatura moderada hasta alcanzar ángulos rectos.
<b>Patrón B</b>	87,8 °	Prácticamente igual comportamiento que el patrón A.
<b>Patrón C</b>	66,67 °	Mayor capacidad de flexión.

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 79.** Esquema prueba de curvatura



**Fuente:** Elaboración propia

### 4.3 Ensayo de tracción

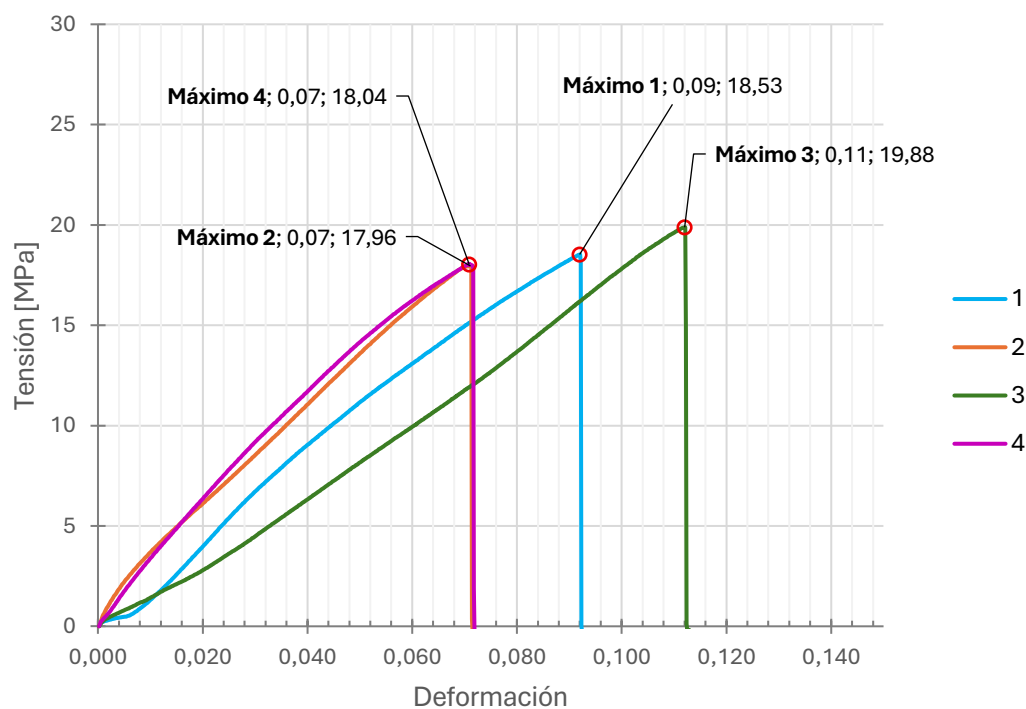
A continuación, se presentan los resultados obtenidos del **ensayo de tracción** con probetas, tanto del **grupo de compactas**, como de **aquellas modificadas mediante patrones *kerfing***. Este apartado se centra en **exponer los valores experimentales de carga máxima, elongación, tensión, deformación y módulo de Young**, junto con su correspondiente **tratamiento estadístico**.

Para un análisis más detallado de cada probeta individual (incluyendo las gráficas y observaciones específicas del fallo), se remite al **Anexo IV - Ensayo de tracción**, donde se recoge dicha documentación técnica y gráfica elaborada. Asimismo, en dicho anexo se describen las **condiciones particulares** del ensayo y la contextualización del fenómeno de **concentración de esfuerzos**, hecho que cobra relevancia en las probetas con patrones debido a la **presencia de ranuras**.

#### 4.3.1 RESULTADOS DE LA PROBETA SIN KERFING

##### CURVAS TENSIÓN – DEFORMACIÓN

**Figura 80.** Curvas Tensión – Deformación de las probetas sin *kerfing*. **Fuente:** Elaboración propia



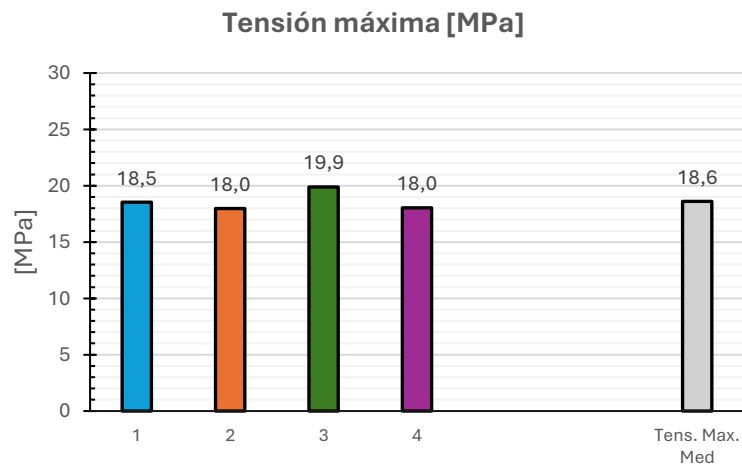
En la **Figura 80** se presentan las **curvas tensión-deformación** correspondientes a las cuatro probetas sin *kerfing* aplicado. Todas ellas muestran un comportamiento prácticamente elástico-lineal hasta alcanzar la tensión máxima, momento en el que se produce una rotura súbita, propia de un material frágil como el *MDF*.

La tensión máxima registrada varía ligeramente entre las probetas, con valores comprendidos entre **18 MPa (probeta 2)** y **19,9 MPa (probeta 3)**, mientras que la deformación máxima se situó entre **0,07** y **0,11**, siendo la **probeta 3** la que alcanzó la **mayor deformación antes del fallo**. Estas curvas sirvieron como **base para el cálculo del módulo de Young en la región elástica**.

De forma equivalente, en términos de carga y desplazamiento, las probetas alcanzaron fuerzas máximas entre **220,54 kg (probeta 2)** y **243,76 kg (probeta 3)**, con desplazamientos axiales comprendidos entre **3,55 mm (probeta 2)** y **5,61 mm (probeta 3)**. Las curvas son relativamente consistentes entre sí, aunque se observan ligeras diferencias en la rigidez inicial y en el desplazamiento en rotura. Estas variaciones pueden atribuirse a pequeñas diferencias en la fabricación de los paneles o en la colocación de las probetas. En general, el comportamiento del ensayo confirma una respuesta estructural prácticamente homogénea en el material.

En la **Figura 81** se observa un diagrama de barras con los valores de la tensión máxima o tensión de rotura de cada probeta, así como la media ponderada de ellas, que resulta en una tensión de rotura media de **18,6 MPa**.

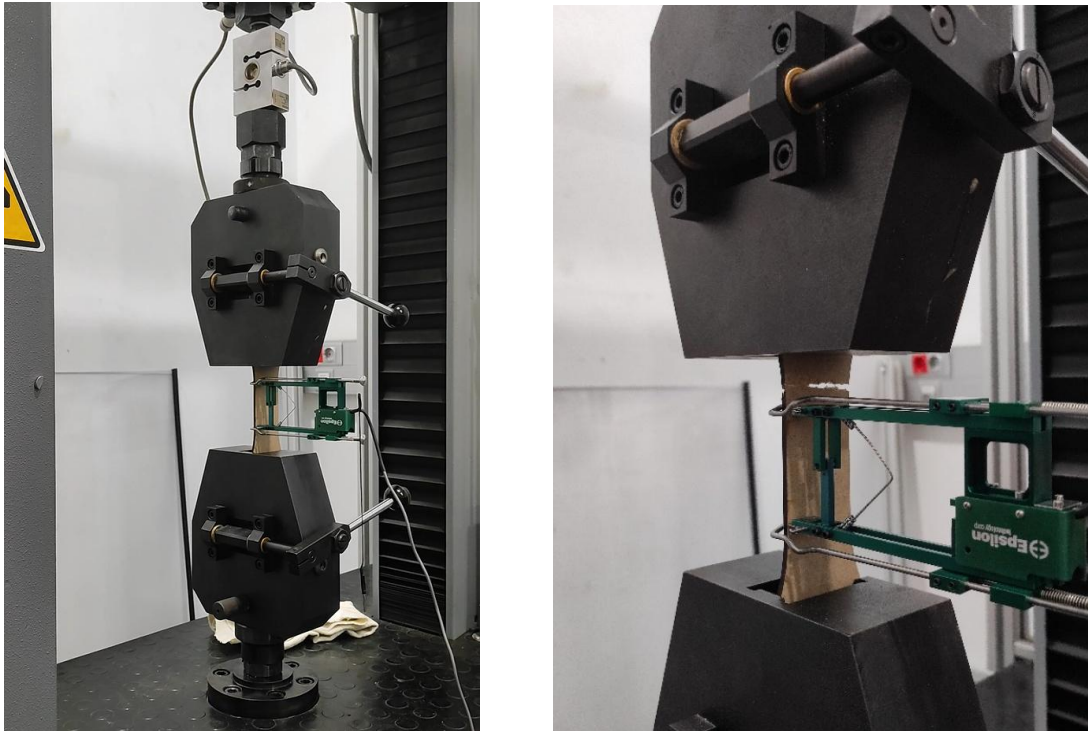
**Figura 81.** Media de los valores de tensión máxima de la probeta sin *kerf*. **Fuente:** Elaboración propia



### OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA

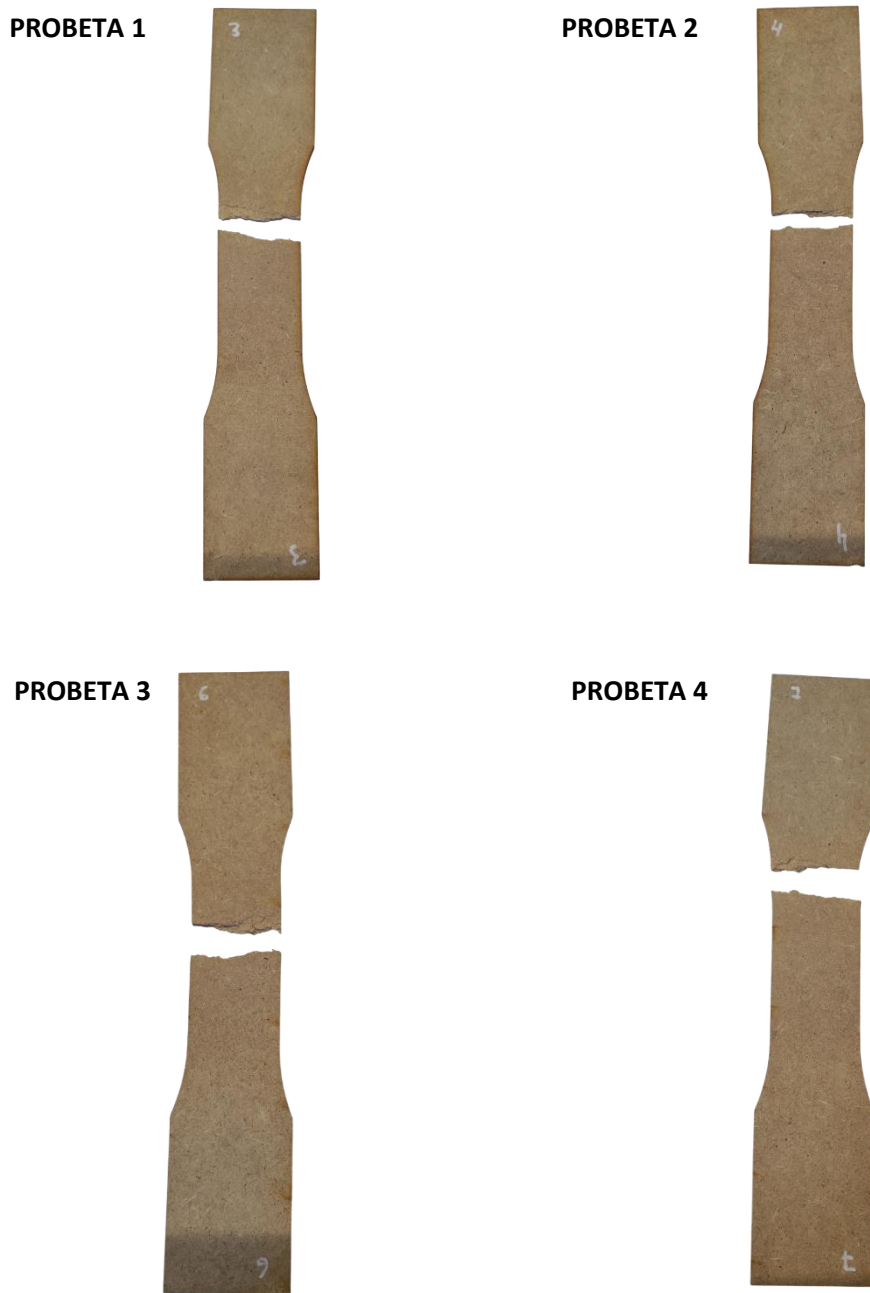
En la **Figura 82** se aprecia la configuración del ensayo de este grupo de probetas de MDF.

**Figura 82.** Imagen durante el ensayo de tracción de las probetas compactas. **Fuente:** Elaboración propia



A continuación, se presentan **imágenes del modo de rotura (Figura 83)** observado en las probetas sin *kerfing* tras el ensayo de flexión. En todos los casos, se identifica una **rotura frágil localizada en la zona central en la dirección perpendicular a la aplicación de la carga, sin deformación previa a la rotura**. La superficie de fractura mostró una textura fina y pulverulenta, propia de una rotura por tracción de las fibras lignocelulósicas del MDF.

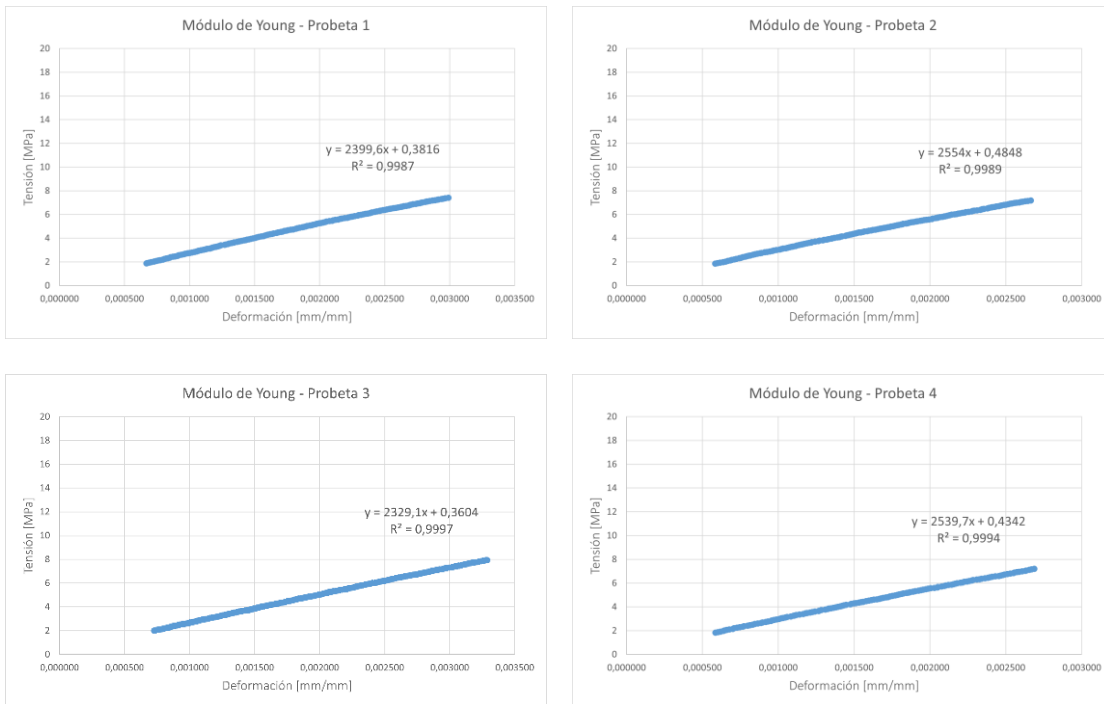
**Figura 83.** Fotografías del modo de fallo en las cuatro probetas sin patrón tras el ensayo de tracción.  
**Fuente:** Elaboración propia



### MÓDULO DE YOUNG

A partir de la **región elástica** de las **curvas tensión-deformación** (*Figura 84*) se determinó el módulo de Young, los valores obtenidos se resumen en la *Tabla 6*. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) obtenidos en las regresiones lineales fueron superiores a 0,99 en todos los casos, indicando un buen ajuste de la zona elástica. Las probetas mostraron una **rigidez similar**, con valores comprendidos entre **2329,1 MPa** y **2554,0 MPa**.

**Figura 84.** Rectas de regresión tramo elástico probetas *sin kerfing* - Módulo de Young. **Fuente:** Elaboración propia



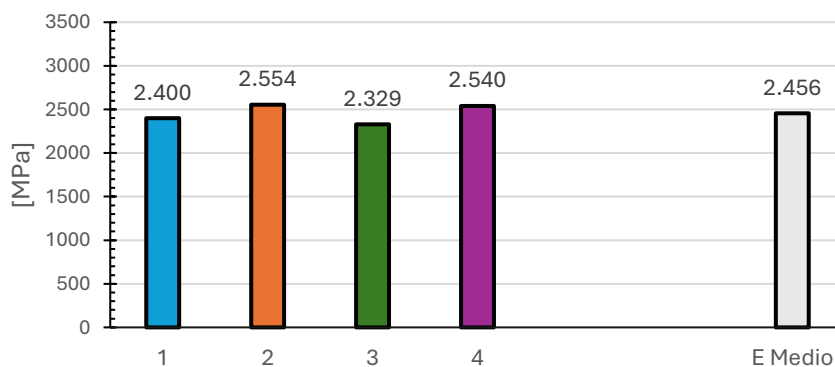
**Tabla 6.** Módulo de Young probetas *sin kerfing*

Probeta	Módulo de Young [MPa]	Ecuación de la recta	R <sup>2</sup>
1	2399,6	$y = 2399,6x + 0,3816$	0,9987
2	2554,0	$y = 2554x + 0,4848$	0,9989
3	2329,1	$y = 2329,1x + 0,3604$	0,9997
4	2539,7	$y = 2539,7x + 0,4342$	0,9994

**Fuente:** Elaboración propia

El valor **medio** del **módulo de Young** se encuentra en **2456 MPa** (**Figura 85**).

**Figura 85.** Media del módulo de Young. **Fuente:** Elaboración propia



**RESULTADOS ESTADÍSTICOS**

Se realizó un **tratamiento estadístico siguiendo la norma ASTM D2915-17** sobre las cuatro probetas sin *kerfing* ( $n = 4$ ;  $t = 3,182$ ), recogido en la **Tabla 7**. La **tensión máxima media obtenida** fue de **18,6 MPa**, con una **desviación estándar de 0,89 MPa** y un coeficiente de variación del **4,77 %**, lo que indica una dispersión moderada y aceptable entre muestras.

Considerando una distribución normal con un **intervalo de confianza del 95 %**, los límites se sitúan entre **17,2 MPa (límite inferior)** y **20,0 MPa (límite superior)**. Por su parte, el **módulo de Young medio** fue de **2455,6 MPa**, con una **desviación estándar de 109,4 MPa** y un **coeficiente de variación de 4,46 %**, en ambos casos se sitúan por debajo del 5 %, sugiriendo una buena repetibilidad dentro del conjunto de ensayos. Los límites se encuentran entre **2281,5 MPa y 2629,7 MPa** con un intervalo de confianza del 95 %.

**Tabla 7.** Tratamiento estadístico probetas sin kerfing

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Tensión máxima media ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	18,6	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	0,89	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	17,2	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	20,0	MPa
Coeficiente de variación ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	4,77	%
Módulo de Young medio (E)	2455,6	MPa
Desviación estándar (E)	109,4	MPa
Límite inferior 95 % (E)	2281,5	MPa
Límite superior 95 % (E)	2629,7	MPa
Coeficiente de variación (E)	4,46	%

**Fuente:** Elaboración propia

Asimismo, se calcularon los **errores porcentuales** individuales **respecto a los valores medios** del módulo de Young y la tensión máxima, mostrados en la **Tabla 8**. En el caso de la media de la tensión máxima los errores relativos oscilaron entre **-6,86 %** y **+3,41 %**, mientras que, para el **módulo de Young**, se situaron entre **-4,01 %** y **+5,15 %**. Aunque estos márgenes pueden considerarse aceptables en ensayos mecánicos con materiales como el MDF, la variación relativa, especialmente en la tensión máxima, sugiere cierta dispersión en el comportamiento a la rotura entre probetas. Esta dispersión puede deberse no solo a pequeñas **diferencias en el corte** o **leves desalineaciones** durante el ensayo, sino también a **factores intrínsecos del material**,

como la heterogeneidad entre distintas zonas de la plancha, el contenido de **humedad** o ligeras variaciones en el proceso de fabricación.

**Tabla 8.** Errores porcentuales probetas sin kerf

Probeta	E (MPa)	% Error E	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	% Error ( $\sigma_{\text{máx}}$ )
1	2399,58	2,28 %	18,54	0,39 %
2	2554,05	-4,00 %	17,98	3,41 %
3	2329,07	5,15 %	19,89	-6,86 %
4	2539,71	-3,43 %	18,04	3,07 %

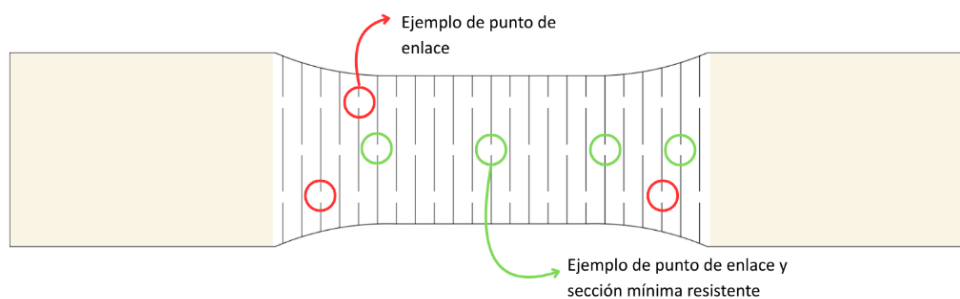
Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2 RESULTADOS DEL PATRÓN A (LINEAL)

#### CURVAS TENSIÓN DEFORMACIÓN

Para calcular la tensión en las probetas con patrón, se ha utilizado la **sección efectiva**, es decir la **sección mínima resistente** correspondiente a los puntos de enlace (**Figura 86**), ya que es en esa zona donde **tenderá a ocurrir la fractura** debido a la concentración de esfuerzos por cambios bruscos en la sección. Las áreas resultantes se exponen en la **Tabla 9**.

**Figura 86.** Identificación de la zona de enlace y sección mínima en el patrón A de tracción



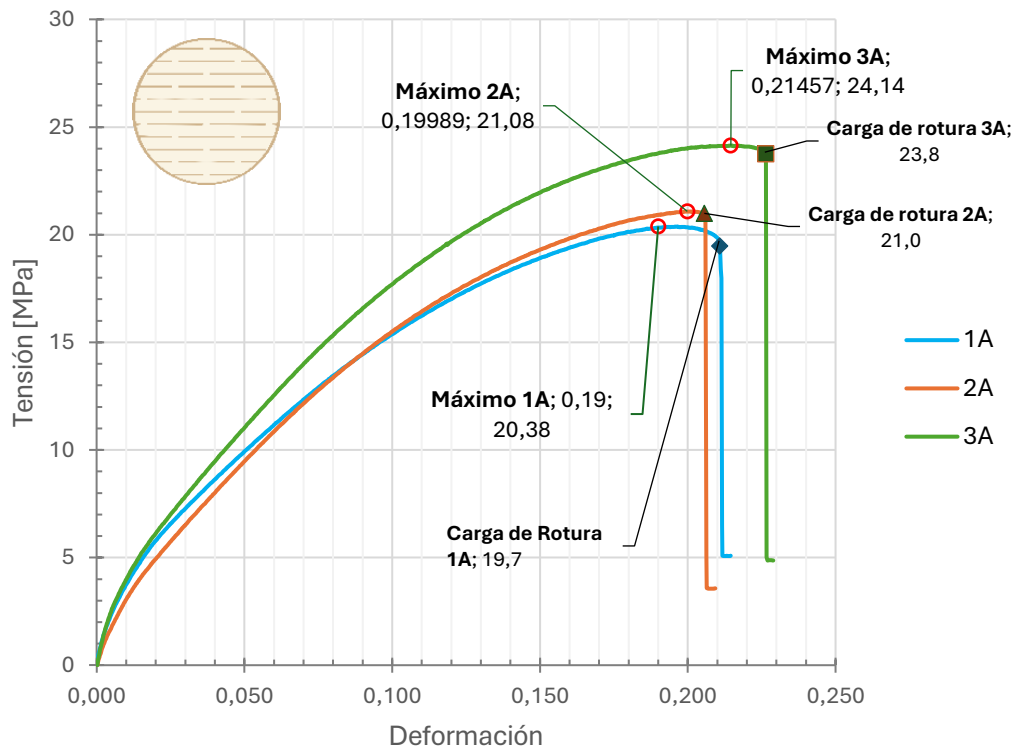
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9.** Áreas efectivas empleadas para probetas con patrón A

	A efectiva
Probeta 1A	8,49 mm <sup>2</sup>
Probeta 2A	8,31 mm <sup>2</sup>
Probeta 3A	8,31 mm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

Figura 87. Curvas Tensión – Deformación de las probetas con patrón A. Fuente: Elaboración propia



En la **Figura 87** se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas con el patrón A o Lineal. En términos de Fuerza-Desplazamiento, se alcanzaron cargas máximas comprendidas entre **17,64 kg (probeta 1A)** y **20,45 kg (probeta 3A)**, acompañadas de desplazamientos considerablemente altos, se encuentran entre **9,79 (probeta 1A)**, **9,99 (probeta 2A)** y **10,73 mm (probeta 3A)**, esto es debido a que los cortes permiten una mayor elongación bajo cargas más bajas.

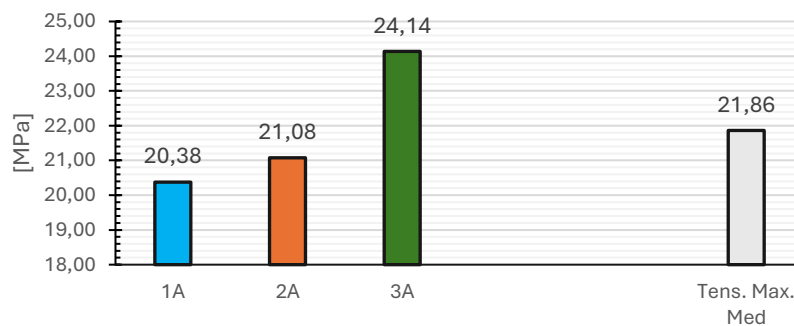
Las curvas obtenidas muestran un **comportamiento inicial similar** en las tres probetas, con un incremento progresivo de la tensión hasta alcanzar la máxima resistencia en cada caso.

La **probeta 3A** presenta la **mayor resistencia**, alcanzando una **tensión máxima de 24,1 MPa a una deformación de 0,215**. Le siguen las **probetas 2A y 1A**, con tensiones máximas de **21,1 MPa y 20,4 MPa**, alcanzadas a deformaciones de **0,199 y 0,190**, respectivamente.

El valor de la **tensión media** es de **21,86 MPa (Figura 88)**.

La maquinaria empleada para el ensayo del grupo del patrón A se observa en la **Figura 89**.

**Figura 88.** Media de los valores de tensión de rotura patrón A. **Fuente:** Elaboración propia



### **OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA**

**Figura 89.** Fotografías de la configuración de ensayo de tracción para el patrón A. **Fuente:** Elaboración propia



Tras alcanzar la **carga máxima**, todas las probetas presentan una **ligera caída en la fuerza acompañada de un incremento del desplazamiento**, hasta producirse la **fractura frágil** del material en la **zona debilitada por el patrón de ranuras**. Por tanto, la carga máxima y la carga de rotura difieren en este caso.

En la **Figura 90** se muestra el modo de rotura observado en cada una de las probetas. La **iniciación** de la fisura se localiza en la **zona redondeada**, actuando como **punto de concentración de tensiones**. La **propagación posterior de la fractura** se interpreta como **resultado del impacto generado tras la rotura inicial**.

En las **probetas 2A y 3A**, la rotura se produce en la sección con doble punto de enlace, mientras que la **probeta 1A** presenta una trayectoria de rotura atípica, ya que

el punto de enlace de menor sección se mantiene intacto, rompiendo de otra manera, posiblemente influida por defectos locales o desviaciones en la geometría de corte.

**Figura 90.** Fotografías del modo de fallo en las tres probetas con patrón A tras el ensayo de tracción.  
**Fuente:** Elaboración propia

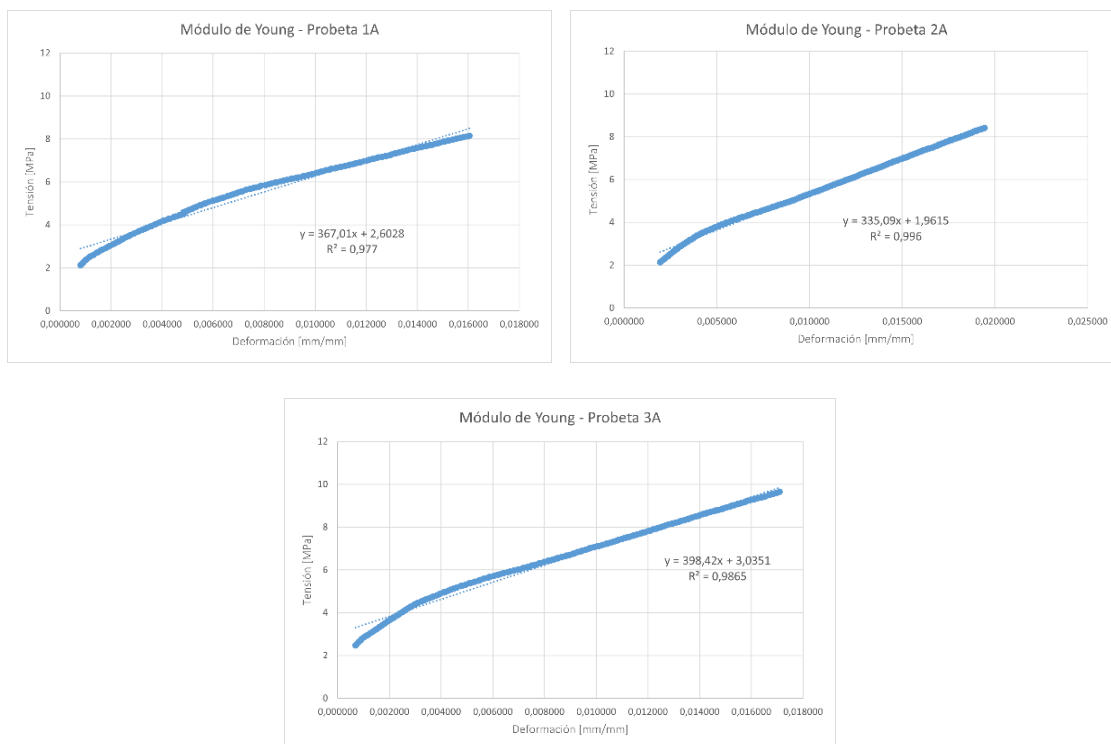


MÓDULO DE YOUNG

El **módulo de Young** obtenido no representa la **propiedad intrínseca del material base (MDF)**, sino una **rigidez efectiva del sistema estructurado** mediante el **patrón de kerfing**. El **módulo de Young** se calculó a partir de la **zona elástica** de cada curva mediante ajuste lineal (**Figura 91**).

Los valores obtenidos fueron de **367,0 MPa**, **335,1 MPa** y **398,4 MPa**, mostrados en la **Tabla 10**.

**Figura 91.** Rectas de regresión tramo elástico probetas patrón A - Módulo de Young. **Fuente:** *Elaboración propia*



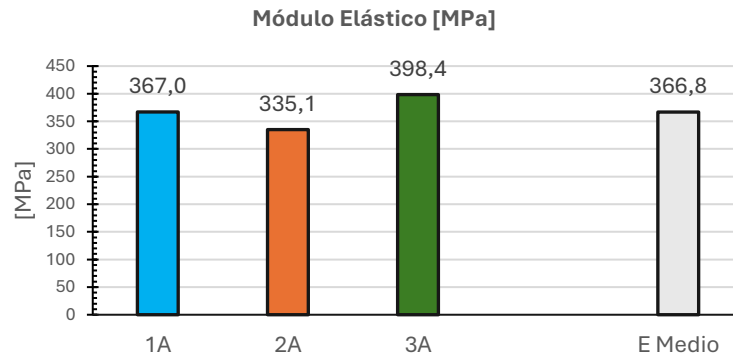
**Tabla 10.** Módulo de Young probetas con patrón A

Probeta	Módulo de Young [MPa]	Ecuación de la recta	R <sup>2</sup>
1A	367,01	y = 367,01x + 2,6028	0,977
2A	335,09	y = 335,09x + 1,9615	0,996
3A	398,42	y = 398,42x + 3,0351	0,9865

**Fuente:** *Elaboración propia*

El valor medio del **módulo de Young** para las probetas con cortes rectos aplicados se observa en la **Figura 92**, resultando un valor de **366,8 MPa**.

Figura 92. Media del módulo de Young – patrón A. Fuente: Elaboración propia



### RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Se realizó un tratamiento estadístico sobre las tres probetas con el **Patrón A** ( $n = 3$ ;  $t = 4,303$ ), recogido en la **Tabla 11**. La **tensión máxima media obtenida** fue de **21,9 MPa**, con una **desviación estándar de 2 MPa** y un **coeficiente de variación del 9,15 %**, lo que indica una dispersión moderada y aceptable entre muestras. Considerando una distribución normal con un **intervalo de confianza del 95 %**, los límites se sitúan entre **16,9 MPa (límite inferior)** y **26,8 MPa (límite superior)**.

Por su parte, el **módulo de Young medio** fue de **366,8 MPa**, con una **desviación estándar de 31,7 MPa** y un **coeficiente de variación de 8,63 %**. Los límites se encuentran entre **288,2 MPa** y **445,5 MPa** con un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 11. Tratamiento estadístico probetas con patrón A

Parámetro	Valor	Unidad
Tensión máxima media ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	21,9	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	2	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	16,9	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	26,83	MPa
Coeficiente de variación ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	9,15	%
Módulo de Young medio (E)	366,8	MPa
Desviación estándar (E)	31,7	MPa
Límite inferior 95 % (E)	288,2	MPa
Límite superior 95 % (E)	445,5	MPa
Coeficiente de variación (E)	8,63	%

Fuente: Elaboración propia

Además, se calcularon los **errores porcentuales** individuales respecto a los valores medios del módulo de Young y la tensión máxima, se muestran en la **Tabla 12**. En el caso del **patrón A**, los errores relativos del **módulo de Young** se sitúan en un

rango de  $\pm 8,6$  %, lo que indica una **rigidez elástica moderadamente consistente entre probetas**.

Sin embargo, los valores de tensión máxima presentan una dispersión mayor, con errores de hasta  $-10,4$  %, especialmente en la **probeta 3A**. Esta variabilidad puede atribuirse a diferencias en la ejecución del ensayo, así como a la sensibilidad del material frente a pequeñas concentraciones de tensiones en las zonas de corte.

**Tabla 12.** Errores porcentuales de las probetas con patrón A

Probeta	E (MPa)	% Error E	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	% Error ( $\sigma_{\text{máx}}$ )
1A	367,01	- 0,04 %	20,38	6,8 %
2A	335,09	8,65 %	31,08	3,6 %
3A	398,42	- 8,61 %	27,14	-10,40 %

**Fuente:** Elaboración propia

4.3.3 RESULTADOS DEL PATRÓN B (WAVE O LÍNEAS INCLINADAS)

CURVAS TENSIÓN DEFORMACIÓN

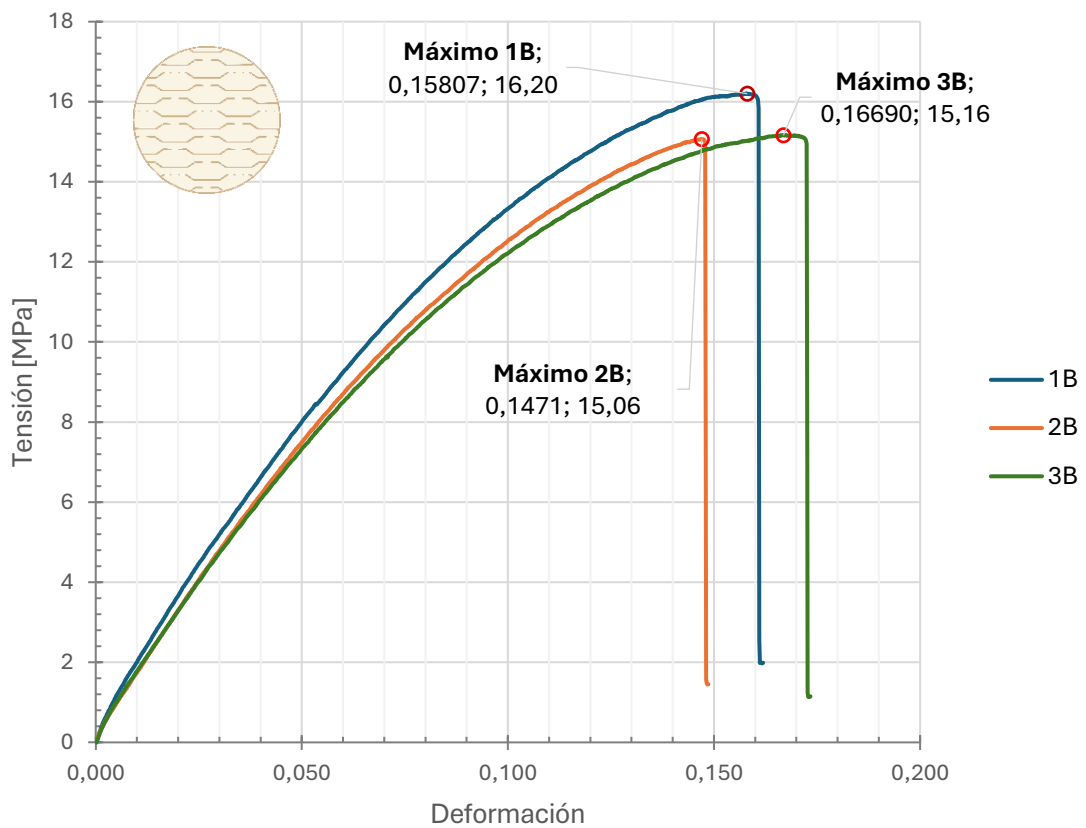
Del mismo modo que para el Patrón A, se emplea el **área efectiva** para calcular la tensión, dichas secciones se encuentran recogidas en la **Tabla 13**.

**Tabla 13.** Áreas efectivas empleadas para probetas con patrón B

	A efectiva
Probeta 1B	8,20 mm <sup>2</sup>
Probeta 2B	8,14 mm <sup>2</sup>
Probeta 3B	8,27 mm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

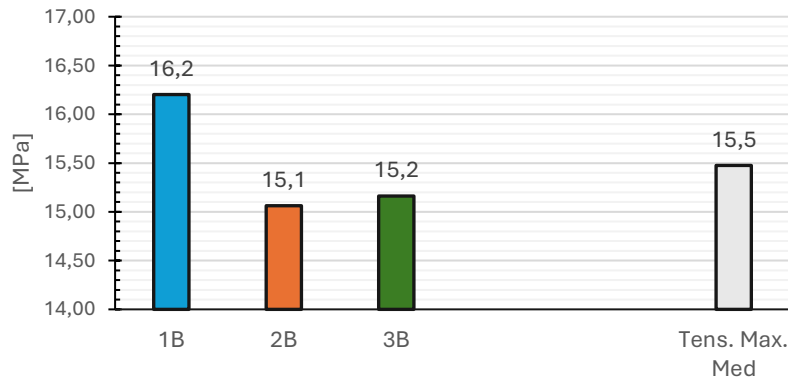
**Figura 93.** Curvas Tensión – Deformación de las probetas sin kerfing. Fuente: Elaboración propia



En la **Figura 93** se muestra los resultados para las **tres probetas con el patrón de líneas inclinadas (B) o “wave lattice”** aplicado. Con respecto a términos de fuerza-desplazamiento, se alcanzaron cargas máximas entre **12,51 kg (probeta 2B)** y **13,55 kg (probeta 1B)**, con desplazamientos de **12,51 a 12,78 mm**. Este comportamiento sugiere una mayor flexibilidad estructural a costa de una reducción de la capacidad portante máxima.

Al representar los resultados en tensión-deformación, se observa **tensiones máximas registradas** que se sitúan entre **15,1 MPa (probeta 2B)** y **16,2 MPa (probeta 3B)**, con **deformaciones comprendidas** entre **0,1471 (probeta 2B)** y **0,16690 (probeta 3B)**. La **media** es de **15,5 MPa (Figura 94)**.

**Figura 94.** Media de los valores de tensión máxima patrón B. **Fuente:** Elaboración propia



### OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA

En la **Figura 95** se aprecia el ensayo de tracción para el patrón B.

**Figura 95.** Fotografías de la configuración de ensayo de tracción para el patrón B. **Fuente:** Elaboración propia



Las probetas de MDF con el patrón B de *kerfing* revelaron un **modo de fallo consistente y predecible** tal y como se aprecia en la **Figura 96**. En las tres probetas ensayadas, la rotura se produjo de manera uniforme en la sección central con *kerfing*, específicamente a través de una de las **ranuras transversales creadas por el corte**.

Esta homogeneidad en el punto de fractura subraya la efectividad del diseño del *kerfing* para **concentrar los esfuerzos en la zona esperada**, convirtiéndola en el punto de menor resistencia a la tracción.

La forma de la rotura sigue una línea a través de los puntos de enlace más delgados entre las ranuras del *kerfing*, **indica una rotura por tracción directa en esa sección debilitada**. No parece haber un desgarro del material base. La rotura se produce de **forma "limpia"** a través de la sección más delgada, lo cual es consistente con el comportamiento de un material como el MDF, que no se deforma significativamente antes de fallar.

La rotura ocurrió esta vez de forma prácticamente súbita tras alcanzar la carga máxima.

Figura 96. Fotografías del modo de fallo en las tres probetas con patrón B tras el ensayo de tracción.  
Fuente: Elaboración propia

Probeta 1B



Probeta 2B



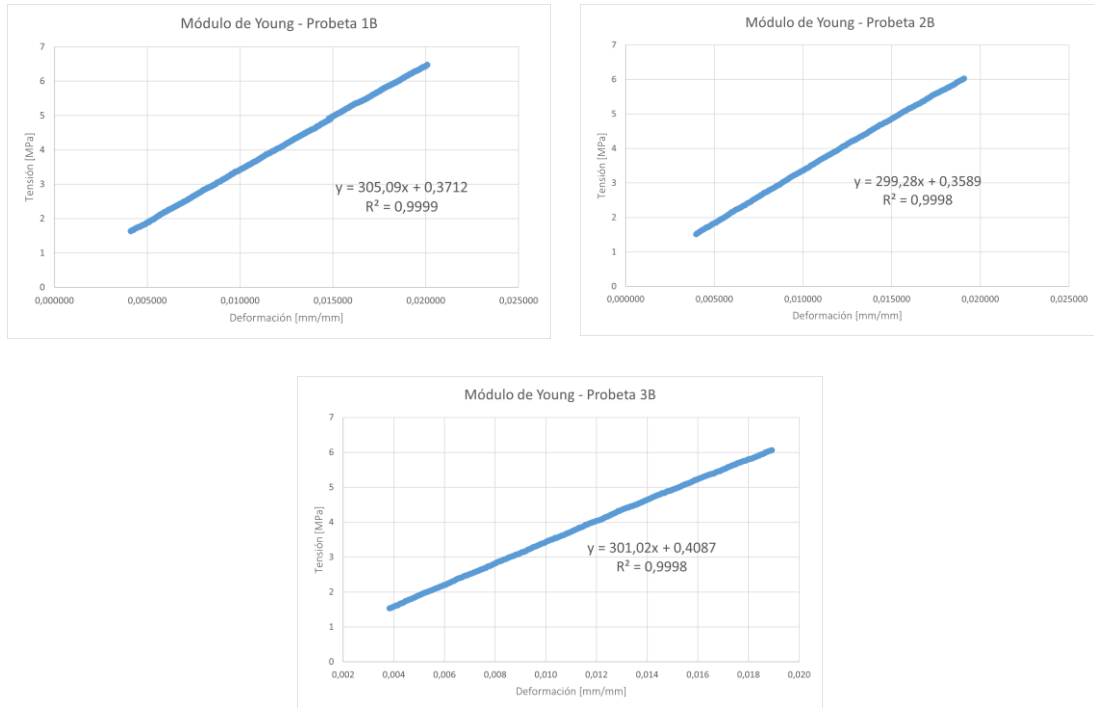
Probeta 3B



MÓDULO DE YOUNG

A partir de la zona elástica inicial de las curvas (Figura 97) se obtuvieron **módulos de Young** de 299,28 MPa, 301,02 MPa y 305,09 MPa, se muestran en la **Tabla 14**, junto con las rectas de regresión y el coeficiente de regresión ( $R^2$ ). Los valores medios se encuentran en la gráfica de barras de la **Figura 98**.

**Figura 97.** Rectas de regresión tramo elástico probetas patrón B - Módulo de Young. **Fuente:** Elaboración propia

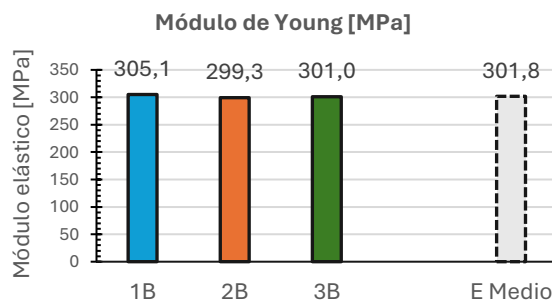


**Tabla 14.** Módulo de Young probetas con patrón B

Probeta	Módulo de Young [MPa]	Ecuación de la recta	$R^2$
1B	305,09	$y = 305,09x + 0,3712$	0,9999
2B	299,28	$y = 299,28x + 0,3589$	0,9998
3B	301,02	$y = 301,02x + 0,4087$	0,9998

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 98.** Media de los valores del módulo de Young del patrón B. **Fuente:** Elaboración propia



**RESULTADOS ESTADÍSTICOS**

Se realizó el **tratamiento estadístico con  $n = 3$  ( $t = 4,303$ )**. La **tensión máxima media** fue de **15,5 MPa**, con desviación estándar de **0,63 MPa** y coeficiente de variación del **4,08 %**. El **módulo de Young medio** fue de **301,8 MPa**, con desviación estándar de **2,98 MPa** y coeficiente de variación del **0,99 %**. Todo ello se recoge en la *Tabla 15*.

**Tabla 15.** Tratamiento estadístico probetas con patrón B

Parámetro	Valor	Unidad
Tensión máxima media ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	15,5	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	0,63	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	13,9	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	17,0	MPa
Coficiente de variación ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	4,08	%
Módulo de Young medio (E)	301,8	MPa
Desviación estándar (E)	2,98	MPa
Límite inferior 95 % (E)	294,4	MPa
Límite superior 95 % (E)	309,2	MPa
Coficiente de variación (E)	0,99	%

**Fuente:** Elaboración propia

A su vez, se calcularon los **errores porcentuales** individuales respecto a los valores medios del módulo de Young y la tensión máxima, se muestran en la *Tabla 16*. En el caso de la tensión máxima los errores relativos oscilaron entre **-4,70 %** y **+2,67 %**, mientras que, para el módulo de Young, se situaron entre **-1,09 %** y **+0,83 %**. Estos bajos errores porcentuales, especialmente para el módulo de Young, confieren una alta fiabilidad a los valores promedio obtenidos. La consistencia observada permite afirmar que las propiedades mecánicas caracterizadas **son representativas** del material y del patrón de *kerfing* ensayado, **minimizando el impacto de la variabilidad** experimental inherente a los ensayos de materiales.

**Tabla 16.** Porcentajes Errores probetas con patrón B

Probeta	E (MPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	% Error E	% Error ( $\sigma_{\text{máx}}$ )
1B	305,09	16,20	-1,09 %	-4,70 %
2B	299,28	15,06	0,83 %	2,67 %
3B	301,02	15,16	0,26 %	2,03 %

**Fuente:** Elaboración propia

4.3.4 RESULTADOS DEL PATRÓN C (ROMBOIDAL)

CURVAS TENSIÓN DEFORMACIÓN

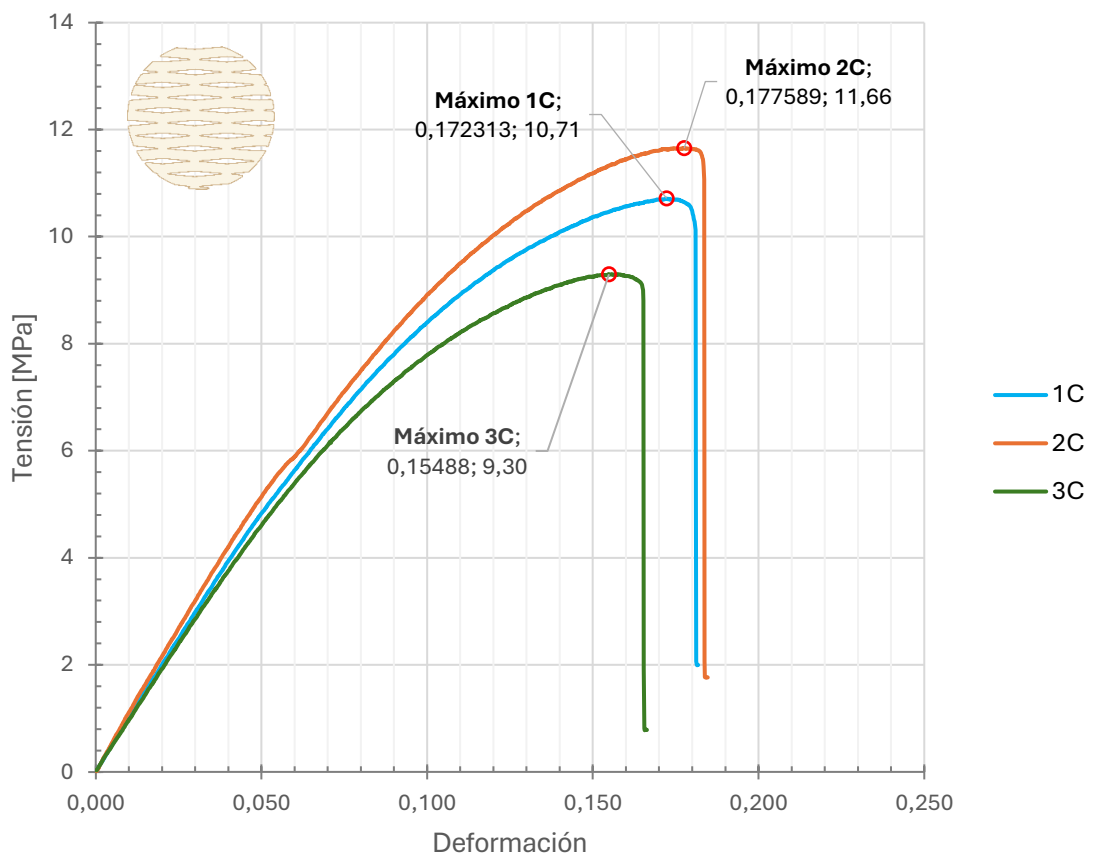
En el caso del patrón C, el área mínima resistente de cada probeta se muestra en la **Tabla 17**.

**Tabla 17.** Áreas efectivas empleadas para probetas con patrón C

	A efectiva
Probeta 1C	11,08 mm <sup>2</sup>
Probeta 2C	11,00 mm <sup>2</sup>
Probeta 3C	11,17 mm <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

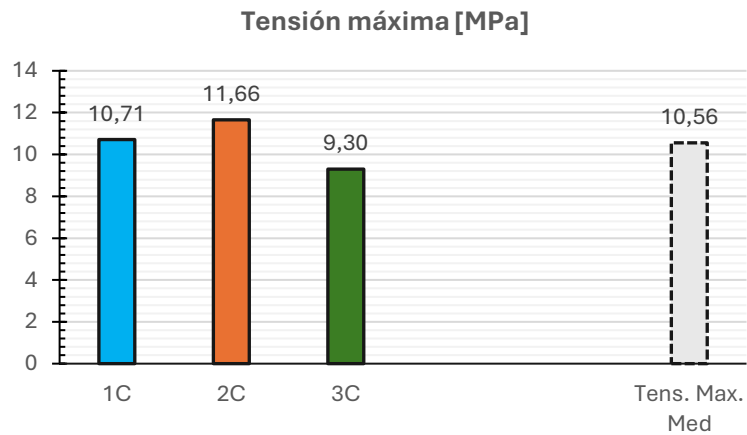
**Figura 99.** Curvas Tensión – Deformación de las probetas con patrón C. Fuente: Elaboración propia



En la **Figura 99** se muestran los resultados obtenidos del último patrón ensayado, el **patrón C o romboidal**. Los valores de la carga máxima en kilogramos varían entre **10,59 kg (probeta 3C) a 13,07 kg (probeta 2C)**, en cuanto al desplazamiento se tiene una horquilla entre **7,740 mm (probeta 3C) y 8,880 mm (probeta 2C)**. Complementariamente, se recogen en las curvas tensión–deformaciones las tensiones máximas, que oscilan entre **9,3 MPa (probeta 3C) y 11,7 MPa (probeta 2C)**, mientras que las deformaciones máximas se encuentran entre **0,154 (probeta 3C) y 0,178 (probeta 2C)**.

La distribución de los valores, así como su **media** se observa en la **Figura 100**.

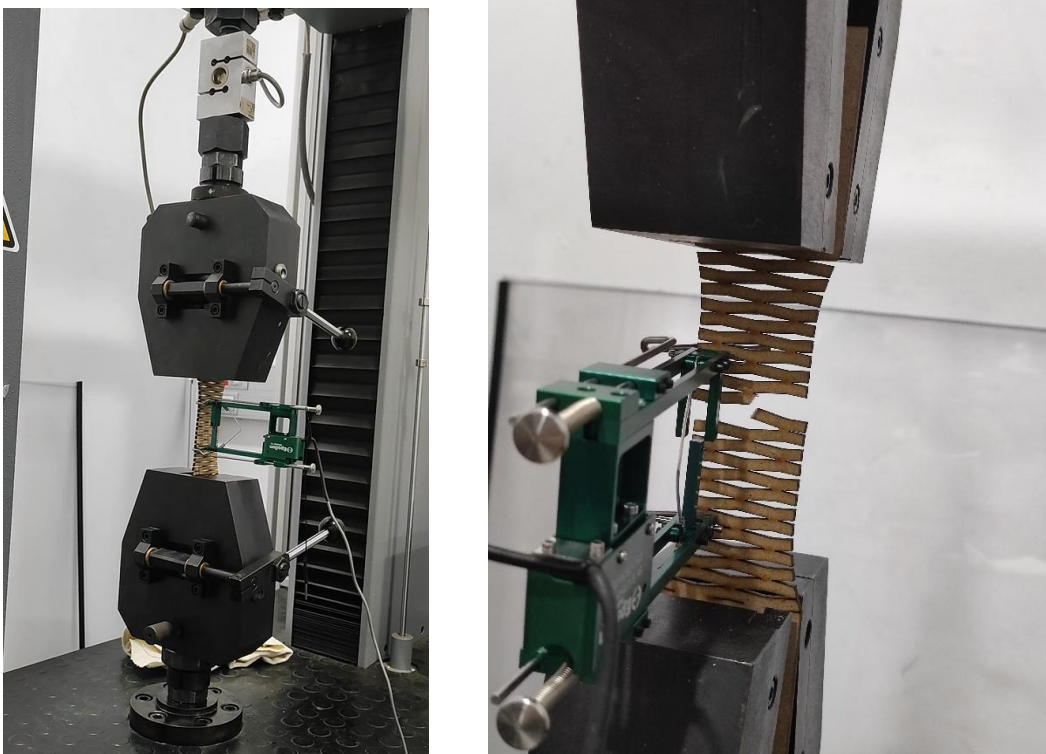
**Figura 100.** Media de los valores de la tensión máxima del patrón C. **Fuente:** Elaboración propia



### **OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA**

En la Figura 101 se puede visualizar fotografías realizadas durante el ensayo de este grupo.

**Figura 101.** Fotografías de la configuración de ensayo de tracción para el patrón C. **Fuente:** Elaboración propia



La rotura se inicia en los puntos de enlace indicados en la **Figura 102**. Después de la fractura de dichos puntos de enlace, se produce la rotura del segundo punto, que separa finalmente la probeta en **dos partes**.

**Figura 102.** Fotografías del modo de fallo en las tres probetas con patrón C tras el ensayo de tracción.  
**Fuente:** Elaboración propia

**Probeta 1C**



**Probeta 2C**



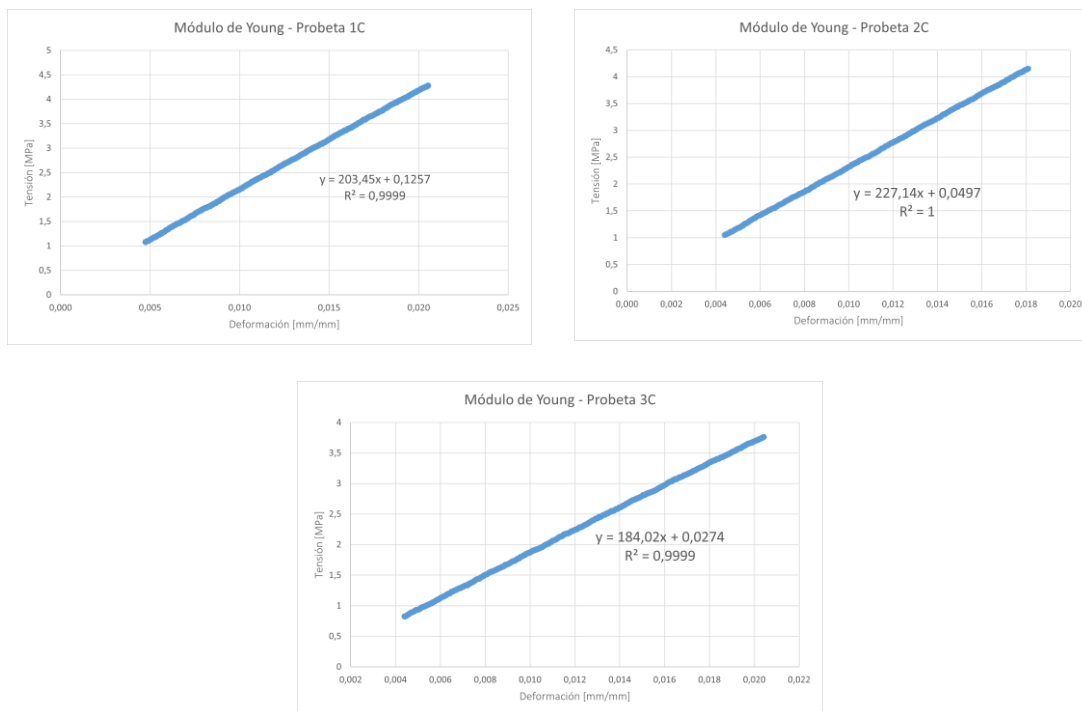
**Probeta 3C**



**MÓDULO DE YOUNG**

Los **módulos de Young** obtenidos del ajuste lineal (**Figura 103**) fueron de **203,5**, **227,1** y **184,0** MPa para las probetas 1, 2 y 3 respectivamente. Las ecuaciones de la recta, así como el coeficiente de regresión se resume en la **Tabla 18**. Los valores, así como el valor medio del **módulo elástico** para el **patrón C** se encuentra en la **Figura 104**, siendo **204,9** MPa.

**Figura 103.** Rectas de regresión tramo elástico probetas patrón C - Módulo de Young. **Fuente:** *Elaboración propia*

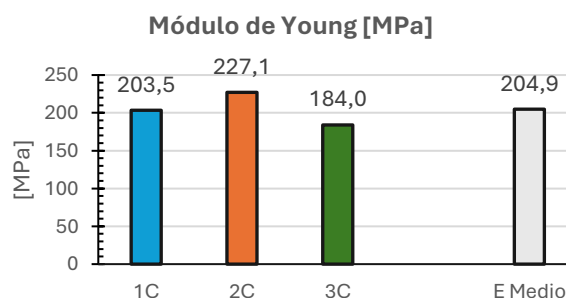


**Tabla 18.** Módulo de Young probetas con patrón C

Probeta	Módulo de Young [MPa]	Ecuación de la recta	R <sup>2</sup>
1C	203,5	$y = 203,45x + 0,1257$	0,9999
2C	227,1	$y = 227,14x + 0,0497$	1
3C	184,0	$y = 184,02x + 0,0274$	0,9999

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Figura 104.** Media de los valores del módulo de Young del patrón C. **Fuente:** *Elaboración propia*



RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Para el patrón C (*kerfing* con rombos), la tensión máxima media obtenida fue de **10,6 MPa**, con una desviación estándar de **1,19 MPa** y un coeficiente de variación del **11,24 %**. Este valor indica una **variabilidad moderada** en la resistencia a tracción de las probetas, posiblemente asociada a la orientación inclinada de las ranuras, que genera zonas de concentración de esfuerzos menos predecibles. Bajo un intervalo de confianza del **95 %** ( $t = 4,303$ ;  $n = 3$ ), los límites inferior y superior se sitúan entre **7,6 MPa** y **13,5 MPa**, respectivamente.

En cuanto al comportamiento elástico, el **módulo de Young medio** fue de **204,9 MPa**, con una desviación estándar de **21,6 MPa** y un coeficiente de variación del **10,54 %**. Estos valores reflejan una **dispersión comparable** a la observada en la tensión máxima, lo que sugiere que la geometría del *kerf* afecta tanto a la rigidez como a la resistencia final de las probetas. Los límites de confianza al **95 %** para el módulo de Young se sitúan entre **151,2 MPa** y **258,5 MPa**, datos recogidos en la *Tabla 19*.

Tabla 19. Tratamiento estadístico probetas con patrón C

Parámetro	Valor	Unidad
Tensión máxima media ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	10,6	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	1,19	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	7,6	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	13,5	MPa
Coeficiente de variación ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	11,24	%
Módulo de Young medio (E)	204,9	MPa
Desviación estándar (E)	21,6	MPa
Límite inferior 95 % (E)	151,2	MPa
Límite superior 95 % (E)	258,5	MPa
Coeficiente de variación (E)	10,54	%

Fuente: Elaboración propia

Tal como se muestra en la *Tabla 20*, los errores porcentuales individuales respecto a la media permiten observar la consistencia de los resultados obtenidos para cada probeta. En el caso del **módulo de Young**, los errores relativos varían entre **-10,87 %** (probeta 2) y **+10,17 %** (probeta 3), mientras que para la tensión máxima oscilan entre **-10,42 %** y **+11,90 %**. Estos márgenes reflejan una **variabilidad significativa**, especialmente en comparación con el grupo de control (probetas compactas), lo que pone de manifiesto que el patrón C introduce una mayor sensibilidad a factores locales como la ejecución del corte, la distribución de tensiones o la propagación de fisuras.

Tabla 20. Porcentajes Errores probetas con patrón C

Probeta	E (MPa)	% Error E	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	% Error ( $\sigma_{\text{máx}}$ )
1	203,45	0,69	10,71	-1,48
2	227,14	-10,87	11,66	-10,42
3	184,02	10,17	9,30	11,90

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.5 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE PROBETAS EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN

##### CURVAS TENSIÓN DEFORMACIÓN

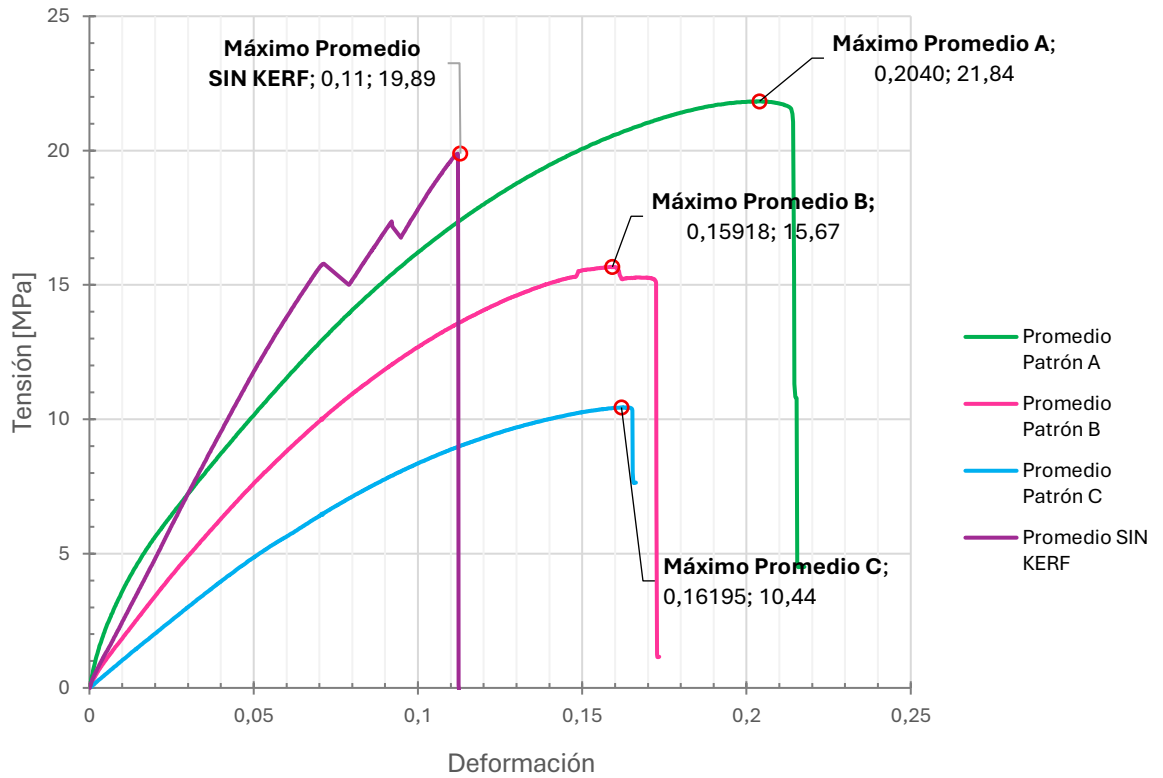
En la *Figura 105* se presentan los resultados de las **curvas promedio tensión-deformaciones correspondientes** a todos los grupos ensayados en el ensayo de tracción.

Cabe señalar que la **curva promedio del conjunto sin *kerf*** presenta cierta irregularidad, con picos sucesivos en lugar de una evolución continua como se da en los patrones. Este comportamiento se debe a la **dispersión natural entre las probetas ensayadas**, aunque todas alcanzaron valores próximos de resistencia máxima, las ligeras diferencias en rigidez producen **discontinuidades al promediarse** los datos individuales.

En cuanto a los resultados numéricos (recogidos en *la Tabla 21*), el conjunto **sin *kerf*** alcanza el nivel de tensión con un promedio de **19,89 MPa** y una deformación asociada de **0,11**, confirmando su elevada rigidez, pero limitada capacidad de elongación. En comparación, el **Patrón A** muestra el mayor rendimiento, alcanzando **21,84 MPa** y una deformación de **0,20**, lo que combina una alta resistencia con una ductilidad notablemente superior a las probetas compactas. El **Patrón B** registra un valor intermedio de **15,67 MPa** con **0,16** de deformación, mientras que el **Patrón C** obtiene el rendimiento más reducido, con **10,44 MPa** y **0,16** de deformación.

La comparación global evidencia **dos tendencias claras**: por un lado, la introducción de cortes reduce la rigidez inicial en el material, como se refleja en los valores del módulo de Young, que alcanza **366,84 MPa en el Patrón A**, **301,8 MPa en el Patrón B** y **204,9 MPa en el Patrón C**, frente al valor de **2455,6 MPa** de la probeta **sin *kerf***; y, por otro lado, los patrones con cortes mejoran la capacidad de deformación, especialmente en el caso del **Patrón A**.

Figura 105. Curva Tensión - Deformación del promedio de las probetas con kerfing. Fuente: Elaboración propia



Conviene señalar que los valores máximos de la gráfica difieren ligeramente con respecto a los de la **Tabla 21**. Esta variación se debe a los ajustes realizados en la curva para obtener una representación lo más depurada posible. No obstante, los resultados de la **Tabla 21** constituyen los más precisos desde el punto de vista matemático.

Tabla 21. Resumen de los valores medios obtenidos en el ensayo de tracción

Tipo de probeta	F <sub>máx</sub> media (kg)	Deformación media	E medio (MPa)	σ <sub>máx</sub> media (MPa)
Sin patrón	228,95	0,088	2455,6	18,61
Patrón A	18,65	0,217	366,84	21,86
Patrón B	12,95	0,161	301,80	15,48
Patrón C	11,92	0,177	204,87	10,56

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Ensayo de flexión

En este apartado, se exponen los resultados obtenidos del **ensayo de flexión** realizado en **15 probetas**, divididas en grupos según el patrón de corte aplicado, incluida la opción sin patrón o compacta.

Se expondrán **los valores de carga máxima, flecha o deflexión máxima, tensión máxima, y módulo de Young en flexión**, junto con su correspondiente **tratamiento estadístico**. Al igual que con el anterior ensayo, en el *Anexo V - Ensayo de flexión* se recogen los resultados individuales y condiciones particulares del ensayo.

Cabe mencionar que las curvas obtenidas en este ensayo presentan un **carácter irregular**, consecuencia principalmente del procedimiento empleado para aplicar la carga. En este caso **la carga se transfirió manualmente** mediante el sistema definido en *Metodología*. Este procedimiento no permitió un incremento perfectamente uniforme como se había esperado en primer lugar, lo que generó oscilaciones y saltos en el registro. Además, en todas las curvas se aprecia un aumento de la pendiente en la fase final, debido a que, al agotarse el agua utilizada como carga, fue necesario completarla manualmente con las manos.

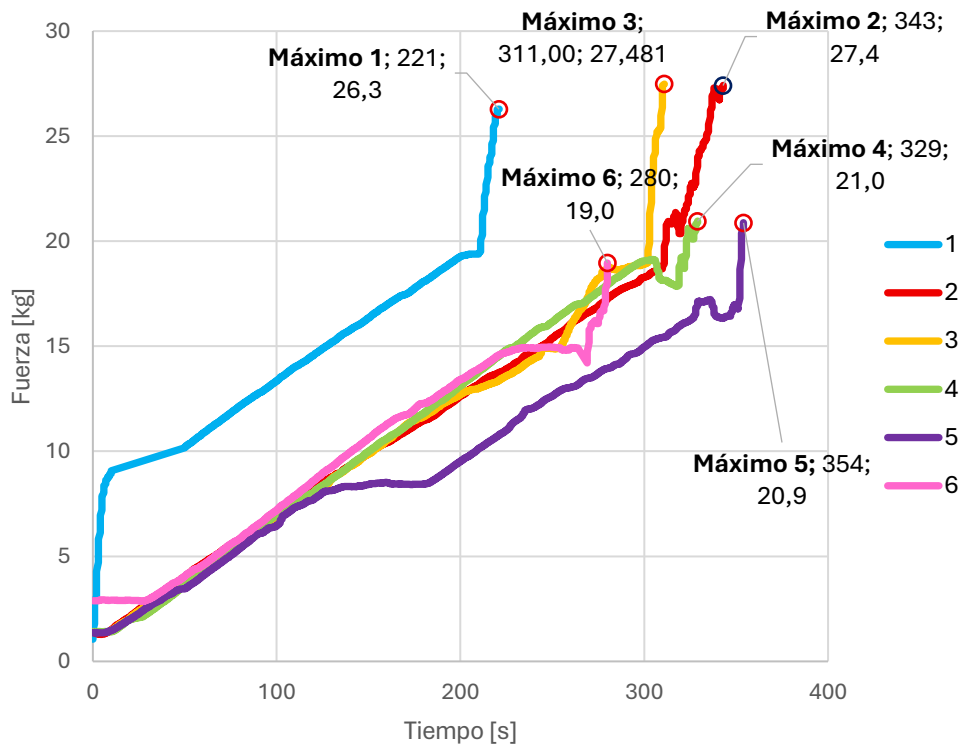
Asimismo, las **curvas aparecen en unidades de carga (kg) y tiempo (s)**, ya que, debido al carácter experimental de este ensayo, no fue posible registrar el **desplazamiento vertical de la probeta de manera automática**. Para poder obtener la deformación en cada instante de forma manual, hubiera sido necesario medirla en intervalos de tiempo muy reducidos, algo inviable con los medios disponibles.

Por otro lado, cabe mencionar que las curvas parten de una **precarga**, esto se debe únicamente a que el **registro de datos** en esos casos comenzaba una vez la célula de carga y el sistema de aplicación del peso (aproximadamente 1,2 kg) ya estaban colocados. Merece resaltar que dicha **precarga** se liberaba de **forma progresiva** al inicio del ensayo y en todos los casos, sin causar ningún impacto.

##### 4.4.1 RESULTADOS DE LA PROBETA SIN KERFING CURVAS FUERZA - TIEMPO

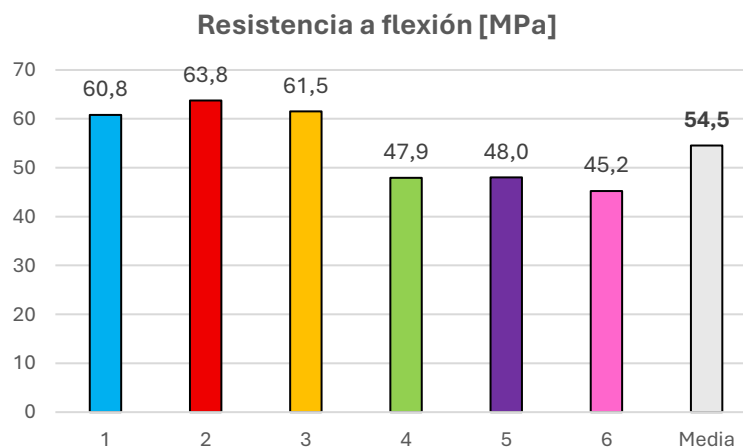
En la **Figura 106** se muestran las curvas fuerza-tiempo obtenidas en el ensayo de flexión para cada una de las seis probetas sin *kerfing*. Se observa un comportamiento elástico inicial seguido de una fractura repentina en el punto de máxima carga, donde encontramos valores que oscilan desde **19 kg a 27,481 kg**. En cuanto a la deflexión máxima, oscila entre **17,68 y 24,9 mm** (promedio de **21,41 mm**).

Figura 106. Curva Fuerza - Tiempo de las probetas sin kerfing en el ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia

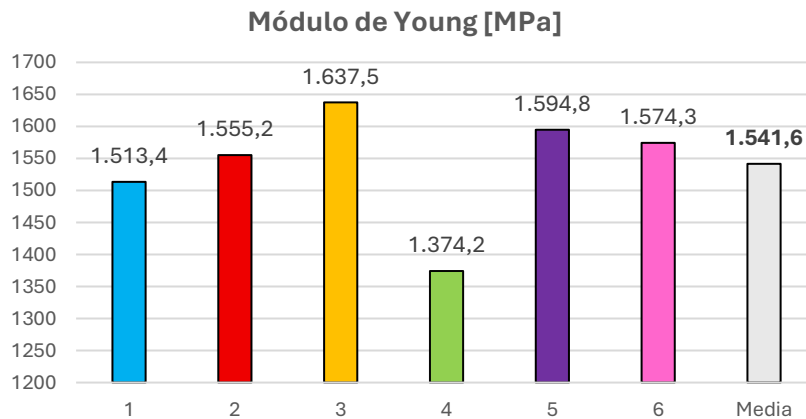


En la Figura 107 se recogen los valores medios de resistencia a flexión, los cuales se sitúan en torno a los 54,5 MPa, mientras que el módulo de Young medio, mostrado en la Figura 108, alcanza los 1542 MPa. Estos resultados confirman una elevada rigidez estructural en ausencia de cortes.

Figura 107. Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas sin patrón. Fuente: Elaboración propia



**Figura 108.** Media de los valores del módulo de Young de las probetas sin patrón. **Fuente:** Elaboración propia



### RESULTADOS ESTADÍSTICOS

El análisis estadístico ( $n=6$ ;  $t= 2,571$ ) que se recoge en la *Tabla 22* muestra una baja dispersión de los datos, con coeficientes de variación del **2,48 %** para la tensión máxima y del **4,02 %** para el módulo de Young. Esto indica una buena repetibilidad del ensayo en este grupo.

**Tabla 22.** Tratamiento estadístico probetas sin patrón

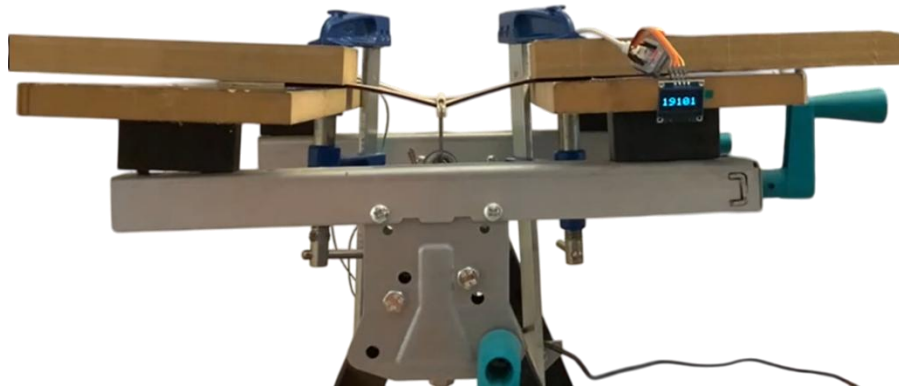
Parámetro	Valor	Unidad
Tensión máxima media ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	62,0	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	1,539	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	60,415	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	63,645	MPa
Coefficiente de variación ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	2,481	%
Módulo de Young medio (E)	1568,7	MPa
Desviación estándar (E)	63,132	MPa
Límite inferior 95 % (E)	1502,5	MPa
Límite superior 95 % (E)	1635,0	MPa
Coefficiente de variación (E)	4,024	%

**Fuente:** Elaboración propia

**OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA**

El ensayo para las probetas compactas se puede observar en la **Figura 109**.

**Figura 109.** Configuración del ensayo de flexión para las probetas compactas. **Fuente:** Elaboración Propia



Visualmente (**Figura 110**), todas las probetas presentaron una rotura frágil localizada, iniciándose en la zona de mayor sollicitación, es decir la sección transversal central donde se aplicó la carga.

**Figura 110.** Fotografías del modo de fallo en las seis probetas sin tras el ensayo de flexión. **Fuente:** Elaboración propia

**Probeta 1**



**Probeta 2**



Probeta 3



Probeta 4



Probeta 5



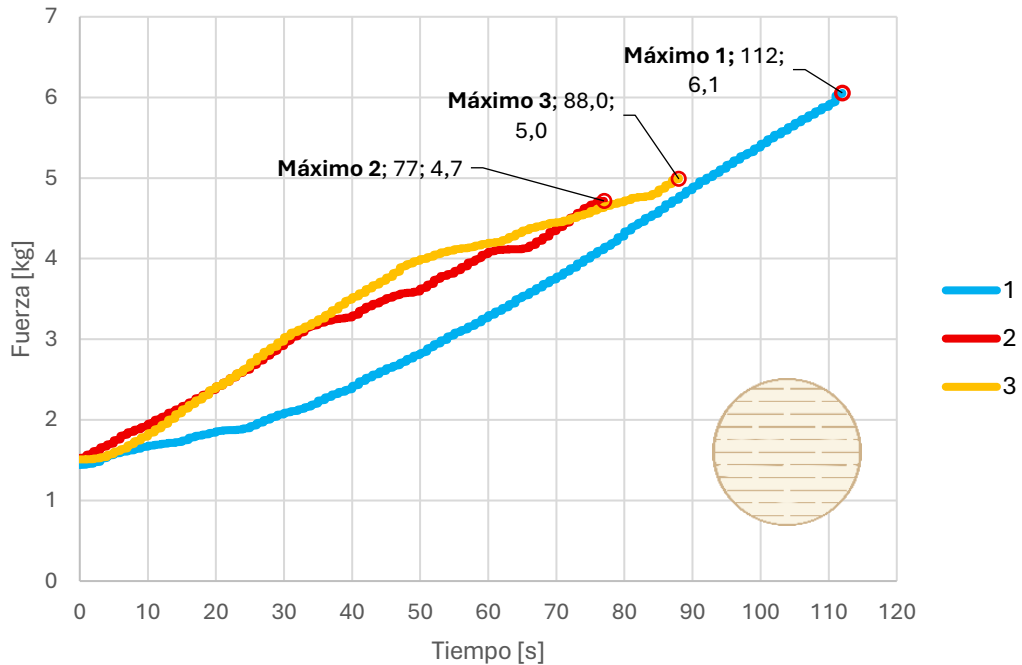
Probeta 6



#### 4.4.2 RESULTADOS DEL PATRÓN A (LINEAL)

##### CURVAS FUERZA – TIEMPO

**Figura 111.** Curva Fuerza - Tiempo de las probetas con el patrón A en el ensayo de flexión. **Fuente:** Elaboración propia

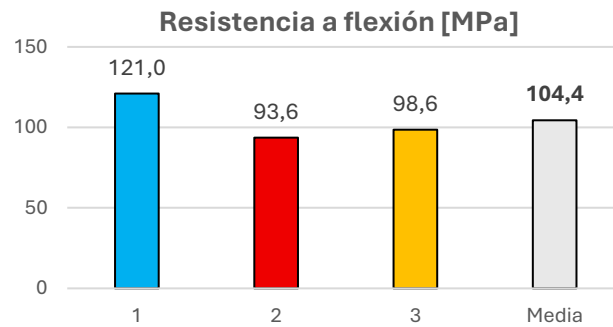


Las probetas **con patrón A**, consistente en ranuras rectas paralelas en la zona central, mostraron una notable modificación en su comportamiento estructural. En la **Figura 111** se presentan las curvas fuerza-tiempo, donde se aprecia una reducción significativa en la carga máxima soportada respecto al grupo sin patrón, con valores entre **4,7 y 6,1 kg**.

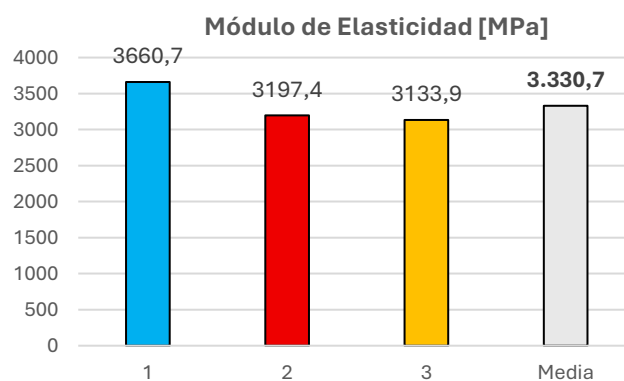
Debido a la disminución de la sección resistente, el **valor medio de resistencia a flexión** (*Figura 112*) fue de **104,4 MPa**, superando incluso al grupo de referencia. Este efecto se atribuye a una concentración de tensiones localizada. El **módulo de Young medio** (*Figura 113*) fue de **3330,7 MPa**.

En cuanto a la deflexión, oscila entre **17,8 y 20,16 mm**, con un **promedio de 19 milímetros**.

**Figura 112.** Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas con patrón A. **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 113.** Media de los valores del módulo de Young de las probetas con patrón A. **Fuente:** Elaboración propia



### RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Se realizó el **análisis estadístico** con el tamaño de muestra  $n = 3$  ( $t = 4,303$ ). La *Tabla 23* muestra una **mayor dispersión** respecto al grupo sin patrón, especialmente en la tensión máxima, con un coeficiente de variación del **13,98 %**.

**Tabla 23.** Tratamiento estadístico probetas con patrón A

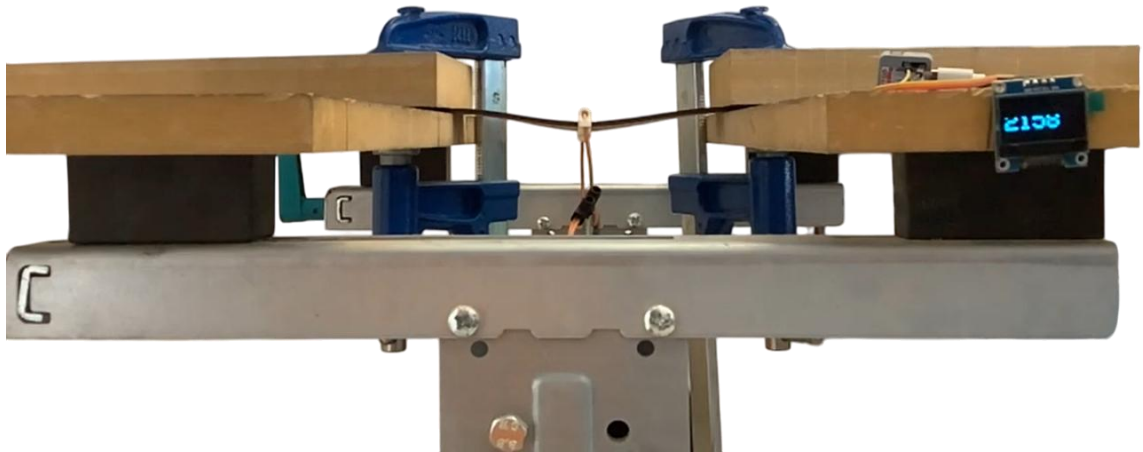
Parámetro	Valor	Unidad
Tensión máxima media ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	104,4	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	14,6	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	68,1	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	140,7	MPa
Coefficiente de variación ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	13,982	%
Módulo de Young medio (E)	3330,7	MPa
Desviación estándar (E)	287,6	MPa
Límite inferior 95 % (E)	2616,2	MPa
Límite superior 95 % (E)	4045,2	MPa
Coefficiente de variación (E)	8,635	%

**Fuente:** Elaboración propia

*OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA*

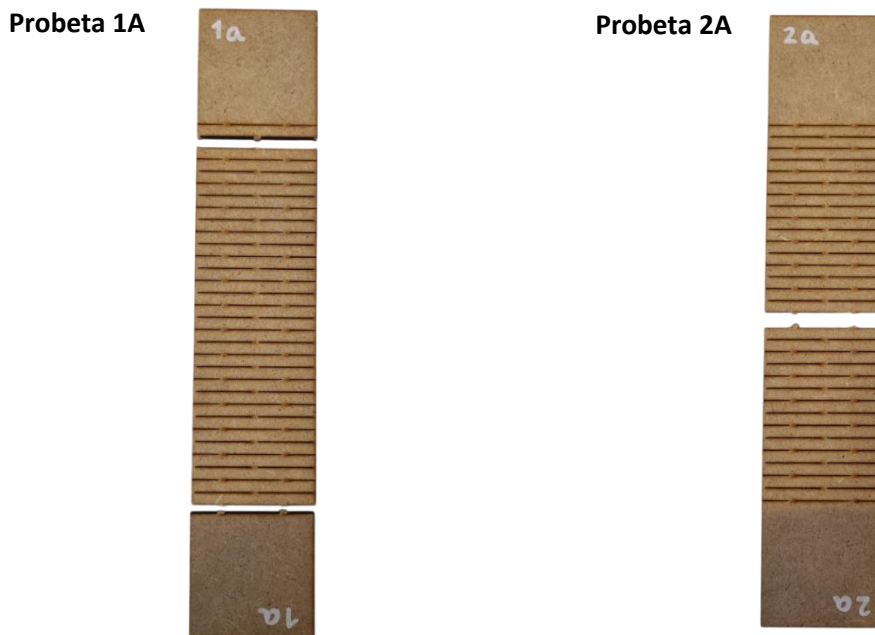
En la **Figura 114** se observa el sistema de ensayo experimental para las probetas del grupo A.

**Figura 114.** Configuración ensayo de flexión para las probetas de patrón A. **Fuente:** Elaboración propia



Visualmente (**Figura 115**), las probetas presentaron roturas asociadas a las zonas debilitadas por el *kerfing*, con modos de fallo que se inician en las entallas y se propagan de forma frágil. En el caso de la **probeta 1A**, se observa que se inició en los extremos, puede ser debido a desalineaciones de los elementos de sujeción y que por ello se generasen **tensiones más altas en los extremos** que en el centro.

**Figura 115.** Fotografías del modo de fallo de las probetas con patrón A. **Fuente:** Elaboración propia



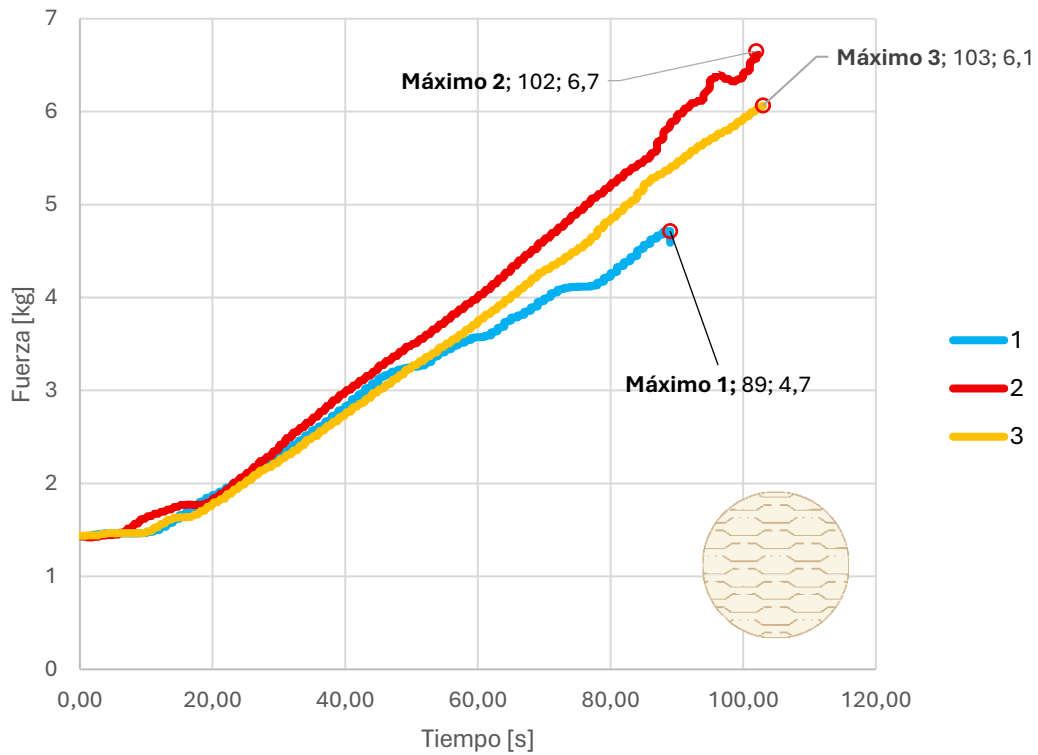
Probeta 3A



4.4.3 RESULTADOS DEL PATRÓN B (WAVE O LÍNEAS INCLINADAS)

CURVAS FUERZA - TIEMPO

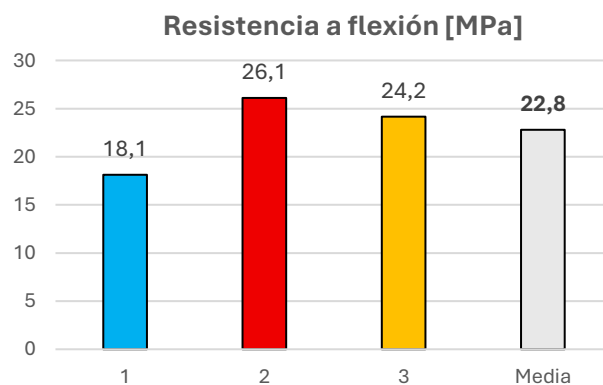
Figura 116. Curva Fuerza - Tiempo de las probetas con el patrón B en el ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia



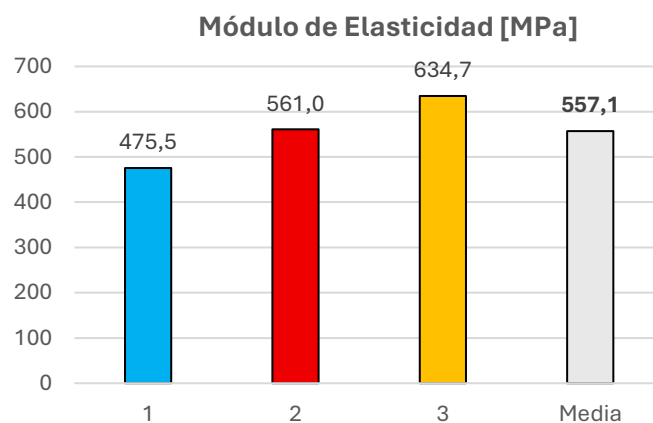
Las probetas con **patrón B**, caracterizado por ranuras en ángulo (wave pattern), evidencian un comportamiento **más dúctil**, con mayores desplazamientos antes del fallo (**Figura 116**). Alcanza picos de fuerza desde 4,7 a 6,7 kg.

La **resistencia a flexión media** (**Figura 117**) fue de **22,8 MPa**, mientras que el **módulo de Young medio** (**Figura 118**) se situó en **557,1 MPa**. Los valores menores se deben a que, a diferencia del patrón recto, los cortes seguían una trayectoria ondulada que aumentaba la sección efectiva en la zona central, reduciendo así la concentración de tensiones.

**Figura 117.** Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas con patrón B. **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 118.** Media de los valores del módulo de Young de las probetas con patrón B. **Fuente:** Elaboración propia



En cuanto a la medida de la **deflexión**, el patrón B posee valores que varían desde los **22,7 mm** hasta los **28 mm**, con un valor **promedio de 24,6 mm**.

### RESULTADOS ESTADÍSTICOS

Los valores estadísticos reflejan una elevada variabilidad (**Tabla 24**), con un coeficiente de variación del **18,26 %** en la resistencia y del **14,30 %** en el módulo elástico, indicando una menor homogeneidad en la respuesta estructural.

**Tabla 24.** Tratamiento estadístico probetas con patrón B

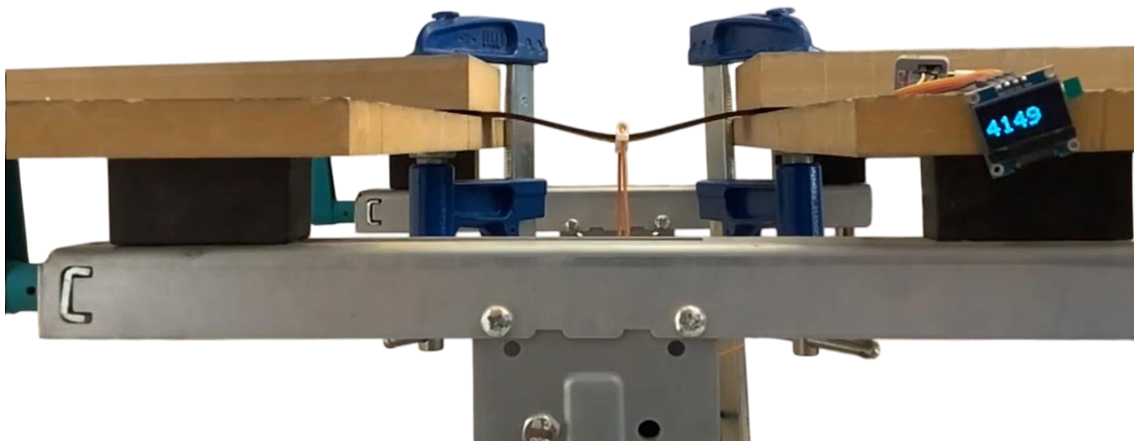
Parámetro	Valor	Unidad
Tensión máxima media ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	22,8	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	4,162	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	12,5	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	33,1	MPa
Coefficiente de variación ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	18,255	%
Módulo de Young medio (E)	557,1	MPa
Desviación estándar (E)	79,669	MPa
Límite inferior 95 % (E)	359,1	MPa
Límite superior 95 % (E)	755,0	MPa
Coefficiente de variación (E)	14,302	%

Fuente: Elaboración propia

### OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA

Respecto al ensayo, se puede observar las fotografías tomadas durante el ensayo en la **Figura 119**.

**Figura 119.** Configuración ensayo de flexión para las probetas de patrón B. Fuente: Elaboración propia



En cuanto a la rotura (**Figura 120**), se observa que en todas las probetas rompe uno o dos extremos debido a las altas tensiones generadas por los elementos de sujeción en los apoyos.

Figura 120. Fotografías del modo de fallo de las probetas con patrón B. Fuente: Elaboración propia

Probeta 1B



Probeta 2B



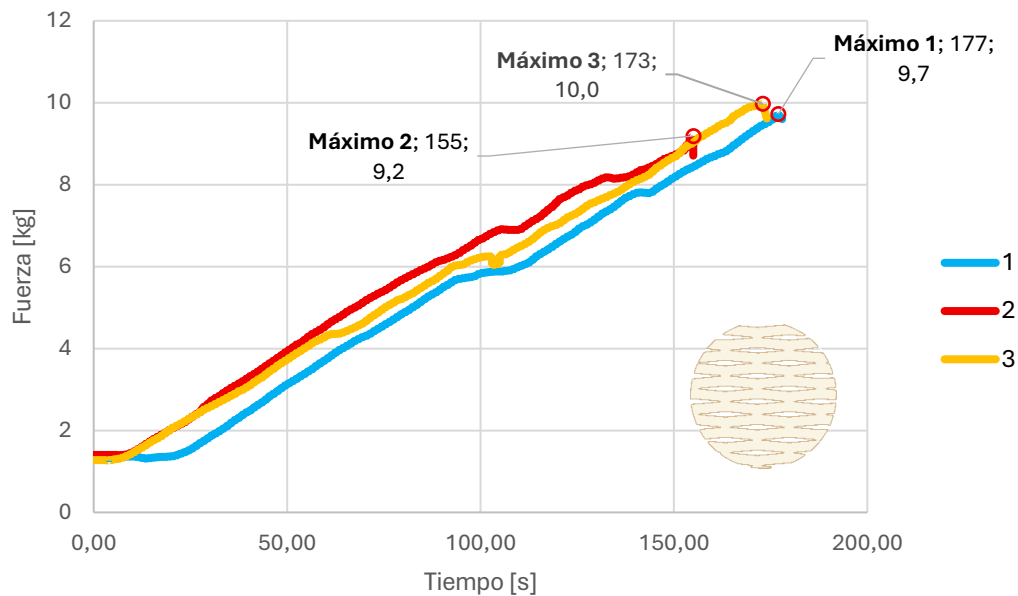
Probeta 3B



#### 4.4.4 RESULTADOS DEL PATRÓN C (ROMBOIDAL)

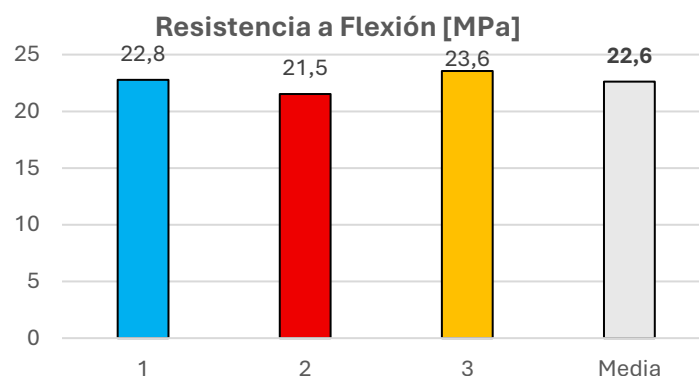
##### CURVAS FUERZA - TIEMPO

**Figura 121.** Curva Fuerza - Tiempo de las probetas con el patrón C en el ensayo de flexión. **Fuente:** Elaboración propia

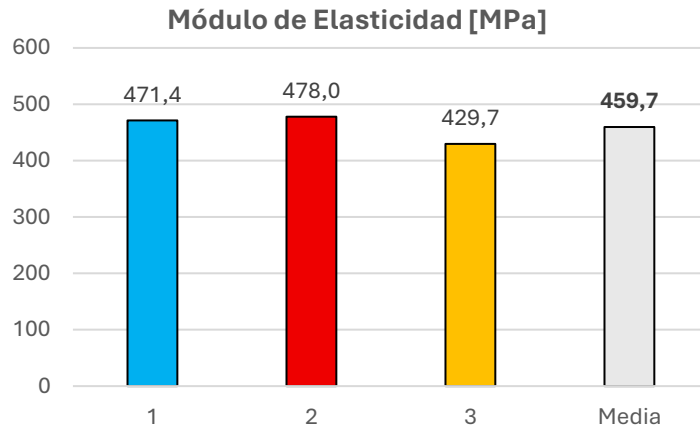


Las probetas con **patrón C** presentan un diseño romboidal que da lugar a un comportamiento intermedio entre los patrones B y A. Como se muestra en la **Figura 121**, las curvas fuerza-tiempo indican un aumento progresivo de la carga hasta alcanzar el fallo, que se encuentra en el umbral de **9,2 y hasta 10 kg**. La resistencia a flexión media fue de **22,6 MPa (Figura 122)**, muy similar a la del patrón B, mientras que el módulo de **Young medio (Figura 123) fue de 459,7 MPa, ligeramente inferior**. En este caso la sección central coincide con la sección de las probetas compactas (no hay cortes en la misma). La **flecha** es de 27,4 a 33,5 mm, con 30 mm como valor promedio.

**Figura 122.** Media de los valores de resistencia a flexión de las probetas con patrón C. **Fuente:** Elaboración propia



**Figura 123.** Media de los valores del módulo de Young de las probetas con patrón C. **Fuente:** Elaboración propia



**RESULTADOS ESTADÍSTICOS**

El análisis estadístico (*Tabla 25*) muestra una menor dispersión de los datos que en el patrón B, lo que indica **mayor consistencia en el comportamiento** estructural.

**Tabla 25.** Tratamiento estadístico probetas con patrón C

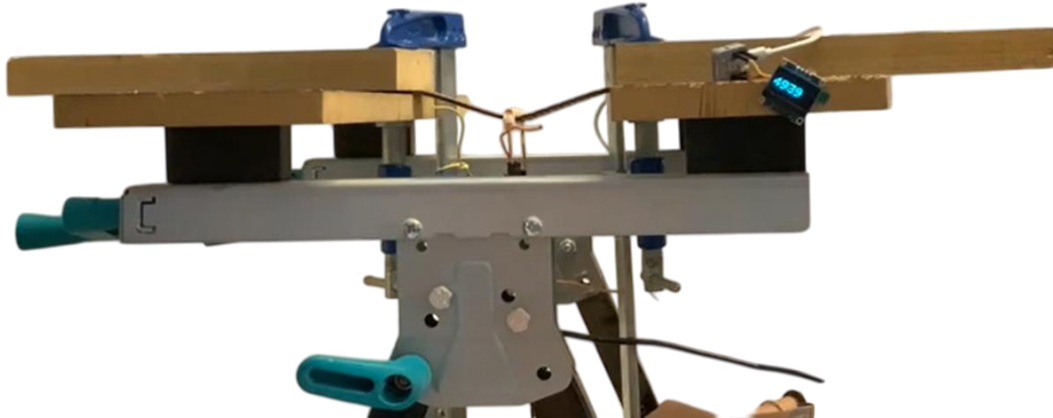
Parámetro	Valor	Unidad
Tensión máxima media ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	22,6	MPa
Desviación estándar ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	1,024	MPa
Límite inferior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	20,1	MPa
Límite superior 95 % ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	25,2	MPa
Coefficiente de variación ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ )	4,528	%
Módulo de Young medio (E)	459,7	MPa
Desviación estándar (E)	26,176	MPa
Límite inferior 95 % (E)	394,7	MPa
Límite superior 95 % (E)	524,7	MPa
Coefficiente de variación (E)	5,694	%

**Fuente:** Elaboración propia

### OBSERVACIÓN DEL MODO DE ROTURA

En la Figura 124, se observa el ensayo experimental de flexión para el último patrón estudiado, el patrón C.

**Figura 124.** Configuración ensayo de flexión para las probetas de patrón C. **Fuente:** Elaboración propia



En las imágenes del fallo (*Figura 125*), se aprecia una rotura en la zona central, iniciada en los vértices del patrón romboidal. El fallo fue relativamente frágil pero más controlado que en el patrón A ya que **sucede en la sección central** en todos los casos.

**Figura 125.** Fotografías del modo de fallo de las probetas con patrón C. **Fuente:** Elaboración propia

**Probeta 1C**



**Probeta 2C**



Probeta 3C



#### 4.4.5 RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE PROBETAS EN EL ENSAYO DE FLEXIÓN

Tras el análisis individual de las probetas sometidas al ensayo de flexión, se presenta a continuación una **tabla resumen** con los **valores medios obtenidos** para cada tipología de patrón. La *Tabla 26* permite identificar con claridad las **diferencias de comportamiento mecánico** según el diseño de los cortes y compararlas con la respuesta estructural de las probetas sin patrón.

Se observa cómo las **probetas sin patrón presentan los valores más altos de carga máxima soportada y módulo de elasticidad**, mientras que los distintos patrones provocan una disminución de la rigidez estructural, con variaciones según el tipo de ranurado. El **patrón A**, debido a su reducida sección resistente, presenta una **mayor fragilidad** (carga absorbida de 5,26 kg y flecha de 19 mm), asociada a una alta concentración de esfuerzos (104,4 MPa). Por el contrario, los **patrones B y C** favorecen una **mayor ductilidad y deformaciones más amplias** antes de la rotura (flechas superiores a las del patrón A y similares entre sí: 24,58 para el patrón B y 30,12 mm para el **Patrón C**), lo que conlleva una reducción significativa del **módulo de Young**. A pesar de que ambos mantienen valores semejantes de desplazamiento vertical, el **Patrón C** alcanza **cargas más elevadas** (9,63 kg), mientras que el **Patrón B** se mantiene en rangos de valores **intermedios**, más **próximos** a los del **Patrón A**, como es 5,81 kg.

La **Tabla 26** sintetiza estos resultados y pone de manifiesto que las **probetas sin ranuras** son las que presentan **mayor rigidez ( $E \approx 1542$  MPa)** y **resistencia ( $\sigma \approx 54$  MPa)**, seguidas por las del **Patrón C (romboidal)**, que combina una **elevada deformabilidad con una resistencia destacada**. En segundo lugar, el **Patrón B (líneas inclinadas u ondas)**, caracterizado por una deformabilidad elevada, pero resistencia más limitada. Finalmente, el **Patrón A (lineal)** se sitúa en la cola, con la menor resistencia y deformabilidad reducida.

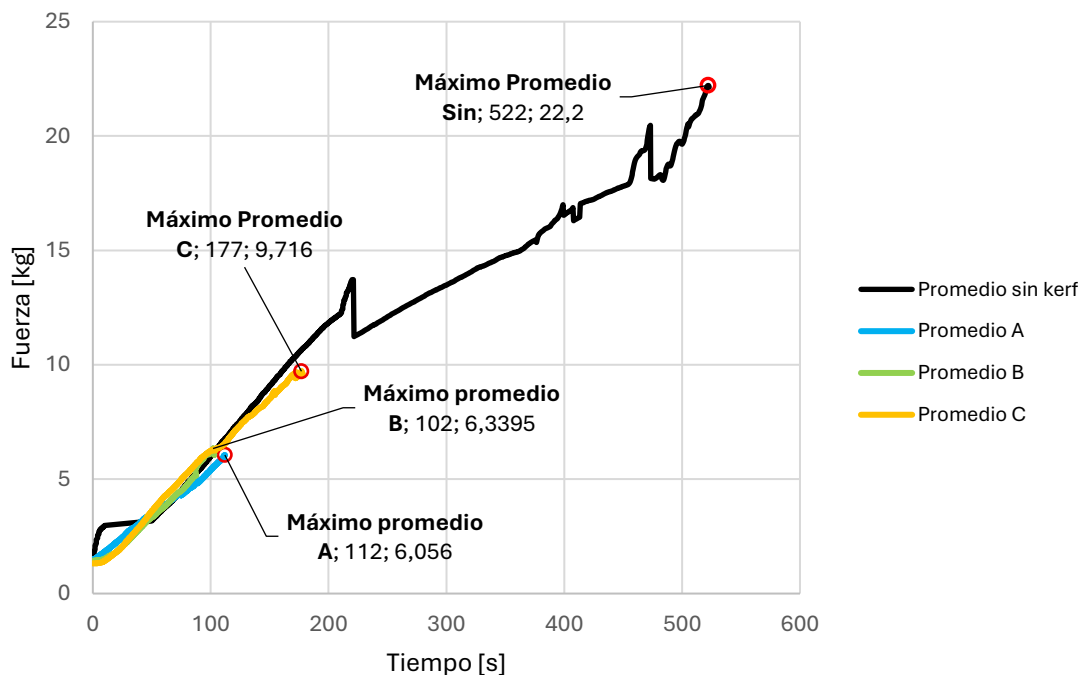
**Tabla 26.** Resumen de los valores medios obtenidos en el ensayo de flexión

Tipo de probeta	$F_{m\acute{a}x}$ media (kg)	$\delta_{m\acute{a}x}$ media (mm)	$E_f$ medio (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ media (MPa)
Sin patrón	23,7	21,41	1541,6	54,5
Patrón A	5,26	19,00	3330,7	104,4
Patrón B	5,81	24,58	557,1	22,8
Patrón C	9,63	30,12	459,7	22,62

Fuente: Elaboración propia

Las curvas Fuerza-Tiempo promedio de cada grupo (**Figura 126**) reflejan estas diferencias de comportamiento estructural de manera gráfica, los valores numéricos no son exactamente iguales debido a los ajustes para conseguir una curva lo más pulida posible, pese a las imperfecciones.

**Figura 126.** Curva Fuerza - Tiempo de los valores promedio de cada grupo de probetas. Fuente: Elaboración propia



### 4.5 Simulaciones digitales

En este apartado se exponen los resultados de las simulaciones por elementos finitos mediante el Software *SolidWorks Simulation*. En él se observarán las distribuciones de tensiones, desplazamientos y deformaciones unitarias bajo condiciones idénticas a las de cada grupo de los ensayos físicos experimentales. En la **Tabla 27** se recogen las cargas aplicadas en cada caso.

**Tabla 27.** Carga aplicada en cada probeta las simulaciones

Ensayo de Tracción	
Patrón de corte	Carga aplicada [N]
Sin patrón	2280
Patrón A	183
Patrón B	127
Patrón C	117

Ensayo de Flexión	
Patrón de corte	Carga aplicada [kgf]
Sin patrón	23,7
Patrón A	5,26
Patrón B	5,81
Patrón C	9,63

Fuente: Elaboración propia

Se simularon **cuatro configuraciones diferentes**: una probeta sin patrón (compacta) y tres con *kerfing* (patrones A, B y C), manteniendo en todos los casos las mismas condiciones de contorno y propiedades de material, así como un espesor de 3 milímetros.

Además, se estudió la **influencia del espesor del MDF**, repitiendo cada simulación para espesores de **3 mm, 9 mm y 16 milímetros**. El estudio se desarrolló como un análisis estático lineal, con condiciones de carga y sujeción equivalentes a las del ensayo de tracción y del ensayo de flexión con extremos empotrados. Se aplicó un mallado de tipo **malla sólida triangular con control de refinamiento en base a curvatura** en las zonas críticas. Para mayor detalle, se ha realizado un anexo, que recoge más información gráfica y numérica (**Anexo VI – Simulaciones Digitales**).

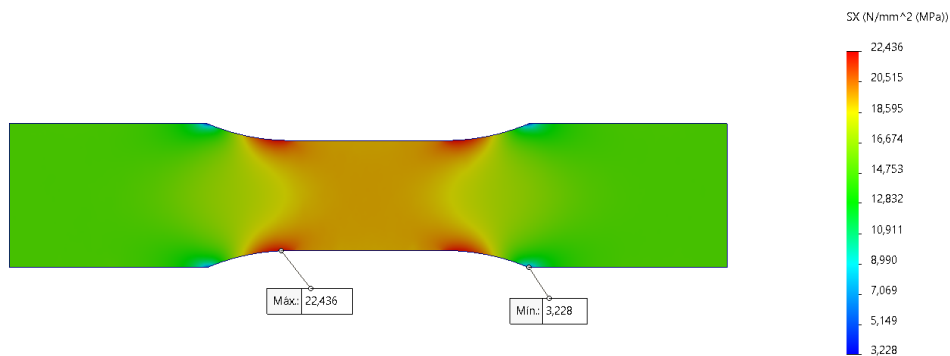
### 4.5.1 Ensayo de tracción

#### Distribución de tensiones

Los resultados mostraron diferencias significativas entre las distintas configuraciones:

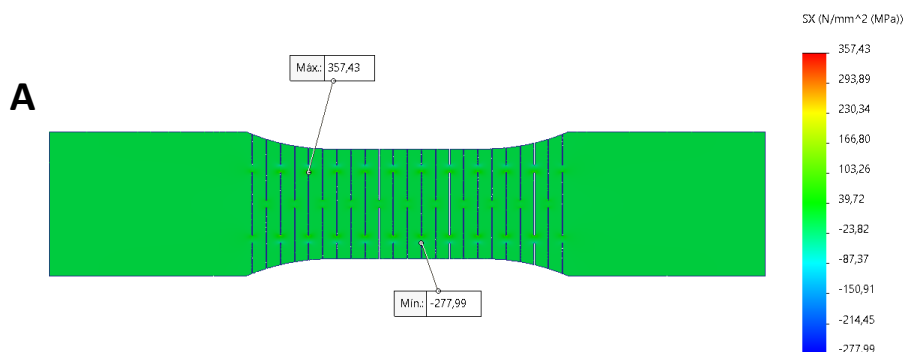
- En la **probeta sin patrón**, las tensiones se distribuyen de forma homogénea a lo largo del eje de tracción, con un valor máximo de **22,4 MPa** localizado en la zona central (*Figura 127*).

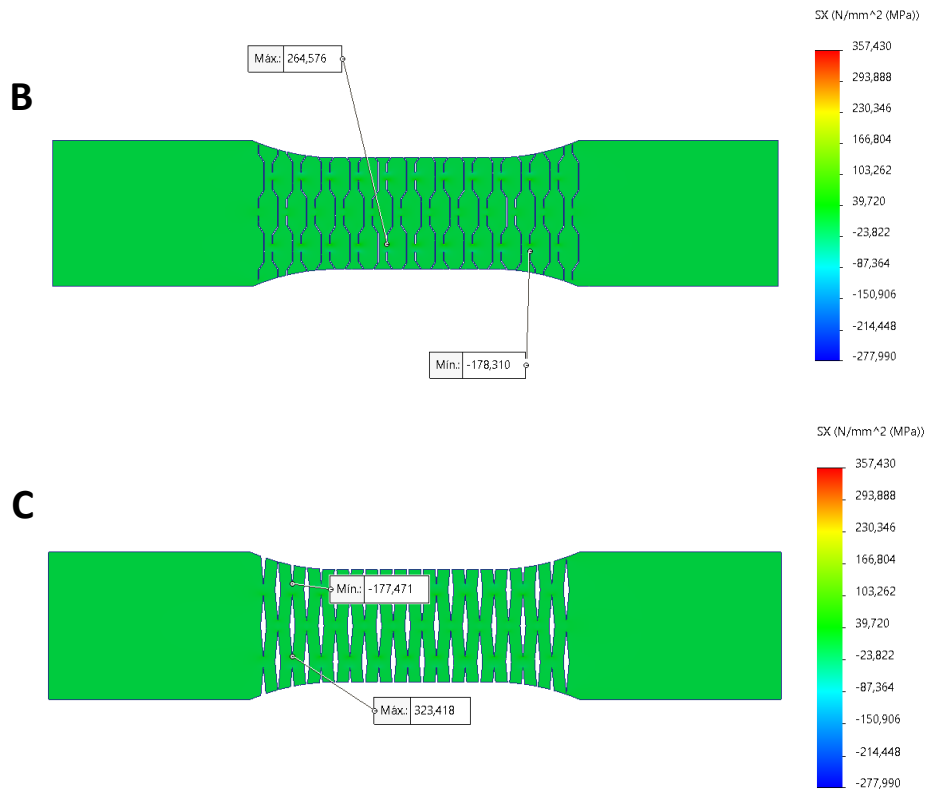
**Figura 127.** Resultado de la distribución de tensiones a tracción de la probeta sin patrón. **Fuente:** Elaboración propia



- El **patrón A** presentó la mayor concentración de esfuerzos, alcanzando un pico de **357 MPa**, principalmente en los radios de acuerdo de las ranuras (*Figura 128A*).
- En el **patrón B**, las tensiones máximas fueron inferiores (**264 MPa**), con una distribución algo más dispersa (*Figura 128B*).
- El **patrón C** mostró un comportamiento intermedio, con una tensión máxima de **323 MPa**, y una distribución más equilibrada que en el patrón A, aunque sin alcanzar la homogeneidad de la probeta compacta (*Figura 128C*).

**Figura 128.** Resultados de la distribución de tensiones a tracción de las probetas con patrón. **Fuente:** Elaboración propia



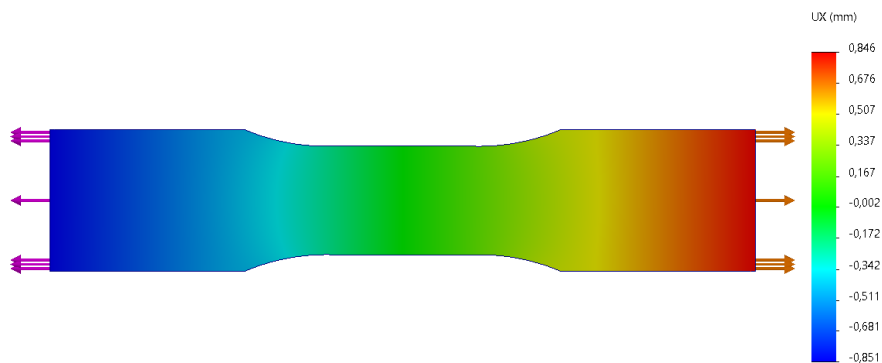


### Desplazamientos

Los desplazamientos obtenidos en las simulaciones reflejan el grado de deformabilidad de cada configuración bajo carga axial:

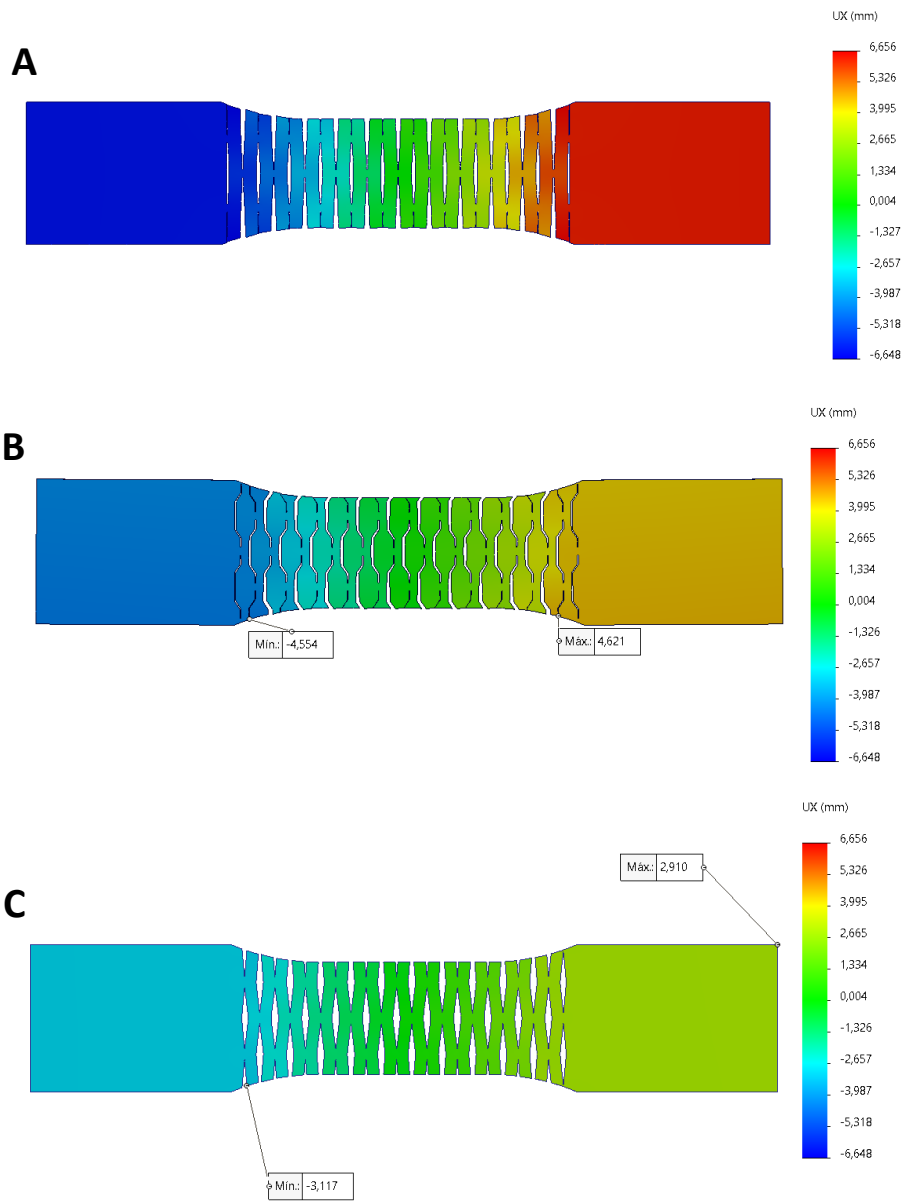
- La **probeta sin patrón** alcanzó un desplazamiento máximo de  $\pm 0,85$  mm, evidenciando una buena rigidez estructural (Figura 129).

**Figura 129.** Resultado de los desplazamientos simulados a tracción de la probeta sin patrón. **Fuente:** Elaboración propia



- El **patrón A** presentó los mayores desplazamientos de  $\pm 6,65$  mm (Figura 130A).
- El **patrón B** mostró desplazamientos de hasta  $\pm 4,6$  mm (Figura 130B).
- El **patrón C** presentó valores intermedios, del orden de  $\pm 3,1$  mm (Figura 130C).

Figura 130. Resultado de los desplazamientos simulados a tracción de las probetas con patrón. Fuente: Elaboración propia

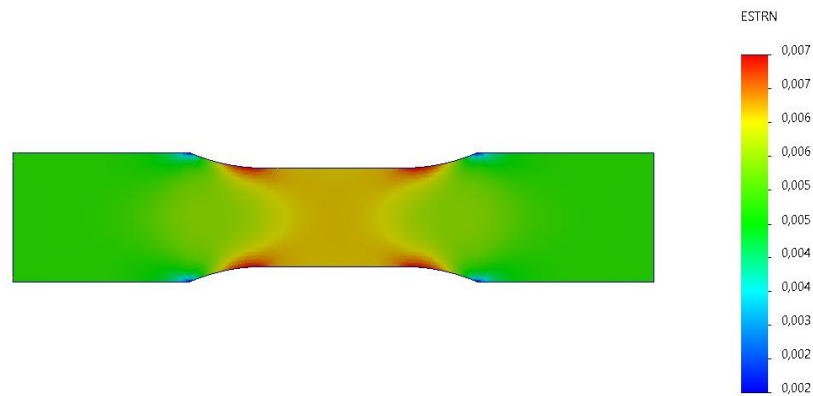


### Deformación unitaria

La deformación unitaria equivalente también permite evaluar el modo de fallo potencial y la homogeneidad en la distribución de esfuerzos internos:

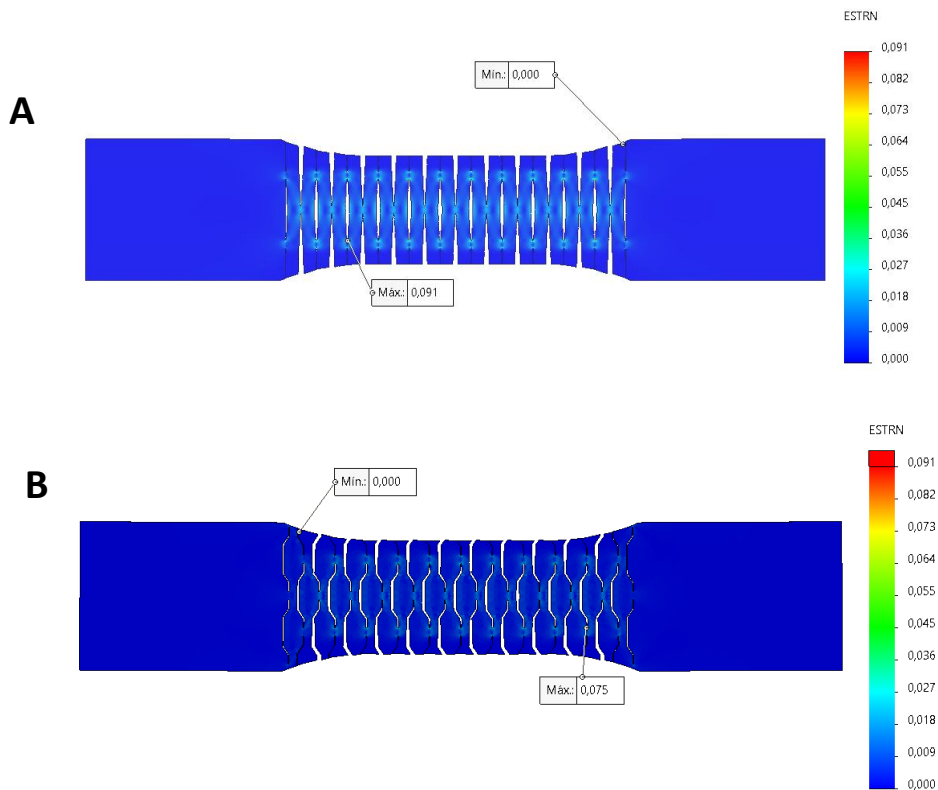
- En la **probeta sin patrón**, los valores de deformación fueron bajos (**0,002 a 0,007**), lo que confirma un comportamiento elástico lineal sin puntos críticos (*Figura 131*).

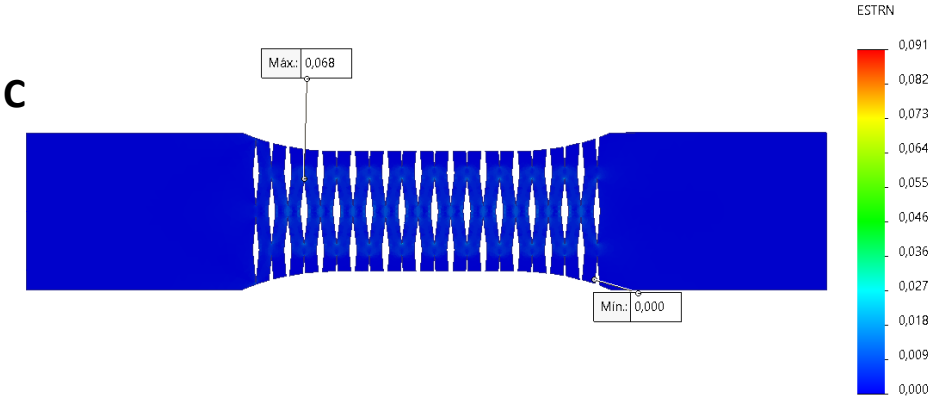
Figura 131. Resultado de La deformación unitaria simulada a tracción de la probeta sin patrón. Fuente: Elaboración propia



- El patrón A alcanzó deformaciones máximas de hasta **0,091**, concentradas en los radios de los cortes, indicando zonas de estricción severa y un deterioro considerable de la integridad estructural (Figura 132A).
- El patrón B mostró un rango de deformación de 0 a **0,075** (Figura 132B).
- El patrón C presentó una deformación máxima de **0,068**, ligeramente inferior a la del patrón B (Figura 132C).

Figura 132. Resultado de la deformación unitaria simulada a tracción de las probetas con patrón. Fuente: Elaboración propia





**Influencia del espesor**

Para conocer la influencia del espesor, se repitieron las simulaciones para 3, 9 y 16 milímetros. Durante las iteraciones, se mantuvieron **constant**: la carga, las condiciones de contorno, el ancho de la probeta y la geometría de los cortes, **variando únicamente el espesor**. Como consecuencia, debido al tipo de sollicitación, la **tensión obtenida** en las simulaciones teóricamente debería disminuir con el aumento del espesor de forma inversamente proporcional ( $\sigma \propto 1/e$ ). Es por ello por lo que los incrementos de espesor supusieron una reducción relativa de los desplazamientos y un aumento de la capacidad resistente. Los datos se resumen en la *Tabla 28*.

**Tabla 28.** Tabla resumen de los resultados de las simulaciones para el ensayo de tracción

SIN PATRÓN			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[3.228, 22.436]	[-0.851, 0.846]	[0.002, 0.007]
9	[1.650, 7.477]	[-0.370, 0.320]	[0.001, 0.003]
16	[1.081, 4.215]	[-0.228, 0.160]	[0.001, 0.002]
PATRÓN A			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-277.99, 357.43]	[-6.648, 6.656]	[0.000, 0.091]
9	[-86.08, 110.15]	[-2.216, 2.216]	[0.000, 0.029]
16	[-39.85, 55,77]	[-1.159, 1.157]	[0.000, 0.016]
PATRÓN B			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-178.310, 264.576]	[-4.554, 4.621]	[0.000, 0.075]
9	[-74.500, 104.877]	[-1.591, 1.616]	[0.000, 0.024]
16	[-43.608, 65.486]	[-0.096, 0.931]	[0.000, 0.013]
PATRÓN C			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento Máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-177.471, 323.418]	[-3.117, 2.910]	[0.000, 0.068]
9	[-54.660, 107.919]	[-1.020, 0.964]	[0.000, 0.019]
16	[-31.257, 59.956]	[-0.567, 0.534]	[0.000, 0.010]

Fuente: Elaboración Propia

En el caso de las **probetas sin patrón**, los datos de la tabla se ajustan casi perfectamente a dicha relación inversa, es decir, al aumentar el espesor la tensión disminuye en proporción de 1/e, resultado que concuerda con la hipótesis de material lineal e isótropo adoptada. Si bien estos efectos **se dispersan ligeramente más** cuando se trata de los patrones A, B y C, se puede aproximar que el comportamiento en simulación comparado con la teoría es el esperado.

**Tabla 29.** Relación numérica entre la tensión y el espesor en simulaciones de tracción

TEÓRICAMENTE	Resultados simulación SIN PATRÓN
$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{9}{3} = 3$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{16}{3} \approx 5,334$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{22,436}{7,477} \approx 3,007$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{22,436}{4,215} \approx 5,323$
	<b>Resultados simulación PATRÓN A</b>
	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{357,43}{110,15} \approx 3,245$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{357,43}{55,77} \approx 6,409$
	<b>Resultados simulación PATRÓN B</b>
	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{264,576}{104,877} \approx 2,523$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{264,576}{65,486} \approx 4,04$
	<b>Resultados simulación PATRÓN C</b>
	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{323,418}{107,919} \approx 2,997$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{323,418}{59,956} \approx 5,394$

Fuente: Elaboración Propia

En la **Tabla 30** se recogen los resultados extraídos tanto de las simulaciones para las probetas de 3 mm de espesor como de los ensayos mecánicos, para garantizar la comparación se empleó la misma carga en ambos métodos. Los valores máximos obtenidos en las simulaciones son, por norma general, superiores a los medidos experimentalmente, a excepción de la probeta sin patrón. Esta discrepancia se puede atribuir la idealización del modelo numérico (propiedades materiales homogéneas, condiciones de contorno perfectas y ausencia de daños por fabricación) y al hecho de

que el FEM tiende a reportar picos locales de esfuerzo, mientras que los ensayos incluyen imperfecciones, pérdidas y promedios que reducen los valores medidos. Mas investigación en este campo es requerida para conocer con precisión el origen de este fenómeno.

**Tabla 30.** Tabla comparativa simulación y ensayo de tracción

<b>SIN PATRÓN</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[3.228, 22.436]	[-0.851, 0.846]	[0.002, 0.007]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	Deformación unitaria
3	18,61	4,41	0,088
<b>PATRÓN A</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-277.99, 357.43]	[-6.648, 6.656]	[0.000, 0.091]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	Deformación unitaria
3	21,86	10,88	0,217
<b>PATRÓN B</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-178.310, 264.576]	[-4.554, 4.621]	[0.000, 0.075]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	Deformación unitaria
3	15,48	8,07	0,161
<b>PATRÓN C</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento Máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-177.471, 323.418]	[-3.117, 2.910]	[0.000, 0.068]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	Deformación unitaria
3	10,56	8,88	0,177

**Fuente:** Elaboración Propia

### 4.5.2 Ensayo de flexión

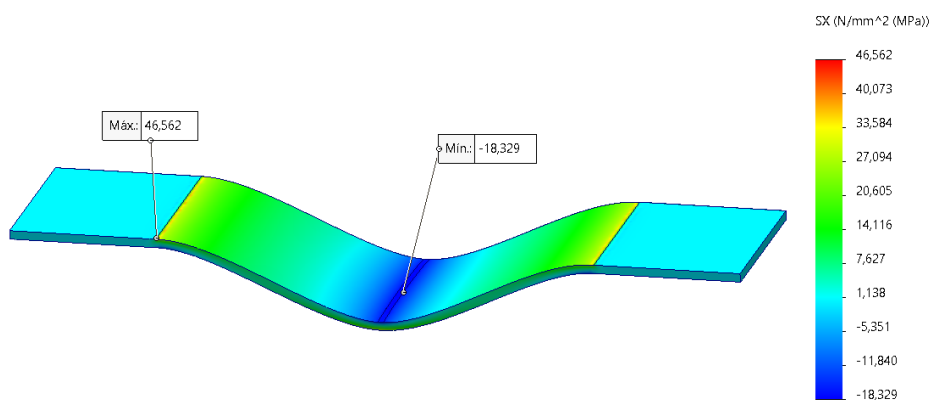
#### Distribución de tensiones

Las simulaciones muestran en algunos casos, como es esperable que las concentraciones de esfuerzos se dan en ellos empotramientos, sin embargo, también existe, simulaciones donde las tensiones máximas no se dan en estos puntos si no que en las ranuras de los cortes. Todo ello concuerda con los resultados experimentales ya que ha habido probetas que han fracturado por la sección central y hay otras que han fracturado por el empotramiento.

- En el caso **sin patrón**, se observan tensiones máximas de **46,56 MPa** para el espesor de 3 mm (*Figura 133*).

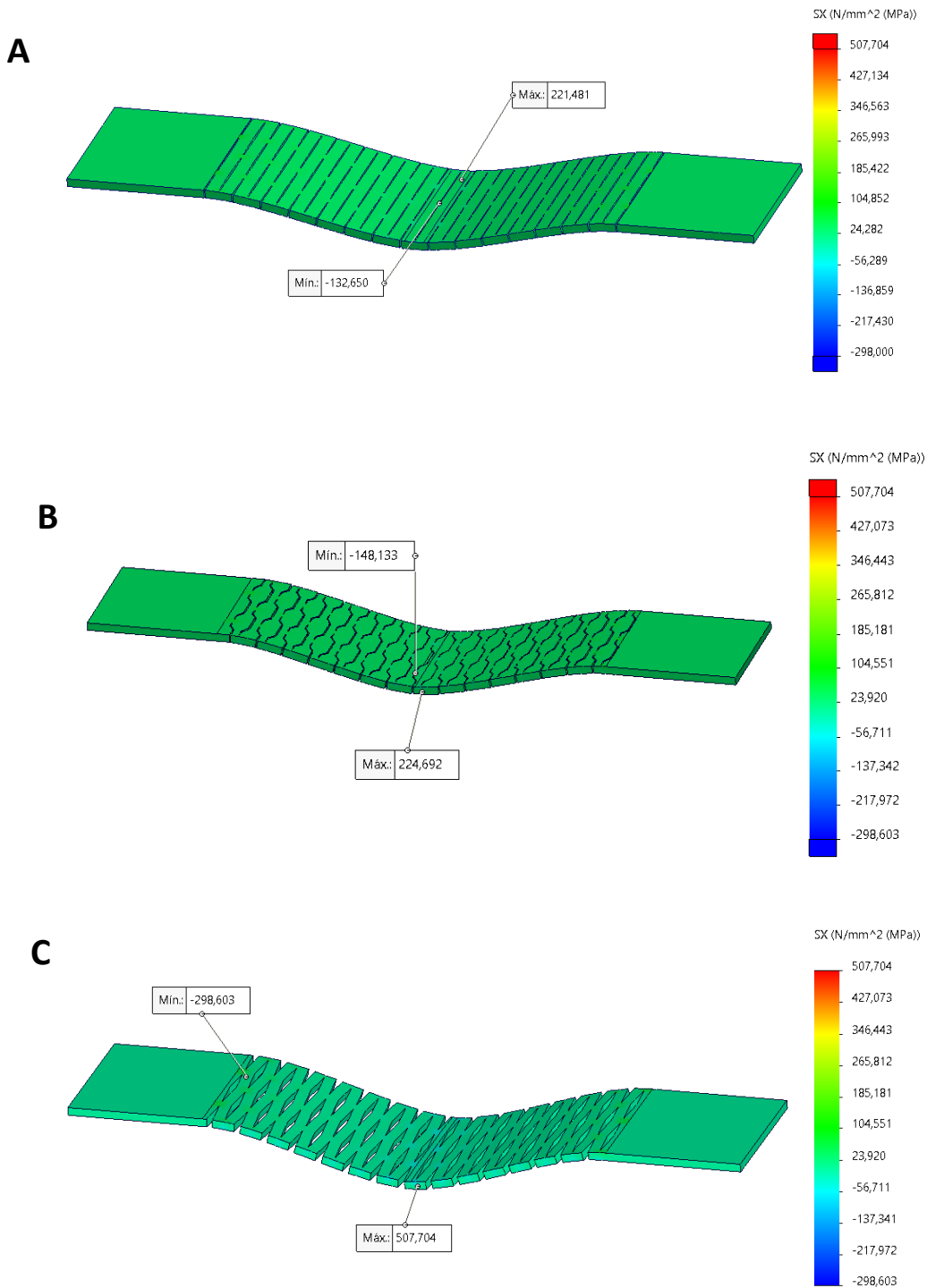
**Figura 133.** Resultado de la distribución de tensiones simulados a flexión de la probeta sin patrón.

**Fuente:** Elaboración propia



- En el **Patrón A**, se alcanzan valores máximos de tensión significativamente superiores, llegando a **221,48 MPa** para 3 milímetros. La geometría rectilínea de los cortes genera una clara acumulación de tensiones en la región inferior central (*Figura 134A*).
- Para el **Patrón B**, las tensiones también se concentran en las zonas próximas a las ranuras (*Figura 134B*), obteniéndose máximos de 224,69 MPa (3 mm).
- En el caso del **Patrón C**, se observan las mayores tensiones de todas las simulaciones, esto se debe a que la carga aplicada en la simulación también fue la mayor. La probeta de 3 mm alcanza un valor máximo de 507,70 MPa (*Figura 134C*).

Figura 134. Resultados de la distribución de tensiones de la simulación a flexión de las probetas con patrón.  
Fuente: Elaboración propia

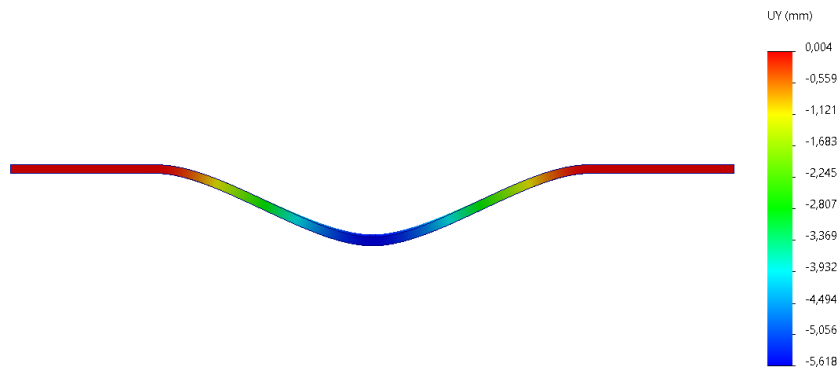


### Desplazamientos

Los desplazamientos resultantes muestran una clara relación inversa con el espesor de las probetas, siendo más acusados en los espesores delgados y en los patrones que presentan mayor flexibilidad estructural inducida por el *kerfing*.

- **Sin patrón:** Los desplazamientos máximos se dan en la zona central y llegan a **5,62 mm** (*Figura 135*).

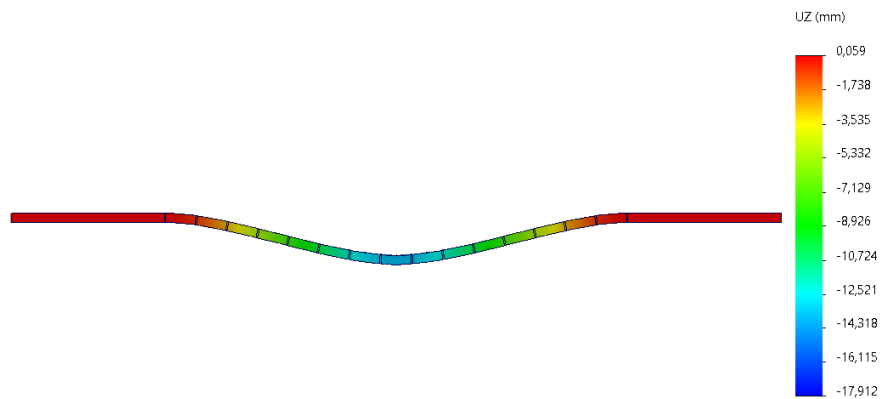
**Figura 135.** Resultado de los desplazamientos simulados a flexión de la probeta sin patrón. **Fuente:** Elaboración propia

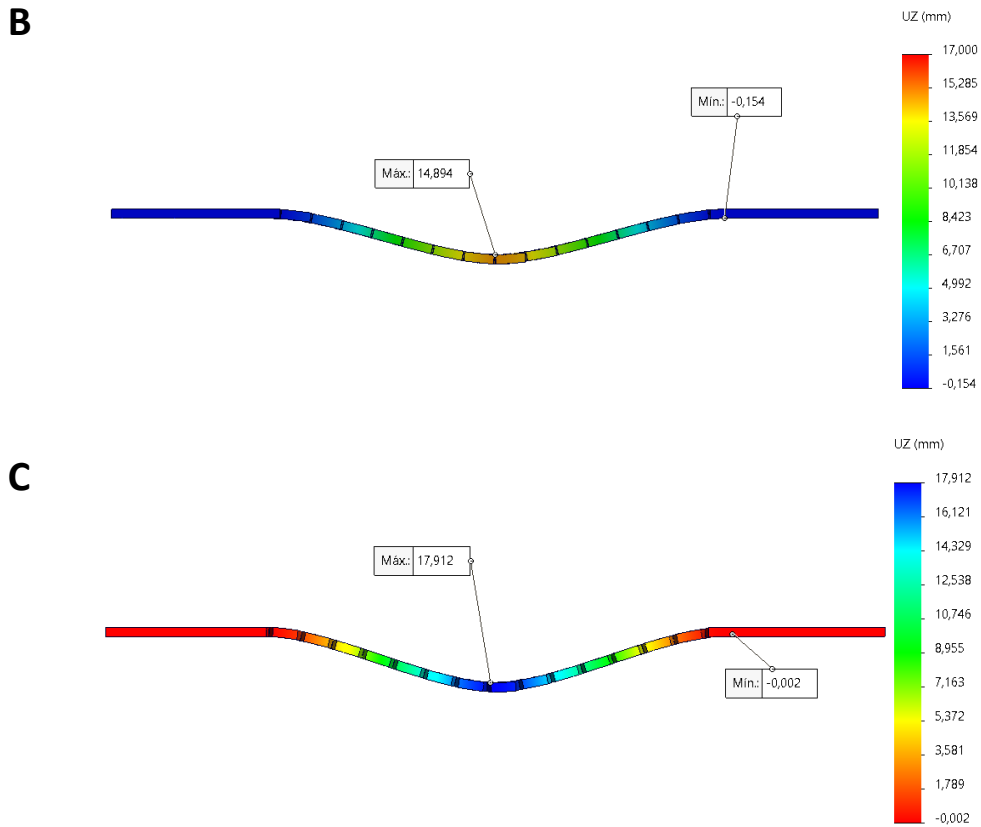


- Para el **patrón A** se alcanza un desplazamiento de **13,68 mm** en la probeta de 3 mm (*Figura 136A*).
- Para el **patrón B**, se muestran valores elevados, con un valor de **14,89 mm** para la probeta de 3 mm (*Figura 136B*).
- En el caso del **patrón C**, se observan **17,91 mm** (*Figura 136C*).

**Figura 136.** Resultados de los desplazamientos simulados a flexión de las probetas con patrón. **Fuente:** Elaboración propia

**A**



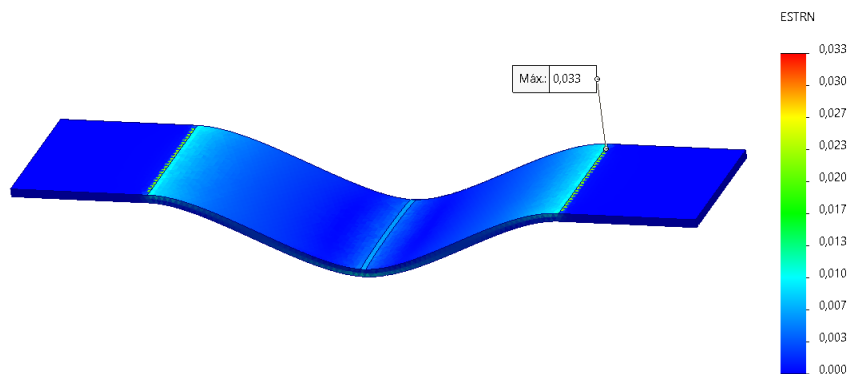


### Deformación unitaria

Los desplazamientos resultantes muestran una clara relación inversa con el espesor de las probetas, siendo más acusados en los espesores delgados y en los patrones que presentan mayor flexibilidad estructural inducida por el *kerfing*.

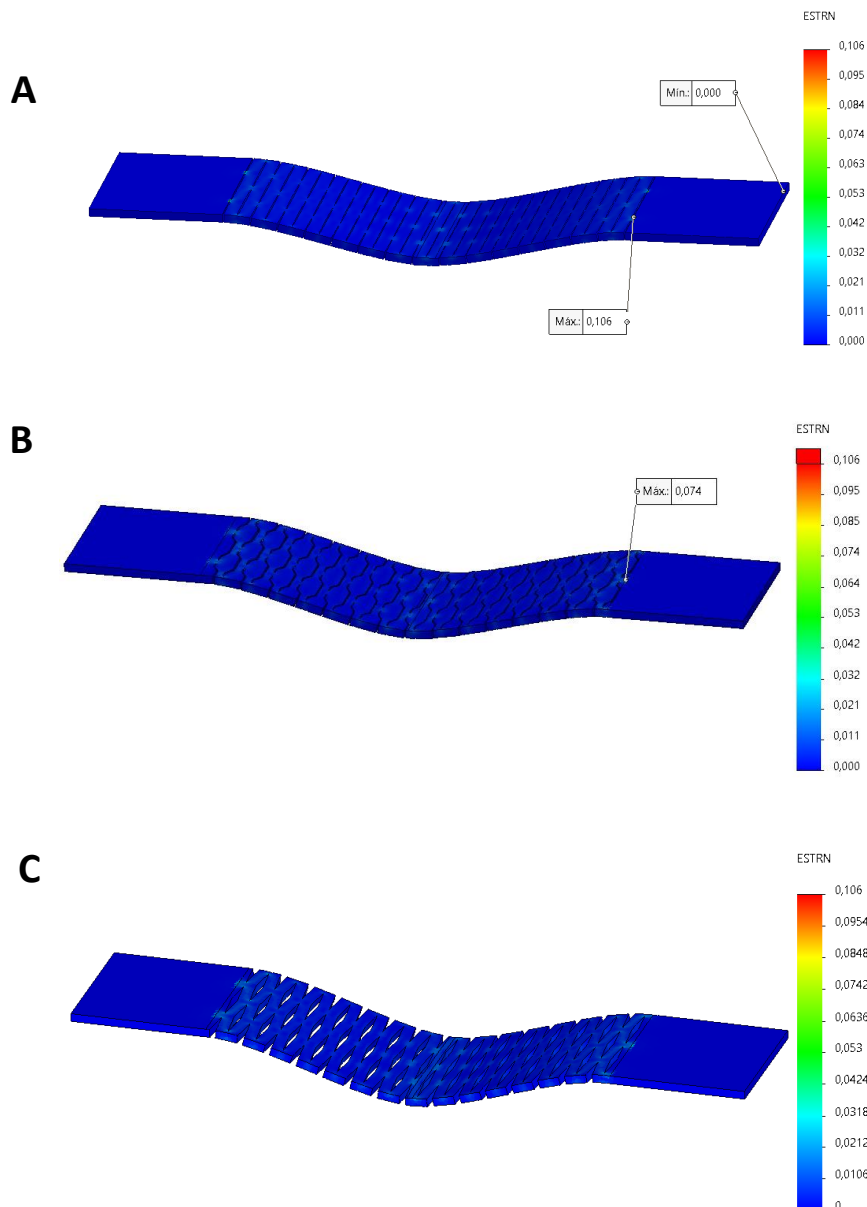
- **Sin patrón:** Los valores son bajos y bien distribuidos, con máximos de **0,033** (Figura 137).

**Figura 137.** Resultado de la deformación unitaria simulada a flexión de la probeta sin patrón. **Fuente:** Elaboración propia



- En el **patrón A** se obtiene la mayor deformabilidad (**0,106**) (*Figura 138A*).
- En el **patrón B** se observa una deformación máxima de **0,074** (*Figura 138B*).
- En el **patrón C** se muestran valores de **0,068** (*Figura 138C*).

**Figura 138.** Resultado de la deformación unitaria simulada a flexión de las probetas con patrón. **Fuente:** Elaboración propia



### Influencia del espesor

Los resultados obtenidos muestran una tendencia clara de incremento de rigidez estructural con el aumento del espesor de las probetas independientemente del patrón de *kerfing* aplicado, los resultados se muestran en la **Tabla 31**.

Teóricamente, para interpretar los cambios con el espesor, conviene partir de la teoría de flexión, donde bajo la misma sollicitación de momento, la tensión máxima debería escalar aproximadamente como  $1/e^2$  ( $\sigma \propto 1/e^2$ ). Los resultados numéricos confirman la tendencia general, a mayor espesor menores tensiones y deflexiones, pero muestran desviaciones importantes respecto al factor ideal comentado.

**Tabla 31.** Tabla resumen de los resultados de las simulaciones para el ensayo de flexión

<b>SIN PATRÓN</b>			
<b>Espesor (mm)</b>	<b>Tensión Máxima y mínima (MPa)</b>	<b>Desplazamiento máximo y mínimo (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
3	[-18.329, 46.562]	[-5.618, 0.004]	[0.000, 0.033]
9	[-7.988, 13.600]	[-0.523, 0.001]	[0.001, 0.003]
16	[-3.732, 4.611]	[-0.012, 0.000]	[0.000, 0.001]
<b>PATRÓN A</b>			
<b>Espesor (mm)</b>	<b>Tensión máxima y mínima (MPa)</b>	<b>Desplazamiento máximo y mínimo (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
3	[-132.650, 221.481]	[-13.677, 0.059]	[0.000, 0.106]
9	[-52.463, 58.665]	[-2.892, 0.018]	[0.000, 0.018]
16	[-25.619, 25.289]	[-0.910, 0.005]	[0.000, 0.018]
<b>PATRÓN B</b>			
<b>Espesor (mm)</b>	<b>Tensión máxima y mínima (MPa)</b>	<b>Desplazamiento máximo y mínimo (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
3	[-148,133, 224.692]	[-14.894, 0.154]	[0.000, 0.074]
9	[-61.386, 78.178]	[-3.924, 0.050]	[0.000, 0.014]
16	[-31.582, 33.172]	[-1,126, 0.014]	[0.000, 0.006]
<b>PATRÓN C</b>			
<b>Espesor (mm)</b>	<b>Tensión Máxima y mínima (MPa)</b>	<b>Desplazamiento Máximo y mínimo (mm)</b>	<b>Deformación unitaria</b>
3	[-298.603, 507.704]	[-17.912, 0.002]	[0.000, 0.045]
9	[-175.012, 215.990]	[-5.173, 0.027]	[0.000, 0.045]
16	[-95.457, 94.073]	[-1.720, 0.010]	[0.000, 0.0197]

**Fuente:** Elaboración propia

En el caso del ensayo de flexión, en la **Tabla 32**, se observan las razones numéricas teóricas y las obtenidas como respuesta de las simulaciones. Se aprecia que las razones son mucho menores, lo cual confirma que la mejora real por aumentar el espesor está atenuada en la simulación.

Esto puede deberse a que la geometría de cortes reduce la contribución efectiva del material a la resistencia a flexión. En otras palabras, estas discontinuidades provocan que, a escala local, los segmentos entre cortes roten y se deformen con cierta libertad antes de “engranar” con los segmentos vecinos, este efecto (fenómeno de bisagra por

flexión) podría ser el responsable de que la dependencia teórica  $\sigma \propto 1/e^2$  no se dé con la exactitud con la que se da en el ensayo de tracción, donde esta interferencia con el material no existe.

Esta teoría parece funcionar, sin embargo, el caso de la probeta sin patrón (probeta compacta y continua) tampoco responde a la teoría de manera adecuada, las razones numéricas se mantienen igualmente alejadas en los 4 grupos de probetas, por tanto, se plantea que hacen falta estudios adicionales que permitan determinar con mayor rigor por qué las razones teóricas no se cumplen.

**Tabla 32.** Relación numérica entre la tensión y el espesor en simulaciones de flexión

TEÓRICAMENTE	Resultados simulación SIN PATRÓN
$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{9^2}{3^2} = 9$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{9^2}{3^2} \approx 28,445$	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{46,562}{13,600} \approx 3,424$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{46,562}{4,611} \approx 10,098$
	<b>Resultados simulación PATRÓN A</b>
	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{221,481}{58,665} \approx 3,775$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{221,481}{25,289} \approx 8,758$
	<b>Resultados simulación PATRÓN B</b>
	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{224,692}{78,178} \approx 2,874$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{224,692}{33,172} \approx 6,774$
	<b>Resultados simulación PATRÓN C</b>
	$\frac{\sigma_3}{\sigma_9} = \frac{507,704}{215,99} \approx 2,351$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_{16}} = \frac{507,704}{94,073} \approx 5,397$

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la comparación de los resultados de las simulaciones con los experimentales (**Tabla 33**), de nuevo existe una tendencia en la que se obtienen valores muchos más altos en *SolidWorks Simulation*, a excepción de la probeta sin patrón.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

Esto puede provenir de un refinamiento escaso en las ranuras, o incluso que las tensiones máximas simuladas no se den en la sección central (que es la tensión calculada en los ensayos experimentales) y ahí que difieran debido a que ni siquiera son comparables en primera estancia.

**Tabla 33.** Tabla comparativa simulación y ensayo de flexión

<b>SIN PATRÓN</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-18.329, 46.562]	[-5.618, 0.004]	[0.000, 0.033]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión sección central (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	
3	54,5	21,41	
<b>PATRÓN A</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-132.650, 221.481]	[-13.677, 0.059]	[0.000, 0.106]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión sección central (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	
3	104,4	19,00	
<b>PATRÓN B</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-148,133, 224.692]	[-14.894, 0.154]	[0.000, 0.074]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión sección central (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	
3	22,8	24,58	
<b>PATRÓN C</b>			
<b>Resultados simulación FEM</b>			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento Máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-298.603, 507.704]	[-17.912, 0.002]	[0.000, 0.045]
<b>Resultados experimentales</b>			
Espesor (mm)	Tensión sección central (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	
3	22,6	30,12	

**Fuente:** Elaboración Propia



**Discusiones.**



## 5. Discusiones

A través del apartado de discusiones se proporcionará un **análisis crítico** de los resultados obtenidos, valorando su alcance, significado y validez en relación con los objetivos inicialmente planteados. Además, se busca poner los resultados en diálogo con la bibliografía existente, con el fin de identificar **coincidencias, discrepancias o cualquier posible aportación** a la temática del presente proyecto. De esta manera se ofrece una **base consistente** para la recopilación de **conclusiones** del proyecto.

### 5.1 Evaluación del cumplimiento de objetivos

El objetivo fundamental de este proyecto fue la **experimentación y análisis del comportamiento mecánico del MDF sometido al kerfing**, hecho que se cumple satisfactoriamente a lo largo del proyecto. En lo relativo a los **objetivos específicos**, los resultados permiten mencionar lo siguiente sobre las siguientes cuestiones:

*¿Qué influencia tiene la geometría del patrón en las propiedades del material y cuál es su efecto en los ensayos de tracción y flexión? ¿Qué diferencias se observan entre patrones de corte?*

Los ensayos muestran **diferencias significativas entre patrones**. En el caso del ensayo de **tracción**, las probetas sin ranurado son las que mayor carga soportan (228 kg), tal y como era esperable, al poseer la mayor sección transversal. Muestran una tensión máxima media de referencia de **18,6 MPa** y un módulo de Young elevado (**2,4 GPa**), situándolo como un material rígido y resistente a la tracción. En contraposición, las **probetas con patrones** presentan una rigidez notablemente menor y valores de tensión dependientes de la geometría (entallas): el **patrón A** muestra la mayor tensión máxima media, con un valor de **21,9 MPa**. Este resultado puede interpretarse como el efecto de aplicar la carga sobre una probeta con sección variable y reducida, generando picos de tensión que hacen que se incremente el valor máximo registrado. En cuanto a la carga máxima aplicada para el **patrón A** fue de **18,62 kg**.

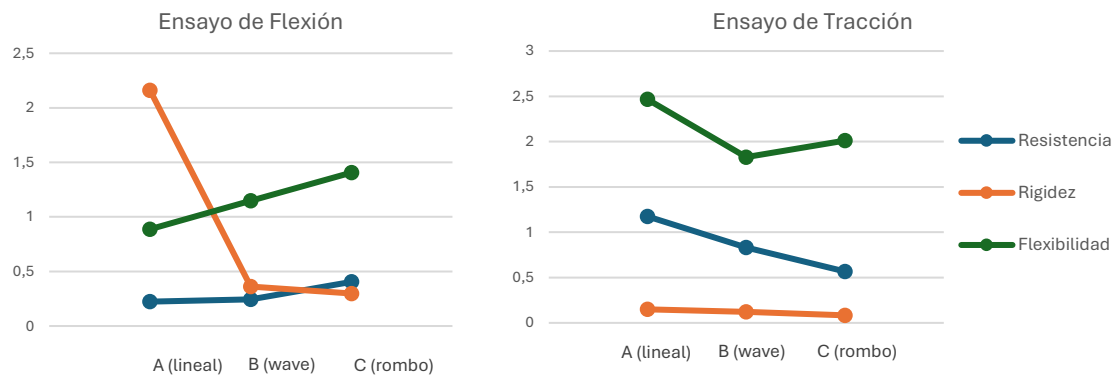
Los **patrones B y C**, en cambio, se mantienen en valores menores, de **15,7 MPa y 10,4 MPa**, respectivamente, evidenciando como el incremento de material extraído y, por tanto, la **pérdida de sección efectiva** compromete la resistencia tal y como demuestran la fuerza en kilogramos máxima alcanzada: **8,34 y 8,10 kg**, respectivamente.

Respecto a la **rigidez**, hay una **clara reducción** del módulo de elasticidad entre los patrones. El **patrón A** parte de **366,84 MPa**, un **17,7 % más** que el **patrón B** y un **44,2 % más** que el **patrón C**. Esto sugiere que la geometría lineal (patrón A) aún conserva cierta **continuidad estructural**, permitiendo una transmisión más eficiente de esfuerzos a lo largo del material. Sin embargo, a medida que las ranuras se inclinan (patrón B) o se eliminan mayores porciones de material (patrón C), el material se vuelve progresivamente **más flexible**, sacrificando capacidad tanto de carga como de rigidez frente a una mayor ductilidad y flexibilidad. En otras palabras, la reducción de rigidez observada implica que el *kerfing* introduce cambios en el comportamiento del material, modificando su comportamiento mecánico **en función de la orientación y la densidad de los cortes**, es decir, de la morfología del patrón.

Al considerar el **ensayo de flexión biempotrado con carga puntual central**, se obtiene un comportamiento en servicio bajo **solicitación combinada** (momento flector y cortante) que ayuda a conocer cómo se implica el *kerfing* en estos casos de carga. Los resultados indican una tendencia **contraria** a la descrita en **tracción**, la geometría del *kerf* **condiciona las concentraciones de tensión** y los **modos de fallo**. Las probetas sin patrón mantienen la mayor resistencia y presentan fallos frágiles y súbitos. Soportan la **mayor carga máxima** (23,7 kg), lo que confirma que la ausencia de cortes preserva la inercia de la sección y la capacidad portante. Al introducir patrones de *kerfing*, la respuesta cambia de manera significativa. El **patrón A** llega a alcanzar picos de tensión de **104,41 MPa** en la sección central, un **68,3 % superior** al de la probeta sin *kerfing*. Este valor demuestra fragilidad como consecuencia de las **concentraciones de tensiones** en las reducciones de la sección, que generan picos en la cara traccionada (cara inferior) durante la flexión. A su vez, **ofrece la menor deflexión** entre todas las geometrías (19 mm) y **su capacidad de carga es la más baja** (5,26 kg), esto puede indicar una respuesta local relativamente tensa (posible efecto de la sección reducida en la zona de aplicación de la carga). El **patrón B** aumenta un **10,5 %** la carga soportada (5,81 kg) y mantiene una flecha de 24,58 mm, mientras que el **patrón C** soporta la mayor carga entre los patrones (9,63 kg) a costa de ser el más deformable a solicitación de flexión (30,12 mm). En definitiva, el **patrón A** concentra tensiones con una baja capacidad portante y limitada deflexión, que puede deberse a que la carga se situó perpendicularmente a la sección más desfavorable, algo que no ocurre en el **patrón B**, logrando así, un ligero aumento de la carga con deformaciones más moderadas, o el **patrón C**, que combina la mayor carga con la mayor deformabilidad.

En conjunto, los resultados confirman que **la geometría del patrón influye decisivamente en el comportamiento mecánico del material**, generando un comportamiento diferenciado según el tipo de sollicitación y geometría de corte, tal y como se aprecia en la *Figura 139*, donde se ha representado en términos normalizados: la **resistencia**, **rigidez** y **flexibilidad** de cada patrón y ensayo. Se observa que mientras en el ensayo de flexión, la rigidez y la flexibilidad se comportan contrariamente, en tracción siguen la misma tendencia.

**Figura 139.** Gráficos de las tendencias de los patrones según la sollicitación



**Fuente:** Elaboración propia

*¿Se puede controlar la anisotropía que induce el kerfing?*

El *kerfing*, en esencia, debilita la sección resistente del tablero de madera, al permitir su flexión en la dirección perpendicular a las ranuras (Yao, 2021). Esta técnica introduce anisotropía en el material, al generar direcciones preferentes de flexibilidad. Sin embargo, tanto la investigación realizada en este trabajo como la **evidencia bibliográfica** sugieren que dicha anisotropía no es incontrolable, sino que puede ser diseñada para predecir el comportamiento del material.

Diversos autores (Condoroțeanu et al., 2022; Gatóo et al., 2021; Holterman, 2018) coinciden en que la anisotropía puede modularse manipulando los siguientes parámetros clave: **(i) la orientación de las ranuras**, que define el eje principal de flexibilidad; **(ii) la densidad de corte o distancia entre ranuras**, que incrementa o reduce la rigidez en la dirección perpendicular; **(iii) el tipo de patrón (lineal o meandro)**, que condiciona si la deformación se distribuye en una o dos direcciones; y **(iv) los parámetros del láser (ancho de corte láser, potencia, velocidad)**, que influyen en el daño término, anchos de corte, y por ende, en la respuesta del material.

Cabe señalar que **no todos los parámetros mencionados han sido contrastados experimentalmente en el presente trabajo**. En particular, la influencia de la densidad y corte **(ii)**, no se analizó, ya que se priorizó estudiar la influencia de varios patrones manteniendo la densidad de corte entre ellos, **garantizando la comparabilidad**.

Asimismo, únicamente se estudiaron patrones que inducen deformación en una sola dirección **(iii)**, dado que las configuraciones bidireccionales quedaban fuera del alcance del proyecto. No obstante, ambos factores se encuentran documentados **(Wei y Singh, 2017; Condoroțeanu et al., 2022; Chen et al., 2020)**, lo que respalda su papel determinante en el control de la anisotropía.

En consecuencia, se puede afirmar que la anisotropía inducida por el *kerfing* no constituye una limitación estructural inevitable, sino una **herramienta de diseño** diferente, que adecuadamente controlada, permite equilibrar resistencia y flexibilidad en función de los requisitos de la aplicación.

## 5.2 Comparación de los resultados con estudios previos

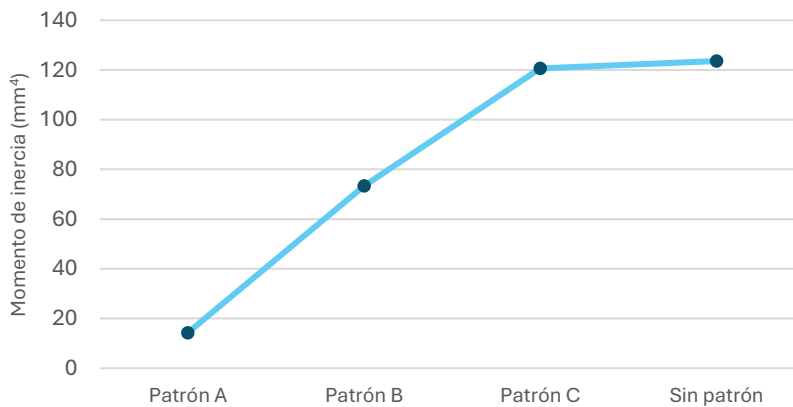
En este apartado se continuará con la comparación del presente trabajo con **respecto a las investigaciones previas** recogidas en la bibliografía, con ello, se discutirán los hallazgos obtenidos por los diferentes investigadores con el fin de encontrar afinidades, disconformidades o nuevos caminos para el *kerfing*.

Los hallazgos empíricos obtenidos durante el ensayo de tracción guardan coherencia con las tendencias generales reportadas en la bibliografía sobre *kerfing*: “*el incremento de la sustracción de material reduce la rigidez y aumenta la deformabilidad*”. Si bien los estudios previos se centran en ensayos de flexión en tres puntos y doblado manual **(Gatío et al., 2021; Condoroțeanu et al., 2022)**, sus conclusiones pueden ser extrapolables, efecto que se ha observado en la caída del módulo de Young en el ensayo de tracción directa realizado.

Esta tendencia señalada por los autores parece contradecirse en el ensayo de flexión con extremos fijos realizado, donde **el patrón C** (romboidal), es el que mayor porcentaje de material extraído posee y que a su vez, el que mostró la mayor resistencia absoluta. Esta aparente discrepancia podría tener su explicación debido a diversos factores como que (i) las condiciones de contorno biempotradas del ensayo, modifican considerablemente el reparto de momentos y cortantes respecto a otros ensayos de flexión o voladizo reportados en la bibliografía, lo que implica que la

tendencia general no pueda aplicarse de manera universal a todas las configuraciones de ensayo; (ii) La sección en la zona del momento máximo (centro de la probeta) sea de mayor inercia, hecho que se corrobora, el patrón romboidal posee un momento de inercia en la sección central de  $120,6 \text{ mm}^4$ , prácticamente equivalente a la probeta compacta ( $123,6 \text{ mm}^4$ ), mientras que los patrones A y B se reduce a  $14,3 \text{ mm}^4$  y  $73,3 \text{ mm}^4$ , respectivamente (*Figura 140*); (iii) la orientación y diseño del patrón favorezca una transmisión y redistribución de esfuerzos más óptima.

**Figura 140.** Gráfico momento de inercia de la sección central de las probetas del ensayo de flexión



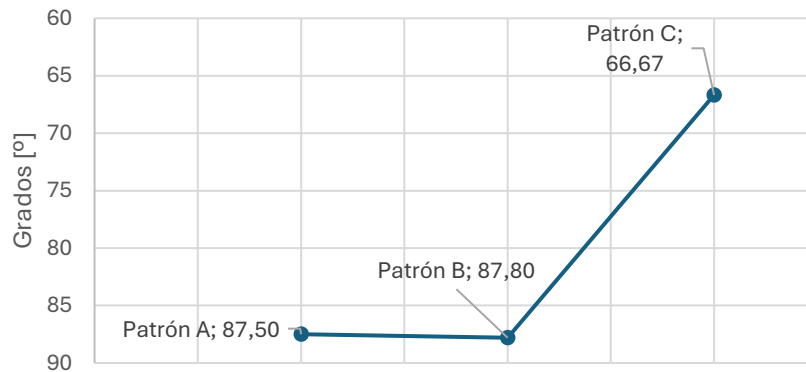
**Fuente:** Elaboración propia

Por tanto, la mayor resistencia observada en C se explica por la conservación local de sección útil en la región de mayor momento, unido a un mecanismo de fallo más progresivo que permite mayor absorción antes de la rotura. Esto subraya que la geometría local y la ubicación del material en la zona del máximo momento son determinantes para el comportamiento a flexión y que la relación de más corte - menos resistencia, no puede aplicarse de forma universal sin contemplar la distribución espacial del material, lo que concuerda con las afirmaciones de diversos autores (Condoroțeanu et al., 2022; Gatóo et al., 2021; Holterman, 2018).

Por otro lado, Güzelci et al. (2017), advierte que, si bien dicha afirmación se sostiene en su estudio, no existe una proporcionalidad directa y lineal entre **porosidad** y **flexibilidad**. En su ensayo (sostener en voladizo por un extremo el panel *kerfeado*), un cambio relativamente pequeño en porosidad (de 1,01 a 1,23) produjo una variación amplia en la flexibilidad (de  $3^\circ$  a  $65^\circ$ ). Paralelamente a este hecho, los resultados obtenidos durante la **prueba de estimación de curvatura** muestran que este hecho no se cumple, ya que el patrón A y B tienen similar porosidad (2,25 % y 2,36 %, respectivamente) y, sin embargo, alcanzan curvaturas muy similares, sin saltos

grandes, mientras que el patrón C, cuyo porcentaje de material extraído asciende a 6,66 % sí que alcanza una flexibilidad mucho más elevada tal y como se aprecia en la **Figura 141**.

**Figura 141.** Gráfico comparativo grado de curvatura



**Fuente:** Elaboración propia

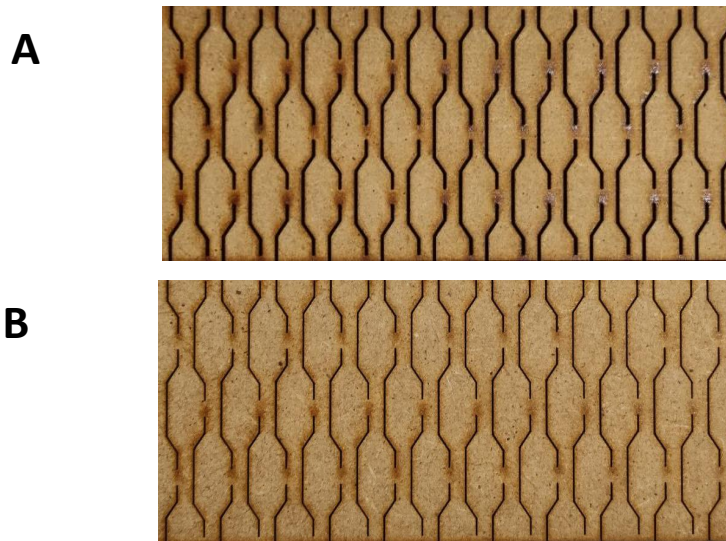
Con respecto a las **propiedades mecánicas**, los resultados obtenidos muestran paralelismos con la bibliografía reportada. Naturalmente, existe una caída en la resistencia de los tableros con ranuras, **Loyola et al. (2017)** ensaya en una máquina de universal un ensayo de flexión de 3 puntos para determinar módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR), sus resultados muestran que el espécimen de patrón lineal con mejor rendimiento obtuvo un MOE de 15,7 MPa y un MOR de 357,5 MPa, lo que significa una reducción aproximada del 60 % con respecto a la probeta sin ranurar. Si bien en este proyecto no se ha realizado específicamente la misma configuración de ensayo, geometría de probetas o tipo de patrón empleado, puede ser relevante constatar que las órdenes de magnitud obtenidos en ambos artículos son coherentes, lo que aporta validez a los resultados. Concretamente, en los ensayos realizados, la pérdida de rigidez del **patrón A** con respecto a la probeta sin ranurar alcanzó en tracción, aproximadamente el 92 % y en el ensayo de flexión con extremos fijos, el 77 %. Estas cifras, aun siendo más severas que las reportadas por Loyola et al. (2017), apuntan en la misma dirección. La diferencia en la magnitud de la caída puede atribuirse a la variación en los patrones utilizados. En cualquier caso, ambos estudios corroboran que el *kerfing* compromete la resistencia.

La literatura ha enfatizado de manera frecuente en que no solo la cantidad de material extraído, sino también la idea de que la topología y la orientación del patrón gobiernan la localización del fallo y el comportamiento mecánico. **Lorenzoni et al. (2021)** y **Guzelci et al. (2017)** lo corroboran: experimentalmente las roturas se inician

en posiciones condicionadas por las ranuras, por lo que la topología del *kerf* define las zonas de concentración de tensiones. Los resultados de la presente investigación muestran que la rotura se inició sistemáticamente en las zonas coincidentes con las ranuras, tal y como predecía la bibliografía. Por tanto, uno de los aspectos claves también podría ser la suavización de dichas entallas mediante radios. No obstante, dado que el *kerf efectivo* en este trabajo es de 0,31 mm, la introducción de un radio fileteado significativo dentro de la ranura no es práctica. En consecuencia, para reducir la concentración de tensiones, se podría recomendar estrategias alternativas compatibles con el proceso de corte láser: la incorporación de pequeños orificios de alivio en los extremos de las ranuras (*relief holes*) propuesto por **Weston (2012)**. Esta solución puede disminuir la tendencia a la iniciación de grietas convirtiéndola en posibles líneas futuras de trabajo para optimizar el equilibrio entre flexibilidad y durabilidad en aplicaciones de *kerfing*.

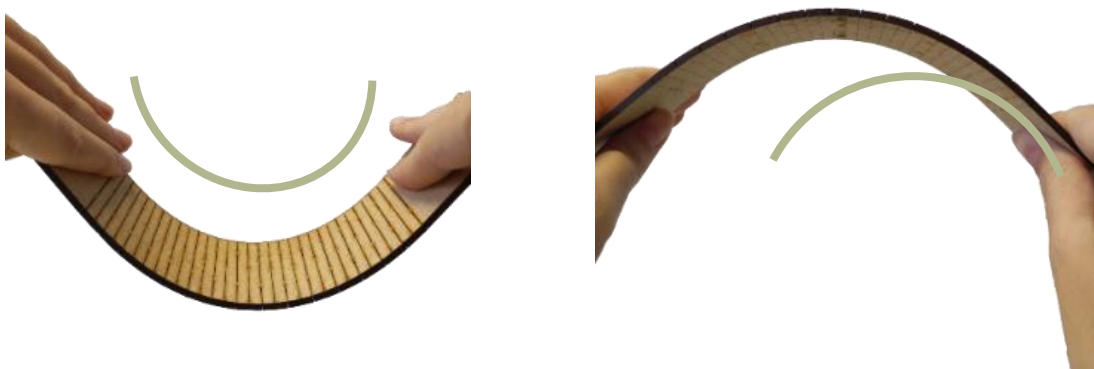
Asimismo, las simulaciones por ordenador identifican las mismas zonas críticas, por tanto, existe una coincidencia en el “dónde”, aunque en el contexto cuantitativo difiere, probablemente por las simplificaciones adoptadas en los modelos (consideración del MDF como material homogéneo e isotrópico). Este contraste pone de manifiesto la importancia de la experimentación (**Muñoz et al., 2011**).

Más allá de la geometría, debe mencionarse que el efecto de la tecnología de fabricación, en este caso, el **proceso de corte láser** ha sido señalado por la bibliografía como un factor condicionante. **Condoroteanu et al. (2022)** identifican fenómenos como carbonización, pérdida de humedad y aumento de fragilidad en los bordes del *kerf*, lo cual coincide con las observaciones en las probetas ensayadas, donde la rotura se inició mayoritariamente en las zonas carbonizadas, es decir, en las entallas. Este hecho apunta a que, además de la geometría, el **control de los parámetros de corte** constituye un aspecto crítico para la optimización del *kerfing* ya que, si hay una carbonización excesiva, ésta afecta a la resistencia del material. Este hallazgo introduce un **aspecto adicional** que no ha sido suficientemente estudiado por la bibliografía: la **calidad del proceso de corte**. En este sentido, el ajuste de los parámetros del láser (potencia, velocidad de corte, enfoque, calibración) podría constituir un factor clave por lo que su estudio y experimentación previa debe ser vigilada con cautela ya que las consecuencias pueden ser severas. Este factor ha sido comprobado en el estudio cuando las probetas fabricadas no eran cortadas por completo debido a errores de calibración, entre otros (*Figura 142*).

**Figura 142.** Control de la tecnología de corte

**Fuente:** Elaboración propia

Otro aspecto **relevante a la tecnología sustractiva es la conicidad inherente** al corte láser, es decir, la ligera inclinación que adoptan las paredes del *kerf* como consecuencia de la divergencia del haz y la interacción entre la energía y el espesor del material. Este fenómeno provoca que la abertura no sea completamente perpendicular. Según Silveira et al. (2018), esta conicidad puede modificar de manera significativa la flexibilidad global del panel, ya que esa conicidad parcial de cada *kerf* disminuye el ángulo global de curvatura del panel. Este fenómeno podría explicar que, a igualdad de patrón, la flexión a un lado y a otro sea diferente, lo que pone de relieve la necesidad de controlar no solo la geometría del *kerf*, sino también la calidad del corte. En las probetas se experimentó y observó que la flexibilidad aumentaba en mayor medida en dirección a la cara superior, debido a la conicidad (*Figura 143*).

**Figura 143.** Efecto de la conicidad en las probetas

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.3 Correlación ensayo – simulación y correlación entre espesores

En este apartado se discutirán las conclusiones obtenidas en las simulaciones digitales valorando su utilidad en conjunto, además se dará respuesta a las siguientes incógnitas:

*¿Cómo se correlacionan los resultados experimentales con las simulaciones de elementos finitos en términos de distribución de tensiones?*

Las simulaciones por elementos finitos realizadas con SolidWorks permiten establecer una **correlación cualitativa** con los resultados experimentales. En términos de distribución de tensiones, estas se muestran en las mismas regiones generales donde se produce la rotura experimental (extremo de los cortes, radios de unión, zonas de transición del patrón). Este hecho puede aportar una **verificación cualitativa** de las zonas críticas identificadas en los ensayos físicos, lo que constituye un punto de validación de la herramienta digital como soporte predictivo.

Concretamente en el **ensayo de tracción**, la probeta sin patrón mostró una distribución homogénea con pico en la zona central, el patrón A, B y C mostraron los picos de tensiones en las zonas de los extremos ranurados, lo que sirve para prever las zonas más propensas a rotura. En cuanto a magnitudes la tendencia relativa entre patrones ( $A > B > C$ ) se mantiene constante con lo estudiado experimentalmente, lo que confirma la capacidad de simulación para poder anticiparse a tendencias y orientar decisiones de diseño.

En el **ensayo de flexión** con extremos empotradas y carga central, la correlación resultó igualmente coherente, las simulaciones ubicaron los máximos esfuerzos en dos zonas: en la fibra traccionada de la sección central o en la zona de agarre de la probeta. Los resultados experimentales confirmaron que la rotura ocurría en ambas zonas, comprobando la utilidad del modelo numérico para predecir los puntos sugestionados.

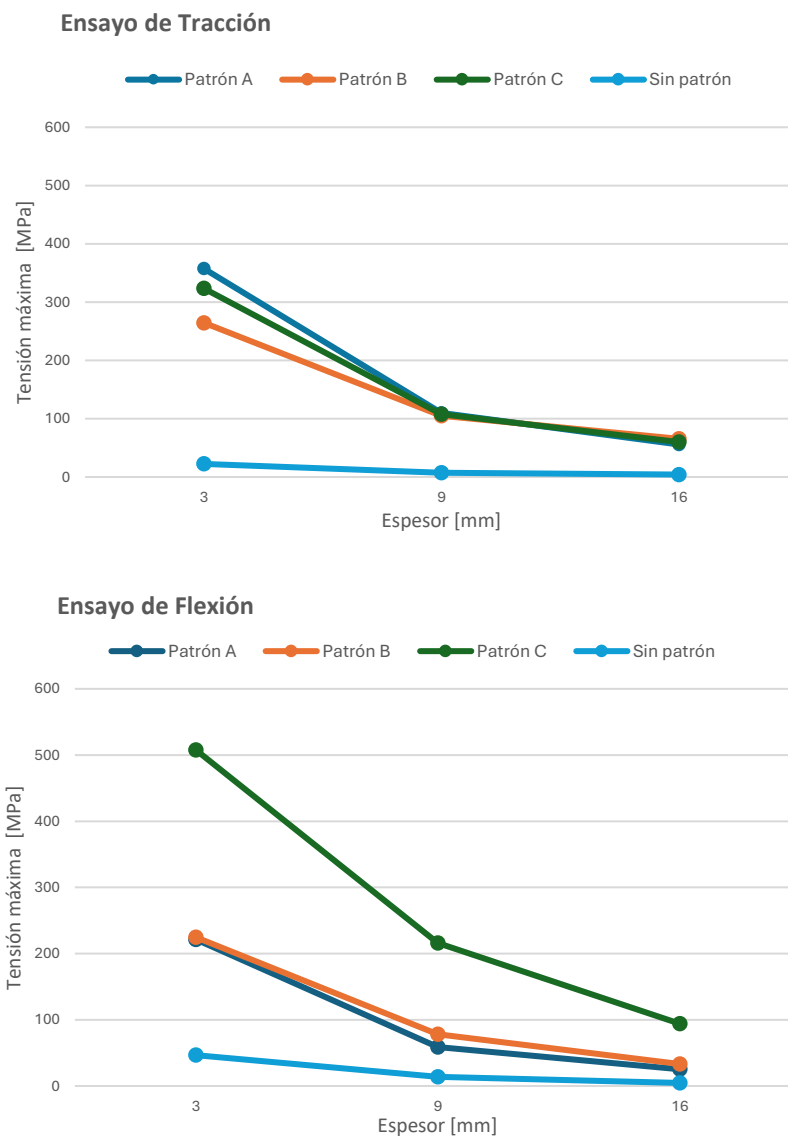
Sin embargo, en ambos ensayos el **factor cuantitativo** refleja incrementos de tensiones localizados en determinadas áreas, valores que son significativamente más elevados que los resultados calculados, pero que no representan el comportamiento global del material. Por tanto, el valor más representativo para la comparación con los resultados experimentales no es la tensión puntual máxima registrada por *SolidWorks*,

sino la distribución uniforme de tensiones, donde la escala de color de los resultados del programa muestra una correspondencia más coherente con la resistencia a tracción y flexión calculada de forma experimental.

*¿Existe una correlación numérica entre la resistencia mecánica y el espesor al aumentar el mismo?*

Los resultados experimentales muestran una correlación: al aumentar el espesor, la resistencia y la rigidez se incrementan significativamente en todos los patrones. El incremento del espesor mejora la sección resistente y, en consecuencia, la capacidad portante, pero también modifica el comportamiento en términos de flexibilidad, reduciéndola a coste del aumento de la rigidez.

**Figura 144.** Correlación espesor resistencia en ambos ensayos



Fuente: Elaboración propia

En la *Figura 144* se puede observar cómo en ambos ensayos existe una clara tendencia decreciente de la tensión máxima, lo que refleja el efecto esperado del incremento de la rigidez de la sección. Las probetas sin patrón muestran tensiones máximas muy bajas en comparación con las probetas con *kerfing*, y su caída con el espesor es menos pronunciada.

En el ensayo de tracción, los patrones A, B y C presentan una ganancia de resistencia clara derivada del incremento del área resistente: al crecer la sección, la tensión disminuye de manera casi lineal con el espesor ( $\sigma \propto 1/e$ ). En flexión, se observa un crecimiento más acusado debido a la dependencia cuadrática de la tensión con el espesor ( $\sigma \propto 1/e^2$ ). En ambos casos, se aprecia como las curvas de los tres patrones convergen conforme aumenta el espesor, incluso solapándose. Este comportamiento se puede atribuir a la dominancia de la rigidez seccional y a la reducción relativa de la influencia geométrica de los *kerfs*, ya que el ancho del patrón de corte es prácticamente despreciable comparado con la masa del material. Es por ello que, a grandes espesores los patrones convergen a las mismas tensiones.

En consecuencia, puede concluirse que el espesor constituye una variable determinante en el diseño: su aumento aporta mayor resistencia estructural, pero puede comprometer los objetivos de flexibilidad. Por ello, resulta recomendable estudiar también la influencia del ancho de corte como parámetro de diseño complementario en perspectiva de líneas futuras.

### 5.4 Interpretación práctica: implicación para el diseño

En este apartado se busca establecer una interpretación práctica sobre la idoneidad de los tres patrones estudiados en función del equilibrio óptimo entre flexibilidad y resistencia estructural, así como identificar posibles aplicaciones de diseño en las que cada uno de ellos podría resultar más ventajoso, para ello se busca responder las siguientes cuestiones:

*¿Cuál de los tres patrones seleccionados ofrece un equilibrio óptimo entre flexibilidad y resistencia estructural?*

Para saber qué patrón podría efectuar un **equilibrio óptimo**, discutiremos cada uno de ellos de manera independiente. En la *Tabla 34* se puede observar los datos organizados. El **criterio de categorización** de los patrones en términos de flexibilidad y resistencia se ha establecido a partir de los resultados experimentales de tracción y

flexión. La **flexibilidad** se valoró principalmente mediante la deflexión máxima ( $\delta_{\text{máx}}$ ) obtenida en el ensayo de flexión, considerando así mismo el módulo aparente de flexión ( $E_f$ ), de modo que **mayores deformaciones y menores valores de rigidez** se interpretan como **mayor flexibilidad**. La **resistencia** se determinó combinando la **tensión máxima en tracción** ( $\sigma_{t-\text{máx}}$ ), que refleja la capacidad intrínseca del material, y la **tensión máxima en flexión** ( $\sigma_{f-\text{máx}}$ ), representativa del comportamiento estructural frente al doblado. En aquellos casos en los que los valores de  $\sigma_{f-\text{máx}}$  resultaron elevados (como en el caso del patrón A), se han interpretado como muestra de fragilidad, advirtiendo que responden en gran medida a concentraciones de tensión y al método de cálculo empleado, considerando la sección más desfavorable. Por otro lado, la carga en kilogramos se ha incluido también, esta es una medida más equiparable a resistencia. Todos los datos recogidos en la *Tabla 34* son **valores promedio** del grupo del patrón que corresponda.

**Tabla 34.** Datos organizados

Patrón	$\sigma_m$ (tracción) [MPa]	E (tracción) [MPa]	Carga máx (tracción) [kg]	$\epsilon$ máx (tracción)	$\sigma_m$ (flexión) [MPa]	E (flexión) [MPa]	Carga máx (flexión) [kg]	$\delta_{\text{máx}}$ (flexión) [mm]
$\emptyset$	18,61	2455,6	228,95	0,088	54,5	1541,6	23,7	21,41
<b>A (lineal)</b>	21,86	366,8	18,65	0,217	104,4	3330,7	5,3	19,00
<b>B (wave)</b>	15,48	301,8	12,95	0,161	22,8	557,1	5,8	24,58
<b>C (rombo)</b>	10,56	204,9	11,92	0,177	22,6	459,7	9,6	30,12

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, puede afirmarse que el comportamiento de los patrones no es uniforme frente a diferentes sollicitaciones.

En tracción, el patrón A (lineal) se posiciona como el más resistente, mientras que el patrón C (romboidal) ofrece la menor capacidad frente a esfuerzos axiales. En cambio, en el ensayo de flexión con apoyos empotrados, la tendencia se invierte: el patrón C (romboidal) es el que alcanza la mayor carga máxima y presenta además la mayor deformación, lo que lo convierte en el más adecuado cuando se requiere soportar esfuerzos flectores con elevada adaptabilidad. El patrón B (wave) mantiene en ambos casos un comportamiento intermedio, constituyendo un compromiso entre resistencia y flexibilidad. Por su parte, el patrón A, aunque ventajoso en tracción, resulta menos eficaz en flexión tanto por su menor capacidad de carga como por su limitada deformación.

Estos resultados ponen de manifiesto que la idoneidad de cada patrón está directamente ligada al tipo de sollicitación predominante: A es recomendable bajo cargas axiales, C bajo cargas flectoras y B cuando se busca un equilibrio entre ambas condiciones tal y como se aprecia en la *Tabla 35*, mediante un código de color.

**Tabla 35.** Relatividad flexibilidad – resistencia entre patrones

	Patrón A	Patrón B	Patrón C
Flexibilidad			
Resistencia a tracción			
Resistencia a flexión			

**Nota:** Leyenda de colores, verde – alto; amarillo – medio; rojo – bajo. **Fuente:** Elaboración propia.

*¿Cuáles son las posibles aplicaciones prácticas de cada patrón en función de su comportamiento mecánico?*

Comenzando por el **patrón A o lineal**, las aplicaciones prácticas podrían ser elementos sometidos principalmente a **cargas axiales** donde se aproveche su mayor resistencia intrínseca, así como componentes que requieran cierta rigidez y en los que no sea deseable una gran deformación (paneles divisorios rígidos, costillas estructurales ligeras, uniones o tirantes en mobiliario). También puede ser correcto su uso en zonas donde se busque un plegado localizado tipo bisagra en dirección controlada, aunque sin soportar flexiones significativas.

El **patrón B (wave)** puede emplearse en soluciones en las que se busque un compromiso entre resistencia y flexibilidad, como paneles que deban curvarse moderadamente manteniendo capacidad portante. Podría ser útil en **mobiliario adaptable** (respaldos que se curven levemente para mejorar la ergonomía) o superficies curvas que deban deformarse sin perder estabilidad básica.

Respecto al **patrón C o romboidal**, resulta útil su utilización en aplicaciones donde se sometan a flexión, donde su elevada deformabilidad y capacidad portante lo hacen idóneo (respaldos de sillas, superficies de curvatura pronunciada). A su vez, su validez para situaciones donde **se privilegie la capacidad de doblado y conformación frente a la resistencia axial** resulta un patrón idóneo.

La extrapolación práctica de los hallazgos pone en evidencia la importancia de **adoptar la geometría del kerfing a las necesidades funcionales** del producto. Los diseñadores e ingenieros pueden, por tanto, emplear estos patrones como un catálogo de soluciones adaptables, en el que la elección del corte no sea únicamente un criterio estético, sino también una **decisión técnica** fundamental en su comportamiento.



**Conclusiones.**



## 6. Conclusiones

Con el presente epígrafe se concluye el estudio sobre la **aplicación de la técnica de kerfing en paneles de MDF**, por lo que en este apartado se reflexionará sobre los hallazgos obtenidos y las contribuciones que esta investigación aporta al conocimiento del comportamiento mecánico de patrones de corte y su aplicabilidad en diseño y fabricación. Asimismo, se señalan **las limitaciones detectadas** durante el desarrollo experimental y se propone una hoja de ruta para futuras exploraciones que permitan consolidar y ampliar los resultados aquí presentados.

Tal y como se planteó en la introducción, el *kerfing* ofrece una **vía versátil y económica para modular la rigidez y la deformabilidad** en un material sin recurrir a procesos de conformado complejos ni materiales compuestos más costosos. A través del diseño experimental y de la ejecución de ensayos, combinando cortes con cortadora láser y ensayos normalizados adaptados, se ha podido comparar el comportamiento de **tres familias de patrones** (lineales, inclinados o wave y de sustracción de material o romboidal) en términos de respuesta a flexión y tracción, así como extraer conclusiones aplicables al diseño de piezas con flexibilidad localizada.

Este trabajo aporta **novedad científica** en varios frentes: 1) integra procesos replicables con maquinaria accesible y normalizada, facilitando la reproducibilidad para futuros investigadores; 2) propone y valida experimentalmente **varias configuraciones de patrones en un mismo material**, hecho poco descrito en la bibliografía técnica; y 3) combina un **enfoque experimental con criterios de diseño aplicado** (posible uso en mobiliario), reforzando la utilidad del *kerfing* no solo como un recurso formal sino como una estrategia estructural de bajo coste, debido al material.

A pesar de ello, el desarrollo experimental puede presentar **varias limitaciones** relevantes que deben considerarse al interpretar resultado y plantear extrapolaciones de diseño o seguridad:

- **Restricciones y adaptación normativa:** las normativas técnicas consultadas limitan o condicionan la manipulación de probetas, sin embargo, se ha seguido adaptando las normativas a las soluciones experimentales ya que no existe ninguna normativa aplicable por completo.
- El **tamaño de la muestra** de las probetas con patrón ( $n = 3$ ), extraído de la bibliografía, puede resultar pequeño, lo que puede aumentar la incertidumbre

estadística, sobre todo en el **ensayo de flexión experimental**, donde la configuración utilizada y la naturaleza “casera” de algunos acondicionamientos pueden producir efectos en los resultados, como cambios bruscos en la curva fuerza tiempo debido a picos de fuerza aplicada de manera repentina.

- **Condiciones higrotérmicas y material:** la sensibilidad del MDF a la humedad y a las condiciones ambientales pudo afectar a la reproducibilidad ya que el control ambiental fue limitado.
- **La variabilidad del proceso láser:** pequeñas variaciones de origen humano en el corte láser como la focalización o calibración, podría haber introducido irregularidades geométricas que influyen en el comportamiento mecánico, aunque esta variabilidad se ha intentado controlar al máximo.

Los resultados obtenidos permiten **identificar aplicaciones prácticas** prometedoras como mobiliario adaptable, paneles y elementos con rigidez variable para sillas, respaldos o elementos curvables que pueden modificar su rigidez sin procesos de conformado adicionales. Facilita el prototipado rápido y el diseño paramétrico al posibilitar ajustes estructurales mediante la geometría del corte en vez de cambiar materiales. Puede ser aplicable a rejillas, biombos y cerramientos ligeros que requieran flexibilidad controlada y resulta útil en componentes que demandan deformación localizada para confort o disipación de energía. Además, por su bajo coste, el *kerfing* constituye una opción atractiva para talleres y estudios que busquen soluciones estructurales modulables sin recurrir a materiales compuestos o procesos caros, abriendo asimismo la puerta a usos en producto industrial y arquitectura ligera.

A partir de las limitaciones, hallazgos y aplicaciones, se pueden proponer diversas **líneas de investigación futuras** que permitirían ampliar la aportación de este trabajo: Aumentar el tamaño muestral y realizar un diseño experimental más amplio para obtener estimaciones estadísticas robustas, acompañando estos ensayos con un control estricto de las condiciones ambientales para evaluar el efecto higrotérmico sobre el MDF; es recomendable optimizar y calibrar el proceso de corte por láser, así como realizar ensayos normalizados complementarios (fatiga, impacto, envejecimiento y comportamiento a largo plazo) para entender mejor la durabilidad; desde el punto de vista analítico puede resultar conveniente desarrollar modelos numéricos por elementos finitos que permitan la optimización geométrica de los patrones y la calibración del módulo de flexión aparente obtenido experimentalmente.

Además, resulta interesante escalar los resultados obtenidos a aplicaciones reales, para validar el comportamiento en condiciones de uso, estudiar tratamientos superficiales o revestimientos que modifiquen la respuesta y/o extender el estudio a otros materiales como contrachapado o polímeros; finalmente, integrar estos resultados en flujos de trabajo de diseño paramétrico y fabricación digital facilitará la transferencia a la industria y a talleres de prototipado, consolidando el *kerfing* como técnica viable tanto en investigación como en aplicación práctica.

En definitiva, este proyecto ha permitido investigar de manera rigurosa y aplicada el potencial del *kerfing* para modular propiedades mecánicas de paneles de MDF. Aunque existen limitaciones experimentales, los hallazgos confirman que la geometría de corte es una herramienta poderosa para ajustar resistencia y flexibilidad. El estudio abre caminos claros para investigación adicional y ofrece una base sólida para su traslación al diseño del producto.



# **Bibliografía.**



## 7. Bibliografía

- Addington, M., & Schodek, D. (2012).** *Smart materials and technologies in architecture*. Routledge.
- AITIM (Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera). (s. f.).** *Tableros MDF: Información general*. Recuperado el 18 de mayo de 2025, de [https://infomadera.net/uploads/productos/informacion\\_general\\_426\\_mdf.pdf](https://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_426_mdf.pdf)
- American National Standards Institute. (2022).** *Medium Density Fiberboard (MDF) For Interior Applications: ANSI A208.2-2022*. ANSI.
- Andonstar. (s. f.).** *Andonstar 246S, 249S digital microscope manual v7: Output to external devices*. Recuperado el 8 de junio de 2025, de [https://manuals.plus/es/andonstar/246s-249s-digital-microscope-manual#output\\_to\\_external\\_devices](https://manuals.plus/es/andonstar/246s-249s-digital-microscope-manual#output_to_external_devices)
- Andonstar. (s.f.).** *3 lentes AD246S-M/AD249S-M LCD HDMI 10/7 inch Digital Microscope HDMI & PC Supported*. <https://andonstarmicroscope.com/products/tri-lens-microscope-246sm-249sm>
- Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera (AITIM). (2005).** *Productos de madera para la arquitectura*. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España (CSCAE).
- Asociación Española de Normalización. (1994).** UNE-EN 310:1994. *Tableros a base de madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y resistencia a la flexión*. UNE.
- Asociación Española de Normalización. (1995).** UNE-EN 326-1:1995. *Tableros a base de madera. Muestreo, corte y evaluación de los valores de ensayo*. UNE.
- Asociación Española de Normalización. (2012).** UNE-EN 325:2012. *Tableros a base de madera. Determinación de las dimensiones de las probetas de ensayo*. UNE.
- ASTM International. (2012).** *ASTM D1037-12: Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1037-12>
- Aullana Arastell, L. (2021).** *Diseño de pendientes fabricados por corte láser* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Babu, b., Nallasivam, j., & Aravinth, s.** *The art of material removal: an overview of subtractive manufacturing*.
- Badoniya, P. (2018).** *CO2 laser cutting of different materials—A review*. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 5(6), 1-12.

- Baison Laser.** (2023, 23 de agosto). *Kerf cortado con láser: lo que necesita saber*. [https://es.baisonlaser.com/blog/laser-cut-kerf/#elementor-toc\\_heading-anchor-0](https://es.baisonlaser.com/blog/laser-cut-kerf/#elementor-toc_heading-anchor-0)
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K.** (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9th ed.). McGraw-Hill.
- Capone, M., & Lanzara, E.** (2019). *Parametric kerf bending: manufacturing double curvature surfaces for wooden furniture design*. *Digital Wood Design: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*, 415-439.
- CHANCSMAC.** (s.f.). *High frequency plywood bending press working theory*. CHANCSMAC. <https://chancsmac.com/high-frequency-plywood-bending-press-working-theory/>
- Chen, R., Turman, C., Jiang, M., Kalantar, N., Moreno, M., & Muliana, A.** (2020). *Mechanics of kerf patterns for creating freeform structures*. *Acta Mechanica*, 231, 3499-3524.
- Cipra Rodriguez, J. A.** (2020). *Evaluación de tableros MDF producidos con residuos de madera de Bolaina Blanca (Guazuma crinita Mart) proveniente de una plantación forestal*.
- Condoroțeanu, C. D., Gurău, L., Coșereanu, C., & Georgescu, S. V.** (2022). *A proposed method to evaluate the effect of changing the kerfing parameters upon the static bending behavior of flexible plywood panels cut by laser*. *Applied Sciences*, 12(9), 4303.
- Darnal, A., Mantri, K., Betts, W., Kalantar, N., Kim, J., & Muliana, A.** (2024). *Flexibility, toughness, and load bearing of 3D-printed chiral kerf composite structures*. *Composites Part B: Engineering*, 284, 111685. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111685>
- Dukta.** (s.f.). *Dukta – Flexible wood*. Recuperado el 18 de abril de 2025, de <https://dukta.com/en/>
- Eltawahni, H. A., Olabi, A. G., & Benyounis, K. Y.** (2011). *Investigating the CO2 laser cutting parameters of MDF wood composite material*. *Optics & Laser Technology*, 43(3), 648-659.
- Fernández Álvarez, A.** (2019). *Diseño de un modelo de silla realizada mediante la técnica “kerfing”* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Forest Products Laboratory.** (2010). *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

- Ganev, S., Gendron, G., Cloutier, A., & Beauregard, R. (2005).** *Mechanical properties of MDF as a function of density and moisture content.* Wood and fiber science, 314-326.
- Gatío, A., Koronaki, A., Al Asali, M. W., Bukauskas, A., Gin, Y., Shah, D. U., ... & Ramage, M. H. (2020, June).** *Flexible and sustainable building components through kerf patterns.* In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2020, No. 5, pp. 1-10). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- GATÍO, Ana, et al.** *Unfolding Timber-A future of design. Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2022.*
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021).** *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- Gomes, A. C. (2017).** *Kerf bending: técnica de flexão de madeira aplicada ao mobiliário* (Doctoral dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina).
- Greenberg, E., & Körner, A. (2014).** *Subtractive manufacturing for variable-stiffness plywood composite structures. Sustainable Design and Manufacturing.*
- Guzelci, O. Z., Alaçam, S., & Bacınoğlu, S. Z. (2017).** *Three-step experimentation on embedding curvature to rigid planar materials through cut patterns.* Gestão & Tecnologia de Projetos, 12(3), 93-107.
- Holterman, A. (2018).** *Pattern Kerfing for Responsive Wooden Surfaces.* Master's thesis, Delft University of Technology.
- Iberolaser. (s.f).** *Máquinas láser CO<sub>2</sub>: Corte y grabado.* Recuperado de: <https://iberolaser.com/maquinas-laser-co2-corte-y-grabado/>
- Kang, H. G. (2010).** *A study on the technique and process of bending wood.* Journal of the Korea Furniture Society, 21(6), 459-468.
- Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J.-Y. (2011).** *A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing.* arXiv preprint arXiv:1106.3176.
- Khatak, P. (2022).** *Laser cutting technique: A literature review.* Materials today: proceedings, 56, 2484-2489.
- Lorenzoni, B. R., & da Silva, F. P. (2021).** *Bending techniques for flat materials using cut patterns: A review.* Global Journal of Engineering and Technology Advances, 7(2), 091-102.
- Lorenzoni, B. R., & Silva, F. P. D. (2022).** *Geometric analysis of the MDF kerf-bending structure accuracy.* International Journal of Space Structures, 37(2), 135-149.

- Loyola, M., Caldera, S., & Rozas, S.** *Kerfing2: Una técnica para el diseño, fabricación y optimización de elementos de doble curvatura a partir de placas rígidas de madera.*
- Luxigo. (2024).** *3mm MDF sheets – laserable material for digital fabrication.* <https://luxigo.nl/en/materialen-luxigo/3mm-mdf/>
- Madier, D. (2020).** *Practical finite element analysis for mechanical engineers (Vol. 147).* Val-Morin, QC, Canada: FEA Academy.
- Muñoz, P., Coronel, J. L., Sequeira, A., & Magnasco, I. R. (2011).** *Fabricación digital y morfología: la flexibilidad en la generación de la forma.* In SIGraDI, XV Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital. [online] Santa Fe, Argentina (p. 368).
- Omega Engineering. (s.f.).** *Células de carga.* <https://es.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html>
- Popovska, V. J., Iliev, B., & Spiroski, I. (2016).** *Characteristics of medium density fiberboards for furniture production and interior application.* South East European Journal of Architecture and Design, 2016, 1-5.
- Rodríguez, J. A., & Antonio, J. (2001).** *Sistemas de prototipado rápido.* Universidad de Vigo, 3, 9-17.
- Sebbe, N. P., Fernandes, F., Sousa, V. F., & Silva, F. J. (2022).** *Hybrid manufacturing processes used in the production of complex parts: a comprehensive review.* Metals, 12(11), 1874.
- Servosis. (s.f.).** *ME-405.* <https://www.servosis.com/producto/me-405/>
- Silveira, A. L. M. D., & Ribeiro, V. G. (2023).** *Estudos preliminares para o cálculo da flexão de materiais planos por meio da técnica de kerf-bending.* Educação gráfica. Bauru, SP. Vol. 27, n. 2 (ago. 2023), p. 271-288.
- Stanford Product Realization Lab. (s.f.).** *Design for laser cutting.* Stanford University. <https://making.stanford.edu/resources/process-guides/laser-cutting/design-laser-cutting>
- Universidad de Málaga. (s.f.).** *Ultimaker S5.* DIGILAB. <https://digilab.uma.es/ultimaker-S5.php>
- Valencia, N. (2017, 23 de enero).** *Inauguran en España el primer puente impreso en 3D del mundo.* ArchDaily en español.
- Van der Linden, J. N. C. (2022).** *Neo-artesanía: marquetería y CNC.* EME Experimental Illustration Art & Design, (10), 110-121. <https://doi.org/10.4995/eme.2022.17253>

- Wei, M., & Singh, K. (2017, June).** *Bend-a-rule: a fabrication-based workflow for 3D planar contour acquisition*. In Proceedings of the 1st annual ACM symposium on computational fabrication (pp. 1-7).
- Weston, M. (2012).** *Anisotropic operations*. *International Journal of Architectural Computing*, 10(1), 105-119.
- Yang, L. J., Haq, A. N., & Nagarajan, L. (2020).** *Proceedings of ICDMC 2019*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer.
- Yao, J. (2021).** *Computational woodworking: Tools for designing stable decorative joints and flexible kerf patterns* (Order No. 28870047). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (2928411929). Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/computational-woodworking-tools-designing-stable/docview/2928411929/se-2>
- Yoshihara, H. (2011).** *Measurement of the Young's modulus and shear modulus of in-plane quasi-isotropic medium-density fiberboard by flexural vibration*. *BioResources*, 6(4).



**ANEXOS.**



## Índice Anexos

<b>ANEXO I. DOCUMENTACIÓN DE LA MAQUINARIA.....</b>	<b>180</b>
1. Cortadora Láser IL1390.....	199
2. Declaración de conformidad CE Servosis ME 405/10 .....	202
<b>ANEXO II. CARACTERIZACIÓN DEL CORTE LÁSER.....</b>	<b>186</b>
1. Caracterización del corte láser .....	205
<b>ANEXO III. CONTROL MICROSCÓPICO.....</b>	<b>190</b>
1. Descripción de la prueba de conicidad.....	209
1.1. Observación microscópica .....	210
1.2. Galería de mediciones .....	214
2. Estimación del ángulo de curvatura total.....	220
2.1. Galería de mediciones .....	221
3. Cálculo del <i>kerf</i> .....	224
3.1. Galería de mediciones .....	225
<b>ANEXO IV. ENSAYO DE TRACCIÓN.....</b>	<b>208</b>
1. Ensayo de tracción .....	229
1.1 Objetivo del ensayo .....	230
1.2 Tipo de probetas ensayadas.....	230
1.3 Parámetros de ensayo .....	231
2. Probeta sin patrón .....	232
3. Probeta con patrón A .....	236
4. Probeta con patrón B .....	239
5. Probeta con patrón C.....	242
<b>ANEXO V. ENSAYO DE FLEXIÓN .....</b>	<b>224</b>
1. Ensayo de flexión.....	249
1.1 Objetivo del ensayo .....	249
1.2. Tipo de probetas ensayadas.....	250
1.4. Parámetros de ensayo .....	250
2. Probeta sin patrón .....	252
3. Probeta con patrón A .....	258
4. Probeta con patrón B .....	261
5. Probeta con patrón C.....	264
<b>ANEXO VI. SIMULACIONES DIGITALES.....</b>	<b>244</b>
1. Simulaciones digitales.....	271
2. Definición de la probeta .....	271
2.1 Geometría de las probetas .....	271
2.2 Material asignado .....	272
3. Condiciones de contorno.....	272
3.1 Ensayo de tracción .....	272
3.2 Ensayo de flexión .....	274

---

4. Tipo de malla y configuración .....	275
4.1 Ensayo de tracción .....	275
4.2 Ensayo de flexión .....	276
5. Resultados .....	277
5.1 Ensayo de tracción .....	278
5.1.1 <i>Campo de tensiones</i> .....	278
5.1.2 <i>Desplazamientos</i> .....	280
5.1.3 <i>Deformación unitaria</i> .....	282
5.1.4 <i>Influencia en el resto de los espesores</i> .....	284
5.2 Ensayo de flexión .....	285
5.2.1 <i>Campo de tensiones</i> .....	285
5.2.2 <i>Desplazamientos</i> .....	291
5.2.3 <i>Deformación unitaria</i> .....	297
5.2.4 <i>Influencia del espesor</i> .....	303
6. Conclusiones .....	303

# **I. Documentación de la maquinaria.**



## Cortadora Láser IL1390



2021



### MÁQUINA IL-1390 CORTE / GRABADO / MARCADO

Nuestro nuevo modelo llega al mercado con unas mejoras sustanciales respecto a su versión anterior, tanto en la mecánica de los ejes X/Y/Z como en la calidad de sus componentes internos y accesorios externos, consiguiendo con ello unos mejores resultados en el corte, grabado y marcado de diferentes materiales tipo mdf, madera, contrachapado, metacrilato, piel, papel, cartón, espumas, etc.



#### Para sistema operativo Win XP, Win Vista, Win 7, Win 8, Win 10

1- Medidas 105cm(Alto) x 187cm(Largo) x 148cm(Ancho).	
2- Área de trabajo 1300mm(eje X) x 900mm(eje Y).	
3- Cabezal láser mecánico de serie ó Autofocus (opcional).	
4- Mesa con sistema sube/baja automático (eje Z). Estructura integrada.	
5- Mesa de trabajo de cuchillas (palas) y otra de panal de abejas.	
6- Cubierta con panel polarizado para protección de la vista.	
7- Sensor de protección de apertura de la máquina.	
8- Apertura delantera/trasera para trabajos con materiales largos.	
9- Sensores de limite electrónicos para ejes X, Y, Z.	
10- Cuadro medidor de amperímetros del tubo láser (digital).	
11- Punto rojo para seguimiento del láser.	
12- Tubo láser marca RECI 100W de 10.000 horas útiles.	
13- Bomba de aire ACO-009D / Compresor insonorizado 30L (opcional).	
14- Activación automática del aire del cabezal mediante sensor.	
15- Enfriador (Chiller) modelo CW-5000.	
16- Extractor de aire silencioso y tubos de aspiración.	
17- Estabilizador de corriente incluido en la fuente de alimentación.	
18- Controlador RDCAM / Conexión WIFI / APP Móvil.	
19- Software RDWorks V8 y Manuales del usuario en español.	
20- Juego de lentes y espejos (marca II VI).	

**Instalación, calibración y capacitación sobre nociones básicas - Incluidos.**  
**Garantía:** 1 año en todas las piezas, salvo en el tubo láser (6 meses).



ventas@iberolaser.com

iberolaser.com

+34 670 792 633



Parámetros diferentes materiales (tubo láser 90W) - IBEROLASER

\* Potencia Máxima (power) recomendada = 80%

\* Máximo mA para un tubo láser RECI de 90W es de 28mA (trabajar en promedio 25-26mA, verificarlo en el medidor mA del tablero)

Nº	Material	Distancia cabezal	Espesor	Corte			Marcado (Corte)			Grabado			Notas			
				Velocidad	MinPoten	MáxPoten	Velocidad	MinPoten	MáxPoten	Velocidad	MinPoten	MáxPoten				
1.1	MDF	8mm	3mm	25	45	45	20-25	15-16	15-16	150	15	15	0.1	Media presión de aire Letras minúsculas oculto Grabado en DW blanco		
				4mm	25	45	45	5	14.0	14.5	60	18	18		0.1	
1.2				5mm												
1.3				10mm												
1.4				6	85	85										
2.1	METACRILATO (Colada)	8mm	3mm	25	40	40								Media presión de aire		
2.2				4mm												
2.3				8mm	6	70	70	5	14.1	14.6	150	16	16		0.1	
2.4				10mm	5	80	80				150	16	16		0.1	
3	CONTRACHAPADO		10mm	14	50	50				70	20	20	0.1	Media presión de aire		
4	CARTÓN		5mm	60	35	35					15	15	0.1	Media presión de aire		
5	MADEIRA		3mm	25	50	50				70	17	17	0.1	Media presión de aire		
6	STENCIL		1mm	60	20	20				70	17	17	0.1	Media presión de aire		
7	POUESTIRENO EXPANDIDO (Pollexpan - Corcho blanco Tecnopop)	Lente 5" DF: 10mm Colocación Parte arriba	34mm	12	24	24										
8	CORCHO GRIS	Lente 5" DF: 10mm Parte arriba	38mm	10	24	24										
9	CORCHO CELESTE	Lente 5" DF: 10mm Parte arriba	50mm	12	30	30										
10	SELLOS CAUCHO (en Negativo)	8mm	15mm	25	60	60				80	15	15	0.05	Media presión de aire		

Fuente: [digilab.uma.es](http://digilab.uma.es)



## Declaración de conformidad CE Servosis ME 405/10

En este anexo se adjunta la Declaración de Conformidad de la máquina de ensayo de tracción SERVOSIS ME 405/10 escaneada, conforme a la **Directiva 2006/42/CE**, como garantía de la validez y fiabilidad del equipo empleado.



### DECLARACION DE CONFORMIDAD CE

LA EMPRESA:

SERVOSIS, S.A.

Como fabricante del siguiente equipo, suministrado a UNIVERSIDAD DE MÁLAGA – E.T.S. ING. INDUSTRIALES, declara que:

DENOMINACION: **MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL**  
MOD. MAQUINA: **ME-405/10**  
Nº SERIE: **1801** AÑO FABRICACION: **2007**

**Es conforme con la Directiva de Máquinas 98/37/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la aproximación de legislaciones de los Estados miembros sobre máquinas y recopila y sustituye a las Directivas 89/392/CEE (y sus sucesivas modificaciones), 91/368/CEE; 93/44/CEE y 93/68/CEE, y con la **Directiva 89/336/CEE sobre Compatibilidad Electromagnética**.

Las directivas citadas anteriormente han sido recopiladas en la legislación Española mediante los Reales Decretos que se citan a continuación

- Directivas sobre máquinas mediante los Reales Decretos 1435/1992 y 56/1995
- Directivas sobre Material eléctrico mediante los Reales Decretos 7/1988 y 154/1995
- Directivas EMC mediante los Reales Decretos 444/1994, 1950/1995 y 1580/2006
- Directiva sobre Baja Tensión mediante R.D. 842/2002
- Directiva sobre seguridad y salud de trabajadores mediante R.D. 1215/1997

**Que se ha tenido en cuenta las normas armonizadas**

**UNE EN-ISO 12100-1:04 Seguridad de las máquinas. Principios generales.**  
**UNE EN-ISO 12100-2:04 Seguridad de las máquinas. Principios técnicos.**  
**UNE EN- 418-1993 Paradas de emergencia.**  
**UNE EN-60204.1-1999 Seguridad de equipos eléctricos.**  
**UNE EN-1037-1996 Puesta en marcha intempestiva de máquinas.**  
**EN-7500-1 Relativa a procesos de verificación máquinas de ensayo.**  
**EN-9513:2003 Relativa a la verificación de extensómetros.**  
**UNE-EN 954-1:97 Sistemas de mando de seguridad.**

SERVOSIS, S.A.

Pinto (Madrid), a 14 de noviembre de 2007

*Fuente: Documentación facilitada por el técnico del laboratorio*

## **II. Caracterización del corte láser.**



## 1. Caracterización del corte láser

En el presente anexo se documenta el proceso de caracterización del corte láser empleado para la correcta fabricación de las probetas del proyecto. El objetivo de este proceso ha sido **optimizar la calidad del corte** sobre MDF de 3 mm de espesor, **garantizando un acabado adecuado, precisión dimensional y repetitividad**, evitando defectos como **carbonización excesiva, rebabas o cortes incompletos**.

Para determinar la combinación óptima de parámetros de corte, se realizaron ensayos experimentales ajustando las siguientes variables. Por un lado, la **potencia (%)**, incluyendo el límite mínimo y máximo, en este caso se fijaron iguales. Y por otro, la **velocidad (mm/s)**. Se denominará según la nomenclatura (*Pot. Min. /Pot. Max. /Vel.*).

Las combinaciones seleccionadas para el ensayo se establecieron tomando como referencia los **valores orientativos sugeridos por el fabricante (Anexo I)** para el **corte de MDF de 3 mm**, y explorando posteriormente **valores ascendentes (Figura 145)**.

Figura 145. Pruebas de caracterización del corte láser



Fuente: Elaboración propia

Cada ensayo se evaluó mediante los **siguientes criterios**:

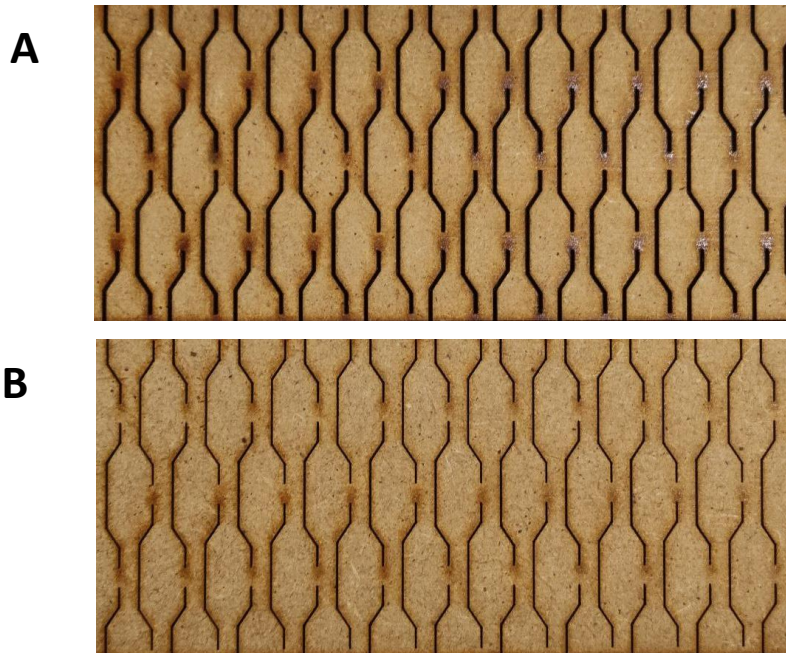
- Completitud del corte a través del espesor
- Calidad del borde
- Nivel de carbonización
- Precisión dimensional respecto a las dimensiones nominales

Tras esta primera prueba (**Figura 145**) se observó que la **potencia especificada de referencia** por el fabricante **no cumplía** con el criterio fundamental de que el **corte debía ser completo** a través del material. Las segundas y terceras potencias (75/75/25 y 100/100/25) presentaron resultados **más consistentes en cuanto a la completitud**

**del corte**, aunque en el caso de la configuración 100/100/25 se observó un nivel elevado de carbonización, con oscurecimiento **evidente en los bordes**.

Para optimizar mejor los resultados, se decidió tomar una **potencia intermedia** que permitiera un **mejor equilibrio entre calidad de corte y carbonización**, manteniéndose **dentro** de los **márgenes razonables sugeridos por el fabricante**. Se volvió a realizar una segunda prueba, esta vez manteniendo la **potencia 60/60/25**, en una primera repetición con esta configuración se detectaron resultados inconsistentes debido a un **error en la calibración** de la distancia focal del cabezal (*Figura 146*), lo que pone de manifiesto la **importancia crítica de este ajuste en la calidad del corte** y poniendo de manifiesto la sensibilidad del proceso de corte láser a múltiples variables de ajuste.

**Figura 146.** Error de calibración con potencia 60/60/25



**Fuente:** Elaboración propia

Una vez corregido este aspecto y verificado el correcto ajuste de la distancia focal, la **configuración 60/60/25** proporcionó **los resultados más satisfactorios** (*Figura 146B*) en función de los criterios establecidos: **corte completo y uniforme en todas las geometrías, carbonización moderada, buena precisión dimensional, borde de buena calidad, sin rebabas apreciables, y repetitividad adecuada para la producción de múltiples unidades**.

Todas las probetas fueron realizadas con la misma potencia y velocidad.

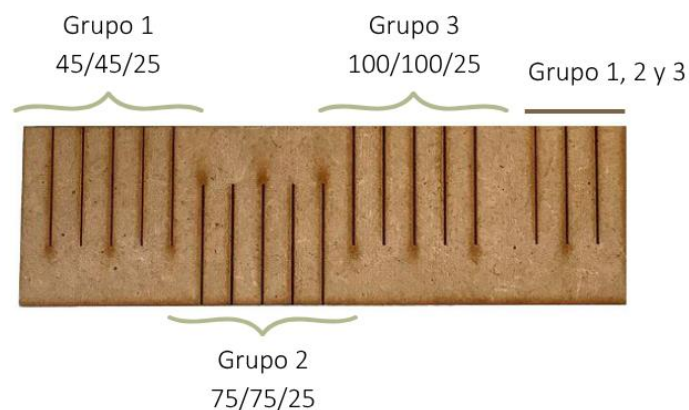
# **III. Control microscópico.**



## 1. Descripción de la prueba de conicidad

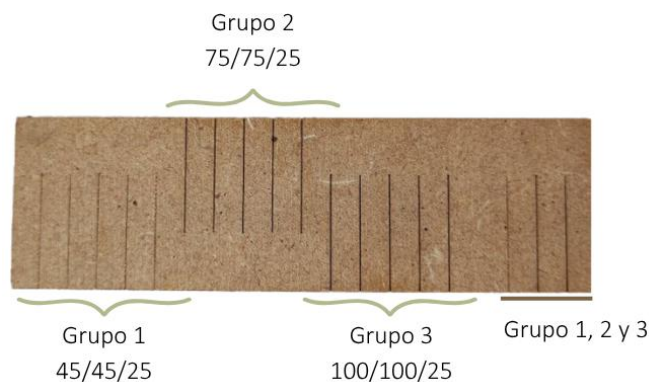
La prueba realizada consiste en **estudiar microscópicamente** desde la planta y el perfil el corte realizado con la *Cortadora Láser* empleada. La probeta obtenida se observa en las **Figuras 147 y 148**, consiste en un rectángulo de **100×30×3 mm** donde se aprecian **tres grupos** de cinco cortes cada uno y un último grupo con tres cortes. A cada uno de los tres primeros grupos se le asignaron **distintos parámetros**. En todo momento, se mantuvo constante la velocidad, mientras que la potencia se incrementa progresivamente a partir del **valor base**, correspondiente a la recomendación del fabricante. Al último grupo se le asignó a cada corte una de las potencias de los grupos anteriores, con el fin de que con el microscopio se pudieran ver los resultados de las tres potencias a la vez. En las **Figuras 147 y 148** se indican los valores empleados en cada grupo, especificados como: **Potencia Mínima / Potencia Máxima / Velocidad**. Cabe señalar que, antes de llevar a cabo esta prueba, se realizó una limpieza de la cortadora láser con el fin de conseguir unos resultados lo más exactos posibles, en vista del mal funcionamiento en una prueba previa.

**Figura 147.** Prueba corte láser con distintas potencias



Fuente: Elaboración propia

**Figura 148.** Reverso prueba corte láser

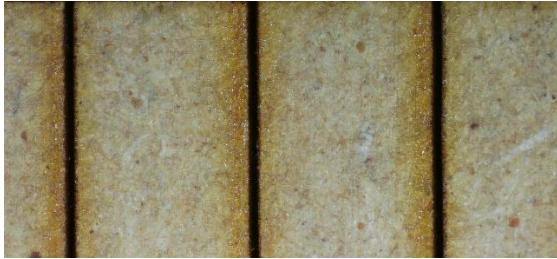


Fuente: Elaboración propia

### 1.1.Observación microscópica

Una vez fabricada la pieza, se observó en el Microscopio Digital 246S/249S con un aumento de entre 60 y 240 con la **lente L** las imágenes en planta y con una magnificación de entre 18 y 720 con la **lente A** las imágenes de perfil. Obteniéndose las siguientes imágenes:

**Figura 149.** Planta grupo 1 (45/45/25)



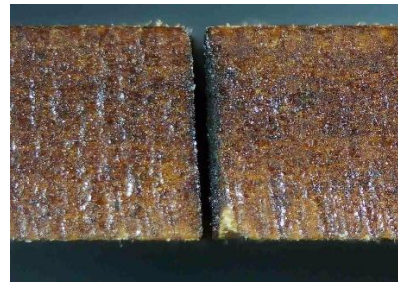
**Figura 150.** Perfil grupo 1 (45/45/25)



**Figura 151.** Planta grupo 2 (75/75/25)



**Figura 152.** Perfil grupo 2 (75/75/25)



**Figura 153.** Planta grupo 3 (100/100/25)



**Figura 154.** Perfil grupo 3 (100/100/25)



**Figura 155.** Planta grupo 1, 2, 3



**Fuente:** Elaboración propia

Figura 156. Perfil grupo 1, 2, 3



Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las imágenes tomadas en **vista superior** (planta), en la **Figura 155** se aprecian las **diferencias** notables en el grosor del corte (*kerf*) entre los tres grupos. A medida que  **aumenta** la potencia del láser, este funde una mayor cantidad de material, provocando un **incremento** en el **ancho del corte**. En la **Figura 153** se puede observar cómo el corte es considerablemente más ancho que en la **Figura 149**. Este comportamiento confirma que el ancho del *kerf* está directamente relacionado con la potencia aplicada (Eltawahni et al., 2011).

Cuanto más **baja** sea la **potencia** (grupo 1) el corte es más **estrecho**: **0,2627 mm**, sin embargo, pueden observarse zonas en el reverso que **no han sido completamente separadas** (debido al concepto de **conicidad** que se mencionará más tarde, **Figura 148**), lo cual indica una penetración insuficiente del haz. Con una potencia media (grupo 2) el ancho de corte es **0,2974 mm** mientras que con potencias elevadas (grupo 3) el corte es más amplio: **0,3189 mm**. La presencia de bordes quemados debido a una sobrefusión del material es menor en el grupo 1, mientras que el grupo 2 y 3 poseen una quemadura mayor pero similar entre sí. Para cada una de las ejecuciones se registró un **promedio** basado en **diez mediciones** del ancho de corte y que se encuentran al final del presente *Anexo*.

En las imágenes tomadas desde el **canto** (vista de perfil) (*Figuras 150, 152 y 154*), se distingue claramente el **efecto cónico del corte** (*Figura 157*), un fenómeno habitual en el corte láser (Khatak, 2022), donde la parte superior del corte (entrada del haz) es más ancha que la inferior (salida del haz), debido a una dispersión de energía, generando así un ángulo de conicidad que puede calcularse mediante la fórmula [12].

Este ángulo es más pronunciado en potencias más bajas (*Figura 150 y 152*) donde la energía penetra el material con una fuerza que se disipa rápidamente, alcanza un ángulo  $\alpha = 0,88^\circ$  para la potencia 1 y  $\alpha = 0,98^\circ$  para la potencia 2. En cambio, a la

potencia más alta (*Figura 154*), el haz penetra completamente, abrasa el material de manera más uniforme, obtenemos un mayor ancho de corte y a su vez, un ángulo de conicidad más reducido, con valor de  $\alpha = 0,44^\circ$ .

$$\alpha = \arctan\left(\frac{w_{sup} - w_{inf}}{2 \cdot e}\right) \quad [12]$$

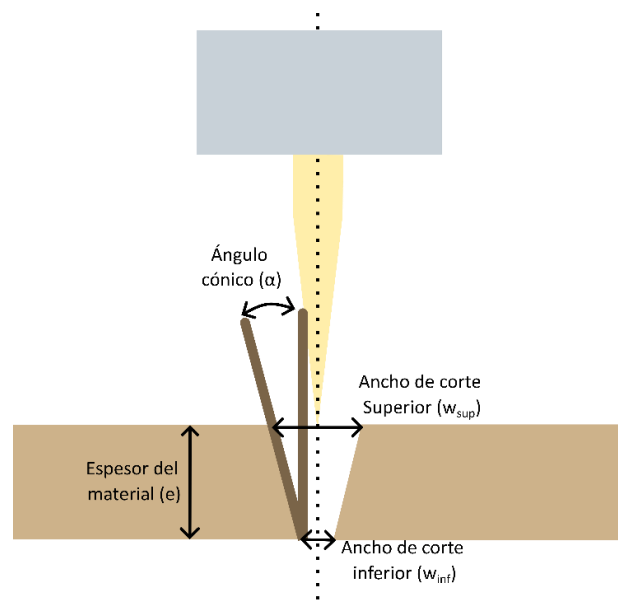
Donde,

$w_{sup}$ , ancho de corte superior

$w_{inf}$ , ancho de corte inferior

$e$ , espesor del material

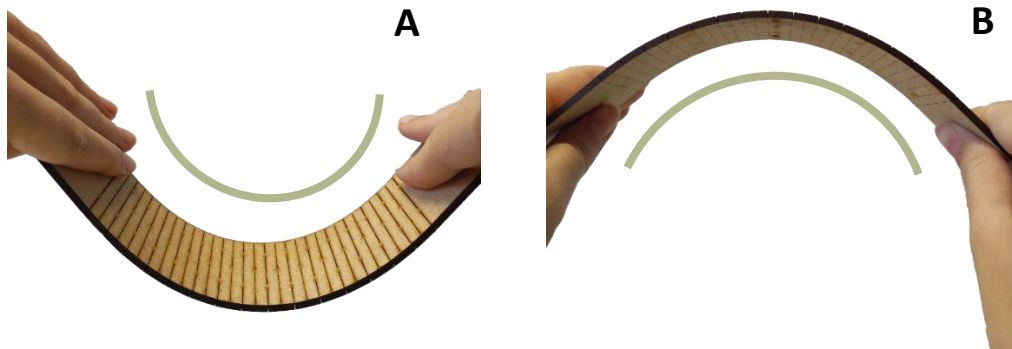
**Figura 157.** Conicidad en el corte láser



**Fuente:** Elaboración propia

El fenómeno de la conicidad puede comprobarse a su vez de forma empírica mediante la flexión manual de una muestra (*Figura 158*) a la que se le ha aplicado el patrón de *kerfing* lineal. Al intentar curvarla en ambos sentidos, se observa que **la flexión es significativamente más pronunciada en una dirección que en la opuesta**, lo que evidencia la **conicidad del corte generado por el láser**. Esta conicidad, que provoca que **la abertura del corte sea más ancha en la cara superior que en la inferior**, generando una geometría asimétrica en sección que provoca que el material tienda a curvarse con mayor facilidad hacia el lado del corte más amplio. Por tanto, la flexión será más pronunciada cuando la curvatura interior coincida con el lado donde el ancho de corte es más amplio.

Figura 158. Demostración empírica conicidad



**Nota.** A) Mayor curvatura al doblarse hacia el lado donde el ancho de corte es mayor; B) Menor curvatura limitada por el menor ancho de corte de la circunferencia interior, donde el ancho de corte es menor.

**Fuente:** Elaboración propia

## 1.2.Galería de mediciones


En el presente apartado se puede encontrar el registro de cada grupo de medidas obtenidas, así como la información relevante y extraída.

### GRUPO 1

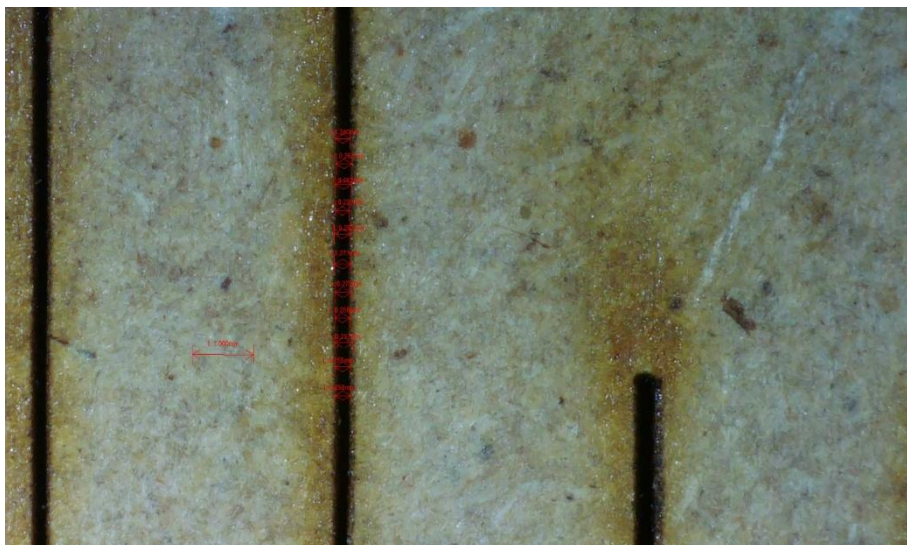
Información general

**Lente:** L  
**Calibrador:** 1,0 mm  
**Medición:** Vista en **planta**, **Potencia 1 - 45/45/25**, (GRUPO 1)

### Registro de mediciones

Nº	Tipo de contenido	Medida [mm]	LENTE EMPLEADA
1	Línea	0,273	
2	Línea	0,273	
3	Línea	0,25	
4	Línea	0,297	
5	Línea	0,258	
6	Línea	0,25	
7	Línea	0,262	
8	Línea	0,262	
9	Línea	0,262	
10	Línea	0,24	
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,263</b>	

### IMAGEN ASOCIADA




**GRUPO 1**

Información general

**Lente:** A  
**Calibrador:** 1,0 mm  
**Medición:** Vista de perfil, Potencia 1 – 45/45/25, (Grupo 1)

Registro de mediciones

Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	LENTE EMPLEADA
1	Kerf superior	0,19	11	Kerf inferior	0,097	
2	Kerf superior	0,19	12	Kerf inferior	0,102	
3	Kerf superior	0,181	13	Kerf inferior	0,102	
4	Kerf superior	0,181	14	Kerf inferior	0,093	
5	Kerf superior	0,204	15	Kerf inferior	0,093	
6	Kerf superior	0,181	16	Kerf inferior	0,106	
7	Kerf superior	0,204	17	Kerf inferior	0,093	
8	Kerf superior	0,194	18	Kerf inferior	0,102	
9	Kerf superior	0,181	19	Kerf inferior	0,097	
10	Kerf superior	0,181	20	Kerf inferior	0,083	
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,1887</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>0,0968</b>	

$$\alpha = \arctan \left( \frac{w_{sup} - w_{inf}}{2 \cdot e} \right) = \arctan \left( \frac{0,189 - 0,097}{2 \cdot 3} \right) = 0,88^\circ$$

IMAGEN ASOCIADA




**GRUPO 2**

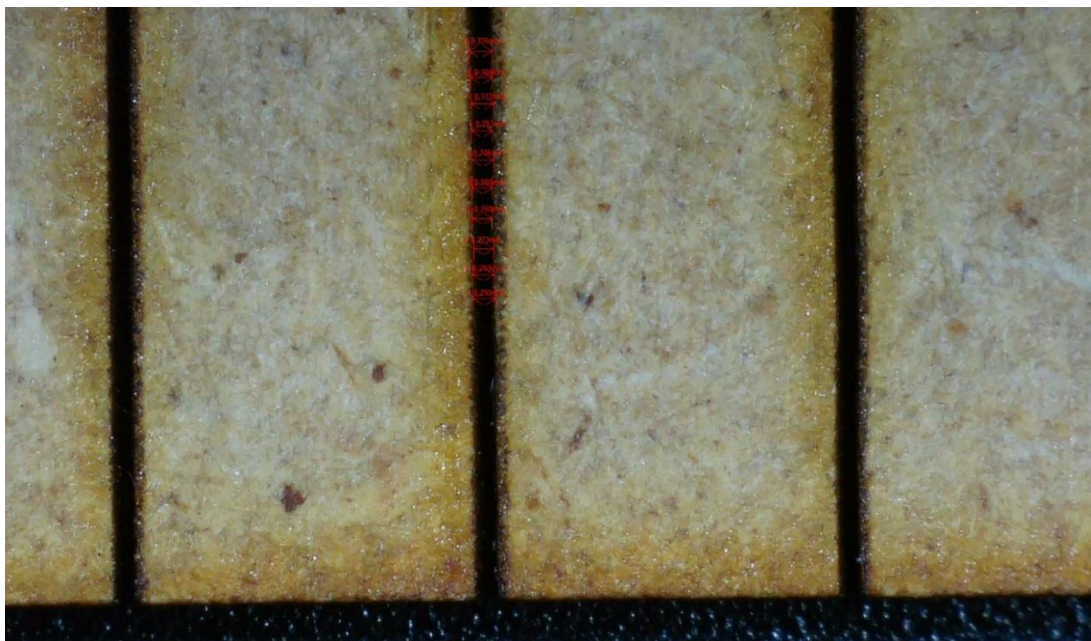
Información general

**Lente:** L  
**Calibrador:** 1,0 mm  
**Medición:** Vista en planta, Potencia 2 - 75/75/25, (Grupo 2)

**Registro de mediciones**

Nº	Tipo de contenido	Medida [mm]	LENTE EMPLEADA
1	Línea	0,326	
2	Línea	0,306	
3	Línea	0,312	
4	Línea	0,293	
5	Línea	0,306	
6	Línea	0,286	
7	Línea	0,28	
8	Línea	0,273	
9	Línea	0,293	
10	Línea	0,299	
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,297</b>	

**IMAGEN ASOCIADA**




**GRUPO 2**

Información general

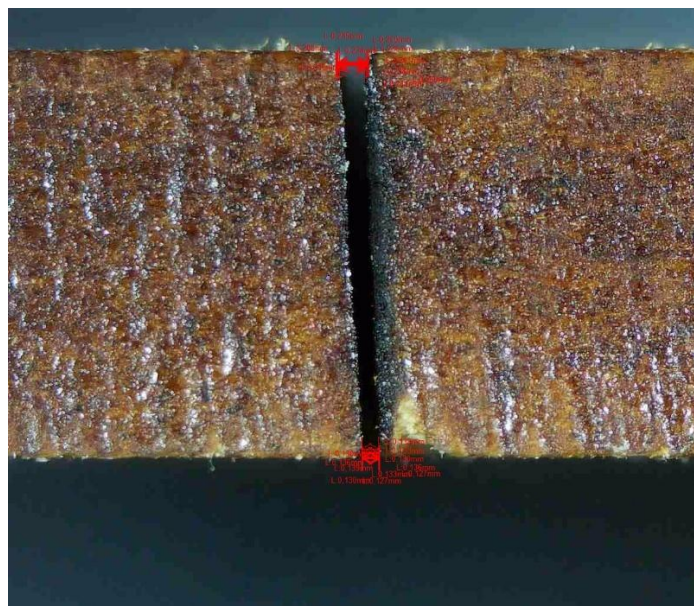
**Lente:** A  
**Calibrador:** 1,0 mm  
**Medición:** Vista de perfil, Potencia 2 - 75/75/25, (GRUPO 2)

Registro de mediciones

Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	LENTE EMPLEADA
1	<i>Kerf superior</i>	0,241	11	<i>Kerf inferior</i>	0,13	
2	<i>Kerf superior</i>	0,236	12	<i>Kerf inferior</i>	0,133	
3	<i>Kerf superior</i>	0,208	13	<i>Kerf inferior</i>	0,13	
4	<i>Kerf superior</i>	0,21	14	<i>Kerf inferior</i>	0,127	
5	<i>Kerf superior</i>	0,238	15	<i>Kerf inferior</i>	0,127	
6	<i>Kerf superior</i>	0,235	16	<i>Kerf inferior</i>	0,139	
7	<i>Kerf superior</i>	0,25	17	<i>Kerf inferior</i>	0,133	
8	<i>Kerf superior</i>	0,238	18	<i>Kerf inferior</i>	0,13	
9	<i>Kerf superior</i>	0,241	19	<i>Kerf inferior</i>	0,136	
10	<i>Kerf superior</i>	0,25	20	<i>Kerf inferior</i>	0,136	
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,2347</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>0,1321</b>	

$$\alpha = \arctan \left( \frac{w_{sup} - w_{inf}}{2 \cdot e} \right) = \arctan \left( \frac{0,2347 - 0,1321}{2 \cdot 3} \right) = 0,98^\circ$$

IMAGEN ASOCIADA



**GRUPO 3**

Información general

**Lente:** L  
**Calibrador:** 1,0 mm  
**Medición:** Vista en planta, Potencia 3 - 100/100/25, (GRUPO 3)

Registro de mediciones


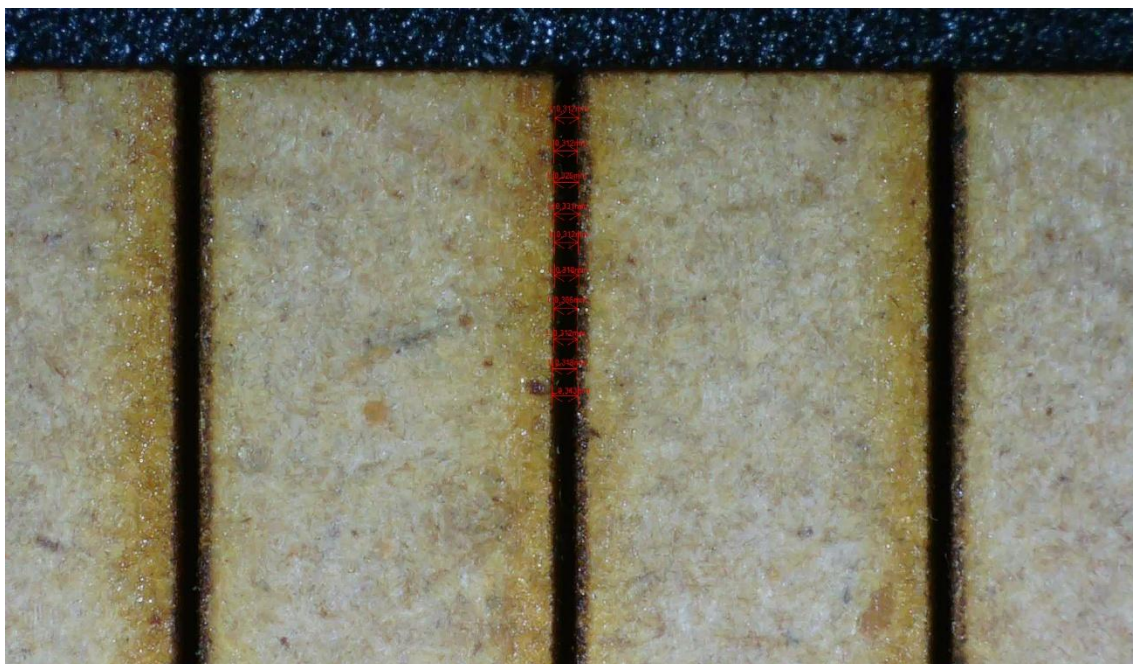
Nº	Tipo de contenido	Medida [mm]	LENTE EMPLEADA
1	Línea	0,312	
2	Línea	0,312	
3	Línea	0,325	
4	Línea	0,331	
5	Línea	0,312	
6	Línea	0,318	
7	Línea	0,306	
8	Línea	0,312	
9	Línea	0,318	
10	Línea	0,343	
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,319</b>	

IMAGEN ASOCIADA




**GRUPO 3**

Información general

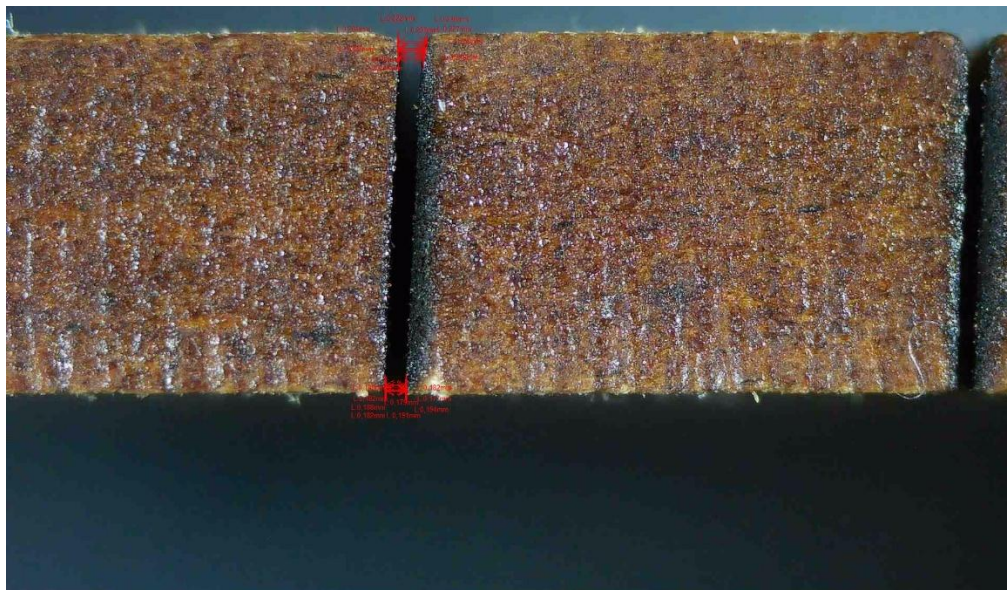
**Lente:** A  
**Calibrador:** 1,0 mm  
**Medición:** Vista de perfil, Potencia 3 - 100/100/25, (GRUPO 3)

Registro de mediciones

Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	LENTE EMPLEADA
1	<i>Kerf superior</i>	0,25	11	<i>Kerf inferior</i>	0,179	
2	<i>Kerf superior</i>	0,264	12	<i>Kerf inferior</i>	0,182	
3	<i>Kerf superior</i>	0,222	13	<i>Kerf inferior</i>	0,188	
4	<i>Kerf superior</i>	0,218	14	<i>Kerf inferior</i>	0,177	
5	<i>Kerf superior</i>	0,222	15	<i>Kerf inferior</i>	0,182	
6	<i>Kerf superior</i>	0,227	16	<i>Kerf inferior</i>	0,188	
7	<i>Kerf superior</i>	0,236	17	<i>Kerf inferior</i>	0,182	
8	<i>Kerf superior</i>	0,214	18	<i>Kerf inferior</i>	0,194	
9	<i>Kerf superior</i>	0,223	19	<i>Kerf inferior</i>	0,191	
10	<i>Kerf superior</i>	0,237	20	<i>Kerf inferior</i>	0,19	
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,2313</b>	<b>PROMEDIO</b>		<b>0,1853</b>	

$$\alpha = \arctan \left( \frac{w_{sup} - w_{inf}}{2 \cdot e} \right) = \arctan \left( \frac{0,2313 - 0,1853}{2 \cdot 3} \right) = 0,44^\circ$$

IMAGEN ASOCIADA



## 2. Estimación del ángulo de curvatura

Cada probeta fue flexionada **manualmente** hasta aproximar su **máxima capacidad de curvatura sin llegar a la fractura**. En ese momento, se registró el **ángulo** formado entre los extremos de la probeta y el eje neutro utilizando el transportador. Esta metodología permitió obtener una **estimación directa y visual** del ángulo de curvatura alcanzable, facilitando la comparación del comportamiento mecánico entre los distintos patrones.

El procedimiento **se repitió para las probetas de los tres patrones**, asegurando la consistencia de la medición y minimizando errores de manipulación. Los resultados obtenidos proporcionan información complementaria a los ensayos de flexión y tracción, permitiendo correlacionar la geometría del kerfing con la deformabilidad de la pieza.

La dirección de flexión fue aquella más restrictiva, es decir dejando el **arco exterior para la cara superior** y el **arco interior para la superficie inferior** del panel. Es la situación más restrictiva ya que el ancho de corte es más amplio en la cara superior que en la cara inferior. A su vez, **estéticamente** hablando es **más atractivo** que la cara superior sea la más visible en la curvatura del material.

A continuación, se muestran las mediciones tomadas.

## 2.1. Galería de mediciones

---

### ÁNGULO DE CURVATURA TOTAL DEL PATRÓN A

---

Información general

---

Patrón: Lineal o A

---

#### Registro de mediciones

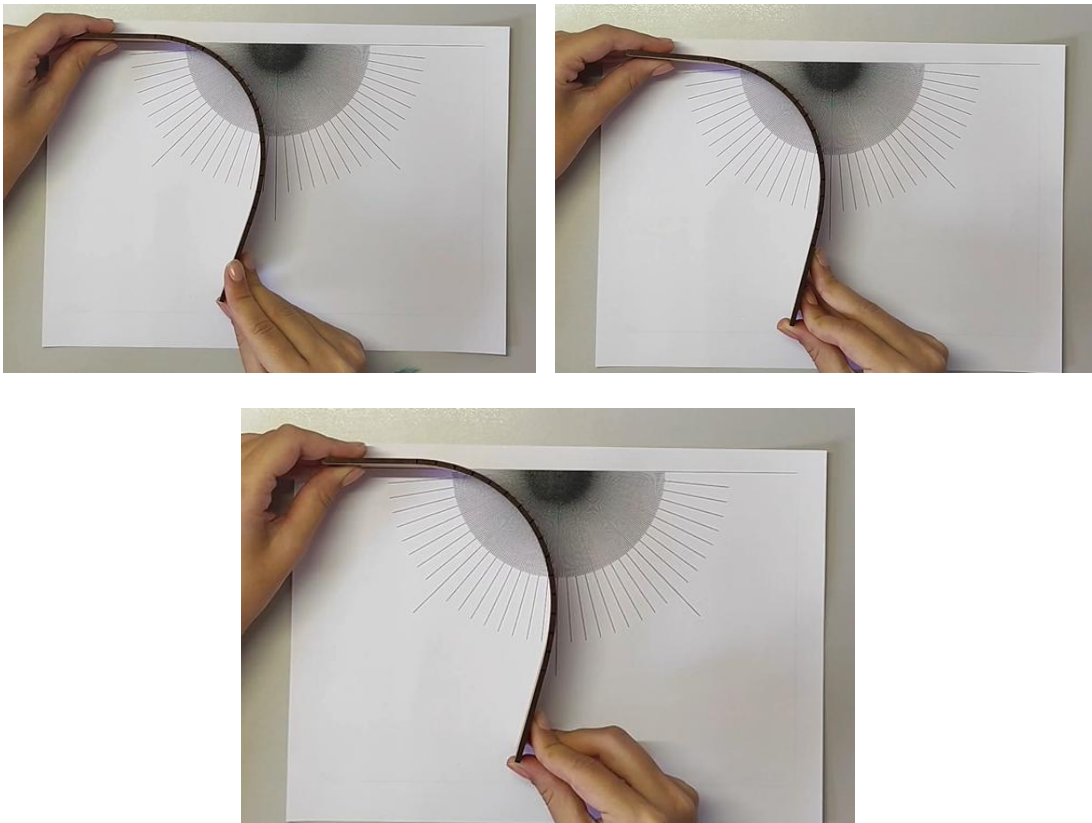
---

Nº	Medida [°]
1	85°
2	87,5°
3	90°
PROMEDIO	87,5°

---

#### IMÁGENES ASOCIADAS

---



## ÁNGULO DE CURVATURA TOTAL DEL PATRÓN B

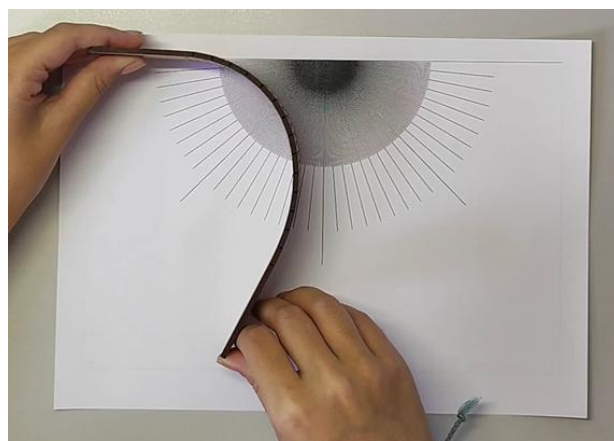
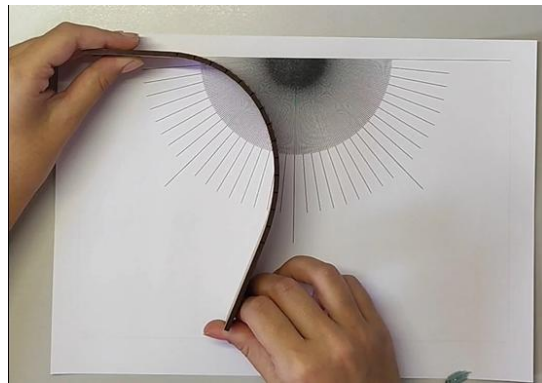
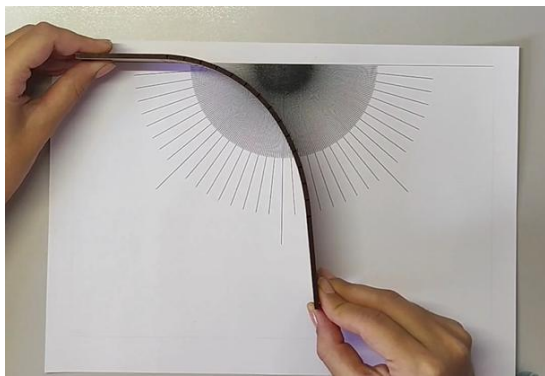
Información general

**Patrón:** Líneas inclinadas, Wave o B

### Registro de mediciones

Nº	Medida [º]
1	100º
2	83,5º
3	80º
<b>PROMEDIO</b>	<b>87,8º</b>

### IMÁGENES ASOCIADAS



---

## ÁNGULO DE CURVATURA TOTAL DEL PATRÓN C

---

Información general

---

Patrón:                    Romboidal o C

---

### Registro de mediciones

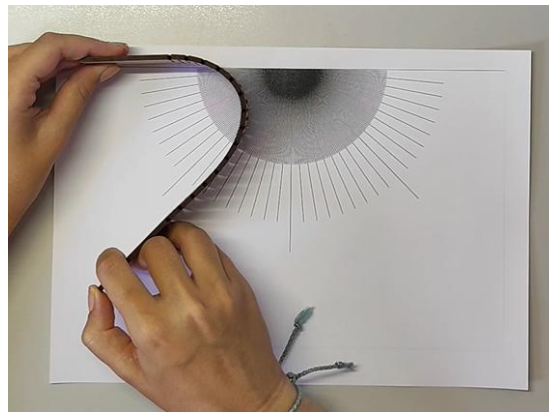
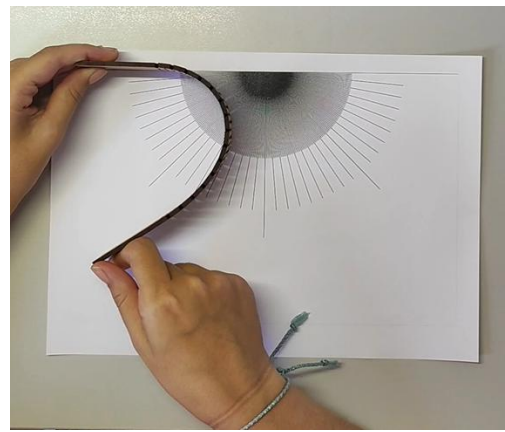
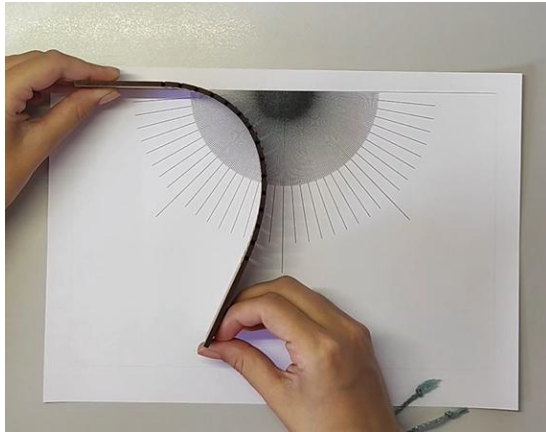
---

Nº	Medida [°]
1	80°
2	65°
3	55°
<b>PROMEDIO</b>	<b>66,67°</b>

---

### IMÁGENES ASOCIADAS

---



### 3. Cálculo del *kerf*

El ancho de corte (*kerf*) fue medido con una probeta con un patrón de corte recto aplicado bajo los parámetros **60/60/25**, definidos en la prueba de parametrización de corte láser como los idóneos para la fabricación de las probetas.

Se midió el *kerf* resultante con la **Lente L del microscopio**, se **tomaron 20 medidas** a lo largo del corte en la probeta. Se obtuvo un valor medio de ancho de corte de **0,31 mm**, que se ha empleado **posteriormente en las simulaciones** digitales por medio de elementos finitos realizadas en **SolidWorks** para garantizar la **precisión dimensional del modelo** respecto de las piezas reales obtenidas.

A continuación, se recogen las mediciones obtenidas con el software *Microscope Measure*, así como la imagen a partir de la cual se han extraído los datos.


### 3.1. Galería de mediciones

#### Medición del ancho de corte o *kerf* de las probetas fabricadas

Información general

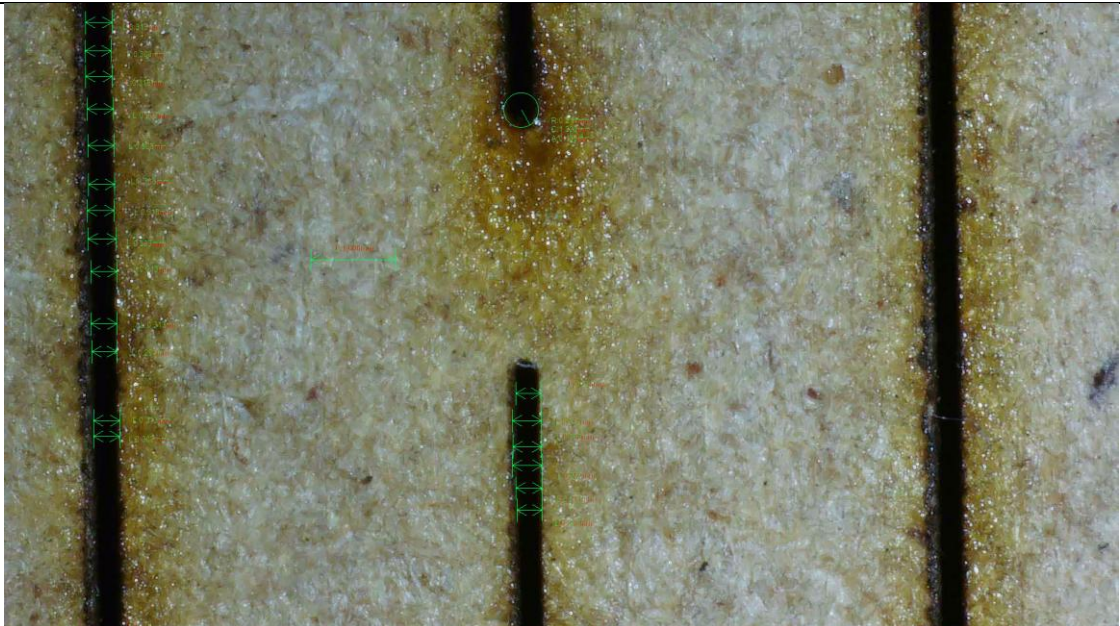
Lente: L  
 Calibrador: 1,0 mm  
 Potencia: 60/60/25

#### Registro de mediciones

Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	Nº	Tipo de medición	Valor [mm]	LENTE EMPLEADA
1	Línea	0,295	11	Línea	0,333	
2	Línea	0,338	12	Línea	0,318	
3	Línea	0,342	13	Línea	0,308	
4	Línea	0,313	14	Línea	0,308	
5	Línea	0,298	15	Línea	0,308	
6	Línea	0,308	16	Línea	0,318	
7	Línea	0,313	17	Línea	0,308	
8	Línea	0,313	18	Línea	0,313	
9	Línea	0,294	19	Línea	0,294	
10	Línea	0,313	20	Línea	0,323	

PROMEDIO 0,3129

#### IMAGEN ASOCIADA





# **IV. Ensayo de tracción.**

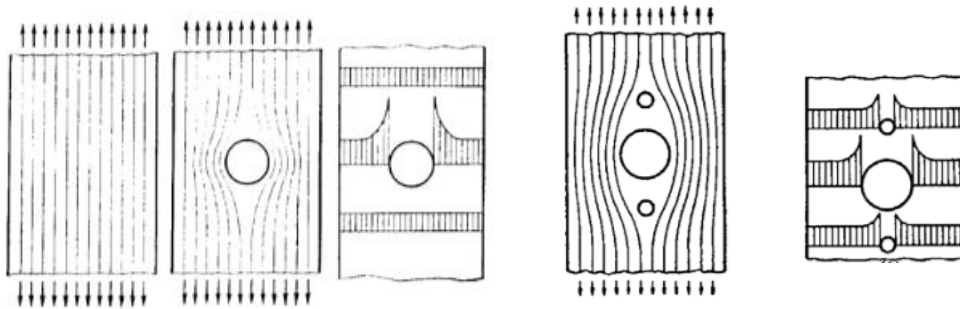


## 1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción implica aplicar una **fuerza gradualmente creciente** a una probeta de forma **uniaxial**, en la dirección paralela a la superficie hasta que se rompe. Durante este proceso, se registran la **fuerza aplicada** y la **deformación resultante de la probeta**. Los datos obtenidos se utilizan para crear una curva tensión-deformación, que muestra cómo reacciona el material a la carga. Para el procedimiento se ha seguido la normativa **ASTM D1037 – 12** para el ensayo y la **ASTM D1095 – 17** para el tratamiento estadístico de los resultados.

Las probetas ensayadas presentan diferentes patrones de *kerfing* que generan interrupciones geométricas en la sección del material, lo cual produce **concentraciones de esfuerzo localizadas**. Estas discontinuidades, provocan una redistribución de las tensiones internas, dando lugar a máximos locales superiores a los que se calcularían bajo la hipótesis de esfuerzo uniforme (*Figura 159*).

**Figura 159.** Representación de líneas de flujo de fuerzas y concentración de esfuerzos



Fuente: [WordPress.com](http://WordPress.com)

Tal y como describe **Budynas y Nisbett (2011)**, la concentración de esfuerzos se define como el **aumento localizado de la tensión en zonas con geometría no uniforme** y se cuantifica mediante el **coeficiente de concentración de esfuerzos ( $K_t$ )**, que se expresa como:

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{nominal}} \quad [1314]$$

Donde,

$\sigma_{m\acute{a}x}$ , es la tensión máxima real en la zona de la discontinuidad,

$\sigma_{nominal}$ , es la tensión calculada suponiendo una sección uniforme (es decir, sin ranuras ni cambios geométricos).

En este trabajo, se ha estimado el valor de  $K_t$  a partir de los resultados experimentales de los dos ensayos. Para cada patrón, se ha obtenido la tensión máxima real considerando el área neta efectiva en la zona de *kerfing*, y se ha comparado con la tensión nominal basada en la sección original sin cortes. Así, se podrá interpretar la distribución tensional en las probetas con ranuras, tanto en el ensayo de tracción como en el de flexión.

### 1.1 Objetivo del ensayo

El objetivo principal del ensayo de tracción es evaluar la **resistencia mecánica** y **el comportamiento a tracción** de diferentes patrones de corte (*kerfing*) aplicados a paneles de MDF. A través de este ensayo se busca comparar la capacidad resistente de cada patrón, así como caracterizar su deformabilidad y rigidez, determinando parámetros como la **tensión máxima**, la **deformación última** y el **módulo de Young**.

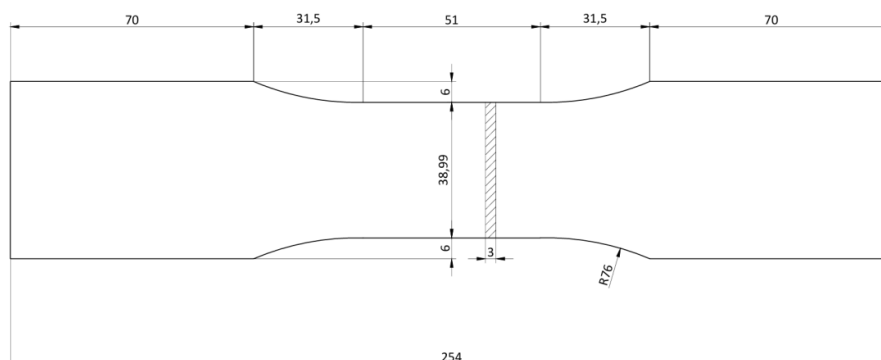
### 1.2 Tipo de probetas ensayadas

Se han ensayado un total de **trece probetas** divididas en **cuatro grupos**, cada uno correspondiente a un patrón diferente de *kerfing*, incluyendo la versión sin patrón:

- **Sin patrón (4):** probetas con las dimensiones especificadas compactas
- **Patrón A (3):** ranuras lineales perpendiculares al eje de tracción
- **Patrón B (3):** ranuras en ángulo inclinado perpendiculares al eje de tracción
- **Patrón C (3):** ranuras con sustracción de material de forma romboidal perpendiculares al eje de tracción

Todas las probetas presentan **dimensiones exteriores de 254 × 51 mm**, con un **espesor constante de 3 mm**, se muestra en la *Figura 160*. El área efectiva se ha reducido considerándose el **área neta resistente** al calcular la tensión.

**Figura 160.** Probeta empleada en el ensayo de tracción



**Fuente:** Elaboración propia

### 1.3 Parámetros de ensayo

- **Equipamiento utilizado:** Servosis, modelo ME-405/10, extensómetro Épsilon.
- **Velocidad de aplicación de carga:** 2 mm/min
- **Condición de sujeción:** ambas caras extremas fijadas mediante mordazas planas antideslizantes, se añadió una lija para asegurar el coeficiente de rozamiento óptimo.
- **Longitud de referencia para la deformación:** 50 mm

## 2. Probeta sin patrón

### ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 1

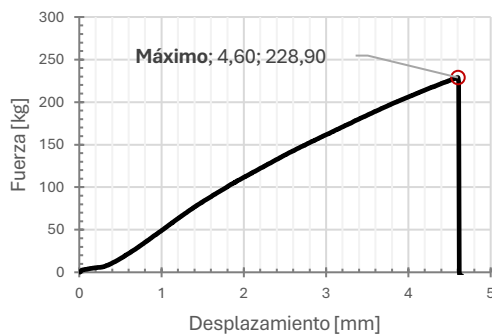
<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
--	-------------------------------	--------------------------------------	---

#### CONTROL DIMENSIONAL [mm]

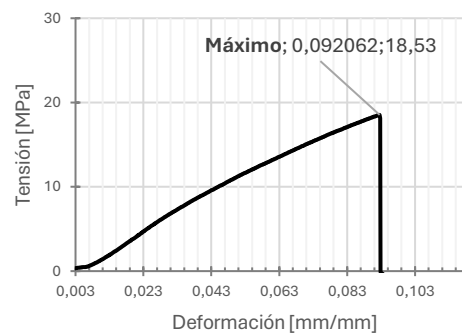
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,07	3,1	3,12	3,1	3,12	3,14	3,12	3,15	3,11	3,13	<b>3,116</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
38,9	38,85	38,85	38,85	38,9	38,8	38,9	38,9	38,9	38,9	<b>38,88</b>

**Sección<sub>1</sub>** = 3,12 · 38,88 = **121,1345 mm<sup>2</sup>**

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



**F<sub>máx</sub>** = **F<sub>uts</sub>** = 228,90 kg

**σ<sub>máx</sub>** = resistencia a tracción = 18,53 MPa

**d<sub>máx</sub>** = 4,60 mm

**ε<sub>máx</sub>** = 0,092

Módulo de Young - Probeta 1

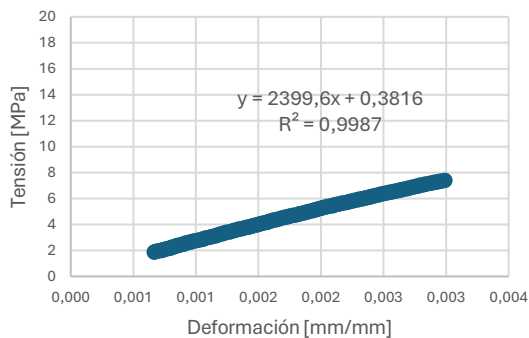


Figura AX1. Fractura observada en Probeta 1 (sin patrón) tras el ensayo de tracción



**E** = 2399,6 ≈ 2400 MPa

Fractura limpia en zona media, perpendicular al eje de aplicación de la carga

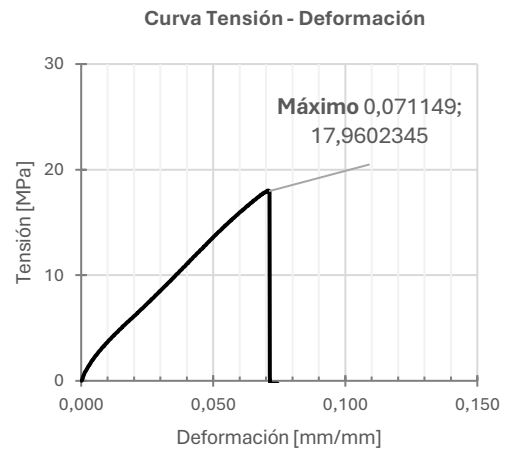
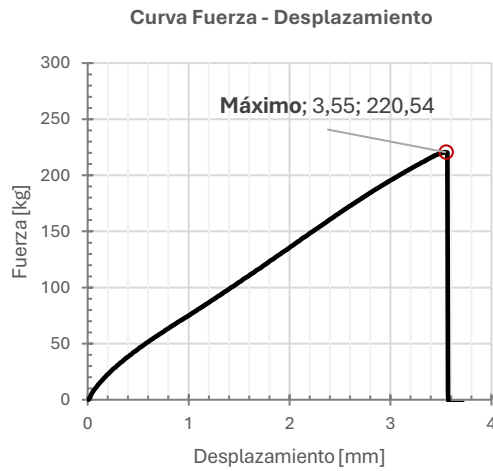
#### OBSERVACIONES

La probeta sin patrón ha mostrado un comportamiento típicamente frágil, comportamiento lineal hasta el fallo, con una tensión máxima de 18,53 MPa y rotura localizada de la matriz lignocelulósica del MDF en el centro de la probeta sin deformación plástica visible. Con respecto el módulo de Young se ha calculado ajustando una recta al tramo elástico inicial de la curva tensión–deformación, con un coeficiente de regresión R<sup>2</sup> de 0,9987, resultando E = 2400 MPa

**INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL**

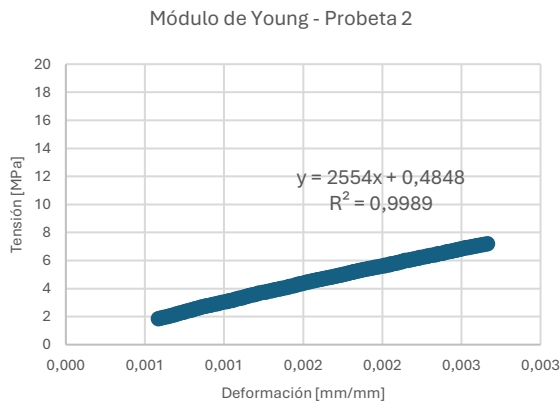
**ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 2**

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.			<b>Velocidad</b> = 2 mm / min			<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm			<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>	
<b>CONTROL DIMENSIONAL [mm]</b>										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
33,1	3,1	3,11	3,11	3,11	3,11	3,1	3,09	3,08	3,11	<b>3,10</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	<b>38,80</b>
<b>Sección<sub>2</sub></b> = 3,10 · 38,80 = <b>120,3576 mm<sup>2</sup></b>										



**F<sub>máx</sub>** = **F<sub>uts</sub>** = 220,54 kg  
**d<sub>máx</sub>** = 3,55 mm

**σ<sub>máx</sub>** = resistencia a tracción = 17,96 MPa  
**ε<sub>máx</sub>** = 0,071



**Figura AX2.** Fractura observada en Probeta 2 (sin patrón) tras el ensayo de tracción



**E** = 2554,6 ≈ 2555 MPa

Fractura limpia en zona cercana al radio de acuerdo, recta en la dirección perpendicular a la dirección de la carga

**OBSERVACIONES**

Esta segunda probeta sin patrón ha mostrado un comportamiento similar; comportamiento lineal hasta el fallo, con una tensión máxima de 17,96 MPa y rotura localizada de la matriz lignocelulósica del MDF en la zona media alta de la probeta sin deformación plástica visible. Con respecto el módulo de Young se ha calculado ajustando una recta al tramo elástico inicial de la curva tensión–deformación, con un coeficiente de regresión R<sup>2</sup> de 0,9989, resultando E = 2555 MPa.

**ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 3**

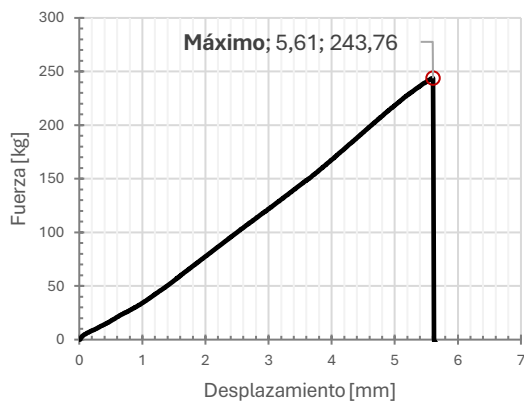
<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad =</b> 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro =</b> 50 mm	<b>Densidad =</b> 750 kg/m <sup>3</sup>
--	-------------------------------	--------------------------------------	---

**CONTROL DIMENSIONAL [mm]**

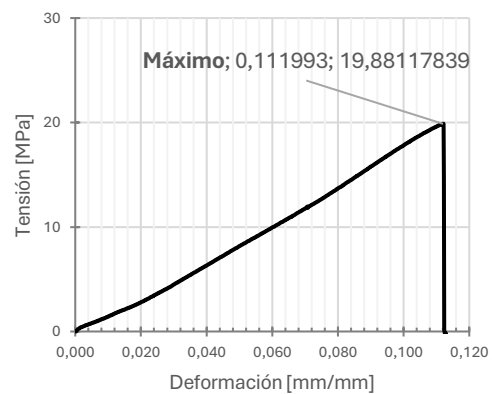
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,08	3,09	3,11	3,09	3,11	3,09	3,09	3,1	3,12	3,08	<b>3,10</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
38,8	38,9	38,9	39	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	<b>38,84</b>

**Sección<sub>3</sub> = 3,10 · 38,84 = 120,2486 mm<sup>2</sup>**

**Curva Fuerza - Desplazamiento**



**Curva Tensión - Deformación**



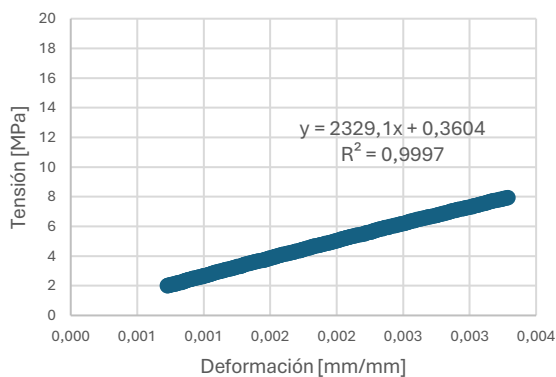
**F<sub>máx</sub> = F<sub>uts</sub> = 243,76 kg**

**σ<sub>máx</sub> = resistencia a tracción = 19,88 MPa**

**d<sub>máx</sub> = 5,61 mm**

**ε<sub>máx</sub> = 0,112**

**Módulo de Young - Probeta 3**



**Figura AX3. Fractura observada en Probeta 3 (sin patrón) tras el ensayo de tracción**



**E = 2329,1 ≈ 2329 MPa**

**Fractura limpia en zona media**

**OBSERVACIONES**

La tercera repetición sin patrón ha mostrado un comportamiento lineal hasta el fallo, esta vez la tensión máxima es mayor, 19,88 MPa. La rotura localizada de la matriz lignocelulósica del MDF en la zona media de la probeta sin deformación plástica. Con respecto el módulo de Young se ha calculado ajustando una recta al tramo elástico inicial de la curva tensión–deformación, con un coeficiente de regresión R<sup>2</sup> de 0,9997, resultando E = 2329 MPa.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 4

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
--	-------------------------------	--------------------------------------	---

#### CONTROL DIMENSIONAL [mm]

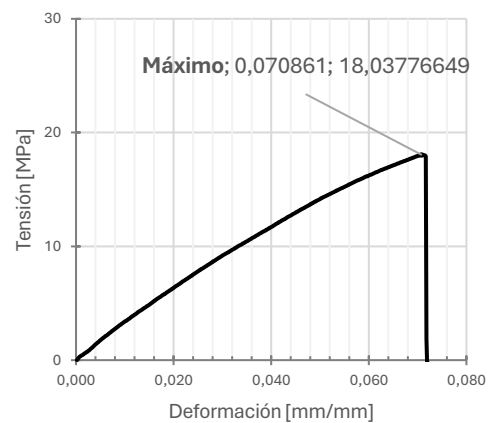
<b>e1</b>	<b>e2</b>	<b>e3</b>	<b>e4</b>	<b>e5</b>	<b>e6</b>	<b>e7</b>	<b>e8</b>	<b>e9</b>	<b>e10</b>	<b>Media espesor</b>
3,12	3,15	3,14	3,12	3,14	3,14	3,09	3,1	3,09	3,11	<b>3,12</b>
<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>b3</b>	<b>b4</b>	<b>b5</b>	<b>b6</b>	<b>b7</b>	<b>b8</b>	<b>b9</b>	<b>b10</b>	<b>Media ancho</b>
38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8

$$\text{Sección}_4 = 3,12 \cdot 38,8 = 121,056 \text{ mm}^2$$

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



$$F_{\text{máx}} = F_{\text{uts}} = 222,59 \text{ kg}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \text{resistencia a tracción} = 18,04 \text{ MPa}$$

$$d_{\text{máx}} = 3,54 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 0,071$$

Módulo de Young - Probeta 4

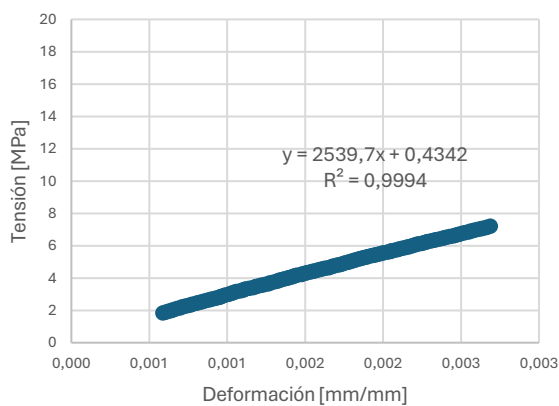


Figura AX4. Fractura observada en Probeta 4 (sin patrón) tras el ensayo de tracción



$$E = 2539,7 \approx 2540 \text{ MPa}$$

Fractura limpia en zona cercana al radio de acuerdo

#### OBSERVACIONES

La última probeta sin patrón ha mostrado un comportamiento lineal hasta el fallo, que se ha producido de manera súbita, clásico en rotura de materiales frágiles. La tensión máxima de 18,04 MPa y la rotura se encuentra localizada en la zona media alta de la probeta sin deformación plástica visible. Con respecto el módulo de Young se ha calculado ajustando una recta al tramo elástico inicial de la curva tensión-deformación, con un coeficiente de regresión  $R^2$  de 0,9994, resultando  $E = 2540 \text{ MPa}$ .

### 3. Probeta con patrón A

#### ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 1A

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
--	-------------------------------	--------------------------------------	---

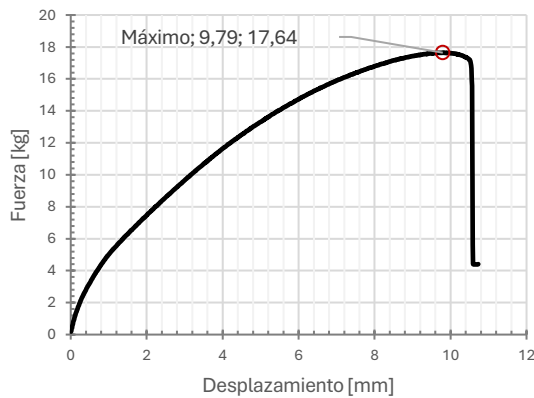
#### CONTROL DIMENSIONAL [mm]

e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	Media espesor
3,12	3,11	3,12	3,11	3,12	3,11	3,14	3,13	3,14	3,13	3,12
b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	b <sub>8</sub>	b <sub>9</sub>	b <sub>10</sub>	Media ancho
2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72

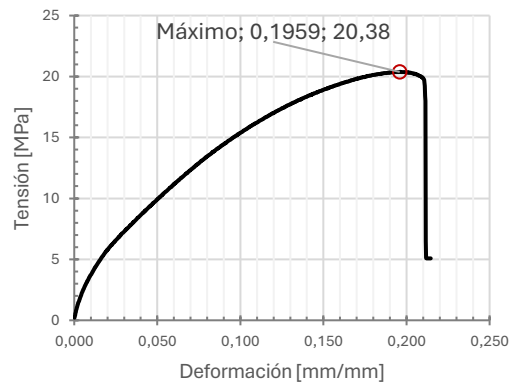
Sección efectiva = 3,12 · 2,72 = 8,49 mm<sup>2</sup>

Mat. Sustraído = 2,2507 %

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



F<sub>máx</sub> = 17,64 kg ; F<sub>uts</sub> = 17,22 kg  
d<sub>máx</sub> = 9,79 mm

σ<sub>máx</sub> = 20,38 MPa ; σ<sub>nom</sub> = 1,43 MPa ; K<sub>t</sub> = 14,26  
ε<sub>máx</sub> = 0,1959

Módulo de Young - Probeta 1A

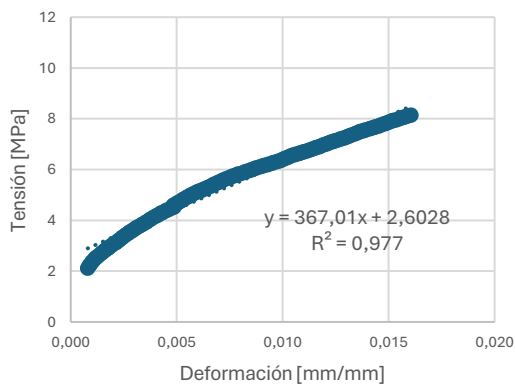


Figura AX5. Fractura observada en Probeta 1A (patrón A) tras el ensayo de tracción



E = 367,01 ≈ 367 MPa

Presenta una rotura en la zona central, la distribución de tensiones provoca que la iniciación de grieta ocurra en el borde interno de la ranura, propagándose rápidamente a través del espesor

#### OBSERVACIONES

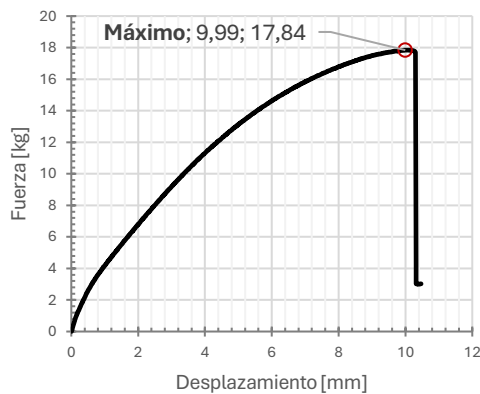
El módulo de Young obtenido (367,01 MPa) evidencia una reducción significativa respecto a las probetas compactas (sin patrón), debido a la pérdida de rigidez inducida por el kerfing. La curva tensión-deformación mantiene un comportamiento lineal hasta cerca del punto máximo (20,38 MPa), lo que sugiere que la zona ranurada condiciona la respuesta estructural del conjunto, funcionando como un concentrador de tensiones.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

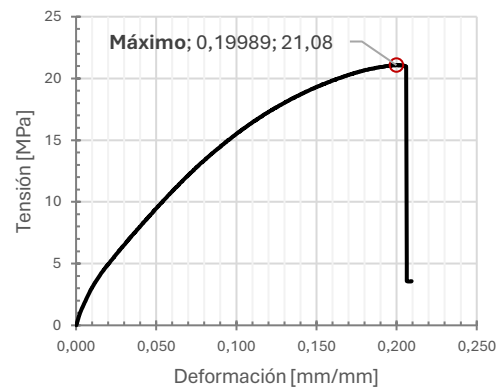
### ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 2A

Maquinaria: Servosis ME-405/10.		Velocidad = 2 mm / min	Longitud extensómetro = 50 mm			Densidad = 750 kg/m <sup>3</sup>				
CONTROL DIMENSIONAL [mm]										
e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	Media espesor
3,11	3,11	3,1	3,11	3,1	3,09	3,1	3,1	3,09	3,1	3,10
b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	b <sub>8</sub>	b <sub>9</sub>	b <sub>10</sub>	Media ancho
2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74	2,74
Sección efectiva = 3,10 · 2,74 = 8,31 mm <sup>2</sup>					Mat. Sustraído = 2,2507 %					

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



$$F_{\text{máx}} = F_{\text{uts}} = 17,84 \text{ kg}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 21,08 \text{ MPa} ; \sigma_{\text{nom}} = 1,45 \text{ MPa} ; K_t = 14,48$$

$$d_{\text{máx}} = 9,99 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{\text{máx}} = 0,19989$$

Módulo de Young - Probeta 2A

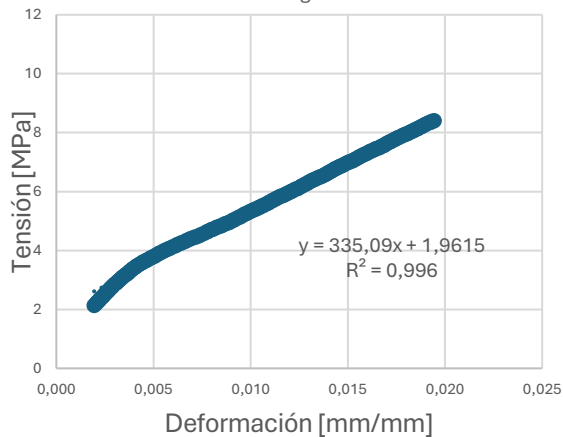


Figura AX6. Fractura observada en Probeta 2A (patrón A) tras el ensayo de tracción



$$E = 335,09 \approx 335 \text{ MPa}$$

La probeta 2A presentó una rotura asimétrica, localizada en el extremo izquierdo de la zona central, correspondiente al área de menor sección. Tras el fallo inicial, la fractura se extendió hacia el lado derecho, impulsada por el impacto.

#### OBSERVACIONES

La curva tensión-deformación evidencia un comportamiento mayoritariamente lineal hasta el punto de máxima tensión (21,08 MPa), tras el cual se produce una caída brusca, característica de una rotura frágil. El módulo de Young obtenido (335,09 MPa) es ligeramente inferior al de la probeta 1A, lo que puede deberse a variaciones en la sección efectiva o a pequeñas diferencias en la respuesta mecánica de la madera tratada mediante kerfing.

**ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 3A**

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
--	-------------------------------	--------------------------------------	---

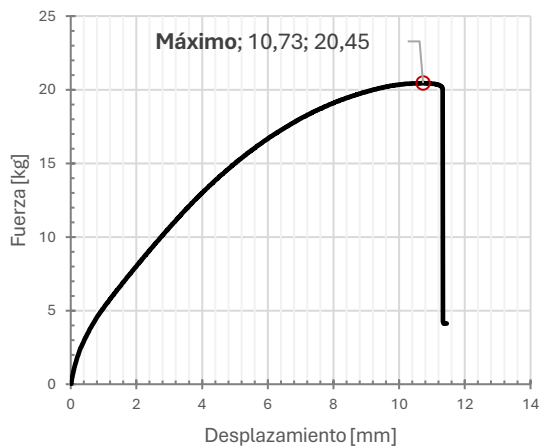
**CONTROL DIMENSIONAL [mm]**

e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	Media espesor
3,15	3,16	3,17	3,15	3,16	3,16	3,13	3,14	3,14	3,13	3,15
b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	b <sub>8</sub>	b <sub>9</sub>	b <sub>10</sub>	Media ancho
2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7

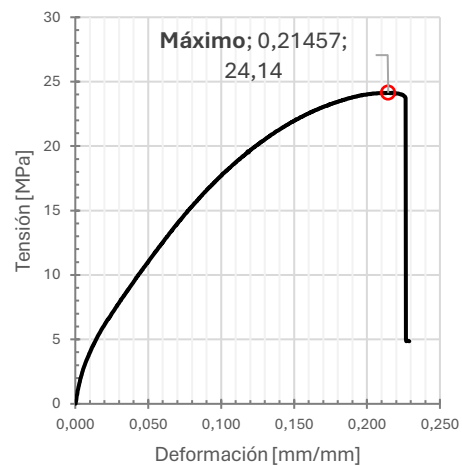
**Sección efectiva** = 3,15 · 2,7 = 8,31 mm<sup>2</sup>

**Mat. Sustraído** = 2,2507 %

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



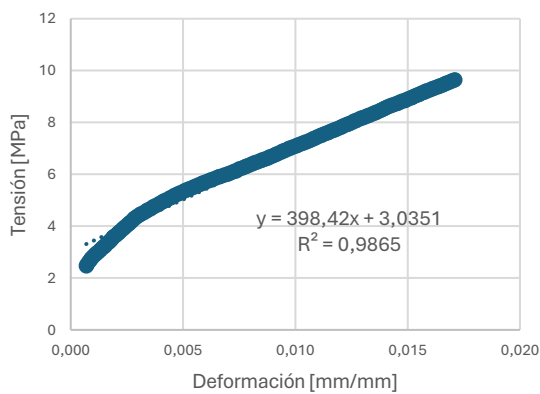
**F<sub>máx</sub>** = **F<sub>uts</sub>** = 20,45 kg

**σ<sub>máx</sub>** = 24,14 MPa ; **σ<sub>nom</sub>** = 1,64 MPa ; **K<sub>t</sub>** = 14,7

**d<sub>máx</sub>** = 10,73 mm

**ε<sub>máx</sub>** = 0,21457

Módulo de Young - Probeta 3A



**Figura AX7.** Fractura observada en Probeta 3A (patrón A) tras el ensayo de tracción



**E** = 398,42 ≈ 398 MPa

La rotura sigue el mismo comportamiento que en la probeta anterior, se rompe asimétricamente, por el lado izquierdo primero y debido al impacto repentino se rompe de manera brusca en la parte izquierda.

**OBSERVACIONES**

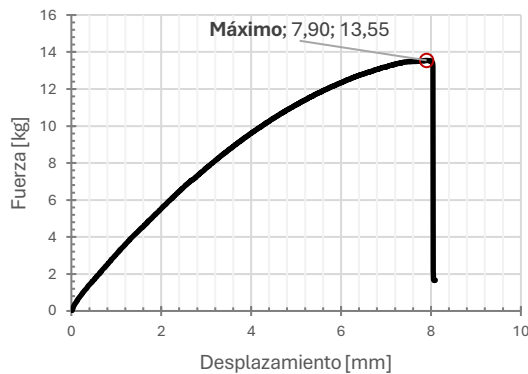
La curva tensión-deformación de la última probeta de patrón A muestra un comportamiento inicial lineal hasta el punto de máxima tensión (20,45 MPa), tras el cual se produce una rotura brusca, característica de una rotura frágil. El módulo de Young obtenido (398,42 MPa)

## 4. Probeta con patrón B

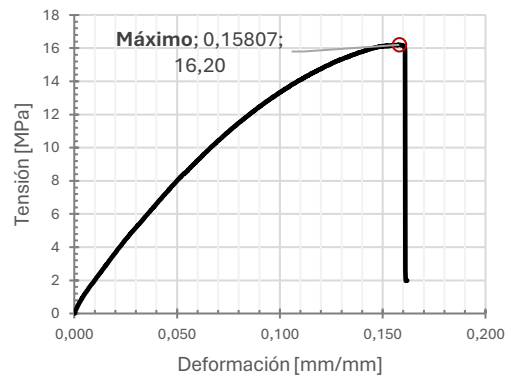
### ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 1B

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>							
CONTROL DIMENSIONAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,12	3,11	3,12	3,11	3,12	3,11	3,14	3,13	3,14	3,13	3,12
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69
<b>Sección efectiva</b> = 3,12 · 2,69 = 8,20 mm <sup>2</sup>						<b>Mat. Sustraído</b> = 2,3580 %				

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



$$F_{\text{máx}} = F_{\text{uts}} = 13,55 \text{ kg}$$

$$d(F_{\text{máx}}) = 13,55 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 16,20 \text{ MPa} ; \sigma_{\text{nom}} = 1,09 \text{ MPa} ; K_t = 14,77$$

$$\epsilon(\sigma_{\text{máx}}) = 0,15807$$

Módulo de Young - Probeta 1B

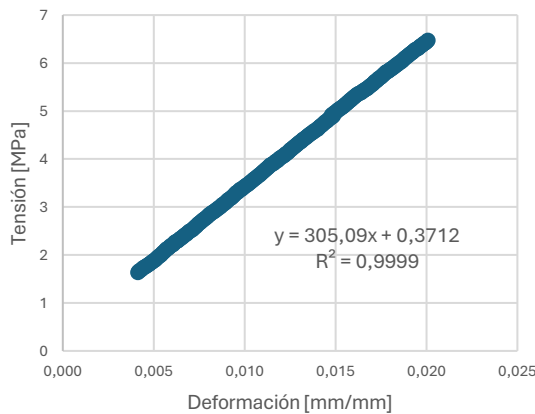


Figura AX8. Fractura observada en Probeta 1B (patrón B) tras el ensayo de tracción



$$E = 305,09 \approx 305 \text{ MPa}$$

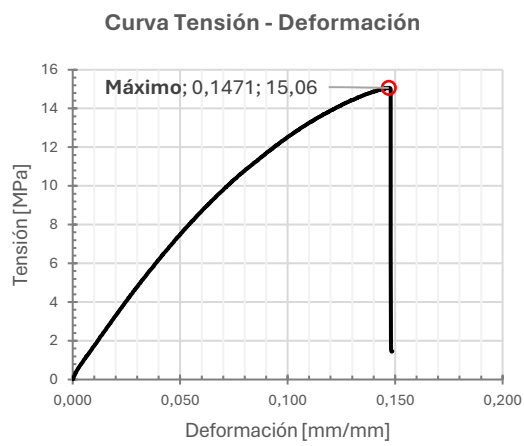
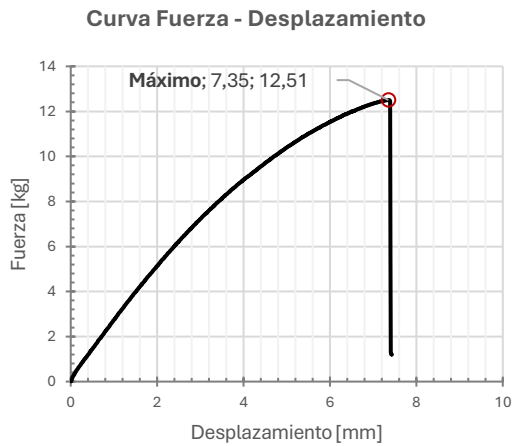
Fractura de tipo escalonada, iniciándose en una de las ranuras laterales y propagándose progresivamente a través de los cortes sucesivos.

#### OBSERVACIONES

Este patrón mostró un comportamiento mecánico diferente al anterior, puesto que a pesar de que el porcentaje de material sustraído no varía apenas con el patrón A hay un descenso de la carga máxima (16,20 MPa), dejando en evidencia la importancia de la forma del patrón en el ensayo. En cuanto al módulo de Young, se obtiene valores similares del orden de 305,09 MPa

**ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 2B**

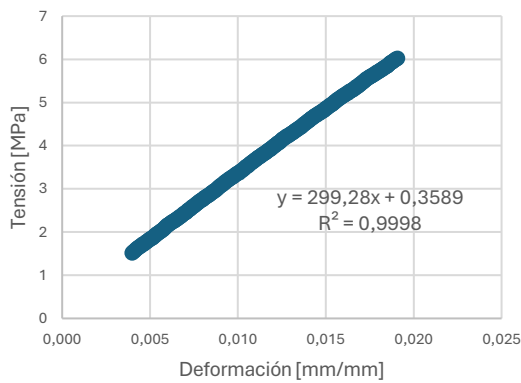
<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>							
CONTROL DIMENSIONAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,12	3,11	3,12	3,11	3,12	3,11	3,14	3,13	3,14	3,13	3,12
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69
<b>Sección efectiva</b> = 3,12 · 2,69= 8,20 mm <sup>2</sup>					<b>Mat. Sustraído</b> = 2,3580 %					



**F<sub>máx</sub>** = F<sub>uts</sub> = 12,51 kg  
**d(F<sub>máx</sub>)** = 7,35 mm

**σ<sub>máx</sub>** = 15,06 MPa ; **σ<sub>nom</sub>** = 1,02 MPa ; **K<sub>t</sub>** = 14,77  
**ε(σ<sub>máx</sub>)** = 0,15807

Módulo de Young - Probeta 2B



**Figura AX9.** Fractura observada en Probeta 2B tras el ensayo de tracción



**E** = 299,28 ≈ 300 MPa

Rotura exactamente igual que la anterior, escalonada en el centro de la probeta

**OBSERVACIONES**

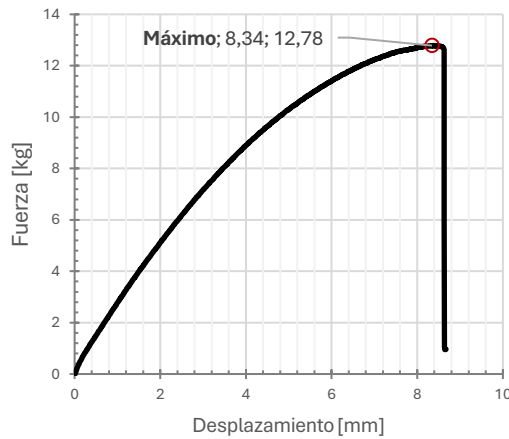
En la curva de la aplicación de la carga y desplazamiento se observa un comportamiento lineal hasta la carga máxima (15,06 MPa), seguido de una caída brusca, sugiriendo una rotura de un material frágil. Respecto al módulo de Young, se encuentra en el orden de 300 MPa aproximadamente.

# INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

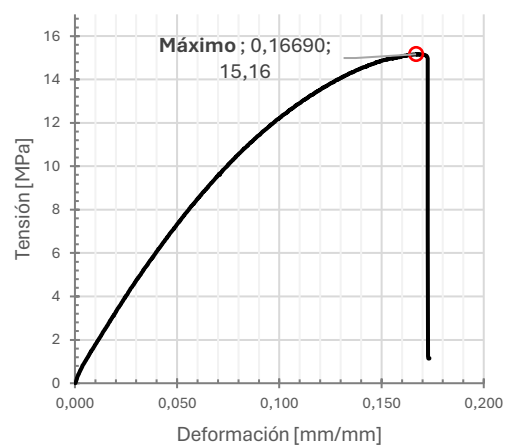
## ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 3B

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>							
CONTROL DIMENSIONAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,12	3,11	3,12	3,11	3,12	3,11	3,14	3,13	3,14	3,13	3,12
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69
<b>Sección efectiva</b> = 3,12 · 2,69= 8,20 mm <sup>2</sup>					<b>Mat. Sustraído</b> = 2,3580 %					

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



$F_{\text{máx}} = F_{\text{uts}} = 12,78 \text{ kg}$   
 $d(F_{\text{máx}}) = 8,34 \text{ mm}$

$\sigma_{\text{máx}} = 15,16 \text{ MPa}$  ;  $\sigma_{\text{nom}} = 1,03 \text{ MPa}$  ;  $K_t = 14,77$   
 $\epsilon(\sigma_{\text{máx}}) = 0,16690$

Módulo de Young - Probeta 3B

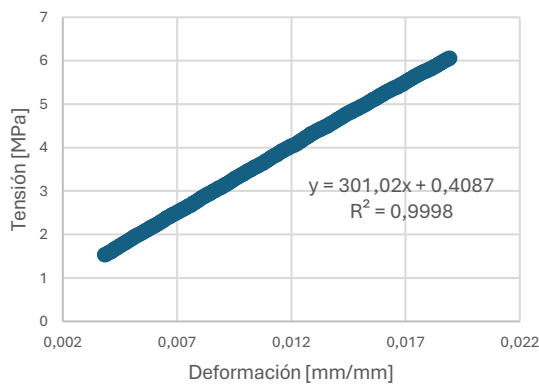


Figura AX10. Fractura observada en Probeta 3B tras el ensayo de tracción



$E = 301,02 \approx 301 \text{ MPa}$

Esta vez el comportamiento escalonado en la fractura se acerca más al radio de acuerdo de la probeta

### OBSERVACIONES

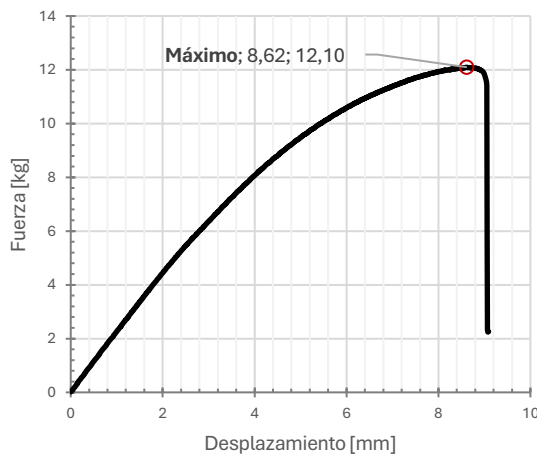
El comportamiento de esta probeta es muy similar a los anteriores, por tanto, tenemos una serie que un comportamiento resultante muy homogéneo. La tensión máxima alcanzada se encuentra en 15,16 MPa y el módulo de Young llega a 301 MPa

## 5. Probeta con patrón C

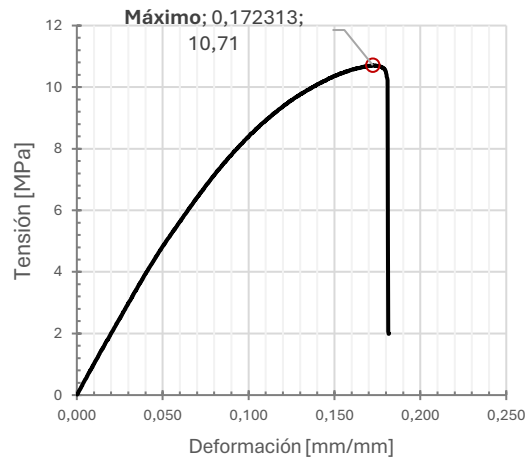
### 6. ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 1C

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>							
CONTROL DIMENSIONAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,12	3,11	3,12	3,11	3,12	3,11	3,14	3,13	3,14	3,13	3,12
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,80
<b>Sección efectiva</b> = 3,12 · 2,69 = 8,20 mm <sup>2</sup>						<b>Mat. Sustraído</b> = 6,66 %				

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



$F_{\text{máx}} = F_{\text{uts}} = 12,10 \text{ kg}$   
 $d(F_{\text{máx}}) = 8,62 \text{ mm}$

$\sigma_{\text{máx}} = 15,16 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_{\text{nom}} = 0,98 \text{ MPa}$ ;  $K_t = 10,94$   
 $\epsilon(\sigma_{\text{máx}}) = 0,16690$

Módulo de Young - Probeta 1C

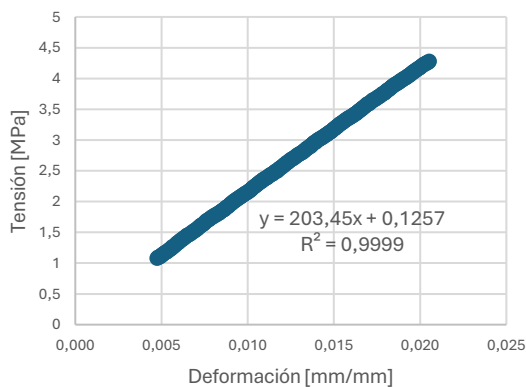


Figura AX11. Fractura observada en Probeta 3B tras el ensayo de tracción



$E = 203,45 \approx 203,5 \text{ MPa}$

Rotura localizada en la zona central, se ha fracturado en el punto de enlace de la izquierda primeramente

#### OBSERVACIONES

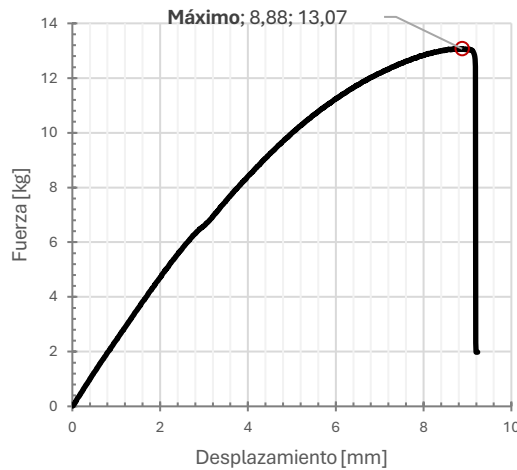
La curva tensión-deformación muestra un comportamiento elástico casi lineal hasta el pico de tensión (10,71 MPa), seguido de una caída rápida. El módulo de Young se ve reducido respecto a las probetas sin ranuras, debido a la pérdida de rigidez derivada de la geometría romboidal, aunque puede mantenerse algo superior (203,45 MPa) al observado en patrones más intrusivos, como el patrón B, según el grado de continuidad de material entre rombos.

# INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

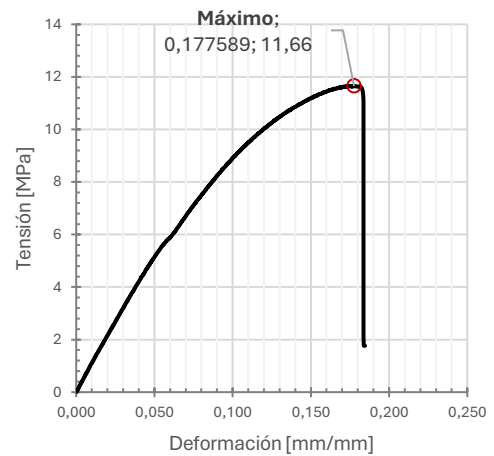
## ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 2C

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.		<b>Velocidad</b> = 2 mm / min	<b>Longitud extensómetro</b> = 50 mm				<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>			
CONTROL DIMENSIONAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,11	3,11	3,1	3,11	3,1	3,09	3,1	3,1	3,09	3,1	3,10
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,80
<b>Sección efectiva</b> = 3,10 · 3,80 = 11,00 mm <sup>2</sup>					<b>Mat. Sustraído</b> = 6,66 %					

Curva Fuerza - Desplazamiento



Curva Tensión - Deformación



$F_{\text{máx}} = F_{\text{uts}} = 13,07 \text{ kg}$   
 $d(F_{\text{máx}}) = 8,88 \text{ mm}$

$\sigma_{\text{máx}} = 11,66 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_{\text{nom}} = 1,07 \text{ MPa}$  ;  $K_t = 10,94$   
 $\epsilon(\sigma_{\text{máx}}) = 0,1776$ ;

Módulo de Young - Probeta 2C

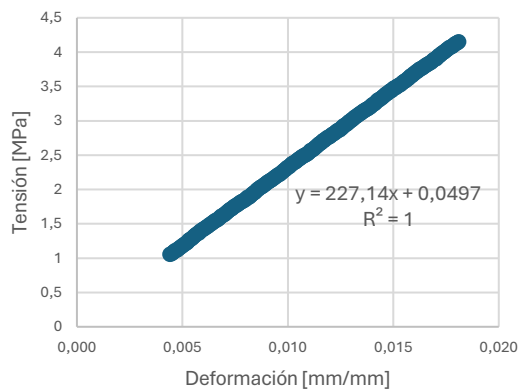


Figura AX12. Fractura observada en Probeta 2C tras el ensayo de tracción



$E = 227,14 \approx 227 \text{ MPa}$

La rotura se presenta idéntica a la anterior, iniciada en el punto de enlace (pico de tensiones) y continua por el centro de la probeta.

### OBSERVACIONES

Esta vez la curvade tensión – deformación alcanza el pico de tensión en un valor mucho menor, 11,66 MPa. En cuanto al módulo de Young aumenta hasta un valor de 227 MPa.

**ENSAYO DE TRACCIÓN – PROBETA CON PATRÓN: 3C**

<b>Maquinaria:</b> Servosis ME-405/10.	<b>Velocidad = 2</b> mm / min	<b>Longitud extensómetro = 50 mm</b>	<b>Densidad = 750 kg/m<sup>3</sup></b>
--	----------------------------------	--------------------------------------	--

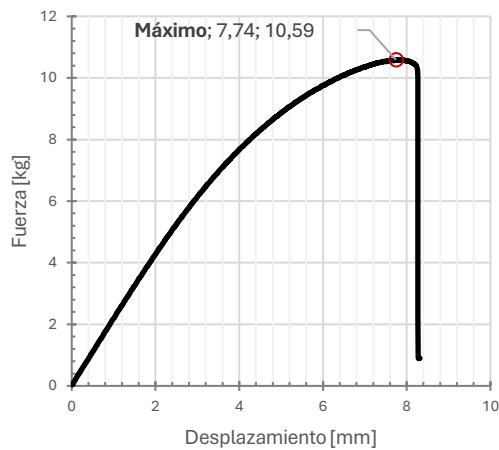
**CONTROL DIMENSIONAL [mm]**

e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	Media espesor
3,15	3,16	3,17	3,15	3,16	3,16	3,13	3,14	3,14	3,13	3,15
b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	b <sub>8</sub>	b <sub>9</sub>	b <sub>10</sub>	Media ancho
3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,80

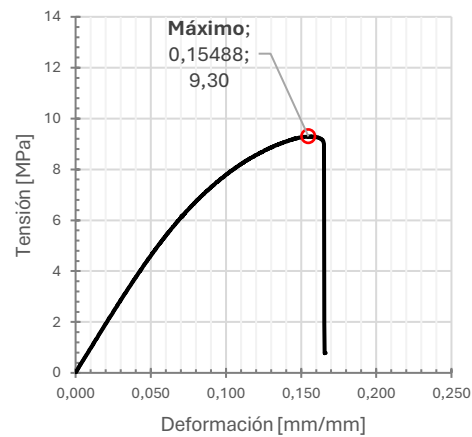
**Sección efectiva = 3,15 · 3,80 = 11,17 mm<sup>2</sup>**

**Mat. Sustraído = 6,66 %**

**Curva Fuerza - Desplazamiento**



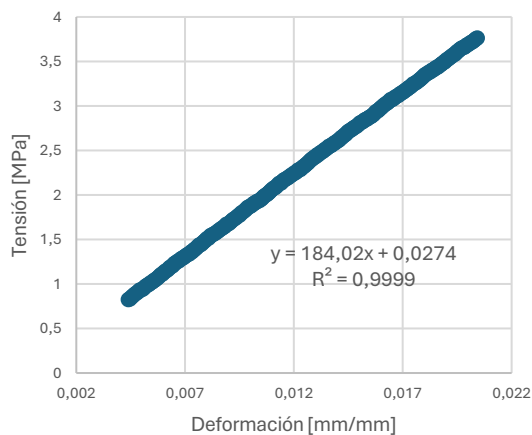
**Curva Tensión - Deformación**



**F<sub>máx</sub> = F<sub>uts</sub> = 10,59 kg**  
**d(F<sub>máx</sub>) = 7,74 mm**

**σ<sub>máx</sub> = 9,30 MPa ; σ<sub>nom</sub> = 0,850 MPa ; K<sub>t</sub> = 10,94**  
**ε(σ<sub>máx</sub>) = 0,15488**

**Módulo de Young - Probeta 3C**



**E = 184,02 ≈ 184 MPa**

**Figura AX13. Fractura observada en Probeta 3C tras el ensayo de tracción**



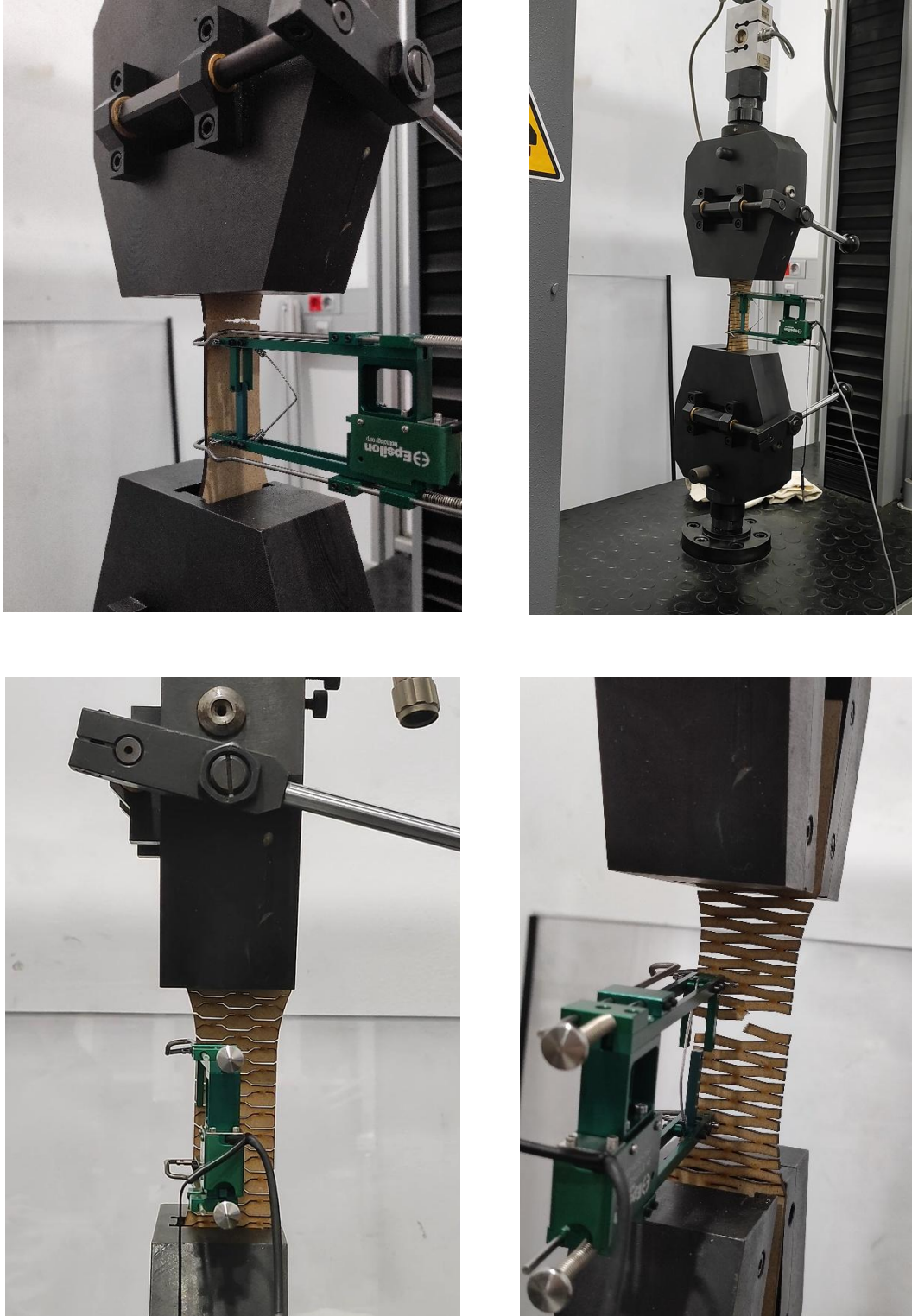
Esta vez la rotura se produce de manera simétrica, es decir en la dirección perpendicular del eje de la carga

**OBSERVACIONES**

La curva tensión – deformación alcanza un pico de 9,30 MPa antes de la rotura abrupta. En cuanto al módulo de elasticidad alcanza los 184 MPa.

A continuación, se muestran algunas imágenes tomadas durante los ensayos mecánicos (Figura 161).

Figura 161. Conjunto de imágenes tomadas durante los ensayos



Nota. De arriba abajo y de izquierda a derecha: probeta sin patrón, probeta con Patrón A, probeta con Patrón B y probeta con Patrón C.

Fuente: Elaboración propia.



## **V. Ensayo de flexión.**



## 1. Ensayo de flexión

El presente anexo recoge los resultados obtenidos en el **ensayo de flexión con extremos empotrados**, realizado sobre un conjunto de probetas fabricadas en MDF con y sin aplicación de patrones de *kerfing*. La carga se aplicó en el centro de la probeta, con los extremos completamente inmóviles en las direcciones de los ejes principales. La metodología seguida se ha basado parcialmente en los criterios establecidos en las normas UNE-EN 310 (ensayo de flexión en materiales derivados de la madera) y UNE-EN 625 (método de flexión para tableros de fibras), adaptando el procedimiento a un sistema **experimental con empotramientos en ambos extremos**, procedimiento justificado en la *metodología* de la memoria.

Se ha empleado un banco de ensayo de desarrollo propio, registrando el comportamiento en términos de **fuerza-tiempo** hasta la rotura de cada probeta. Se han medido las **dimensiones efectivas de cada sección** y se han calculado los momentos de inercia para estimar los **módulos de elasticidad**, así como las **tensiones máximas alcanzadas**. Las curvas de carga se acompañan de fotografías de las fracturas y de un análisis cualitativo.

A continuación, se exponen las **observaciones individuales** de cada una de las probetas ensayadas, recogiendo los principales aspectos visuales tras el fallo, así como comportamientos detectables en las curvas fuerza-tiempo. Esta información complementa los resultados numéricos ya detallados en conjunto en la memoria.

### 1.1 Objetivo del ensayo

El objetivo principal del presente ensayo es **evaluar el comportamiento mecánico a flexión de probetas de MDF** (tablero de fibra de densidad media), tanto en su estado **compacto** como **modificadas mediante patrones de *kerfing***. Se pretende analizar cómo **la introducción de diferentes tipos de ranuras** (patrones A, B y C) influye en propiedades como la **carga máxima soportada**, el **módulo de elasticidad aparente (E)**, el **desplazamiento y la tensión máximos** en condiciones de flexión con extremos empotrados.

Este ensayo permitirá comparar el comportamiento estructural de las distintas configuraciones de ranurado, con el fin de **extraer conclusiones sobre su viabilidad mecánica y su posible aplicación en diseño de mobiliario o estructuras flexibles** fabricadas con técnicas de corte por láser.

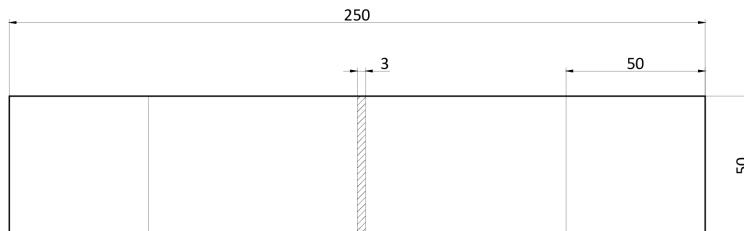
## 1.2. Tipo de probetas ensayadas

Se han ensayado un total de **15 probetas**, divididas en cuatro grupos diferenciados en función del patrón de corte aplicado:

- **Probetas sin patrón (compactas):** 6 unidades fabricadas en MDF sin modificación geométrica. Sección rectangular completa, sin ranuras. Sirven como referencia base para comparar el efecto del *kerfing*.
- **Grupo 2: Probetas con patrón A:** 3 unidades. Ranuras lineales paralelas. Alta reducción de sección central resistente.
- **Grupo 3: Probetas con patrón B:** 3 unidades. Patrón “wave lattice” con líneas rectas. El ancho de la sección central aumenta.
- **Grupo 4: Probetas con patrón C:** 3 unidades. Ranuras más amplias en forma de rombos. Sección central próxima a la original, pero con pérdida parcial de rigidez.

En cuanto a la **geometría de las probetas**, se ha seguido lo establecido por la norma **ASTM D1037**. Como resultado, se ha definido la probeta mostrada en la **Figura 162** para el **ensayo de flexión**.

**Figura 162.** Probeta empleada en el ensayo de flexión



**Fuente:** Elaboración propia

## 1.4. Parámetros de ensayo

- **Tipo de ensayo:** flexión con extremos empotrados (configuración de viga biempotrada con carga puntual central).
- **Normas de referencia:** adaptación parcial de las normas **UNE-EN 310** y **UNE-EN 625**.
- **Sistema de ensayo:** dispositivo experimental de desarrollo propio, con fijación rígida en ambos extremos.
  - o La celda de carga se calibró correctamente con pesos patrón.
- **Velocidad de carga:** desplazamiento controlado, progresivo y continuo hasta fractura. Entorno los 60 - 90 segundos hasta la fractura, según norma.
- **Variable registrada:** fuerza aplicada en función del tiempo y desplazamiento.

- **Longitud entre empotramientos (L):** 150 mm para todas las probetas.
- **Cálculos realizados:**
  - **Módulo de elasticidad aparente (E),** a partir de fórmula [15].
  - **Tensión máxima ( $\sigma_{f\text{-máx}}$ )** en la sección central de cada probeta [16].
  - **Deflexión máxima ( $\delta_{\text{máx}}$ )** en la sección central medida con el software *Traker* tras el ensayo.
  - **Momento de inercia (I)** individual para cada probeta, en su sección central, en función de sus dimensiones reales [17].

$$E_f = \frac{P \cdot L^3}{192 \cdot I^3 \cdot \delta_{\text{máx}}} \quad [15]$$

Donde,

*L, distancia entre vanos en mm*

*I, momento de inercia de la sección transversal en mm<sup>4</sup>*

*P, carga central en N*

*$\delta_{\text{máx}}$ , la deflexión máxima en la sección central en mm*

$$\sigma_{f\text{-max}} = \frac{3 \cdot F_{\text{máx}} \cdot l_1}{4 \cdot b \cdot e^2} \quad [16]$$

Donde,

*F<sub>máx</sub>, es la carga máxima, en N*

*l<sub>1</sub>, distancia entre los ejes de los apoyos en milímetros*

*b, anchura de la probeta, en milímetros*

*e, espesor de la probeta, en milímetros*

$$I = \frac{b \cdot e^3}{12} \quad [17]$$

Donde,

*b, anchura de la probeta, en milímetros*

*e, espesor de la probeta, en milímetros*

## 2. Probeta sin patrón

### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 1

Maquinaria: sistema experimental de elaboración propia			Tiempo total transcurrido = 221 s				Densidad = 750 kg/m <sup>3</sup>			
CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,11	3,11	3,11	3,09	3,09	3,09	3,1	3,1	3,1	3,1	<b>3,1</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,7	49,6	49,65	49,6	49,6	49,7	49,6	49,6	49,7	49,7	<b>49,65</b>
$I_1 = 1/12 \cdot 49,65 \cdot 3,1^3 = 123,25 \text{ mm}^4$						$L$ (distancia entre empotramientos) = 150 mm				

#### Curva Fuerza - Tiempo

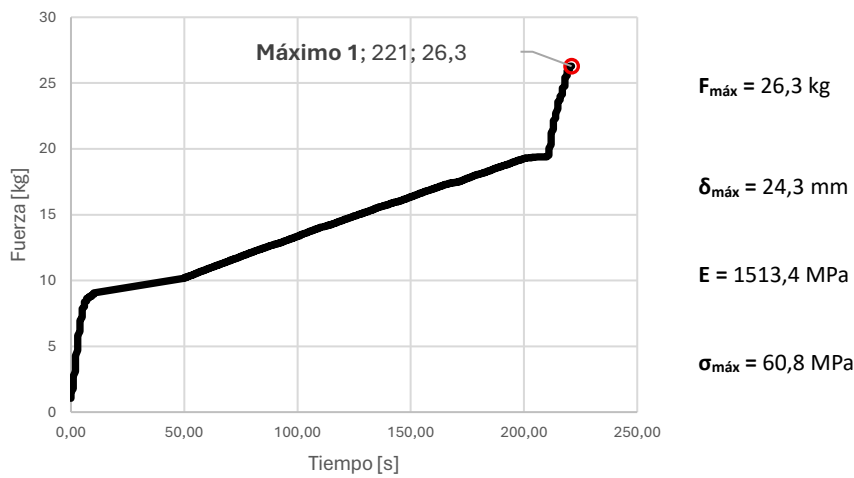


Figura AX14. Fractura observada en Probeta 1 (sin patrón) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

Fractura limpia sin deformación apreciable. El valor de módulo de Young (1513,4 MPa) es bajo en comparación con el resto del grupo, lo que sugiere ligera variabilidad en el material o en la rigidez del montaje. La tensión máxima alcanzada es de 60,8 MPa.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 2

Maquinaria: sistema experimental de elaboración propia			Tiempo total transcurrido = 343 s				Densidad = 750 kg/m <sup>3</sup>			
CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,08	3,08	3,08	3,1	3,1	3,09	3,09	3,08	3,08	3,09	<b>3,087</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,85	49,8	49,8	49,7	49,9	49,7	49,8	49,7	49,8	49,8	<b>49,79</b>
$I_1 = 1/12 \cdot 49,79 \cdot 3,087^3 = 122,05 \text{ mm}^4$						$L$ (distancia entre empotramientos) = 150 mm				

#### Curva Fuerza - Tiempo

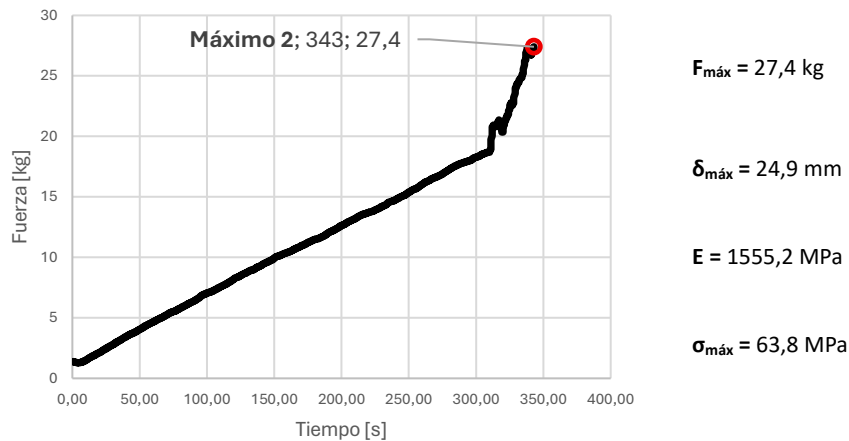


Figura AX15. Fractura observada en Probeta 2 (sin patrón) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

Se observa una fractura similar a la de la probeta 1, con un módulo de Young algo superior (1555,2 MPa), lo que indica mayor rigidez del sistema. La curva fuerza-tiempo es estable hasta la rotura, que surge al alcanzar 63,8 MPa y 24,9 mm de deflexión.

**ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 3**

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido</b> = 311 s	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
---	--	---

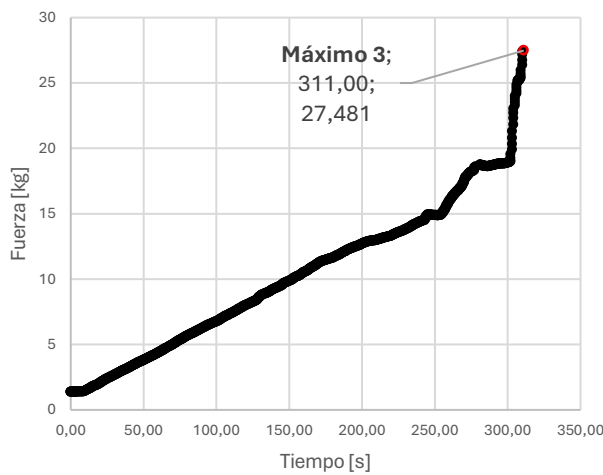
**CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]**

<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,15	3,15	3,15	3,15	3,16	3,16	3,12	3,12	3,16	3,16	<b>3,148</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,8	49,7	49,7	49,7	49,8	49,8	49,7	49,7	49,8	49,7	49,74

$I_1 = 1/12 \cdot 49,74 \cdot 3,148^3 = 129,31 \text{ mm}^4$

$L$  (distancia entre empotramientos) = 150 mm

**Curva Fuerza - Tiempo**



$F_{\text{máx}} = 27,5 \text{ kg}$

$\delta_{\text{máx}} = 22,38 \text{ mm}$

$E = 1637,5 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{máx}} = 61,5 \text{ MPa}$

**Figura AX16.** Fractura observada en Probeta 3 (sin patrón) tras el ensayo de flexión



**OBSERVACIONES**

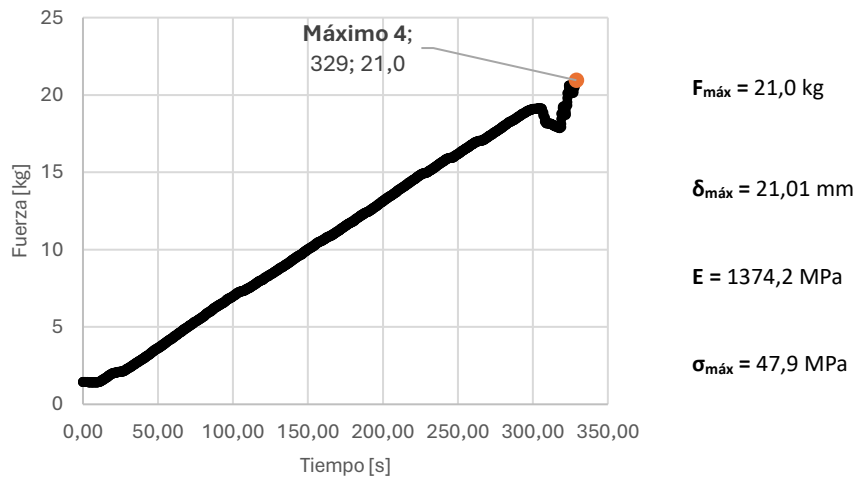
Presenta la mayor rigidez de las compactas ( $E = 1637,5 \text{ MPa}$ ). Fractura frágil, sin grandes deformaciones previas a la rotura, como es habitual en un material como el MDF. Tensión máxima de 61,5 MPa, generando una fractura en la sección central de la probeta limpia.

**INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL**

**ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 4**

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia			<b>Tiempo total transcurrido</b> = 329 s				<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>			
<b>CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]</b>										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,12	3,12	3,12	<b>3,113</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,8	49,8	49,8	49,8	49,7	49,7	49,8	49,8	49,8	49,8	<b>49,78</b>
<b>I<sub>1</sub> = 1/12 · 49,78 · 3,113<sup>3</sup> = 125,14 mm<sup>4</sup></b>						<b>L (distancia entre empotramientos) = 150 mm</b>				

**Curva Fuerza - Tiempo**



**Figura AX17.** Fractura observada en Probeta 4 (sin patrón) tras el ensayo de flexión



**OBSERVACIONES**

Se detecta la menor carga máxima del grupo (F<sub>máx</sub> = 21 kg). La fractura se inicia en la zona media, con menor desplazamiento en y (deflexión = 21,01 mm).

**ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 5**

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido</b> = 354 s	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
---	--	---

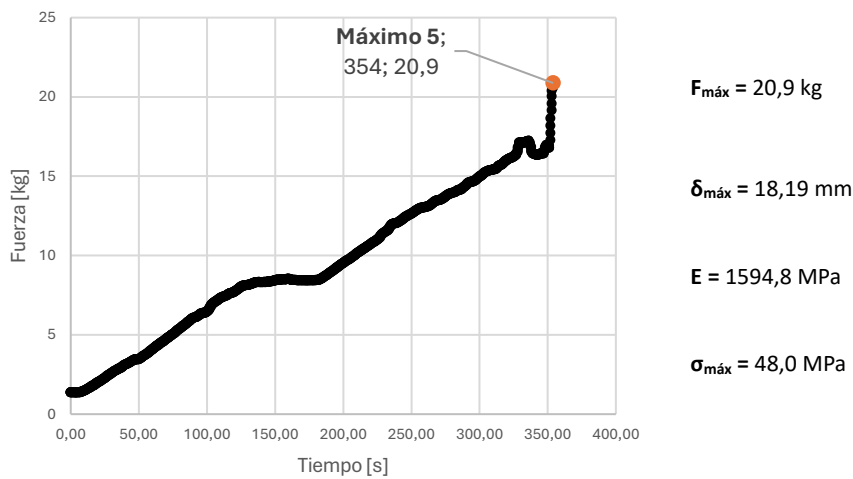
**CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]**

<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,1	3,1	3,1	3,1	3,11	3,11	3,11	3,11	3,1	3,1	<b>3,104</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,8	49,8	49,8	49,8	49,8	49,8	49,7	49,7	49,9	49,8	<b>49,79</b>

$I_1 = 1/12 \cdot 49,79 \cdot 3,104^3 = 124,09 \text{ mm}^4$

$L$  (distancia entre empotramientos) = 150 mm

**Curva Fuerza - Tiempo**



**Figura AX18.** Fractura observada en Probeta 5 (sin patrón) tras el ensayo de flexión



**OBSERVACIONES**

Comportamiento intermedio. Curva fuerza-tiempo regular. Buena correlación entre tensión y deformación. Deformación menor.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA SIN PATRÓN: 6

Maquinaria: sistema experimental de elaboración propia			Tiempo total transcurrido = 280 s			Densidad = 750 kg/m <sup>3</sup>				
CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,05	3,05	3,04	3,05	3,05	3,05	3,04	3,05	3,05	3,04	<b>3,047</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,9	49,9	49,8	49,8	49,8	49,8	49,8	49,8	49,9	49,8	<b>49,83</b>
$I_1 = 1/12 \cdot 49,83 \cdot 3,047^3 = 117,47 \text{ mm}^4$						$L$ (distancia entre empotramientos) = 150 mm				

#### Curva Fuerza - Tiempo

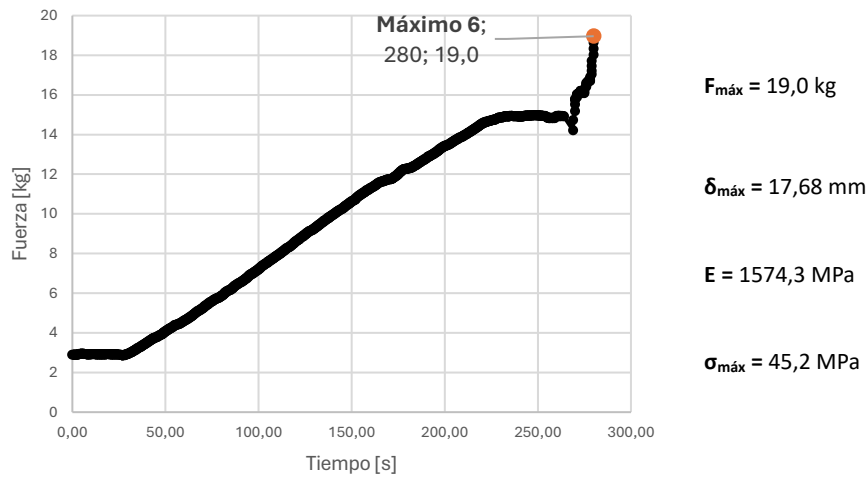


Figura AX19. Fractura observada en Probeta 6 (sin patrón) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

Presenta la tensión máxima más baja, con fractura limpia. El módulo de Young es relativamente alto ( $E = 1574,3 \text{ MPa}$ ), lo que indica que la rigidez se ha mantenido a pesar de la menor carga soportada.

### 3. Probeta con patrón A

#### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL A: 1

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido</b> = 112 s	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
---	--	---

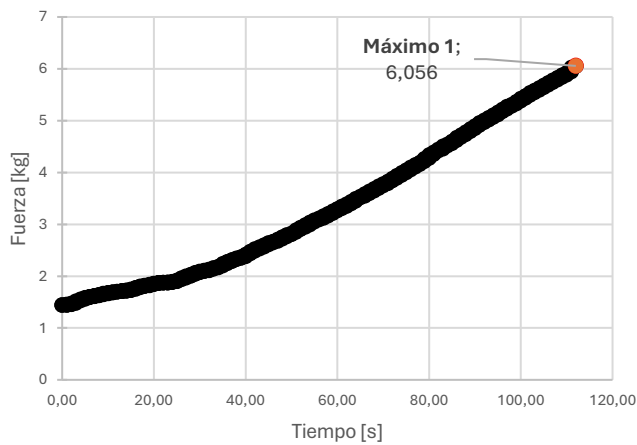
#### CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]

e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	Media espesor
3,07	3,07	3,08	3,07	3,08	3,07	3,08	3,09	3,07	3,07	<b>3,075</b>
b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	b <sub>8</sub>	b <sub>9</sub>	b <sub>10</sub>	Media ancho
5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	<b>5,84</b>

$$I_1 = 1/12 \cdot 5,84 \cdot 3,075^3 = 14,15 \text{ mm}^4$$

$$L \text{ (distancia entre empotramientos)} = 150 \text{ mm}$$

Curva Fuerza - Tiempo



$$F_{\text{máx}} = 6,1 \text{ kg}$$

$$\delta_{\text{máx}} = 20,16 \text{ mm}$$

$$E = 3660,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 121,03 \text{ MPa}$$

Figura AX20. Fractura observada en Probeta 1 (patrón A) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

Fractura frágil con deformación localizada en la zona de ranuras. Elevada tensión máxima debido a la concentración de esfuerzos. El módulo de Young es alto, probablemente por rigidez localizada antes del colapso. Se observan dos fracturas en los puntos de los extremos, debido probablemente a las altas tensiones inducidas en esos puntos por el empotramiento. La tensión alcanzada en esos puntos es mayor que la  $q$  se alcanzó en el centro de la probeta, de ahí la aparición de dicha iniciación de rotura.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL A: 2

Maquinaria: sistema experimental de elaboración propia			Tiempo total transcurrido = 77 s				Densidad = 750 kg/m <sup>3</sup>			
CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,08	3,08	3,08	3,09	3,08	3,09	3,09	3,08	3,09	3,09	<b>3,085</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	<b>5,84</b>

$I_1 = 1/12 \cdot 5,84 \cdot 3,085^3 = 14,29 \text{ mm}^4$   $L$  (distancia entre empotramientos) = 150 mm

Curva Fuerza - Tiempo

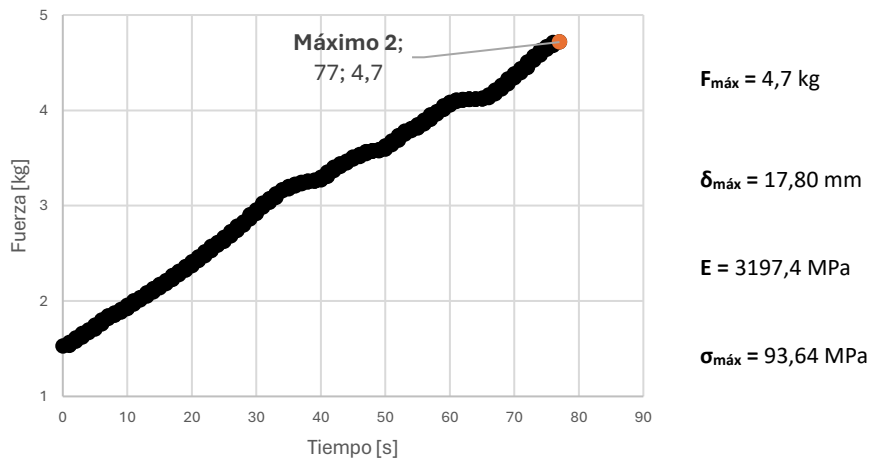


Figura AX21. Fractura observada en Probeta 2 (patrón A) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

Reducción clara de rigidez respecto a A1 ( $E = 3197,4 \text{ MPa}$ ). La fractura inicia en el centro de la probeta esta vez, lo que puede sugerir que en el caso primero hubo errores de colocación de los elementos de sujeción. La deflexión alcanzada es de 17,80 mm, un valor no muy alto.

**ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL A: 3**

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido</b> = 88 s	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
---	---	---

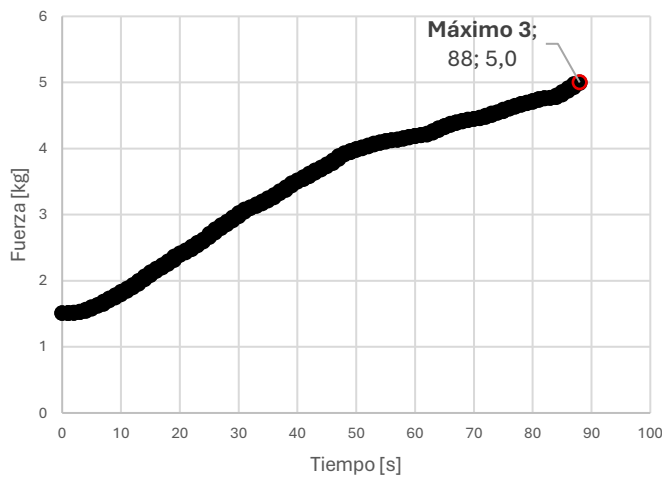
**CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]**

<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,1	3,1	3,1	3,09	3,09	3,1	3,09	3,1	3,09	3,1	<b>3,096</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	<b>5,84</b>

$I_1 = 1/12 \cdot 5,84 \cdot 3,096^3 = 14,44 \text{ mm}^4$

$L$  (distancia entre empotramientos) = 150 mm

**Curva Fuerza - Tiempo**



$F_{\text{máx}} = 5,0 \text{ kg}$

$\delta_{\text{máx}} = 19,05 \text{ mm}$

$E = 3133,9 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{máx}} = 98,6 \text{ MPa}$

**Figura AX22.** Fractura observada en Probeta 3 (patrón A) tras el ensayo de flexión



**OBSERVACIONES**

Comportamiento regular. Se alcanza un pico de 98,6 MPa. Esta vez la fractura es también en el centro, lo que respalda la creencia de que la serie 1 se trataba de una anomalía.

## 4. Probeta con patrón B

### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL B: 1

Maquinaria: sistema experimental de elaboración propia	Tiempo total transcurrido = 89 s	Densidad = 750 kg/m <sup>3</sup>								
<b>CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]</b>										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,16	3,16	3,16	3,16	3,15	3,12	3,14	3,15	3,15	3,15	<b>3,15</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	<b>28,94</b>
$I_1 = 1/12 \cdot 28,94 \cdot 3,15^3 = 75,38 \text{ mm}^4$						$L$ (distancia entre empotramientos) = 150 mm				

Curva Fuerza - Tiempo

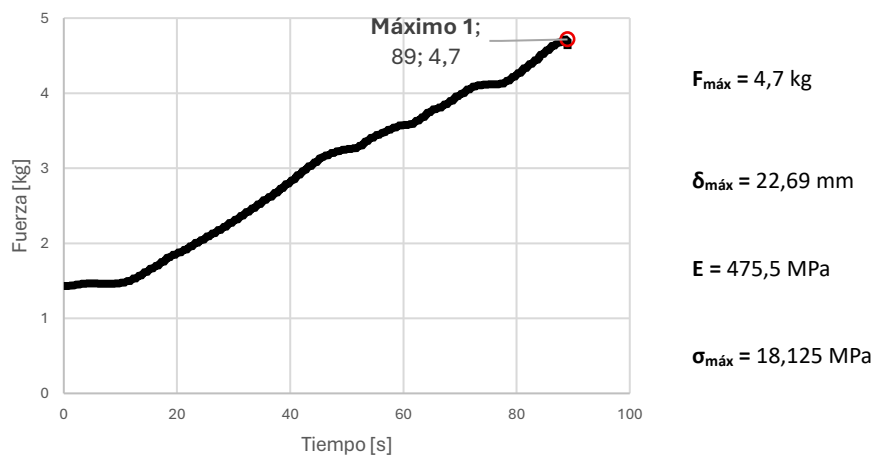


Figura AX23. Fractura observada en Probeta 1 (patrón B) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

El módulo de Young es notablemente inferior al de las compactas. Alta deformabilidad, con fractura en zona de corte central. El comportamiento sugiere pérdida de rigidez estructural. La fractura se inicia en los puntos de empotramiento, sugiriendo que estos son los puntos donde mayores tensiones han sido alcanzadas.

**ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL B: 2**

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido</b> = 102 s	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
---	--	---

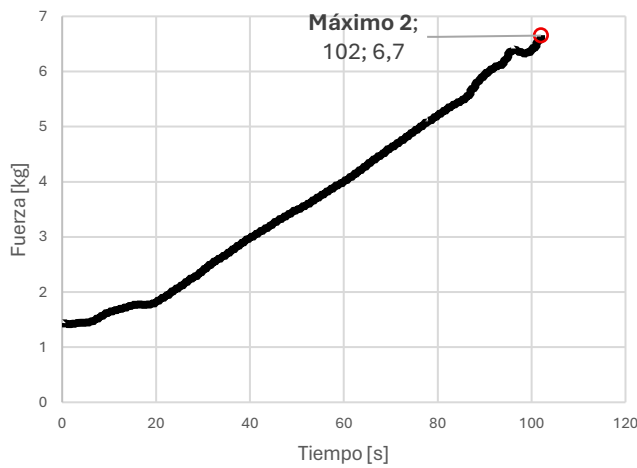
**CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]**

<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,2	3,1	3,1	3,2	3,1	3,1	3,09	3,08	3,1	3,1	<b>3,117</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	<b>28,94</b>

$I_1 = 1/12 \cdot 28,94 \cdot 3,117^3 = 73,03 \text{ mm}^4$

$L$  (distancia entre empotramientos) = 150 mm

Curva Fuerza - Tiempo



$F_{\text{máx}} = 6,7 \text{ kg}$

$\delta_{\text{máx}} = 27,99 \text{ mm}$

$E = 561,0 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{máx}} = 26,106 \text{ MPa}$

**Figura AX24.** Fractura observada en Probeta 2 (patrón B) tras el ensayo de flexión



**OBSERVACIONES**

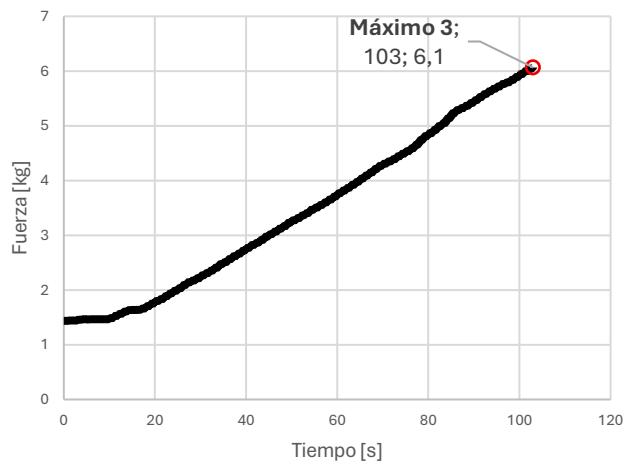
Mayor carga máxima que B1. Se incrementa la tensión máxima y la rigidez, pero sigue siendo inferior a la de las sin patrón. Esta vez la rotura expone un comportamiento nuevo, rotura en el centro y en el extremo del empotramiento, donde se observa un desgarramiento.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL B: 3

Maquinaria: sistema experimental de elaboración propia			Tiempo total transcurrido = 103 s				Densidad = 750 kg/m <sup>3</sup>			
CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,09	3,09	3,09	3,1	3,1	3,09	3,1	3,09	3,1	3,09	<b>3,094</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	<b>28,94</b>
$I_1 = 1/12 \cdot 28,94 \cdot 3,094^3 = 71,43 \text{ mm}^4$						$L$ (distancia entre empotramientos) = 150 mm				

Curva Fuerza - Tiempo



$$F_{\text{máx}} = 6,1 \text{ kg}$$

$$\delta_{\text{máx}} = 23,07 \text{ mm}$$

$$E = 634,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 24,161 \text{ MPa}$$

Figura AX25. Fractura observada en Probeta 3 (patrón B) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

Tendencia de rigidez creciente respecto a las anteriores. La fractura sucede de la misma manera que en la probeta anterior, se observan dos fracturas, primeramente, ocurre la del centro y posteriormente debido a un impacto se fractura la de la zona del empotramiento. Buen comportamiento frente a carga.

## 5. Probeta con patrón C

### ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL C: 1

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido</b> = 177 s	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
---	--	---

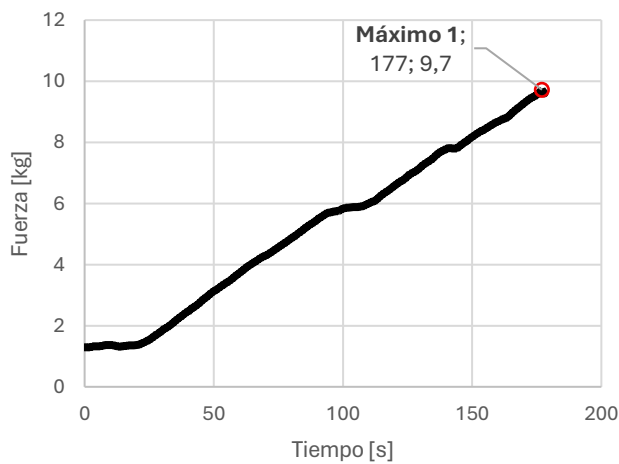
#### CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]

e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	Media espesor
3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,09	3,08	3,09	3,08	3,09	<b>3,078</b>
b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	b <sub>8</sub>	b <sub>9</sub>	b <sub>10</sub>	Media ancho
49,8	49,8	49,8	49,8	49,7	49,7	49,7	49,65	49,65	49,65	<b>49,73</b>

$$I_1 = 1/12 \cdot 49,73 \cdot 3,078^3 = 120,84 \text{ mm}^4$$

$$L \text{ (distancia entre empotramientos)} = 150 \text{ mm}$$

Curva Fuerza - Tiempo



$$F_{\text{máx}} = 9,7 \text{ kg}$$

$$\delta_{\text{máx}} = 29,43 \text{ mm}$$

$$E = 471,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 22,773 \text{ MPa}$$

Figura AX26. Fractura observada en Probeta 1 (patrón C) tras el ensayo de flexión



#### OBSERVACIONES

Fractura escalonada visible. Módulo bajo. Buena ductilidad (29,43 mm). Cierta absorción de energía antes de colapso.

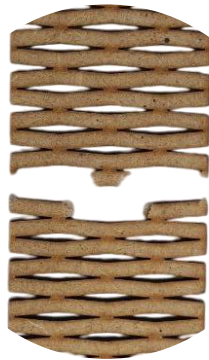
**INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL**

**ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL C: 2**

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido = 155 s</b>	<b>Densidad = 750 kg/m<sup>3</sup></b>								
<b>CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]</b>										
<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,08	3,07	3,08	3,07	3,08	3,07	3,08	3,08	3,09	3,09	<b>3,079</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	<b>49,70</b>
<b><math>I_2 = 1/12 \cdot 49,70 \cdot 3,079^3 = 120,89 \text{ mm}^4</math></b>						<b><math>L</math> (distancia entre empotramientos) = 150 mm</b>				



**Figura AX27.** Fractura observada en Probeta 2 (patrón C) tras el ensayo de flexión



**OBSERVACIONES**

Comportamiento similar al de C1. Fractura progresiva.

**ENSAYO DE FLEXIÓN – PROBETA CON PATRÓN LINEAL C: 3**

<b>Maquinaria:</b> sistema experimental de elaboración propia	<b>Tiempo total transcurrido</b> = 173 s	<b>Densidad</b> = 750 kg/m <sup>3</sup>
---	--	---

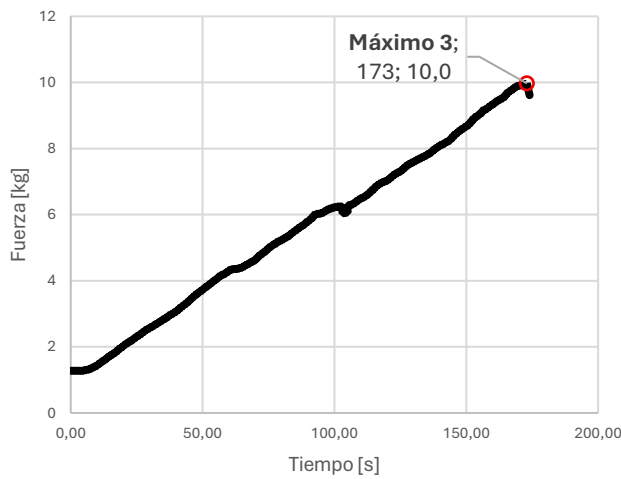
**CONTROL DIMENSIONAL SECCIÓN CENTRAL [mm]**

<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>	<b>e<sub>4</sub></b>	<b>e<sub>5</sub></b>	<b>e<sub>6</sub></b>	<b>e<sub>7</sub></b>	<b>e<sub>8</sub></b>	<b>e<sub>9</sub></b>	<b>e<sub>10</sub></b>	<b>Media espesor</b>
3,06	3,07	3,06	3,07	3,07	3,06	3,06	3,07	3,07	3,07	<b>3,066</b>
<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>Media ancho</b>
49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	<b>49,7</b>

$I_3 = 1/12 \cdot 49,7 \cdot 3,066^3 = 119,37 \text{ mm}^4$

$L$  (distancia entre empotramientos) = 150 mm

**Curva Fuerza - Tiempo**



$F_{\text{máx}} = 10,0 \text{ kg}$

$\delta_{\text{máx}} = 33,52 \text{ mm}$

$E = 429,7 \text{ MPa}$

$\sigma_{\text{máx}} = 23,554 \text{ MPa}$

**Figura AX28.** Fractura observada en Probeta 3 (patrón C) tras el ensayo de flexión

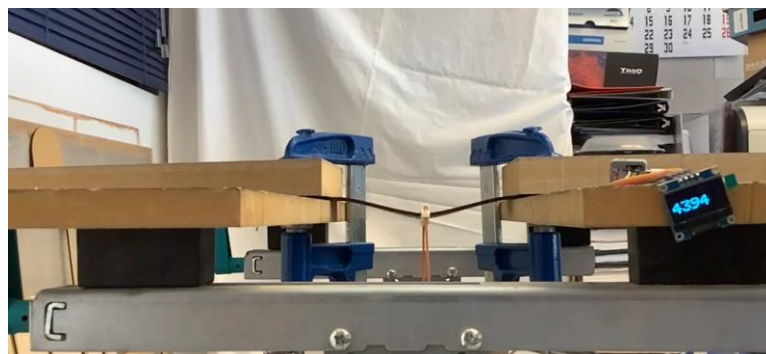
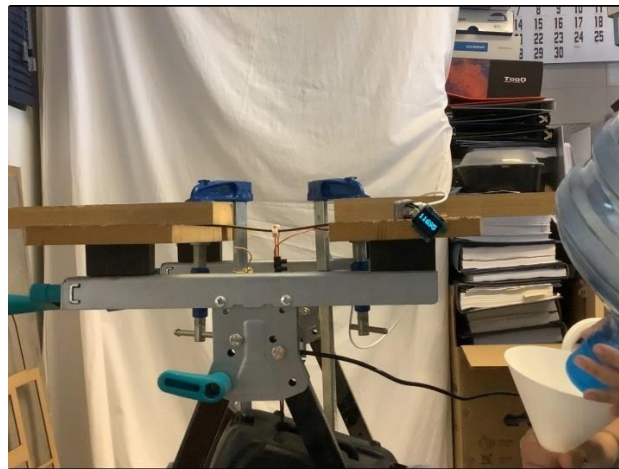


**OBSERVACIONES**

Mayor desplazamiento antes de rotura ( $\delta = 33,52 \text{ mm}$ ). Módulo más bajo del grupo. Se confirma una fractura en varios estadios. La curva fuerza-tiempo presenta una caída lenta, indicando fallo progresivo.

A continuación, se muestran algunas imágenes tomadas durante los ensayos experimentales de flexión con extremos fijos (*Figura 163*).

**Figura 163.** Conjunto de imágenes tomadas durante los ensayos



**Fuente:** Elaboración propia.



# **VI. Simulaciones digitales.**



## 1. Simulaciones digitales

Con el fin de complementar los ensayos experimentales realizados sobre el MDF con **diferentes patrones de kerfing**, se ha llevado a cabo una serie de simulaciones numéricas utilizando el software *SolidWorks Simulation*. Estas simulaciones permiten estudiar la distribución de tensiones y deformaciones en las probetas.

En este estudio se evaluarán las probetas sometidas a las solicitaciones correspondientes a ensayos de **tracción paralela a la superficie** y **flexión con extremos empotrados** y **carga puntual centrada** para comparar los resultados digitales con los experimentales. Asimismo, se pretende analizar si existe una correlación lineal entre el incremento del espesor del material y su resistencia mecánica, por lo que se repetirán las simulaciones para **tres espesores: 3, 9 y 16 mm**, todos ellos, **espesores normalizados** en la industria de paneles de MDF.

## 2. Definición de la probeta

### 2.1 Modelización de las probetas

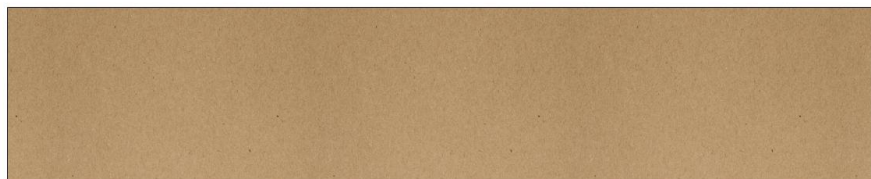
En cuanto a la geometría de las probetas, se ha seguido lo establecido por las normas ASTM D1037 y UNE-EN 310, al igual que en los ensayos experimentales. Como resultado, se han definido dos configuraciones: la probeta mostrada en la *Figura 164* para el **ensayo de tracción** y la probeta representada en la *Figura 165* para el **ensayo de flexión**.

Figura 164. Modelo tracción



Fuente: Elaboración propia

Figura 165. Modelo flexión



Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Material asignado

Para las simulaciones de los **ensayos de tracción y flexión** se ha asignado a las probetas un material con propiedades equivalentes al MDF utilizado en los ensayos experimentales. Se ha considerado una hipótesis de **material homogéneo, isótropo y linealmente elástico** (Ganev et al., 2005).

A continuación, se muestran las propiedades del material empleadas en las simulaciones (*Figura 166*).

**Figura 166.** Captura propiedades MDF introducidas en SolidWorks

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2068	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.25	N/D
Módulo cortante	827	N/mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	750	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción		N/mm <sup>2</sup>
Límite de compresión		N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	15	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)
Calor específico	1386	J/(kg·K)

Fuente: Elaboración propia

## 3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno varían en función del tipo de ensayo simulado. A continuación, se describen las configuraciones aplicadas.

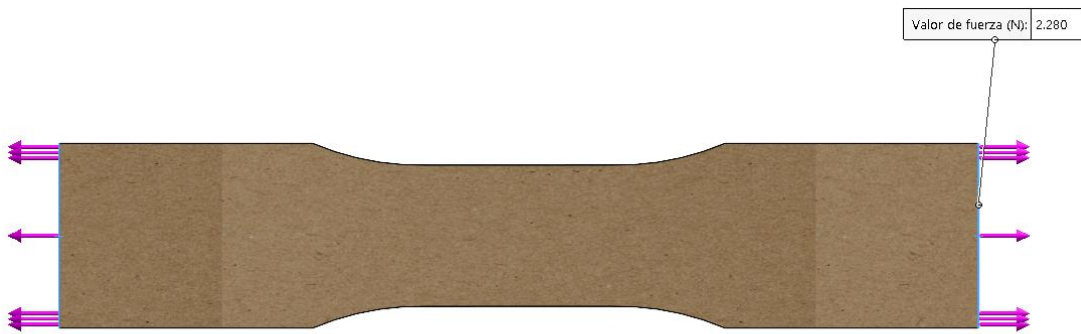
### 3.1 Ensayo de tracción

En las simulaciones del ensayo de tracción realizadas en SolidWorks, inicialmente se aplicó una condición de contorno tipo **geometría fija** en una de las caras extremas de la probeta, restringiendo completamente todos sus grados de libertad (traslaciones y rotaciones en X, Y y Z). En el extremo opuesto, se aplicó una fuerza en dirección axial (eje X), simulando una tracción uniaxial. Sin embargo, esta configuración provocaba la **aparición de valores singulares** en la zona del empotramiento, generando un comportamiento no realista.

Para resolver este problema, se sustituyó el **apoyo fijo (empotramiento)** por la **aplicación de fuerzas de igual magnitud y sentido opuesto en ambos extremos**, reproduciendo de forma más representativa el estado de carga del ensayo. Dado que esta configuración no incluía restricciones rígidas, fue necesario activar la opción de *muelle blando*, lo que permitió estabilizar el modelo durante el cálculo, por tanto, las **condiciones de contorno (Figura 167) finalmente adoptadas** son:

- **Fijación:** ninguna, condición de *muelle blando* que genera apoyos “débiles” en todas las direcciones para evitar problemas numéricos.
- **Carga aplicada:** en ambas caras extremas se aplicó una fuerza de igual módulo y dirección opuesta.

Figura 167. Condiciones de contorno ensayo de tracción



Fuente: Elaboración propia

La magnitud de la **carga aplicada** corresponde con los **resultados extraídos de los ensayos experimentales**. Se trata de la media de la fuerza máxima en cada una de las series de cada grupo de probetas analizado. Las fuerzas aplicadas en la sollicitación de carga uniaxial se observan en la **Tabla 36**.

Tabla 36. Carga aplicada en cada probeta en el ensayo de tracción

Patrón de corte	Carga aplicada [N]
Sin patrón	2280
Patrón A	183
Patrón B	127
Patrón C	117

Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Ensayo de flexión

Para facilitar la aplicación de las condiciones de contorno (carga y sujeción) en el modelo de *SolidWorks Simulation*, se ha generado una **extrusión despreciable de 0,001 mm** en la zona de la probeta correspondiente al área de sujeción y al área de carga. Esta pequeña geometría auxiliar **permite seleccionar con precisión el área deseada para fijar**.

- **Fijación:** se ha tratado como geometría fija (bloqueadas traslaciones y rotaciones en X, Y y Z), las áreas de los extremos destinadas a la sujeción de las probetas, es decir, los dos cuadrados de 50x50 mm en los extremos de la probeta.
- **Carga aplicada:** La carga se aplica en el centro de la probeta, en un ancho de 3 mm, correspondiente a la superficie de contacto del dispositivo empleado en la realidad. Como valor tendrá, la media de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas. Se pueden observar en la **Tabla 37**.

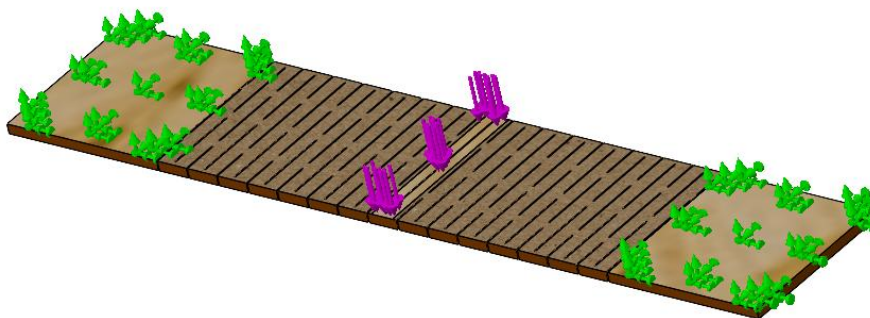
**Tabla 37.** Carga aplicada en cada probeta en el ensayo de flexión

Patrón de corte	Carga aplicada [kgf]
Sin patrón	<b>23,7</b>
Patrón A	<b>5,26</b>
Patrón B	<b>5,81</b>
Patrón C	<b>9,63</b>

**Fuente:** Elaboración propia

En la **Figura 168** se puede ver la representación visual de las condiciones de contorno que se han aplicado a todas las probetas del ensayo de flexión.

**Figura 168.** Condiciones de contorno ensayo de flexión



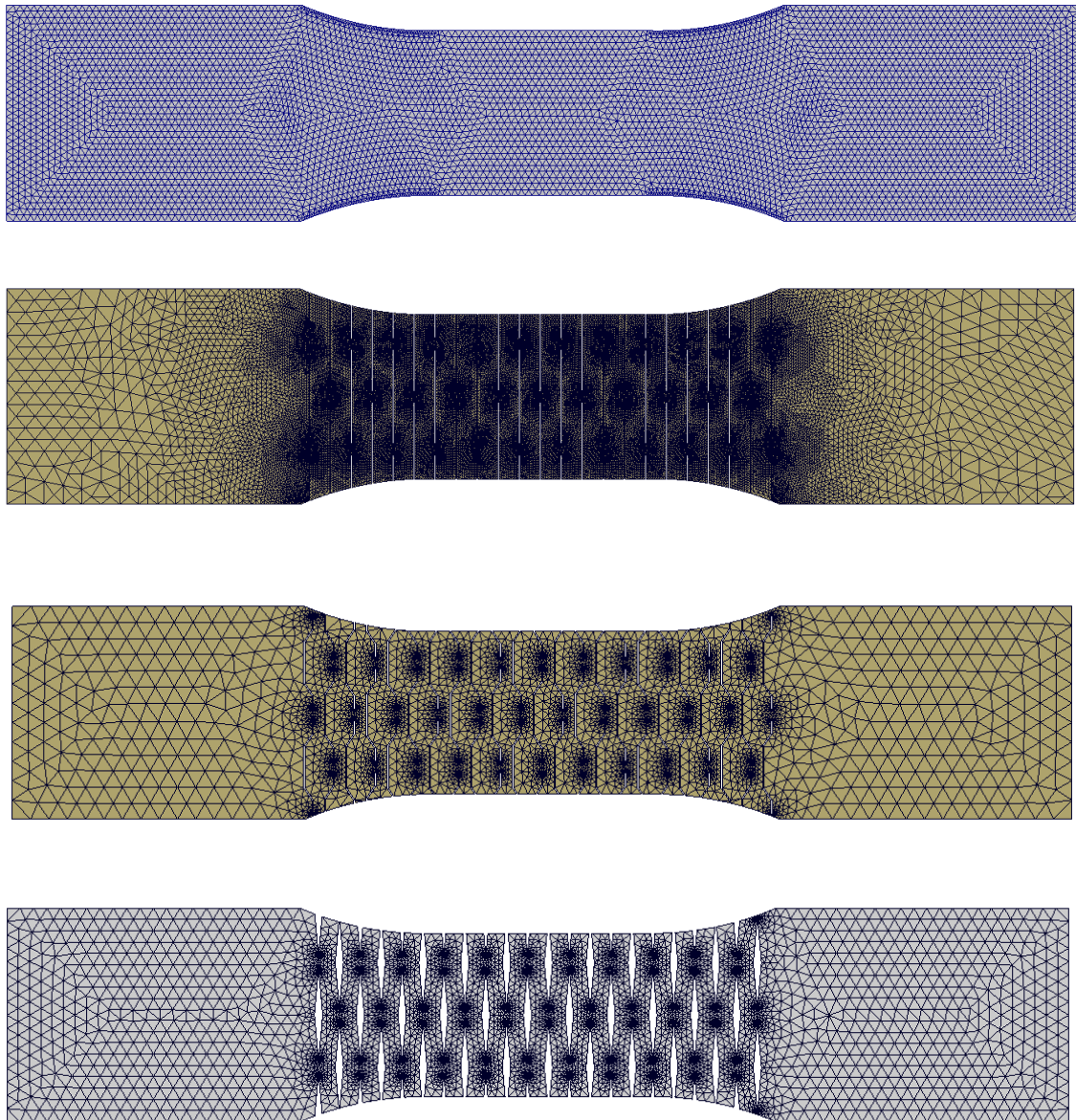
**Fuente:** Elaboración propia

## 4. Tipo de malla y configuración

### 4.1 Ensayo de tracción

Se ha utilizado una **malla a base de elementos triangulares**. Dado que las zonas **más críticas** se localizan en las **aristas del cuello**, se ha aplicado un **control de malla local** en dichas aristas de la probeta, así como en los **cortes** de los *patrones kerfing*, aumentando la densidad de los elementos en estas zonas y **adaptándolo a la curvatura**. Este refinamiento permite capturar con **mayor detalle** el gradiente de esfuerzos en las **zonas de estricción**, donde habrá una **concentración de esfuerzos**. Las mallas resultantes se observan en la *Figura 169*.

Figura 169. Malla resultante probetas tracción

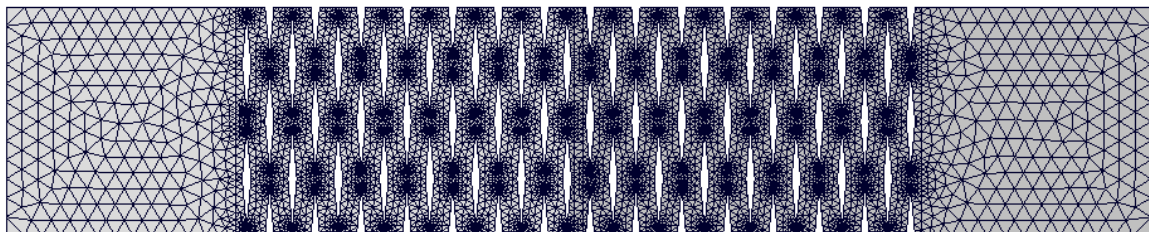
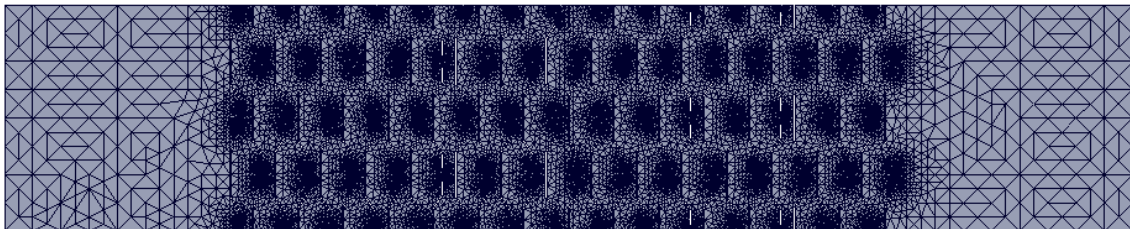
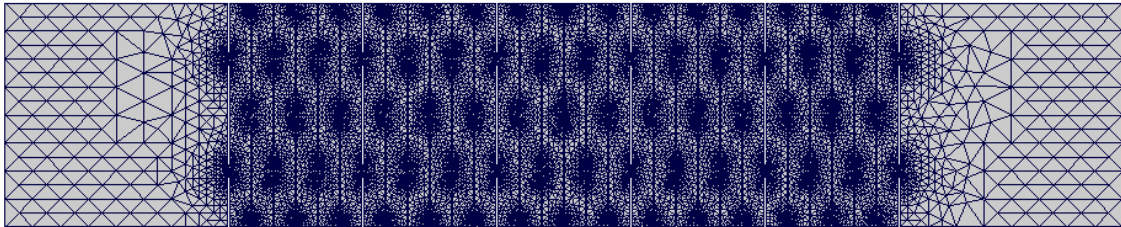
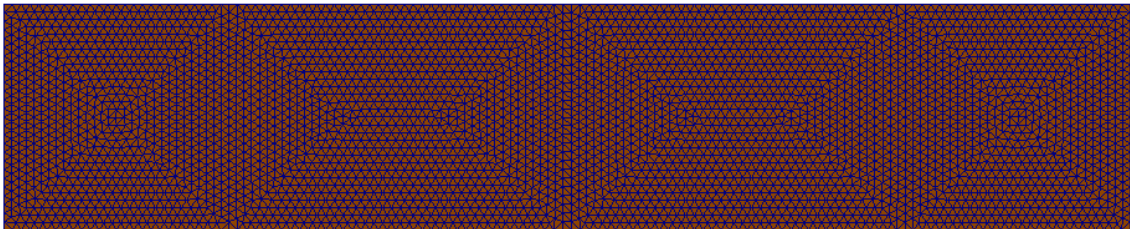


Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Ensayo de flexión

Para las probetas del ensayo de flexión se ha procedido de igual manera, mediante refinamientos locales logramos una mejor precisión en las zonas con mayor tendencia a albergar tensiones más altas. Las diferentes mallas se observan en la **Figura 170**.

**Figura 170.** Mallas resultantes probetas flexión



**Fuente:** Elaboración propia

## 5. Resultados

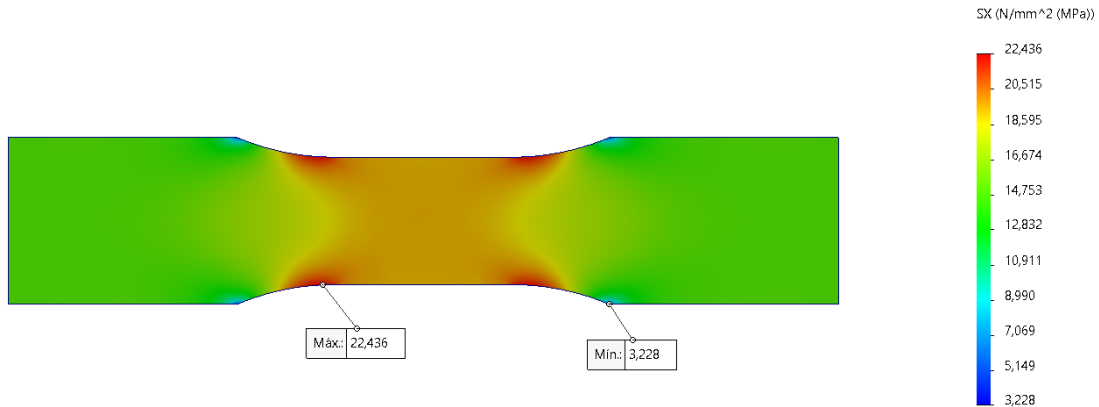
A continuación, se exponen los resultados obtenidos para ambos ensayos y solicitaciones extraídos de SolidWorks Simulation. Para estudiar la influencia del **espesor** en el comportamiento estructural de las probetas con *kerfing*, se han repetido las simulaciones **de ensayo de tracción** y **ensayo de flexión** para tres espesores diferentes: **3, 9 y 16 mm**, los resultados de los espesores adicionales se encuentra al final del apartado en formato de tabla resumen. En todos los casos, las **condiciones de contorno** permanecieron idénticas.

## 5.1 Ensayo de tracción

### 5.1.1 Campo de tensiones

#### SIN PATRÓN APLICADO

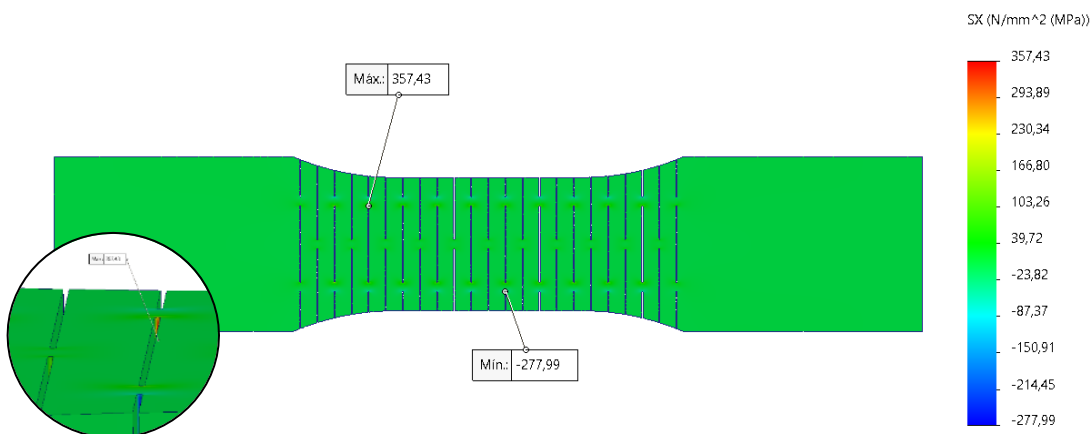
Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-P0-e3	SX: Tensión normal de X	3,228 MPa	22,436 MPa



**Observaciones:** Se observa una distribución homogénea de tensiones en el eje horizontal, con máximos localizados en el centro de la probeta debido a la tracción uniaxial, en esta zona se alcanzan tensiones del orden de 19 MPa. Existe una concentración de esfuerzos en el cuello de la probeta, aunque de manera suavizada gracias al radio de acuerdo amplio. Es aquí donde se dan las mayores tensiones, de 22,439 MPa como se aprecia en la imagen.

#### PATRÓN A

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PA-e3	SX: Tensión normal de X	-277,99 MPa	357,43 MPa

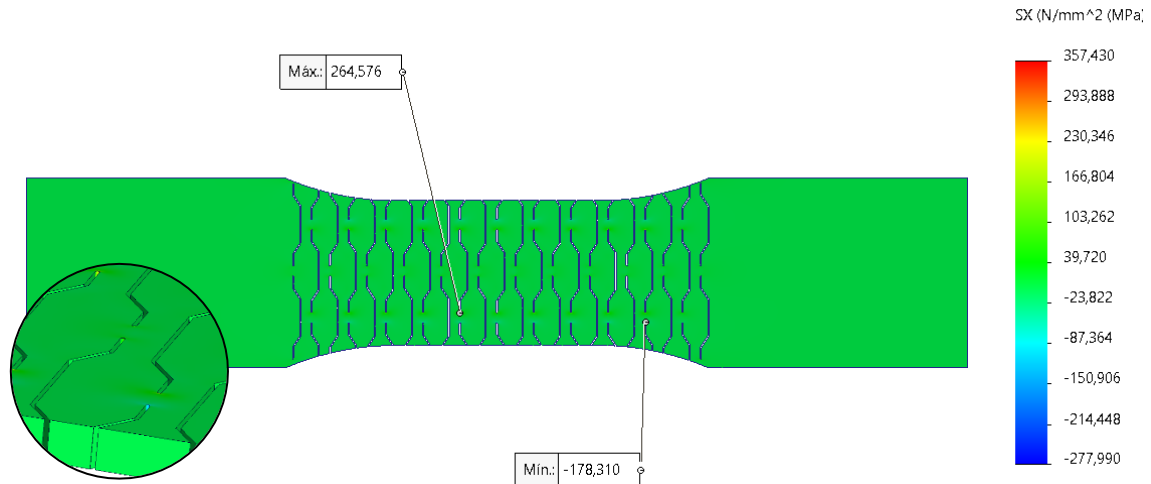


**Observaciones:** Se evidencian **concentraciones elevadas de tensiones** en los radios de acuerdo de las ranuras del kerfing, donde la geometría introduce cambios bruscos de sección. El valor máximo (357 MPa) es significativamente mayor que en la probeta sin patrón, lo cual indica que este diseño genera zonas críticas susceptibles de fallo prematuro por concentración de esfuerzos. Las tensiones en el resto de la probeta se mantienen del mismo orden, alcanzando valores mucho menores desde 5 MPa a 50 MPa.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### PATRÓN B

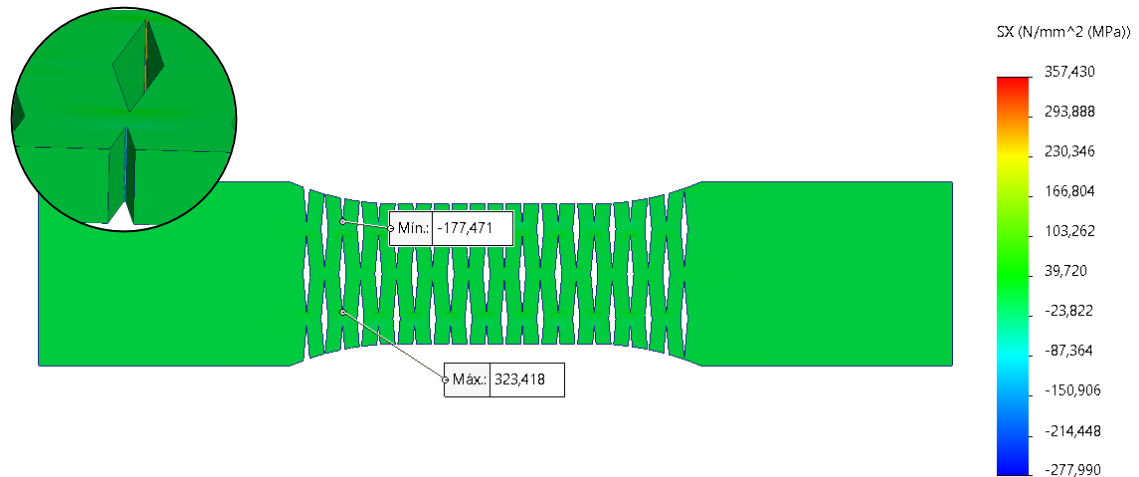
Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PB-e3	SX: Tensión normal de X	-178,31 MPa	264,576 MPa



**Observaciones:** Se observa una distribución más dispersa de las tensiones, con picos localizados en los extremos de los cortes donde parece inducir tensiones elevadas. Para la carga aplicada se alcanzan valores de 264,6 MPa. Los valores en el resto de la probeta (color verde) son varían desde 5 MPa hasta 40 MPa tal y como se aprecia en la imagen y la escala de color.

### PATRÓN C

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PC-e3	SX: Tensión normal de X	-177,471 MPa	323,418 MPa

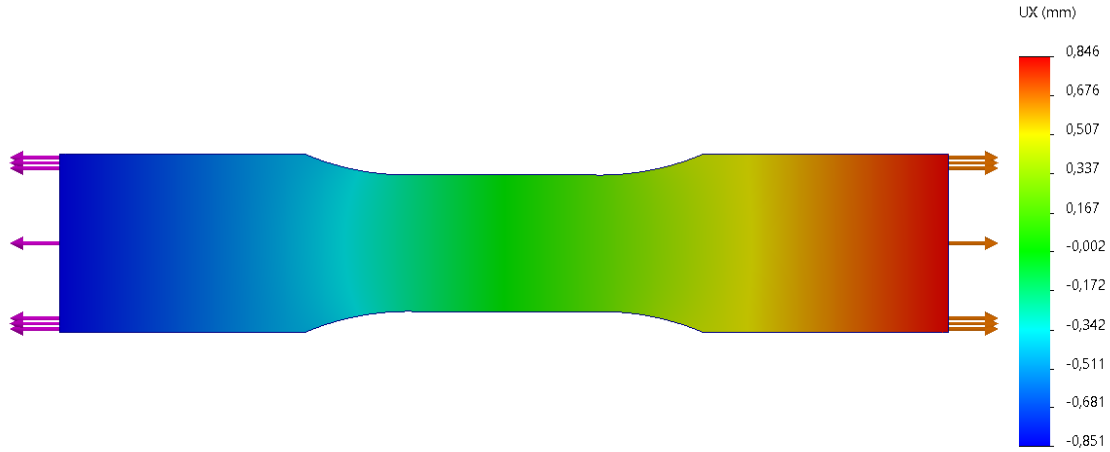


**Observaciones:** La concentración de tensiones se encuentra en las zonas próximas a los extremos de los cortes romboidales. Los valores siguen siendo elevados, del orden de 323,418. Los valores mayoritarios en el resto de la probeta se encuentran en el rango desde 5 MPa a 40 MPa tal como se aprecia en la imagen y en la escala de color.

### 5.1.2 Desplazamientos

#### SIN PATRÓN APLICADO

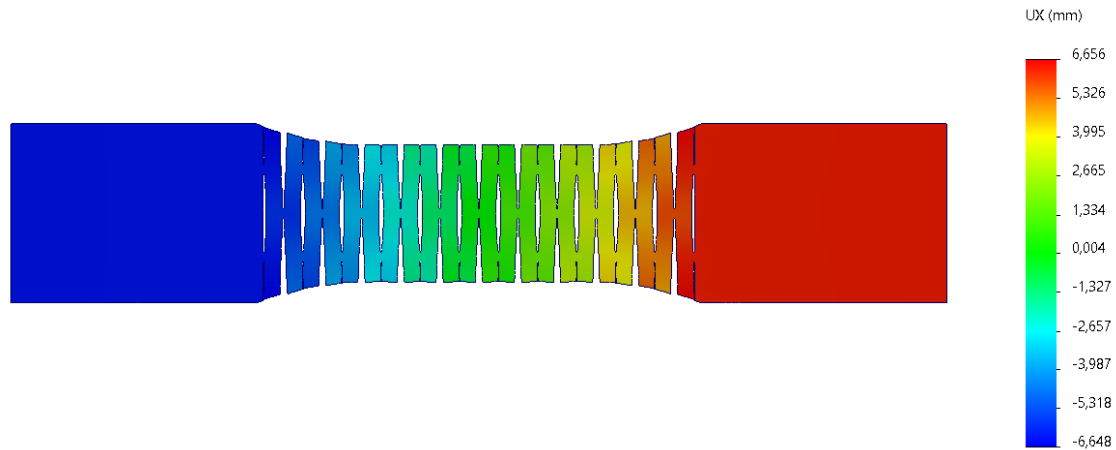
Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Tracción-P0-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje X	-0,851 mm	0,846 mm



**Observaciones:** Desplazamientos moderados y simétricos, con valores máximos de  $\pm 0,85$  mm. El comportamiento indica buena rigidez estructural en tracción, sin zonas de debilidad.

#### PATRÓN A

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Tracción-PA-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje X	-6.648 mm	6,656 mm

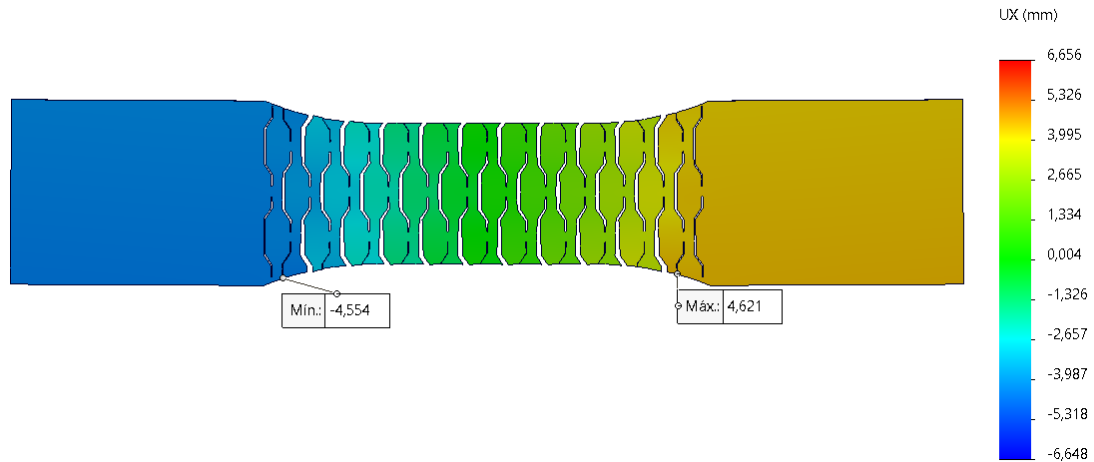


**Observaciones:** El desplazamiento máximo llega a los 7 mm debido a la que la geometría rectilínea favorece la elongación de las aperturas. El desplazamiento es simétrico desplazándose 13 mm en total

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### PATRÓN B

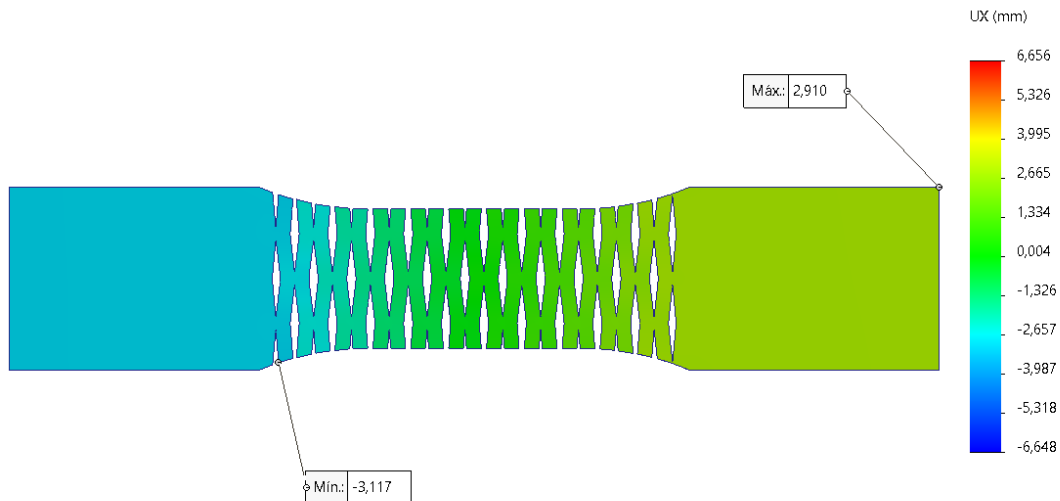
Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Tracción-PB-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje X	-4,554 mm	4,621 mm



**Observaciones:** Se observan **desplazamientos significativos**, con valores máximos superiores a 4,6 mm, de manera simétrica.

### PATRÓN C

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Tracción-PC-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje x	2,910 mm	-3,117 mm

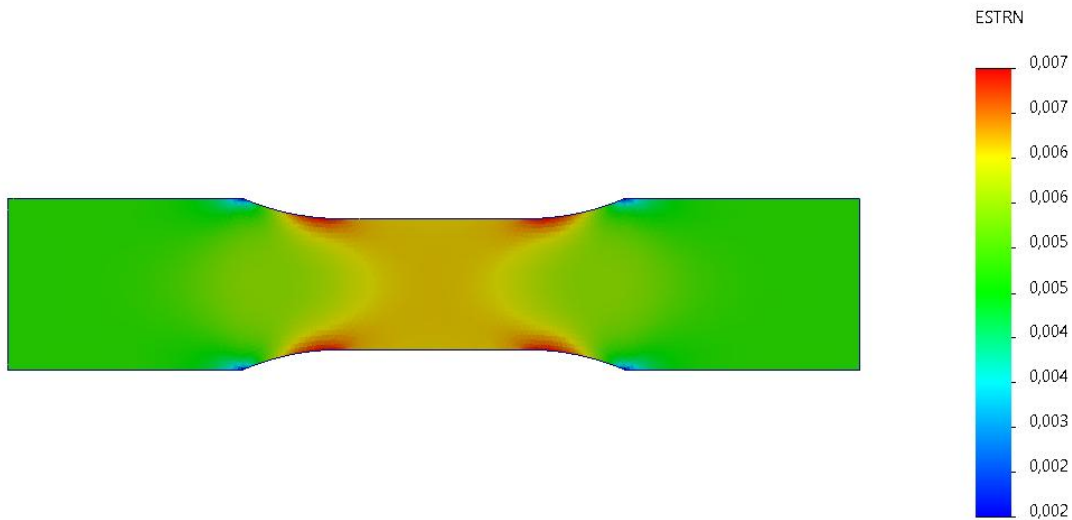


**Observaciones:** Los desplazamientos también son altos (hasta  $\pm 3,1$  mm), aunque algo menores que en el patrón B a pesar de que la carga aplicada ha sido prácticamente la misma, lo que sugiere una pérdida de rigidez.

### 5.1.3 Deformación unitaria

#### SIN PATRÓN APLICADO

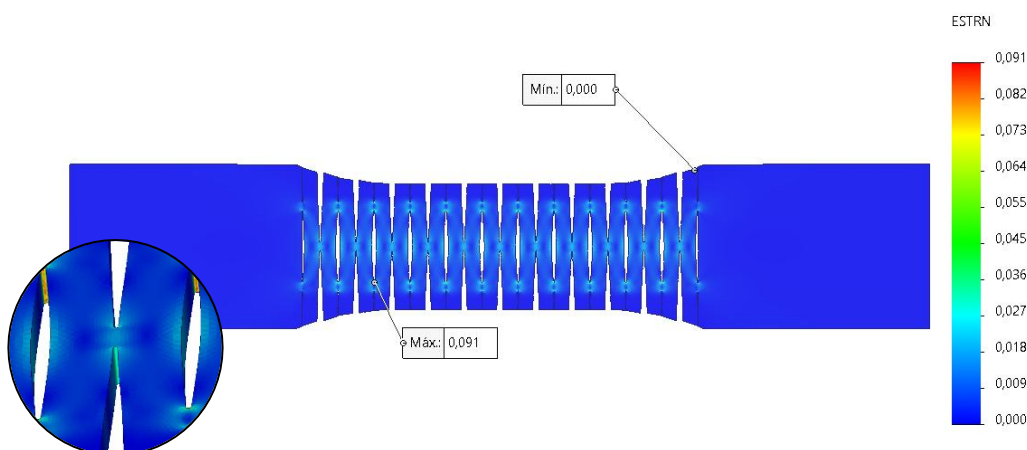
Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Tracción-P0-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,002	0,007



**Observaciones:** La deformación unitaria es baja y uniforme, entre 0,002 y 0,007. Este rango indica un comportamiento lineal elástico sin concentraciones de deformación, lo cual valida el modelo como referencia base para comparaciones.

#### PATRÓN A

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Tracción-PA-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,091

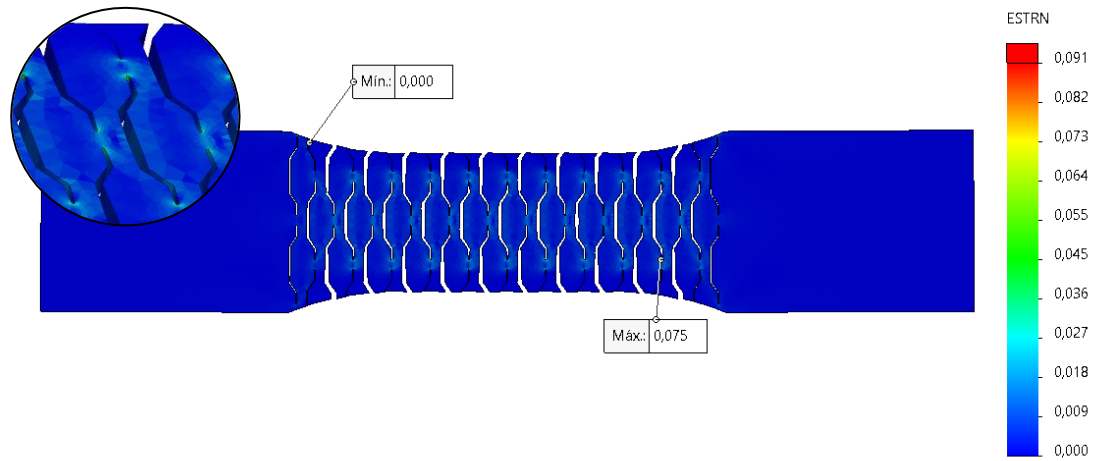


**Observaciones:** Se alcanza una deformación máxima de 0,091, muy superior al resto de patrones. Este valor indica zonas de **estricción severa** en los radios de los cortes, donde probablemente se localiza el inicio del fallo. La elevada deformabilidad confirma que este patrón reduce drásticamente la resistencia estructural.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

### PATRÓN B

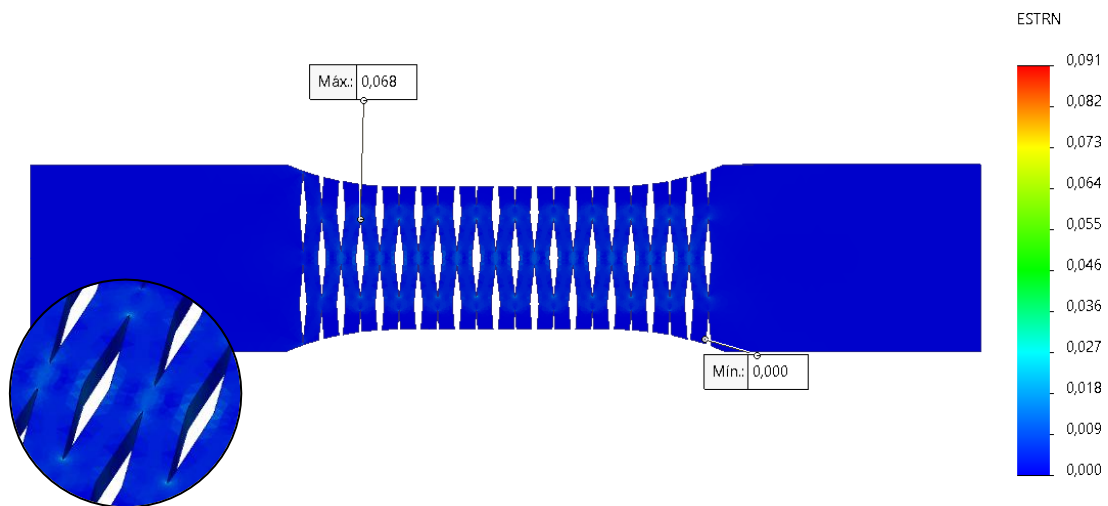
Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Tracción-PB-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,075



**Observaciones:** La deformación unitaria alcanza un valor máximo de 0,075, concentrándose en las zonas cercanas a los extremos de los cortes. Aunque es inferior a la del patrón A, sigue indicando un comportamiento menos rígido y con cierta acumulación de deformación.

### PATRÓN C

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Tracción-PC-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,068



**Observaciones:** El valor máximo de deformación equivalente es de 0,068, ligeramente inferior al del patrón B. Se localiza en los extremos de los cortes romboidales. Aunque el desplazamiento general de la probeta es menor, el patrón C presenta una mejor distribución del campo de deformaciones, sin picos tan agudos como los observados en el patrón A.

### 5.1.4 Influencia en el resto de los espesores

En la siguiente tabla se recogen los resultados correspondientes a las **modificaciones en el espesor** de las probetas. Dado que su comportamiento fue análogo al de las probetas previamente analizadas, no se ha considerado necesario incluir representaciones gráficas adicionales. Por ello, únicamente se presentan los valores numéricos obtenidos, tal y como se muestra en la **Tabla 38**.

**Tabla 38.** Resultados del ensayo de tracción

SIN PATRÓN			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[3.228, 22.436]	[-0.851, 0.846]	[0.002, 0.007]
9	[1.650, 7.477]	[-0.370, 0.320]	[0.001, 0.003]
16	[1.081, 4.215]	[-0.228, 0.160]	[0.001, 0.002]
PATRÓN A			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-277.99, 357.43]	[-6.648, 6.656]	[0.000, 0.091]
9	[-86.08, 110.15]	[-2.216, 2.216]	[0.000, 0.029]
16	[-39.85, 55,77]	[-1.159, 1.157]	[0.000, 0.016]
PATRÓN B			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-178,310, 264.576]	[-4.554, 4.621]	[0.000, 0.075]
9	[-74.500, 104.877]	[-1.591, 1.616]	[0.000, 0.024]
16	[-43.608, 65.486]	[-0.096, 0.931]	[0.000, 0.013]
PATRÓN C			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento Máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-177.471, 323.418]	[-3.117, 2.910]	[0.000, 0.068]
9	[-54.660, 107.919]	[-1.020, 0.964]	[0.000, 0.019]
16	[-31.257, 59.956]	[-0.567, 0.534]	[0.000, 0.010]

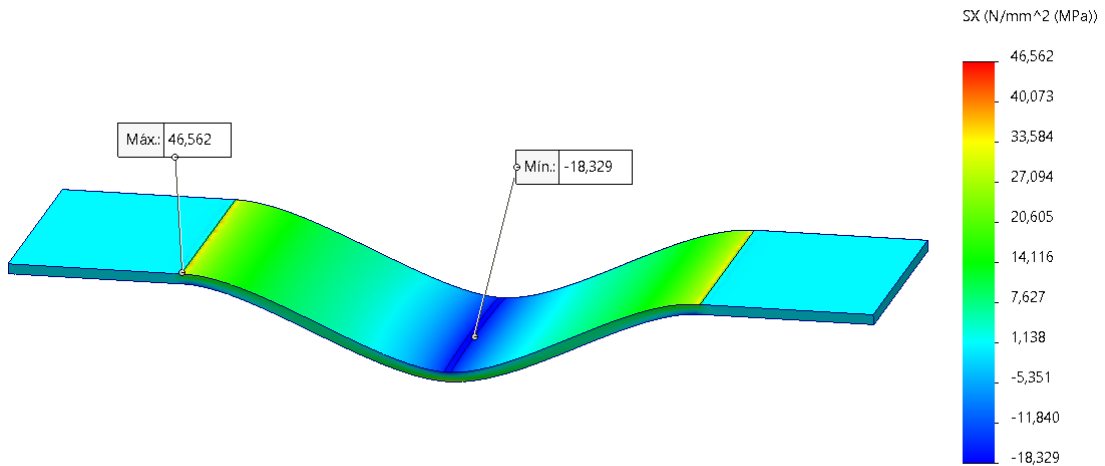
Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Ensayo de flexión

### 5.2.1 Campo de tensiones

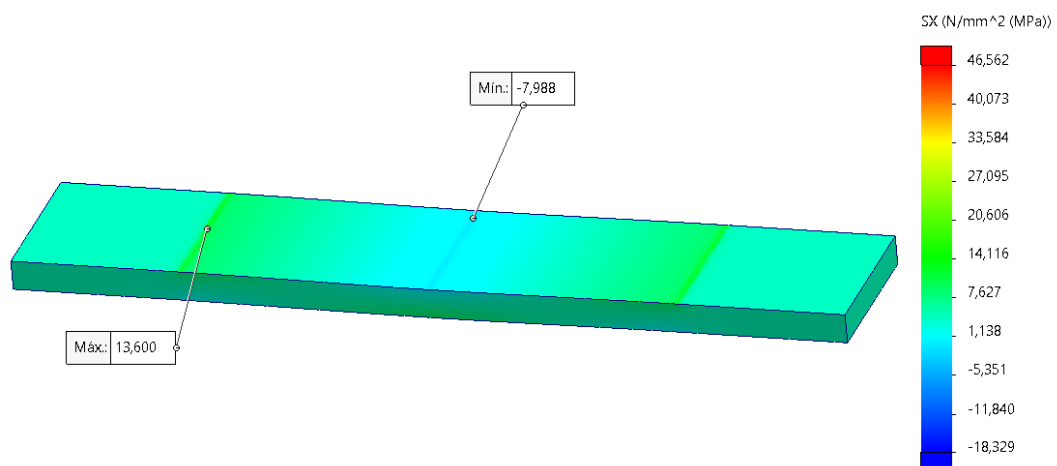
#### SIN PATRÓN APLICADO

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e3	SX: Tensión normal de X	-18,329 MPa	46,562 MPa



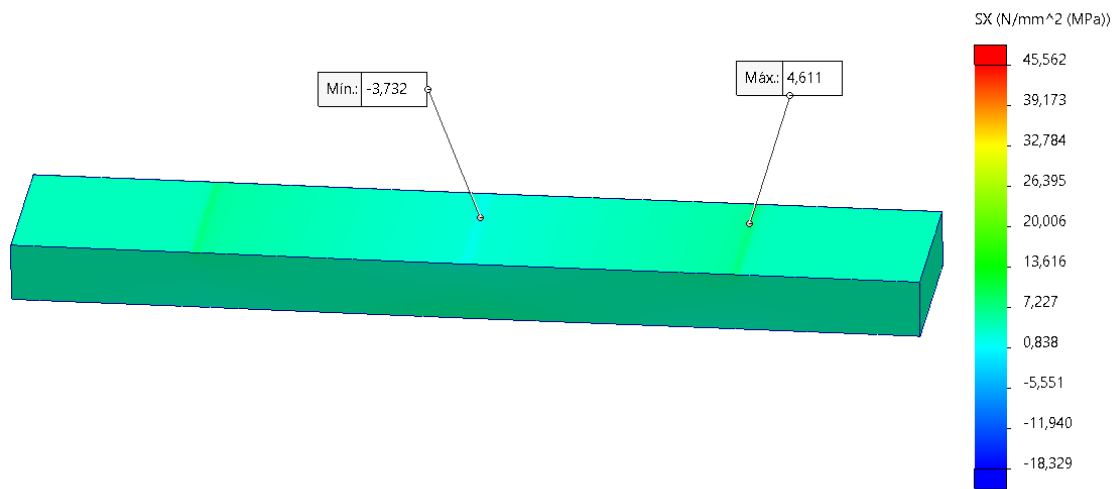
**Observaciones:** Como es de esperar se produce unas tensiones altas en los empotramientos. Los valores en el centro de la probeta, en la fibra más alejada, traccionada, es del orden de 30 MPa.

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e9	SX: Tensión normal de X	-7,988 MPa	13,600 MPa



**Observaciones:** Como es de esperar se produce unas tensiones altas en los empotramientos, esta vez la mínima se produce en el centro de la probeta con un valor de 6,5 MPa en compresión. Los valores en el centro de la probeta, en la fibra más alejada son también altos, del orden de 6,5 MPa en tracción.

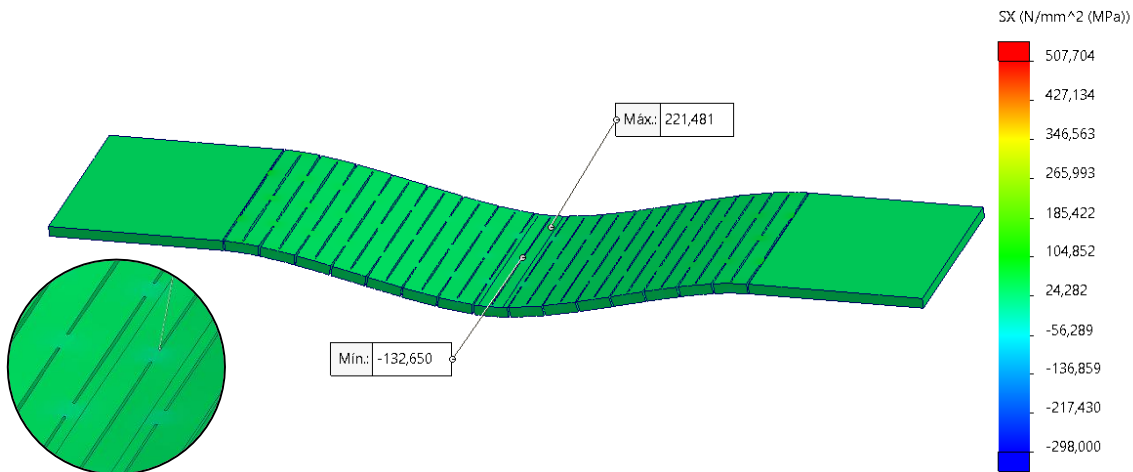
Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Flexión-PO-e16	SX: Tensión normal de X	-3,732 MPa	4,611 MPa



**Observaciones:** al igual que en el caso anterior, la tensión más alta se produce en la zona a ras de los empotramientos. La tensión disminuye mucho con respecto la probeta de 3 mm de espesor.

**PATRÓN A**

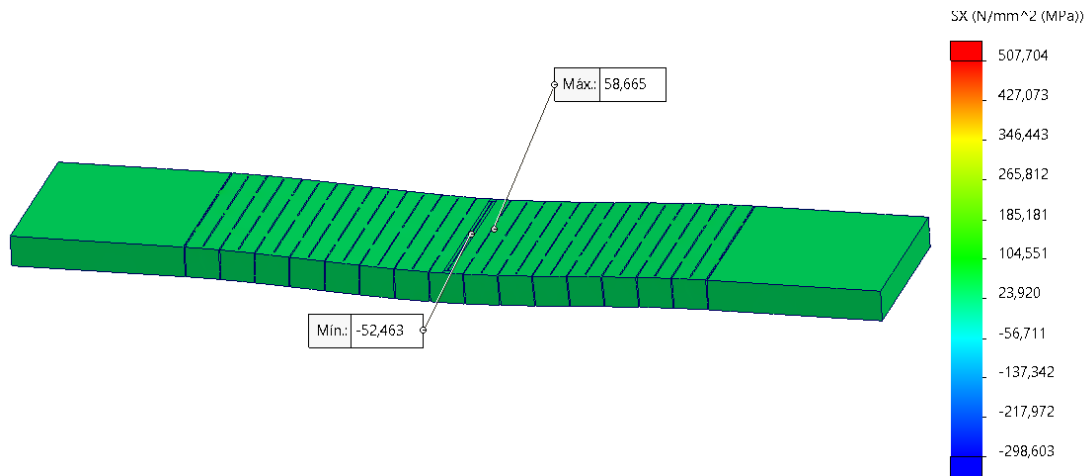
Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PA-e3	SX: Tensión normal de X	-132,650 MPa	221,481MPa



**Observaciones:** El campo de tensiones muestra la esperada concentración de esfuerzos de tracción máxima en la zona inferior central de la probeta, alcanzando un pico de 132,65 MPa. Complementariamente se observan esfuerzos de tracción en las ranuras de la parte inferior (221,481 MPa). El resto de las tensiones se distribuyen con la probeta con valores del orden de 30 – 40 MPa.

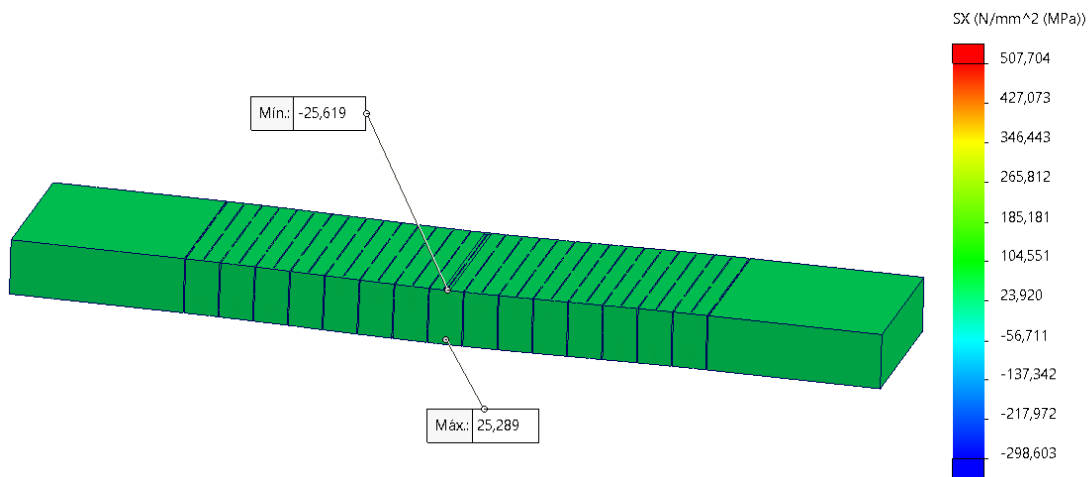
## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PA-e9	SX: Tensión normal de X	-52,463 MPa	58,665 MPa



**Observaciones:** El campo de tensiones (SX) para un espesor de 9 mm muestra una concentración de esfuerzos de tracción máximos de 58,665 MPa en la zona superior del empotramiento, adyacente a las ranuras del kerfing, y compresión de -52,463 MPa la parte superior central. Por el resto de la probeta hablamos de unas tensiones del orden de 5 MPa.

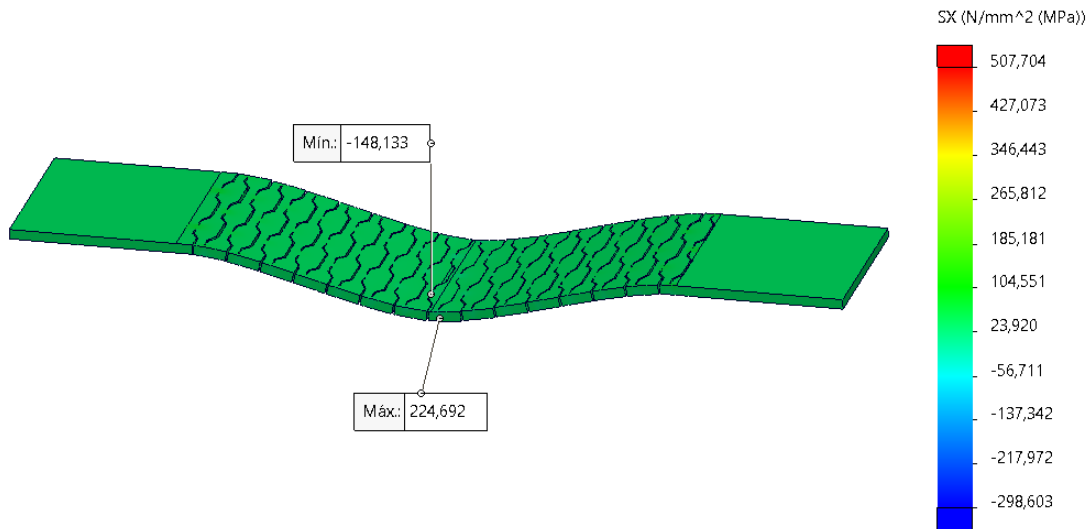
Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PA-e16	SX: Tensión normal de X	-25,619 MPa	25,289 MPa



**Observaciones:** Al aumentar el espesor a 16 mm, los esfuerzos máximos de tracción se reducen a 25,289 MPa y los de compresión a -25,619 MPa, ambos se dan en la sección central. Esta reducción de tensiones es consistente con el incremento de la rigidez de la sección transversal.

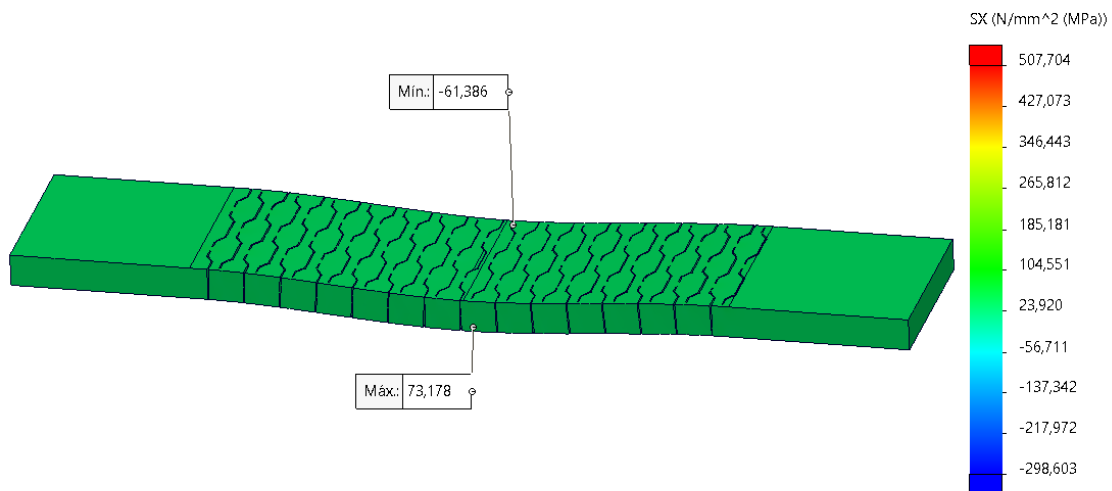
**PATRÓN B**

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PB-e3	SX: Tensión normal de X	-148,133 MPa	224,692 MPa



**Observaciones:** Tensión máxima de 224,7 MPa y mínima de -148,1 MPa, con picos en las zonas cercanas a las ranuras. Hay una fuerte concentración en el centro en la sección donde se aplica la carga. Las tensiones en la probeta son del orden de 10 – 20 MPa.

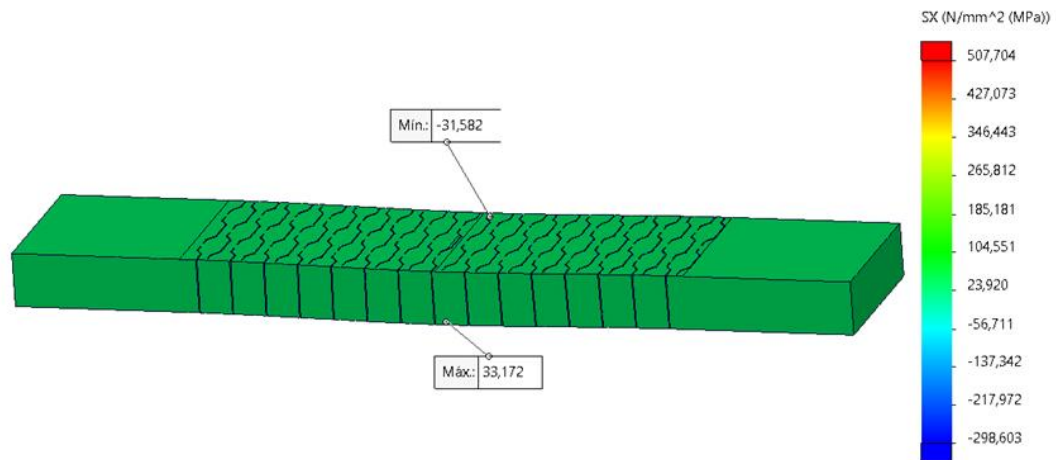
Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PB-e9	SX: Tensión normal de X	-61,386 MPa	73,178 MPa



**Observaciones:** tensión máxima de 73,178 MPa y mínima de 61,386 MPa, la distribución es muy similar a la probeta de 3 mm pero menos severa. Al igual, los esfuerzos en general son del valor de 10 – 20 MPa (tono verde)

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

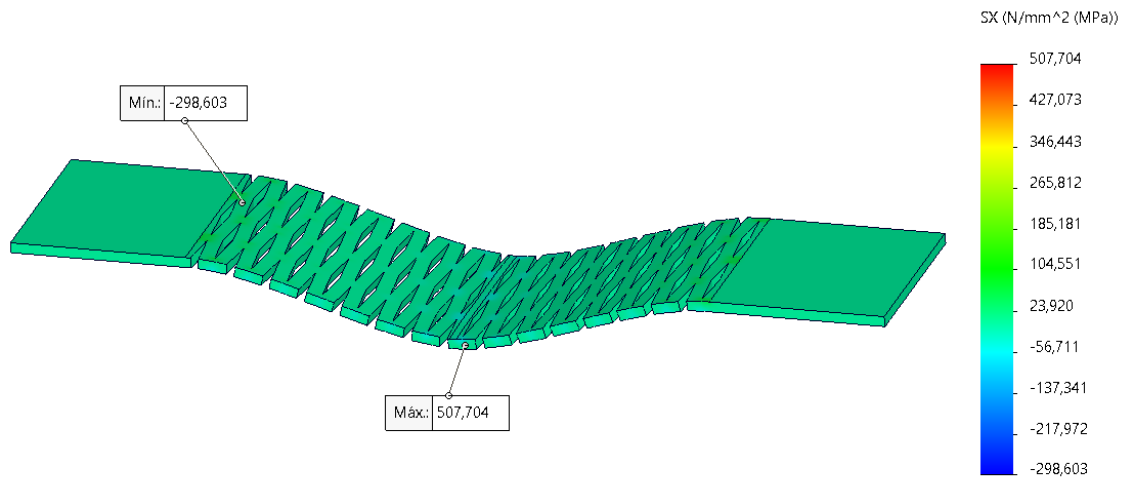
Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Tracción-PB-e16	SX: Tensión normal de X	-31,582 MPa	33,172 MPa



**Observaciones:** Tensiones máximas y mínimas de  $\pm 33$  MPa aproximadamente, de nuevo con aparición en las ranuras centrales y un comportamiento más rígido.

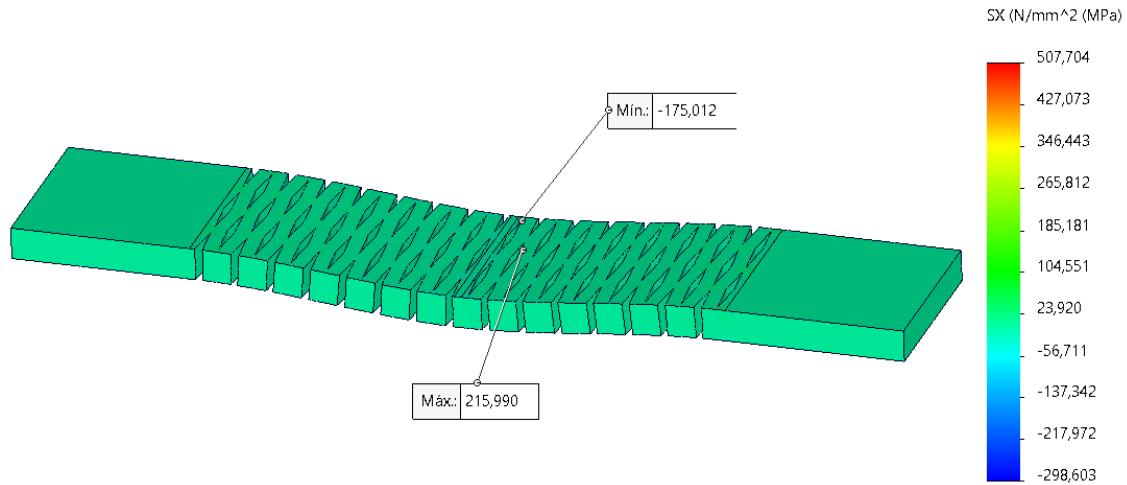
### PATRÓN C

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e3	SX: Tensión normal de X	-298,603 MPa	507,704 MPa



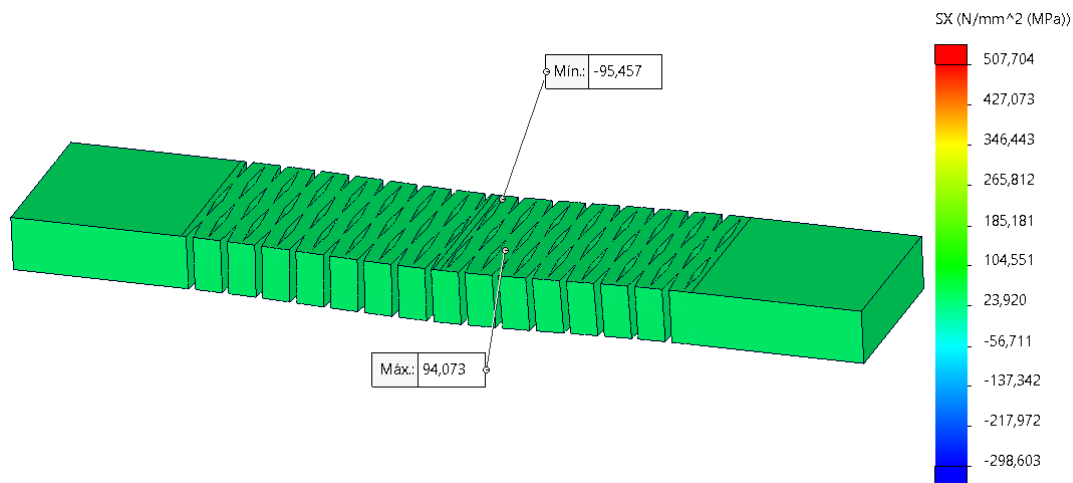
**Observaciones:** se alcanzan tensiones muy altas, con picos de 507,7 y mínimos de -298,6, este último en la zona del empotramiento, por lo que no es de especial interés. El máximo aparece en la esquina de los rombos. El valor alto de las tensiones coincide con que este patrón aguantó 9 kgf en los experimentos.

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e9	SX: Tensión normal de X	-175,012 MPa	215,990 MPa



**Observaciones:** Tensiones elevadas (215,990 MPa) en los cortes, esta vez se da un rombo que no está en la sección central.

Nombre	Tipo de tensión	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e16	SX: Tensión normal de X	-95,457 MPa	94,073 MPa

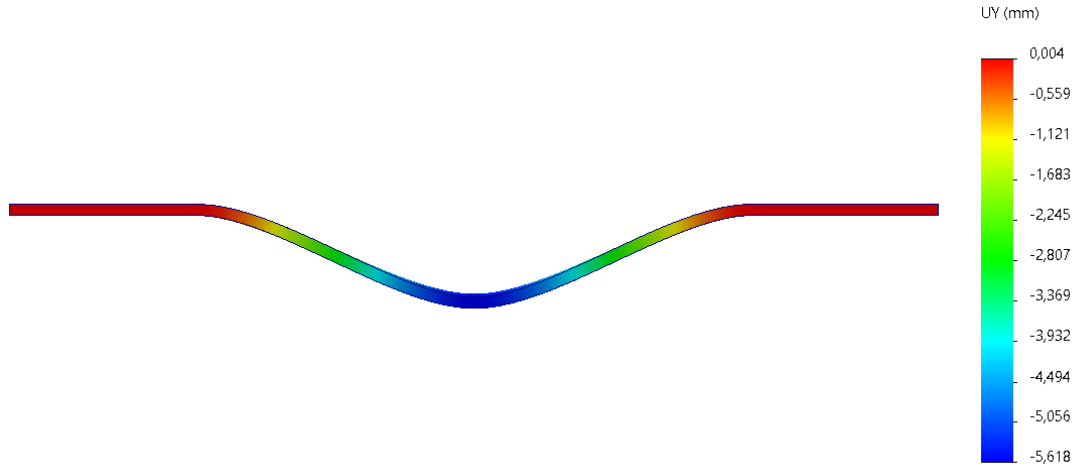


**Observaciones:** Se observan tensiones de compresión de valor 95,457 MPa y de tracción de 94,073 MPa (en las fibras inferiores más alejadas del eje neutro). Las tensiones por el resto de la probeta se distribuyen de manera uniforme (6 – 10 MPa).

5.2.2 Desplazamientos

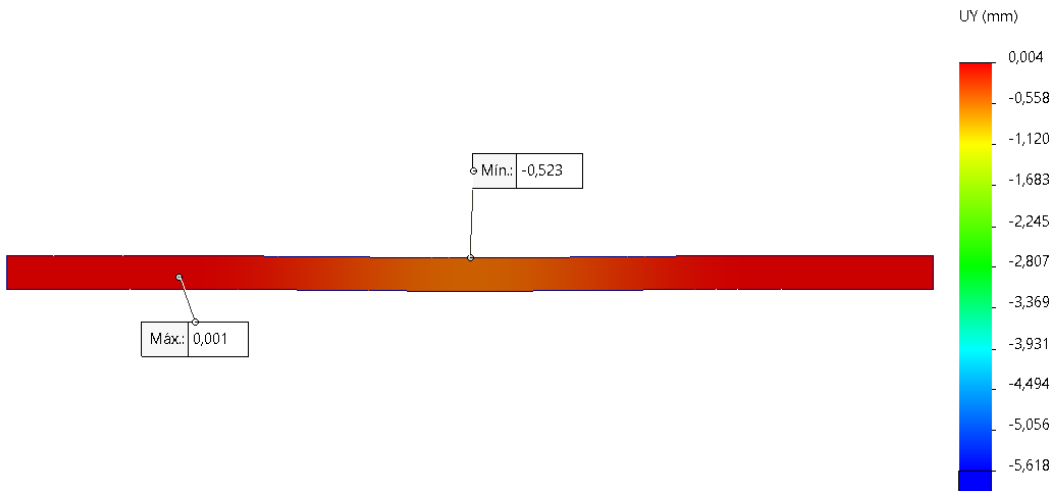
SIN PATRÓN APLICADO

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Y	-5,618 mm	0,004 mm



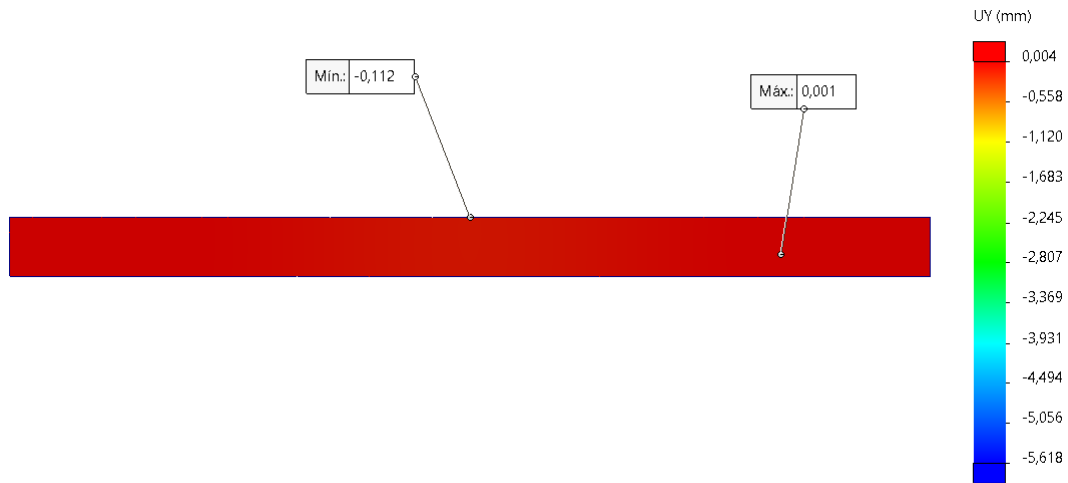
**Observaciones:** Desplazamientos moderado en el centro, con una flecha de valor **5,618 mm** de la fibra central.

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e9	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Y	-0,523 mm	0,001 mm



**Observaciones:** Desplazamientos se reducen de manera drástica. En el centro se dan los valores máximos, un total de 0,523 mm.

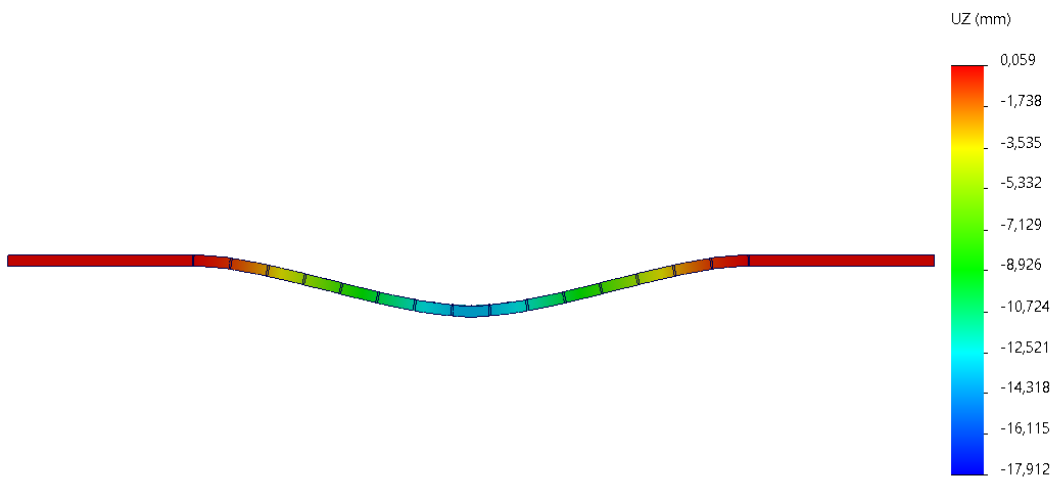
Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e16	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Y	-0,012 mm	0,000 mm



**Observaciones:** Desplazamientos se reducen aún más con el espesor de 16 mm, se alcanza en el centro, una flecha de valor **0,012 mm**.

**PATRÓN A**

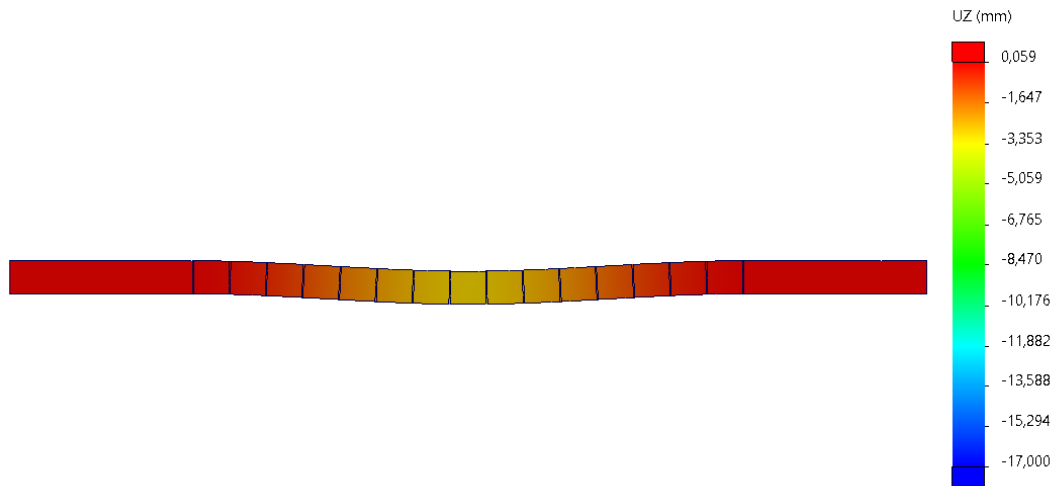
Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PA-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-13,677 mm	0,059 mm



**Observaciones:** El desplazamiento máximo llega a los 13,677 mm en la sección central de la probeta debido a la que la geometría de los cortes rectilínea favorece la flexibilidad de la probeta.

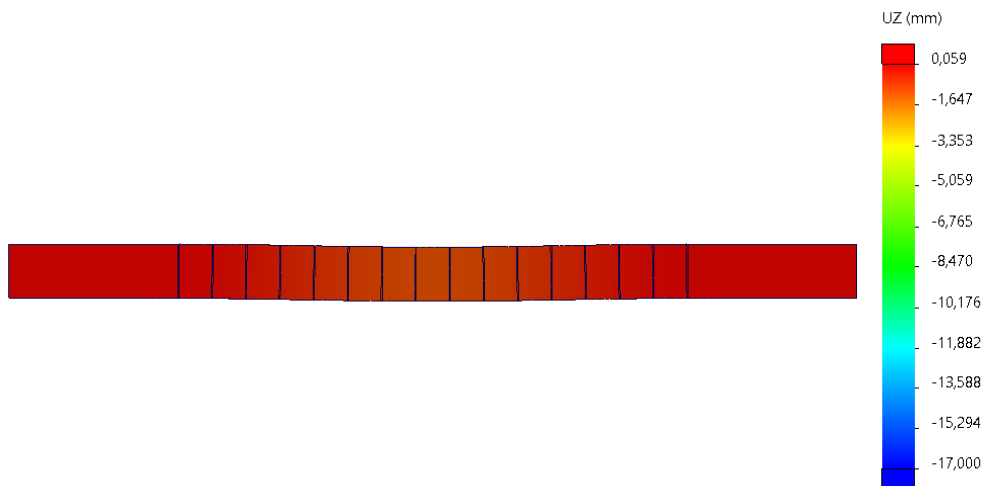
## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PA-e9	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-2,892 mm	0,018 mm



**Observaciones:** El desplazamiento máximo llega a los 2,892 mm en la sección central.

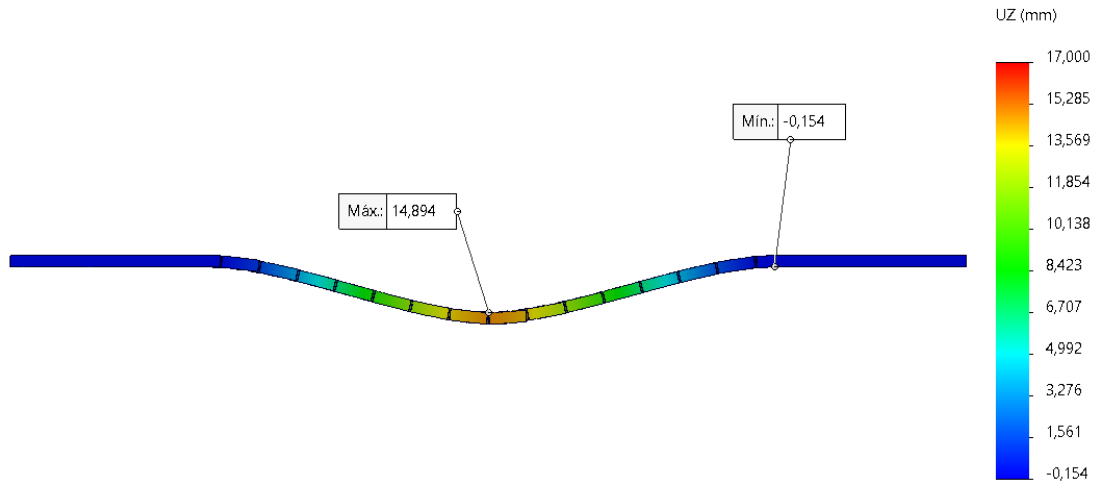
Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PA-e16	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-0,910 mm	0,005 mm



**Observaciones:** El desplazamiento se disminuye considerablemente llegando a un valor en el vano central de 0,910 mm.

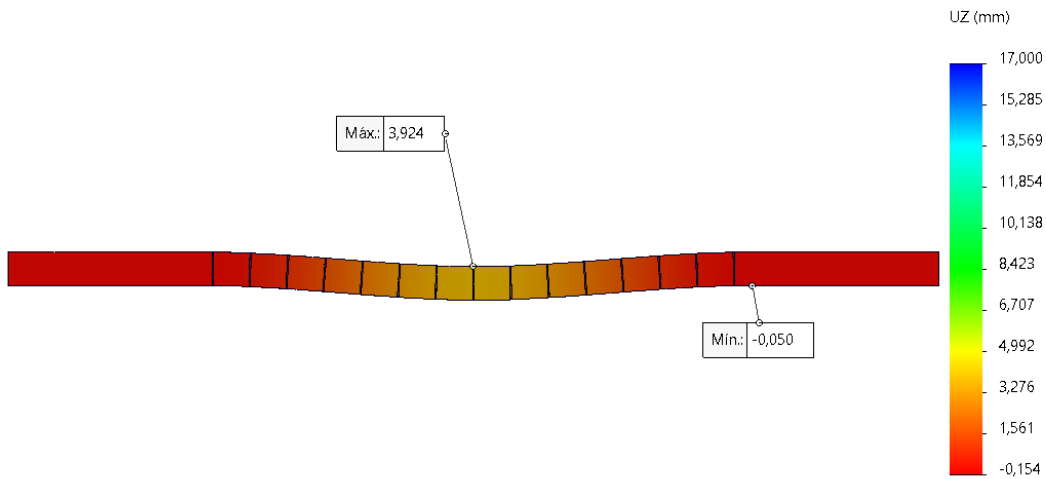
**PATRÓN B**

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PB-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-0,154 mm	14,894 mm



**Observaciones:** Se registra un desplazamiento máximo de **14,894 mm** en la zona central, se observa una alta deformabilidad.

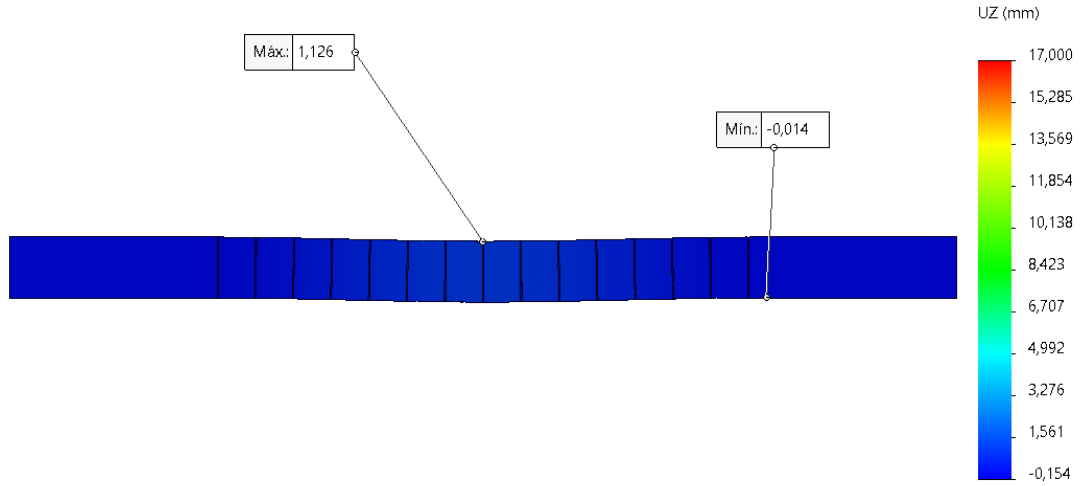
Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PB-e9	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-3,924 mm	0,050 mm



**Observaciones:** El desplazamiento máximo es de **3,924 mm**, de nuevo en el centro.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

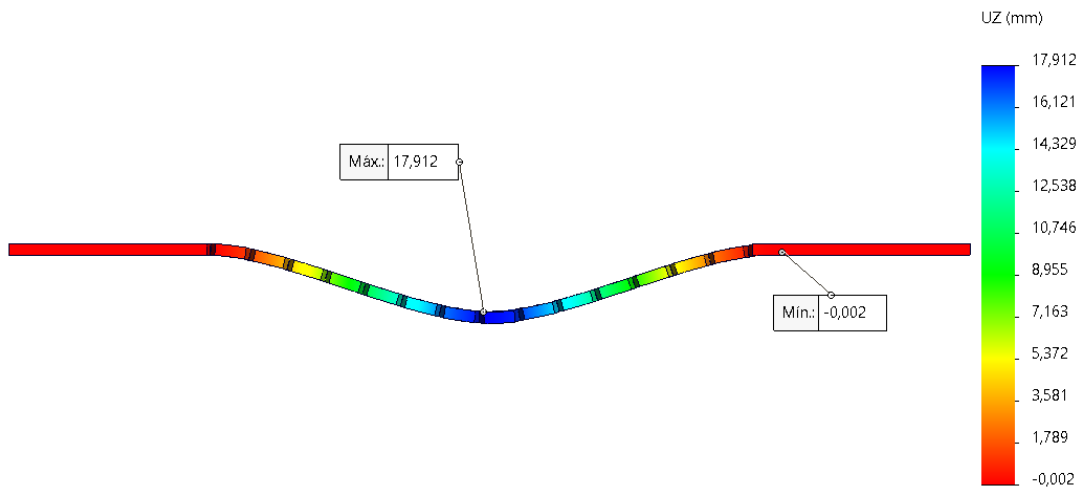
Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PB-e16	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-0,014 mm	1,126 mm



**Observaciones:** El valor de la flecha disminuye a 1,126 mm en la parte central.

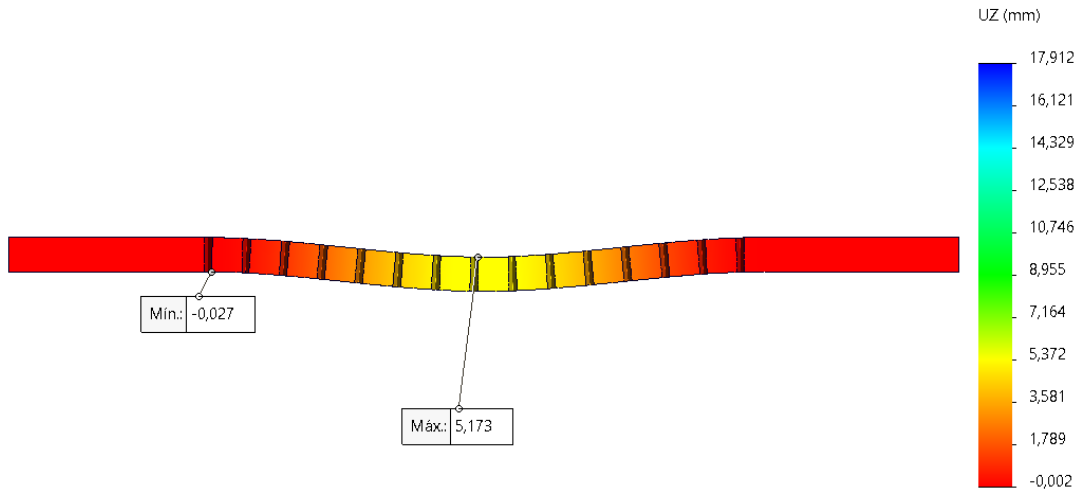
### PATRÓN C

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e3	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-17,912 mm	0,002 mm



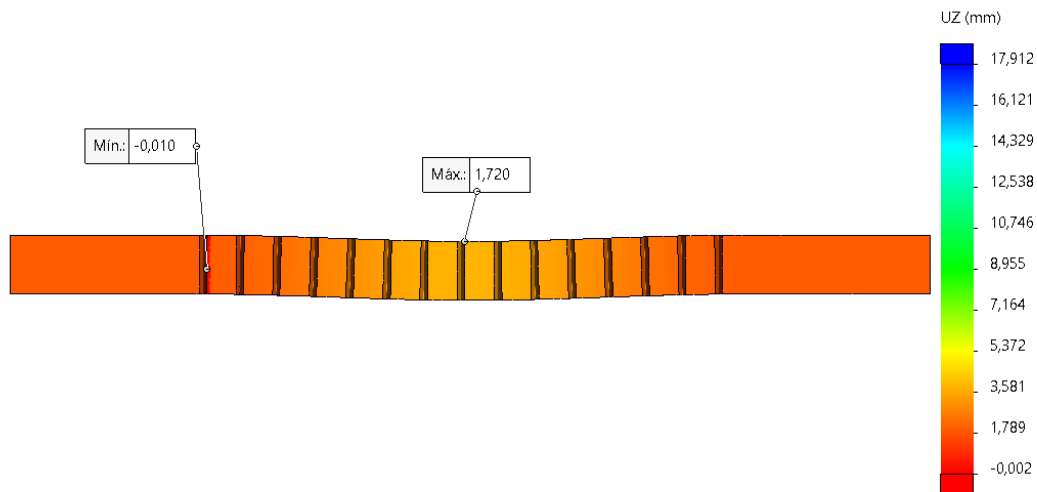
**Observaciones:** Se observa el mayor desplazamiento de todas las simulaciones, con 17,912 mm en el centro, también se trata del patrón que más carga soportó.

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e9	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-5,173 mm	0,027 mm



**Observaciones:** El desplazamiento vertical llega a 5,173 mm.

Nombre	Tipo de desplazamiento	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e16	URES: Desplazamientos resultantes en el eje Z	-1.720 mm	0,010 mm

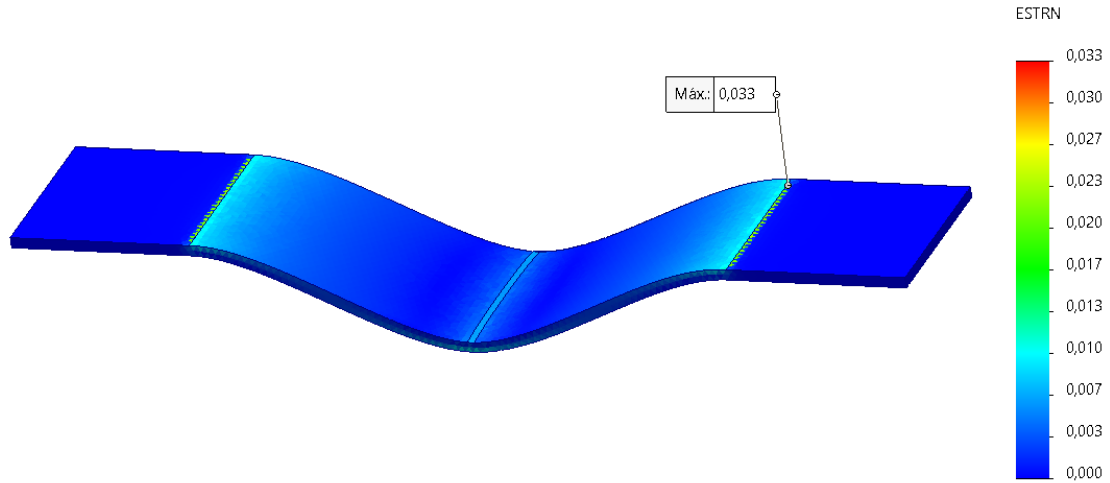


**Observaciones:** El desplazamiento vertical alcanza 1,720 mm.

5.2.3 Deformación unitaria

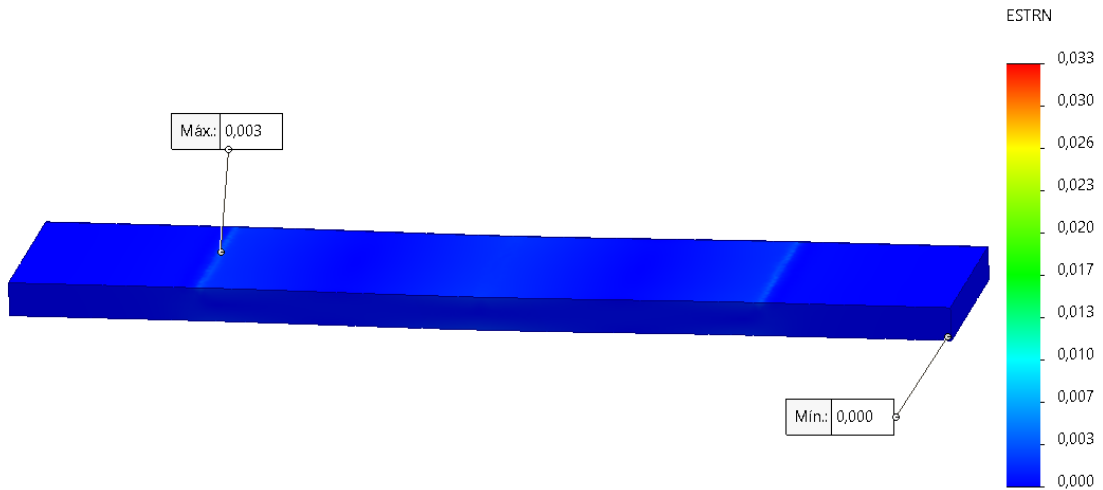
SIN PATRÓN APLICADO

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,033



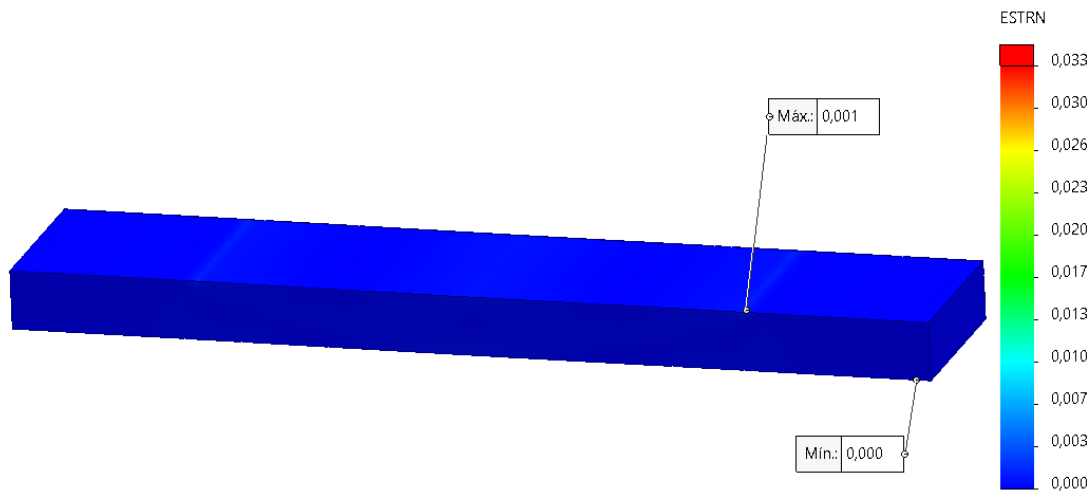
**Observaciones:** La deformación unitaria es de 0,033, distribuida de forma progresiva a lo largo de la probeta. Se da en el empotramiento.

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e9	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,003



**Observaciones:** La deformación unitaria es muy baja, con un valor de 0,003.

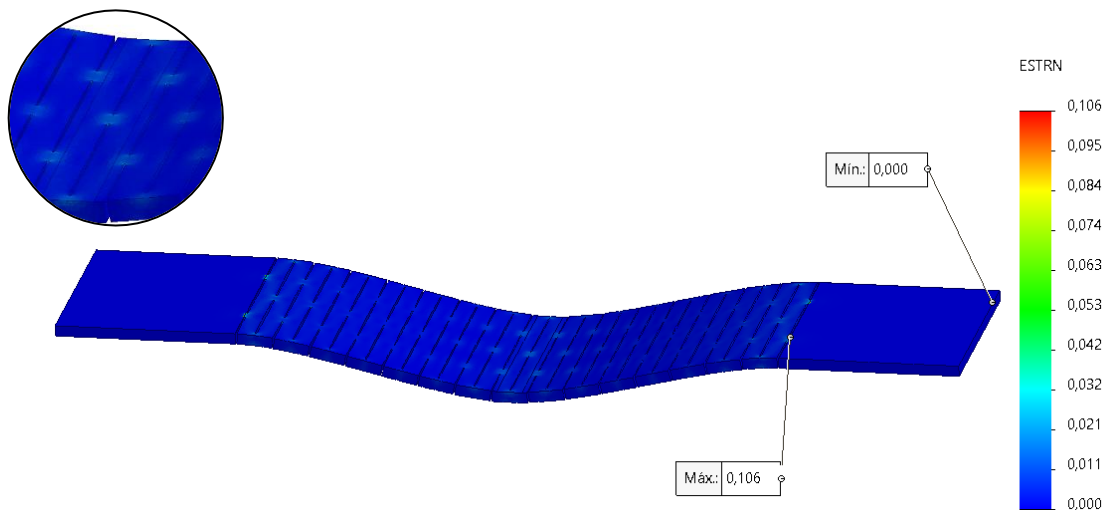
Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-P0-e16	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,001



**Observaciones:** La deformación unitaria es despreciable, del orden de 0,001. Evidencia una alta rigidez.

**PATRÓN A**

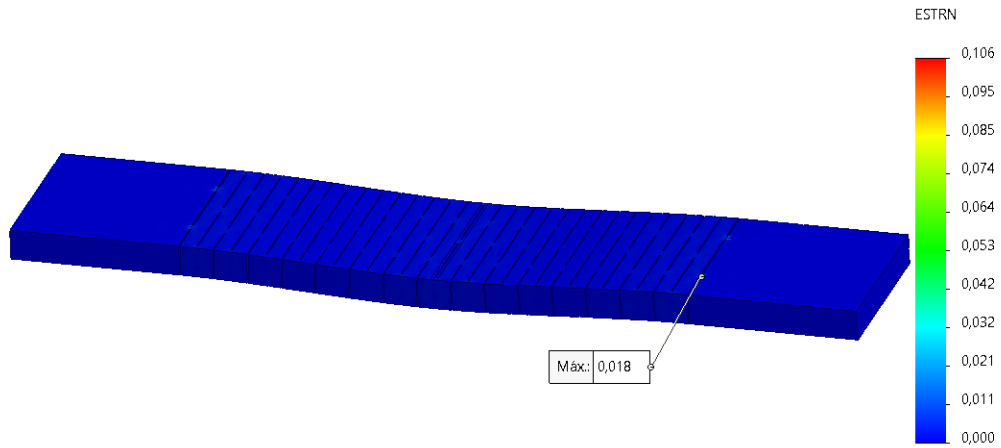
Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PA-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,106



**Observaciones:** Se alcanza una deformación máxima de 0,106. Se concentran en la parte central de la probeta, donde se produce la flexión máxima y donde el kerfing permite el doblado.

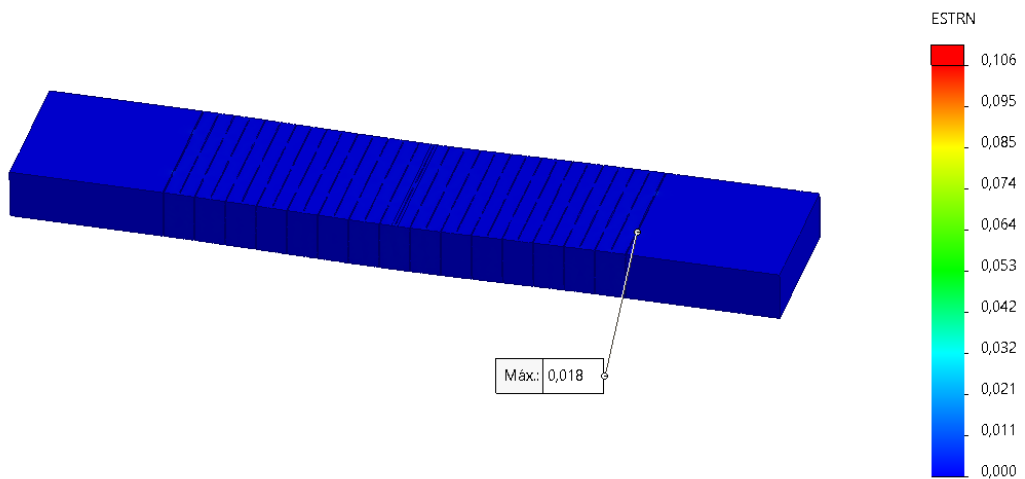
## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PA-e9	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,018



**Observaciones:** Las zonas de mayor deformación (tonos naranjas/amarillos) siguen concentrándose en la región central del kerfing, pero la intensidad de la deformación es mucho menor (colores más fríos en la escala). Se alcanza una deformación máxima de 0,018.

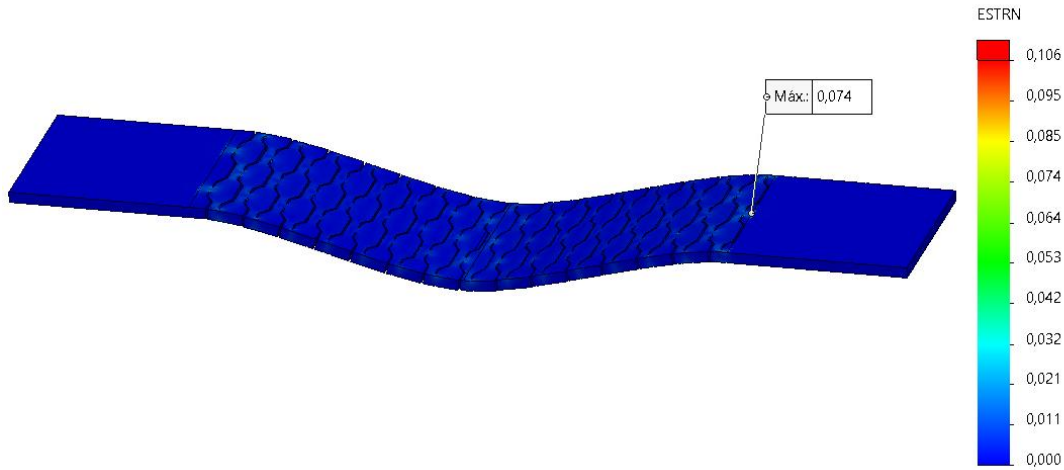
Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PA-e16	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,018



**Observaciones:** Se alcanza una deformación máxima de 0,018, muy bajo en la zona de los empotramientos.

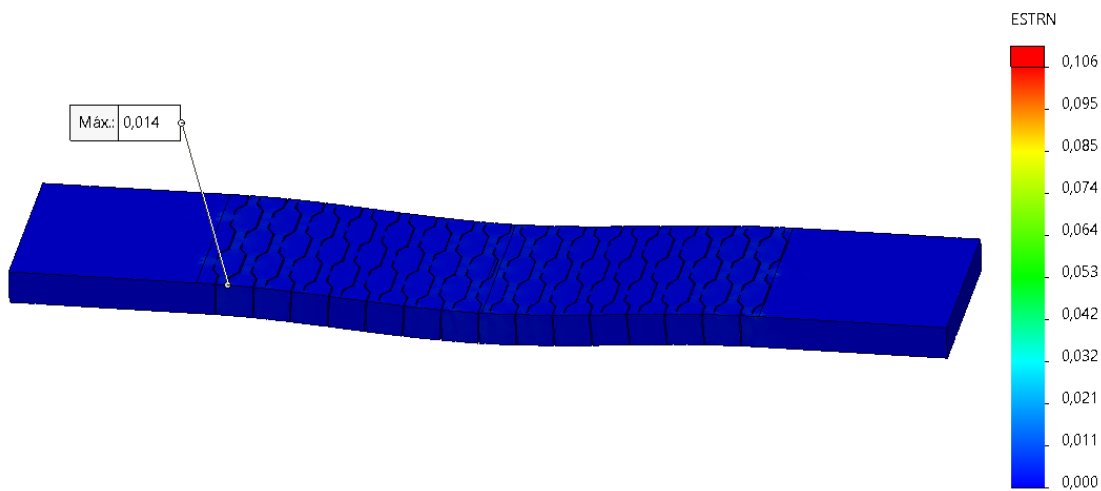
**PATRÓN B**

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PB-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,074



**Observaciones:** La deformación máxima es de 0,074.

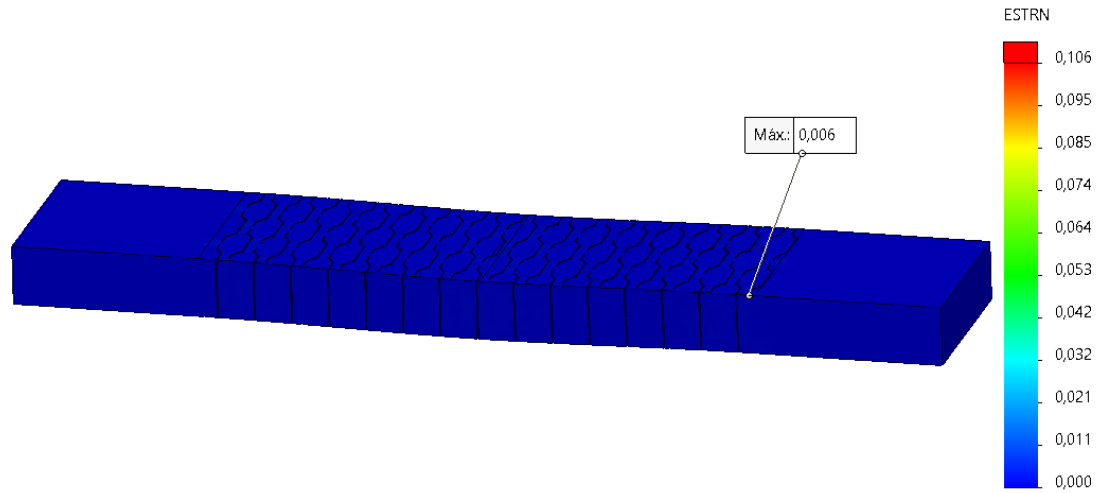
Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PB-e9	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,014



**Observaciones:** Deformación máxima de 0,014, localizada principalmente en las zonas con cortes.

## INFLUENCIA DEL KERFING EN MDF: ESTUDIO EXPERIMENTAL

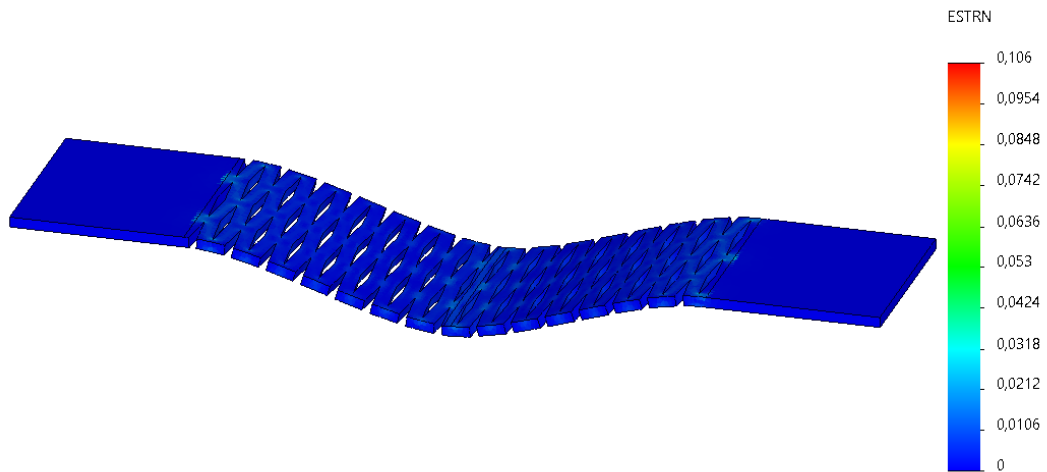
Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PB-e16	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,006



**Observaciones:** Deformación baja, de 0,006, que evidencia una mejor respuesta estructural.

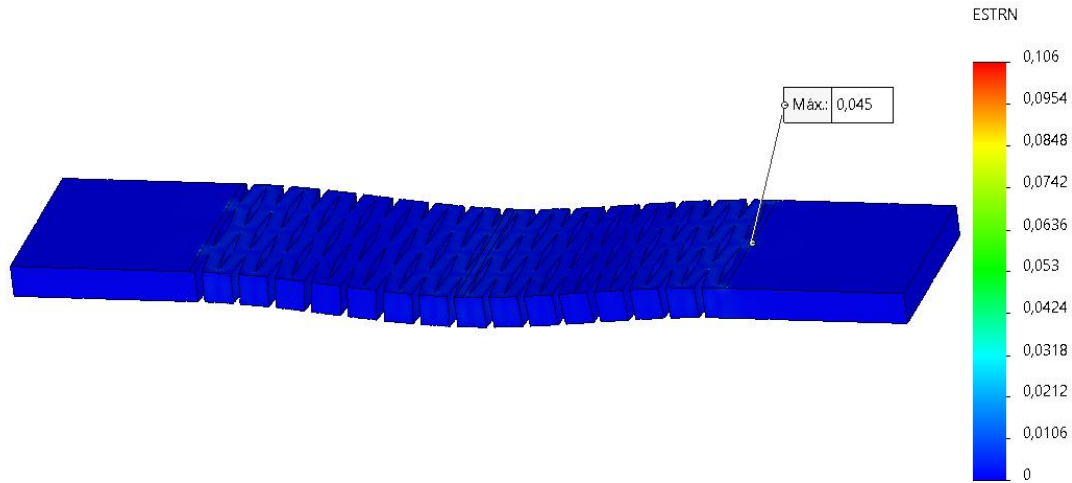
### PATRÓN C

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e3	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,068



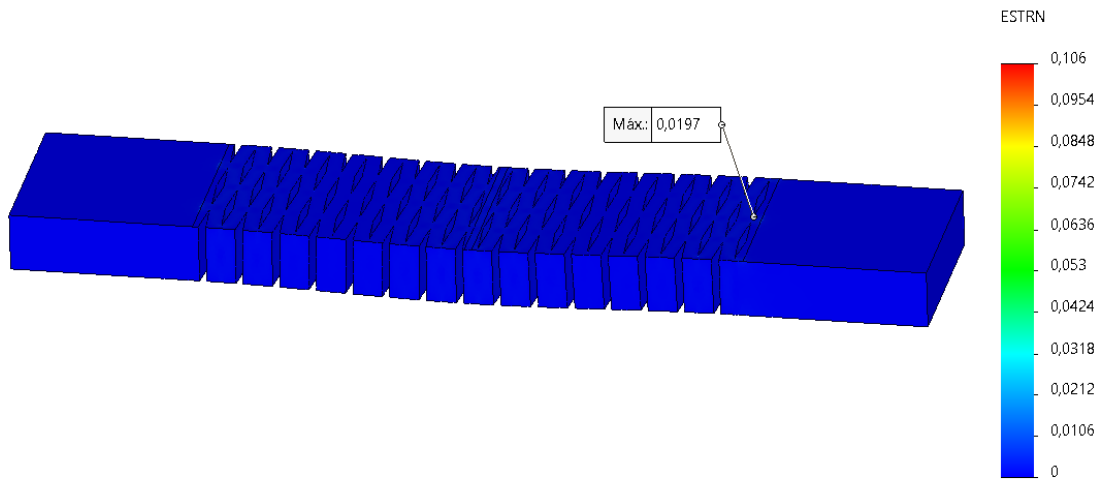
**Observaciones:** Deformación máxima de 0,068, bien distribuida, sin picos extremos.

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e9	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,045



**Observaciones:** valor máximo de 0,045, con distribución centrada en el empotramiento.

Nombre	Tipo de deformación	Mínimo	Máximo
Flexión-PC-e16	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0,000	0,0197



**Observaciones:** el valor máximo es de 0,0197, en la zona del empotramiento derecho.

### 5.2.4 Influencia del espesor

En la **Tabla 39** se observan los resultados extraídos de manera resumida.

**Tabla 39.** Tabla resumen de los resultados para el ensayo de flexión

SIN PATRÓN			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-18.329, 46.562]	[-5.618, 0.004]	[0.000, 0.033]
9	[-7.988, 13.600]	[-0.523, 0.001]	[0.001, 0.003]
16	[-3.732, 4.611]	[-0.012, 0.000]	[0.000, 0.001]
PATRÓN A			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-132.650, 221.481]	[-13.677, 0.059]	[0.000, 0.106]
9	[-52.463, 58.665]	[-2.892, 0.018]	[0.000, 0.018]
16	[-25.619, 25.289]	[-0.910, 0.005]	[0.000, 0.018]
PATRÓN B			
Espesor (mm)	Tensión máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-148,133, 224.692]	[-14.894, 0.154]	[0.000, 0.074]
9	[-61.386, 78.178]	[-3.924, 0.050]	[0.000, 0.014]
16	[-31.582, 33.172]	[-1,126, 0.014]	[0.000, 0.006]
PATRÓN C			
Espesor (mm)	Tensión Máxima y mínima (MPa)	Desplazamiento Máximo y mínimo (mm)	Deformación unitaria
3	[-298.603, 507.704]	[-17.912, 0.002]	[0.000, 0.045]
9	[-175.012, 215.990]	[-5.173, 0.027]	[0.000, 0.045]
16	[-95.457, 94.073]	[-1.720, 0.010]	[0.000, 0.0197]

Fuente: Elaboración propia

## 6. Conclusiones

En general, los resultados numéricos obtenidos mediante simulación han mostrado una **correlación cualitativa adecuada con los datos experimentales**, especialmente en lo relativo a la **localización de las zonas críticas de concentración de esfuerzos y al comportamiento relativo entre los diferentes patrones**. Las simulaciones también han reflejado el efecto esperado del aumento del espesor del material: una disminución progresiva de tensiones, desplazamientos y deformaciones, confirmando la hipótesis inicial de que la rigidez estructural aumenta con el espesor.



