



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PIEZAS OBTENIDAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D CON MATERIALES REFORZADOS CON FIBRAS

Alumno: Manuel Hurtado Expósito

Tutor: Prof. D. Daniel Carazo Álvarez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Cotutor: Prof. D. Alberto García Collado
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2021



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería mecánica y minera

Don Daniel Carazo Álvarez y Don Alberto García Collado, tutor y cotutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: "*Caracterización Mecánica de Piezas Obtenidas mediante Impresión 3D con Materiales Reforzados con Fibras*", que presenta Manuel Hurtado Expósito, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2021

El alumno:

Los tutores:

Manuel Hurtado Expósito

Daniel Carazo Álvarez

Alberto García Collado

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
RESUMEN.....	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. ESTADO DEL ARTE	17
2.1. ¿Qué es la impresión 3D?	17
2.1.1. Fabricación Digital	17
2.1.2. Fabricación Aditiva.....	20
2.1.2.1. Fotopolimerización en tanque o cuba	21
2.1.2.2. Proyección de material (Polyjet).....	23
2.1.2.3. Proyección de aglutinante	24
2.1.2.4. Fusión lecho de polvo	24
2.1.2.5. Extrusión de material	25
2.1.2.6. Deposición de energía focalizada.....	27
2.1.2.7. Laminado de hojas.....	28
2.1.3. Síntesis conceptos de la Impresión 3D.....	29
2.2. Evolución tecnológica de la Impresión 3D	30
2.3. Aplicaciones de la Impresión 3D	33
2.4. Materiales reforzados con fibras	34
3. OBJETIVOS Y MOTIVACIONES	36
4. DISEÑO DE PROGRAMAS EXPERIMENTALES	37
4.1. Objetivos.....	37
4.2. Propiedades generales de los materiales empleados.....	37
4.2.1. Onyx.....	37
4.2.2. Onyx + FV.....	37
4.2.3. PET Fibra de carbono (PET FC).....	38
4.2.4. PA Fibra de carbono	38
4.3. Impresión 3D de las probetas	39
4.3.1. Proceso de impresión 3D	39
4.3.2. Número y dimensiones de las probetas	50
4.3.2.1. Ensayo a tracción ASTM D3039	50
4.3.2.2. Ensayo a cortante ASTM D5379	51

4.3.2.3.	Ensayo a compresión UNE EN ISO 604	53
4.4.	Caracterización mecánica	54
4.5.	Correlación digital de imágenes.....	55
5.	PROGRAMAS EXPERIMENTALES: OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	59
5.1.	Ensayo a tracción ASTM D3039	59
5.1.1.	Descripción del ensayo.....	59
5.1.2.	Procedimiento experimental.....	61
5.1.3.	Cálculos e interpretación de resultados	63
5.1.4.	Resultados obtenidos.....	66
5.2.	Ensayo a cortante ASTM D5379 – ASTM D7078.....	72
5.2.1.	Descripción del ensayo.....	72
5.2.2.	Procedimiento experimental.....	74
5.2.3.	Cálculos e interpretación de resultados	76
5.2.4.	Resultados obtenidos.....	77
5.3.	Ensayo a compresión UNE EN ISO 604	83
5.3.1.	Descripción del ensayo.....	83
5.3.2.	Procedimiento experimental.....	85
5.3.3.	Cálculos e interpretación de resultados	87
5.3.4.	Resultados obtenidos.....	88
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	95
6.1.	Procedimiento general del análisis de resultados	95
6.2.	Tracción	98
6.2.1.	Onyx.....	98
6.2.2.	Onyx + FV.....	101
6.2.3.	PET FC	103
6.2.4.	PA FC.....	106
6.3.	Cortante.....	109
6.3.1.	Onyx.....	109
6.3.2.	Onyx + FV.....	112
6.3.3.	PET FC	114
6.3.4.	PA FC.....	117
6.4.	Compresión	120
6.4.1.	Onyx.....	120
6.4.2.	Onyx + FV.....	123
6.4.3.	PET FC	125
6.4.4.	PA FC.....	128

6.5.	Modos de rotura / fallo	131
6.5.1.	Tracción	131
6.5.2.	Cortante	136
6.5.3.	Compresión	138
6.6.	Comparativa onyx / onyx + FV / PET FC / PA FC	140
6.6.1.	Tracción	142
6.6.1.1.	Coeficiente de Poisson	150
6.6.2.	Cortante	153
6.6.3.	Compresión	159
6.7.	Anisotropía de los materiales	166
6.8.	Comparativa de costes.....	168
7.	CONCLUSIONES.....	169
	BIBLIOGRAFÍA.....	172

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. Ejemplo de programación abierta.....	19
ILUSTRACIÓN 2. Pieza realizada por estereolitografía	22
ILUSTRACIÓN 3. Impresora 3D DLP B9-Creator	22
ILUSTRACIÓN 4. Fabricación de pieza mediante tecnología Polyjet	23
ILUSTRACIÓN 5. Esquema orientativo de la tecnología de proyección de material (Polyjet)	23
ILUSTRACIÓN 6. Pieza obtenida mediante proyección de aglutinante	24
ILUSTRACIÓN 7. Fabricación de pieza mediante DMLS	25
ILUSTRACIÓN 8. Pieza obtenida mediante FDM	27
ILUSTRACIÓN 9. Deposición de energía focalizada	28
ILUSTRACIÓN 10. Fresadora CNC para recorte de pieza mediante UC	28
ILUSTRACIÓN 11. Rodillo uniendo láminas de material (LOM).....	29
ILUSTRACIÓN 12. Primera impresora 3D de la historia diseñada por Chuck Hull.....	31
ILUSTRACIÓN 13. Impresora autorreplicable Darwin.	32
ILUSTRACIÓN 14. Direcciones de impresión.	39
ILUSTRACIÓN 15. Tensiones normales y tangenciales en las tres direcciones.	40
ILUSTRACIÓN 16. Apilamiento de capas según tensión estudiada.	40
ILUSTRACIÓN 17. Modo de impresión para probeta de tracción.....	41
ILUSTRACIÓN 18. Impresora Markforged Two.	42
ILUSTRACIÓN 19. Capa de fibra de vidrio a 0° para probeta a cortante.	43
ILUSTRACIÓN 20. Capa interna de onyx para probeta a cortante.	43
ILUSTRACIÓN 21. Capa interna de fibra de vidrio a +45° para probeta a cortante.	43
ILUSTRACIÓN 22. Capa interna de fibra de vidrio a -45° para probeta a cortante.....	43
ILUSTRACIÓN 23. Capa interna de fibra de vidrio a 0° durante el proceso de impresión.	44
ILUSTRACIÓN 24. Warping en probetas a compresión.	44
ILUSTRACIÓN 25. Warping en primer modelo para probetas a tracción.	44
ILUSTRACIÓN 26. Fibra de vidrio descolocada fuera del plano de impresión.	45
ILUSTRACIÓN 27. Impresora Bq Witbox 1.....	45
ILUSTRACIÓN 28. Impresora Creality3D Ender 3 Pro.....	46
ILUSTRACIÓN 29. Instalaciones de la empresa Smartmaterials3D.	46
ILUSTRACIÓN 30. Impresora Ultimaker S5 de Smartmaterials3D.	47
ILUSTRACIÓN 31. Impresora Ultimaker S5 del departamento de impresión 3D de la Universidad de Jaén.....	48
ILUSTRACIÓN 32. Probetas verticales de PA FC impresas por la impresora Ultimaker S5.....	49
ILUSTRACIÓN 33. Requisitos dimensionales probetas ASTM D3039.	50
ILUSTRACIÓN 34. Modelo CAD-3D de la probeta a tracción ASTM D3039.....	51
ILUSTRACIÓN 35. Dimensiones probetas ASTM D5379.....	52
ILUSTRACIÓN 36. Modelo CAD-3D de la probeta a cortante ASTM D5379.....	52
ILUSTRACIÓN 37. Dimensiones probetas UNE EN ISO 604.....	53
ILUSTRACIÓN 38. Modelo CAD-3D de las probetas a compresión UNE EN ISO 604.	54
ILUSTRACIÓN 39. Fotografía previa al ensayo de tracción de una probeta.....	55
ILUSTRACIÓN 40. Zoom de la ilustración 39.	56
ILUSTRACIÓN 41. Píxeles con diferentes tonalidades y valores de posición de la ilustración 15.....	56
ILUSTRACIÓN 42. Comparación fotografía inicial y final de un ensayo a tracción.....	57
ILUSTRACIÓN 43. Ejemplo vector desplazamiento de una faceta de la ilustración 17.....	57

ILUSTRACIÓN 44. Extensómetros digitales por correlación digital de imágenes en probeta de tracción.....	59
ILUSTRACIÓN 45. Modos de fallos y códigos de identificación.....	60
ILUSTRACIÓN 46. Moteado de la probeta a tracción.	61
ILUSTRACIÓN 47. Marcas de referencia a 40 mm.	61
ILUSTRACIÓN 48. Montaje experimental ensayo a tracción.....	62
ILUSTRACIÓN 49. Cámara de alta resolución.....	63
ILUSTRACIÓN 50. Imagen tomada con cámara de alta resolución.....	63
ILUSTRACIÓN 51. Rango de deformaciones para el módulo de elasticidad.....	64
ILUSTRACIÓN 52. Curva tensión-deformación de la norma ASTM D3039.....	65
ILUSTRACIÓN 53. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO1.....	67
ILUSTRACIÓN 54. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TDCO3.	67
ILUSTRACIÓN 55. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TVO4.	68
ILUSTRACIÓN 56. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO0°FV1.....	68
ILUSTRACIÓN 57. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO45°FV3.....	69
ILUSTRACIÓN 58. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPPET1.	69
ILUSTRACIÓN 59. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TDCPET5.	70
ILUSTRACIÓN 60. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TVPET1.....	70
ILUSTRACIÓN 61. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPPA2.....	71
ILUSTRACIÓN 62. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TDCPA3.	71
ILUSTRACIÓN 63. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TVPA1.	71
ILUSTRACIÓN 64. Planos de orientación para las diferentes propiedades.	72
ILUSTRACIÓN 65. Mordazas norma ASTM D5379.	73
ILUSTRACIÓN 66. Mordazas norma ASTM D7078.	73
ILUSTRACIÓN 67. Extensómetro digital por correlación digital de imágenes para probeta de cortante.....	74
ILUSTRACIÓN 68. Montaje experimental ensayo a cortante.....	75
ILUSTRACIÓN 69. Fotografía durante el proceso de la correlación digital de imágenes.	75
ILUSTRACIÓN 70. Curva tensión-deformación de la norma ASTM D5379.....	77
ILUSTRACIÓN 71. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPO3.	78
ILUSTRACIÓN 72. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORDCO4.	78
ILUSTRACIÓN 73. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORVO2.....	78
ILUSTRACIÓN 74. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPO0°FV2.	79
ILUSTRACIÓN 75. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPO45°FV3.	79
ILUSTRACIÓN 76. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPPET5.	80
ILUSTRACIÓN 77. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORDCPET5.	80
ILUSTRACIÓN 78. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORVPET4.....	81
ILUSTRACIÓN 79. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPPA1.	81
ILUSTRACIÓN 80. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORDCPA3.	82
ILUSTRACIÓN 81. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORVPA4.....	82
ILUSTRACIÓN 82. Máquina de ensayos a compresión.....	84
ILUSTRACIÓN 83. Probeta de compresión colocada y longitud de referencia.	85
ILUSTRACIÓN 84. Montaje experimental ensayo a compresión.....	86
ILUSTRACIÓN 85. Extensómetro digital para los ensayos de compresión.	86

ILUSTRACIÓN 86. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPO4.	88
ILUSTRACIÓN 87. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMDCO5. ...	89
ILUSTRACIÓN 88. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMVO1.	89
ILUSTRACIÓN 89. Pandeo producido en las probetas de compresión.	90
ILUSTRACIÓN 90. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPO0°FV5.	90
ILUSTRACIÓN 91. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPO45°FV4.	90
ILUSTRACIÓN 92. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPPET2. ..	91
ILUSTRACIÓN 93. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMDCPET5.	91
ILUSTRACIÓN 94. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMVPET1. ...	92
ILUSTRACIÓN 95. Probeta COMVPET3 ensayada.	92
ILUSTRACIÓN 96. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPPA4.	93
ILUSTRACIÓN 97. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMDCPA2. .	93
ILUSTRACIÓN 98. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMVPA2. ...	93
ILUSTRACIÓN 99. Probeta COMVPA2 ensayada.	94
ILUSTRACIÓN 100. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO1.	95
ILUSTRACIÓN 101. Ecuación módulo de elasticidad en el rango de deformaciones.	95
ILUSTRACIÓN 102. Curva Tensión-Deformación procesada de la probeta TPO1.	96
ILUSTRACIÓN 103. Distribución del coeficiente de Poisson de la probeta TPO1.	96
ILUSTRACIÓN 104. Línea promedio del coeficiente de Poisson de la probeta TPO1.	97
ILUSTRACIÓN 105. Curvas Tensión-Deformación probetas TPO.	98
ILUSTRACIÓN 106. Curvas Tensión-Deformación probetas TDCO.	99
ILUSTRACIÓN 107. Curvas Tensión-Deformación probetas TVO.	100
ILUSTRACIÓN 108. Curvas Tensión-Deformación probetas TPO0°FV.	101
ILUSTRACIÓN 109. Curvas Tensión-Deformación probetas TPO45°FV.	102
ILUSTRACIÓN 110. Curvas Tensión-Deformación probetas TPPET.	103
ILUSTRACIÓN 111. Curvas Tensión-Deformación probetas TDCPET.	104
ILUSTRACIÓN 112. Curvas Tensión-Deformación probetas TVPET.	105
ILUSTRACIÓN 113. Curvas Tensión-Deformación probetas TPPA.	106
ILUSTRACIÓN 114. Curvas Tensión-Deformación probetas TDCPA.	107
ILUSTRACIÓN 115. Curvas Tensión-Deformación probetas TVPA.	108
ILUSTRACIÓN 116. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPO.	109
ILUSTRACIÓN 117. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORDCO.	110
ILUSTRACIÓN 118. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORVO.	111
ILUSTRACIÓN 119. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPO0°FV.	112
ILUSTRACIÓN 120. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPO45°FV.	113
ILUSTRACIÓN 121. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPPET.	114
ILUSTRACIÓN 122. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORDCPET.	115
ILUSTRACIÓN 123. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORVPET.	116
ILUSTRACIÓN 124. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPPA.	117
ILUSTRACIÓN 125. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORDCPA.	118
ILUSTRACIÓN 126. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORVPA.	119
ILUSTRACIÓN 127. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPO.	120
ILUSTRACIÓN 128. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMDCO.	121
ILUSTRACIÓN 129. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMVO.	122
ILUSTRACIÓN 130. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPO0°FV.	123
ILUSTRACIÓN 131. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPO45°FV.	124

ILUSTRACIÓN 132. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPPET.	125
ILUSTRACIÓN 133. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMDCPET.	126
ILUSTRACIÓN 134. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMVPET.	127
ILUSTRACIÓN 135. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPPA.	128
ILUSTRACIÓN 136. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMDCPA.	129
ILUSTRACIÓN 137. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMVPA.	130
ILUSTRACIÓN 138. Rotura probetas TPO.	131
ILUSTRACIÓN 139. Sección de rotura probeta TPO.	131
ILUSTRACIÓN 140. Sección de rotura probeta TVO.	132
ILUSTRACIÓN 141. Rotura probetas TPO0°FV.	132
ILUSTRACIÓN 142. Sección de rotura probeta TPO0°FV.	133
ILUSTRACIÓN 143. Rotura probetas TPO45°FV.	133
ILUSTRACIÓN 144. Rotura probetas TVPET.	134
ILUSTRACIÓN 145. Rotura probetas TPPA.	135
ILUSTRACIÓN 146. Rotura probeta CORDCO3.	136
ILUSTRACIÓN 147. Rotura probetas CORVO.	136
ILUSTRACIÓN 148. Rotura probetas CORPPET.	137
ILUSTRACIÓN 149. Rotura probetas CORPPA.	137
ILUSTRACIÓN 150. Rotura probetas CORVPET.	138
ILUSTRACIÓN 151. Rotura probeta COMDCPA1.	138
ILUSTRACIÓN 152. Rotura probeta COMVPET3.	139
ILUSTRACIÓN 153. Rotura probeta COMVPA2.	139
ILUSTRACIÓN 154. Líneas de tendencia de las probetas TPO0°FV.	140
ILUSTRACIÓN 155. Representación de la curva media para el lote de probetas TPO0°FV.	141
ILUSTRACIÓN 156. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Tracción dirección 1. ...	142
ILUSTRACIÓN 157. Comparativa comportamiento tensión-deformación Markforged. Tracción dirección 1.	143
ILUSTRACIÓN 158. Comparativa comportamiento tensión-deformación Smartmaterials3D. Tracción dirección 1.	144
ILUSTRACIÓN 159. Comparativa Módulo de Young. Tracción dirección 1.	145
ILUSTRACIÓN 160. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Tracción dirección 1.	145
ILUSTRACIÓN 161. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Tracción dirección 2. ...	146
ILUSTRACIÓN 162. Comparativa Módulo de Young. Tracción dirección 2.	147
ILUSTRACIÓN 163. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Tracción dirección 2.	147
ILUSTRACIÓN 164. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Tracción dirección 3. ...	148
ILUSTRACIÓN 165. Comparativa Módulo de Young. Tracción dirección 3.	149
ILUSTRACIÓN 166. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Tracción dirección 3.	149
ILUSTRACIÓN 167. Coeficientes de Poisson de materiales típicos utilizados en ingeniería.	150
ILUSTRACIÓN 168. Comparativa valores medios coeficiente de Poisson dirección 1.	151
ILUSTRACIÓN 169. Comparativa valores medios coeficiente de Poisson dirección 2.	152
ILUSTRACIÓN 170. Comparativa valores medios coeficiente de Poisson dirección 3.	152
ILUSTRACIÓN 171. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Cortante plano 12.	153
ILUSTRACIÓN 172. Comparativa comportamiento tensión-deformación Markforged. Cortante plano 12.	154

ILUSTRACIÓN 173. Comparativa comportamiento tensión-deformación Smartmaterials3D. Cortante plano 12.....	154
ILUSTRACIÓN 174. Comparativa Módulo de elasticidad transversal. Cortante plano 12.....	155
ILUSTRACIÓN 175. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Cortante plano 12.	155
ILUSTRACIÓN 176. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Cortante plano 13.	156
ILUSTRACIÓN 177. Comparativa Módulo de elasticidad transversal. Cortante plano 13.....	157
ILUSTRACIÓN 178. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Cortante plano 13.	157
ILUSTRACIÓN 179. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Cortante plano 23.	158
ILUSTRACIÓN 180. Comparativa Módulo de elasticidad transversal. Cortante plano 23.....	158
ILUSTRACIÓN 181. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Cortante plano 23.	159
ILUSTRACIÓN 182. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Compresión dirección 1.	159
ILUSTRACIÓN 183. Comparativa comportamiento tensión-deformación Markforged. Compresión dirección 1.	160
ILUSTRACIÓN 184. Comparativa comportamiento tensión-deformación Smartmaterials3D. Compresión dirección 1.	161
ILUSTRACIÓN 185. Comparativa Módulo de compresión. Compresión dirección 1.	161
ILUSTRACIÓN 186. Comparativa Resistencia máxima / Defor. Rotura. Compresión dirección 1.	162
ILUSTRACIÓN 187. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Compresión dirección 2.	162
ILUSTRACIÓN 188. Comparativa Módulo de compresión. Compresión dirección 2.	163
ILUSTRACIÓN 189. Comparativa Resistencia máxima / Defor. Rotura. Compresión dirección 2.	163
ILUSTRACIÓN 190. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Compresión dirección 3.	164
ILUSTRACIÓN 191. Comparativa Módulo de compresión. Compresión dirección 3.	164
ILUSTRACIÓN 192. Comparativa Resistencia máxima / Defor. Rotura. Compresión dirección 3.	165

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Propiedades del ONYX aportadas por Markforged	37
TABLA 2. Propiedades de la fibra de vidrio aportadas por Markforged.	38
TABLA 3. Propiedades del PET FC aportadas por Smartmaterials3D.	38
TABLA 4. Propiedades del PA FC aportadas por Smartmaterials3D.	39
TABLA 5. Número de probetas a tracción para Onyx + FV.....	50
TABLA 6. Número de probetas a tracción para Onyx, PET FC y PA FC.	50
TABLA 7. Número de probetas a cortante para Onyx + FV.....	51
TABLA 8. Número de probetas a cortante para Onyx, PET FC y PA FC.	51
TABLA 9. Número de probetas a compresión para Onyx + FV.	53
TABLA 10. Número de probetas a compresión para Onyx, PET FC y PA FC.....	53
TABLA 11. Propiedades probetas TPO.	98
TABLA 12. Propiedades probetas TDCO.	99
TABLA 13. Propiedades probetas TVO.....	100
TABLA 14. Propiedades probetas TPO0°FV.	101
TABLA 15. Propiedades probetas TPO45°FV.	102
TABLA 16. Propiedades probetas TPPET.....	103
TABLA 17. Propiedades probetas TDCPET.....	104
TABLA 18. Propiedades probetas TVPET.	105
TABLA 19. Propiedades probetas TPPA.	106
TABLA 20. Propiedades probetas TDCPA.	107
TABLA 21. Propiedades probetas TVPA.....	108
TABLA 22. Propiedades probetas CORPO.	109
TABLA 23. Propiedades probetas CORDCO.	110
TABLA 24. Propiedades probetas CORVO.....	111
TABLA 25. Propiedades probetas CORPO0°FV.....	112
TABLA 26. Propiedades probetas CORPO45°FV.	113
TABLA 27. Propiedades probetas CORPPET.....	114
TABLA 28. Propiedades probetas CORDCPET.....	115
TABLA 29. Propiedades probetas CORVPET.....	116
TABLA 30. Propiedades probetas CORPPA.	117
TABLA 31. Propiedades probetas CORDCPA.	118
TABLA 32. Propiedades probetas CORVPA.....	119
TABLA 33. Propiedades probetas COMPO.....	120
TABLA 34. Propiedades probetas COMDCO.....	121
TABLA 35. Propiedades probetas COMVO.....	122
TABLA 36. Propiedades probetas COMPO0°FV.	123
TABLA 37. Propiedades probetas COMPO45°FV.	124
TABLA 38. Propiedades probetas COMPPET.....	125
TABLA 39. Propiedades probetas COMDCPET.....	126
TABLA 40. Propiedades probetas COMVPET.	127
TABLA 41. Propiedades probetas COMPPA.....	128
TABLA 42. Propiedades probetas COMDCPA.....	129
TABLA 43. Propiedades probetas COMVPA.....	130
TABLA 44. Valores fijos ecuaciones segundo orden de las probetas TPO0°FV.	141

RESUMEN

En el presente trabajo final de grado se estudiarán las propiedades mecánicas de una serie de materiales reforzados con fibra obtenidos a partir de la impresión 3D. Los materiales reforzados con fibra están conformados por un material base y fibra, la cual puede estar insertada por micropartículas o de forma continua.

Para ello se realizará una caracterización mecánica detallada de este tipo de materiales, entre ellos se han escogido el onyx y el onyx con fibra de vidrio continua, comercializados por Markforged, y el PET y la poliamida con microfibra de carbono en ambos, comercializados por Smartmaterials3D.

La caracterización mecánica debe seguir una serie de normas según las propiedades que se deseen estudiar. La norma ASTM D3039 para los ensayos a tracción, la norma ASTM D5379 para los ensayos a cortante y la UNE EN ISO 604 para los ensayos a compresión. Las normas establecen unas determinadas dimensiones para las probetas a emplear en los ensayos, estas probetas se obtienen a partir de la impresión 3D. Tanto el onyx y el onyx con fibra de vidrio son obtenidos a partir de la propia impresora de Markforged, la cual se encuentra en el departamento de fabricación de la Universidad de Jaén. Con respecto a las probetas de Smartmaterials3D, estas fueron obtenidas en su mayoría en los departamentos de la propia empresa con la impresora Ultimaker S5, mientras que una pequeña parte fue obtenida en una misma impresora en el departamento de fabricación de la universidad de Jaén.

Para obtener un estudio completo de los materiales se obtienen las deformaciones a partir de la correlación digital de imágenes, una herramienta bastante novedosa, la cual trabaja con fotografías del ensayo.

El objetivo principal del presente trabajo es la caracterización mecánica de nuevos materiales reforzados con fibra obtenidos a partir de la impresión 3D, profundizar en la impresión 3D, conocer la herramienta de correlación digital de imágenes y aprender el proceso llevado a cabo para la realización de un programa experimental.

ABSTRACT

In this final project, the mechanical properties of some reinforced-with-fiber materials obtained from 3D printing will be studied. These materials are composed by a main material and fiber. This fiber can be introduced by microparticles or continuously.

For that, a detailed mechanical characterization of this type of materials will be made. Among all the materials, we have selected Onyx and Onyx with continuous glass fiber, both commercialized by Markforged, and PET and polyamide with micro carbon fiber inside both materials. Both of them are commercialized by Smartmaterials3D.

The mechanical characterization must follow some rules according to the properties studied. The rule ASTM D3039 for the tensile tests, the rule ASTM D5379 for the shear tests and the rule UNE EN ISO 604 for the compression tests. The rules establish some specific dimensions for the test tubes which need to be used. These test tubes are obtained from 3D printing. The materials Onyx and Onyx with glass fiber are obtained from the Markforged printer directly, which can be found in the manufacturing department from University of Jaén. With respect to the Smartmaterials3D test tubes, they were manufactured with the Ultimaker S5 printer, while a small part was manufactured in a similar printer in the department mentioned above from University of Jaén.

In order to do a complete research of the materials, the deformations from a digital-image correlation are obtained. This tool belongs to cutting-edge technology and it can process test photographs.

The main objective of this project is to mechanically characterize new reinforced-with-fiber materials, which are obtained from 3D printing. We also pursue the target of having a deep insight in 3D printing and getting to know the digital image correlation tool. The last objective would be to learn about the process carried out so as to create an experimental program.

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D cada vez es una tecnología más consolidada en el mundo de la industria y de la investigación, y poco a poco está marcando el paso a la industria 4.0. Existen diferentes variantes de la impresión 3D debido a sus procesos de producción de materiales, en este estudio se utilizará la deposición fundida del material, comúnmente conocida como FDM, la cual es la rama de impresión 3D más utilizada en el mundo debido a su bajo coste de producción y su sencilla utilización.

El principal problema de los materiales obtenidos a partir de la impresión 3D, son sus bajas propiedades mecánicas, por lo que a lo largo de la historia se han realizado distintas investigaciones en las cuales se introducían fibra de distintas maneras para obtener unas mejores propiedades. Se investigó con la inserción de fibra picada en un material base con la cual se obtenía una mejor adhesión del material y por consiguiente una mejor resistencia estructural. Además de la fibra picada se investigó con la adición de fibra continua, la cual se insertaba en forma de malla y con distintas composiciones, la cual también provoca un aumento de las propiedades, pero se producción concentradores de tensiones.

El principal objetivo por lo que aparecieron los materiales reforzados con fibra fue la mejora sustancial de las propiedades de los polímeros básicos para impresión 3D. Un hecho interesante para investigar, por lo que dicho trabajo se centra en la caracterización mecánica de una serie de materiales reforzados con fibra comercializados en la actualidad por diferentes empresas.

El proceso de selección de material fue complicado pues el catálogo de materiales reforzados con fibra para la impresión 3D en el mundo es bastante reducido, si a este hecho le sumamos las limitaciones que se tiene en la universidad, se obtuvo por estudiar los siguientes materiales: el onyx, el onyx más fibra de vidrio continua, el PET con microfibra de carbono y la poliamida con microfibra de carbono. Los dos primeros son comercializados por Markforged, una empresa estadounidense, la cual es una de las empresas más grandes a nivel mundial en el sector de la investigación de nuevos materiales. Con respecto a los dos materiales restantes, son materiales creados y comercializados por Smartmaterials3D, una empresa localizada en Alcalá la Real, la cual se ha convertido en los últimos años en una de las empresas más grandes de Europa en el sector de la fabricación de filamentos para impresión 3D. Destacar que el onyx es un material conformado por nylon y microfibra de

carbono, por lo que el compuesto de onyx más fibra de vidrio continua, tendrá la combinación de dos modelos diferentes de inserción de fibra.

El objetivo de una caracterización mecánica en un material es la obtención de sus propiedades en distintas direcciones, planos de corte, etc. En este estudio se decidió estudiar, la matriz de tensiones, por lo que se ha tenido que realizar tanto ensayos a tracción, como a cortante en las distintas direcciones y planos de corte respectivamente. Adicionalmente, se decidió realizar ensayos a compresión en las distintas direcciones del material para obtener un mayor estudio de las propiedades.

Para la realización de los ensayos se necesitan seguir unas determinadas normas, para el ensayo a tracción se realizó con respecto a la norma americana ASTM D3039, para el ensayo a cortante se decidió utilizar la norma ASTM D5379, y para los ensayos a compresión se utilizó la norma española UNE EN ISO 604. Para los ensayos de tracción y de cortante se decidió utilizar estas normas americanas debido a que las recomendaba la empresa Markforged. En el caso de la norma a compresión, se decidió elegir esta pues es la más utilizada en los ensayos a compresión.

Todas las normas nos indican que las deformaciones se deben obtener a partir de un extensómetro físico, pero en esta investigación se decidió utilizar la herramienta de correlación digital de imágenes. Una herramienta con una gran precisión de obtención de datos y comúnmente conocida como DIC, esta funciona a partir de fotografías, las cuales son obtenidas durante el ensayo. El software DIC posee una serie de algoritmos que calcula los desplazamientos y las deformaciones de las piezas o probetas, en nuestro caso, a través de las fotografías captadas.

Una vez realizados los ensayos y obtenidas las deformaciones se estudian todas las probetas de cada uno de los materiales, de esta manera se obtienen las curvas tensión-deformación, las tensiones máximas con sus respectivas deformaciones y los límites elásticos para cada tipo de ensayo. En el caso de los ensayos a tracción también se obtendrán los coeficientes de Poisson. De esta manera se consigue obtener una gran cantidad de información con respecto a las propiedades de los materiales escogidos.

Tras obtener las propiedades de todos los materiales se realiza una comparación entre ellos y otros materiales comúnmente utilizados en la industria, llegando a una serie de conclusiones bastante interesantes, de las cuales se pueden realizar nuevos trabajos futuros.

2. ESTADO DEL ARTE

Todo Trabajo Fin de Grado relacionado con la investigación debería comenzar con un estudio exhaustivo de la historia del ámbito que se va a estudiar, de esta manera se puede conseguir tener una gran base de conocimientos y ventajas con las cuales podemos realizar el proyecto con una mayor eficacia y exactitud. Por ello mismo a continuación describiremos que es, como surgió, que implementaciones tiene y en que aplicaremos la impresión 3D, así como el significado de la caracterización mecánica y los materiales reforzados con fibra.

2.1. ¿Qué es la impresión 3D?

La impresión 3D es el nombre comúnmente conocido en el mundo, pero ¿en qué se basa esta tecnología tan innovadora que ha tenido un gran salto en la industria en estos diez últimos años? Pues bien, a continuación, describiremos que es y en que se basa la impresión 3D.

Esta innovadora tecnología se basa principalmente en la fabricación aditiva, esta última hace referencia a todas las técnicas de fabricación mediante adición de material por capas con la finalidad de obtener nuevas piezas complejas y duraderas, pero como podemos observar no son exactamente lo mismo, ya que la impresión 3D pretende obtener materiales ya terminados lo más rápidamente posible mediante unos determinados procesos aditivos. Con esta breve explicación podemos deducir que la impresión 3D es una rama de la fabricación aditiva.

Ahora centrándonos en la impresión 3D, explicaremos en profundidad su funcionamiento para así tener un mayor conocimiento de lo que es esta tecnología. Como hemos comentado anteriormente, esta ciencia se basa en la fabricación aditiva pero también necesita estar relacionada con la fabricación digital, ya que sin esta última no existiría el concepto de impresión 3D.

2.1.1. Fabricación Digital

La fabricación digital es una tecnología que poco a poco se está introduciendo en nuestras vidas, es un concepto que abarca desde la digitalización de los objetos reales hasta el movimiento conocido como DIY¹. Es un campo que pretende que cualquier persona sin unos conocimientos previos pueda diseñar digitalmente su propio prototipo, así como poder transferirlo a la sociedad e implementarlo en las vidas de las personas.

¹ DIY (*Do it yourself*) → *Hágalo usted mismo*

Este campo tecnológico es creado mediante la combinación de distintos sistemas y tecnologías, a continuación, explicaremos los cuatro principales:

- **Sistemas Integrados:** como bien indica su nombre son sistemas integrados en cualquier tipo de máquina con la finalidad de recibir unas determinadas señales, las cuales pueden recibirse en determinados estados, y comprenderlas para así poder realizar otros tipos de acciones en esa misma máquina o en cualquier otra. Para entender con una mayor exactitud este concepto, resaltamos una serie de ejemplos:
 - El control de mando de una fábrica de producción de envases de plástico es claramente un sistema integrado, ya que con este podemos ir controlando todas las partes y procesos de producción, así como detectar y solucionar problemas que surjan. Cuando deja de funcionar una determinada máquina, se enviará una señal al control de mando para que este la interprete y la comunique al operario indicando el fallo y donde se ubica.
 - Otro ejemplo muy cotidiano en nuestras vidas sería los propios microondas. Cuando lo encendemos y programamos unos determinados datos, el sistema integrado del microondas lo recibe y los transforma de manera que podamos obtener lo que queríamos.

Una vez entendido el concepto de un sistema integrado, este se puede aplicar a diferentes ámbitos como a la gestión de la calidad, del medioambiente, de seguridad y salud laboral, así como en muchas otras ramas.

- **Sistemas CNC** (*Computer Numeric Control – Control Numérico Computarizado*): Es un sistema de fabricación automatizada por medio de una serie de programas en los cuales parametrizamos determinadas características, como el encendido, el cambio de materiales, el tiempo, la trayectoria o la parada, así como también podemos integrar y cambiar distintas herramientas en un mismo proceso. Todo este proceso se basa en la programación, es decir, en el control numérico y es de una gran importancia que todo operario que intervenga en este, conozca en profundidad este campo.

El control numérico es una secuencia ordenada de instrucciones, con las cuales la máquina puede realizar las tareas encomendadas según lo programado por el operario. Para poder parametrizar dichos datos hay que introducir una información base tal como las dimensiones de las piezas, así como la información necesaria para el funcionamiento de la máquina.

La escritura de estos programas tiene un lenguaje alfanumérico la cual se introduce siguiendo unas determinadas pautas. Todo este conjunto constituye lo que es la ‘programación’, la cual se puede ser: programación estructural y programación abierta.

- **Programación estructural** → Esta se basa en una estructura, más o menos, cerrada en forma tabular para comunicar los datos al control. No es la más utilizada actualmente.
- **Programación abierta** → Es la más utilizada en la programación de control numérico. Se basa en una escritura lineal de los programas, sin una estructura fija e independiente de la posición de los datos. Esta misma se puede dividir en tres categorías que se basan en el modo de empleo: La programación **estándar** (la más utilizada y se realiza mediante el ordenador con programas de simulación, requiere de un gran conocimiento de programación, así como de sus funciones y herramientas), **conversacional** (interacción entre el operario y la máquina, más intuitiva que las demás) y **mixta** (mezcla de las dos categorías anteriores, para funciones sencillas se puede realizar mediante programación conversacional, y para funciones más complejas se realiza manualmente).

```
N010 G90 G94 F180 S2000 T1.1 (SELECCIONAMOS LA HERRAMIENTA Y LOS PARÁMETROS DE CICLO Y RANURADO)
N020 M06 (FIJACIÓN DE LA HERRAMIENTA)
N030 G00 X0 Y0 Z2 M03
N040 G88 X0 Y0 Z2 I-10 J25 B3 C5 D1 H120 L1.5 (CICLO FIJO DE RANURADO)
N050 G80 (ANULACIÓN DE CICLOS FIJOS)
N060 G00 X0 Y0 Z2
N070 G01 Z-2
```

ILUSTRACIÓN 1. Ejemplo de programación abierta

- **Software CAD** (Computer Aided Design – Diseño Asistido por Computadora): Es un software programado para que nos ayude en la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño que queremos realizar. Este software tiene como objetivo aumentar la productividad de los diseñadores, para ello puede mejorar la comunicación entre la documentación que se utiliza al igual que puede crear una base de datos propia para la manufactura, de esta manera podemos mejorar las cualidades del propio diseñador.

CAD se divide en dos programas principales, uno de dibujo en 2D y otro de modelado 3D. Mientras que la primera rama que hemos comentado se dedica a la geometría y a los planos del diseño a realizar, en la segunda rama se introduce una tercera dimensión con la cual podemos obtener una recreación digital del diseño, en la cual podemos representar superficies y sólidos.

Gracias a este software podemos diseñar nuestro objeto, en nuestro caso probetas, el cual podemos implementar en otras máquinas para poder fabricarlo, como puede ser una impresora 3D. Por ello el diseño asistido por ordenador es una gran tecnología que nos facilita en gran medida el diseño y la fabricación de los productos que queremos realizar.

- **Internet:** prácticamente todas las personas en este mundo conocen o tienen contacto diario con el internet. El internet es un conjunto descentralizado de redes de comunicación interconectadas que componen una red lógica única de alcance mundial. De esta manera las personas pueden introducir en la red sus prototipos o diseños al alcance de todo el mundo para diferentes fines. Internet nos facilita el alcance de conocimientos que podemos obtener, así como la comunicación con diferentes personas, entidades, empresas, organizaciones, etc. De esta manera al realizar cualquier trabajo, internet es una herramienta que nos facilita la obtención de información por cualquier medio, al igual que nos ayuda a ser más eficaces y veloces en nuestros procesos.

Por ello mismo, cuando realizamos un diseño que puede ser de gran utilidad para las vidas de las personas podemos comercializarlo o enviarlo sin un fin monetario a internet para que el resto de las personas puedan obtenerlo e implementarlo en sus vidas. Claro queda que todo este proceso se basa en una red digital.

Una vez estudiadas las cuatro principales ramas que conforman la fabricación digital podemos deducir que es una herramienta que nos ayuda a diseñar, programar y comunicarnos con diferentes entornos por medio de la computadora. Esta herramienta no es solo de aplicación a la impresión 3D, sino que también es de gran utilidad en otros procesos de fabricación como pueden ser el fresado, el torneado, la cortadora láser, etc.

2.1.2. Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva es un concepto que clasifica a una gran variedad de tecnologías basadas en la deposición de material sobre una superficie para poder obtener algún objeto, pieza² o prototipo³ físico en 3D. Estos tipos de tecnologías no son solo de gran implementación en la ingeniería, sino que también podemos observarla en otras áreas como la

² Significado de Pieza según norma UNE EN ISO/ASTM 52900:2017 → Material unido que forma un elemento funcional que puede constituir todo o una parte de un producto previsto.

³ Significado de Prototipo según norma UNE EN ISO/ASTM 52900:2017 → Representación física de todos o de un componente de un producto que, aunque con alguna limitación, puede ser utilizado para el análisis, diseño y evaluación.

medina, la educación, la arquitectura, los juguetes o el ocio. Dependiendo de las características de las piezas a desarrollar tendremos que aplicar unos determinados procesos y materiales, los cuales van a tener influencia en el coste y tiempo de producción de la pieza. Por ello es muy importante tener un gran conocimiento de la pieza a desarrollar y así poder elegir el proceso y material que más se adecue.

La fabricación aditiva pretende obtener piezas u objetos físicos sin tener que desperdiciar material alguno, como podría ocurrir en otros procesos de fabricación tales como el fresado o el torneado, al igual que sería innecesario la fabricación de herramientas para etapas intermedias. Razones por las cuales la fabricación aditiva tiene tanta importancia en las últimas décadas en la industria ingenieril.

La fabricación aditiva se puede clasificar en dos grandes ramas dependiendo de la cadena que sigue el proceso de fabricación:

- **Procesos de una sola etapa:** obtenemos la geometría y las propiedades básicas del producto deseado en una sola operación.
- **Procesos de varias etapas:** en un primer procesado obtenemos la forma geométrica de la pieza y en una segunda etapa podemos obtener las propiedades básicas que deseamos.

También se puede clasificar dependiendo del funcionamiento de las máquinas que se utilicen:

2.1.2.1. Fotopolimerización en tanque o cuba

La fotopolimerización es conocida por ser la tecnología de impresión 3D más antigua. Esta se basa en el curado de un fotopolímero líquido en un tanque o cuba mediante la polimerización activada por la luz. En la actualidad existen dos procesos que utilizan esta tecnología:

- **Estereolitografía (SLA):** Se considera la primera tecnología de fabricación aditiva, llegando a ser comercializada por 3D Systems en 1986. Su proceso de fabricación se basa en la incidencia de un haz de luz ultravioleta sobre la superficie de un tanque relleno de fotopolímero líquido. Los rayos de luz crean un patrón en la superficie del líquido, el cual se solidifica mediante la fotopolimerización creando así una capa de la pieza a construir. Una vez realizada la capa, desciende a un baño de polímero líquido y se repite el proceso las veces que sea necesario para poder obtener nuestra pieza. Una

vez finalizada la pieza por completo se procede a un baño químico para retirar el exceso de resina, y posteriormente, se cura en un horno de luz ultravioleta o térmico.

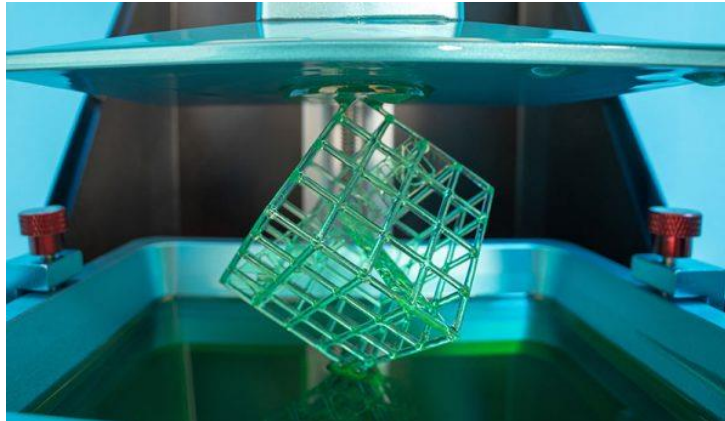


ILUSTRACIÓN 2. Pieza realizada por estereolitografía

- **Procesamiento Digital por Luz (DLP):** Esta tecnología se utiliza en gran parte en la industria de la joyería debido a su gran calidad de acabado y en poder crear geometrías realmente complejas y difíciles. Su proceso de fabricación es prácticamente el mismo que se utiliza en la estereolitografía, pero se diferencian en método de curado de las capas. Mientras que la estereolitografía utiliza un haz de luces por el cual consigue la fotopolimerización, el DLP utiliza un proyector con el cual crea una imagen digital y puede realizar la pieza en una sola capa de proyección, esto se debe a que solo cura las capas proyectadas dejando las áreas circundantes sin curar. Con esta breve explicación podemos deducir que el DLP es un proceso más rápido que el SLA.

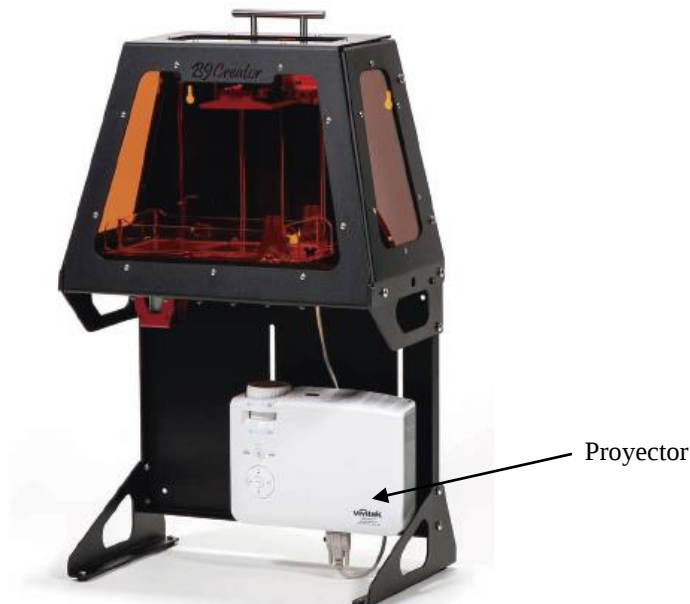


ILUSTRACIÓN 3. Impresora 3D DLP B9-Creator

2.1.2.2. Proyección de material (Polyjet)

Esta tecnología se basa en la deposición selectiva de gotas sobre una superficie de algún fotopolímero líquido o cera fundida, los cuales pueden ir con o sin relleno. Estas gotas se unen formando capas y estas a la vez construyendo la pieza. Esta adherencia se debe a una reacción química provocada por una fuente de radiación luminosa (luz UV) o por la solidificación del material fundido. La ventaja de esta tecnología es la gran variedad de fotopolímeros que se pueden llegar a utilizar en una misma pieza, pues se puede intercambiar distintos materiales en un mismo proceso, al igual que se puede tener varios materiales distintos al mismo tiempo. Esto nos proporciona una gran velocidad de fabricación y un gran abanico de posibilidades.



ILUSTRACIÓN 4. Fabricación de pieza mediante tecnología Polyjet

Para un mayor entendimiento de esta tecnología, a continuación, se muestra un esquema orientativo del proceso que realiza:

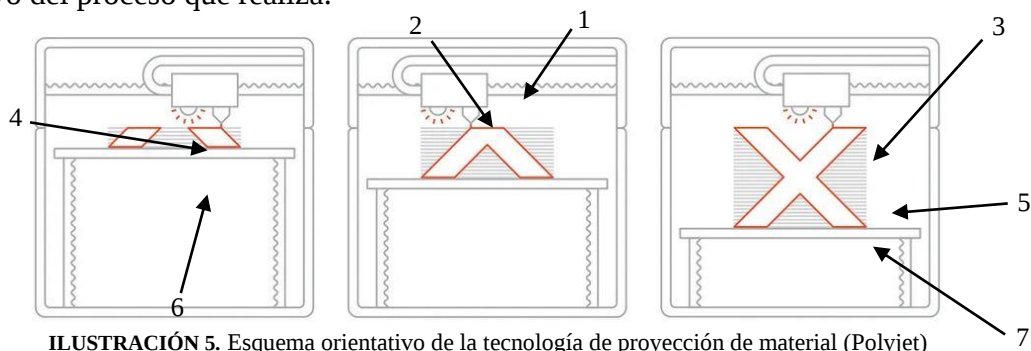


ILUSTRACIÓN 5. Esquema orientativo de la tecnología de proyección de material (Polyjet)

1. Sistema de suministro del material de fabricación.
2. Dispensador del material.
3. Gotas del material de fabricación.
4. Fuente de radiación luminosa o térmica.
5. Estructura de soporte.
6. Plataforma de fabricación y elevador.

7. Producto final.

2.1.2.3. Proyección de aglutinante

La proyección de aglutinante es también conocida como Binder Jetting, esta tecnología se basa en la pulverización de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo, el cual se solidifica al entrar en contacto el aglutinante. Los materiales que se suelen utilizar para este proceso de fabricación suelen ser yeso, arena, cerámicas, metales y polímeros en gránulos. La cerámica es lo más utilizado en este proceso ya que se puede trabajar con todos los materiales pertenecientes a este campo, aun teniendo que realizar algunos procesos posteriores para poder tener un resultado mejor.

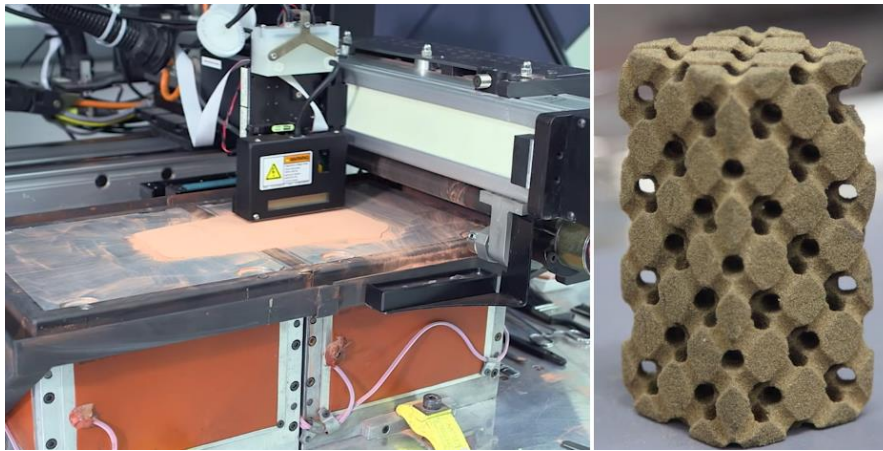


ILUSTRACIÓN 6. Pieza obtenida mediante proyección de aglutinante

2.1.2.4. Fusión lecho de polvo

La fusión lecho de polvo se basa en la fundición de sucesivas capas de material en polvo mediante una determinada fuente de energía. Lo más destacado de esta tecnología comparada con las demás es que puede conseguir aleaciones metálicas de titanio o níquel, a la vez que puede obtener piezas con una estructura interna muy consistente, consiguiendo en algunos casos una mayor resistencia a la que se podría obtener mediante los procesos de fabricación tradicionales. Debido a que es una tecnología que permite trabajar con titanio o níquel es de gran aplicación en el sector aeroespacial.

Dependiendo de la fuente de energía utilizada para fundir el material se puede clasificar en tres ramas:

- **Fusión por haz de electrones (EBM - Electron Beam Melting):** El polvo metálico es depositado en una cámara de vacío con una temperatura alrededor de los 700°C para ser fundido por un haz de electrones.

- **Sinterización directa por láser de metal (DMLS - Direct metal laser sintering):**
El polvo metálico se encuentra depositado en una cámara inerte donde es fundido mediante un láser, formando capa por capa la geometría de la pieza.
- **Sinterización selectiva por láser (SLS - Selective laser sintering):** El polvo metálico se deposita en una cámara previamente calentada a una temperatura algo menor a la de fusión del material. Seguidamente se aplica sobre el polvo un láser de alta potencia que lo sinteriza, formando así la geometría deseada.

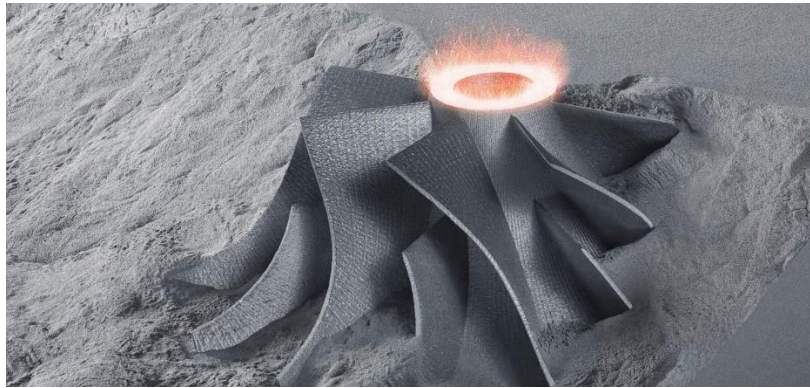


ILUSTRACIÓN 7. Fabricación de pieza mediante DMLS

2.1.2.5. Extrusión de material

La fabricación aditiva mediante extrusión de material es también conocida comúnmente como FDM (Fused Deposition Modeling). Es una de las tecnologías más aplicadas en el mundo tanto en la industria como en los particulares, esto se debe gracias a la obtención de una gran calidad en el producto, así como su bajo coste de producción, lo que la hace bastante atractiva en aquellas personas que quieren introducirse en este ámbito.

El proceso de fabricación se basa principalmente en obtener piezas capa a capa mediante plástico fundido, ya que el material más utilizado mediante esta tecnología es el plástico. Su funcionamiento comienza activando un servomotor el cual provoca el desplazamiento de un hilo de plástico mediante unos rodillos. Este hilo de plástico es introducido a una cámara calefactora en forma cilíndrica lo suficientemente larga para producir la completa plastificación y fusión del material. Una vez plastificado el hilo se introduce en un cabezal extrusor que puede desplazarse en diferentes direcciones para poder depositar el material sobre una superficie y de esta manera se fabrica la pieza programada, destacando que el plástico se solidifica al mismo tiempo que se deposita. Dependiendo del cabezal extrusor que coloquemos podremos obtener una mayor calidad y precisión en la pieza, por ello es muy importante conocer la máquina que estemos utilizando, así como la pieza a fabricar.

Como ocurre en otras tecnologías de fabricación aditiva en algunos casos tendremos que fabricar piezas con determinados voladizos, para los cuales habrá que generar unos soportes que permitan mantener la geometría de la pieza. Estos soportes serán eliminados posteriormente para obtener la pieza final. Dependiendo del material que utilicemos para los soportes, ya que poseen un cabezal extrusor específico, podremos eliminarlos con cierta facilidad o mediante con agua a presión, este último se destaca para los soportes que se encuentran en el interior de las piezas o en zonas más complejas para su eliminación.

Un inconveniente de esta tecnología se debe al porcentaje de densificación de la pieza. Al construir una pieza de estructura laminada mediante solapamiento de capas el material que se deposita sobre la superficie de trabajo se encuentra en un estado semisólido para poder unirse mediante uniones intermoleculares al material que ya se encuentra depositado, esto provoca que la pieza no se encuentre totalmente densa. Este proceso provoca ciertas cavidades entre filamentos lo que conlleva a unas peores propiedades mecánicas en determinadas direcciones. Se ha comprobado a lo largo de los años que en las piezas con estructura laminada tienen una mayor resistencia en la dirección constructiva transversal, esto provoca que tengamos en cuenta la dirección que en la que se va a fabricar la pieza.

También habrá que tener en cuenta las condiciones ambientales en las que se fabrica la pieza, ya que dependiendo del material que se utiliza deberá de encontrarse a unas determinadas temperaturas para poder conseguir una unión intermolecular eficaz.

Los materiales que más se utilizan en esta tecnología son el PLA (ácido poliláctico) debido a su gran facilidad de impresión en comparación con los demás, y el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) debido a que es un plástico muy resistente al impacto. El primero de ellos se centra en un público más doméstico, en aquellas personas que quieren iniciar en este campo, mientras que el ABS se encuentra más en el sector de la automoción y en otros usos de la industria. También cabe destacar que se pueden utilizar muchos otros materiales como pueden ser el PET (Tereftalato de polietileno), PS (Poliestireno), ASA (Acrilonitrilo estireno acrilato), PVA (Alcohol polivinílico), nylon, y muchos filamentos compuestos basados en metal, madera o piedra. Si reemplazamos el cabezal extrusor de una impresora 3D basada en FDM por un sistema de jeringa, es posible crear piezas de cerámica, arcilla o materiales alimenticios.

Gracias a su gran abanico de materiales, así como sus prestaciones a un coste bastante asequible, provoca que esta tecnología se utilice en bastantes campos, tanto de la industria como de particulares.



ILUSTRACIÓN 8. Pieza obtenida mediante FDM

2.1.2.6. Deposición de energía focalizada

La deposición de energía focalizada es una tecnología basada en la unión entre la extrusión de material y la fusión de lecho de polvo. Esto se debe a que su funcionamiento se basa en la fundición del material en forma de polvo o alambre al mismo tiempo que se deposita en una boquilla.

Para conseguir fundir el material se suele utilizar un láser o un haz de electrones. En el caso de este último se tendrá que trabajar en una cámara de vacío para evitar que los electrones interactúen con las moléculas del aire. Los sistemas basados en láser requieren una cámara completamente cerrada si se trabaja con metales reactivos, lo que requiere una cantidad significativa de gas y tiempo para conseguir los niveles de oxígeno deseados.

Como podemos comprobar esta tecnología de fabricación aditiva es una de las más complejas de utilizar, por lo que se suele utilizar para reparaciones o para agregar material a piezas ya existentes. Puede utilizarse para la fabricación de piezas enteras, pero su uso principal se encuentra enfocado en la reparación de turbinas o hélices.

Esta tecnología se suele utilizar con metales, en forma de polvo o alambre, pero también es posible utilizarse con polímeros y materiales cerámicos, aunque es menos común.



ILUSTRACIÓN 9. Deposición de energía focalizada

2.1.2.7. Laminado de hojas

El laminado de hojas es una de las tecnologías de fabricación aditiva que no necesita de altas temperaturas ni de cámaras de vacío para su funcionamiento. Su proceso se basa en la unión de finas hojas de material para posteriormente cortarlas con la forma de la pieza mediante algún dispositivo de corte como puede ser una fresadora o un láser. Esta tecnología se puede clasificar en dos procesos:

- **Consolidación por ultrasonidos (UC – Ultrasonic consolidation):** Esta tecnología se basa en la soldadura ultrasónica de láminas metálicas, es decir, se utiliza vibraciones ultrasónicas a una serie de hojas metálicas bajo presión para crear una soldadura de estado sólida. Para el recorte de la pieza se utiliza una fresadora CNC. Gracias a que esta tecnología se realiza a temperatura ambiente podemos introducir dentro de la pieza cables o componentes electrónicos, lo que es un factor importante a tener en cuenta.



ILUSTRACIÓN 10. Fresadora CNC para recorte de pieza mediante UC

- **Fabricación mediante laminado de objetos (LOM – Laminated object manufacturing):** Esta tecnología se basa en la unión de las hojas de material mediante un adhesivo, el cual hace efecto cuando se le aplica un rodillo caliente a las hojas. Los

materiales que se pueden utilizar pueden ser tanto papel, plástico o metal. Para el recorte de la pieza se utiliza un láser. A diferencia de la UC, esta tecnología abarca un mayor abanico de materiales, pero consigue un peor acabado.

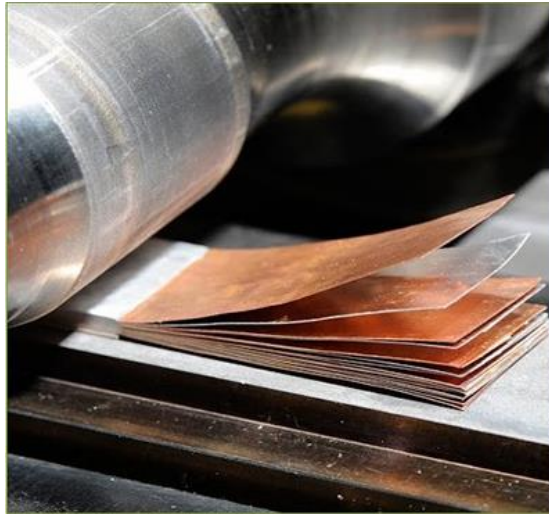


ILUSTRACIÓN 11. Rodillo uniendo láminas de material (LOM)

2.1.3. Síntesis conceptos de la Impresión 3D

Una vez explicadas las dos ramas que componen la impresión 3D (Fabricación digital y Fabricación aditiva) podemos realizar un breve resumen de su funcionamiento. En primer lugar, debemos realizar mediante algún software CAD un diseño previo, el cual podemos realizarle determinados análisis mecánicos, cinemáticos o dinámicos, para así poder obtener una primera visión de su comportamiento frente a determinadas acciones. Una vez obtenido el diseño CAD definitivo para nuestra pieza debemos aplicarlo a algún software CNC compatible con nuestra impresora 3D, mediante el cual podremos programarlo de manera que se fabrique el ítem en una determinada dirección, velocidad, tiempo y con los materiales que seleccionemos.

Para obtener un resultado excelente, tanto en calidad de fabricación como de propiedades mecánicas e impacto en la sociedad, tendremos que poseer un gran conocimiento de todas las tecnologías que hemos comentado anteriormente, lo cual va a depender siempre de la motivación y trabajo que realice la persona o equipo encargada.

2.2. Evolución tecnológica de la Impresión 3D

La aparición del concepto de impresión 3D es muy debatido ya que un gran colectivo asegura que dicha tecnología no fue creada por Charles W. Hull⁴ (referente principal de la Impresión 3D) si no por el equipo francés conformado por, Alain Le Méhauté, Oliver de Witte and Jean Claude André, los cuales intentaron patentar la estereolitografía⁵ (SLA) semanas antes que Chuck Hull lo hiciera. Este proceso de patente por parte del equipo francés fue cancelado debido a una falta de visión ya que no creían en el potencial comercial que podía provocar esta tecnología, por lo que dejaron el campo abierto a Hull.

En 1983, Chuck Hull estuvo trabajando en una empresa desarrollando recubrimientos de madera, lo cual le permitió idear un proceso mediante el cual podía curar y endurecer un recubrimiento protector de resina aplicado a la madera mediante luz ultravioleta, este proceso lo nombró como “estereolitografía”.

Pero no fue hasta 1986 cuando consiguió la patente de dicha tecnología y fundar la empresa 3D Systems, una de las empresas más grandes e importantes en la actualidad en el sector de la impresión 3D. El concepto que definió a la estereolitografía es el mismo que se ha explicado anteriormente en el apartado 2.1.2.1.

Chuck Hull conocía perfectamente que esta tecnología no se iba a implementar fácilmente en la industria, por lo que en los primeros años de la empresa tuvieron que conformarse con pequeños videos que visualizaban el funcionamiento de dicha tecnología para poder comercializarla. Fueron la industria automovilística y la industria aeronáutica las primeras en mostrar interés en dicho campo, ya que les permitía crear diseños y prototipos en cuestión de días y no meses.

La tecnología que Hull había inventado fue complementada con su propio formato y extensión de archivo informático, conocido como STL⁶. Este formato de representación describe únicamente la superficie de un objeto tridimensional, por lo que no puede soportar otros muchos atributos comunes al diseño CAD como pueden ser el color, las texturas, densidades, etc.

⁴ Charles W. Hull conocido como Chuck Hull → Nacido en Clifton, Colorado el 12 de mayo de 1939, es el cofundador, vicepresidente ejecutivo y director tecnológico de 3D Systems.

⁵ Estereolitografía (SLA) → Proceso de fabricación aditiva; ver apartado 2.1.2.1. Fotopolimerización en tanque o cuba

⁶ STL (Standard Tessellation Language) → Formato implementado en todas las tecnologías de impresión 3D.



ILUSTRACIÓN 12. Primera impresora 3D de la historia diseñada por Chuck Hull

Pocos años después, en 1989, Scott Crump ideó y patentó una nueva tecnología de fabricación aditiva llamada FDM⁷ basada en la extrusión de un fino hilo de plástico fundido. Esta idea surgió de la necesidad de Scott en crear un juguete para su hija con una pistola de cola caliente. Esta herramienta utiliza barras cilíndricas de termoplástico que se funden mediante una resistencia eléctrica interna y se depositan por la boquilla del aparato con el fin de unir elementos.

Gracias a esta necesidad diseñó el concepto de FDM y cómo se puede comprobar una impresora 3D y una pistola de cola caliente tienen mucho en común, ya que si a una pistola de cola caliente la montáramos sobre unos ejes móviles y la dotamos de una superficie plana para depositar el termoplástico tendríamos los elementos básicos de una impresora 3D.

Como a Chuck Hull, los primeros años de Scott fueron bastante complicados, debido a un gran desembolso de dinero y un alto precio en las máquinas desarrolladas para la industria, lo que le hacía prácticamente inviable su comercialización. Pero a pesar de sus dificultades la empresa Stratasys (fundada por Scott) es una de las empresas más importantes del sector, además de llevar al FDM a ser la tecnología de fabricación aditiva más extendida del mundo.

Estas dos grandes tecnologías son las referentes a la aparición del concepto de impresión 3D, provocando que poco a poco surgieran los demás procesos de fabricación aditiva a lo largo de la década de los 90 y principios del siglo XXI. Estas tecnologías han ido

⁷ FDM (*Fused Deposition Modeling*) → *Modelo por deposición fundida*; ver apartado 2.1.2.5. *Extrusión de material*

obteniendo experiencia y perfeccionándose a lo largo de los años, buscando nuevas aplicaciones, así como nuevos materiales.

El punto álgido de la impresión 3D se dio cuando entró en juego la ‘comunidad maker’⁸ gracias al movimiento RepRap (**re**plicating **rap**id prototyper). Este movimiento pretendía mediante un software de código abierto la construcción de una impresora 3D autorreplicable, es decir, que sus propios componentes que la conformaban fuesen impresos en 3D.

El movimiento RepRap fue fundado en 2005 por Adrian Bowyer, y no fue hasta el 13 de noviembre de 2006 cuando se pudo obtener la primera pieza idéntica a una de las que formaban la impresora 3D. Poco después, el 9 de febrero de 2008 se consiguió imprimir un poco más de la mitad de las piezas, conociéndose así a esta impresora como la “Darwin”.

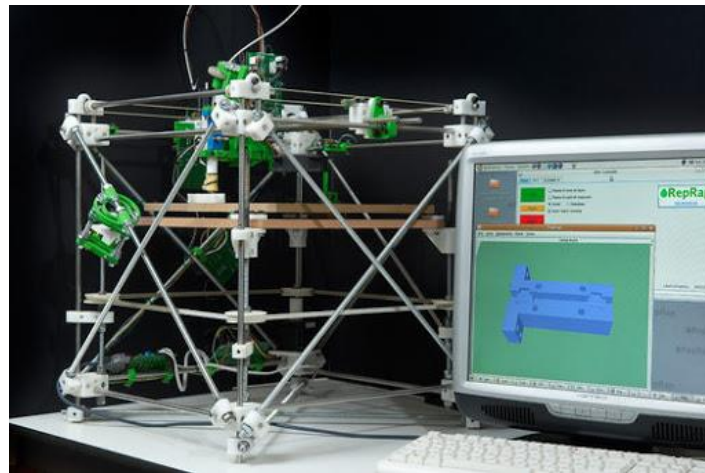


ILUSTRACIÓN 13. Impresora autorreplicable Darwin.

Estos movimientos provocaron la aparición en 2009 del código abierto DIY kits liderado por Makerbot Industries. Este código abierto pretendía que cualquier persona sin tener grandes habilidades pudiera fabricarse su propia impresora. Aprovechando las ganancias, Makerbot Industries crearon Thingiverse, un portal web donde todo el mundo puede poner a disposición de los demás sus ideas y diseños 3D, convirtiéndose así en la mayor plataforma de intercambio de archivos 3D.

Todos estos movimientos y avances tecnológicos han provocado que cada vez haya más personas y empresas introduciéndose en el mundo de la impresión 3D. No solo en el tema de la fabricación si no en el de la investigación, pues es aún un campo en el que todavía se pueden descubrir muchos avances, tanto en nuevos materiales como en aplicaciones en otros

⁸ La comunidad maker es conocida como una cultura o subcultura contemporánea que representa y promueve la idea del DIY (Do it Yourself - Hágalo usted mismo), la cual pretende que todo el mundo sea capaz de desarrollar cualquier actividad sin necesidad de apoyarse en un especialista.

sectores. Pues un claro ejemplo muy reciente es el provocado por la pandemia del COVID-19, surgiendo grandes investigadores y fabricantes prestando sus conocimientos a la sociedad para el enfrentamiento contra el virus. Grandes empresas, tanto públicas como privadas, han formado equipo con especialistas médicos para poder combatir el COVID-19 mediante la fabricación de EPIs (equipos de protección individual), así como el desarrollo de nuevos dispositivos destinados a preservar la salud de las personas.

2.3. Aplicaciones de la Impresión 3D

Grandes sectores de la industria llevan a cabo fuertes inversiones en el campo de la impresión 3D enfocándose en la investigación de nuevos materiales plásticos o compuestos con base polimérica. A continuación, se describe algunos de los sectores más importantes:

- **Sector Aeroespacial:** Actualmente ven a la impresión 3D poco madura para poder implementarla en procesos productivos a corto o medio plazo, pero si la utilizan en gran medida para la construcción de prototipos o pequeñas series de piezas sencillas de plástico. Cabe destacar que una gran parte de las industrias aeroespaciales utilizan la tecnología SLM⁹, con la cual les permiten fabricar estructuras reticulares o de celosía tanto con cubierta externa como sin ella. Estas estructuras les proporcionan un potencial enorme para conseguir un aligeramiento estructural y aplicarlas en la fabricación de componentes de instrumentación y motores de aviación reduciendo el volumen de material necesario.
- **Sector Automovilístico:** La automoción es uno de los primeros sectores que empezó a implementar las tecnologías de fabricación aditiva, y hoy en día se ha convertido en uno de los que más están aprovechando las ventajas que ofrecen estas tecnologías. Estas permiten reducir costes, tiempo y peso a la hora de producir piezas complejas. Además, la fabricación aditiva también permite una mayor personalización a nivel de diseño, ofreciendo de esta manera una mayor experiencia satisfactoria al usuario.
- **Sector Sanitario:** De todos los sectores profesionales, la medicina es la rama donde más aparecen unos innovadores de las tecnologías de impresión 3D, fabricándose en la actualidad desde prótesis y escayolas hasta huesos humanos. La impresión 3D pretende obtener nuevas formas de sustituir o ayudar a las estructuras biológicas existentes. Se considera que, dentro de unos años, la impresión 3D tendrá un papel fundamental en el desarrollo de la bioimpresión, procedimiento enfocado en el desarrollo de piel y tejidos mediante la extrusión de células vivas en lugar de materiales plásticos.

⁹ SLM (Selective Laser Melting) → *Fusión selectiva de láser, tecnología catalogada dentro de la fusión por lecho de polvo.*

- **Sector alimenticio:** Las máquinas cada vez están más presentes en las cocinas y la impresión 3D de alimentos podría formar parte de una nueva revolución. Esto se debe a que el objetivo de muchas personas o industrias es automatizar procesos e imaginar una nueva manera de consumir alimentos. La tecnología y los alimentos están dando forma a la industria alimenticia, desde métodos de envasado, al uso de conservante o técnicas de vanguardia como la gastronomía molecular.

2.4. Materiales reforzados con fibras

A lo largo de la historia de los polímeros obtenidos a partir de impresión 3D, se ha observado que la mayoría de ellos poseían un escaso rendimiento mecánico. Para solucionar este problema se han realizado una serie de investigaciones a lo largo de muchos años, en las cuales a dichos materiales se les añadían tanto en forma de partículas, de microfibra o en fibra continua distintos refuerzos como pueden ser la fibra de carbono, la fibra de vidrio o el kevlar [1]. De esta manera se conseguía mejorar sustancialmente la resistencia estructural de los compuestos tradicionales, formando lo que se conoce como polímeros reforzados con fibra.

Gracias a W. Zhong se pudo demostrar que la incorporación de fibra de vidrio picada en polímeros ABS provocaba una mejor adhesión entre capas, debido a los puentes que formaban las microfibras de vidrio entre dichas capas, esto provocaba que el polímero reforzado tuviera una mayor resistencia a la tracción. Al igual que W. Zhong, F. Ning también investigó los compuestos de ABS reforzados con microfibra de carbono, en los cuales aumentaban sustancialmente su resistencia a la tracción y a la rigidez.

Se ha demostrado que dicho aumento de las propiedades se daba a una menor separación entre capas, lo cual era provocado por un mayor contacto entre fibras de diferentes capas, por lo tanto, a mayor cantidad de fibra, mayor serían las propiedades. Aun así, existe un gran problema en los materiales reforzados con fibra, el cual es la porosidad (inclusiones de aire). Dicha porosidad se debe al contacto entre el material base y la propia fibra, a un menor contacto, existe una mayor porosidad y por lo tanto una menor resistencia. Para dicho problema se realizaron diferentes investigaciones como puede ser la adición de microesferas expansivas en lugar de fibra picada, consiguiendo de esta manera una menor porosidad y una mayor resistencia a la tracción, pero sin llegar nunca a un material totalmente sólido.

También se investigó la inclusión de fibra continua en el proceso de fabricación mediante dos extrusores, por uno se obtiene el material base y por el otro se obtiene la

estructura de fibra continua. A pesar de que este método conseguía unas resistencias mucho mayores a las del material base, se producía un concentrador de tensiones en las fibras de refuerzo.

Estos métodos, tanto el material base con fibra picada y el material base con fibra continua, los pone en práctica con sus impresoras la empresa Markforged. Obteniendo de esta manera una serie de materiales muy atractivos para su estudio. En esta presente investigación se estudiará el material base principal que comercializan, el “Onyx” (material compuesto por nylon y fibra de carbono picada), y este mismo material con fibra continua de fibra de vidrio. Por otro lado, se estudiarán dos materiales comercializados por la empresa Smartmaterials3D, los cuales cumplen el primer método explicado con anterioridad, la poliamida con fibra de carbono picada y el PET con fibra de carbono picada, unos materiales que son bastantes atractivos por sus propiedades y su bajo coste en comparación al Onyx.

3. OBJETIVOS Y MOTIVACIONES

La idea inicial del TFG era la caracterización mecánica de materiales reforzados con fibra continua, pero debido a la falta de impresoras 3D especializadas en la impresión con diferentes materiales y concretamente en fibra de vidrio y fibra de carbono, se tomó la decisión de estudiar el Onyx + Fibra de vidrio (único material fiel al objetivo inicial) y una serie de materiales plásticos compuestos con fibra de carbono picada, por lo que el objetivo principal del presente Trabajo Final de Grado es la realización de una caracterización mecánica de piezas obtenidas mediante impresión 3D a partir de materiales reforzados con fibra: Onyx, Onyx + Fibra de vidrio, Poliamida con fibra de carbono y PET con fibra de carbono, de los cuales los dos primeros son comercializados por Markforged, mientras que los dos últimos por Smartmaterials3D.

Como objetivo secundario se pretende estudiar el comportamiento de los materiales impresos según la dirección de fibra.

Dichos objetivos vienen influenciados por una serie de motivaciones personales:

- Aprender a diseñar y realizar programas experimentales completos de materiales obtenidos mediante impresión 3D basándome en la normativa existente.
- Introducirme en el mundo de la impresión 3D, así como todo aquello que le es de aplicación.
- Aprender nuevas técnicas para la obtención de resultados mecánicos, como la correlación digital de imágenes.
- Poner en práctica los conocimientos obtenidos durante el grado con respecto a las propiedades mecánicas.

4. DISEÑO DE PROGRAMAS EXPERIMENTALES

4.1. Objetivos

En este apartado se pretende realizar un esquema del programa experimental que se va a seguir para poder obtener los objetivos deseados que se han mencionado anteriormente.

4.2. Propiedades generales de los materiales empleados

4.2.1. Onyx

El Onyx es un material comercializado específicamente por Markforged, empresa fundada en 2013 en Massachusetts, la cual se especializa en la investigación e innovación de nuevos materiales, impresoras 3D y softwares, convirtiéndola en una de las empresas más grandes a nivel mundial en su sector.

El Onyx es un material compuesto principalmente por Nylon y microfibra de carbono (fibra picada), el cual tiene un acabado superficial excelente, además de una alta versatilidad mecánicamente, ofreciendo una alta resistencia, dureza y resistencia química cuando se imprime solo, sin ninguna adición de material de refuerzo.

Matriz Plástica	Test (ASTM)	ONYX
Módulo de Tensión (GPa)	D638	2.4
Tensión de fluencia (MPa)	D638	40
Tensión de rotura (MPa)	D638	37
Deformación en la rotura por tracción (%)	D638	25
Temperatura de deflexión térmica (°C)	D648 B	145
Resistencia a Impacto Izod (J/m)	D256-10A	330
Densidad (g/cm ³)	-	1.2

TABLA 1. Propiedades del ONYX aportadas por Markforged

4.2.2. Onyx + FV

El Onyx + FV es simplemente Onyx más la adición de fibra continua de fibra de vidrio, también comercializada por Markforged.

Markforged garantiza que dicho refuerzo, eleva sustancialmente todas las propiedades del Onyx, ofreciendo las siguientes propiedades solo para fibra de vidrio:

Matriz Plástica	Test (ASTM)	ONYX + FV
Módulo de Tensión (GPa)	D3039	21
Tensión a la tracción (MPa)	D3039	590
Deformación en la rotura por tracción (%)	D638	3.8
Módulo de compresión (MPa)	D6641	21
Resistencia a la compresión (MPa)	D6641	140
Deformación a la rotura por compresión (%)	D6641	-
Temperatura de deflexión térmica (°C)	D648 B	105
Resistencia a Impacto Izod (J/m)	D256-10A	2600
Densidad (g/cm ³)	-	1.5

TABLA 2. Propiedades de la fibra de vidrio aportadas por Markforged.

Cabe destacar que estos son los datos ofrecidos por Markforged únicamente para la fibra de vidrio, en esta investigación se pretende obtener las propiedades del Onyx con un refuerzo de fibra de vidrio, por lo que estos valores pueden encontrarse lejos de los obtenidos.

4.2.3. PET Fibra de carbono (PET FC)

El PET FC es un material conformado por una base de PET (tereftalato de polietileno) y microfibras de carbono, el cual es producido y comercializado por la empresa Smartmaterials3D. Cuya empresa fue fundada en 2014 en un pueblo de la provincia de Jaén con el objetivo de brindar soluciones innovadoras con respecto a los filamentos de la impresión 3D, tanto a nivel empresarial como particular. Llegando a convertirse hoy en día en la empresa líder en España y de las mayores empresas en el sector de la fabricación de filamentos para impresión 3D a nivel mundial.

Según indica el fabricante gracias a la adición de fibra de carbono en la base de PET, este consigue una gran resistencia tanto mecánica, como térmica y química, a la vez de que posee una baja absorción a la humedad y una buena estabilidad dimensional.

Matriz Plástica	Test (ISO)	PET FC
Módulo de Tensión (GPa)	527	9
Tensión a la tracción (MPa)	527	80
Alargamiento (%)	527	2.5
Resistencia a Impacto Charpy (kJ/m ²)	179 1eU	40
Densidad (g/cm ³)	-	1.4

TABLA 3. Propiedades del PET FC aportadas por Smartmaterials3D.

4.2.4. PA Fibra de carbono

El PA FC es un material al igual que el PET FC fabricado por Smartmaterials3D. A diferencia del PET FC este tiene una base de poliamida, la cual se combina con fibra de carbono picada. Según indica el fabricante la poliamida al combinarse con la fibra de carbono consigue una alta resistencia mecánica y un excelente rendimiento a altas temperaturas,

además de hacerla adecuada para aplicaciones conductoras y disipadoras, ya que la fibra de carbono le aporta a la poliamida conductividad eléctrica.

Matriz Plástica	Test (ISO)	PA FC
Módulo de Tensión (GPa)	527	15
Tensión a la tracción (MPa)	527	170
Alargamiento (%)	527	2
Resistencia a Impacto Charpy (kJ/m ²)	179 1eU	47
Densidad (g/cm ³)	-	1.25

TABLA 4. Propiedades del PA FC aportadas por Smartmaterials3D.

4.3. Impresión 3D de las probetas

4.3.1. Proceso de impresión 3D

En esta investigación como se ha comentado anteriormente que se realizará tres tipos de ensayos diferentes: ensayo a tracción, a cortante y a compresión. Para la obtención de cada una de las propiedades que conforman los materiales es importante realizar correctamente el método de impresión. Cuya actividad es el primer paso del programa experimental, tanto para las probetas de tracción, como para las de cortante y las de compresión nos hemos basado según las indicaciones de la norma ASTM D5379 [2] y la nomenclatura siguiente:

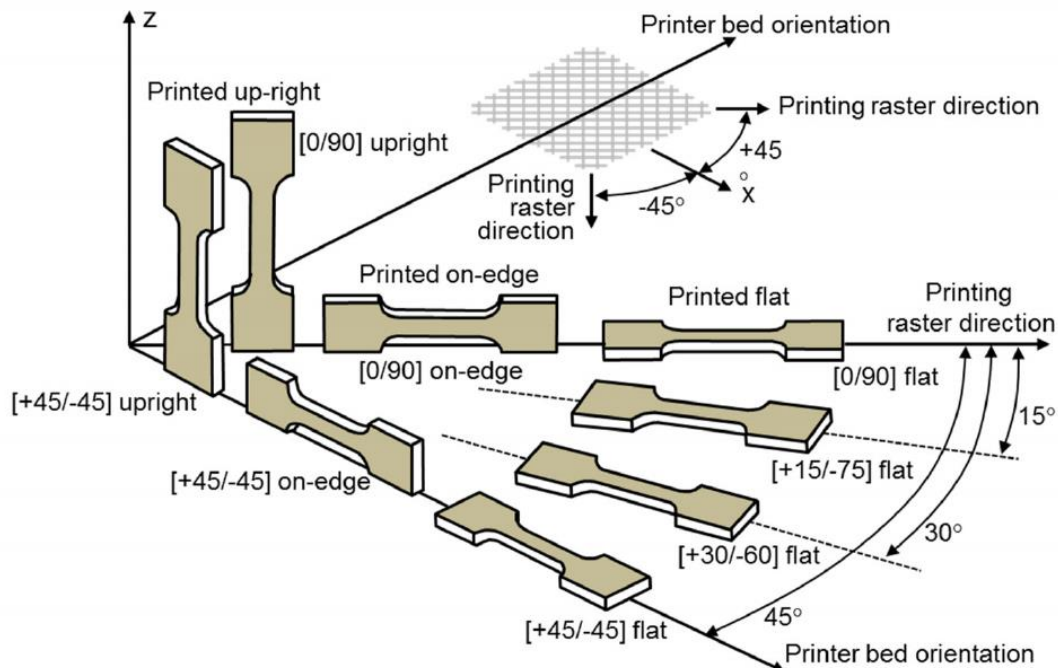


ILUSTRACIÓN 14. Direcciones de impresión.

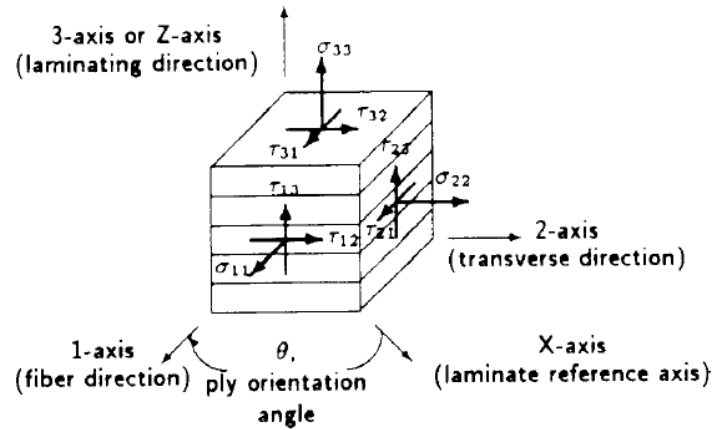


FIG. 1 Material Coordinate System

ILUSTRACIÓN 15. Tensiones normales y tangenciales en las tres direcciones.

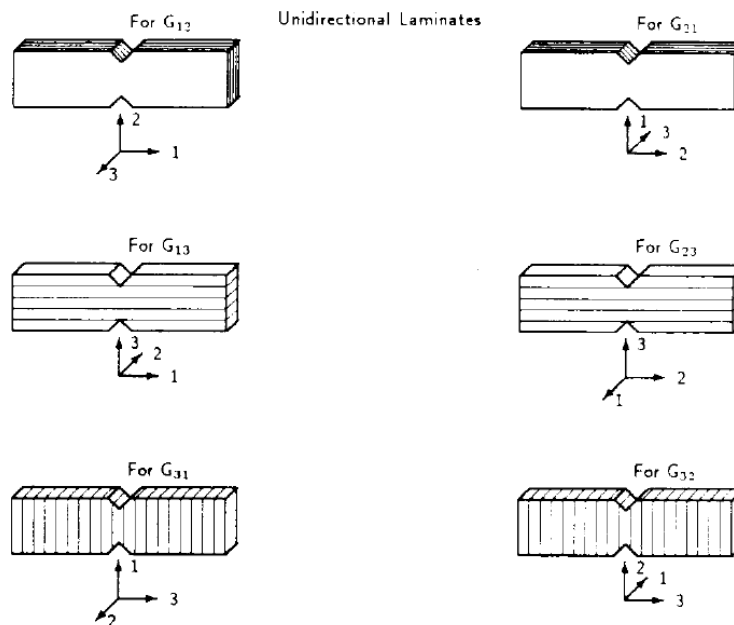


ILUSTRACIÓN 16. Apilamiento de capas según tensión estudiada.

Dependiendo de que propiedad queramos estudiar debemos imprimir las probetas con una determinada dirección de apilamiento de capas. Como podemos observar en la ilustración 21 en el cuerpo material existen una serie de segmentos que lo dividen, los cuales indican la dirección de apilamiento de capas. Seguidamente en la ilustración 22, aportada por la norma ASTM D5379, se nos indica como debe de ser la dirección que tenga el apilamiento de capas según la propiedad que vayamos a estudiar.

Para comprender con una mayor claridad el modo de impresión nos apoyamos en la ilustración 20. Si queremos obtener la tensión tangencial del plano 12 y la tensión de tracción/compresión en la dirección 1 tendremos que imprimir la probeta plana (flat). En el caso de querer obtener la tensión tangencial del plano 13 y la tensión de tracción/compresión

en la dirección 2 tendremos que imprimir la probeta de canto (on-edge), mientras que para las propiedades restantes se realizaría la impresión en vertical (upright).

Para la orientación de la fibra de relleno nos hemos basado en lo indicado en la ilustración 20, en el cual el eje de referencia es el eje x y la orientación de fibras será el ángulo que formen con respecto a este. Las orientaciones más comunes son el $[+45,-45]$ y el $[0,90]$, el cual el primero de ellos va a ser utilizado en las probetas de onyx y onyx + F.V., y el otro patrón de relleno para el resto de los materiales. Estos ángulos nos indican que las capas cambian constantemente de una dirección a otra, en la primera capa tendríamos una impresión a $+45^\circ$ mientras que en la siguiente -45° , y así sucesivamente.

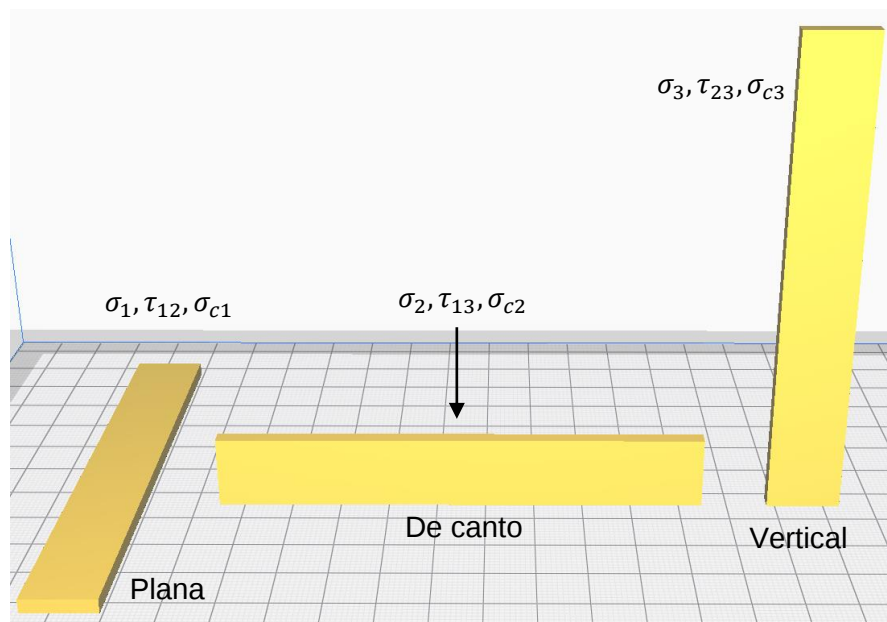


ILUSTRACIÓN 17. Modo de impresión para probeta de tracción.

En el caso del onyx más la fibra de vidrio es imposible imprimirla de canto o en vertical, esto se debe a que, si imprimiéramos la fibra de vidrio en alguna de estas direcciones, el material obtenido tendría una estructura diferente para cada una de las direcciones, ya que la impresión se realiza capa por capa. En el caso de que imprimiéramos en vertical, las capas de fibra de vidrio serían perpendiculares a la dirección de tracción, mientras que en el caso de que imprimiéramos plana a la superficie, su dirección sería paralela a la dirección de tracción.

Según la experiencia de los profesores y demás trabajos finales de grado, se obtuvo por estudiar las tensiones en la dirección 1 y plano 12, con dos tipos diferentes de patrones de relleno de la fibra de vidrio $[0,0]$ y $[+45,-45]$.

El proceso de impresión ha sido complejo debido a las limitaciones que tienen las impresoras 3D con respecto a los materiales. En el caso del onyx y onyx con fibra de vidrio no ha tenido mayor complejidad que la configuración y la nivelación de la placa base. Dicho material se ha imprimido en la impresora Markforged Two, con un relleno totalmente sólido predeterminado por el software que proporciona Markforged, aun así, dicho software proporciona la posibilidad de realizar diferentes rellenos de impresión, como pueden ser un mallado triangular o un relleno en forma de panel de abeja. En esta investigación se decidió realizar un relleno totalmente sólido para que tuviera la menor porosidad posible, y de esta manera que existiera un mayor contacto entre las fibras de carbono picadas.

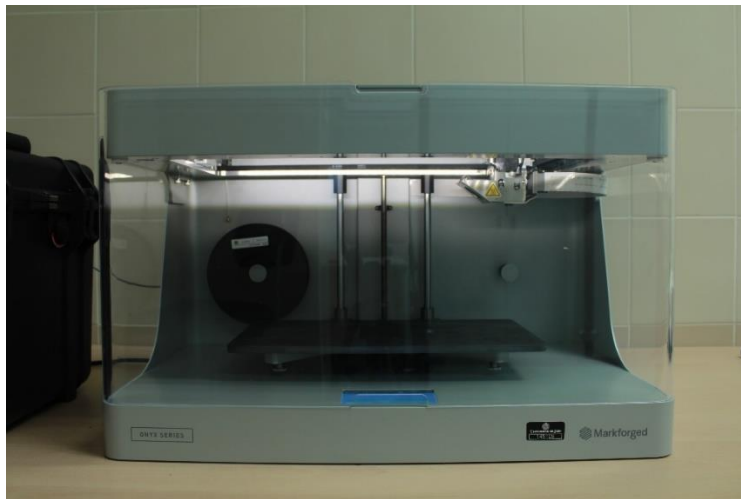


ILUSTRACIÓN 18. Impresora Markforged Two.

Su proceso de impresión no fue sencillo, pues la impresora se encontraba sometida a una gran carga de trabajo por diferentes trabajos de investigación, provocando de esta manera que la placa base se desnivelase cada cierto tiempo. Siguiendo las instrucciones del manual de Markforged y los consejos expuestos en el TFG de Antonio González Ruiz, se pudo nivelar la bandeja de impresión satisfactoriamente las veces que fueron necesarias.

Para la configuración de las probetas de onyx con fibra de vidrio, se decidió optar por unas seis capas intercaladas de fibra de vidrio en todos los ensayos, mientras que el resto de las capas de onyx se imprimían con un relleno totalmente sólido. Esta configuración de capas intercaladas se debe a que proporciona una mejor expansión de las tensiones en toda la probeta, varias investigaciones han demostrado que al tener las capas contiguas pueden provocar concentradores de tensión, un caso que no deseamos que ocurra.

Para la orientación de fibra de vidrio por capa se decidió estudiar dos patrones distintos, como se ha explicado anteriormente.

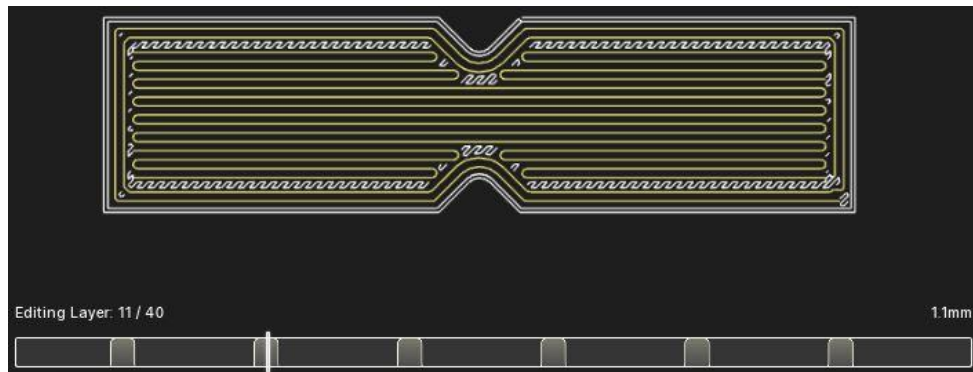


ILUSTRACIÓN 19. Capa de fibra de vidrio a 0° para probeta a cortante.

Como podemos observar en la parte inferior de la ilustración 19 existen una serie de tramos en amarillo que nos indican el número de capas de fibra de vidrio que podemos configurar, tantas como deseemos, en el caso de que estuviéramos solo imprimiendo onyx, no tendríamos ningún tramo en amarillo con fibra de vidrio.

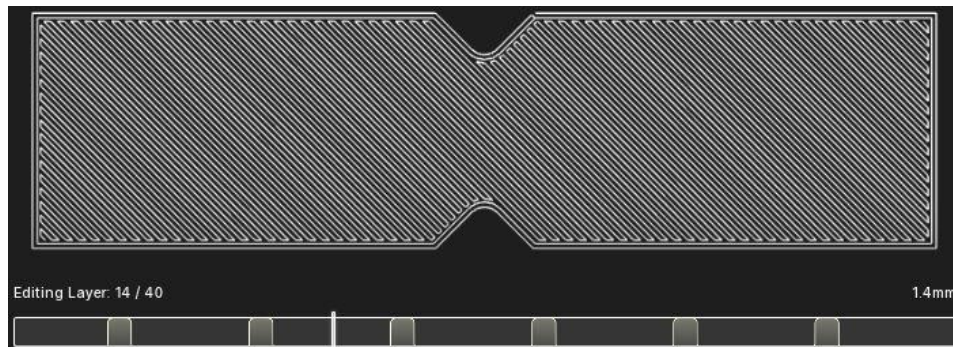


ILUSTRACIÓN 20. Capa interna de onyx para probeta a cortante.

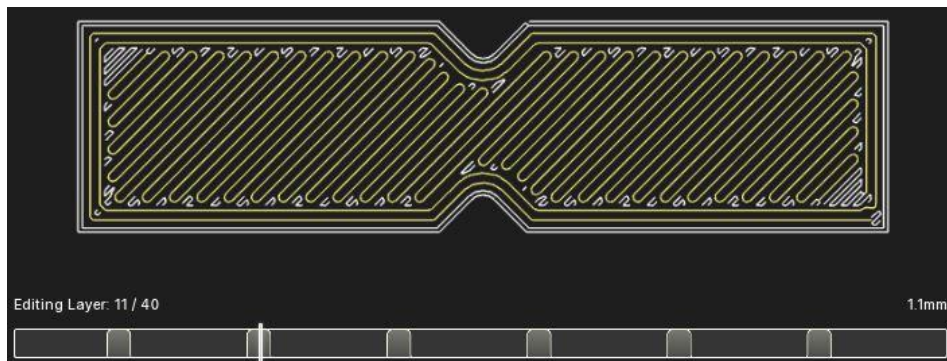


ILUSTRACIÓN 21. Capa interna de fibra de vidrio a +45° para probeta a cortante.

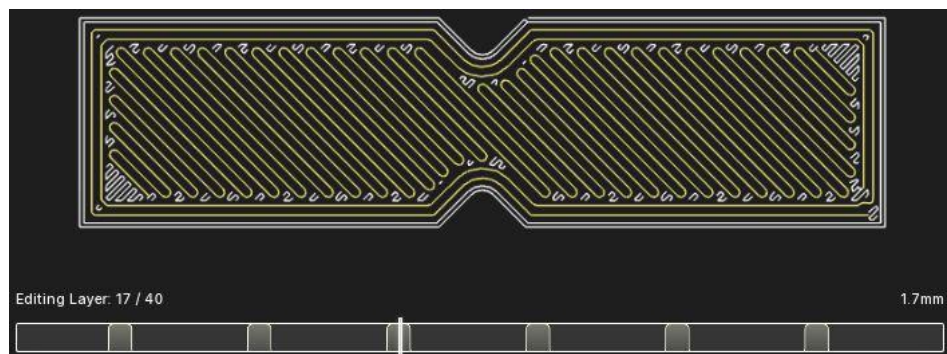


ILUSTRACIÓN 22. Capa interna de fibra de vidrio a -45° para probeta a cortante.

Como podemos observar en las dos últimas ilustraciones, en la capa número 11 la fibra de vidrio se encuentra a $+45^\circ$ con respecto al eje longitudinal de la probeta, mientras que en la capa número 17 se encuentra a -45° .



ILUSTRACIÓN 23. Capa interna de fibra de vidrio a 0° durante el proceso de impresión.

Durante el proceso de impresión de las probetas de onyx apareció el fenómeno conocido como “warping”. El cual se trata de la contracción del material durante su proceso de impresión, esto se puede deber por la humedad, por el enfriamiento que lleva a cabo la impresión junto al material, las condiciones ambientales que existen, provocando de esta manera que la pieza a imprimir no se fiel a la geometría deseada. Se trata de un fenómeno bastante común, además de que ocurre con una mayor frecuencia en aquellas piezas que poseen una superficie de contacto pequeñas como son el caso de las probetas. Para ello se decidió configurar una adhesión programada por el propio software de Markforged, con el cual se consiguió obtener unos resultados óptimos.

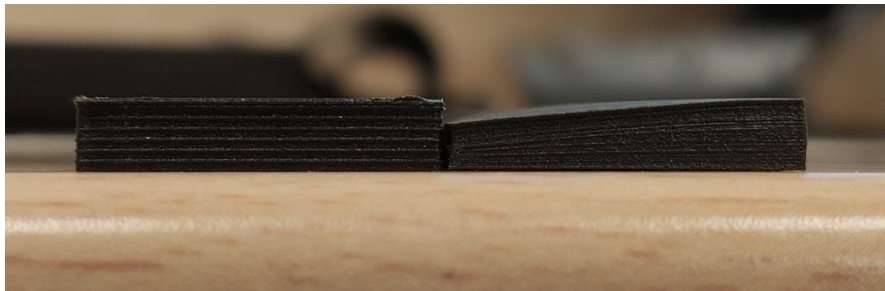


ILUSTRACIÓN 24. Warping en probetas a compresión.



ILUSTRACIÓN 25. Warping en primer modelo para probetas a tracción.

Otro error común que podría ocurrir al imprimir las probetas de onyx con fibra de vidrio es la no adhesión precisa de la fibra de vidrio en el onyx, provocando de esta manera que la fibra de vidrio se descolocase y apareciera fuera de plano. Este fallo se produce debido a que las boquillas de cada material no se encuentran totalmente equilibradas.



ILUSTRACIÓN 26. Fibra de vidrio descolocada fuera del plano de impresión.

Con respecto a la impresión de los materiales de PET FC y PA FC se intentó imprimir al principio de su proceso con dos impresoras. La primera de ellas se trataba de la “Bq Witbox 1”, mientras que la segunda era al “Creality3D Ender 3 Pro”. Con ninguna de ellas se obtuvieron unos resultados idóneos. Esto se debía a las altas temperaturas que necesitan los materiales con fibra de carbono, cuyas temperaturas eran los límites máximos que indicaban dichas impresoras, por lo que las impresoras no podían mantener una temperatura constante durante todo el proceso de impresión.

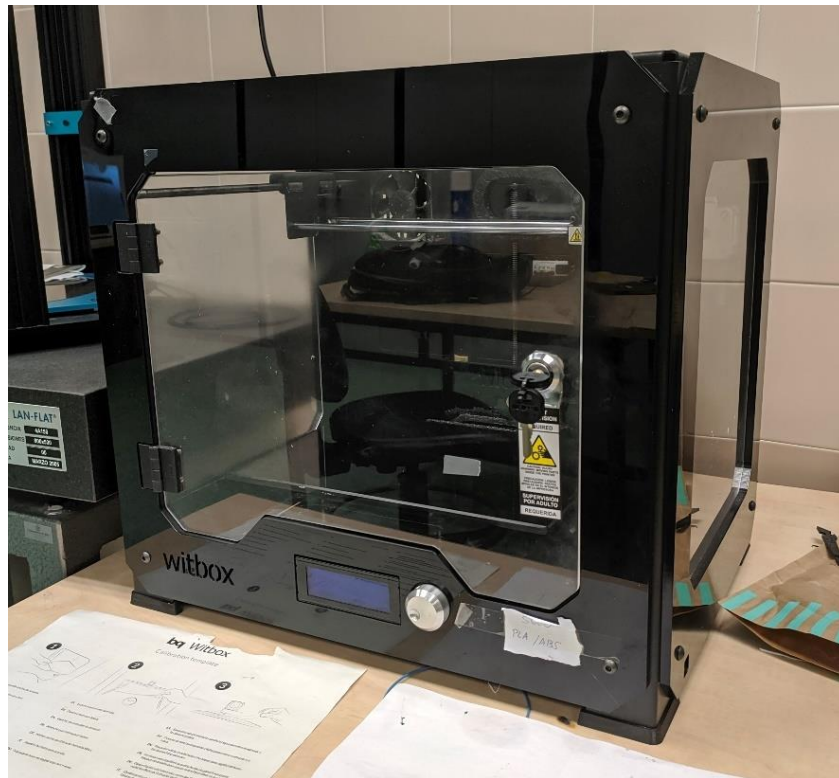


ILUSTRACIÓN 27. Impresora Bq Witbox 1.

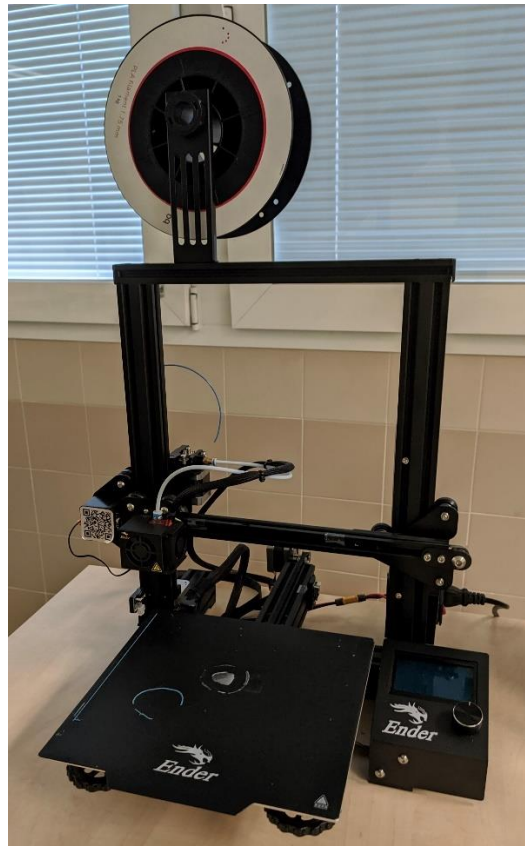


ILUSTRACIÓN 28. Impresora Creality3D Ender 3 Pro.

Además de estos sucesos el filamento de los materiales tenía un diámetro de 1,75 mm por lo que no podíamos probar a imprimirlas en otra impresora diferente. Esto provocó la imposibilidad de imprimir las probetas en el departamento, por lo que contactamos con Smartmaterials3D para que no las pudieran imprimir. Al contactar con ellos nos aceptaron la impresión de las probetas tanto de PET FC y PA FC.



ILUSTRACIÓN 29. Instalaciones de la empresa Smartmaterials3D.

Al principio de contactar con ellos para la impresión de las probetas no nos comentaron como se iba a realizar dicho proceso, pues fue cuando se dio a la recogida de las probetas en las propias instalaciones de la empresa. Una vez estando allí nos comentaron que las probetas se imprimieron en la impresora “Ultimaker S5” con filamentos del material de 2.85 mm, pero 30 probetas de PA FC no pudieron ser imprimidas, esto se debió a que durante el proceso de impresión se le acabó la bobina del material, la cual es de 2kg, y al no haber más proyectos con dicho material, decidieron no comenzar una nueva bobina para las 30 probetas restantes, pues eran alrededor de 100 g de material. Por lo tanto, nos propusieron esperar a que abrieran otra en otro momento, o vendernos una bobina de 2kg e imprimirlas en la “Ultimaker S5” que se encuentra en el departamento de la universidad. Optando por esta última opción, se decidió imprimir las restantes probetas en dicha impresora.

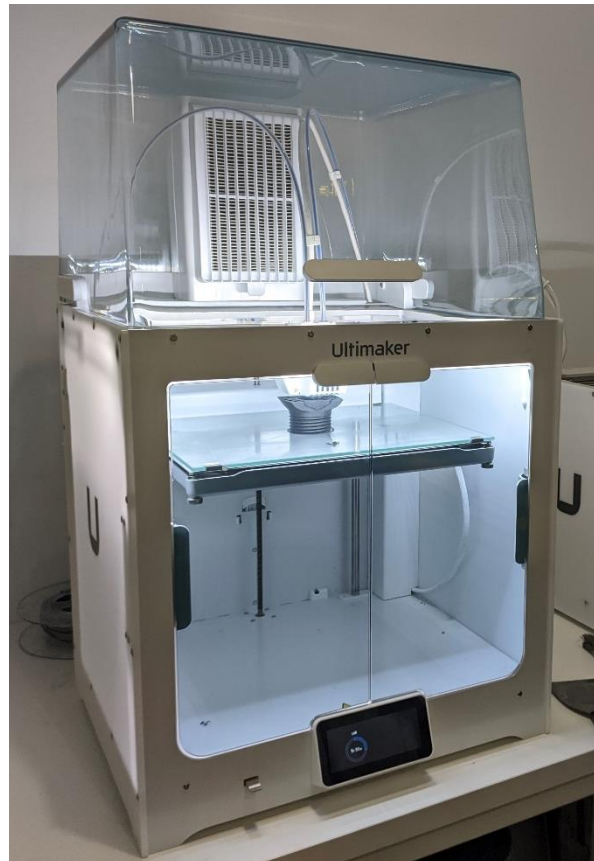


ILUSTRACIÓN 30. Impresora Ultimaker S5 de Smartmaterials3D.

Para la impresión de los materiales de fibra de carbono se necesitan unas boquillas especiales de acero endurecido de 0,6 mm de diámetro como mínimo. La impresora Ultimaker S5 posee unos extrusores específicos para cada tipo de material, por lo que no se podían intercambiar las boquillas entre extrusores. Realizando una serie de investigaciones por diferentes comerciantes se obtuvo por la obtención de un extrusor (hotends) del cual se le pueden intercambiar las boquillas. Dicho extrusor es comercializado por la empresa 3D Solex,

la cual se dedica a la sustitución de diferentes partes de las impresoras comercializadas por Ultimaker, obteniendo de esta manera una mejora en dichas impresoras. Para la impresora Ultimaker S5 existe el extrusor Hardcore 3D Solex AA, el cual es una sustitución por el extrusor estándar de serie de dicha impresora. Con esta sustitución conseguimos la posibilidad de intercambiar diferentes boquillas de la propia empresa 3D Solex, la cual comercializa un gran abanico de boquillas para diferentes materiales. Obteniendo de esta manera el extrusor Hardcore 3D Solex AA y la boquilla Everlast de punta de rubí, la cual es específica para cualquier material con fibra de carbono.

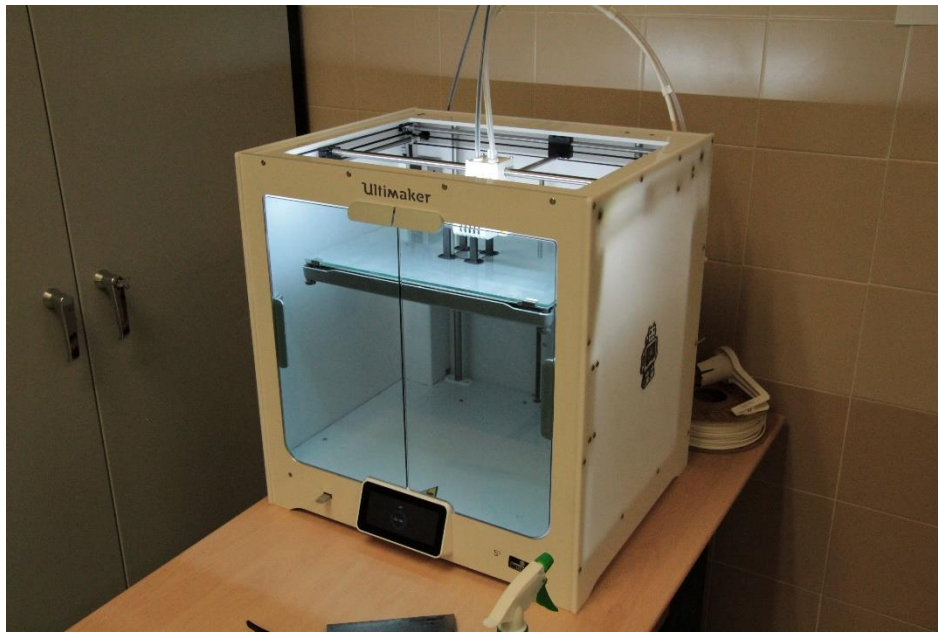


ILUSTRACIÓN 31. Impresora Ultimaker S5 del departamento de impresión 3D de la Universidad de Jaén.

Después de una serie de pruebas de impresión, se obtuvo que los mejores acabados de las probetas se obtenían con una altura de capa de 0,2 mm, a una temperatura de 270 °C (temperatura recomendada por el técnico de materiales de Smartmaterials3D) y con una velocidad de impresión de 70 mm/s. Como se puede comprobar en la siguiente ilustración los acabados eran de una gran calidad.

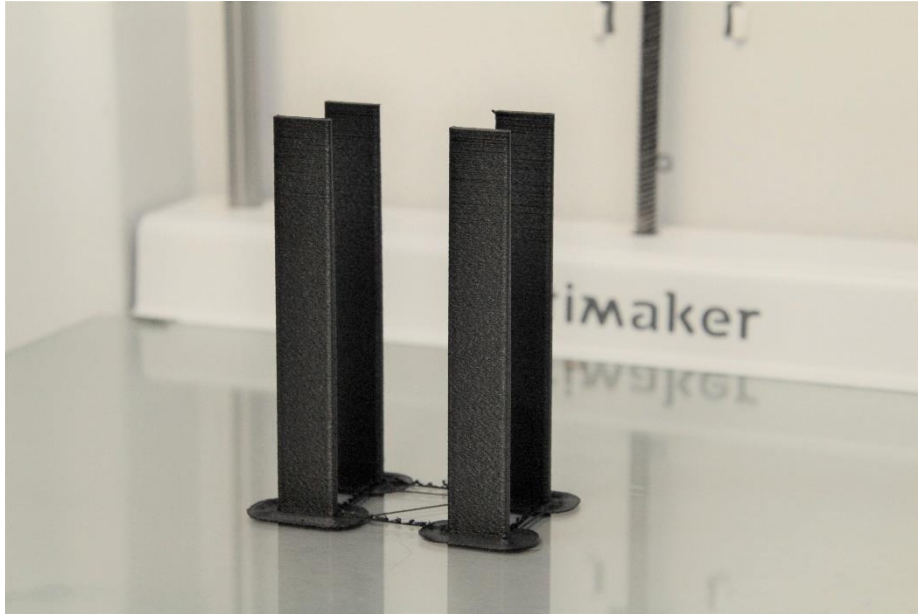


ILUSTRACIÓN 32. Probetas verticales de PA FC impresas por la impresora Ultimaker S5.

Del programa paramétrico Autodesk Inventor Professional se obtuvieron el modelado CAD-3D de las probetas y seguidamente los archivos .stl necesarios para la impresión 3D. Dicho programa se obtuvo gracias a la licencia que otorga la universidad a sus miembros.

Para la configuración de impresión de las probetas se utilizaron los siguientes softwares:

- **Eiger 3D printing:** se trata de un programa único desarrollado por la propia empresa Markforged, obteniendo de esta manera una configuración específica para cada tipo de material que se utilice comercializado por la misma empresa. Por lo tanto, se trata de un software bajo licencia al adquirir un producto determinado de esta empresa. Como es lógico, este programa se ha utilizado para la impresión de las probetas que contienen onyx.
- **Cura:** es un software de código abierto, el cual se puede utilizar para diferentes tipos de impresoras y materiales. En este programa tenemos una amplia gama de posibilidades a la hora de configurar nuestro tipo de impresión. Esta aplicación se ha utilizado para la impresión de las probetas de PET FC y PA FC.

4.3.2. Número y dimensiones de las probetas**4.3.2.1. Ensayo a tracción ASTM D3039**

Según la norma para un correcto análisis el número óptimo a ensayar era de 5 por cada propiedad estudiada:

	Plana [0,0]FV	Plana [+45,-45]FV
Número de probetas ONYX + FV	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]

TABLA 5. Número de probetas a tracción para Onyx + FV.

Para el caso de las probetas de onyx más fibra de vidrio, el onyx sigue teniendo la misma orientación de fibra [+45,-45].

	Plana	De canto	Vertical
Número de probetas ONYX	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]
Número de probetas PET FC	5 [0,90]	5 [0,90]	5 [0,90]
Número de probetas PA FC	5 [0,90]	5 [0,90]	5 [0,90]

TABLA 6. Número de probetas a tracción para Onyx, PET FC y PA FC.

De esta manera se obtiene un total de 55 probetas a estudiar para los ensayos a tracción.

Según la norma las dimensiones de las probetas deben de cumplir los siguientes requisitos:

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

ILUSTRACIÓN 33. Requisitos dimensionales probetas ASTM D3039.

Se recomendaban una serie de dimensiones según la orientación de fibra, pero al tener un espesor menor de 2mm se decidió optar por las siguientes dimensiones: 100x15x3mm. De esta manera los especímenes estudiados tendrían un cuerpo más compacto.

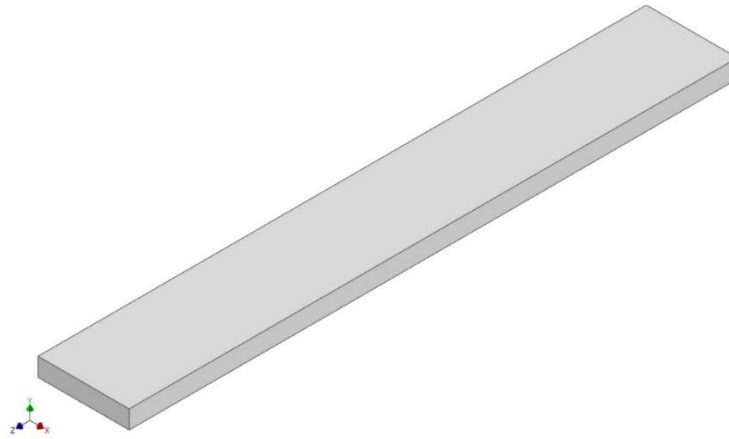


ILUSTRACIÓN 34. Modelo CAD-3D de la probeta a tracción ASTM D3039.

4.3.2.2. Ensayo a cortante ASTM D5379

Al igual que para el ensayo a tracción, en la norma ASTM D5379 nos recomienda estudiar un total de 5 probetas por propiedad:

	Plana [0,0]FV	Plana [+45,-45]FV
Número de probetas ONYX + FV	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]

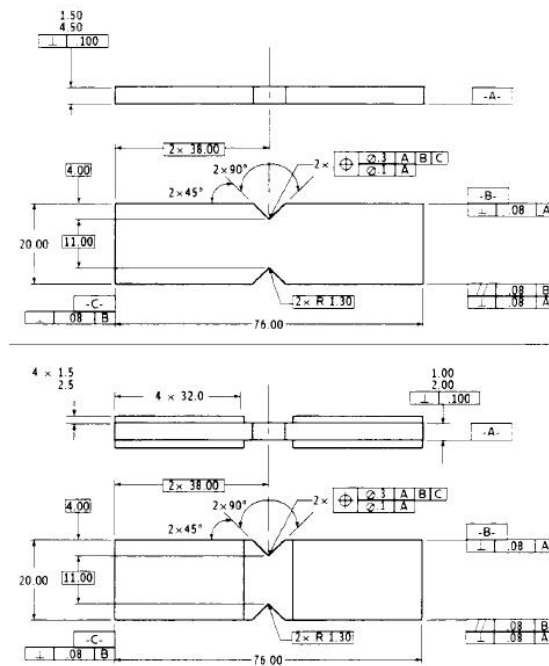
TABLA 7. Número de probetas a cortante para Onyx + FV.

	Plana	De canto	Vertical
Número de probetas ONYX	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]
Número de probetas PET FC	5 [0,90]	5 [0,90]	5 [0,90]
Número de probetas PA FC	5 [0,90]	5 [0,90]	5 [0,90]

TABLA 8. Número de probetas a cortante para Onyx, PET FC y PA FC.

Obteniendo un total de 55 probetas a estudiar para el ensayo a cortante.

Las dimensiones de las probetas son exactamente las mismas que recomienda la norma, obteniendo de esta manera una probeta con las siguientes dimensiones: 76x20x4mm. La cual posee dos entallas en la parte central.



Drawing Notes—Interpret Fig. 7 in accordance with ANSI Y14.5M-1982, subject to the following:

- (1) All dimensions in millimetres with decimal tolerances as follows:

No decimal	0.X	0.XX
± 3	± 1	± 0.3
- (2) All angles have a tolerance of $\pm 0.5^\circ$.
- (3) Ply orientation direction tolerance relative to - A- (or to - B-) within $\pm 0.5^\circ$.
- (4) Finish on machined edges not to exceed $1.6 \sqrt{\text{ }}$. Finish on V-notch not to exceed $0.8 \sqrt{\text{ }}$ (symbology is in accordance with ANSI/ASME B46.1-1985, with roughness height in micrometres.)
- (5) Values to be provided for the following, subject to any ranges shown ggyn the field of Fig. 7: material, lay-up, and ply orientation reference relative to - A-, coupon thickness, tab material, tab thickness, and tab adhesive.

ILUSTRACIÓN 35. Dimensiones probetas ASTM D5379.

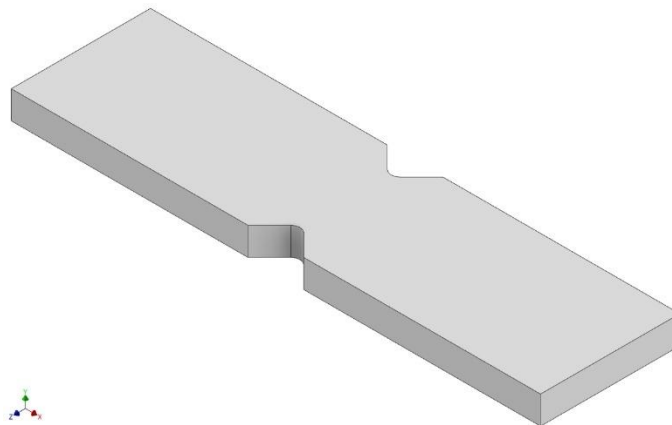


ILUSTRACIÓN 36. Modelo CAD-3D de la probeta a cortante ASTM D5379.

4.3.2.3. Ensayo a compresión UNE EN ISO 604

Al igual que los demás ensayos, la norma UNE EN ISO 604 nos recomienda estudiar 5 probetas para cada propiedad:

	Plana [0,0]FV	Plana [+45,-45]FV
Número de probetas ONYX + FV	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]

TABLA 9. Número de probetas a compresión para Onyx + FV.

	Plana	De canto	Vertical
Número de probetas ONYX	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]	5 [+45,-45]
Número de probetas PET FC	5 [0,90]	5 [0,90]	5 [0,90]
Número de probetas PA FC	5 [0,90]	5 [0,90]	5 [0,90]

TABLA 10. Número de probetas a compresión para Onyx, PET FC y PA FC.

Obteniendo un total de 55 probetas a estudiar para el ensayo a compresión.

Para las dimensiones de las probetas a compresión, la norma nos recomienda las dimensiones que se muestra en la ilustración 35. Como se puede observar, su geometría es bastante pequeña, por lo que el efecto del warping (anteriormente explicado) se producía con más frecuencia en dichas probetas.

Dimensiones en milímetros				
Tipo	Medición	Longitud, l	Anchura, b	Espesor, h
A	módulo	50 ± 2	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
B	resistencia	50 ± 2		

ILUSTRACIÓN 37. Dimensiones probetas UNE EN ISO 604.

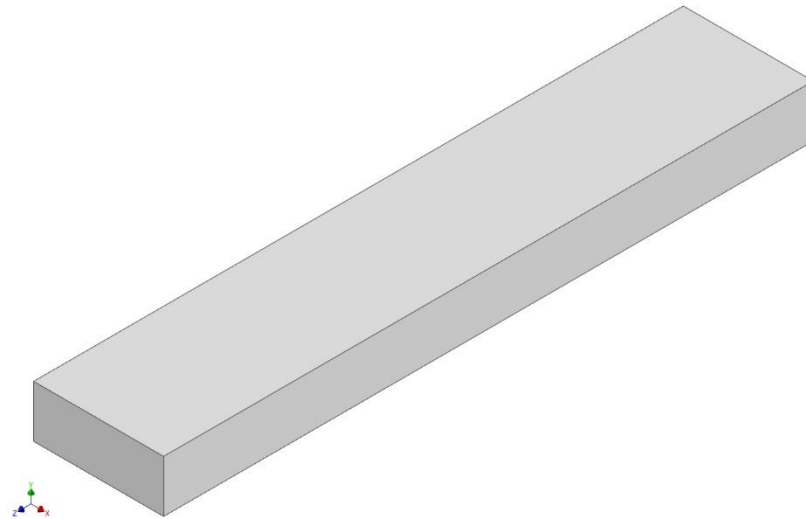


ILUSTRACIÓN 38. Modelo CAD-3D de las probetas a compresión UNE EN ISO 604.

Debido al amplio rango de propiedades que se desea estudiar en este trabajo de investigación, se han tenido que imprimir, ensayar y estudiar un total de 165 probetas.

4.4. Caracterización mecánica

Una vez obtenidas las probetas se realiza el estudio de caracterización mecánica, el cual se trata de un estudio experimental, cuyo objetivo es analizar las características mecánicas que componen un determinado material, pieza, prototipo, etc. Para ello existen diferentes métodos dependiendo de que propiedad queremos obtener, en el caso de que deseemos obtener la tensión máxima a rotura, tenemos que realizar un ensayo a tracción, si por el contrario queremos obtener la tensión tangencial máxima tendremos que realizar un ensayo a cortante [3]. En el caso de que quisiéramos conocer la tenacidad de un material existen múltiples ensayos como podría ser el ensayo Charpy.

Para el presente trabajo final de grado se realizará el estudio de las tensiones principales que conforman a los materiales (matriz de tensiones) y las tensiones principales a compresión, como propiedad extra. Para poder obtener dichas propiedades hemos tenido que realizar los siguientes ensayos basándonos en unas determinadas normas:

- **Ensayo a tracción ASTM D3039:** Con dicho ensayo mecánico podemos obtener la diagonal de tensiones principales (σ_{11} ; σ_{22} ; σ_{33}) [4]
- **Ensayo a cortante ASTM D5379 – ASTM D7078:** Con dicho ensayo mecánico podemos obtener las tensiones tangenciales de cada material (τ_{12} ; τ_{13} ; τ_{23}) [2]; [5]

- **Ensayo a compresión UNE EN ISO 604:** Con dicho ensayo mecánico podemos obtener las tensiones normales a compresión para cada dirección (σ_{c11} ; σ_{c22} ; σ_{c33}) [6]

A continuación, en el apartado 5: “Programas experimentales: obtención de resultados”, se explicará con mayor detalle el proceso llevado para la obtención de los resultados para cada tipo de ensayo.

4.5. Correlación digital de imágenes

La correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica óptica que nos permite obtener los desplazamientos y deformaciones de objetos mediante el seguimiento de una serie de imágenes. En el caso de un estudio de probetas, la secuencia de imágenes se obtendría a partir del estado inicial de la probeta hasta su deformación final obtenida por medio de un ensayo mecánico. Previamente a la captación de la secuencia de imágenes, las probetas se suelen tratar mediante pintura blanca y negra para obtener el mayor contraste posible en la imagen, cuanto mayor sea el contraste entre las diferentes tonalidades que posea las imágenes se obtendrán unos resultados más precisos [7].



ILUSTRACIÓN 39. Fotografía previa al ensayo de tracción de una probeta.

Realizando zoom en la ilustración 39 podemos observar con más detalle el contraste de dicha fotografía:

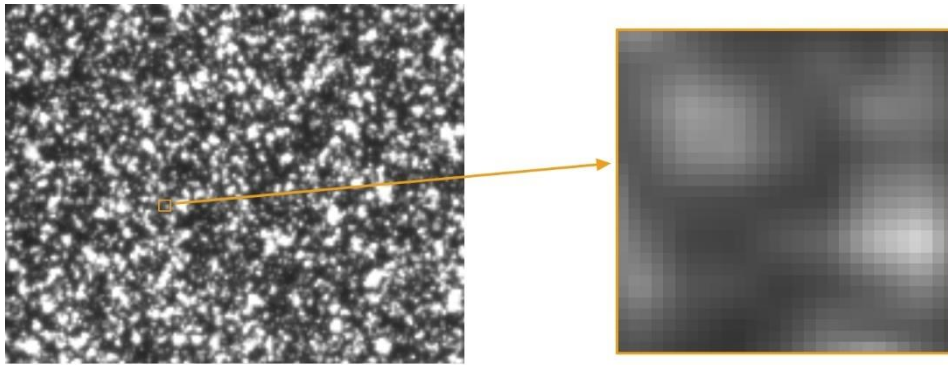


ILUSTRACIÓN 40. Zoom de la ilustración 39.

Como podemos apreciar en la ilustración 40 existen una amplia gama de tonalidades diferentes de negro, blanco y gris. Para cada tonalidad (píxel) le corresponde una determinada posición, por lo que si dicha tonalidad comienza a desplazarse con el paso de las fotografías se construye un vector de desplazamientos, ya que su valor de posición comienza a variar conforme se realiza el ensayo.

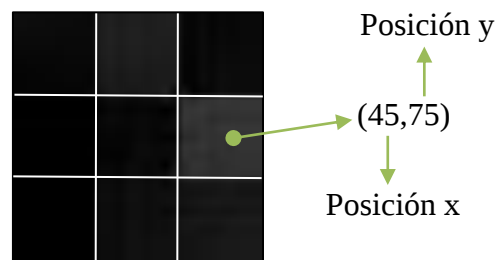


ILUSTRACIÓN 41. Píxeles con diferentes tonalidades y valores de posición de la ilustración 15.

Para la obtención de los desplazamientos o deformaciones, la probeta se divide en subconjuntos virtuales denominados facetas con tamaño estándar de 29x29 píxeles, como se puede observar en la ilustración 40. Cabe destacar que dicho tamaño puede configurarse libremente según las necesidades de cada persona, pues una faceta con un tamaño menor requerirá de un mayor tiempo de procesado y un mayor coste computacional, pero a cambio tendremos unos resultados más precisos. En el caso de que el tamaño fuese mayor al estándar ocurriría todo lo contrario, obteniendo unos resultados menos precisos, pero más rápidos de obtener. Dichas facetas se encuentran dentro de una determinada región que debemos de configurarla según el caso que estudiemos, en el caso de una probeta a tracción podríamos implantar una región rectangular lo más grande posible dentro de la probeta, evitando las zonas que tengan un gran tamaño con una misma tonalidad, pues dichas zonas pueden provocar que el análisis no se realice correctamente.

Al inicio del procesado implantamos un punto de referencia en la primera imagen, la cual se encuentra en una determinada faceta o región, es decir, tiene una determinada posición

al inicio. Una vez deformada la probeta, dicha referencia se encontrará en otra posición diferente. Este concepto se aplica a toda la secuencia de imágenes por lo que obtendremos una serie de posiciones distintas para la referencia que implantamos. De esta manera se puede obtener el vector desplazamiento de la probeta debido a las diferentes posiciones que tenemos a lo largo de la secuencia de imágenes. El concepto explicado se aplica mediante una serie de algoritmos de correlación con los cuales se obtienen directamente los resultados, tanto de deformaciones como de desplazamientos.

Para un mayor entendimiento del concepto de esta tecnología y de la obtención del vector de desplazamiento, se muestra en las ilustraciones 17 y 18 el desplazamiento de una determinada faceta entre el inicio y el final de un ensayo a tracción. Cabe destacar que dichas ilustraciones son meramente ilustrativas junto al vector de desplazamiento, el cual no ha sido obtenido por la tecnología DIC.

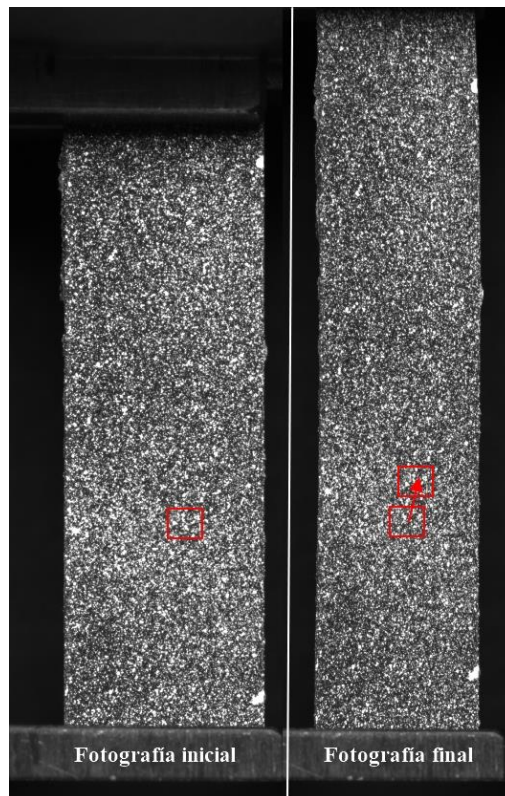


ILUSTRACIÓN 42. Comparación fotografía inicial y final de un ensayo a tracción.

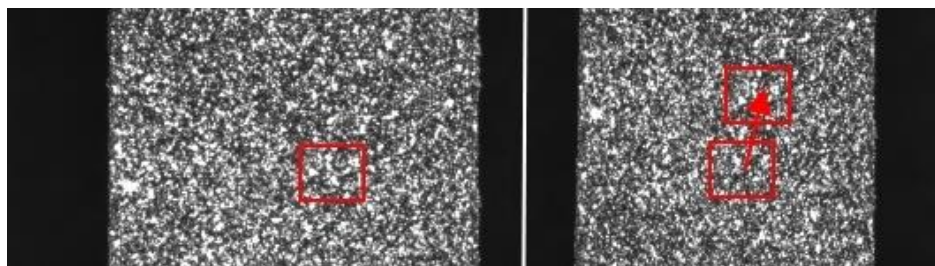


ILUSTRACIÓN 43. Ejemplo vector desplazamiento de una faceta de la ilustración 17.

Los inicios de la correlación digital de imágenes se basaban únicamente en una cámara, por lo que dicho procesado se aplicaba en dos dimensiones (en un único plano). Con el paso de los años se fue perfeccionando la técnica, añadiendo varias cámaras al mismo tiempo y nuevos algoritmos, de esta manera se puede obtener correlaciones cruzadas de imágenes obtenidas en diferentes perspectivas.

5. PROGRAMAS EXPERIMENTALES: OBTENCIÓN DE RESULTADOS

5.1. Ensayo a tracción ASTM D3039

Esta norma caracteriza las propiedades relativas al esfuerzo de tracción para materiales con matriz polimérica reforzados con fibras, tanto con fibras continuas como con fibra picada insertada en el material base.

5.1.1. Descripción del ensayo

Con la norma ASTM D3039 podemos obtener la tensión última, la tensión de rotura, el límite elástico, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, además de las gráficas tensión deformación correspondientes. En ella no se explica cómo obtener las diferentes tensiones para cada dirección, por lo que nos hemos basado en la norma ASTM D5379 para poder obtener cada una de ellas.

La norma nos indica que las probetas deben de ser estudiadas en una máquina de ensayos adecuada con unas mordazas y se le aplicará una carga de tracción de forma constante mientras que se guardan los datos obtenidos durante el proceso. Para medir la deformación que sufre la probeta nos recomienda utilizar unas galgas extensiométricas, pero en estos ensayos utilizaremos extensómetros virtuales mediante el proceso de correlación digital de imágenes.

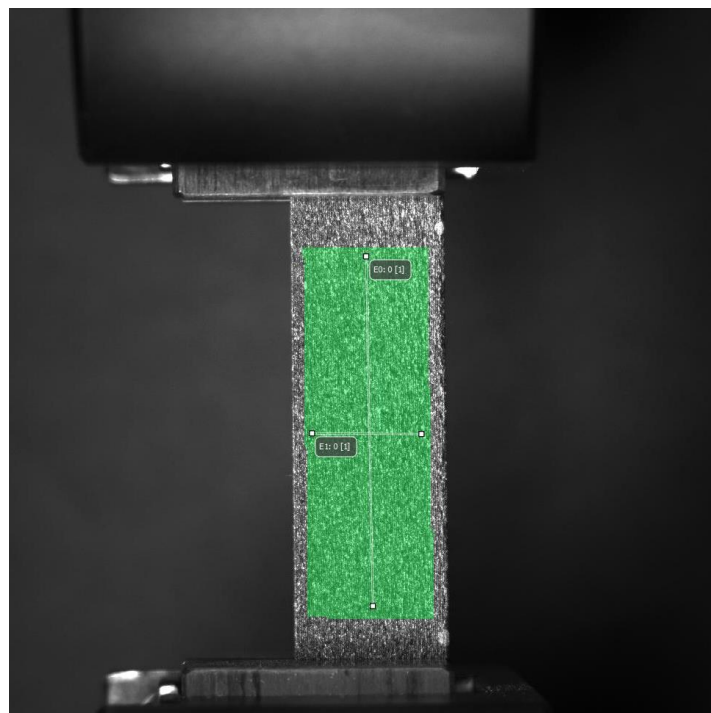


ILUSTRACIÓN 44. Extensómetros digitales por correlación digital de imágenes en probeta de tracción.

Antes de iniciar los ensayos la norma nos recomienda realizar la medición transversal de las probetas (ancho y espesor) en tres puntos diferentes repartidos a lo largo de estas. De esta manera podemos obtener la sección media de la probeta.

Para la velocidad de ensayo nos recomienda que sea la adecuada para que el fallo de la probeta se produzca en un intervalo de entre 1 y 10 minutos, y que la tasa de deformación sea constante. La norma aconseja una velocidad de 2 mm/min.

Una vez ensayadas las probetas la norma pide reportar el modo y la localización del fallo y seleccionar de entre el catálogo de fallos (ilustración 42) que nos proporciona para dar una descripción estandarizada de la forma de fallo usando un código que se indica.

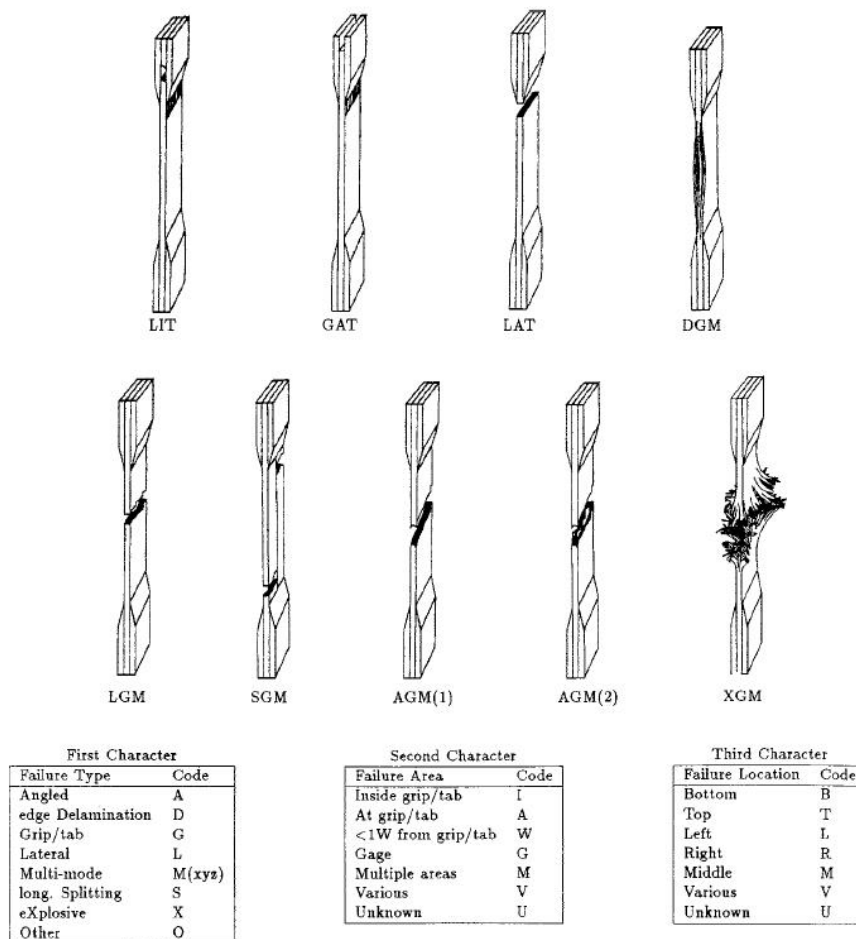


ILUSTRACIÓN 45. Modos de fallos y códigos de identificación.

5.1.2. Procedimiento experimental

Como se ha comentado anteriormente antes de empezar el ensayo se mide la sección transversal en 3 puntos diferentes a lo largo de la probeta, consiguiendo de esta manera la sección media transversal.

Una vez medida se crea un moteado con pintura blanca, ya que las probetas son de color negro, de esta manera obtenemos el contraste deseado para aplicarlo a la correlación digital de imágenes.

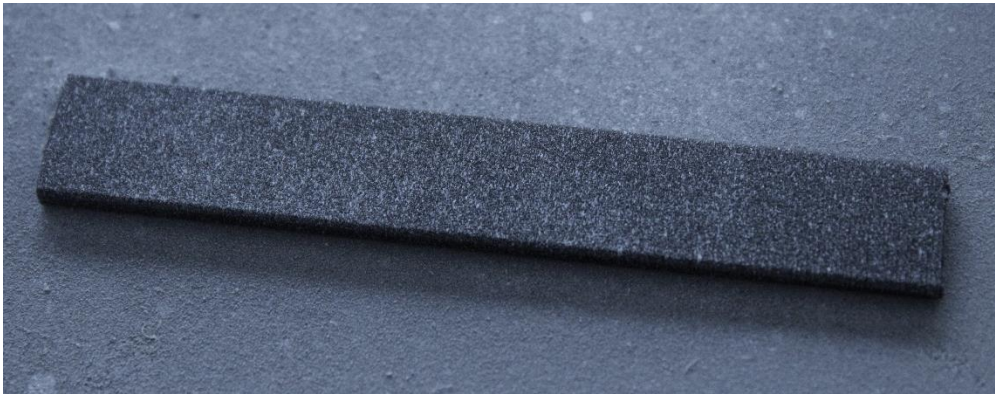


ILUSTRACIÓN 46. Moteado de la probeta a tracción.

Pasados aproximadamente 20 minutos, realizamos unas marcas en uno de los laterales de las probetas con una distancia entre ellas de unos 40 mm, estas marcas nos ayudarán a referenciar las imágenes en la correlación digital de imágenes.



ILUSTRACIÓN 47. Marcas de referencia a 40 mm.

Una vez se tiene la probeta preparada se coloca en la máquina con los útiles de tracción y se aprietan las mordazas, las cuales deben de estar más o menos apretadas dependiendo del

material y el método de impresión. Pues durante el proceso, las probetas imprimidas en vertical tienen una resistencia mucho menor, por lo que, si se aprietan demasiado las mordazas pueden llegar a romperse antes de comenzar el ensayo, mientras que para las probetas más resistentes si no se apretaban todo lo necesario, se salían del plano de corte sin llegar a romperse.

Cabe destacar que todos los ensayos de tracción y de cortante se realizaron en la máquina ISTRON 5567 – A, alojada en el departamento de medios continuos y teoría de estructuras. La cual posee un software denominado BlueHill, con el cual podemos contralar la máquina, además de definir todos los parámetros de los ensayos: tipo de ensayo, velocidad, fuerza a aplicar, etc. Con este programa se obtienen los resultados de tiempo, extensión y fuerza de los ensayos que realicemos.

El montaje experimental se muestra en la siguiente ilustración, en la que se puede observar cómo se graba la probeta con una cámara de alta resolución mientras se realiza el ensayo. También se coloca una fuente de luz para que las imágenes se capturen con las mejores condiciones lumínicas posibles y maximizar el contraste de las imágenes.

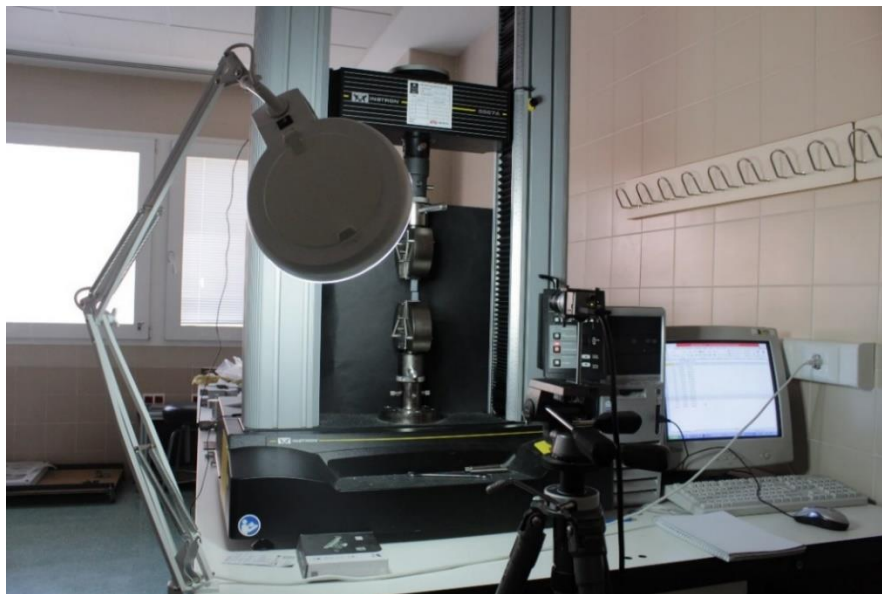


ILUSTRACIÓN 48. Montaje experimental ensayo a tracción.



ILUSTRACIÓN 49. Cámara de alta resolución.

Con la cámara se obtienen todas las imágenes que posteriormente se procesan con el programa de correlación digital de imágenes.

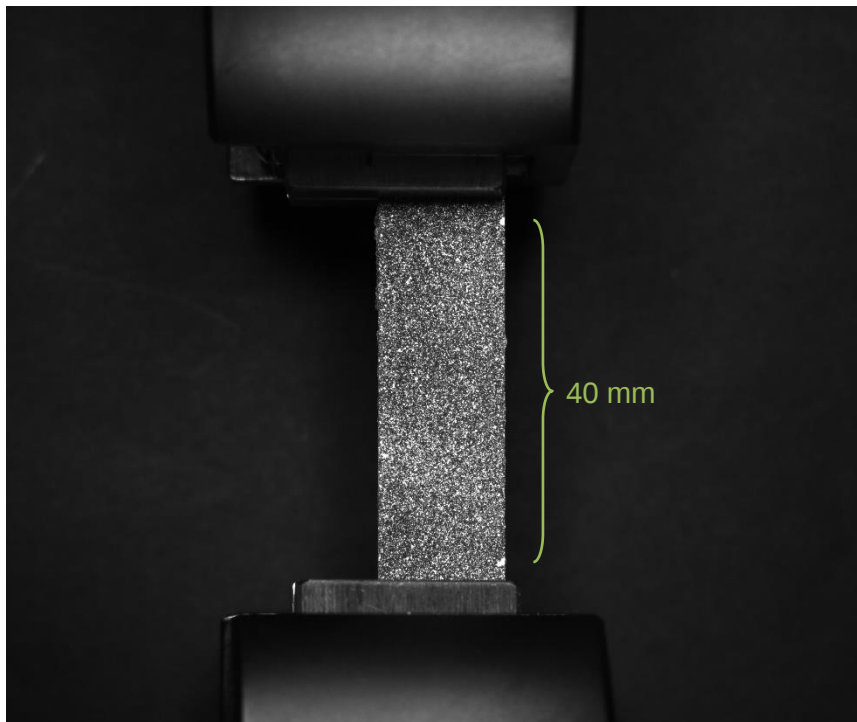


ILUSTRACIÓN 50. Imagen tomada con cámara de alta resolución.

5.1.3. Cálculos e interpretación de resultados

La norma nos indica como calcular las tensiones, el límite elástico, la deformación, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Para el cálculo de las tensiones se utilizada las siguientes ecuaciones:

$$A = w \cdot h$$

$$\sigma_i = P_i / A$$

Donde:

A = Sección media transversal [mm²]

w = espesor medio de la probeta [mm]

h = ancho medio de la probeta [mm]

σ_i = Tensión en el punto "i" de la medición [MPa]

P_i = Carga en el punto "i" de la medición [N]

Para obtener la tensión última básicamente seleccionamos la máxima carga obtenida y le aplicamos la siguiente ecuación:

$$F^{tu} = P^{max} / A$$

Donde:

F^{tu} = Tensión última [MPa]

P^{max} = Carga máxima antes de la rotura [N]

Como se ha comentado anteriormente la deformación se obtiene a partir de la correlación digital de imágenes y no por un extensómetro físico.

Con respecto al módulo de elasticidad, la norma nos recomienda calcularlo en un rango determinado de deformaciones que se muestra en la siguiente ilustración:

TABLE 3 Specimen Alignment and Chord Modulus Calculation Strain Ranges		
Tensile Chord Modulus Calculation Longitudinal Strain Range		Longitudinal Strain Checkpoint for Bending
Start Point	End Point	
$\mu\epsilon^A$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
1000 ^B	3000	2000

^A 1000 $\mu\epsilon$ = 0.001 absolute strain.

^B This strain range is to be contained in the lower half of the stress/strain curve. For materials that fail below 6000 $\mu\epsilon$, a strain range of 25 to 50 % of ultimate is recommended.

ILUSTRACIÓN 51. Rango de deformaciones para el módulo de elasticidad.

Para su obtención se utiliza la siguiente ecuación:

$$E^{chord} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

Donde:

$$E^{chord} = \text{Módulo de elasticidad [GPa]}$$

$\Delta\sigma$ = Diferencia de las tensiones aplicadas entre los dos puntos de la ilustración 47 [MPa]

$\Delta\epsilon$ = Diferencia de las deformaciones entre los dos puntos de la ilustración 47

Para el coeficiente de Poisson nos recomienda variar el rango de deformaciones tanto transversal como longitudinal hasta obtener unos valores óptimos. Al igual que la deformación longitudinal, la transversal se obtiene a partir de la correlación digital de imágenes. Para obtener el coeficiente de Poisson se utiliza la siguiente ecuación:

$$\nu = -\Delta\epsilon_t / \Delta\epsilon_l$$

Donde:

ν = Coeficiente de Poisson

$\Delta\epsilon_t$ = Diferencia entre el rango de deformaciones transversales seleccionado

$\Delta\epsilon_l$ = Diferencia entre el rango de deformaciones longitudinales seleccionado

Según nos indica la norma el límite elástico se obtiene a partir de la intersección de dos líneas, una de ellas es la línea del módulo de elasticidad y la otra, es una línea de tendencia tangente a la tensión de rotura de la curva tensión-deformación. Para un mayor entendimiento se muestra la siguiente ilustración:

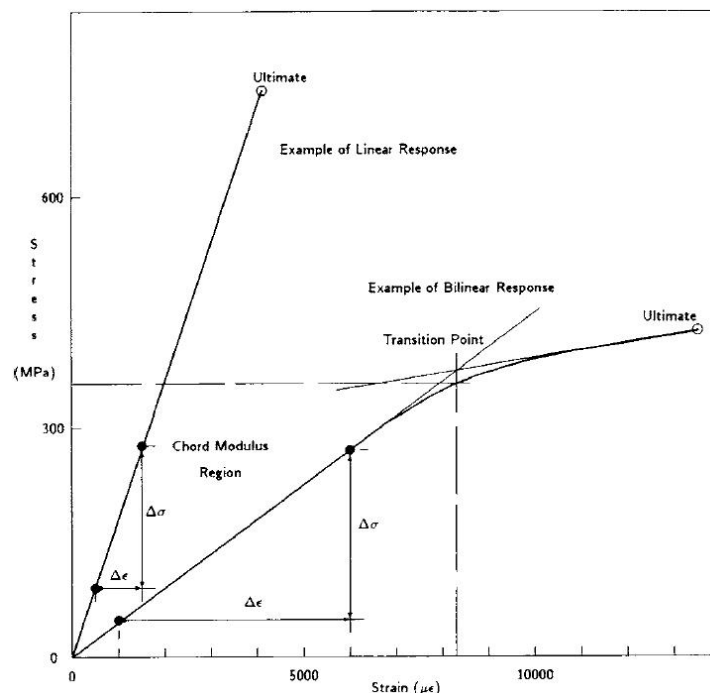
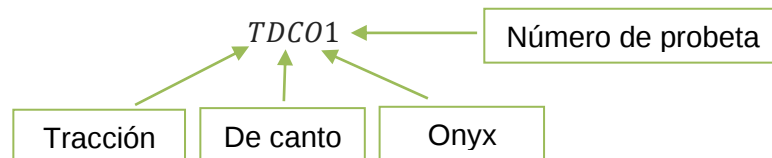


ILUSTRACIÓN 52. Curva tensión-deformación de la norma ASTM D3039.

Como se puede observar en la ilustración 48 existen dos líneas que se cruzan en la curva inferior. En dicho punto de intersección se realiza otra línea vertical que cruza con la curva, obteniendo de esta manera el punto de límite elástico, con su deformación correspondiente.

5.1.4. Resultados obtenidos

Para la clasificación de cada probeta se utilizó la siguiente nomenclatura:

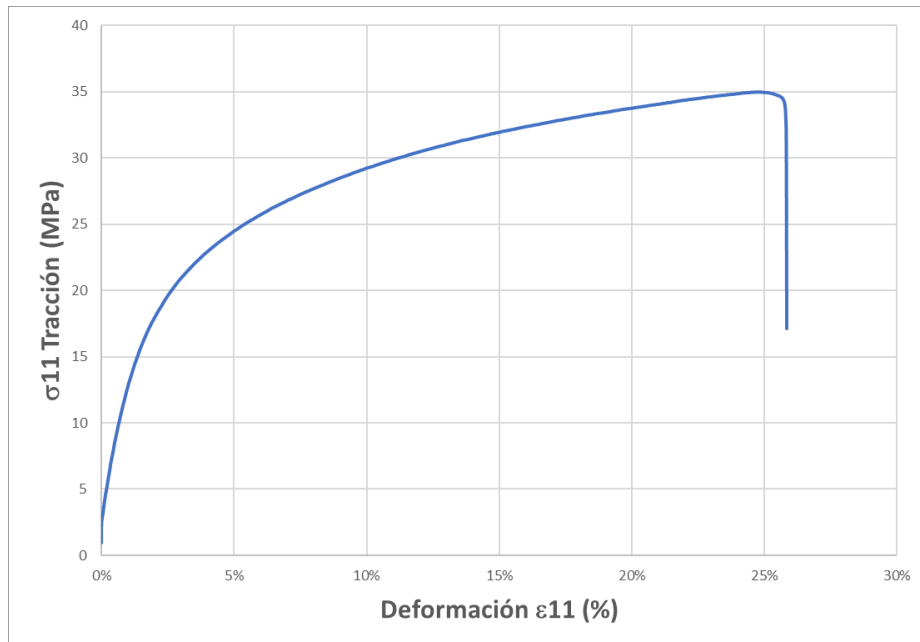
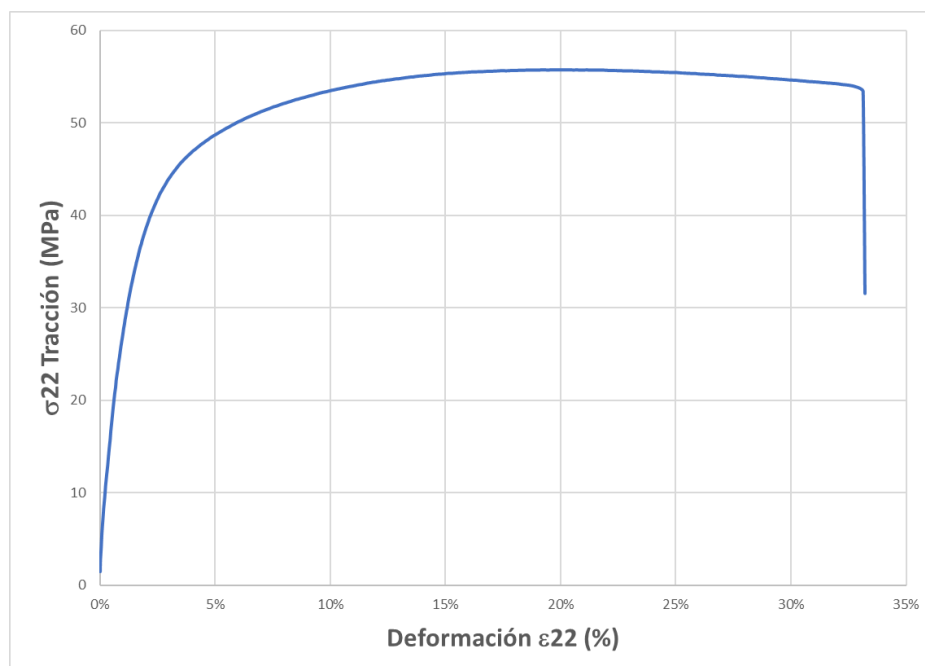


Para un mayor entendimiento de la nomenclatura se exponen una serie de ejemplos:

- CORPO0°FV3 = 3ª probeta de cortante plana onyx + 0° Fibra de vidrio.
- COMVPET2 = 2ª probeta de compresión vertical PET FB.

La gran mayoría de las probetas rompieron en los extremos de donde estaban sujetas a las mordazas, sin embargo, hubo algunas que rompieron en el centro de la entalla, pero cabe destacar que de estas se obtenían una menor resistencia. En el caso de las probetas imprimidas en vertical se obtenían unas resistencias muchos menores a las de otra dirección, pues su rotura se basaba en la separación de capas. En esta dirección es fundamental la adhesión del material y su impresión, pues sin una buena producción del material la separación de capas puede fallar simplemente con el esfuerzo de apretar las mordazas.

A continuación, se mostrarán algunos ejemplos de las curvas tensión-deformación directamente obtenidas de la máquina ISTRON 5567 – A y de la correlación digital de imágenes.

**ILUSTRACIÓN 53.** Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO1.**ILUSTRACIÓN 54.** Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TDCO3.

Como se puede observar tanto en los tramos inicial y final de las ilustraciones anteriores, los cuales son totalmente verticales se eliminarán en el procesado de los datos, estos se deben a la precarga y recolocación inicial de la probeta y a la rotura de esta respectivamente. Estos tramos se producen prácticamente en todas las probetas, tanto las de tracción, como las de cortante y compresión, las cuales se podrán comprobar en los siguientes apartados.

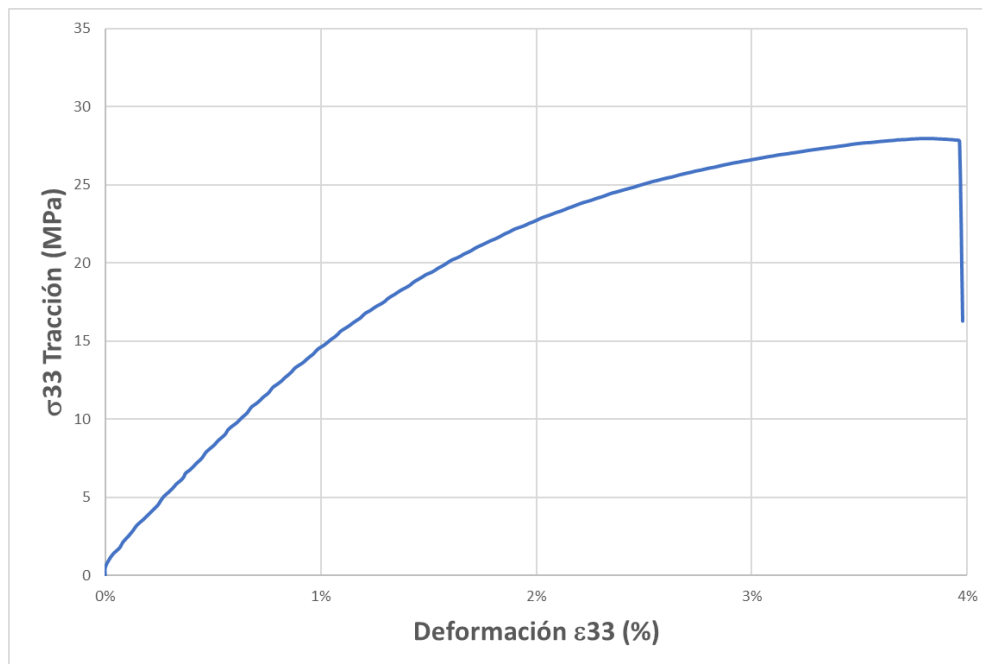


ILUSTRACIÓN 55. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TVO4.

Como se ha comentado anteriormente, las probetas imprimidas verticalmente se fracturaban por separación de capas. En el caso de las probetas de onyx, estas poseían un comportamiento más plástico en comparación a los demás materiales, deduciendo en una primera instancia que dicho material posee una mayor adherencia entre capas.

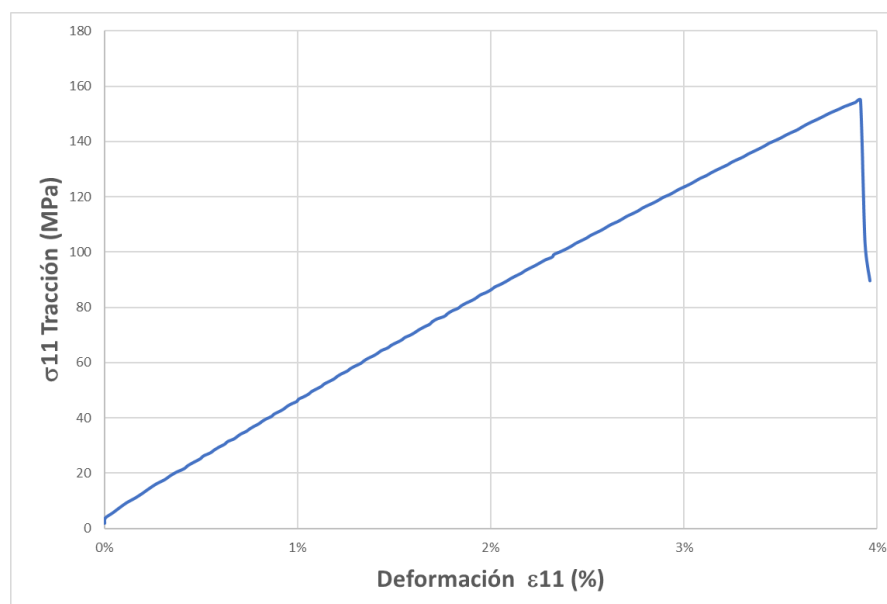


ILUSTRACIÓN 56. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO0°FV1.

En el caso de las probetas de Onyx y fibra de vidrio, los tramos de ruido se producían con una mayor brusquedad, tal es su magnitud que el tramo inicial de recolocación es prácticamente instantáneo. Hay que destacar que en estas probetas se preveía que se produjese un efecto escalón al principio del ensayo debido a que existen dos materiales con distintos

módulos de Young. Pero la fibra de vidrio al tener unas altas propiedades en comparación al onyx, este efecto escalón en prácticamente imperceptible en todos los ensayos, tanto en tracción, como en cortante y compresión.

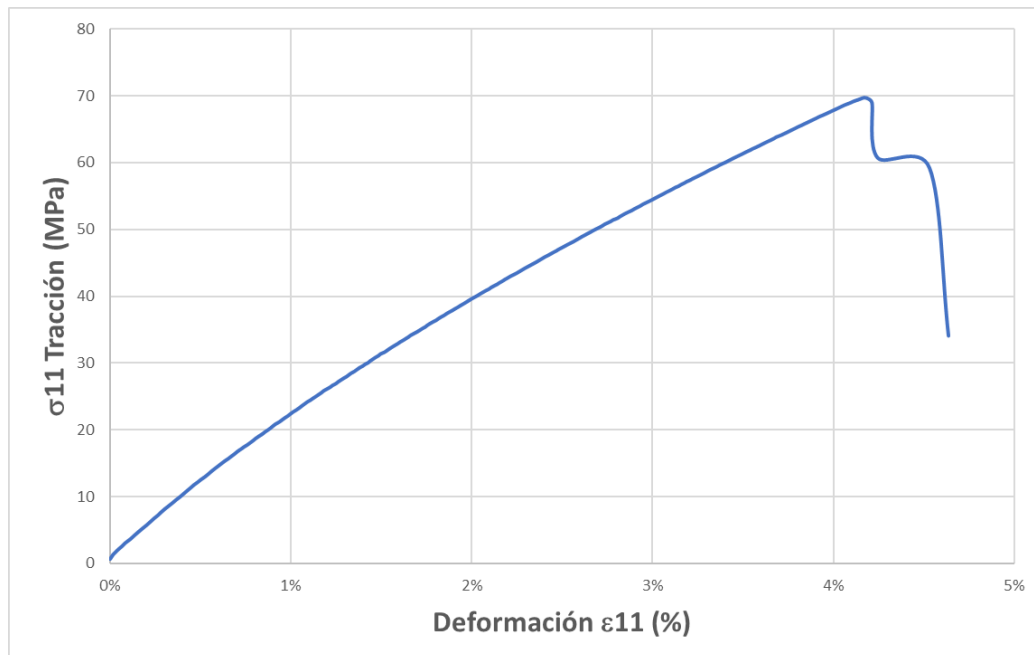


ILUSTRACIÓN 57. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO45°FV3.

En las probetas con fibra de vidrio a 45° se obtenían unos resultados menos lineales que los obtenidos con la fibra de vidrio a 0°.

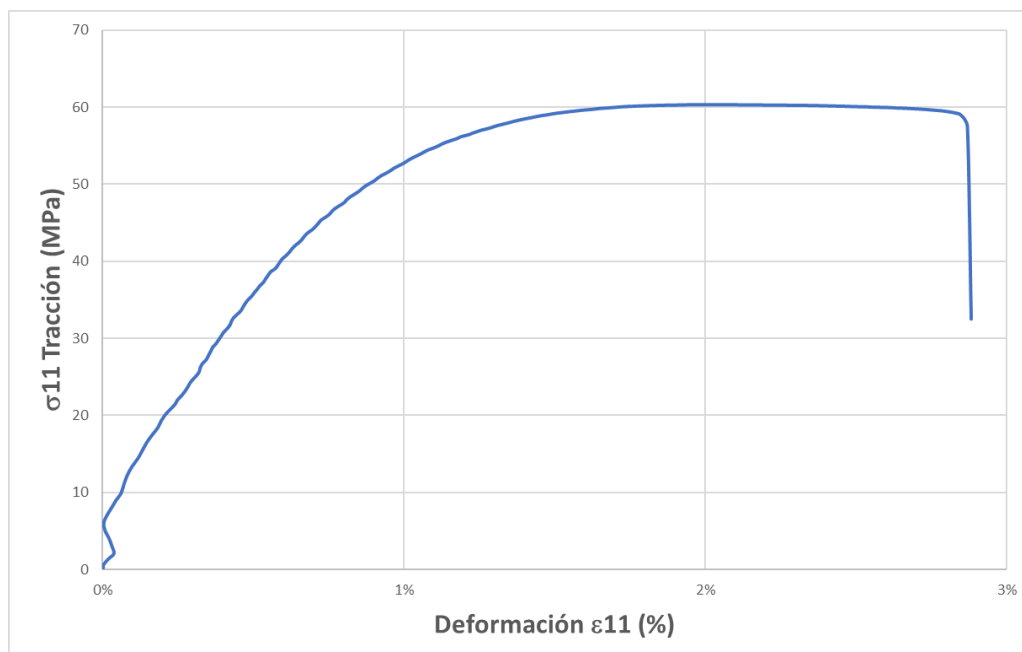


ILUSTRACIÓN 58. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPPET1.

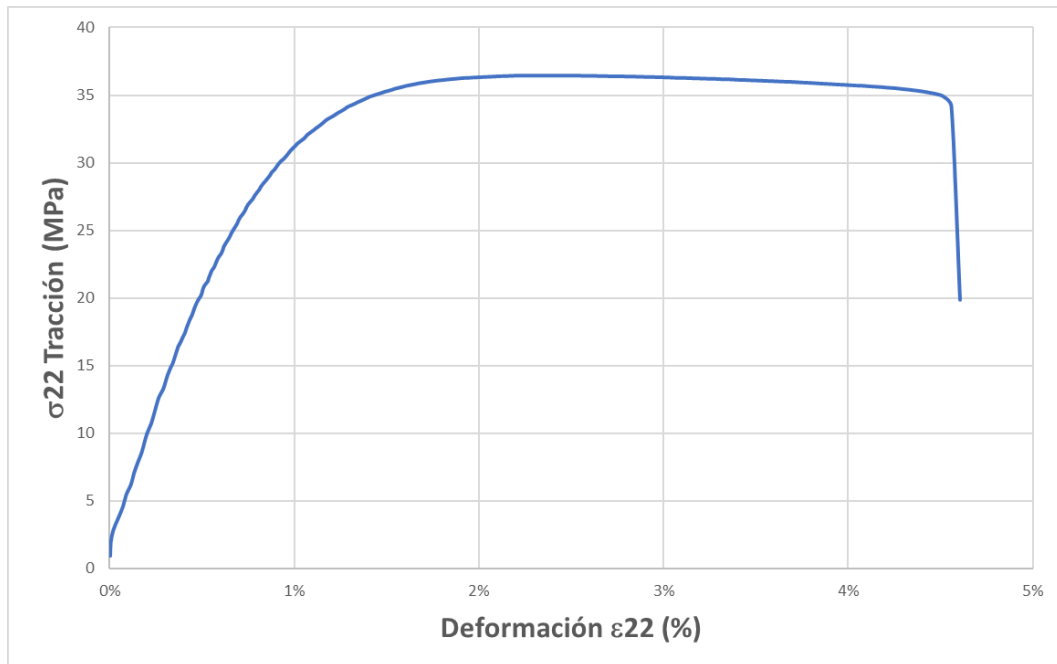
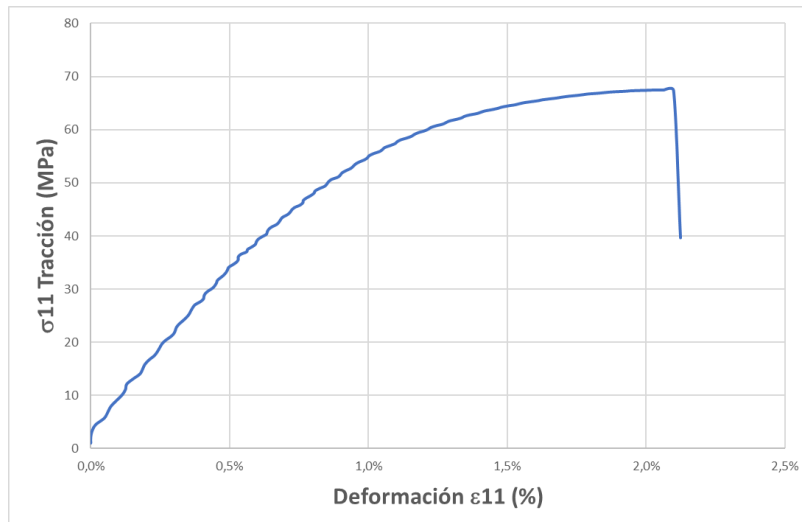
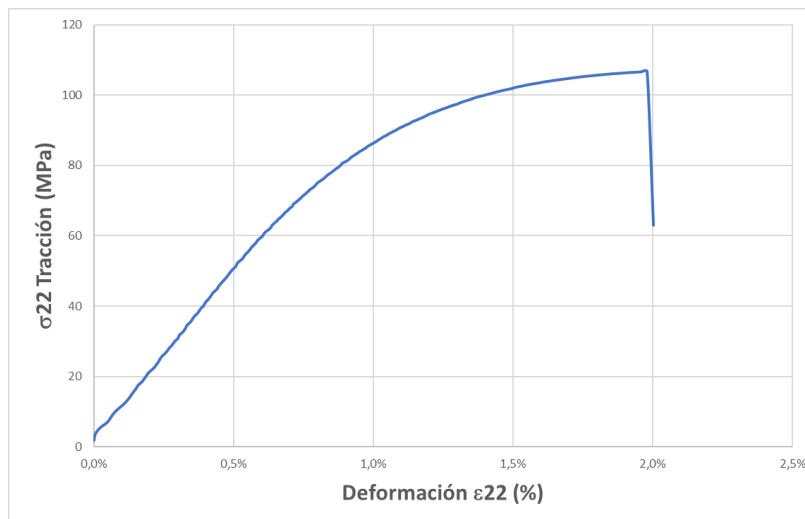
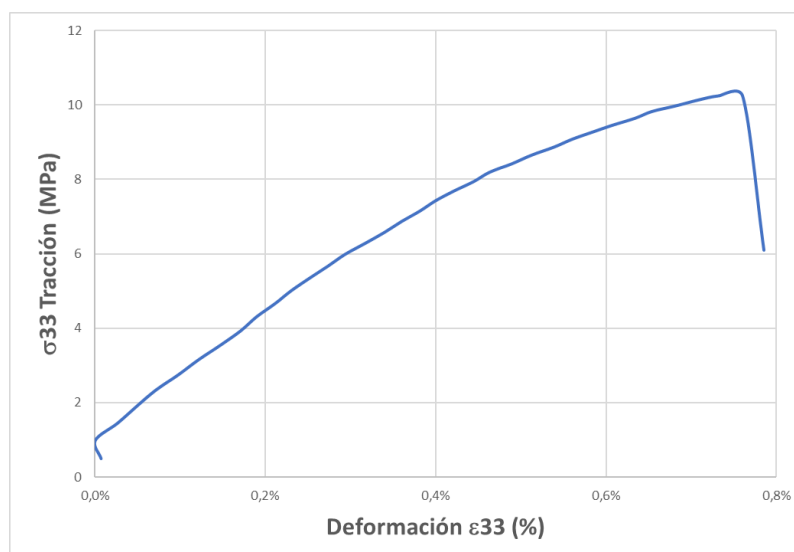


ILUSTRACIÓN 59. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TDCPET5.



ILUSTRACIÓN 60. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TVPET1.

En las ilustraciones 57, 58 y 59 se puede observar los datos obtenidos para el PET con fibra de carbono, el cual posee un comportamiento muy parecido al del onyx en todas sus propiedades, excepto en la tensión tercera, pues como se ha comentado anteriormente, este material y la poliamida con fibra de carbono se fracturaban por separación de capas, obteniendo de esta manera unas resistencias muy bajas en comparación a las del onyx.

**ILUSTRACIÓN 61.** Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPPA2.**ILUSTRACIÓN 62.** Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TDCPA3.**ILUSTRACIÓN 63.** Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TVPA1.

En las ilustraciones 60, 61 y 62 se puede observar prácticamente el mismo comportamiento que el PET, exceptuando de que la poliamida obtiene unas mayores tensiones en todas sus propiedades.

5.2. Ensayo a cortante ASTM D5379 – ASTM D7078

La norma ASTM D5379 determina las tensiones transversales de los materiales reforzados con fibra, tanto con fibra continua como con microfibra insertada en el material base.

5.2.1. Descripción del ensayo

Con la norma ASTM D5379 se obtiene la tensión última transversal, su correspondiente deformación, el módulo de elasticidad transversal y la curva tensión-deformación. Además, se pueden obtener dichas propiedades en todos los planos del material, ofreciendo de esta manera una mayor cantidad de información. Como se ha comentado anteriormente, en dicha norma se especifica la dirección de impresión que deben poseer las probetas para obtener cada propiedad.

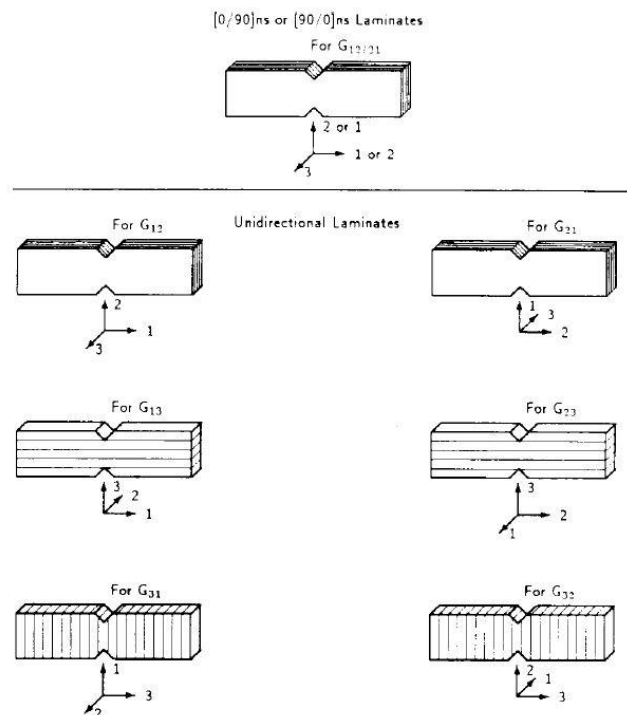


ILUSTRACIÓN 64. Planos de orientación para las diferentes propiedades.

La norma nos indica que las probetas deben de ser estudiadas en una máquina de ensayos adecuada con unas determinadas mordazas, las cuales fueron realizados los primeros ensayos con ellas. Pero después de estos ensayos se apreció que las probetas fallaban por

pandeo, este fenómeno se debía a que las probetas deslizaban en dichas mordazas, por lo que no llegaban a fracturarse.

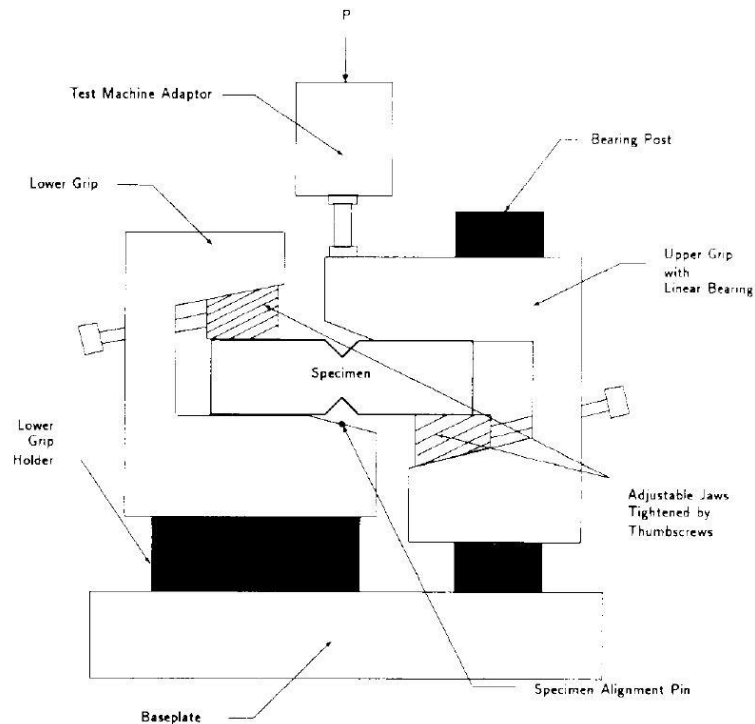


ILUSTRACIÓN 65. Mordazas norma ASTM D5379.

Para remediar dicho efecto se probó a realizar los ensayos con las mordazas recién fabricadas para otro trabajo final de grado, las cuales correspondían a la norma ASTM D7078. Realizando las primeras pruebas se consiguió duplicar las tensiones en los mismos modelos ensayados anteriormente, además de obtener su fractura.

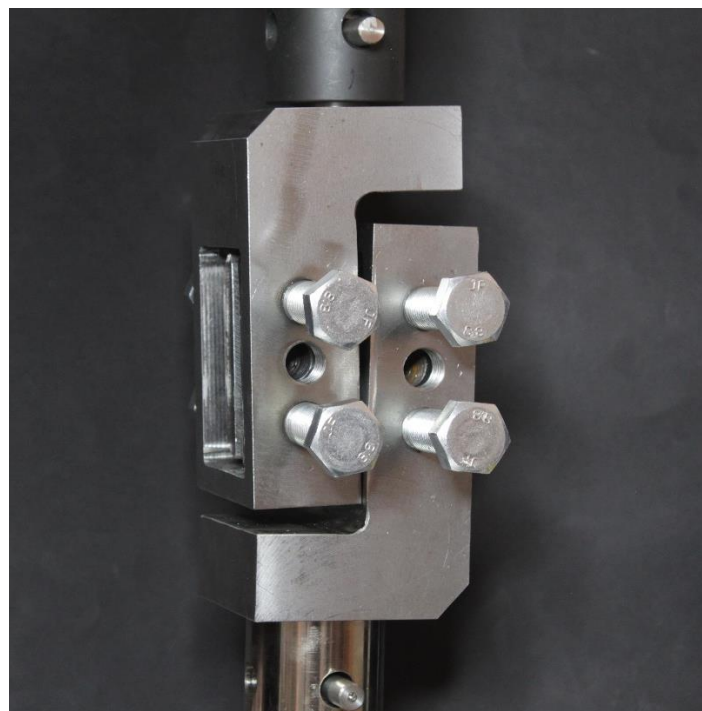


ILUSTRACIÓN 66. Mordazas norma ASTM D7078.

Para medir la deformación que sufre la probeta nos recomienda utilizar unas galgas extensiométricas, pero al igual que los demás ensayos se utilizará extensómetros virtuales mediante el proceso de correlación digital de imágenes.

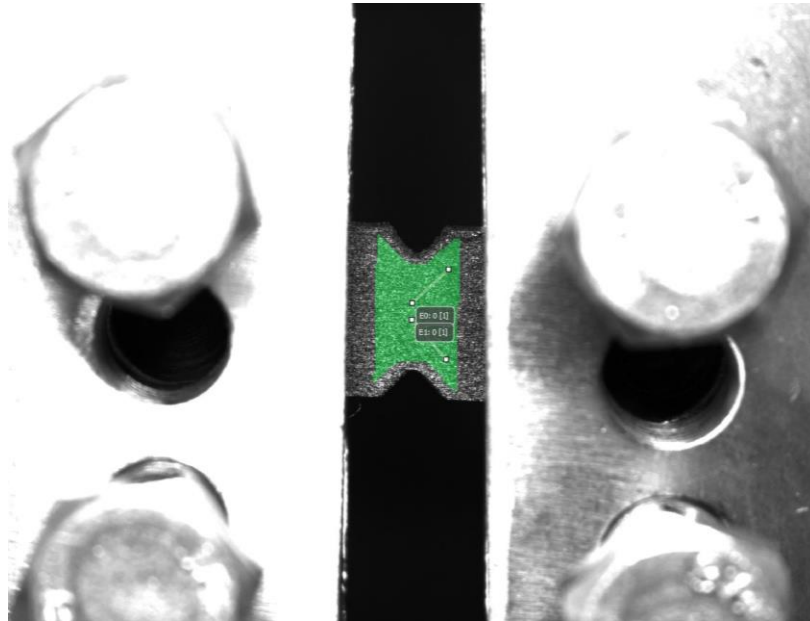


ILUSTRACIÓN 67. Extensómetro digital por correlación digital de imágenes para probeta de cortante.

Antes de iniciar los ensayos, la norma nos recomienda realizar la medición de la sección central, la cual será la utilizada para obtener la tensión transversal.

Para la velocidad de ensayo nos recomienda que sea la adecuada para que el fallo de la probeta se produzca en un intervalo de entre 1 y 10 minutos, y que la tasa de deformación sea constante. La norma aconseja una velocidad de 2 mm/min.

5.2.2. Procedimiento experimental

Al igual que en los demás procesos, se comienza con la medición de la sección central de la probeta. Posteriormente, se aplica el moteado para la correlación digital de imágenes y se espera aproximadamente 20 min para que la pintura se seque. En el caso de las probetas de cortante y de compresión no es necesario realizar unas marcas de referencia, pues en las mismas fotografías tomadas se puede tomar distancias ya medidas. En el caso de las probetas de cortante se toma la distancia central, y en las de compresión se toma su longitud total.

Como se ha comentado anteriormente, una vez tenemos las probetas preparadas las colocamos en las mordazas correspondientes al ensayo de cortante, y en la misma máquina utilizada para los ensayos a tracción (INSTRON 5567 – A).

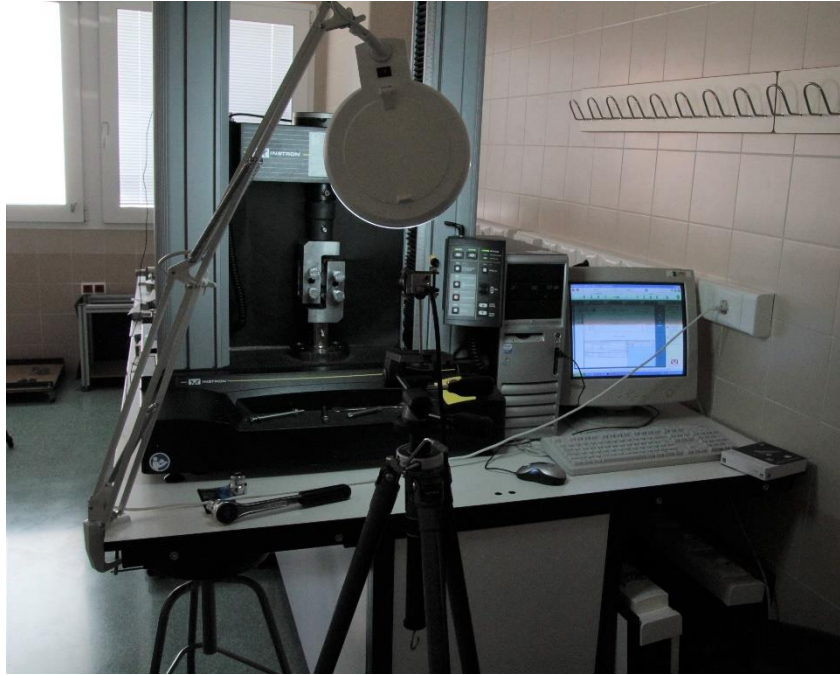


ILUSTRACIÓN 68. Montaje experimental ensayo a cortante.

Al igual que los demás ensayos, se toman las fotografías con la cámara de alta resolución para procesarlas por la correlación digital de imágenes.

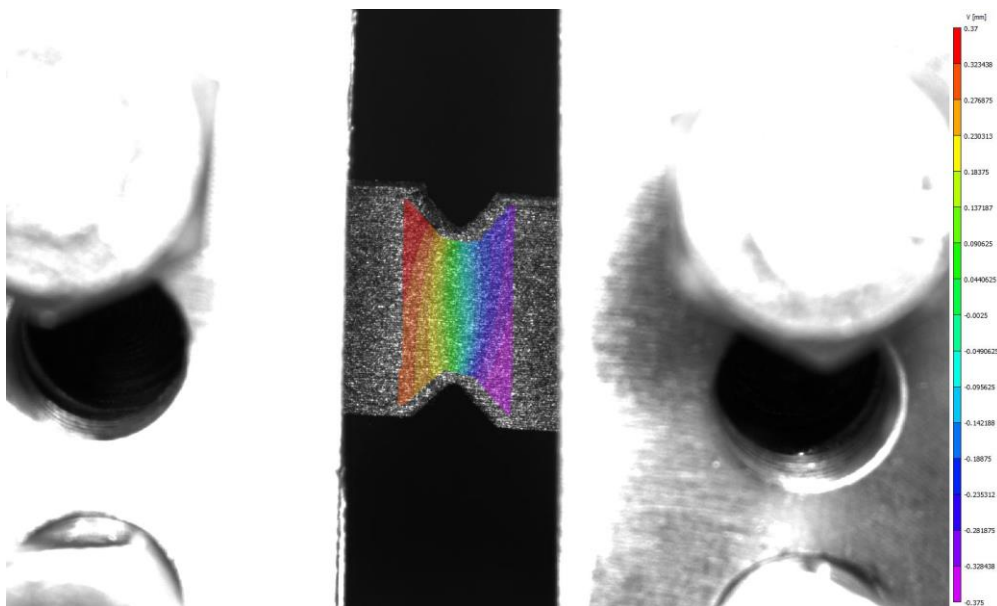


ILUSTRACIÓN 69. Fotografía durante el proceso de la correlación digital de imágenes.

5.2.3. Cálculos e interpretación de resultados

La norma nos indica cómo obtener la tensión última transversal, su correspondiente deformación angular, el módulo y el límite elástico transversal.

Para el cálculo de las tensiones de cortante se utilizadas las siguientes ecuaciones:

$$A = w \cdot h$$

$$\tau_i = P_i/A$$

Donde:

A = Sección central transversal [mm²]

w = espesor medio de la probeta [mm]

h = ancho central de la probeta [mm]

τ_i = Tensión transversal en el punto "i" de la medición [MPa]

P_i = Carga en el punto "i" de la medición [N]

Para obtener la tensión cortante última básicamente seleccionamos la máxima carga obtenida y le aplicamos la siguiente ecuación:

$$F^u = P^u/A$$

Donde:

F^u = Tensión cortante última [MPa]

P^u = Carga máxima antes de la rotura [N]

Como se ha comentado anteriormente la deformación se obtiene a partir de la correlación digital de imágenes y no por galgas extensiométricas.

Con respecto al módulo de elasticidad transversal, la norma nos recomienda calcularlo entre un rango de deformaciones limitado por 1500 $\mu\epsilon$ y 4000 $\mu\epsilon$.

Para su obtención se utiliza la siguiente ecuación:

$$G^{chord} = \Delta\tau/\Delta\gamma$$

Donde:

$$G^{chord} = \text{Módulo de elasticidad transversal [GPa]}$$

$\Delta\tau$ = Diferencia de las tensiones transversales aplicadas entre el rango de deformaciones [MPa]

$\Delta\gamma$ = Diferencia de las deformaciones entre el rango definido [1500, 4000] $\mu\epsilon$

La norma propone un método para obtener el límite elástico transversal, para ello se necesita trasladar la recta del módulo de elasticidad transversal a un valor fijo del eje de deformaciones, cuyo valor nos recomienda que sea del 0,2%. Dicha recta cruza con la curva tensión-deformación en un determinado punto, el cual es el límite elástico transversal. En la siguiente ilustración se muestra un ejemplo que nos propone la norma:

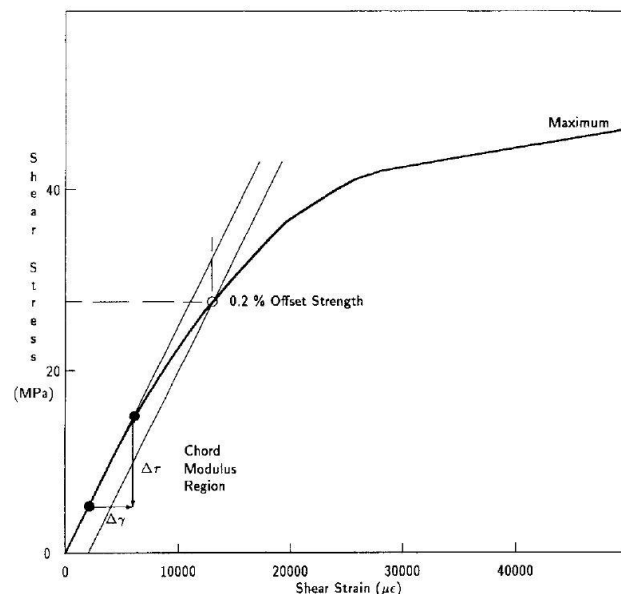
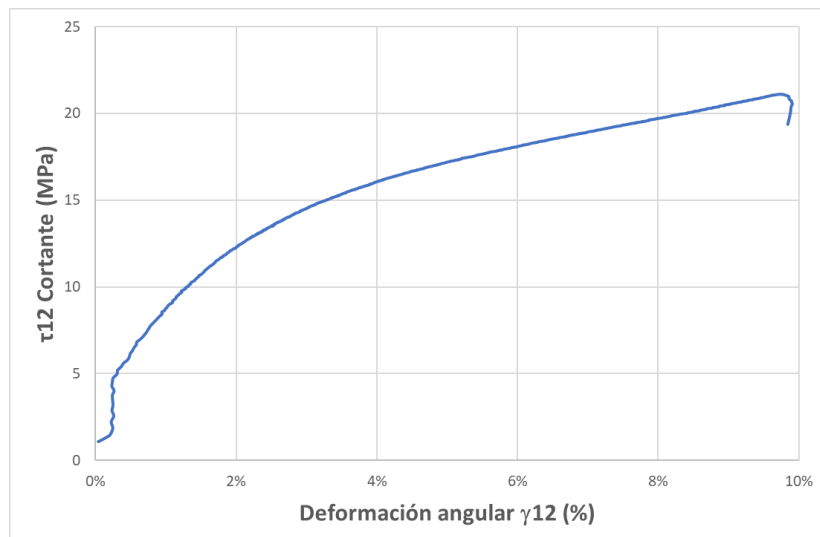
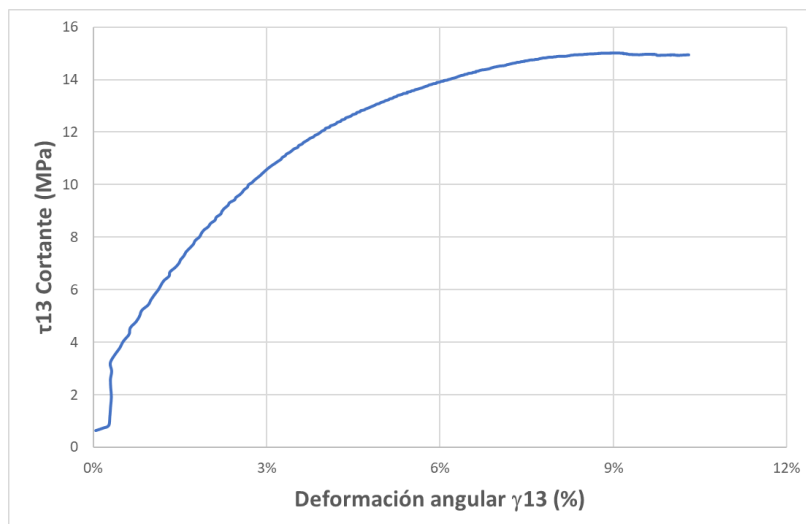
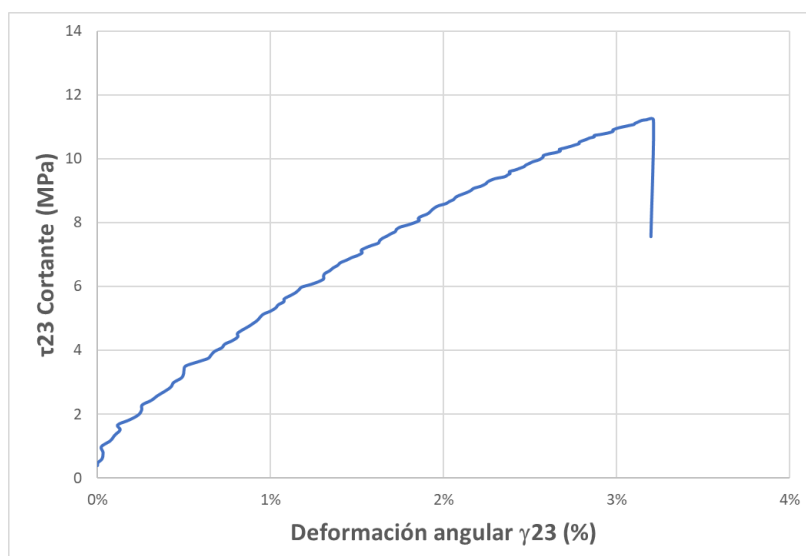


ILUSTRACIÓN 70. Curva tensión-deformación de la norma ASTM D5379.

5.2.4. Resultados obtenidos

Prácticamente todas las probetas imprimidas planas fallaron en la zona de los agarres, en el caso de las probetas imprimidas de canto, la mayoría se fracturaron en su parte central, mientras que las probetas imprimidas verticalmente se fracturaron tanto por su parte central y sus zonas de agarre. Cabe destacar que las probetas imprimidas verticalmente fallaron por separación de capas, al igual que las de tracción y las de compresión.

A continuación, se muestra una serie de curvas tensión-deformación directamente obtenidas de la máquina de ensayos y de la correlación digital de imágenes.

**ILUSTRACIÓN 71.** Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPO3.**ILUSTRACIÓN 72.** Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORDCO4.**ILUSTRACIÓN 73.** Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORVO2.

Como se puede observar en las ilustraciones 71, 72 y 73, al igual que las curvas tensión-deformación de las probetas a tracción, existen zonas de ruido que deben ser eliminadas. Estas zonas se producen por la recolocación de las probetas al principio del ensayo y su fractura al final de este.

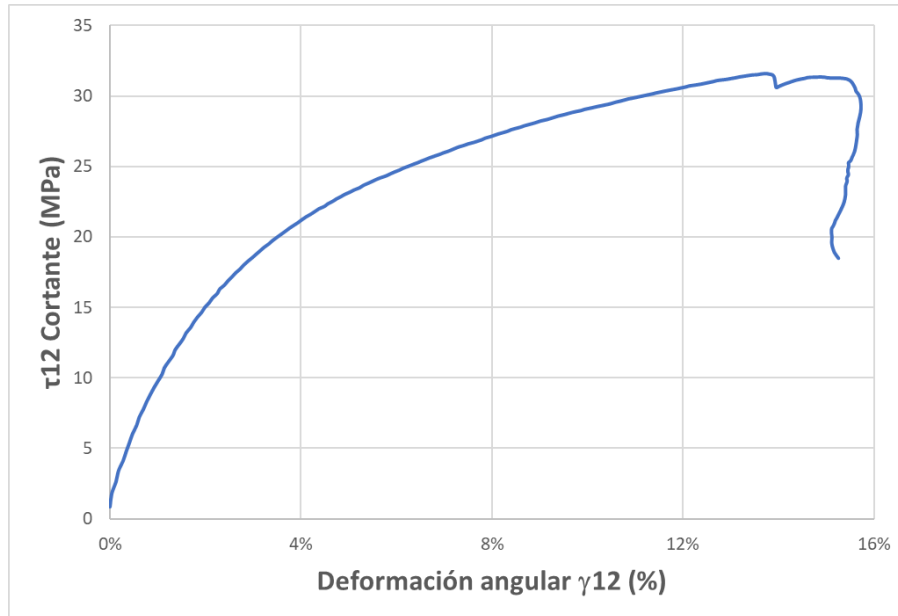


ILUSTRACIÓN 74. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPO0°FV2.

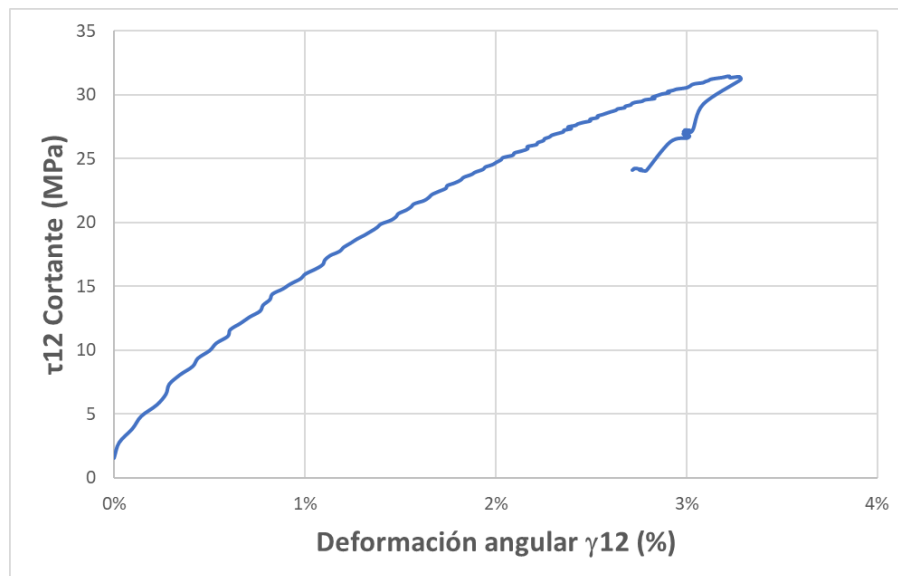


ILUSTRACIÓN 75. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPO45°FV3.

Cabe destacar que en las probetas de cortante existe en muy poca medida la zona de ruido inicial, pues esto se puede deber a que las probetas se han colocado perfectas para que no exista ningún deslizamiento entre las mordazas y estas.

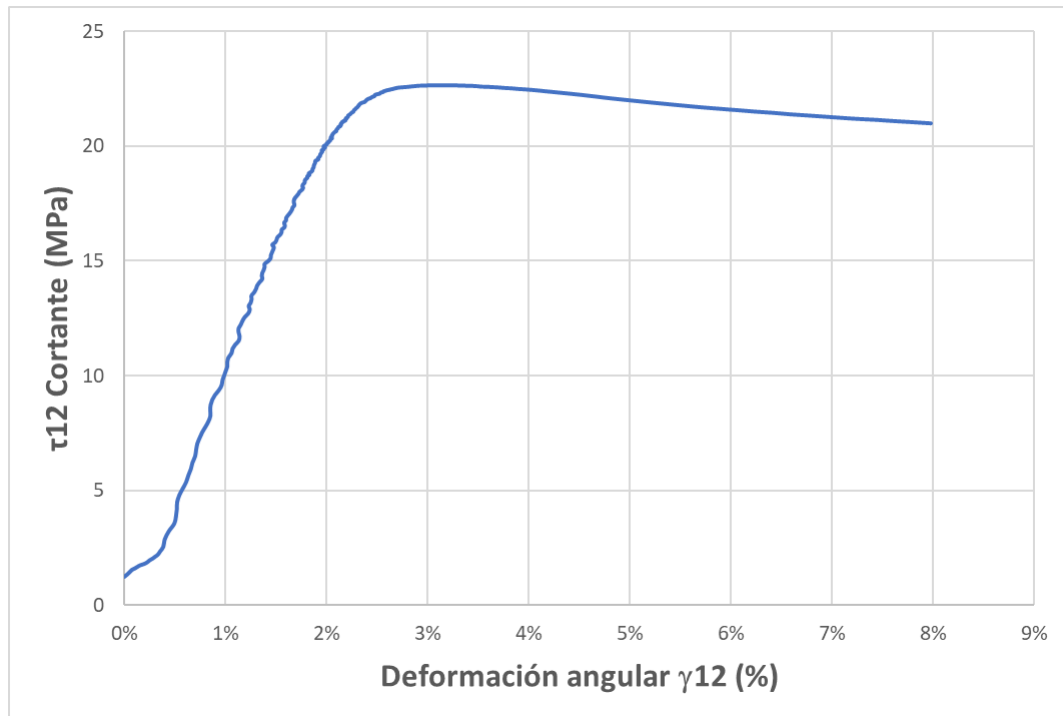


ILUSTRACIÓN 76. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPPET5.

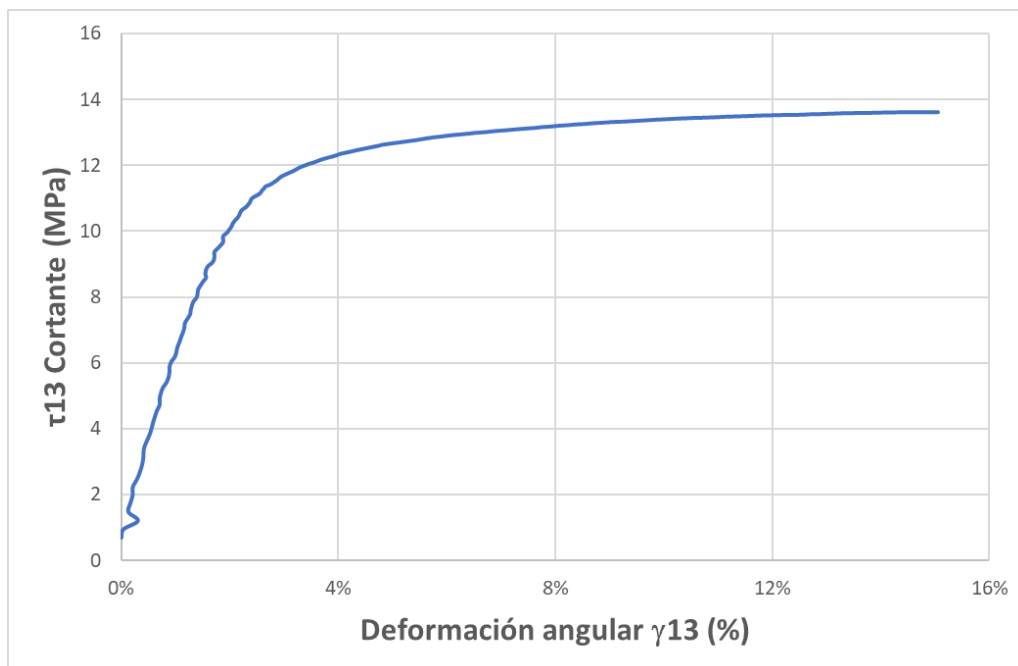


ILUSTRACIÓN 77. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORDCPET5.

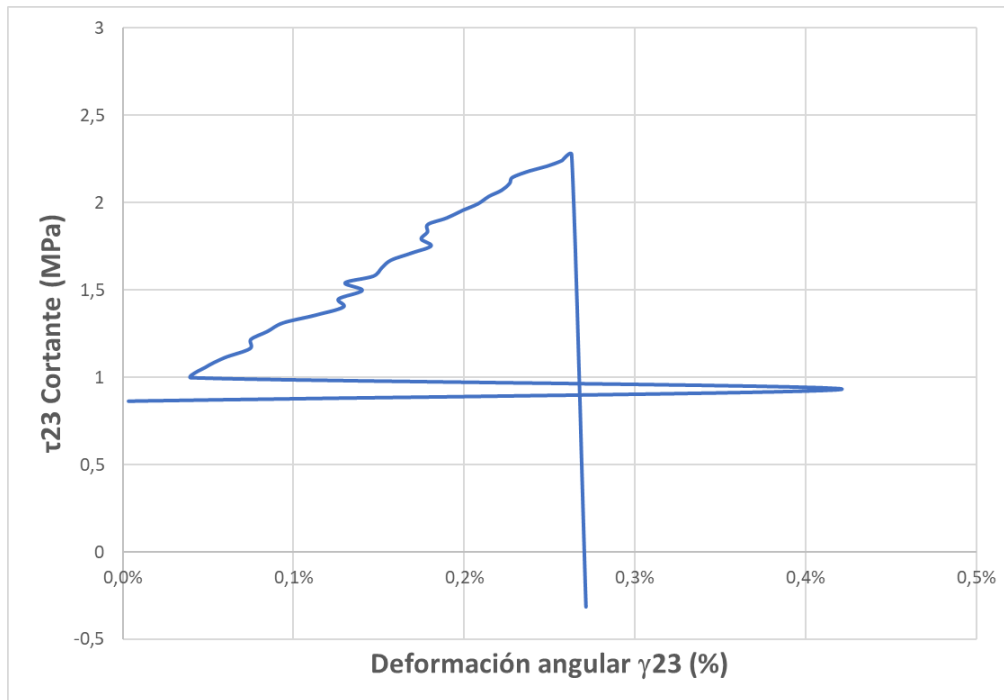


ILUSTRACIÓN 78. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORVPET4.

Como se ha comentado anteriormente las probetas imprimidas verticalmente fallaban simplemente con colocarlas en las mordazas, en el caso de que no se fracturasen en su colocación, una vez que comenzaba el ensayo fallaban aproximadamente en treinta segundos. Este suceso se puede comprobar en la ilustración 78, en la cual se puede observar que existe bastante ruido y que su fractura es repentina.

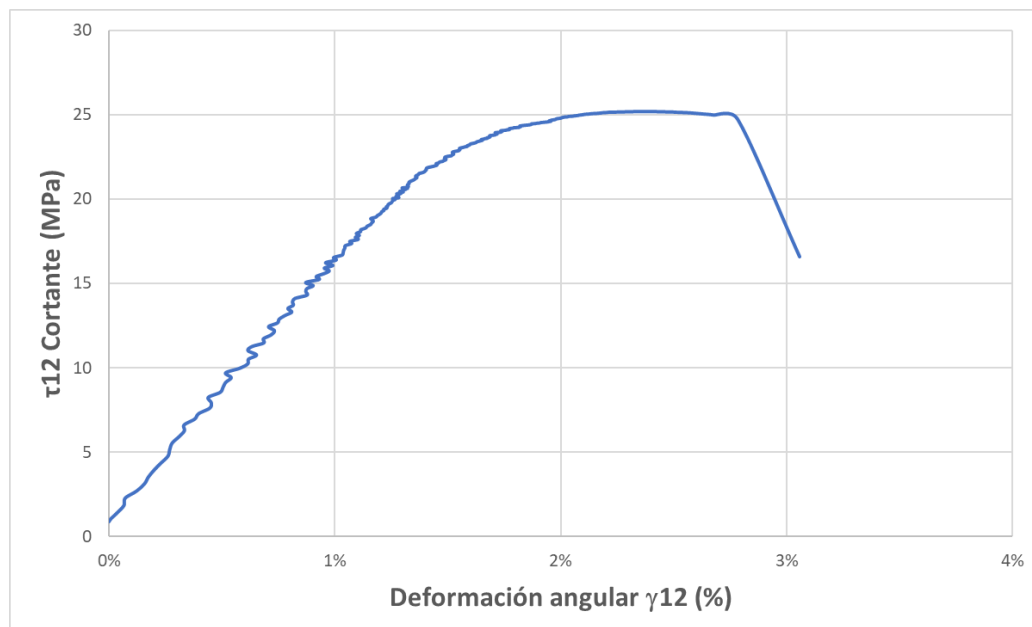


ILUSTRACIÓN 79. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORPPA1.

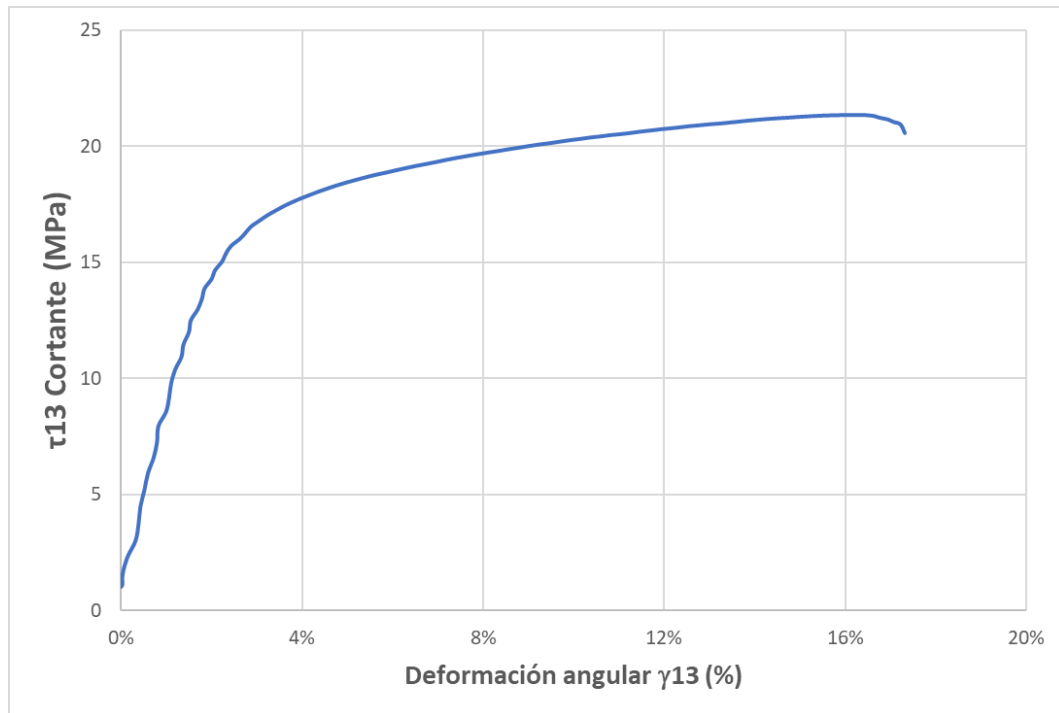


ILUSTRACIÓN 80. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORDCPA3.

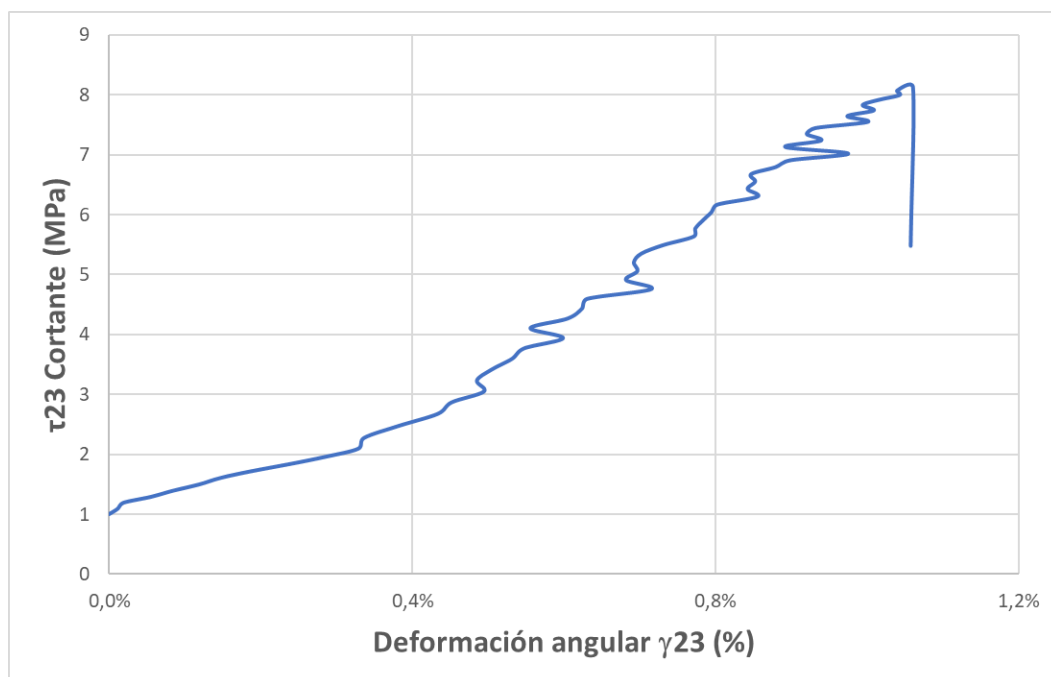


ILUSTRACIÓN 81. Tensión cortante-Deformación angular sin procesar de la probeta CORVPA4.

Después de observar las diferentes curvas obtenidas, podemos llegar a la conclusión de que prácticamente todos los materiales tienen un comportamiento y una tendencia similar en cada una de sus propiedades respectivamente.

5.3. Ensayo a compresión UNE EN ISO 604

Esta norma nos permite caracterizar las propiedades de compresión de los plásticos, incluidos los compuestos y reforzados con fibra. Con este método se puede determinar la resistencia a compresión, el módulo en compresión y otros aspectos relacionados con la curva tensión-deformación en compresión.

5.3.1. Descripción del ensayo

La norma nos indica que los ensayos se deben realizar en una máquina de ensayos que cumpla con la norma ISO 5893. Para ello se ha utilizado la máquina de ensayos del departamento de ciencias de los materiales de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, la 810 Material Test System. En el caso de la obtención de las deformaciones nos indica que deben de ser realizadas por extensómetros físicos, pero al igual que los demás ensayos se utilizará la correlación digital de imágenes para su obtención.

También nos indica que la máquina debe ser capaz de mantener la velocidad de ensayo constante con una tolerancia $\pm 20\%$. A diferencia de los demás ensayos realizados, este estudio no se encuentra limitado por un rango de tiempo para su realización, pero si está limitada la velocidad según la propiedad que queramos estudiar. Pero al estudiar el módulo y la resistencia, estas propiedades poseen la misma velocidad de 1mm/min debido a la longitud de la probeta (50 mm).

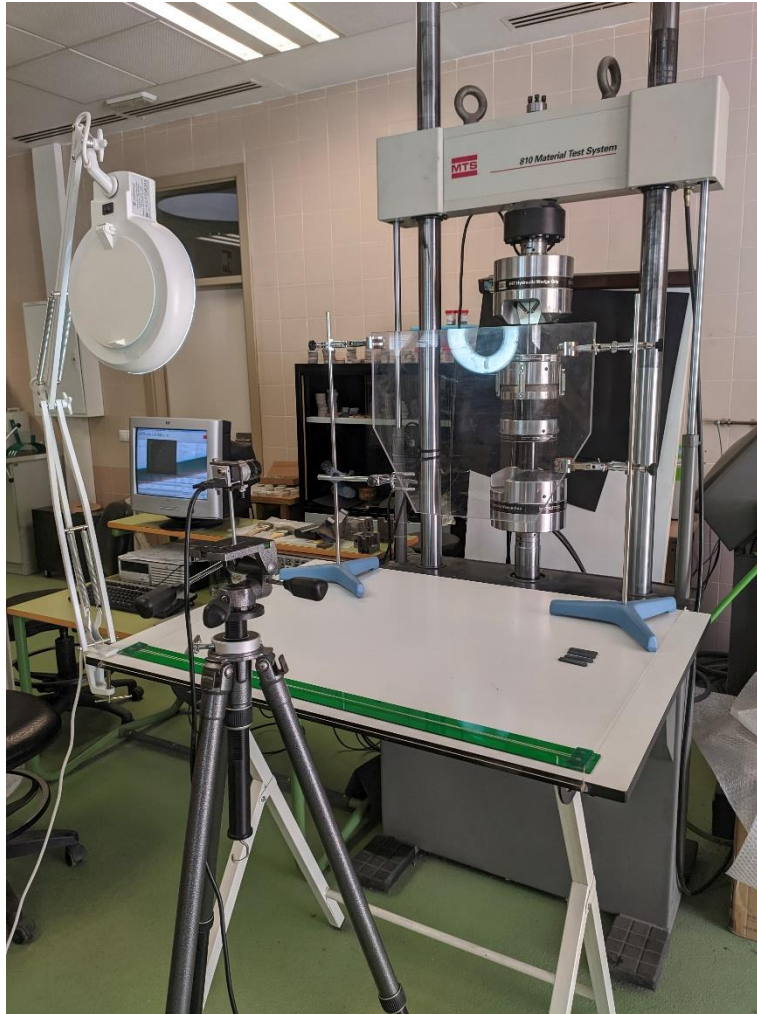


ILUSTRACIÓN 82. Máquina de ensayos a compresión.

Básicamente el principio del ensayo se basa en que la probeta se comprime a lo largo de su eje principal, a velocidad constante, hasta que rompe o hasta que la carga disminuye hasta un valor determinado. Durante este proceso, se mide la carga soportada por la probeta.

Para la obtención de las propiedades de compresión en diferentes direcciones, se ha seguido lo expuesto anteriormente. Dependiendo del método de impresión seguido por la norma ASTM D5379 y la ilustración 14 se obtendrán la diagonal de tensiones de compresión.

5.3.2. Procedimiento experimental

Al igual que los demás procesos experimentales, se empieza con la medición de las probetas, tres medidas tanto en su espesor como en su ancho. De esta manera obtenemos la sección media transversal, la cual es necesaria para obtener la resistencia a compresión.

Una vez medidas las probetas se realiza el moteado de ellas, y como se ha explicado en el proceso experimental de los ensayos a cortante, en estas probetas no es necesario realizar unas marcas de referencia, pues la referencia en este caso será la longitud de la probeta.

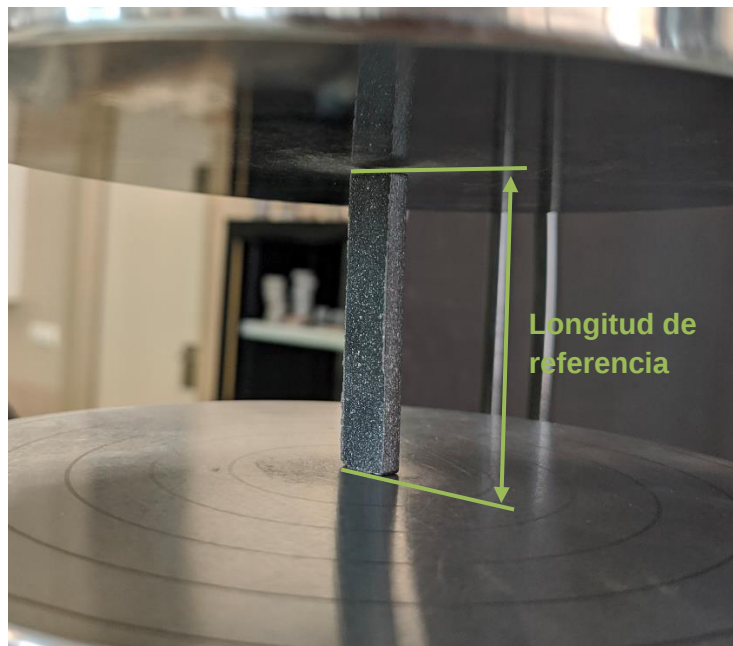


ILUSTRACIÓN 83. Probeta de compresión colocada y longitud de referencia.

Secado el moteado se coloca la probeta en las mordazas de compresión, que en este caso no posee ningún tipo de sujeción, pero si deben estar perfectamente colocadas en el centro del plato inferior de la máquina, como se puede observar en la ilustración 83.

Una vez colocada, se prepara la cámara de alta resolución y se procede a realizar el ensayo.

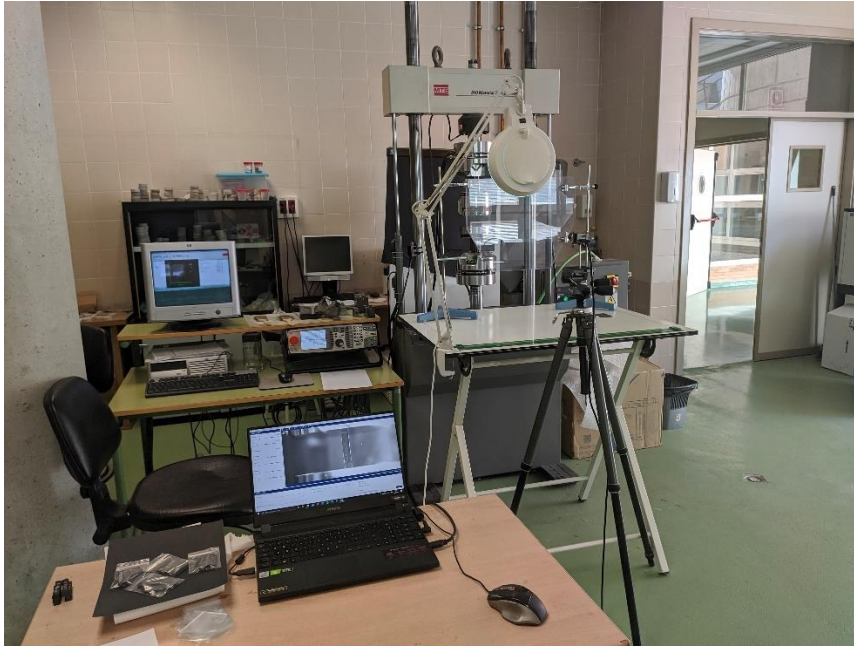


ILUSTRACIÓN 84. Montaje experimental ensayo a compresión.

Al igual que los demás ensayos se recogen los datos, tanto los de la máquina como las fotografías de la cámara, en las cuales solo se necesita representar un extensómetro digital en su procesamiento, pues solo se obtendrá la deformación longitudinal de la probeta.

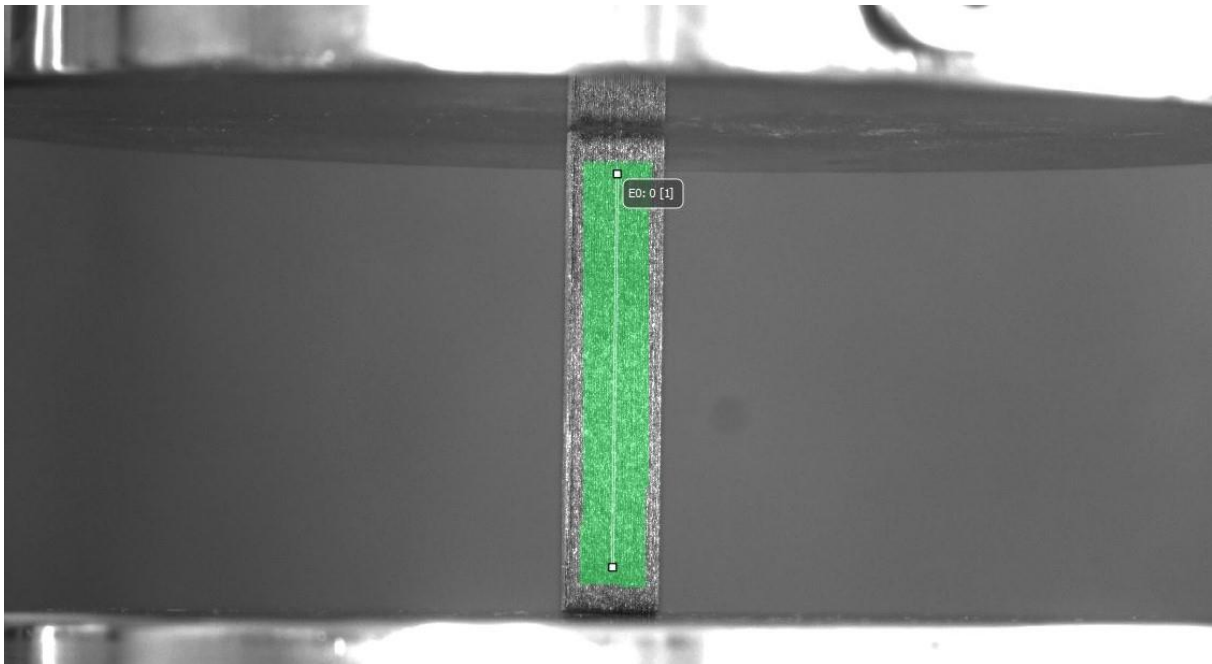


ILUSTRACIÓN 85. Extensómetro digital para los ensayos de compresión.

5.3.3. Cálculos e interpretación de resultados

Para el cálculo del esfuerzo de compresión se utiliza la siguiente ecuación:

Para el cálculo de las tensiones se utilizada las siguientes ecuaciones:

$$A = w \cdot h$$

$$\sigma = F/A$$

Donde:

A = Sección media transversal [mm²]

w = espesor medio de la probeta [mm]

h = ancho medio de la probeta [mm]

σ = Esfuerzo de compresión [MPa]

F = Fuerza medida [N]

Como se ha comentado anteriormente la deformación se obtiene a partir de la correlación digital de imágenes y no por un extensómetro físico.

Con respecto al módulo de compresión, la norma nos recomienda calcularlo entre un rango de deformaciones limitado por 500 $\mu\epsilon$ y 2500 $\mu\epsilon$.

Para su obtención se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

Donde:

E_c = Módulo de compresión [GPa]

σ_1 = Esfuerzo medido para un valor de deformación ϵ_1 de 0,0005 [MPa]

σ_2 = Esfuerzo medido para un valor de deformación ϵ_2 de 0,0025 [MPa]

Cabe destacar que el rango de deformaciones que nos recomienda la norma se puede modificar a nuestra conveniencia.

5.3.4. Resultados obtenidos

La gran mayoría de las probetas fallaban por pandeo, excepto las probetas imprimidas verticalmente de PET FC y PA FC, las cuales estallaron una vez que llegaban a su punto de máxima resistencia. Pues este hecho se basaba a la separación de capas ya explicada anteriormente. Debido a que estas probetas estallaban se procedió a implantar una placa de metacrilato delante de la máquina (ilustración 82 y 84), para que las partes de las probetas no llegaran a dañar a nadie.

Hay que destacar que en gran parte de las probetas ensayas a compresión se producía un efecto escalón, pero este no se debía a que existen dos módulos de compresión distintos en un mismo material. Este fenómeno se produce debido a que en el primer tramo conforme se presiona la probeta se rompen las cavidades que existen en su interior, una vez que se han destruido todas, vuelve a resistir con otra tendencia distinta hasta fracturar. Este efecto se puede observar claramente en las ilustraciones 90 y 92, en las cuales se puede observar un primer tramo con una pendiente y un tramo pequeño, seguidamente un tramo horizontal y por último el tramo en el cual se ensaya por completo la probeta.

A continuación, se mostrará una serie de ejemplos de las curvas esfuerzo-deformación de cada uno de los materiales y de cada una de sus propiedades:

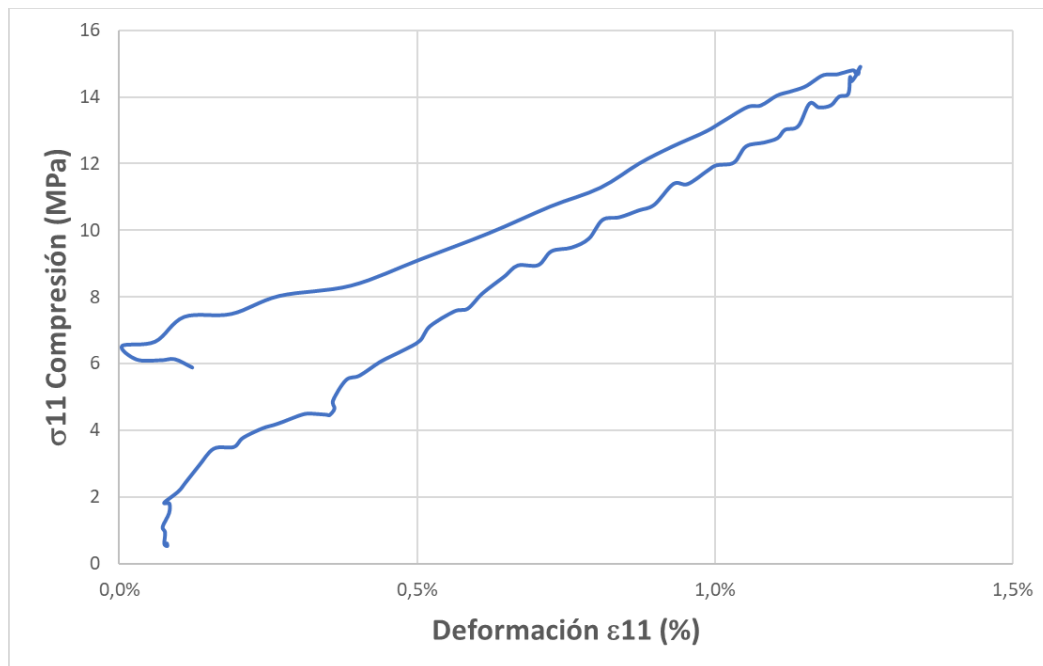


ILUSTRACIÓN 86. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPO4.

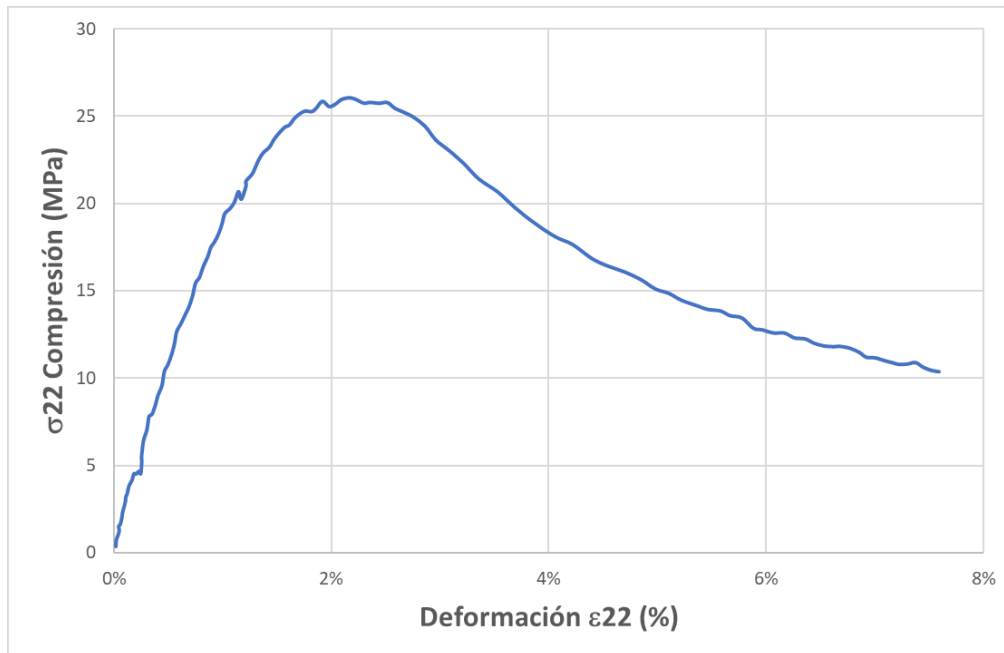


ILUSTRACIÓN 87. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMDCO5.

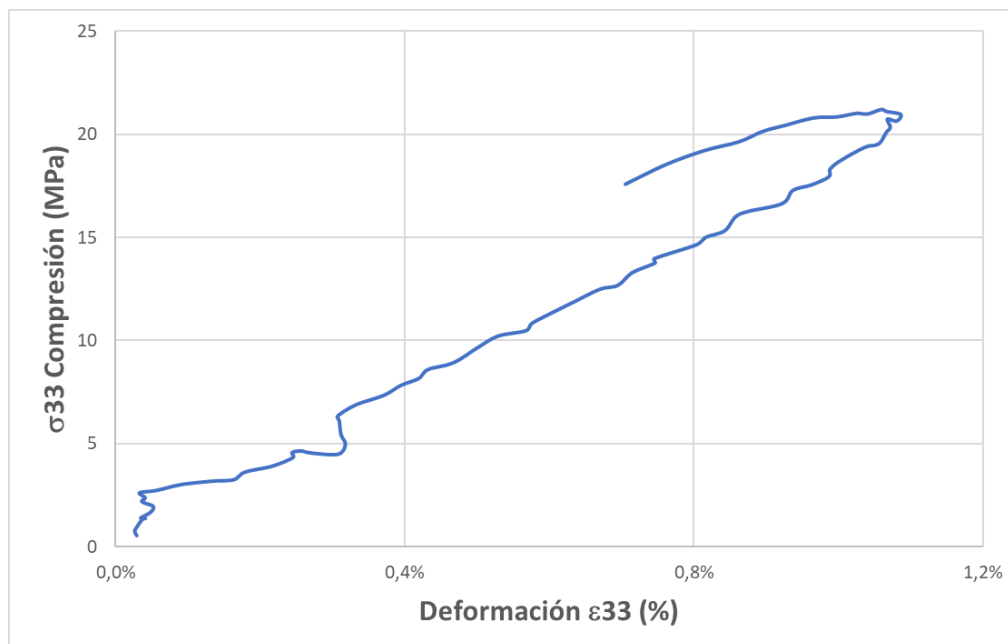


ILUSTRACIÓN 88. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMVO1.

En las ilustraciones 86 y 88 se puede observar que después de llegar al punto de máximo esfuerzo las deformaciones disminuyen, este efecto se produce debido al pandeo de las probetas. Pues este tramo, junto al inicial, en el cual se poros que existen en el interior de la probeta desaparecen debido a la compresión serán eliminados en su estudio.

En el caso de la ilustración 87, la probeta apenas pandeó en comparación a las demás, por lo que su procesado en la correlación digital de imágenes se pudo realizar al completo.

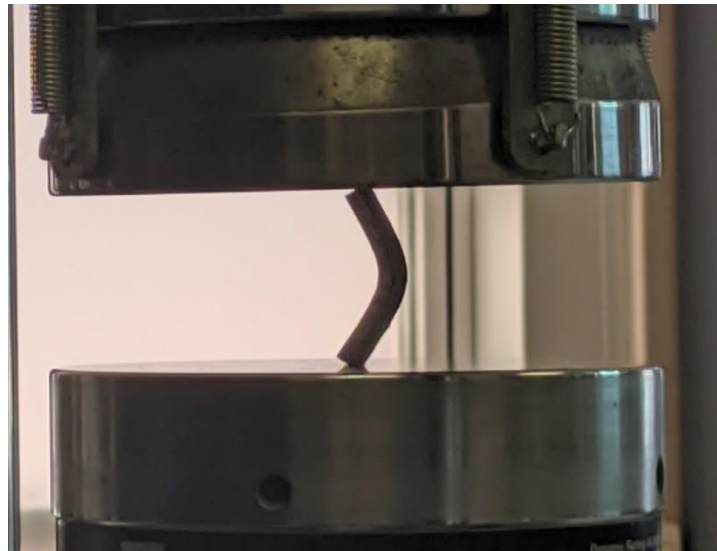


ILUSTRACIÓN 89. Pandeo producido en las probetas de compresión.

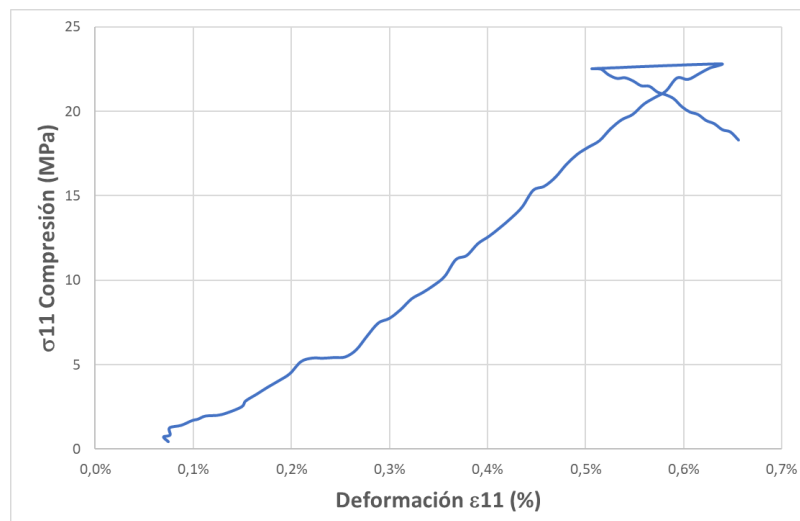


ILUSTRACIÓN 90. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPO0°FV5.

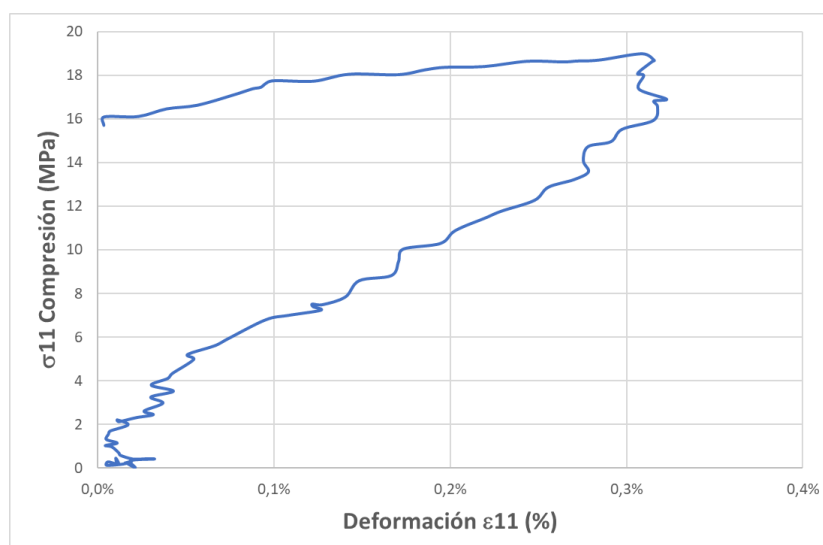


ILUSTRACIÓN 91. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPO45°FV4.

En el caso de las probetas de onyx con fibra de vidrio, se puede observar que existe un mayor ruido en los tramos iniciales, esto se puede deber a que, al existir fibra de vidrio en su interior, existe una mayor porosidad en la probeta, provocando de esta manera que exista unos diferentes tramos de esfuerzos, con distintas pendientes. Este fenómeno se puede observar con mayor claridad en la ilustración 90.

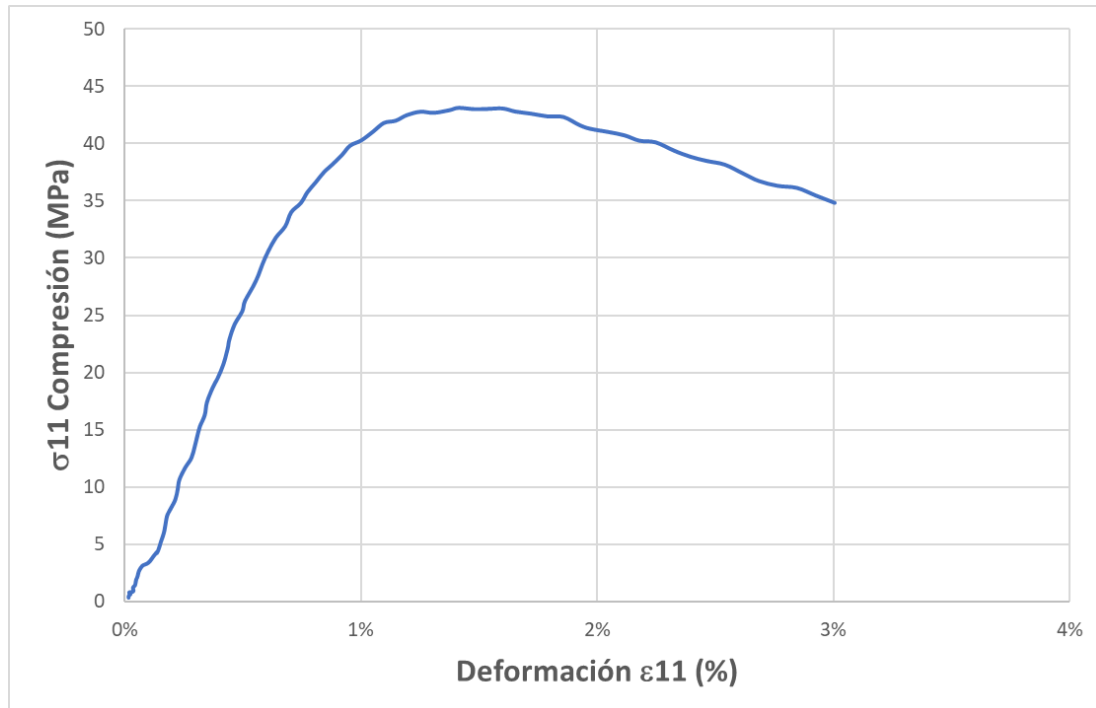


ILUSTRACIÓN 92. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPPET2.

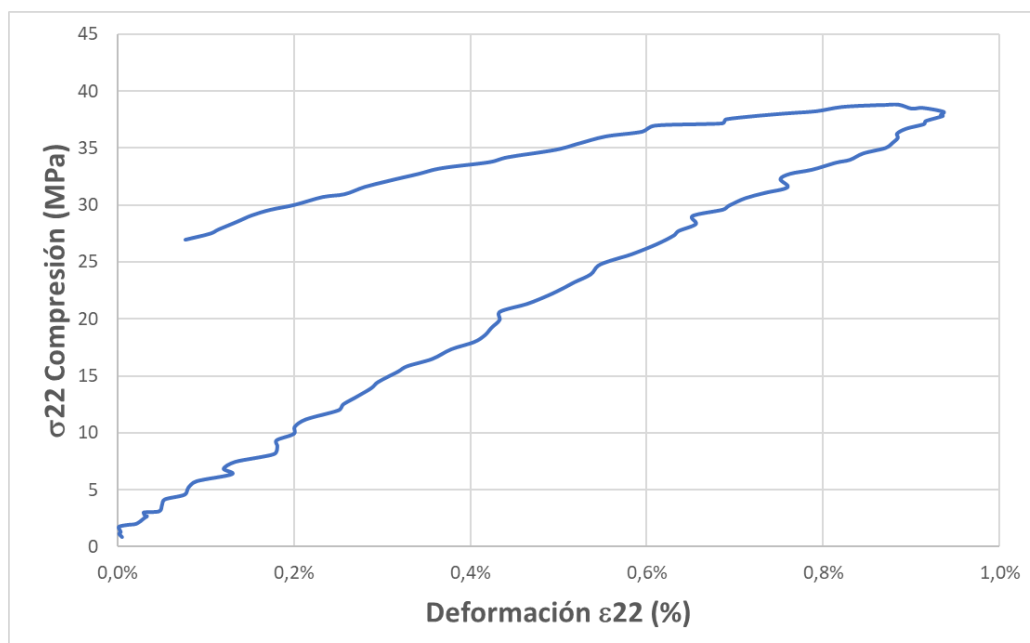


ILUSTRACIÓN 93. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMDCPET5.

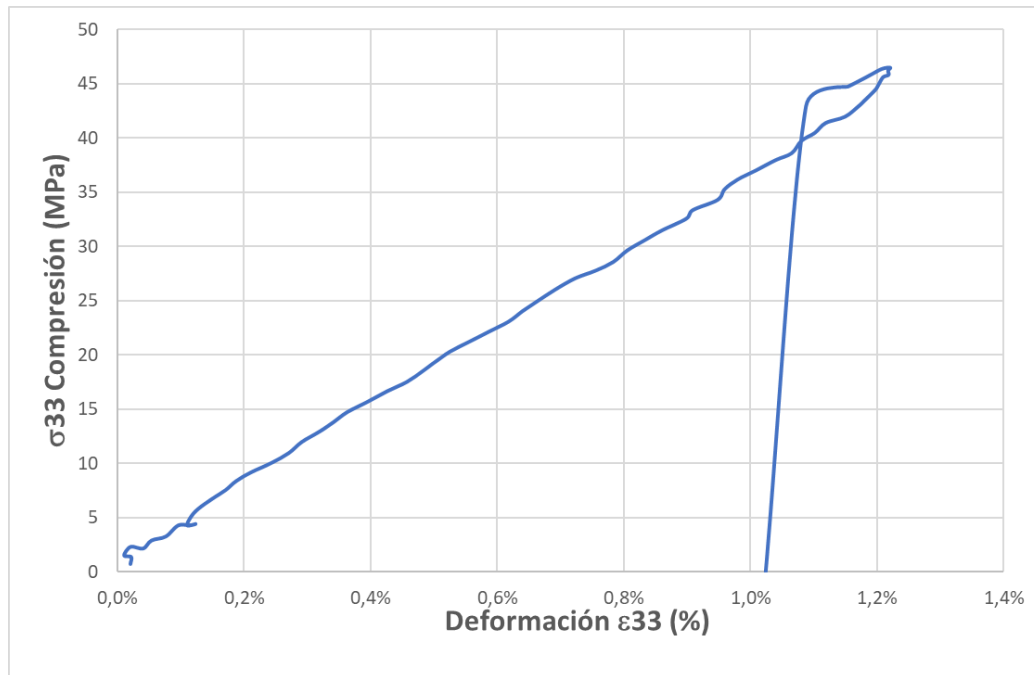


ILUSTRACIÓN 94. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMVPET1.

En las probetas de PET FC se puede observar todos los efectos mencionados, en la ilustración 92 se aprecia tramos con distintas pendientes al inicio del ensayo, en la ilustración 93 se observa el efecto del pandeo, mientras que en la ilustración 94 la fractura se da una manera repentina, como se ha explicado anteriormente, las probetas imprimidas verticalmente estallaban una vez que llegaban a sus esfuerzos máximos.



ILUSTRACIÓN 95. Probeta COMVPET3 ensayada.

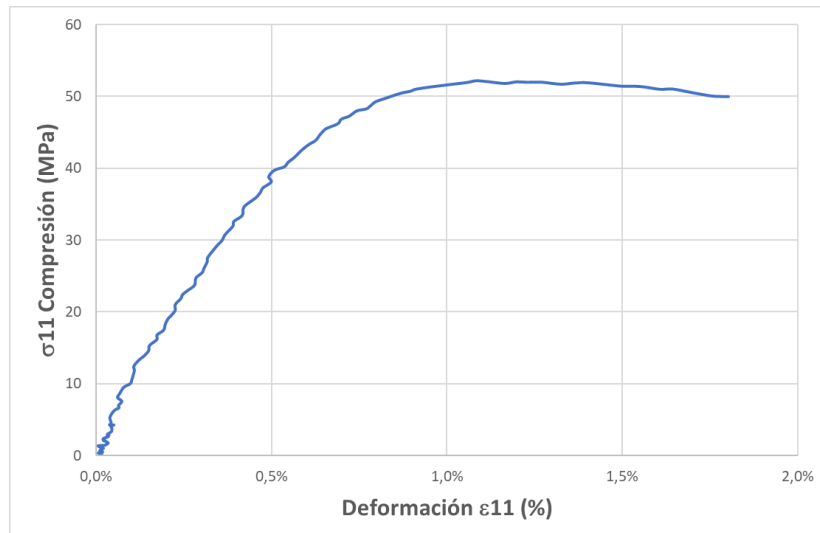


ILUSTRACIÓN 96. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMPPA4.

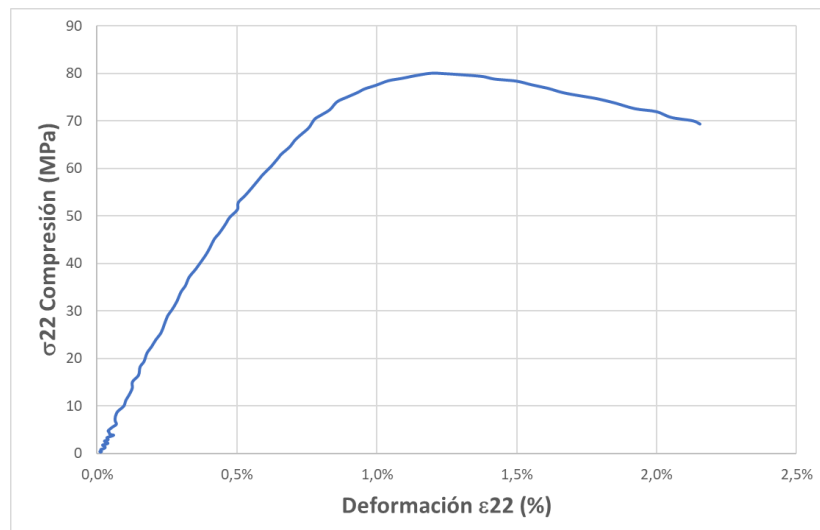


ILUSTRACIÓN 97. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMDCPA2.

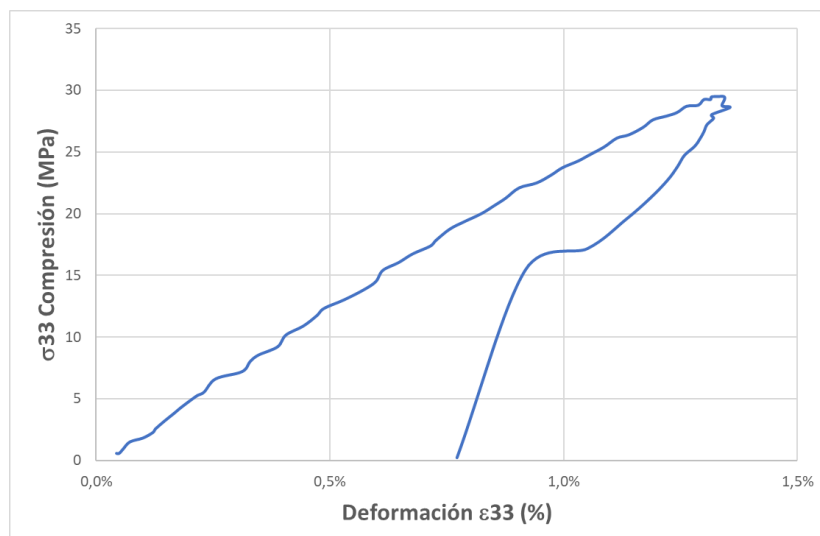


ILUSTRACIÓN 98. Esfuerzo a compresión-Deformación sin procesar de la probeta COMVPA2.

En el caso de las probetas de PA FC, estas poseen una menor tendencia a pandear en comparación a los demás materiales. Al igual que las de PET FC, las probetas imprimidas verticalmente estallan al llegar a su esfuerzo máximo.

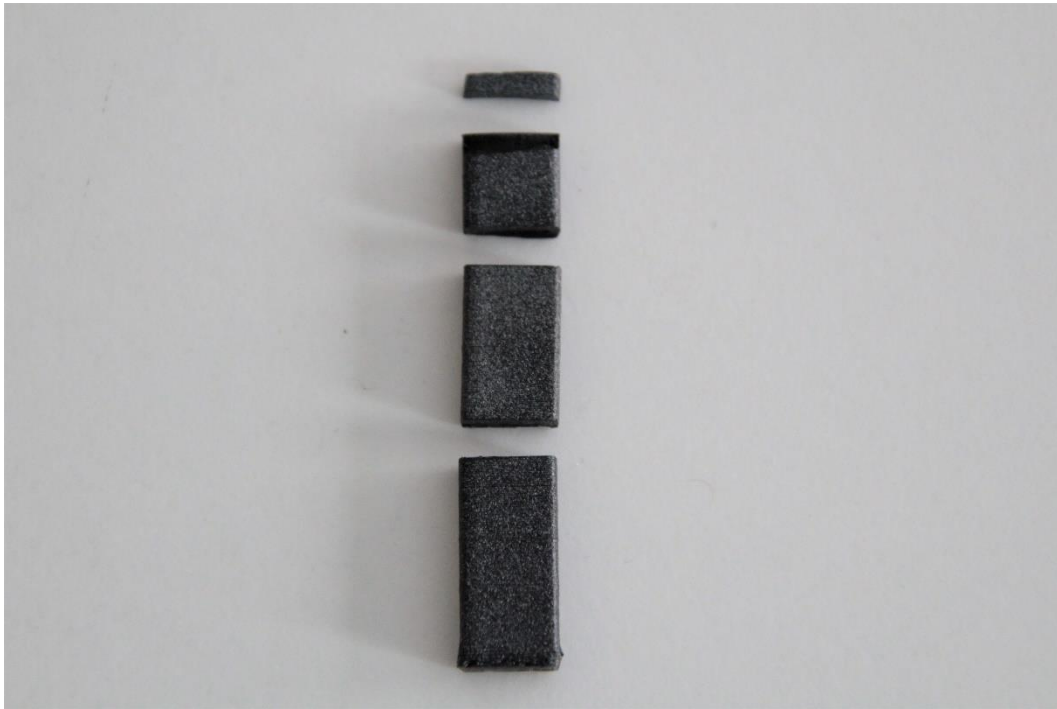


ILUSTRACIÓN 99. Probeta COMVPA2 ensayada.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Procedimiento general del análisis de resultados

Para explicar el procedimiento realizado en el análisis de resultados se tomará los resultados de la probeta TPO1 (tracción plana onyx 1). Se ha decidido tomar como ejemplo una probeta de tracción debido a que conlleva un mayor estudio que los demás ensayos.

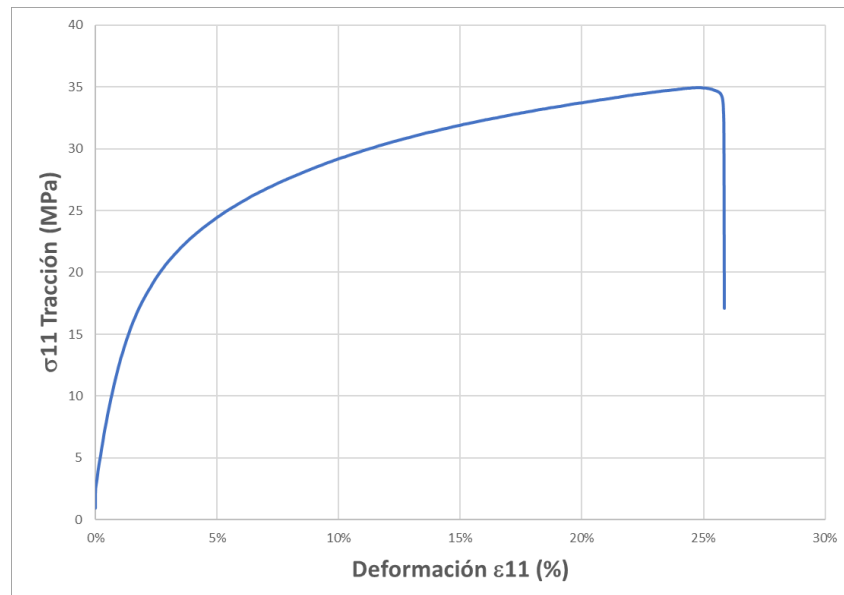


ILUSTRACIÓN 100. Tensión-Deformación sin procesar de la probeta TPO1.

En la ilustración 100 se muestra los datos directamente obtenidos de la máquina de ensayos y de la correlación digital de imágenes. Como se puede observar el punto inicial no comienza en el punto $[0,0]$. Para ello se obtuvo la ecuación que mostraba el módulo de elasticidad del material en el rango que nos indica la norma ASTM D3039 $[0,001; 0,003]\mu\epsilon$, con dicha ecuación se puede obtener el valor que provoca que la gráfica comience en el punto $[0, 0]$.

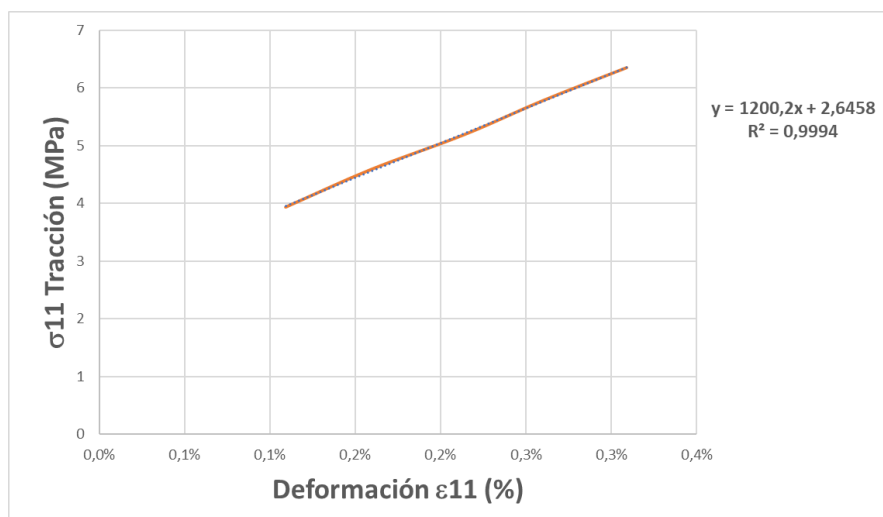


ILUSTRACIÓN 101. Ecuación módulo de elasticidad en el rango de deformaciones.

Como se puede observar en la ilustración 101 obtenemos una ecuación que nos indica el módulo de elasticidad del material (1200,2 MPa). Para que la gráfica comience en el punto [0, 0] necesitamos que la tensión cuando sea 0, el valor de las deformaciones. Para ello se despejó el valor de “x” cuando “y” es 0, obteniendo de esta manera un valor que se le debe sumar o restar, dependiendo de cada caso, a las deformaciones obtenidas por la correlación digital de imágenes. Una vez realizados estos pasos, se trazan las líneas rectas que nos indica la norma para obtener el límite elástico, de esta manera se obtiene la siguiente gráfica con los resultados óptimos.

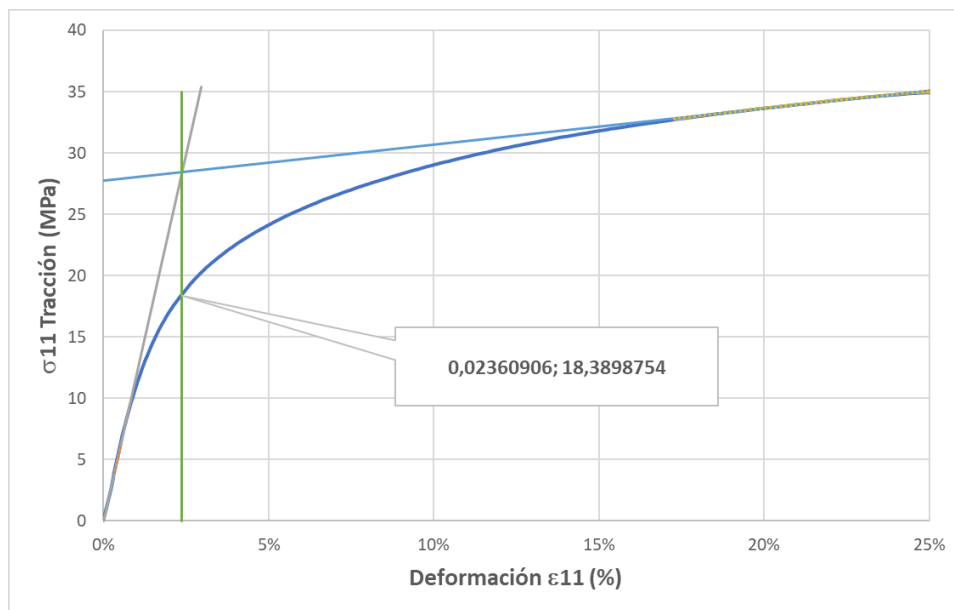


ILUSTRACIÓN 102. Curva Tensión-Deformación procesada de la probeta TPO1.

Además de obtener las propiedades de tensión/deformación del material también se estudia el coeficiente de Poisson para cada una de las direcciones.

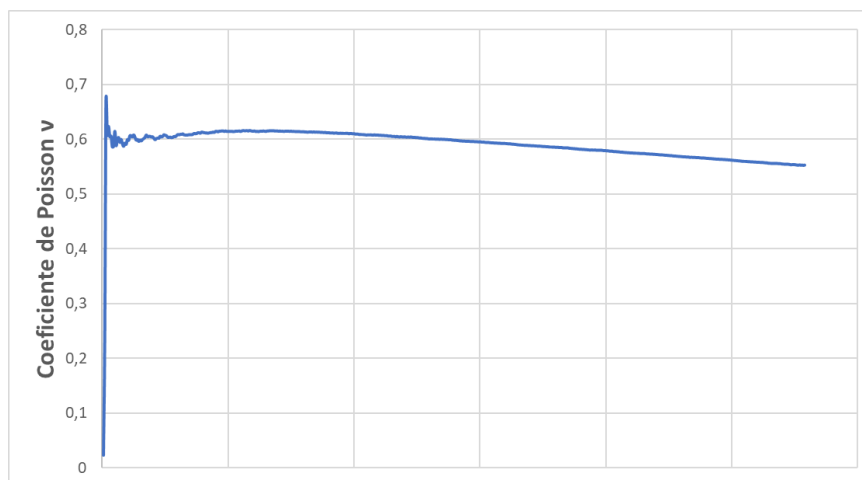


ILUSTRACIÓN 103. Distribución del coeficiente de Poisson de la probeta TPO1.

Una vez obtenidos los resultados del coeficiente de Poisson, estos se estudian en la zona más lineal de su distribución. En el caso de la ilustración 103, se elimina la primera zona en la

cual existe una mayor cantidad de ruido, y una parte del final, pues desciende con una mayor brusquedad.

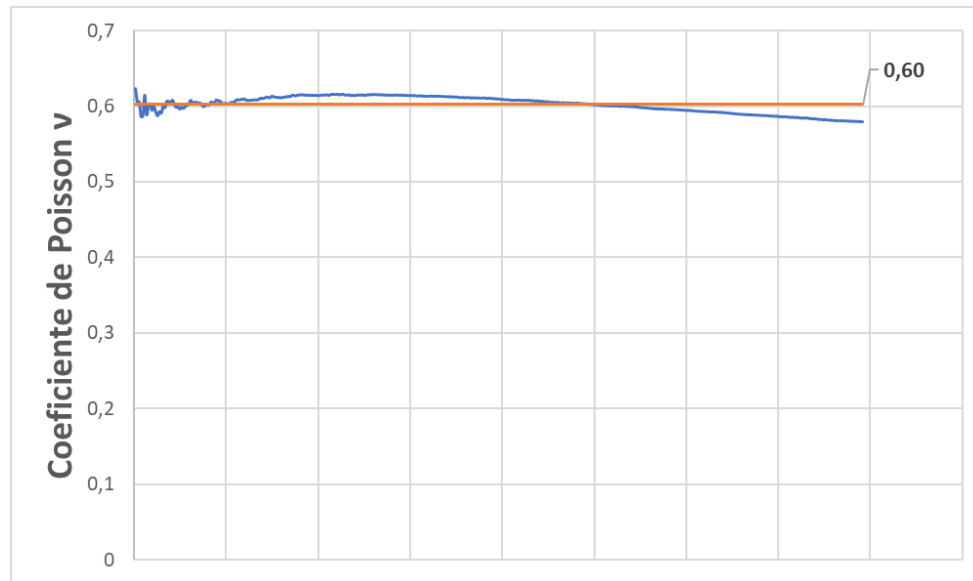


ILUSTRACIÓN 104. Línea promedio del coeficiente de Poisson de la probeta TPO1.

Obteniendo de esta manera un coeficiente de Poisson para la probeta TPO1 de 0,6, un valor indicativo de que el material es totalmente anisótropo.

Una vez explicado el procedimiento general del análisis de resultados, hay que destacar que en ocasiones se eliminaban los datos de algunas probetas en determinados lotes, por lo que sus resultados no se estudian junto a las demás. Esto se debe a que los resultados obtenidos son muy dispares a las demás probetas de su correspondiente lote, por lo que en prácticamente todos los ensayos para cada propiedad estudiada se ha tenido que eliminar alguna probeta. El hecho de que se obtengan algunos resultados bastante dispares se puede deber por diferentes razones, por la impresión de la probeta, la cual puede generar más cavidades en una probeta que otra provocando de esta manera un comportamiento diferente. También puede deberse a las propias tolerancias que existen en el propio ensayo y el DIC, en el caso de los ensayos a compresión, en estos se han utilizado una pantalla de metacrilato delante de la cámara, lo que ha provocado que las fotografías tuvieran un menor contraste y resultase más complicado realizar el procesamiento por DIC.

A continuación, se muestran los datos procesados según el ensayo realizado, los materiales y su dirección de impresión. De esta manera se pretende seguir un orden para una mayor comprensión de las propiedades de cada uno de los materiales.

6.2. Tracción

En el ensayo de tracción como se ha comentado anteriormente se obtendrán las curvas tensión-deformación, la resistencia a tracción, de rotura, el límite elástico, el módulo de elasticidad y los coeficientes de Poisson.

6.2.1. Onyx

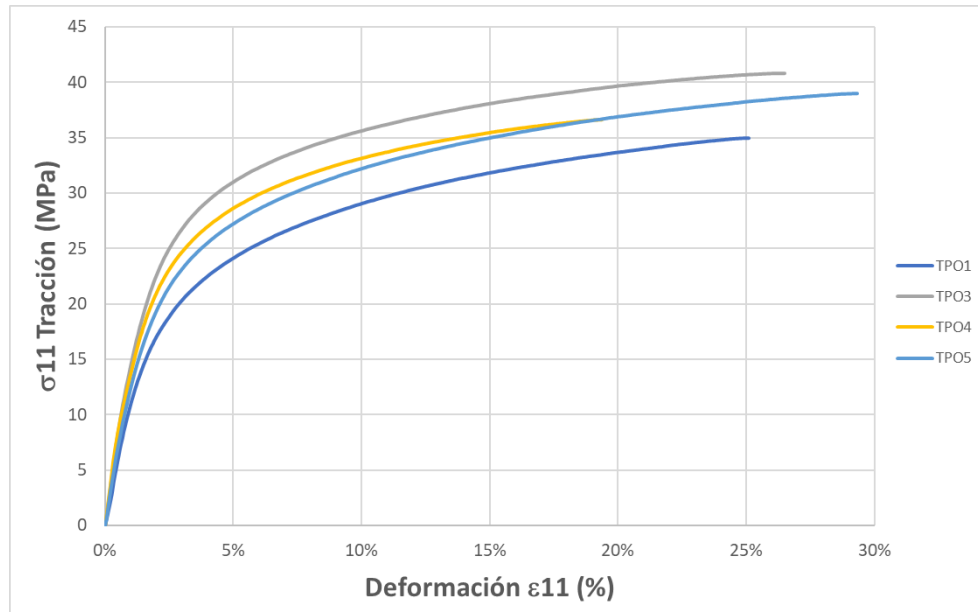


ILUSTRACIÓN 105. Curvas Tensión-Deformación probetas TPO.

	RESULTADOS TPO				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TPO1	TPO3	TPO4	TPO5		
E (Mpa)	1200,20	1715,90	1820,90	1499,60	1559,15	15,23%
σ_{11} max (Mpa)	34,94	40,83	36,62	39,02	37,85	5,94%
ϵ_{11} Tensión max (%)	25,00%	26,51%	19,38%	29,33%	25,06%	14,47%
σ Rotura (Mpa)	34,94	40,83	36,62	39,02	37,85	5,95%
ϵ Rotura (%)	25,09%	26,51%	19,38%	29,33%	25,08%	14,46%
σ Elástica (Mpa)	18,39	23,41	19,82	20,46	20,52	8,91%
ϵ Elástica (%)	2,36%	2,15%	1,78%	2,23%	2,13%	10,03%
ν Poisson	0,60	0,59	0,63	0,60	0,61	2,14%

TABLA 11. Propiedades probetas TPO.

Como se puede observar en la tabla 11, las deformaciones son las propiedades que más varían entre cada una de las probetas, al igual que el módulo de elasticidad, pero no es una variación con una sustancial importancia. De aquí podemos obtener la resistencia máxima en la dirección 1 del onyx, cuyo valor es de 37,85 MPa, el cual coincide con el de rotura. Por lo que podemos deducir como primera conclusión que el onyx en esta dirección rompe una vez que alcanza su resistencia máxima.

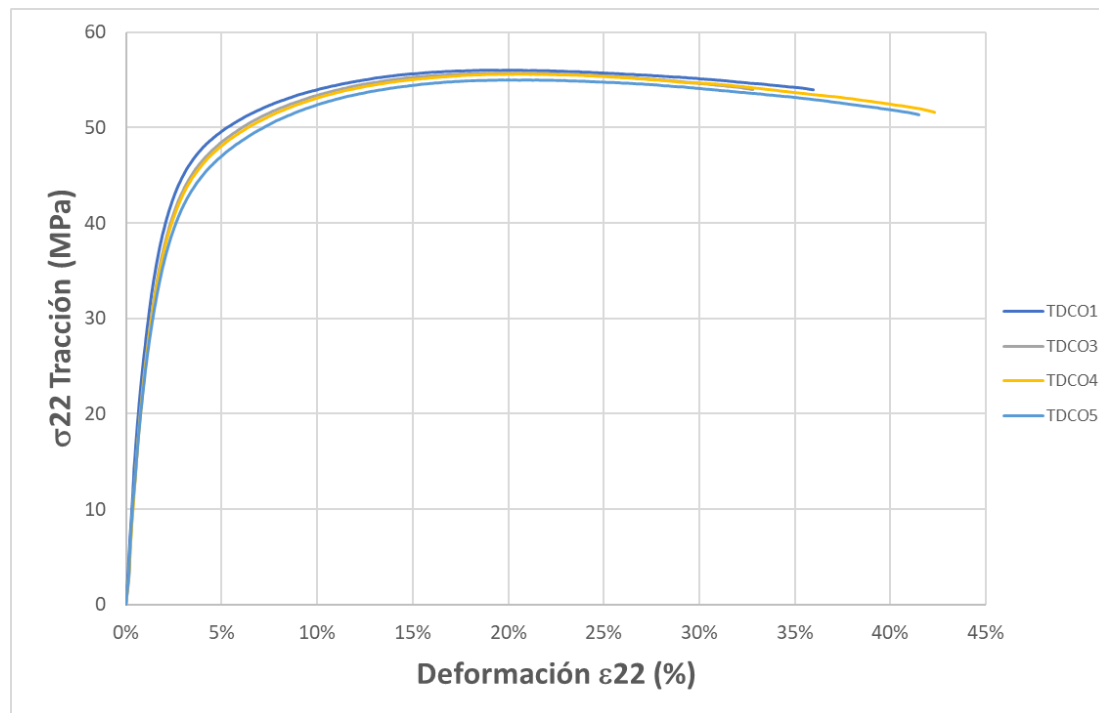


ILUSTRACIÓN 106. Curvas Tensión-Deformación probetas TDCO.

	RESULTADOS TDCO				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TDCO1	TDCO3	TDCO4	TDCO5		
E (Mpa)	3256,80	2800,80	2712,10	2930,80	2925,125	7,07%
σ_{22} max (Mpa)	56,06	55,77	55,58	54,96	55,59	0,73%
ϵ_{22} Tensión max (%)	19,37%	20,54%	20,63%	19,71%	20,06%	2,68%
σ Rotura (Mpa)	54,00	54,04	51,57	51,31	52,73	2,45%
ϵ Rotura (%)	35,99%	32,80%	42,29%	41,51%	38,15%	10,30%
σ Elástica (Mpa)	37,98	38,68	39,25	36,65	38,14	2,55%
ϵ Elástica (%)	1,82%	2,14%	2,28%	2,09%	2,08%	8,02%
ν Poisson	0,38	0,38	0,37	0,37	0,38	0,73%

TABLA 12. Propiedades probetas TDCO.

En el caso de las probetas imprimidas de canto para obtener las propiedades a tracción en la dirección 2 se han obtenido unos resultados más similares, por lo tanto, una menor desviación típica. En este caso la resistencia máxima a la tracción es de 55,59 MPa, mientras que la de rotura es de 52,73 MPa. Como se puede observar en la ilustración 107, estas curvas poseen un comportamiento más plástico que en la dirección 1, llegando a deformaciones del 45% en la rotura.

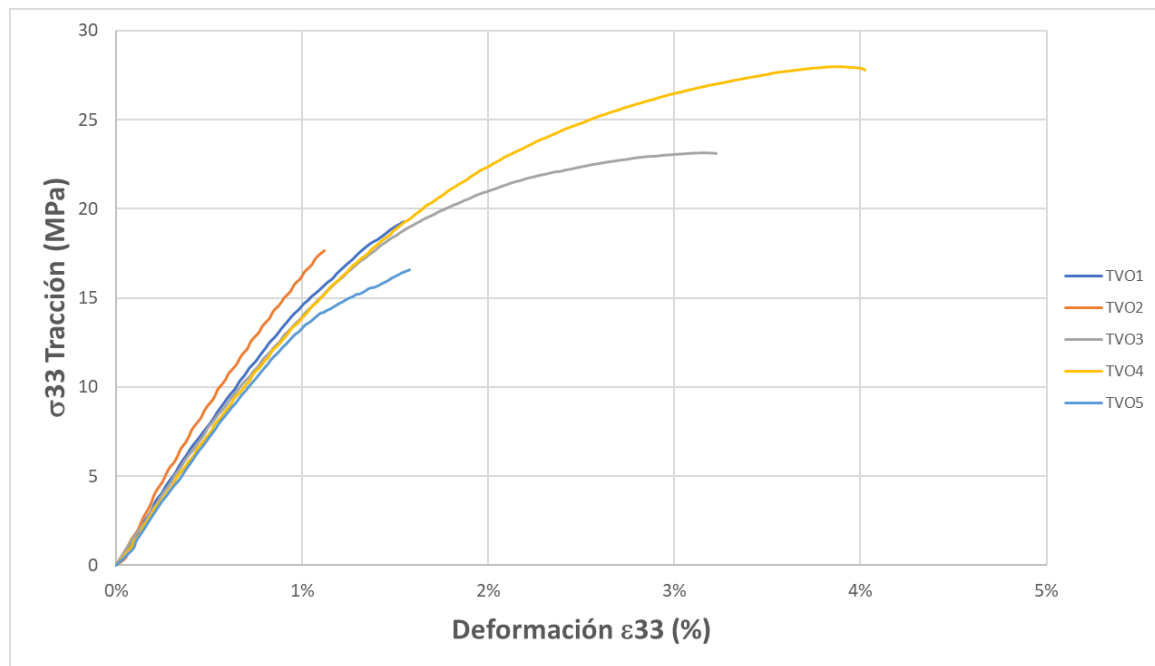
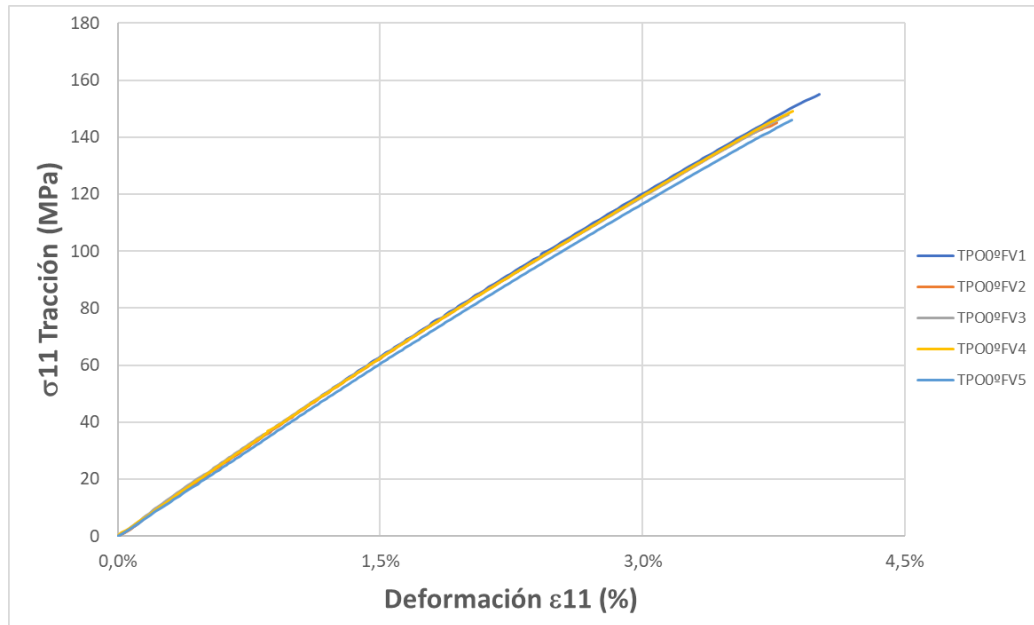


ILUSTRACIÓN 107. Curvas Tensión-Deformación probetas TVO.

	RESULTADOS TVO					MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TVO1	TVO2	TVO3	TVO4	TVO5		
E (Mpa)	1641,40	1871,60	1581,80	1486,90	1421,00	1600,54	9,71%
σ ₃₃ max (Mpa)	19,29	17,68	23,16	27,96	16,56	20,93	19,91%
ε ₃₃ Tensión max (%)	1,54%	1,12%	3,15%	3,88%	1,58%	2,25%	47,36%
σ Rotura (Mpa)	19,29	17,68	23,13	27,77	16,56	20,88	19,63%
ε Rotura (%)	1,54%	1,12%	3,22%	4,03%	1,58%	2,30%	48,91%
σ Elástica (Mpa)	13,28	10,76	17,50	20,43	12,77	14,95	23,49%
ε Elástica (%)	0,89%	0,61%	1,37%	1,71%	0,95%	1,10%	35,32%
ν Poisson	0,18	0,19	0,16	0,20	0,14	0,17	11,59%

TABLA 13. Propiedades probetas TVO.

Como se ha explicado anteriormente, en el caso de las probetas impresas verticalmente, estas fallaban por separación de capas, por lo que su estudio ha resultado ser más complejo, obteniendo unos resultados más dispares. Los modos de rotura se discuten más adelante, en el apartado 6.5. Como se puede apreciar en la ilustración 107, las curvas de las probetas 3 y 4, alcanzaron antes de la rotura una tensión significativamente superior a las demás, esto es un hecho que encaja con el fallo por separación de capas, el cual es ciertamente imprevisible debido a que cualquier defecto en la impresión de la probeta (inclusión de aire, desgarró, partículas, ...) provoca una rotura anticipada (probetas 1, 2 y 5), convirtiendo de esta manera al material en frágil y poco fiable. También en la tabla 13 se observa que las probetas 1, 2 y 5 fallan alrededor del 1,5 %, mientras que las probetas 3 y 4 fallaron en el 3,22% y el 4,03% respectivamente.

6.2.2. Onyx + FV**ILUSTRACIÓN 108.** Curvas Tensión-Deformación probetas TPO0°FV.

	RESULTADOS TPO0°FV					MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TPO0°FV1	TPO0°FV2	TPO0°FV3	TPO0°FV4	TPO0°FV5		
E (Mpa)	4356,20	4228,20	4507,30	4277,00	4023,80	4278,5	3,71%
σ₁₁ max (Mpa)	155,11	145,18	148,01	149,25	146,10	148,73	2,35%
ε₁₁ Tensión max (%)	4,01%	3,77%	3,83%	3,86%	3,85%	3,87%	2,08%
σ Rotura (Mpa)	155,11	145,18	148,01	149,25	146,10	148,73	2,35%
ε Rotura (%)	4,01%	3,77%	3,83%	3,86%	3,85%	3,87%	2,08%
σ Elástica (Mpa)	75,87	86,67	61,63	78,10	93,22	79,10	13,54%
ε Elástica (%)	1,82%	2,11%	1,47%	1,89%	2,35%	1,93%	15,29%
ν Poisson	0,60	0,58	0,61	0,57	0,58	0,59	2,77%

TABLA 14. Propiedades probetas TPO0°FV.

En el caso de las probetas de onyx con fibra de vidrio a 0° se ha obtenido la mayor resistencia de tracción de entre todos los materiales en la dirección 1, cuyo valor es de 148,73 MPa, el cual coincide con el de rotura y con una deformación del 3,9%. Obteniendo como primera conclusión que al introducir fibra de vidrio a 0° en el onyx, sus propiedades aumentan exponencialmente. Como se puede observar el módulo de elasticidad (4278,5 MPa) es prácticamente 3 veces mayor al del onyx en la dirección 1 (1559,15 MPa), mientras que la resistencia máxima a la tracción es 4 veces mayor a la del onyx. Por otro lado, cabe destacar que el comportamiento es mucho menos plástico que el del onyx, de hecho, al no superar el 5% la deformación de rotura puede considerarse un material frágil.

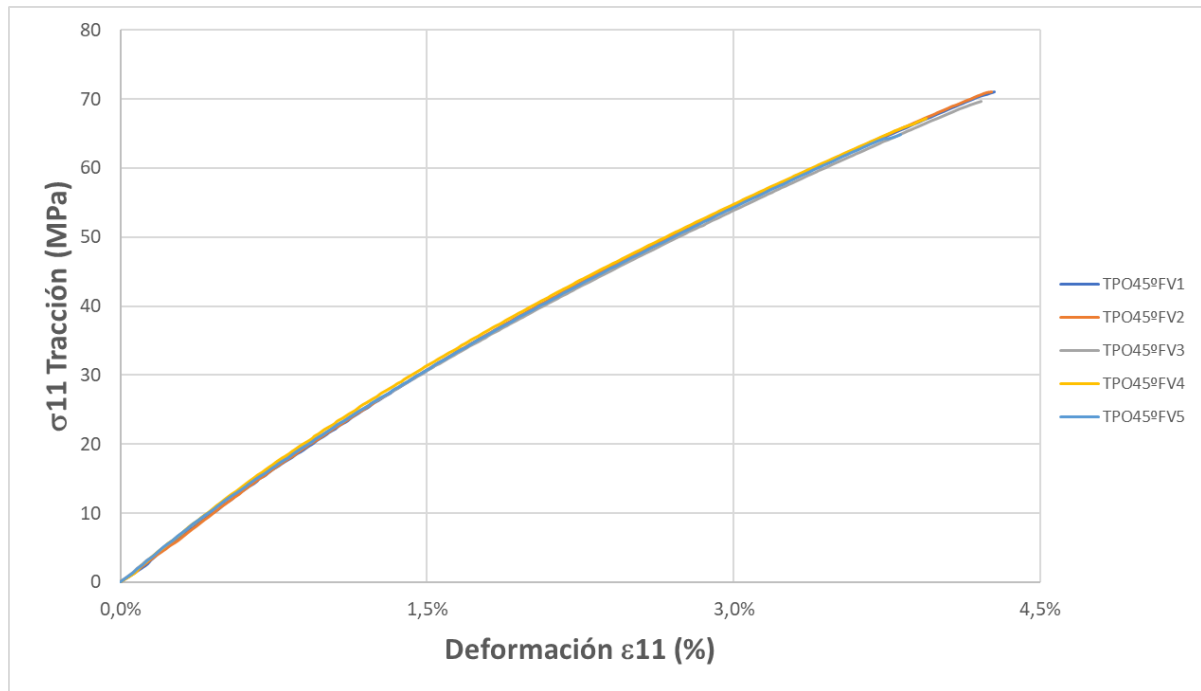


ILUSTRACIÓN 109. Curvas Tensión-Deformación probetas TPO45°FV.

	RESULTADOS TPO45°FV					MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TPO45°FV1	TPO45°FV2	TPO45°FV3	TPO45°FV4	TPO45°FV5		
E (Mpa)	2223,60	2150,60	2353,50	2365,40	2361,60	2290,94	3,84%
σ ₁₁ max (Mpa)	71,08	71,02	69,65	67,24	64,86	68,77	3,49%
ε ₁₁ Tensión max (%)	4,27%	4,26%	4,21%	3,94%	3,82%	4,10%	4,56%
σ Rotura (Mpa)	71,08	71,02	69,65	67,24	64,86	68,77	3,49%
ε Rotura (%)	4,27%	4,26%	4,21%	3,94%	3,82%	4,10%	4,56%
σ Elástica (Mpa)	35,33	37,71	30,06	31,71	31,76	33,31	8,38%
ε Elástica (%)	1,76%	1,90%	1,47%	1,52%	1,55%	1,64%	10,00%
ν Poisson	0,64	0,62	0,69	0,65	0,68	0,65	3,80%

TABLA 15. Propiedades probetas TPO45°FV.

En el caso de las probetas con fibra de vidrio a 45°, estas poseen cerca de la mitad de los valores de las probetas con fibra de vidrio a 0°, tanto en el módulo de elasticidad como en la resistencia máxima y de rotura, las cuales coinciden. Posee prácticamente el mismo comportamiento que las curvas de las probetas con fibra de vidrio a 0°, un comportamiento frágil con una deformación de rotura inferior al 5%.

6.2.3. PET FC

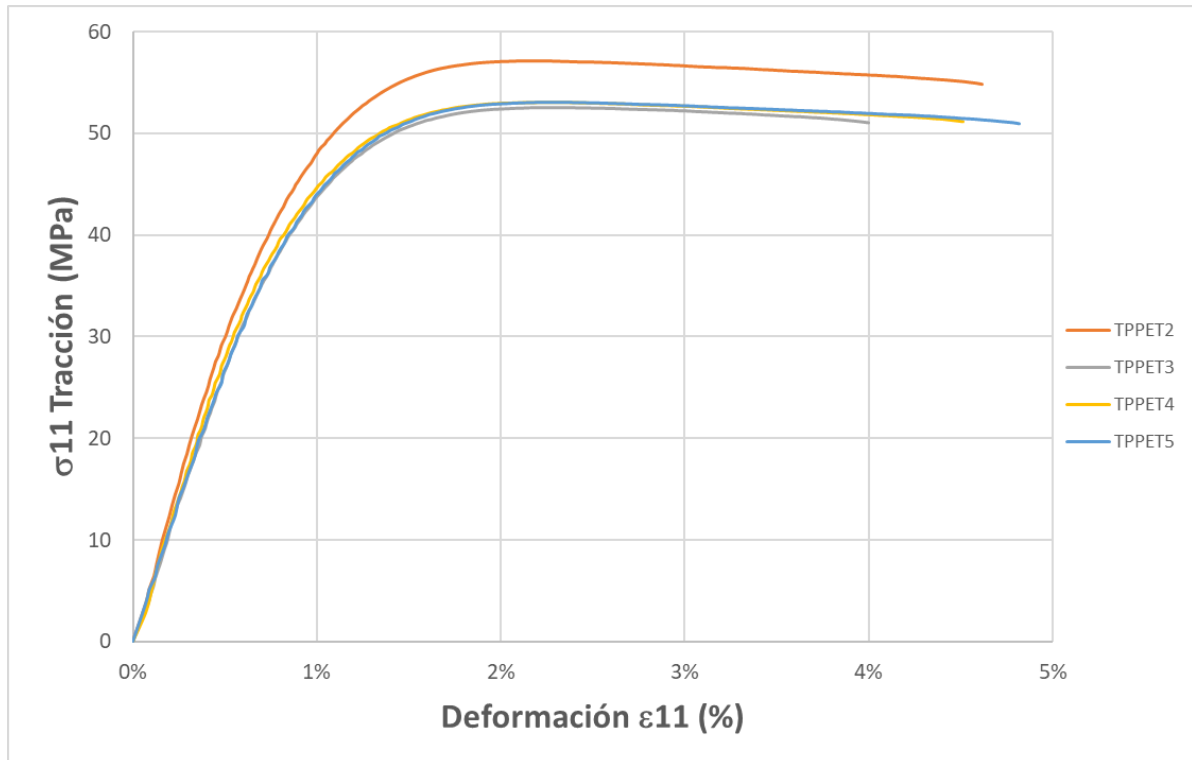


ILUSTRACIÓN 110. Curvas Tensión-Deformación probetas TPPET.

	RESULTADOS TPPET				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TPPET2	TPPET3	TPPET4	TPPET5		
E (Mpa)	6265,90	5424,70	5670,10	5486,60	5711,825	5,82%
σ_{11} max (Mpa)	57,14	52,50	53,10	53,07	53,95	3,44%
ε_{11} Tensión max (%)	2,15%	2,32%	2,29%	2,23%	2,25%	2,97%
σ Rotura (Mpa)	54,84	51,01	51,06	50,96	51,97	3,19%
ε Rotura (%)	4,62%	4,00%	4,55%	4,82%	4,50%	6,74%
σ Elástica (Mpa)	46,38	44,11	43,99	44,27	44,69	2,20%
ε Elástica (%)	0,94%	1,02%	0,97%	1,02%	0,99%	3,46%
ν Poisson	0,40	0,38	0,41	0,35	0,38	5,71%

TABLA 16. Propiedades probetas TPPET.

En el caso de las probetas impresas planas de PET FC se ha obtenido una resistencia máxima en la dirección 1 de 53,95 MPa, un módulo de elasticidad de 5711,825 MPa y una tensión en la rotura de 51,97 MPa, consiguiendo de esta manera que su curva se produzca en un rango de deformaciones bastante pequeño, tanto que no puede considerarse un plástico, sino un material frágil. En el caso del límite elástico se puede observar que se produce bastante antes de obtener la tensión máxima.

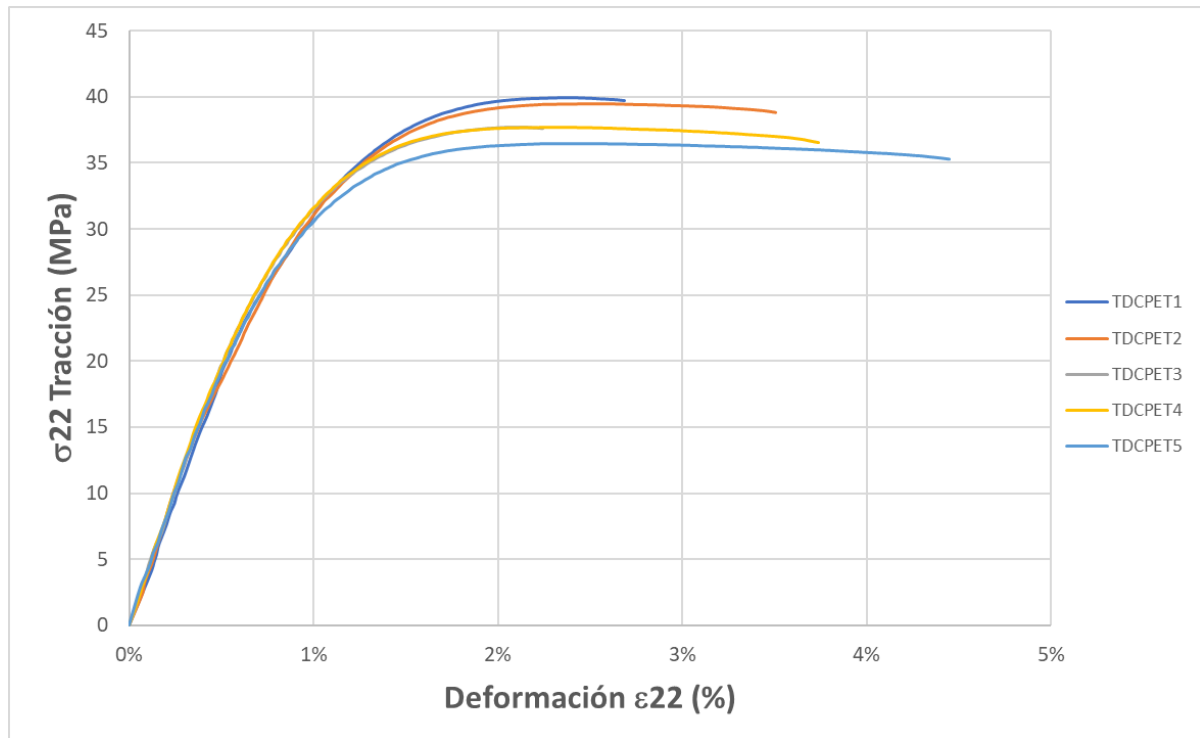


ILUSTRACIÓN 111. Curvas Tensión-Deformación probetas TDCPET.

	RESULTADOS TDCPET					MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TDCPET1	TDCPET2	TDCPET3	TDCPET4	TDCPET5		
E (Mpa)	3796,00	4073,20	4066,40	4167,40	4058,40	4032,28	3,09%
σ_{22} max (Mpa)	39,99	39,47	37,68	37,72	36,46	38,26	3,37%
ϵ_{22} Tensión max (%)	2,36%	2,56%	2,09%	2,30%	2,30%	2,32%	6,53%
σ Rotura (Mpa)	39,76	38,81	37,59	36,56	35,29	37,60	4,22%
ϵ Rotura (%)	2,69%	3,51%	2,24%	3,74%	4,45%	3,32%	23,46%
σ Elástica (Mpa)	32,43	31,12	29,93	30,85	29,71	30,81	3,15%
ϵ Elástica (%)	1,07%	1,00%	0,91%	0,96%	0,94%	0,98%	5,81%
ν Poisson	0,35	0,28	0,34	0,32	0,34	0,33	7,29%

TABLA 17. Propiedades probetas TDCPET.

En la dirección 2 del material de PET FC se han obtenido unas propiedades algo inferiores que la dirección 1, caso contrario que ocurre con el onyx, en el cual se obtenían unas mejores propiedades en la dirección 2 que en la 1. En este caso se ha obtenido una resistencia máxima de 38,26 MPa, un módulo de elasticidad de 4032,28 MPa y una tensión a la rotura de 37,60 MPa, pero con un comportamiento bastante similar a la dirección 1. Cabe destacar que los límites elásticos tanto en la dirección 1 y en la 2 se obtienen para el mismo valor de deformación, que ronda el 1%.

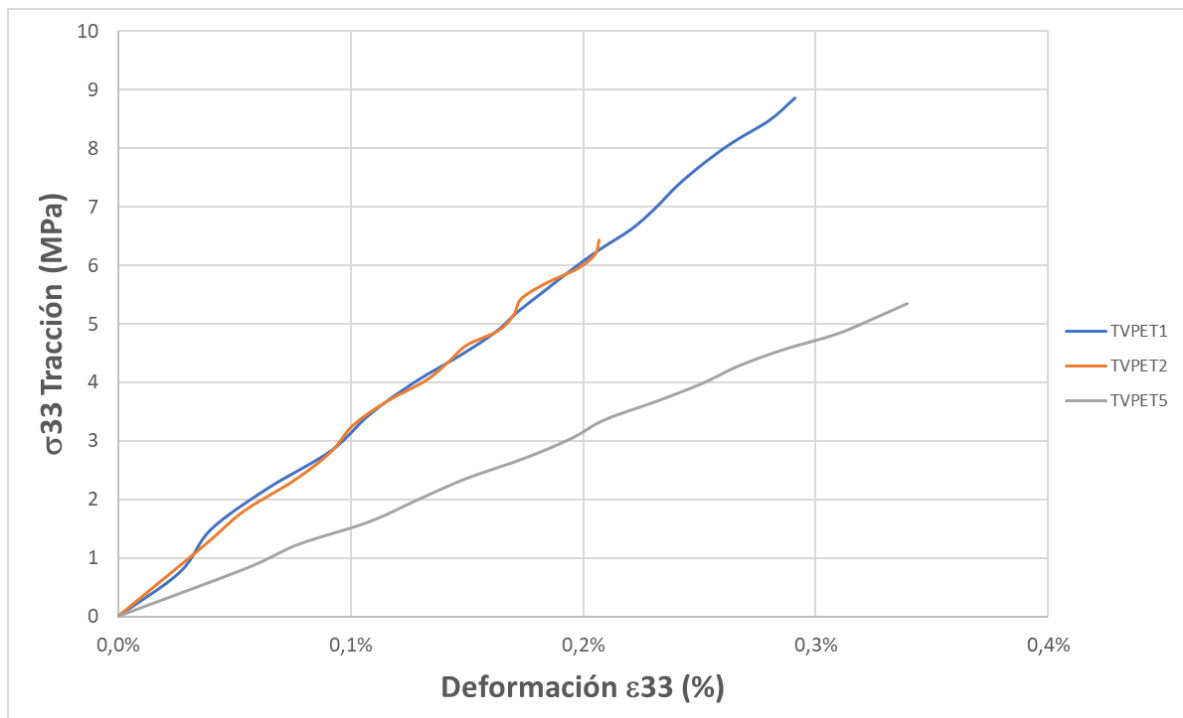


ILUSTRACIÓN 112. Curvas Tensión-Deformación probetas TVPET.

	RESULTADOS TVPET			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TVPET1	TVPET2	TVPET5		
E (Mpa)	3041,40	1577,50	3061,00	2559,97	27,14%
σ_{33} max (Mpa)	8,87	5,34	6,43	6,88	21,40%
ϵ_{33} Tensión max (%)	0,29%	0,34%	0,21%	0,28%	19,67%
σ Rotura (Mpa)	8,87	5,34	6,43	6,88	21,40%
ϵ Rotura (%)	0,29%	0,34%	0,21%	0,28%	19,67%
ν Poisson	0,08	0,02	0,12	0,08	54,37%

TABLA 18. Propiedades probetas TVPET.

Como se ha comentado anteriormente, las probetas imprimidas verticalmente de PET FC y PA FC prácticamente fallaban por separación de capas al colocarlas en las mordazas. Por lo que su estudio ha sido bastante complejo, llegando al caso de que se han tenido que ensayar 7 probetas de PET para obtener unos resultados mediamente óptimos. Aun así, se puede afirmar en primera instancia que el PET en la dirección 3 a tracción no es recomendable en ningún caso.

6.2.4. PA FC

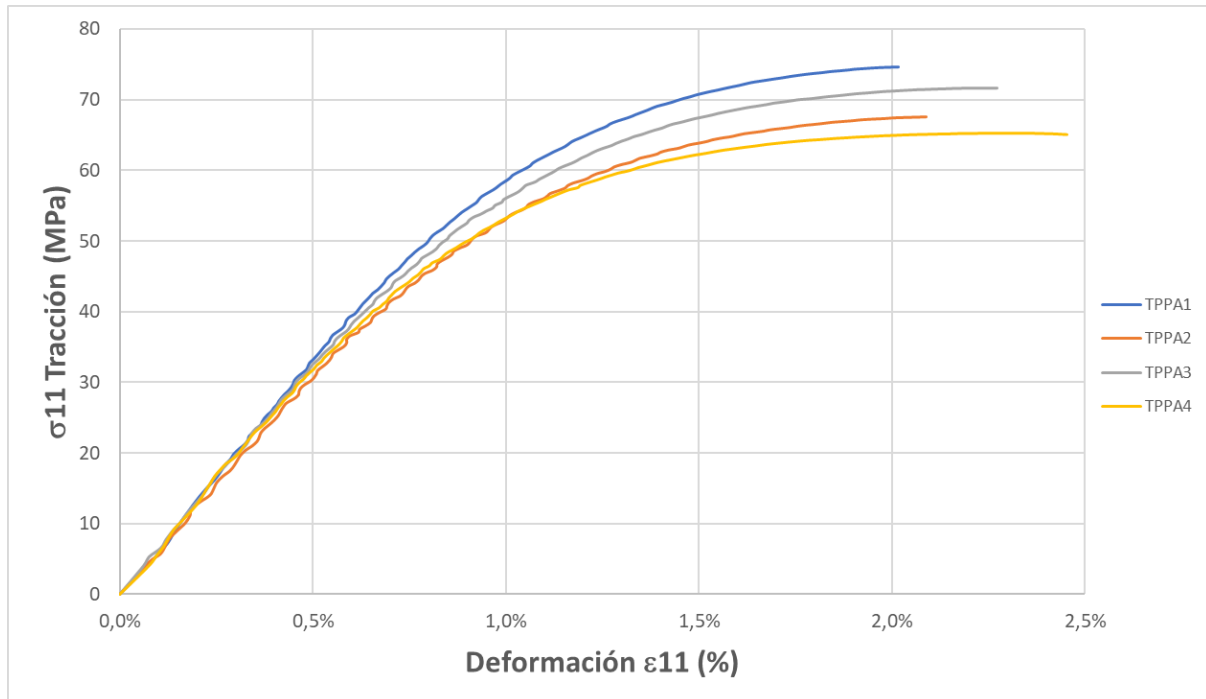


ILUSTRACIÓN 113. Curvas Tensión-Deformación probetas TPPA.

	RESULTADOS TPPA				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TPPA1	TPPA2	TPPA3	TPPA4		
E (Mpa)	6626,50	6176,30	6604,10	6561,70	6492,15	2,83%
σ11 max (Mpa)	74,63	67,54	71,69	65,32	69,79	5,17%
ε11 Tensión max (%)	2,02%	2,09%	2,27%	2,28%	2,16%	5,30%
σ Rotura (Mpa)	74,63	67,54	71,69	65,12	69,74	5,26%
ε Rotura (%)	2,02%	2,09%	2,27%	2,45%	2,21%	7,69%
σ Elástica (Mpa)	60,61	53,99	57,97	53,12	56,42	5,37%
ε Elástica (%)	1,06%	1,02%	1,05%	0,99%	1,03%	2,57%
ν Poisson	0,42	0,41	0,45	0,44	0,43	3,89%

TABLA 19. Propiedades probetas TPPA.

En el caso de la dirección 1 de la poliamida con fibra de carbono se ha obtenido un comportamiento lineal hasta el 1% de deformación, el cual alcanza el 2,2%, un módulo de elasticidad de 6492,15 MPa y una tensión máxima de 69,79 MPa, que coincide con la de rotura. Para el caso del límite elástico se produce al igual que el PET, al 1% de deformación, pero con un valor mayor. Como primera comparativa se puede observar que la poliamida tiene unas mejores propiedades que el PET en esta dirección.

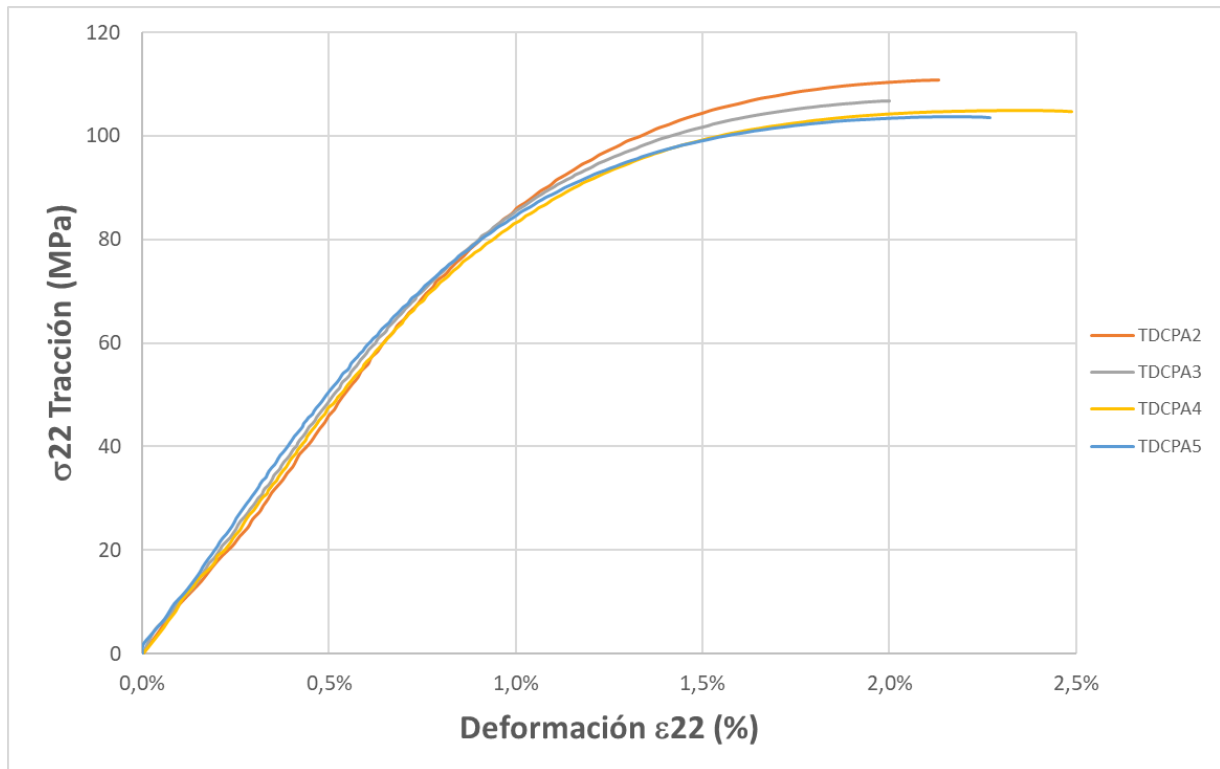


ILUSTRACIÓN 114. Curvas Tensión-Deformación probetas TDCPA.

	RESULTADOS TDCPA				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TDCPA2	TDCPA3	TDCPA4	TDCPA5		
E (Mpa)	8849,70	9706,10	9339,40	10373,00	9567,05	5,81%
σ22 max (Mpa)	110,73	106,73	105,01	103,69	106,54	2,49%
ε22 Tensión max (%)	2,13%	2,00%	2,38%	2,17%	2,17%	6,37%
σ Rotura (Mpa)	110,73	106,73	104,79	103,50	106,44	2,57%
ε Rotura (%)	2,13%	2,00%	2,49%	2,27%	2,22%	8,15%
σ Elástica (Mpa)	95,39	87,65	88,18	83,26	88,62	4,91%
ε Elástica (%)	1,20%	1,04%	1,11%	0,97%	1,08%	7,83%
ν Poisson	0,30	0,32	0,32	0,31	0,31	2,94%

TABLA 20. Propiedades probetas TDCPA.

Con respecto a la dirección 2, se ha obtenido una tensión máxima de 106,74 MPa y un módulo de elasticidad de 9567,05 MPa en un rango de deformaciones igual a su dirección 1, con una deformación de rotura del 2,2%. Al igual que en su dirección 1, el límite elástico se produce en el 1% de deformación. Cabe destacar que esta es la segunda mayor tensión obtenida entre todos los materiales, por detrás del onyx con fibra de vidrio a 0°, pero en este caso, este material es único y no se ayuda de fibra continua.

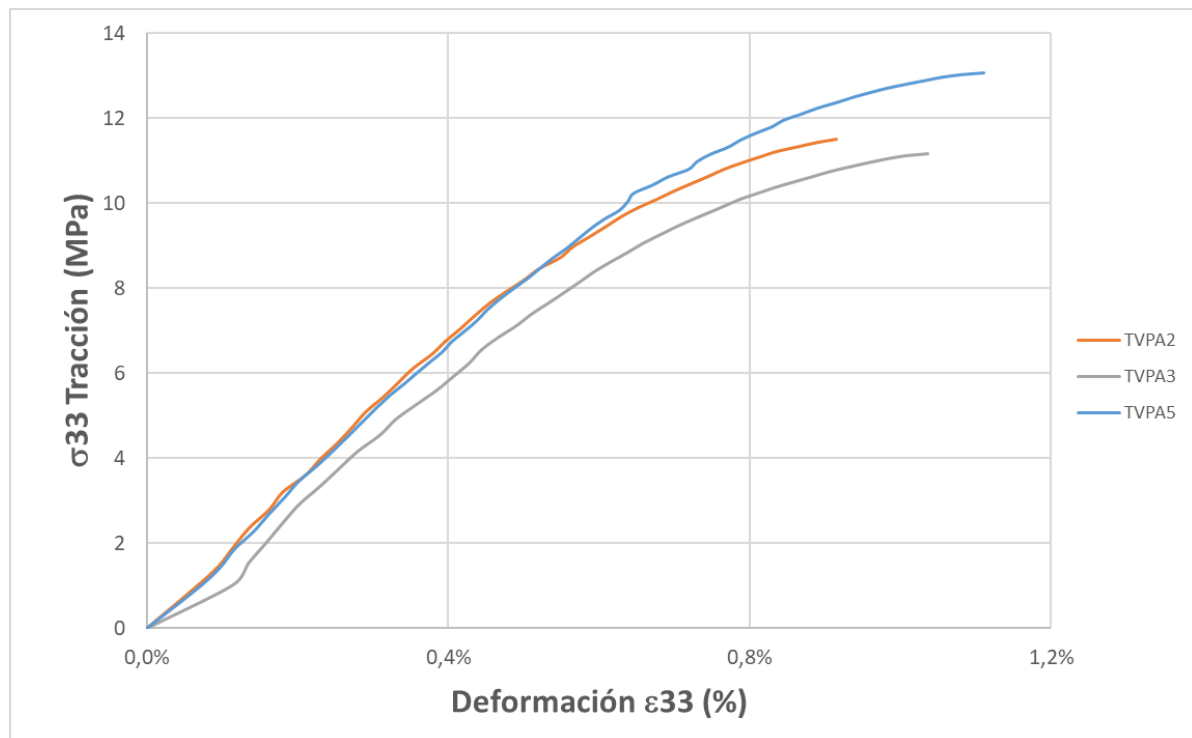


ILUSTRACIÓN 115. Curvas Tensión-Deformación probetas TVPA.

	RESULTADOS TVPA			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	TVPA2	TVPA3	TVPA5		
E (Mpa)	1731,20	1467,60	1689,70	1629,50	7,10%
σ_{33} max (Mpa)	11,50	11,17	13,08	11,91	6,99%
ϵ_{33} Tensión max (%)	0,92%	1,04%	1,11%	1,02%	7,89%
σ Rotura (Mpa)	11,50	11,17	13,08	11,91	6,99%
ϵ Rotura (%)	0,92%	1,04%	1,11%	1,02%	7,89%
ν Poisson	0,03	0,03	0,03	0,03	10,20%

TABLA 21. Propiedades probetas TVPA.

En el caso de las probetas en la dirección 3 de poliamida se pudieron realizar con mayor facilidad los ensayos que las de PET, pues estas no fracturaban con el simple hecho de colocarlas en las mordazas, por lo que su estudio ha sido más sencillo. Obteniendo un valor de tensión máxima de 11,91 MPa y un módulo de elasticidad de 1629,50 MPa. Aun así, cabe destacar que las probetas fallaban por separación de capas.

6.3. Cortante

En el ensayo de cortante como se ha comentado anteriormente se obtendrán las curvas tensión cortante-deformación angular, la tensión máxima transversal, la tensión de rotura, el módulo de elasticidad transversal y el límite elástico transversal.

6.3.1. Onyx

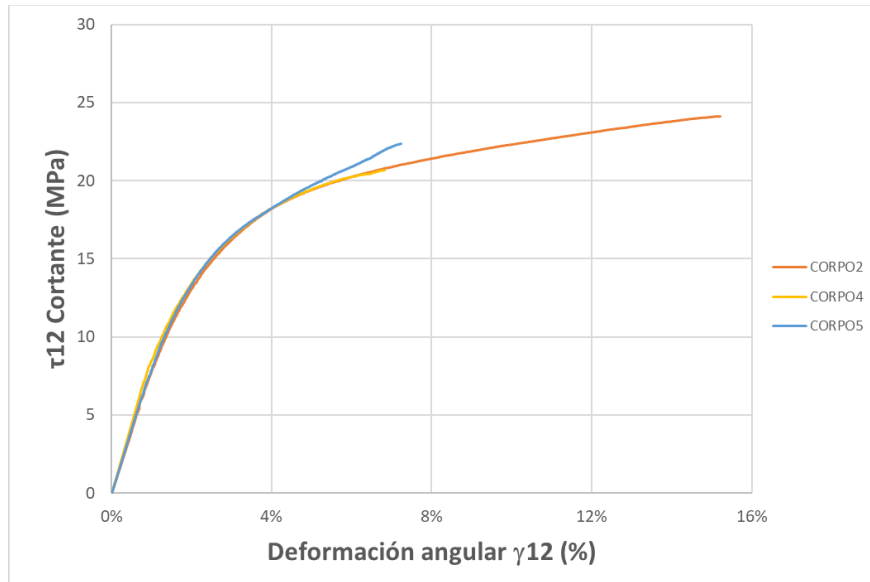


ILUSTRACIÓN 116. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPO.

	RESULTADOS CORPO			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORPO2	CORPO4	CORPO5		
G (Mpa)	806,74	895,68	818,10	840,17	4,70%
τ_{12} max (Mpa)	24,12	20,66	22,35	22,38	6,33%
γ_{12} tensión max (%)	15,21%	6,82%	7,23%	9,76%	39,59%
τ Rotura (Mpa)	24,12	20,66	22,35	22,38	6,33%
γ Rotura (%)	15,21%	6,82%	7,23%	9,76%	39,59%
τ Cortante (Mpa)	11,35	10,86	11,76	11,32	3,23%
γ Cortante (%)	1,61%	1,41%	1,64%	1,55%	6,65%

TABLA 22. Propiedades probetas CORPO.

En la tensión cortante del plano 12 del onyx se obtuvieron las deformaciones de las tensiones máximas algo dispares. Con respecto, a las demás propiedades fueron bastantes similares, obteniendo unas desviaciones típicas aceptables. Por otro lado, cabe destacar que el comportamiento de las curvas se encuentra en un rango de deformaciones de hasta 9,8%, llegando incluso a los 15,2% en una de las pruebas, comportamiento que se acerca al de los polímeros.

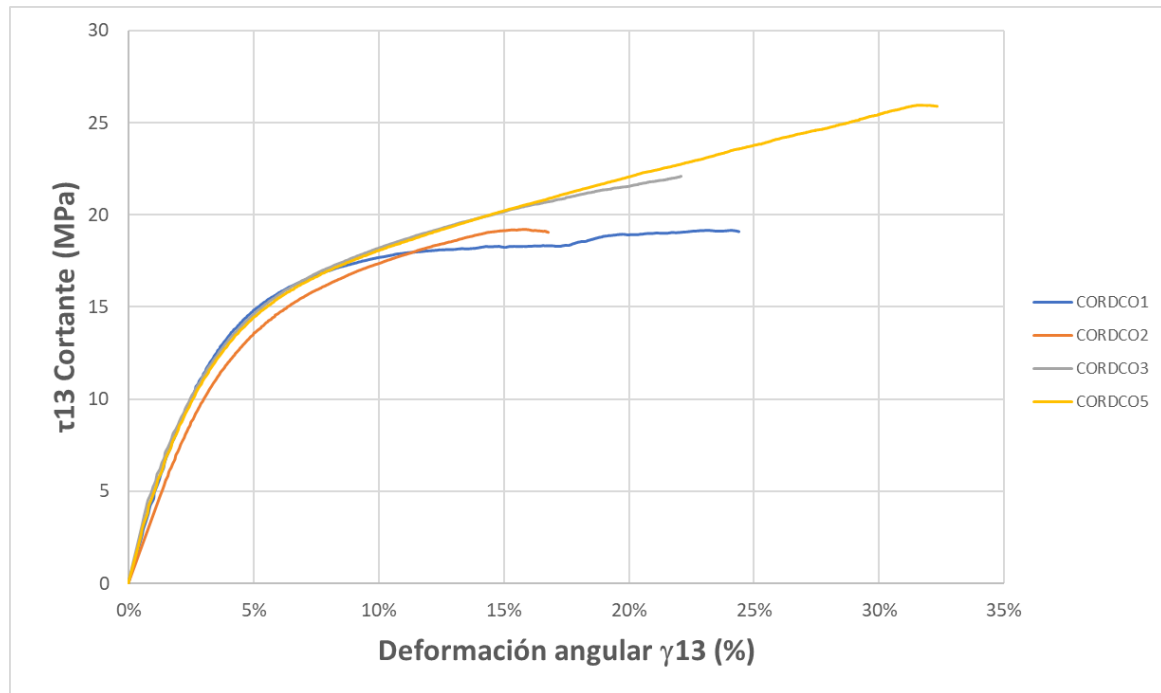


ILUSTRACIÓN 117. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORDCO.

	RESULTADOS CORDCO				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORDCO1	CORDCO2	CORDCO3	CORDCO5		
G (Mpa)	480,87	372,85	573,00	516,97	485,92	15,04%
τ₁₃ max (Mpa)	19,18	19,21	22,10	25,96	21,61	12,84%
γ₁₃ tensión max (%)	23,16%	15,82%	22,08%	31,59%	23,16%	24,25%
τ Rotura (Mpa)	19,11	19,05	22,10	25,90	21,54	13,01%
γ Rotura (%)	24,40%	16,77%	22,08%	32,33%	23,90%	23,43%
τ Cortante (Mpa)	8,11	8,92	6,55	6,86	7,61	12,56%
γ Cortante (%)	1,90%	2,59%	1,34%	1,51%	1,84%	26,16%

TABLA 23. Propiedades probetas CORDCO.

Para las tensiones cortantes del plano 13 se obtuvieron unos resultados más similares, una tensión máxima de 21,61 MPa al 23,16% de deformación angular (11,58% de deformación), un módulo de elasticidad de 485,92 MPa y un límite elástico de 7,61 MPa. Se puede observar que un poco después de obtener la tensión máxima, falla, obteniendo de esta manera una deformación de rotura del 23,9%. Por otro lado, cabe destacar que el límite elástico a cortante se da relativamente pronto, en un 1,84% de deformación angular. También se puede observar que la curva de la probeta 5 resiste más que las, consiguiendo cerca de los 26 MPa de tensión máxima, indicio de que el material puede llegar a resistir unas tensiones mayores a la media si no hay imperfecciones.

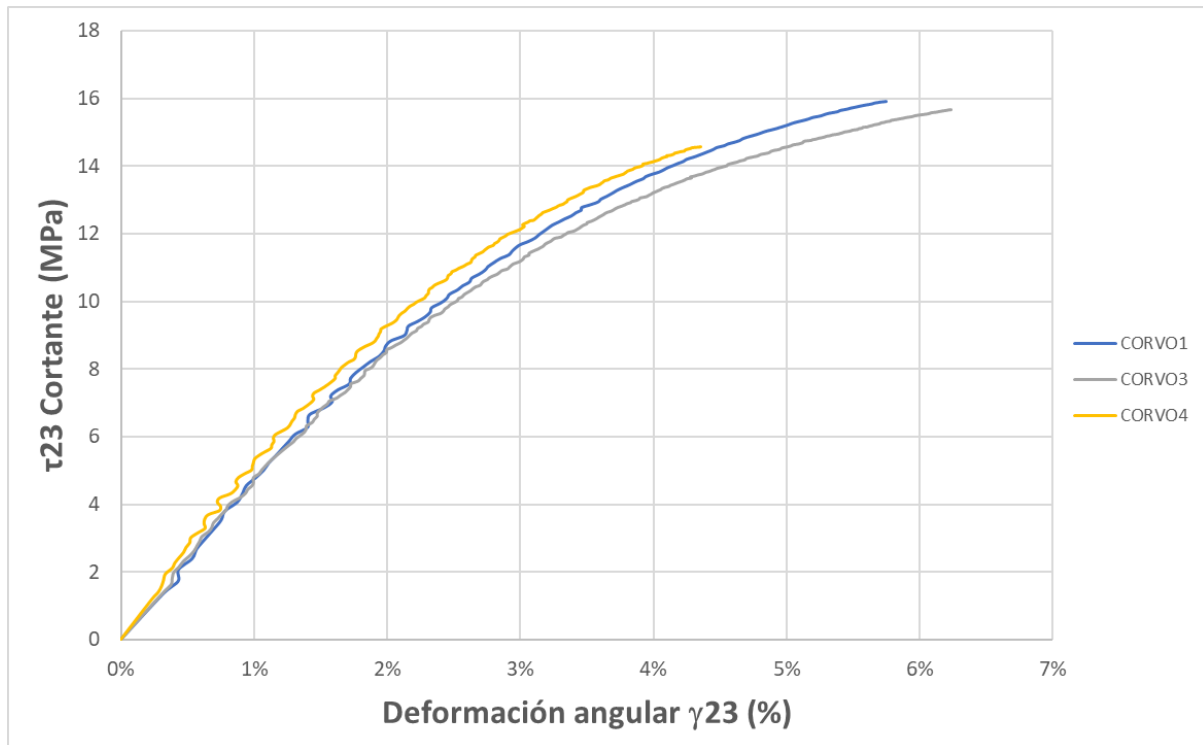


ILUSTRACIÓN 118. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORVO.

	RESULTADOS CORVO			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORVO1	CORVO3	CORVO4		
G (Mpa)	465,82	487,23	555,09	502,71	7,57%
τ_{23} max (Mpa)	15,91	15,68	14,59	15,39	3,77%
γ_{23} tensión max (%)	5,75%	6,23%	4,35%	5,44%	14,67%
τ Rotura (Mpa)	15,91	15,68	14,59	15,39	3,77%
γ Rotura (%)	5,75%	6,23%	4,35%	5,44%	14,67%
τ Cortante (Mpa)	9,40	7,65	7,73	8,26	9,78%
γ Cortante (%)	2,23%	1,78%	1,61%	1,87%	13,92%

TABLA 24. Propiedades probetas CORVO.

Al igual que las probetas impresas verticalmente de los demás ensayos, en las de cortante ocurren lo mismo, estas suelen fallar por separación de capas, lo que provoca que los resultados obtenidos no sean del todo. Aun así, se ha obtenido en este caso una resistencia máxima a cortante de 15,39 MPa que coincide con la de fractura, un módulo de elasticidad transversal de 502,71 MPa y un límite elástico transversal de 8,26 MPa.

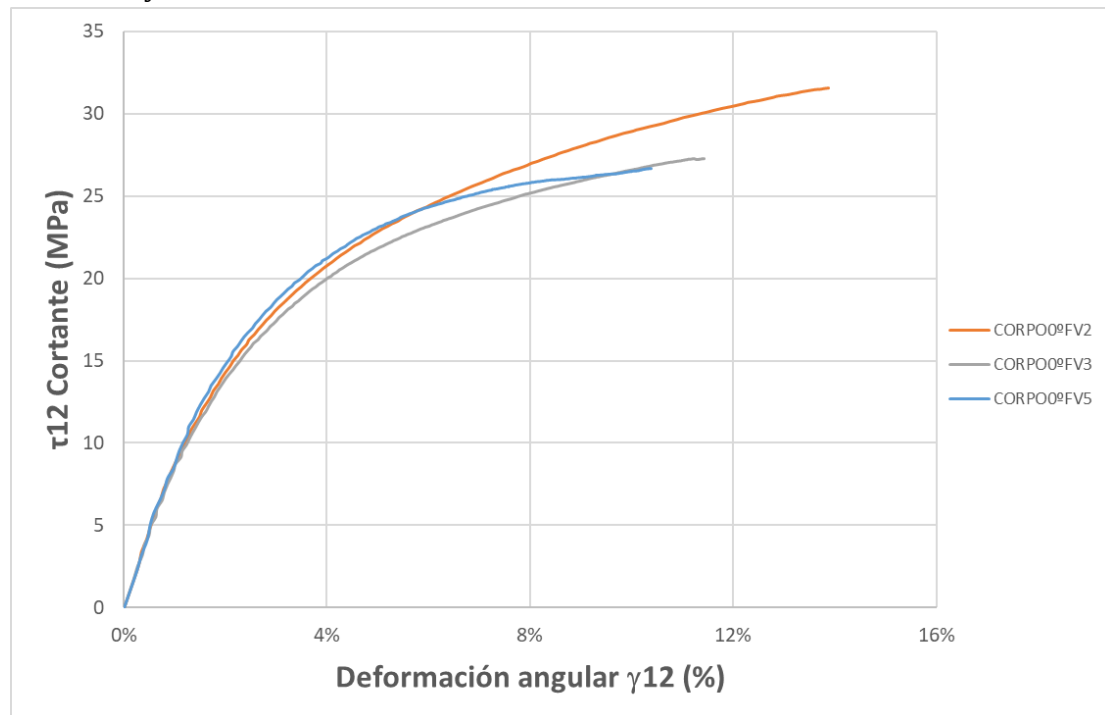
6.3.2. Onyx + FV

ILUSTRACIÓN 119. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPO0°FV.

	RESULTADOS CORPO0°FV			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORPO0°FV2	CORPO0°FV3	CORPO0°FV5		
G (Mpa)	950,74	934,39	952,60	945,91	0,86%
τ₁₂ max (Mpa)	31,58	27,26	26,69	28,51	7,66%
γ₁₂ tensión max (%)	13,88%	11,43%	10,38%	11,90%	12,33%
τ Rotura (Mpa)	31,58	27,26	26,69	28,51	7,66%
γ Rotura (%)	13,88%	11,43%	10,38%	11,90%	12,33%
τ Cortante (Mpa)	10,73	10,25	12,32	11,10	7,97%
γ Cortante (%)	1,30%	1,28%	1,50%	1,36%	7,14%

TABLA 25. Propiedades probetas CORPO0°FV.

Al igual que en los ensayos de tracción, al introducir fibra de vidrio a 0° en el onyx se obtiene una mejora de sus propiedades y de su comportamiento, sin llegar a ser una mejora tan grande como la que sucede a tracción. En este caso la tensión máxima transversal es de 28,51 MPa frente a los 22,38 MPa de solo onyx, una mejora importante pero no sustancial. Cabe destacar que la deformación angular de la tensión máxima, la cual coincide con la de rotura, es del 11,9%, algo mayor que la de solo onyx, consiguiendo de esta manera una zona plástica mayor. Esto se puede deber a la inserción de fibra de vidrio al provocar una mayor sujeción del onyx.

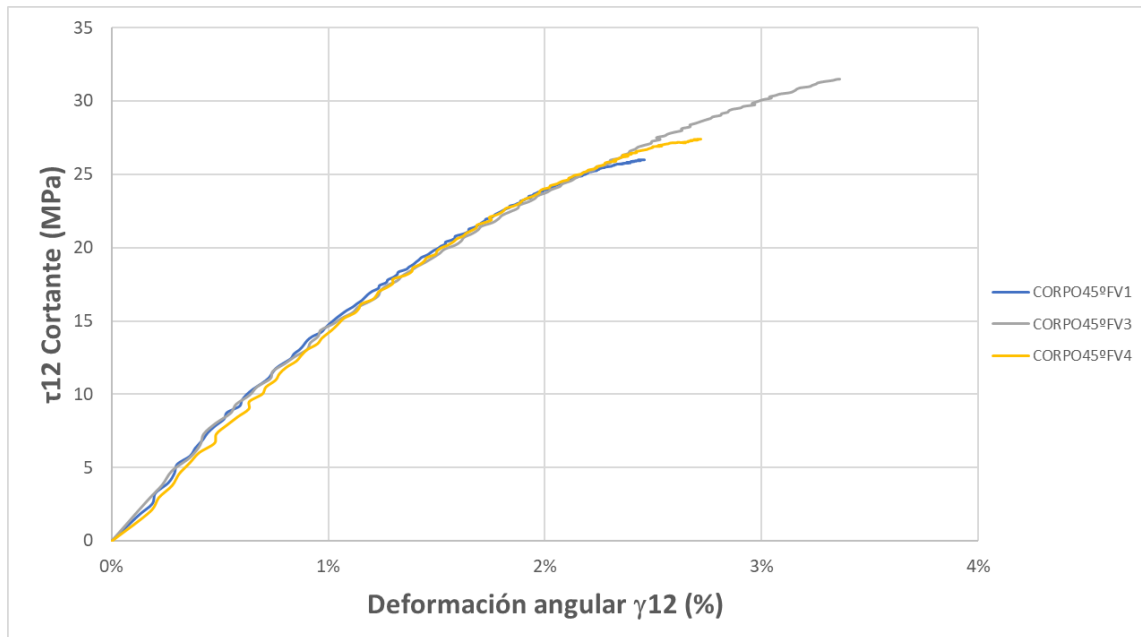


ILUSTRACIÓN 120. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPO45°FV.

	RESULTADOS CORPO45°FV			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORPO45°FV1	CORPO45°FV3	CORPO45°FV4		
G (Mpa)	1648,60	1656,70	1476,20	1593,83	5,22%
τ₁₂ max (Mpa)	26,02	31,48	27,43	28,31	8,17%
γ₁₂ tensión max (%)	2,44%	3,36%	2,72%	2,84%	13,60%
τ Rotura (Mpa)	26,02	31,48	27,43	28,31	8,17%
γ Rotura (%)	2,46%	3,36%	2,72%	2,85%	13,31%
τ Cortante (Mpa)	17,84	16,34	20,64	18,27	9,76%
γ Cortante (%)	1,27%	1,19%	1,59%	1,35%	12,86%

TABLA 26. Propiedades probetas CORPO45°FV.

Con respecto a las probetas de onyx con fibra de vidrio a 45° se obtiene una tensión máxima muy similar a la de 0° pero en un rango de deformaciones angulares mucho menor. Por lo tanto, se obtiene un mayor módulo de elasticidad transversal de 1593,83 MPa y un mayor límite elástico de 18,27 MPa.

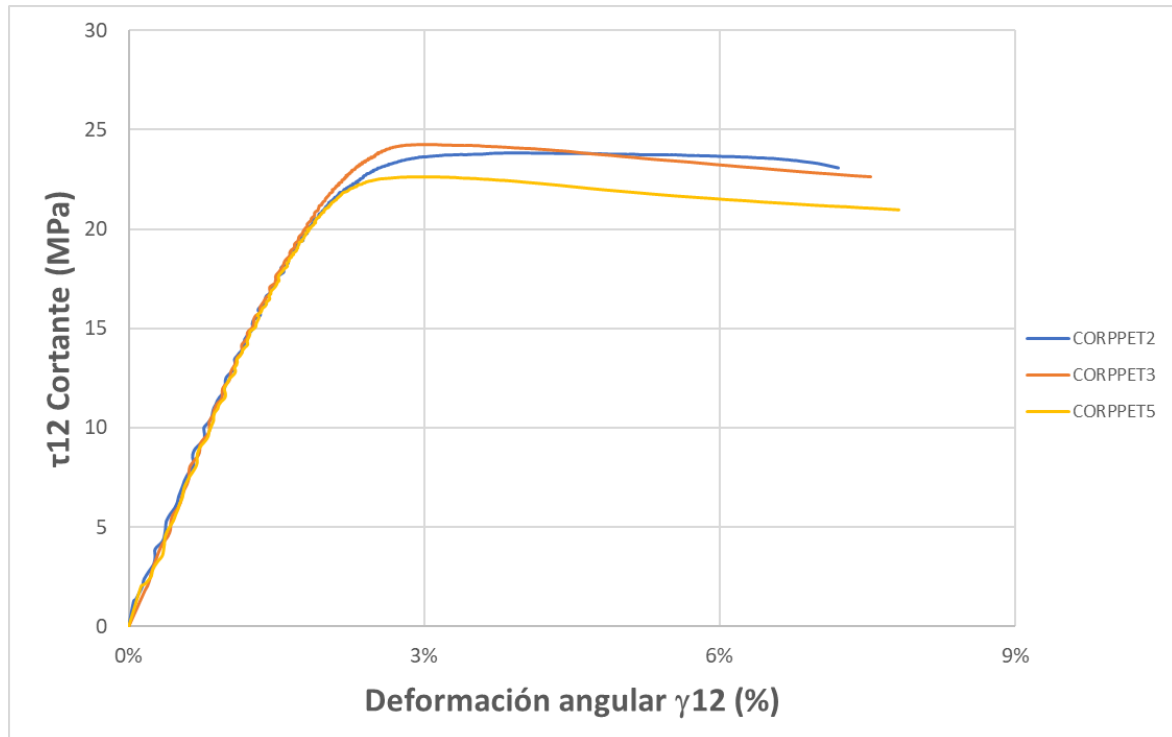
6.3.3. PET FC

ILUSTRACIÓN 121. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPPET.

	RESULTADOS CORPPET			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORPPET2	CORPPET3	CORPPET5		
G (Mpa)	1324,80	1203,90	1198,90	1242,53	4,68%
τ_{12} max (Mpa)	23,83	24,26	22,66	23,58	2,87%
γ_{12} tensión max (%)	3,98%	2,98%	3,00%	3,32%	14,03%
τ Rotura (Mpa)	23,07	22,63	21,00	22,23	4,02%
γ Rotura (%)	7,21%	7,54%	7,82%	7,52%	3,32%
τ Cortante (Mpa)	18,10	21,33	20,60	20,01	6,92%
γ Cortante (%)	1,55%	1,97%	1,92%	1,82%	10,22%

TABLA 27. Propiedades probetas CORPPET.

Con respecto a la tensión cortante del plano 12 del PET FC, se obtiene una tensión máxima relativamente pronto de 23,58 MPa al 3,3% de deformación angular, pero el material es capaz de aguantar un gran rango de deformaciones hasta fracturar en 22,23 MPa al 7,5%. Es importante resaltar que es un material que resiste un gran rango de deformaciones después de haber llegado a su tensión máxima, al igual que es importante destacar que el límite elástico se produce bastante cerca de la tensión máxima, a 20,01 MPa.

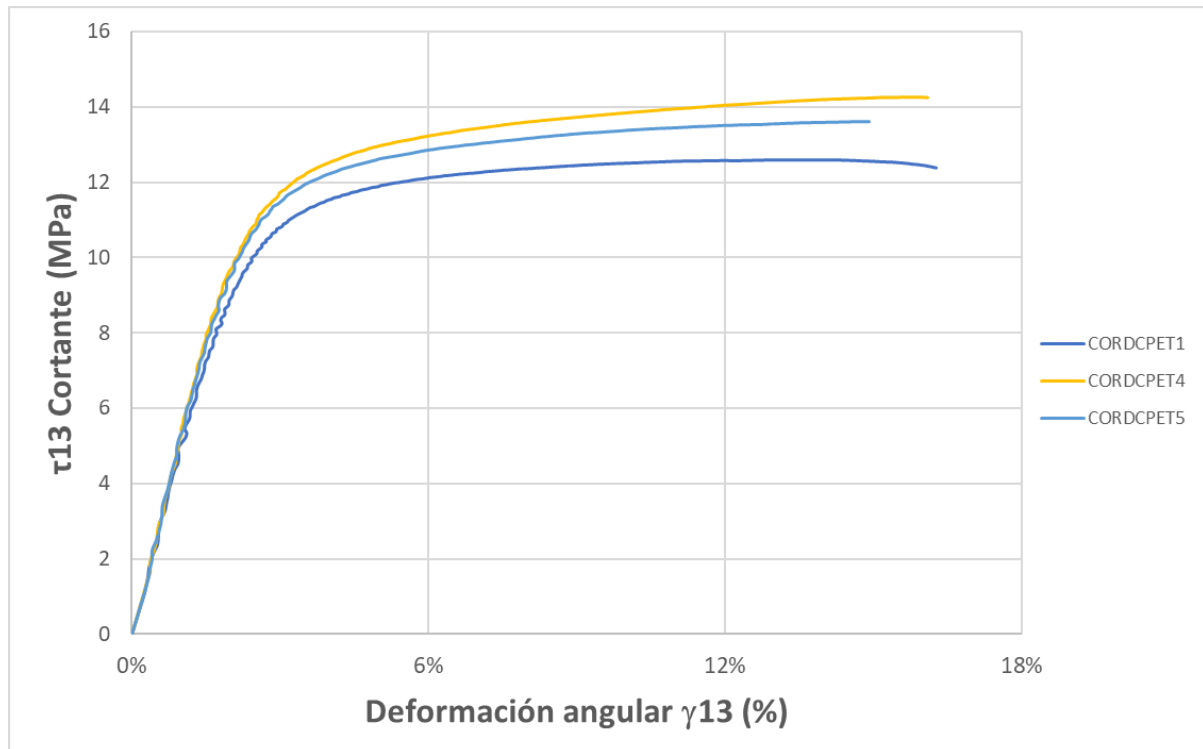


ILUSTRACIÓN 122. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORDCPET.

	RESULTADOS CORDCPET			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORDCPET1	CORDCPET4	CORDCPET5		
G (Mpa)	502,72	518,54	505,41	508,89	1,36%
τ_{13} max (Mpa)	12,58	14,27	13,61	13,49	5,16%
γ_{13} tensión max (%)	13,60%	15,80%	14,91%	14,77%	6,11%
τ Rotura (Mpa)	12,37	14,26	13,61	13,41	5,85%
γ Rotura (%)	16,26%	16,09%	14,91%	15,75%	3,82%
τ Cortante (Mpa)	8,69	10,06	10,05	9,60	6,69%
γ Cortante (%)	1,93%	2,15%	2,19%	2,09%	5,41%

TABLA 28. Propiedades probetas CORDCPET.

Con respecto a los resultados en el plano 13 del PET FC, se han obtenido unos valores de tensiones máximas y de rotura bastantes pequeños en un gran rango de deformaciones, por lo tanto, se ha obtenido un módulo de elasticidad transversal relativamente pequeño, de 508,89 MPa. Cabe destacar que, al tener un gran rango de deformaciones, puede aguantar durante un mayor tiempo tensiones relativamente bajas.

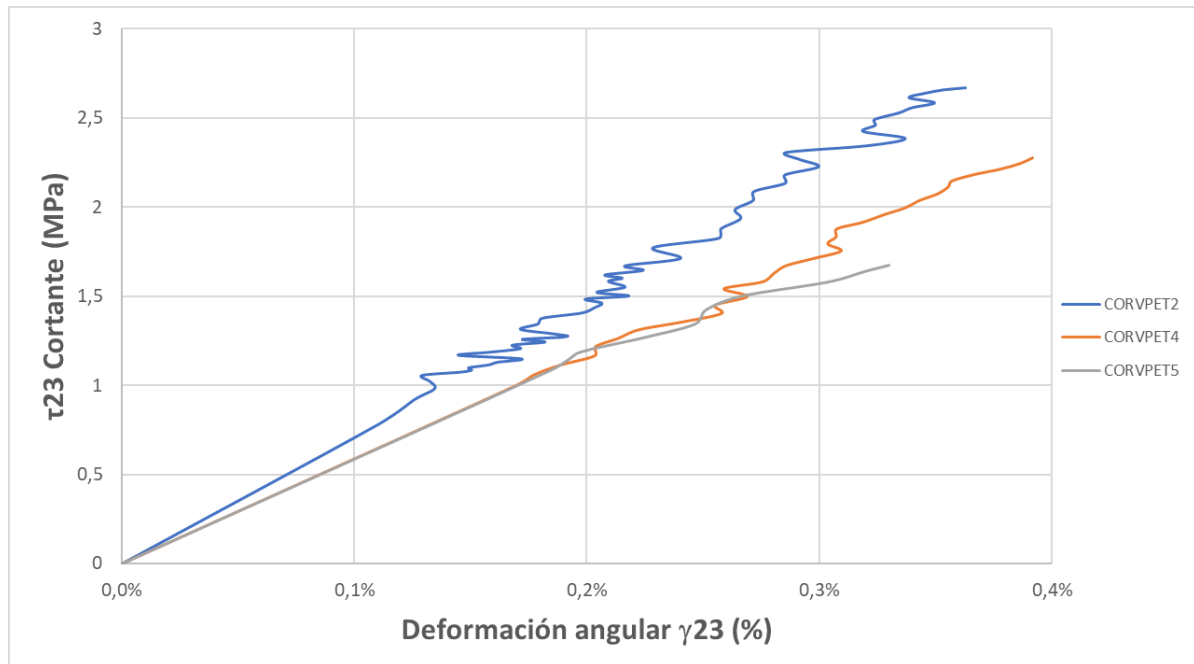


ILUSTRACIÓN 123. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORVPET.

	RESULTADOS CORVPET			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORVPET2	CORVPET4	CORVPET5		
G (Mpa)	750,78	589,40	559,60	633,26	13,26%
τ_{23} max (Mpa)	2,67	2,27	1,67	2,20	18,54%
γ_{23} tensión max (%)	0,36%	0,39%	0,33%	0,36%	6,99%
τ Rotura (Mpa)	2,67	2,27	1,67	2,20	18,54%
γ Rotura (%)	0,36%	0,39%	0,33%	0,36%	6,99%

TABLA 29. Propiedades probetas CORVPET.

Como se ha comentado anteriormente las probetas impresas verticalmente para obtener las propiedades del plano 23 del PET también han fallado por el simple hecho de colocarlas en las mordazas, por lo que su estudio ha sido bastante complejo, y al igual que en los ensayos de tracción se tuvieron que ensayar 7 probetas para obtener unos resultados relativamente óptimos. Con respecto a las propiedades no se pudo obtener el límite elástico debido a su repentina fractura, por otro lado, se obtuvo un módulo de elasticidad de 633,26 MPa y una tensión máxima y de rotura de 2,2 MPa.

6.3.4. PA FC

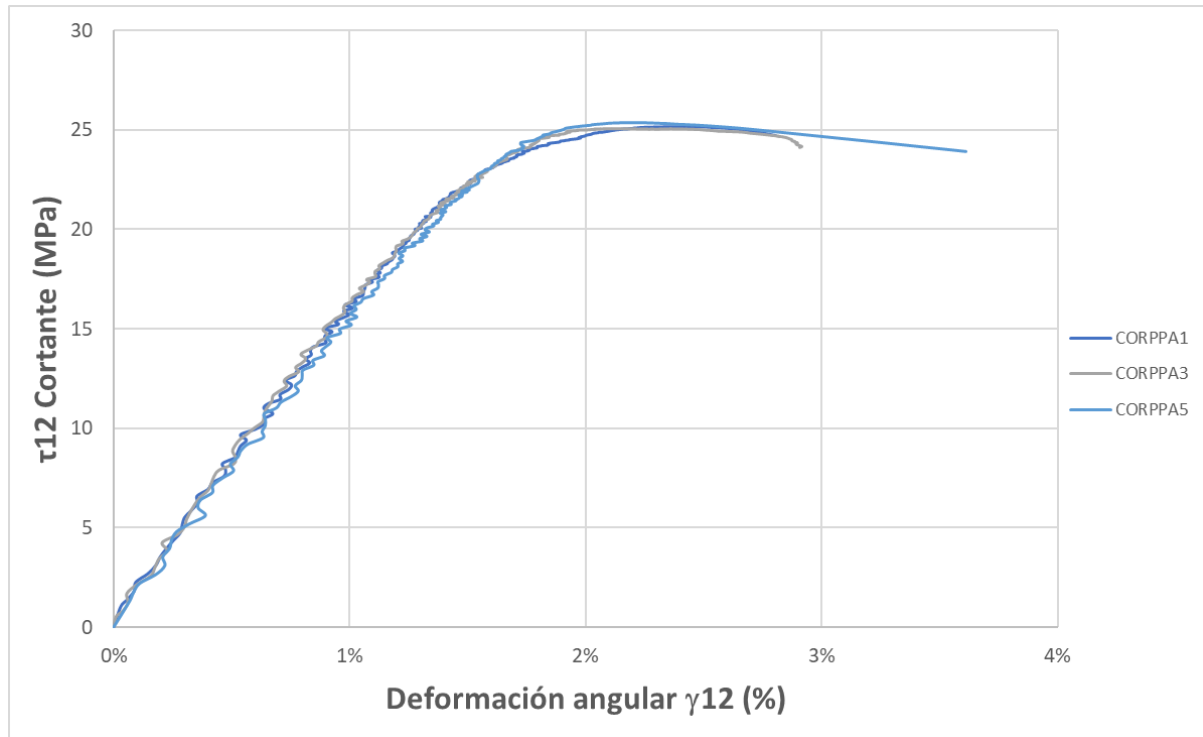


ILUSTRACIÓN 124. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORPPA.

	RESULTADOS CORPPA			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORPPA1	CORPPA3	CORPPA5		
G (Mpa)	1764,10	1764,50	1639,80	1722,8	3,41%
τ_{12} max (Mpa)	25,17	25,05	25,36	25,19	0,50%
γ_{12} tensión max (%)	2,40%	2,11%	2,21%	2,24%	5,43%
τ Rotura (Mpa)	24,72	24,11	23,91	24,25	1,42%
γ Rotura (%)	2,81%	2,91%	3,61%	3,11%	11,51%
τ Cortante (Mpa)	21,87	21,52	23,43	22,27	3,73%
γ Cortante (%)	1,44%	1,41%	1,63%	1,49%	6,48%

TABLA 30. Propiedades probetas CORPPA.

Con respecto a las propiedades en el plano 12 de la poliamida se ha obtenido el mayor módulo de elasticidad transversal de 1722,8 MPa, esto se debe a su pequeño rango de deformaciones en el que se abarca la curva de tensiones. La tensión máxima transversal es de 25,19 MPa, bastante parecida a la del onyx con fibra de vidrio a 0°, a diferencia de este, la poliamida una vez que llega a la tensión máxima puede alargarse más hasta una tensión de rotura de 24,25 MPa y una deformación angular de 3,1%. Cabe destacar que el límite elástico se produce relativamente cercano a la tensión máxima, concretamente a 22,27 MPa.

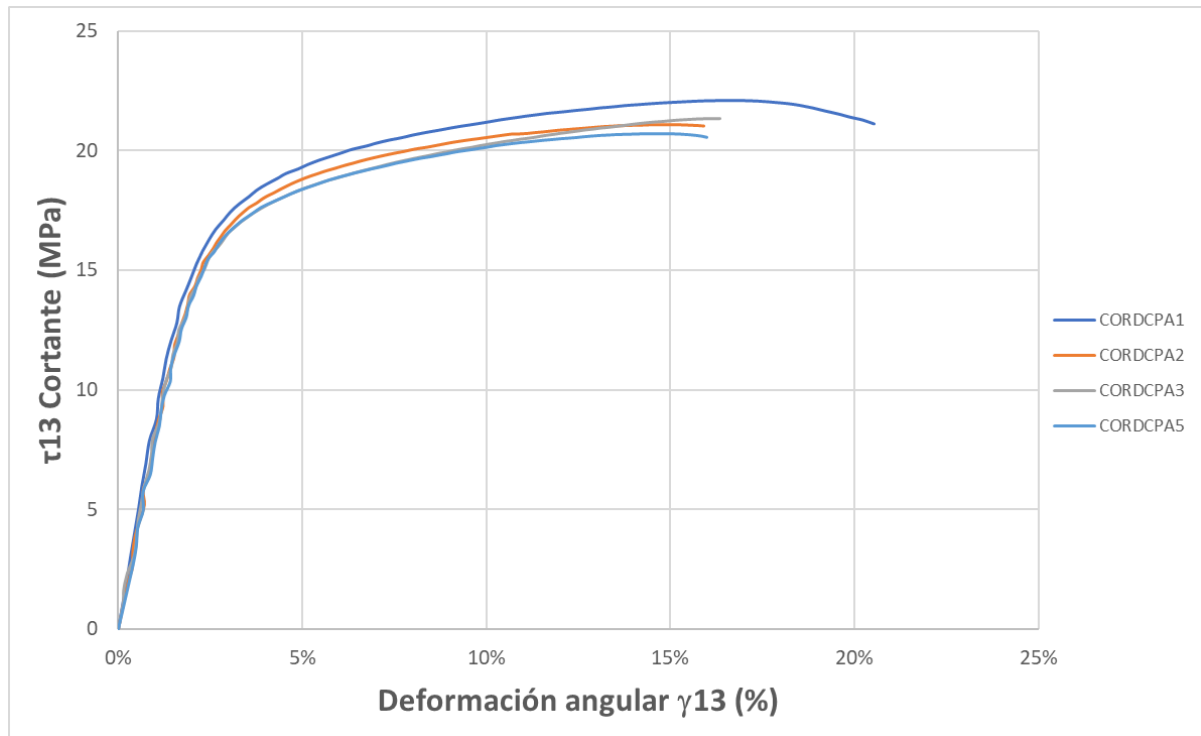


ILUSTRACIÓN 125. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORDCPA.

	RESULTADOS CORDCPA				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORDCPA1	CORDCPA2	CORDCPA3	CORDCPA5		
G (Mpa)	915,62	787,48	824,17	772,79	825,02	6,73%
τ_{13} max (Mpa)	22,08	21,08	21,34	20,72	21,31	2,34%
γ_{13} tensión max (%)	16,82%	14,79%	16,35%	14,44%	15,60%	6,44%
τ Rotura (Mpa)	21,10	21,02	21,34	20,57	21,01	1,32%
γ Rotura (%)	20,55%	15,90%	16,35%	15,98%	17,19%	11,30%
τ Cortante (Mpa)	13,47	13,96	12,99	13,94	13,59	2,94%
γ Cortante (%)	1,66%	1,93%	1,80%	2,04%	1,86%	7,64%

TABLA 31. Propiedades probetas CORDCPA.

En la tabla 32 se muestra los resultados obtenidos de las propiedades en el plano 13 de la poliamida, consiguiendo una tensión máxima transversal de 21,31 MPa con una deformación angular del material del 15,6%. En la ilustración 127 se puede observar como el límite elástico indicado en la tabla 32 se produce bastante temprano en la curva, provocando de esta manera un rango de plasticidad bastante grande en el plano 13, a diferencia del plano 12, el cual tiene un rango de deformaciones bastante menor, por lo tanto, menos plástico.

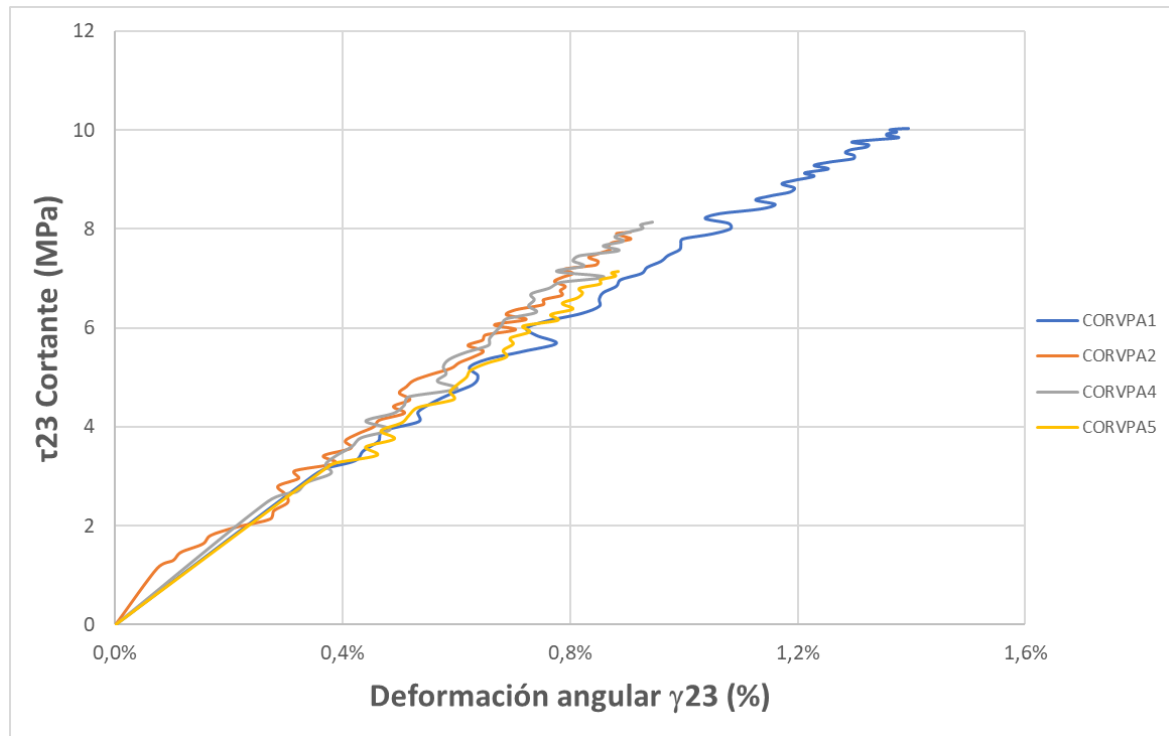


ILUSTRACIÓN 126. Curvas Tensión cortante-Deformación angular probetas CORVPA.

	RESULTADOS CORVPA				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	CORVPA1	CORVPA2	CORVPA4	CORVPA5		
G (Mpa)	802,27	890,73	870,50	812,38	843,97	4,44%
τ₂₃ max (Mpa)	10,04	7,94	8,14	7,15	8,31	12,75%
γ₂₃ tensión max (%)	1,39%	0,91%	0,95%	0,88%	1,03%	20,35%
τ Rotura (Mpa)	10,04	7,94	8,14	7,15	8,31	12,75%
γ Rotura (%)	1,39%	0,91%	0,95%	0,88%	1,03%	20,35%

TABLA 32. Propiedades probetas CORVPA.

Hay que destacar que el estudio de las probetas imprimidas verticalmente de la poliamida ha sido más sencillo que el del PET, pues estas poseen una mayor adherencia de capas, de esta manera los resultados obtenidos han sido más similares. La tensión máxima en el plano 23, la cual coincide con la rotura, ha sido de 8,31 MPa con una deformación angular del 1,03%. Resaltar que los ensayos de estas probetas, tanto las del PET como las de poliamida tenían una duración aproximada de 30 s y 1 min, esto se debe por la adherencia de las capas en la impresión 3D. Al igual que los ensayos de PET, el punto de rotura es imprevisible. debido a que su fractura se produce por la separación de capas, este hecho se puede observar en la probeta 1 de la cual se obtiene una mayor tensión antes de fallar.

6.4. Compresión

En el ensayo de compresión como se ha comentado anteriormente se obtendrán las curvas resistencia a compresión-deformación, la resistencia máxima a compresión, la resistencia de rotura y el módulo de elasticidad de compresión.

6.4.1. Onyx

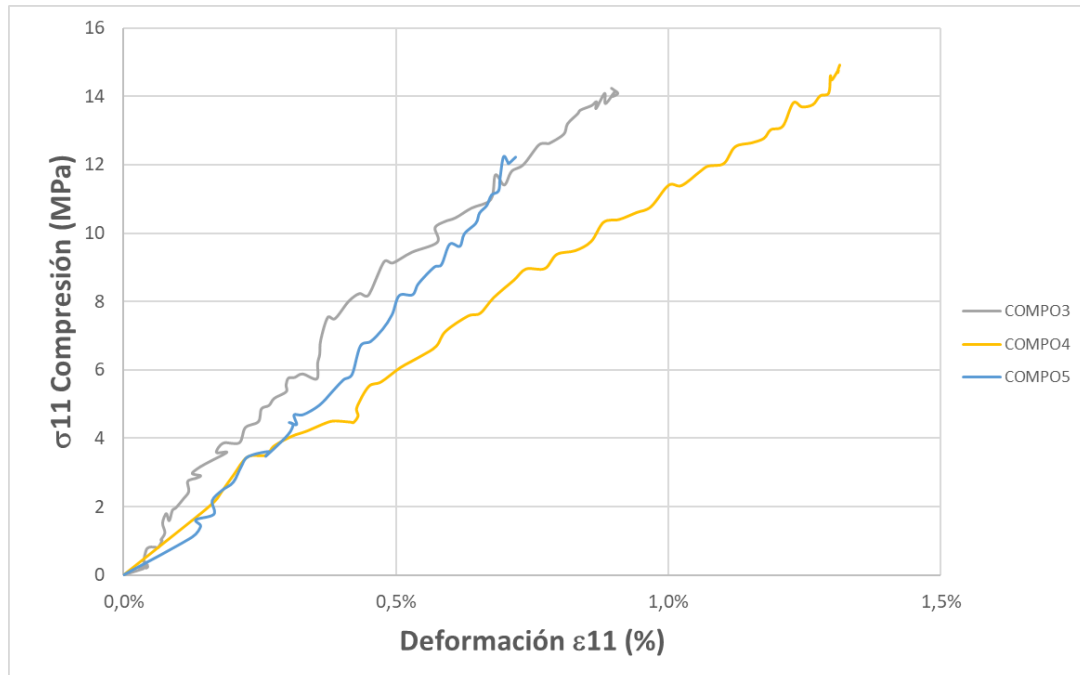


ILUSTRACIÓN 127. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPO.

	RESULTADOS COMPO			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMPO3	COMPO4	COMPO5		
Ec (Mpa)	1979,90	1368,60	1409,80	1586,10	17,59%
σ_{11} Comp. max (Mpa)	14,25	14,92	12,25	13,81	8,23%
ϵ_{11} Tensión max (%)	0,89%	1,31%	0,70%	0,97%	26,51%
σ Rotura (Mpa)	14,25	14,92	12,24	13,80	8,26%
ϵ Rotura (%)	0,89%	1,31%	0,72%	0,98%	25,51%

TABLA 33. Propiedades probetas COMPO.

Como se ha comentado en el apartado de análisis de resultados de los ensayos de compresión, una vez que se obtenía la tensión máxima, una gran parte de las probetas pandeaban por lo que a partir de este punto los datos obtenidos eran incorrectos. De esta manera la tensión rotura es prácticamente la misma que la tensión máxima en la mayoría de los casos. Con respecto al onyx en la dirección 1 se ha obtenido una resistencia máxima a compresión de 13,81 MPa con una deformación del material del 0,97% y un módulo de elasticidad de compresión de 1586,1 MPa.



ILUSTRACIÓN 128. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMDCO.

	RESULTADOS COMDCO				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMDCO1	COMDCO3	COMDCO4	COMDCO5		
E_c (Mpa)	2146,70	2855,10	2681,90	2118,10	2450,45	13,22%
σ_{22} Comp. max (Mpa)	24,64	27,00	25,95	26,06	25,91	3,23%
ϵ_{22} Tensión max (%)	2,27%	2,12%	1,97%	2,18%	2,13%	5,21%
σ Rotura (Mpa)	21,03	23,26	22,25	23,07	22,40	3,92%
ϵ Rotura (%)	3,37%	3,11%	3,16%	3,10%	3,18%	3,41%

TABLA 34. Propiedades probetas COMDCO.

En la ilustración 130 se muestran las curvas resistencia a compresión-deformación, de las cuales se puede resaltar su tendencia descendiente una vez que llega a la tensión máxima. Las probetas imprimidas de canto de todos los materiales son prácticamente las únicas que no pandeaban una vez que llegaban a su punto de resistencia a compresión máxima. En el caso de las de onyx este punto tiene un valor de 25,91 MPa con una deformación del 2,13%, una tensión de rotura del 22,4 MPa al 3,18% y un módulo de 2450,45 MPa.

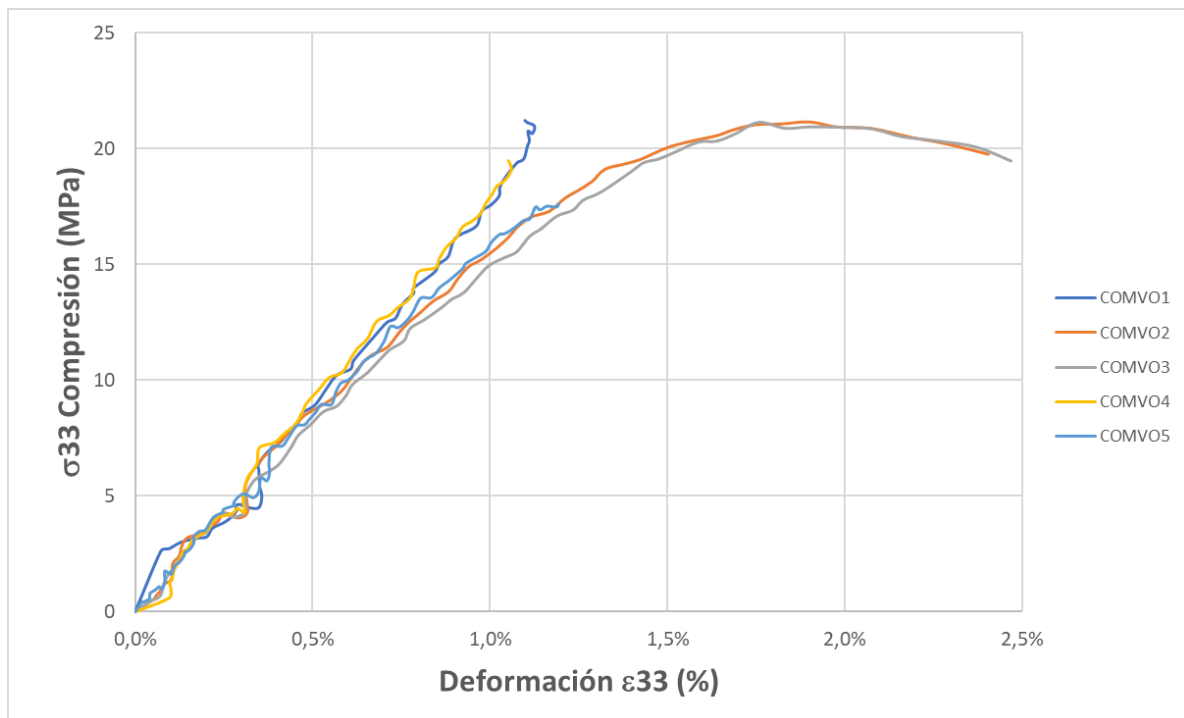


ILUSTRACIÓN 129. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMVO.

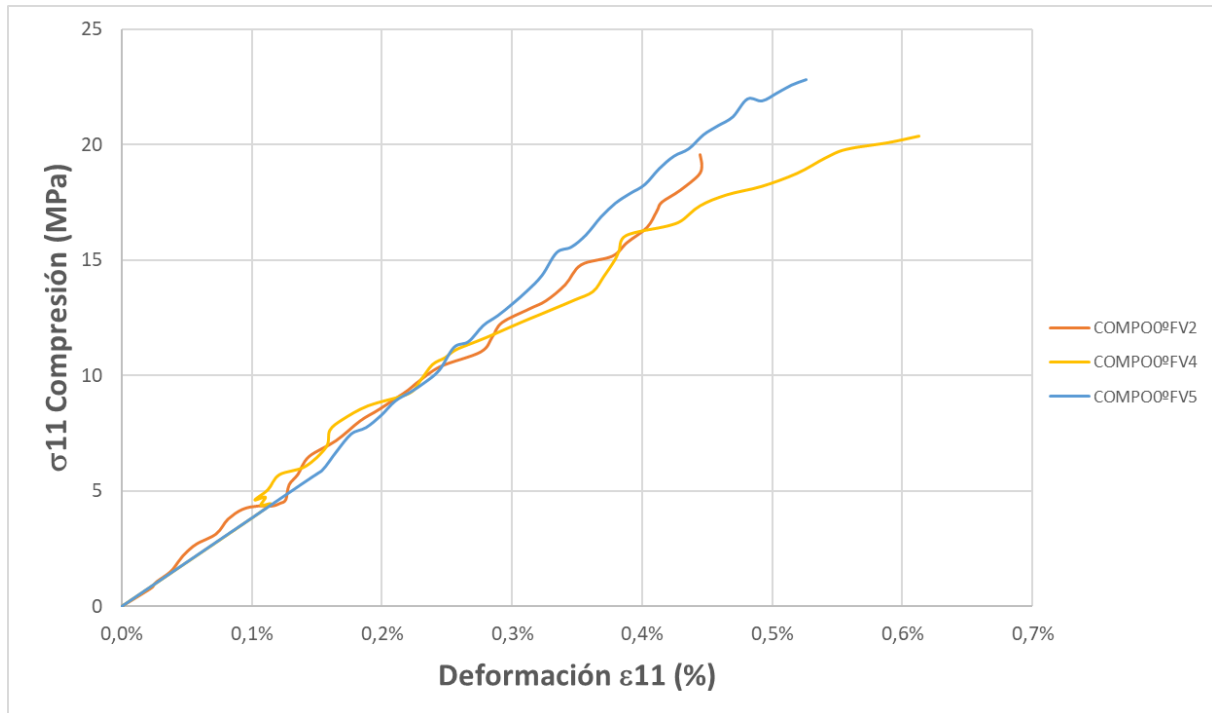
	RESULTADOS COMVO					MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMVO1	COMVO2	COMVO3	COMVO4	COMVO5		
E_c (Mpa)	1702,70	1715,20	1757,10	1718,90	1744,20	1727,62	1,16%
σ_{33} Comp. max (Mpa)	21,21	21,17	21,15	19,47	17,63	20,13	7,02%
ϵ_{33} Tensión max (%)	1,10%	1,90%	1,76%	1,05%	1,19%	1,40%	25,41%
σ Rotura (Mpa)	21,21	19,77	19,48	19,47	17,63	19,51	5,85%
ϵ Rotura (%)	1,10%	2,40%	2,47%	1,05%	1,19%	1,64%	39,56%

TABLA 35. Propiedades probetas COMVO.

Las probetas de onyx imprimidas verticalmente para los ensayos a compresión fueron las únicas que no estallaron entre todas las probetas imprimidas verticalmente una vez que llegaban al punto de resistencia máxima, lo cual se convierte en otra razón más para resaltar la gran capacidad de adherencia que tiene el onyx en su impresión.

Hay que destacar que en dicha dirección el onyx tiene la menor resistencia a la tracción con respecto a las demás direcciones, pero en esfuerzos a compresión posee una resistencia máxima de 20,13 MPa, un valor mayor que en la dirección 1, el cual es de 13,81 MPa. Esto provoca que según los esfuerzos a los que sometamos una determinada pieza, habrá que tener en cuenta las distintas direcciones de impresión.

También hay que destacar el comportamiento de las probetas 2 y 3, las cuales no pandearon durante el ensayo y fallaron con una mayor deformación que las demás, provocando un comportamiento más elástico en la dirección vertical de impresión.

6.4.2. Onyx + FV**ILUSTRACIÓN 130.** Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPO0°FV.

	RESULTADOS COMPO0°FV			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMPO0°FV2	COMPO0°FV4	COMPO0°FV5		
Ec (Mpa)	4239,60	4076,80	4183,70	4166,70	1,62%
σ11 Comp. max (Mpa)	19,57	20,37	22,81	20,92	6,59%
ε11 Tensión max (%)	0,44%	0,48%	0,53%	0,48%	6,86%
σ Rotura (Mpa)	19,57	20,37	22,81	20,92	6,59%
ε Rotura (%)	0,44%	0,48%	0,53%	0,48%	6,86%

TABLA 36. Propiedades probetas COMPO0°FV.

Una vez obtenidos los resultados del onyx con fibra de vidrio a 0° en la tabla 37, se puede apreciar una mejora de la resistencia máxima en la dirección 1 con respecto al onyx, en este caso se obtiene un valor de 20,92 MPa, el cual coincide con el de rotura, pero hay que destacar que dicho punto se obtiene con una deformación muy pequeña (0,48%), provocando de esta manera un módulo de elasticidad de compresión mucho mayor (4166,7 MPa).

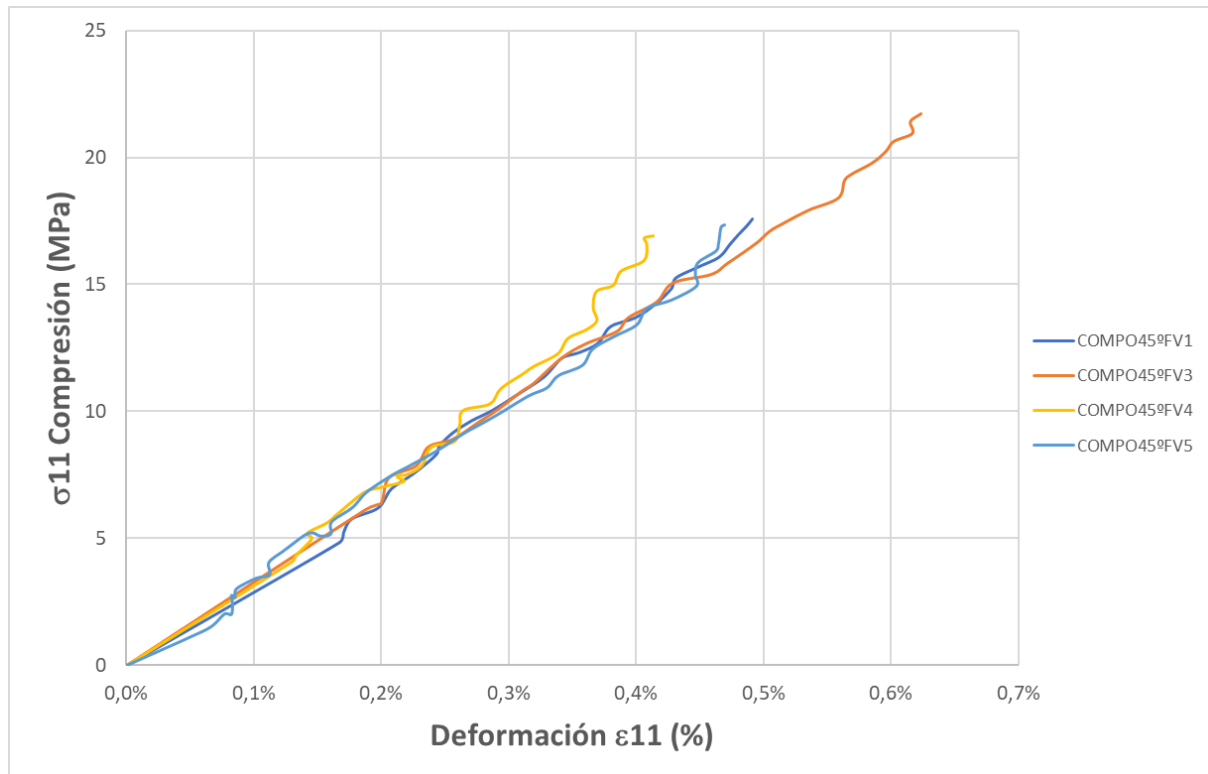


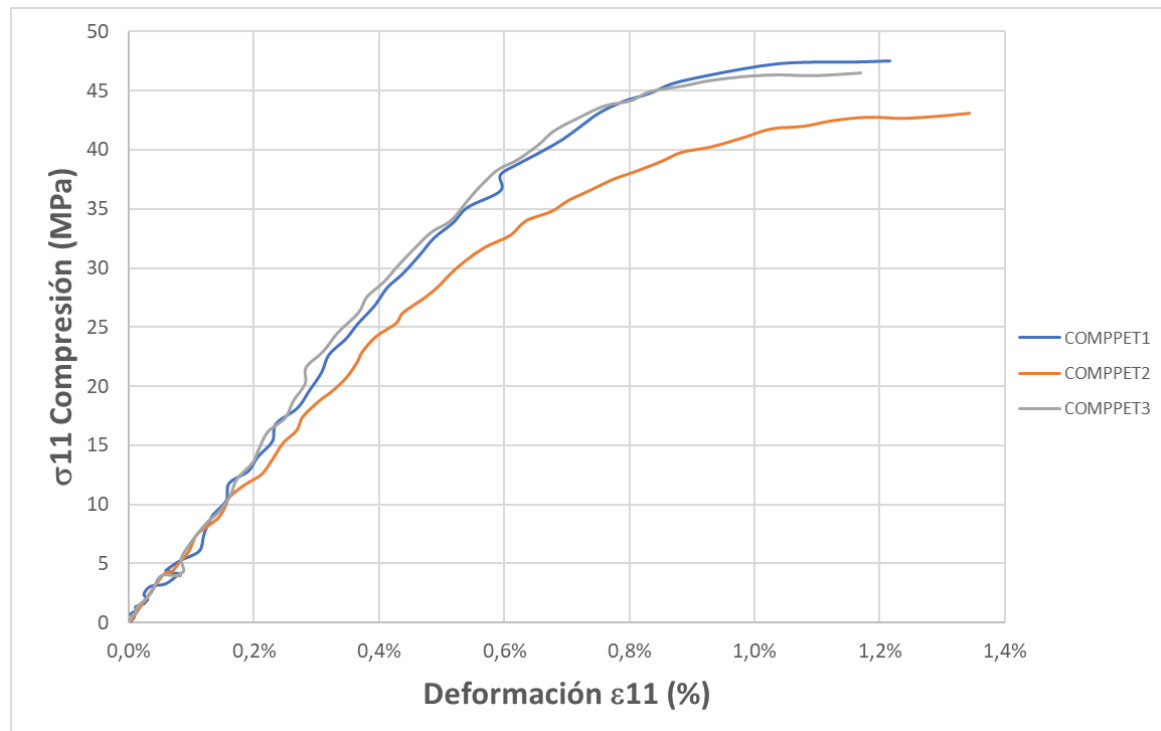
ILUSTRACIÓN 131. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPO45°FV.

	RESULTADOS COMPO45°FV				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMPO45°FV1	COMPO45°FV3	COMPO45°FV4	COMPO45°FV5		
Ec (Mpa)	3466,40	3460,20	3540,80	3454,30	3480,43	1,01%
σ11 Comp. max (Mpa)	17,57	21,72	16,91	17,35	18,39	10,55%
ε11 Tensión max (%)	0,49%	0,62%	0,41%	0,47%	0,50%	15,42%
σ Rotura (Mpa)	17,57	21,72	16,91	17,35	18,39	10,55%
ε Rotura (%)	0,49%	0,62%	0,41%	0,47%	0,50%	15,42%

TABLA 37. Propiedades probetas COMPO45°FV.

Con respecto a las probetas con fibra de vidrio a 45° se obtienen unos resultados muy similares a los mostrados en la tabla 36, pero en este caso, este material resiste un poco menos, el cual posee una resistencia máxima de 18,39 MPa con una deformación del 0,5% y por lo tanto un módulo de elasticidad de 3480,43 MPa.

Estudiando los resultados a compresión del onyx con fibra de vidrio, se puede observar claramente que la fibra de vidrio no aporta una mejora sustancial en las propiedades del onyx a compresión, a diferencia de las propiedades a tracción, en las cuales los valores de tensión máxima son 4 veces más grandes que los obtenidos con el onyx.

6.4.3. PET FC**ILUSTRACIÓN 132.** Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPPET.

	RESULTADOS COMPPET			MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMPET1	COMPET2	COMPET3		
Ec (Mpa)	6767,10	6521,90	6677,50	6655,50	1,52%
σ11 Comp. max (Mpa)	47,50	43,14	46,52	45,72	4,08%
ε11 Tensión max (%)	1,22%	1,34%	1,17%	1,24%	5,87%
σ Rotura (Mpa)	47,50	43,14	46,52	45,72	4,08%
ε Rotura (%)	1,22%	1,34%	1,17%	1,24%	5,87%

TABLA 38. Propiedades probetas COMPPET.

La tabla 39 muestra las propiedades de compresión obtenidas en la dirección 1 del PET, como se puede observar la resistencia máxima, que coincide con la de rotura, es de 45,72 MPa, la cual se produce a un 1,24% de deformación del material, provocando de esta manera un módulo de elasticidad bastante elevado.

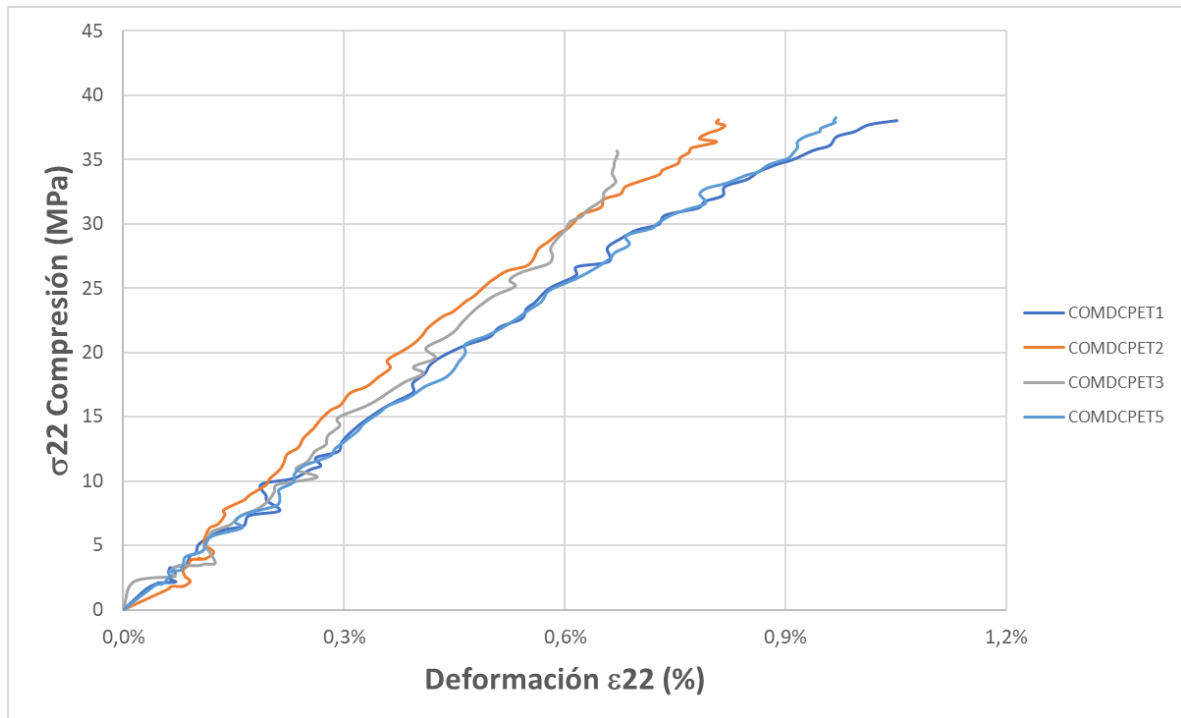


ILUSTRACIÓN 133. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMDCPET.

	RESULTADOS COMDCPET				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMDCPET1	COMDCPET2	COMDCPET3	COMDCPET5		
E_c (Mpa)	4382,40	5313,90	4322,30	4348,10	4591,675	9,09%
σ_{22} Comp. max (Mpa)	38,01	38,06	35,62	38,23	37,48	2,87%
ϵ_{22} Tensión max (%)	1,05%	0,81%	0,67%	0,97%	0,87%	16,74%
σ Rotura (Mpa)	38,01	38,06	35,62	38,23	37,48	2,87%
ϵ Rotura (%)	1,05%	0,81%	0,67%	0,97%	0,87%	16,74%

TABLA 39. Propiedades probetas COMDCPET.

Con respecto a la dirección 2 del PET, se obtienen unas propiedades inferiores. La resistencia máxima, que coincide con la de rotura, es de 37,48 MPa, algo menor a la obtenida en la dirección 1. Esta tensión se produce al 0,87% de deformación, produciendo de esta manera un módulo de compresión de 4591,67 MPa.

Como se puede observar tanto en la ilustración 134 y 135 el punto de rotura se produce relativamente pronto, lo que es un factor para tener en cuenta a la hora de compararlo con otros materiales.

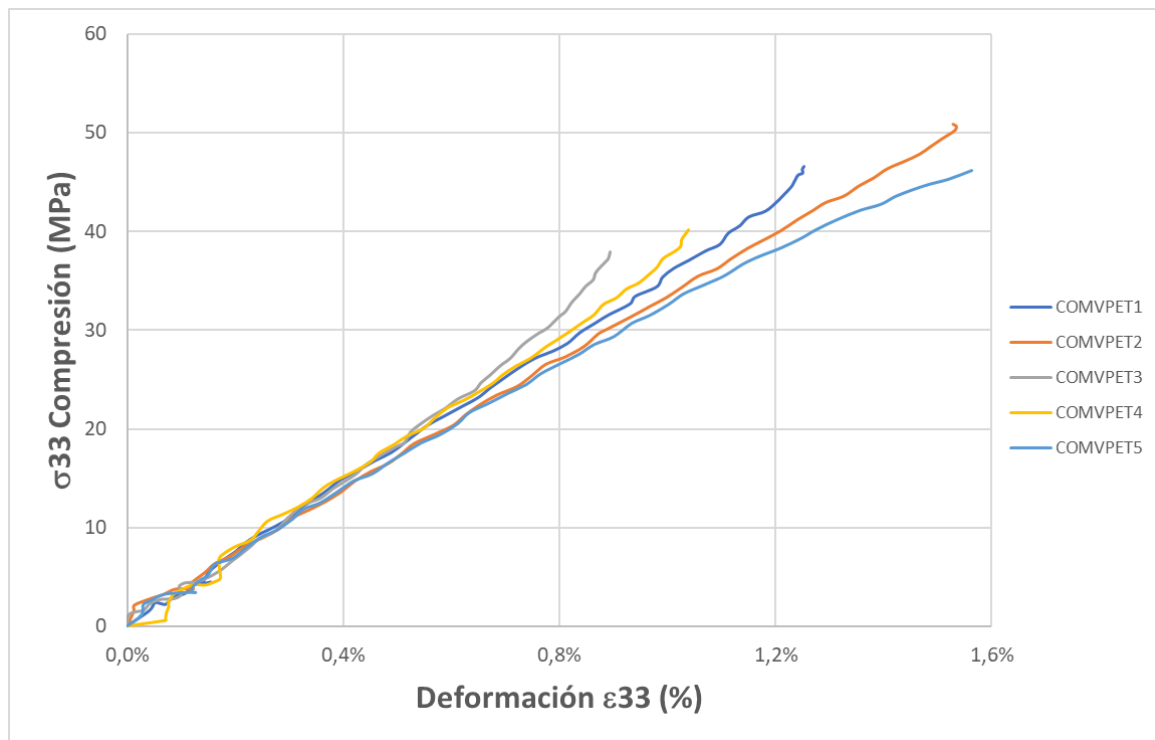


ILUSTRACIÓN 134. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMVPET.

	RESULTADOS COMVPET					MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMVPET1	COMVPET2	COMVPET3	COMVPET4	COMVPET5		
Ec (Mpa)	3601,30	3592,00	3585,40	3677,10	3533,30	3597,82	1,28%
σ33 Comp. max (Mpa)	46,52	50,83	37,91	40,14	46,19	44,32	10,54%
ε33 Tensión max (%)	1,25%	1,53%	0,89%	1,04%	1,56%	1,25%	21,01%
σ Rotura (Mpa)	46,52	50,83	37,91	40,14	46,19	44,32	10,54%
ε Rotura (%)	1,25%	1,53%	0,89%	1,04%	1,56%	1,25%	21,01%

TABLA 40. Propiedades probetas COMVPET.

La resistencia máxima a compresión por el PET se produce en la dirección 3, la cual posee un valor de 44,32 MPa a una deformación del 1,25%, provocando de esta manera un módulo de compresión menor, concretamente de 3597,82 MPa. Con estos resultados se puede observar que el PET resiste prácticamente lo mismo en las tres direcciones, pero cabe destacar que en la dirección 3 una vez que alcanza su punto de fallo, este estalla, esto se puede observar en la ilustración 95. Este fenómeno se produce debido a la adherencia del material en su proceso de impresión 3D por capas.

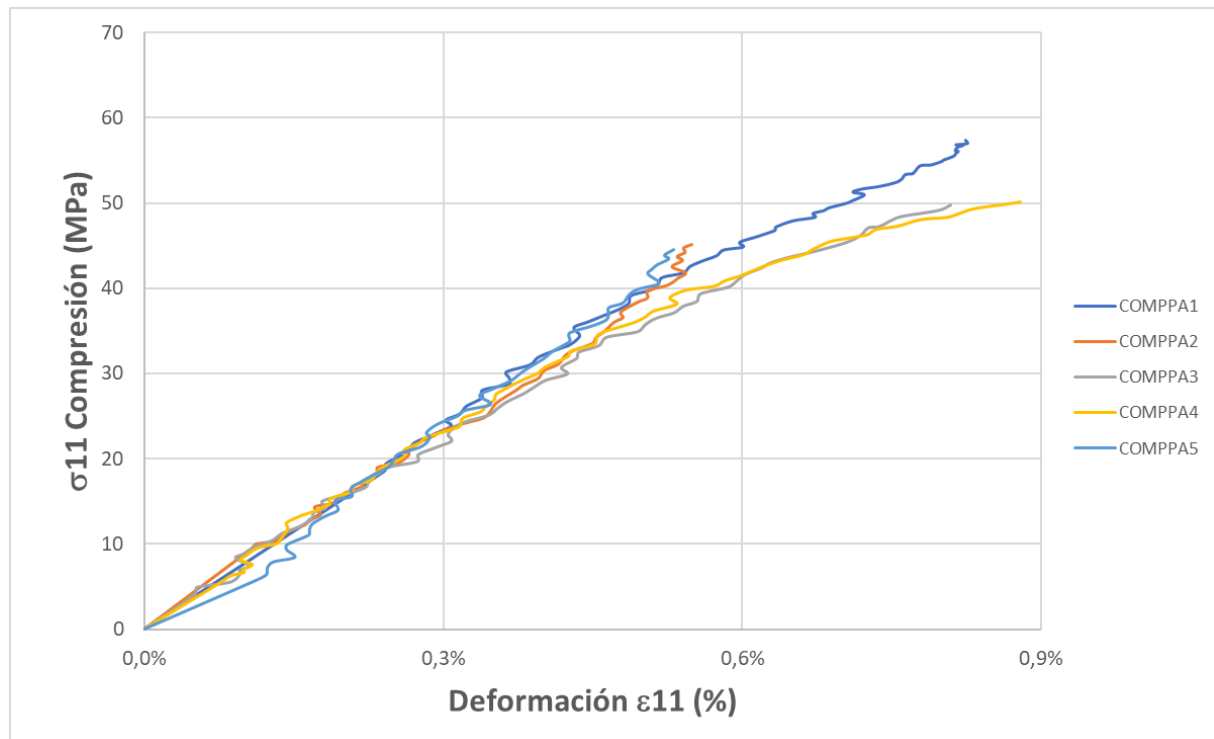
6.4.4. PA FC

ILUSTRACIÓN 135. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMPPA.

	RESULTADOS COMPPA					MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMPPA1	COMPPA2	COMPPA3	COMPPA4	COMPPA5		
E_c (Mpa)	7973,00	7841,10	7931,20	7901,20	7949,90	7919,28	0,58%
σ_{11} Comp. max (Mpa)	57,34	45,08	49,78	50,07	44,57	49,37	9,31%
ε_{11} Tensión max (%)	0,82%	0,55%	0,81%	0,88%	0,53%	0,72%	20,55%
σ Rotura (Mpa)	57,34	45,08	49,78	50,07	44,57	49,37	9,31%
ε Rotura (%)	0,82%	0,55%	0,81%	0,88%	0,53%	0,72%	20,55%

TABLA 41. Propiedades probetas COMPPA.

Para la dirección 1 de la poliamida se ha obtenido una resistencia máxima a compresión de 49,37 MPa con una deformación del 0,72%, lo que produce que este material posea un alto módulo de compresión. Hay que destacar que dos probetas consiguieron alcanzar los 45 MPa de resistencia, otras dos alcanzaron los 50 MPa, mientras que la restante los 57 MPa, unos valores algo dispares, lo que provoca que exista algo de incertidumbre en las resistencias máxima en dicha dirección.

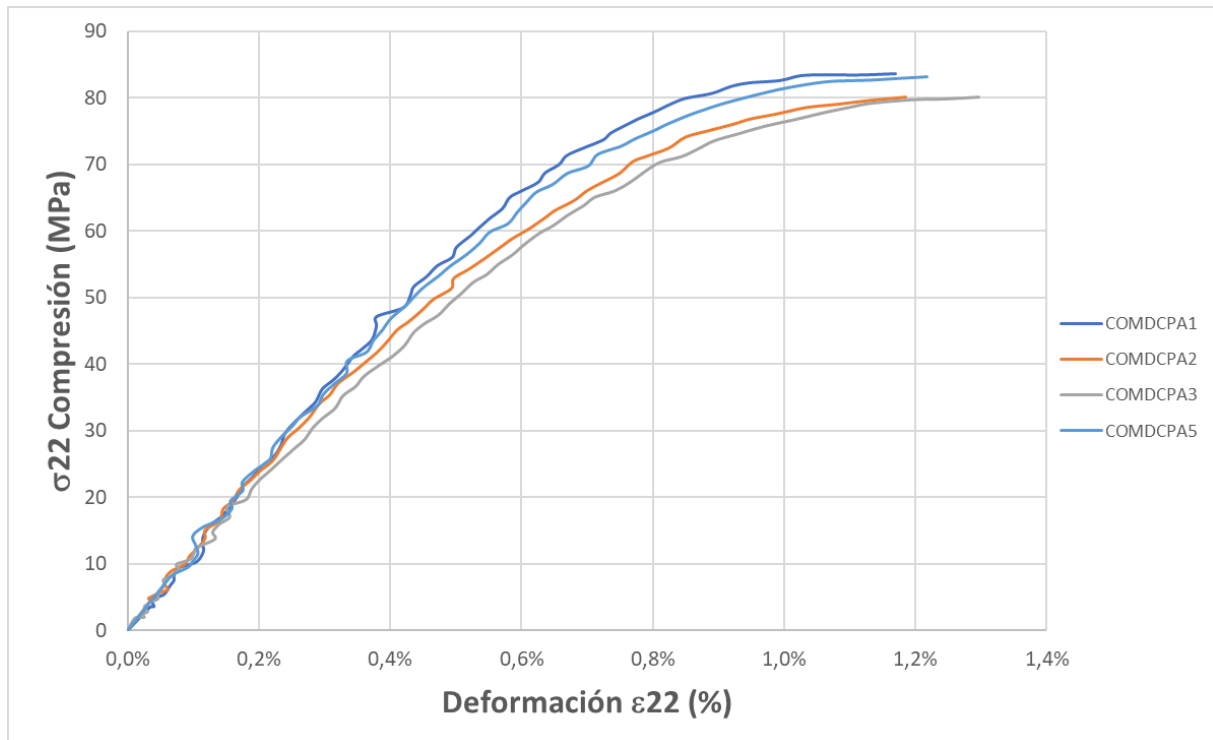


ILUSTRACIÓN 136. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMDCPA.

	RESULTADOS COMDCPA				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMDCPA1	COMDCPA2	COMDCPA3	COMDCPA5		
E_c (Mpa)	12093,00	12084,00	12081,00	12099,00	12089,25	0,06%
σ_{22} Comp. max (Mpa)	83,64	80,05	80,05	83,19	81,73	2,06%
ε_{22} Tensión max (%)	1,17%	1,19%	1,30%	1,22%	1,22%	4,01%
σ Rotura (Mpa)	83,64	80,05	80,05	83,19	81,73	2,06%
ε Rotura (%)	1,17%	1,19%	1,30%	1,22%	1,22%	4,01%

TABLA 42. Propiedades probetas COMDCPA.

Con respecto a la dirección 2 de la poliamida se han obtenido las mayores resistencias a compresión de entre todos los materiales, una resistencia máxima de 81,73 MPa con una deformación del material del 1,22%, la cual coincide con el punto de rotura. Al obtener tan elevadas tensiones en un rango de deformaciones muy pequeño, se obtiene un módulo de compresión de 12089,25 MPa (12,09 GPa).

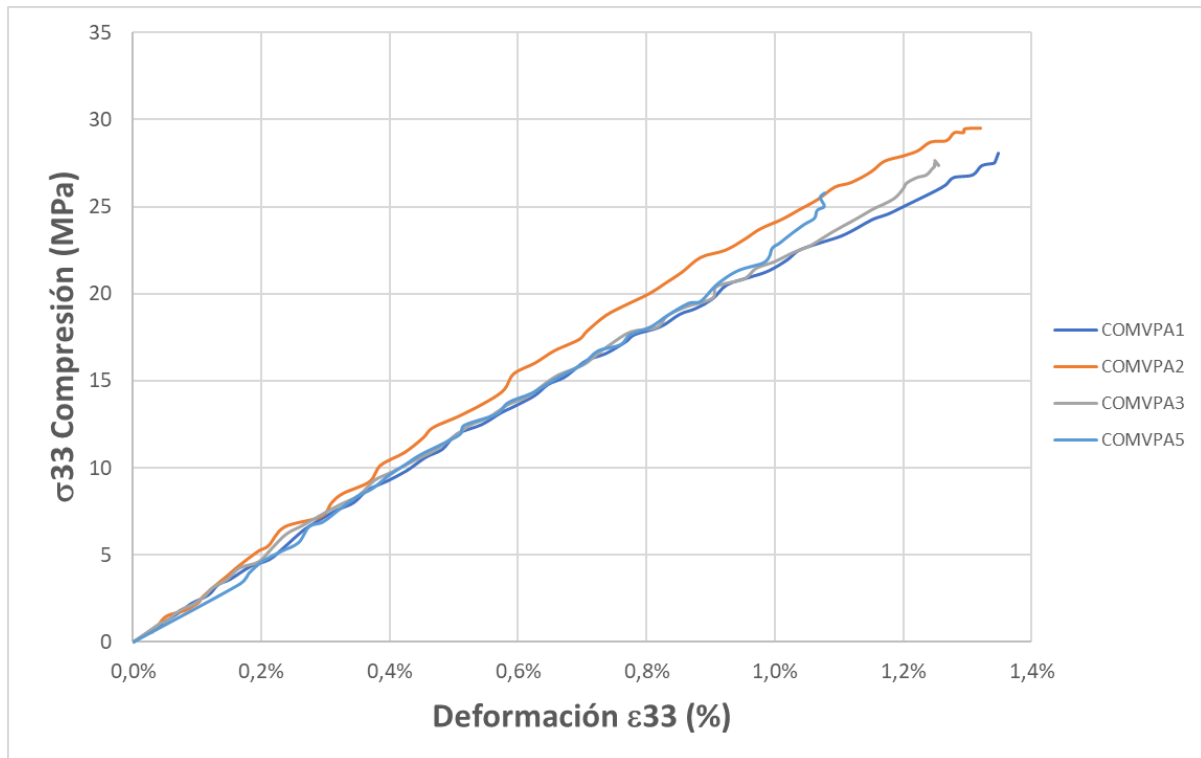


ILUSTRACIÓN 137. Curvas Resistencia a compresión-Deformación probetas COMVPA.

	RESULTADOS COMVPA				MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
	COMVPA1	COMVPA2	COMVPA3	COMVPA5		
E_c (Mpa)	2375,00	2563,10	2469,80	2365,80	2443,425	3,28%
σ_{33} Comp. max (Mpa)	28,05	29,50	27,65	25,78	27,75	4,79%
ϵ_{33} Tensión max (%)	1,35%	1,32%	1,25%	1,08%	1,25%	8,45%
σ Rotura (Mpa)	28,05	29,50	27,65	25,78	27,75	4,79%
ϵ Rotura (%)	1,35%	1,32%	1,25%	1,08%	1,25%	8,45%

TABLA 43. Propiedades probetas COMVPA.

Para la dirección 3 de la poliamida se obtiene una resistencia máxima a compresión de 27,75 MPa con una deformación del 1,25%, lo cual conlleva a que es la dirección más elástica de la poliamida, pero la que menos resiste cuando se somete a esfuerzos a compresión, además de lo mencionado anteriormente, tanto el PET como la poliamida, una vez que alcanzan el punto de rotura, estallan provocando de esta manera una rotura inminente e imprevisible.

6.5. Modos de rotura / fallo

En este apartado se mostrará los modos de fallo que han presentado las probetas.

6.5.1. Tracción



ILUSTRACIÓN 138. Rotura probetas TPO.



ILUSTRACIÓN 139. Sección de rotura probeta TPO.

En las ilustraciones 140 y 141 se muestra el modo de rotura de las probetas de tracción plana del onyx, cabe destacar que tanto las probetas imprimidas planas y de canto poseen el mismo modo de rotura en todos los materiales. Su modo de rotura se produce en gran mayoría en los extremos de las mordazas, aunque también puede ocurrir en el centro de la probeta, como puede observarse en la ilustración 147, la cual corresponde a las probetas de poliamida.



ILUSTRACIÓN 140. Sección de rotura probeta TVO.

En cambio, para las probetas imprimidas verticalmente, se puede observar tanto en la ilustración 142 y 146, el modo de rotura por separación de capas, cuya fractura es frágil, y sin estricción.



ILUSTRACIÓN 141. Rotura probetas TPO0°FV.



ILUSTRACIÓN 142. Sección de rotura probeta TPO0°FV.

En las ilustraciones 143 y 144 se muestra las fracturas que presentan las probetas de onyx con fibra de vidrio 0°, en estas se puede observar como la fractura es repentina, sin llegar a poseer una determinada elongación el material. Si observamos la ilustración 110, en la cual se muestran las curvas tensión-deformación, comprobamos que dichas curvas son prácticamente lineales con poca zona plástica.



ILUSTRACIÓN 143. Rotura probetas TPO45°FV.

Con respecto a las probetas de onyx con fibra de vidrio a 45°, las cuales se muestran en la ilustración 145, podemos observar una cierta estricción, la cual se puede corroborar con la ilustración 111 de las curvas tensión-deformación, las cuales poseen una zona plástica mayor. También cabe destacar que el mallado que forma la fibra de vidrio a 45° provoca que el material no se separe en diferentes partes.



ILUSTRACIÓN 144. Rotura probetas TVPET.

Como se ha comentado anteriormente, el estudio de las probetas verticales del PET fue bastante complejo al fallar con el simple hecho de colocarlas en las mordazas. Como se puede observar en la ilustración 146, de la cual faltan dos probetas más por mostrar, estas se encontraban divididas en diferentes partes debido a la poca adherencia que tiene el material en dicha dirección de impresión.



ILUSTRACIÓN 145. Rotura probetas TPPA.

En la ilustración 147 se muestra el modo de fractura de las probetas planas de poliamida, de las cuales a diferencia de las de onyx mostradas en la ilustración 140, poseen una menor elongación del material. Esto se debe a que dicho material posee una menor región de zona plástica en comparación con el onyx, lo cual se puede comprobar observando las ilustraciones 106, 107, 115 y 116.

Cabe destacar que las fracturas del PET y la poliamida que se producen en todas sus direcciones son totalmente iguales.

6.5.2. Cortante



ILUSTRACIÓN 146. Rotura probeta CORDCO3.

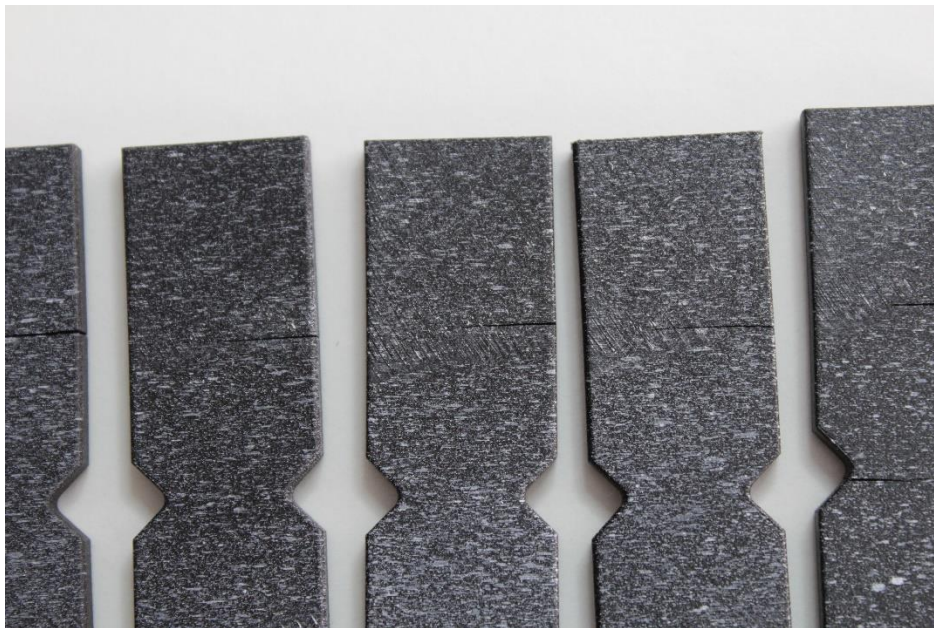


ILUSTRACIÓN 147. Rotura probetas CORVO.

Los fallos más comunes en las probetas de cortante se muestran en las ilustraciones 148 y 149, para las probetas planas y de canto y para las verticales respectivamente. Como se puede observar en la ilustración 148, la fractura de la probeta se produce en el punto extremo de la sección más estrecha de la probeta, indicio de que el ensayo se ha realizado correctamente. En el caso de las probetas imprimidas verticalmente se produce el fallo por separación de capas, lo cual provoca que la localización de su fractura sea menos previsible.

Aunque en gran parte de este modelo de probetas se produce tanto en los extremos de las mordazas como en la sección más estrecha.



ILUSTRACIÓN 148. Rotura probetas CORPPET.

En la ilustración 150 y 151 se muestran las probetas planas del PET y de la poliamida, las cuales fallaron en uno de los extremos de la entalla hacia el interior de las probetas, otro indicio con el cual se puede verificar que los ensayos se han realizado correctamente.

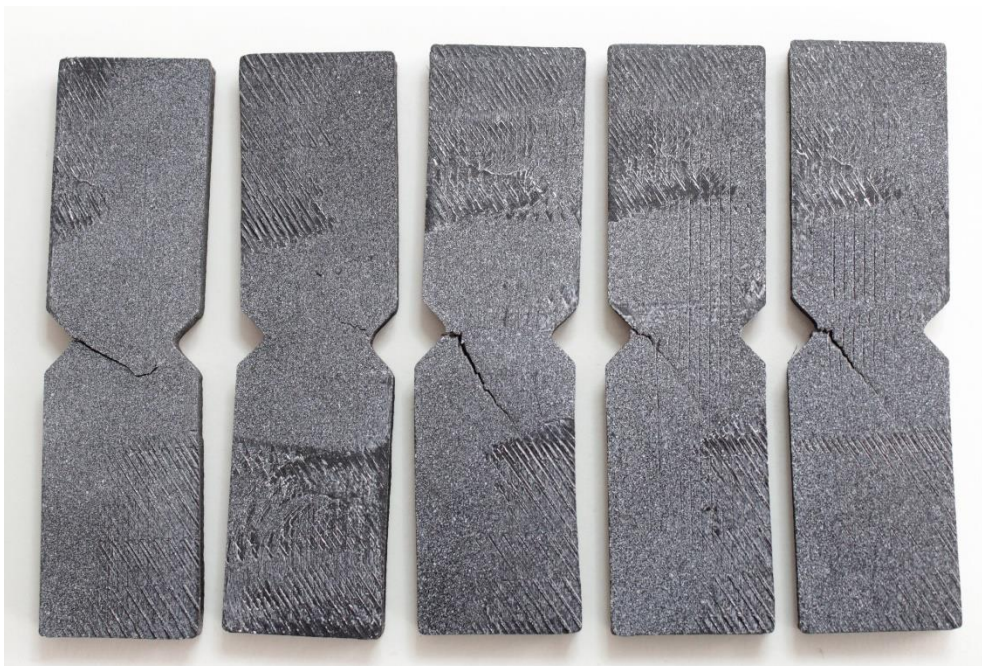


ILUSTRACIÓN 149. Rotura probetas CORPPA.



ILUSTRACIÓN 150. Rotura probetas CORVPET.

Como se ha descrito anteriormente las probetas imprimidas verticales del PET fueron bastante complicadas de ensayar. En la ilustración 152 se muestran las probetas ensayadas de PET para el plano 23, en la cual se puede observar que la gran mayoría de las probetas fallaron en la sección más estrecha debido por la separación de capas al ser más frágil en dicha zona.

6.5.3. Compresión



ILUSTRACIÓN 151. Rotura probeta COMDCPA1.

El modo de fallo más común entre las probetas de compresión se muestra en la ilustración 153, en la cual se puede observar como la probeta ha sufrido una determinada elongación debido al pandeo que experimenta al llegar al punto de máxima resistencia. Si el

ensayo se sigue realizando después de este punto se puede llegar a obtener una pequeña fractura en el centro de la probeta provocada por la elongación de una de las caras de la probeta.



ILUSTRACIÓN 152. Rotura probeta COMVPET3.

Otro modo de fallo común ya comentado anteriormente se presentó en las probetas imprimidas verticalmente del PET y la poliamida. En las ilustraciones 154 y 155 se muestra una probeta de cada material ensayada, en las cuales se puede observar cómo estas se encuentran divididas en distintas partes, esto se debe a que cuando alcanzaban el punto de máxima resistencia estallaban sin poder llegar a prevvisualizarlo.



ILUSTRACIÓN 153. Rotura probeta COMVPA2.

6.6. Comparativa onyx / onyx + FV / PET FC / PA FC

Una vez obtenidas las propiedades de cada material se procede a realizar una comparación entre cada uno de ellos, para ello se ha realizado una curva media para plano y dirección que se compara. A continuación, se expone un ejemplo del procedimiento realizado para conseguir la curva media de los resultados obtenidos en las probetas planas de onyx con fibra de vidrio a 0°.

En primer lugar, insertamos una línea de tendencia para cada una de las probetas junto a su ecuación y regresión cuadrática, cuyo último valor deber ser cercano a 1 para obtener una mejor línea de tendencia, para ello se tiene que estudiar el tipo de línea. En algunos casos se necesita una curva polinómica de segundo grado, y en otros, curvas polinómicas de sexto grado. Según los resultados que estemos procesando se tendrá que elegir una determinada línea de tendencia.

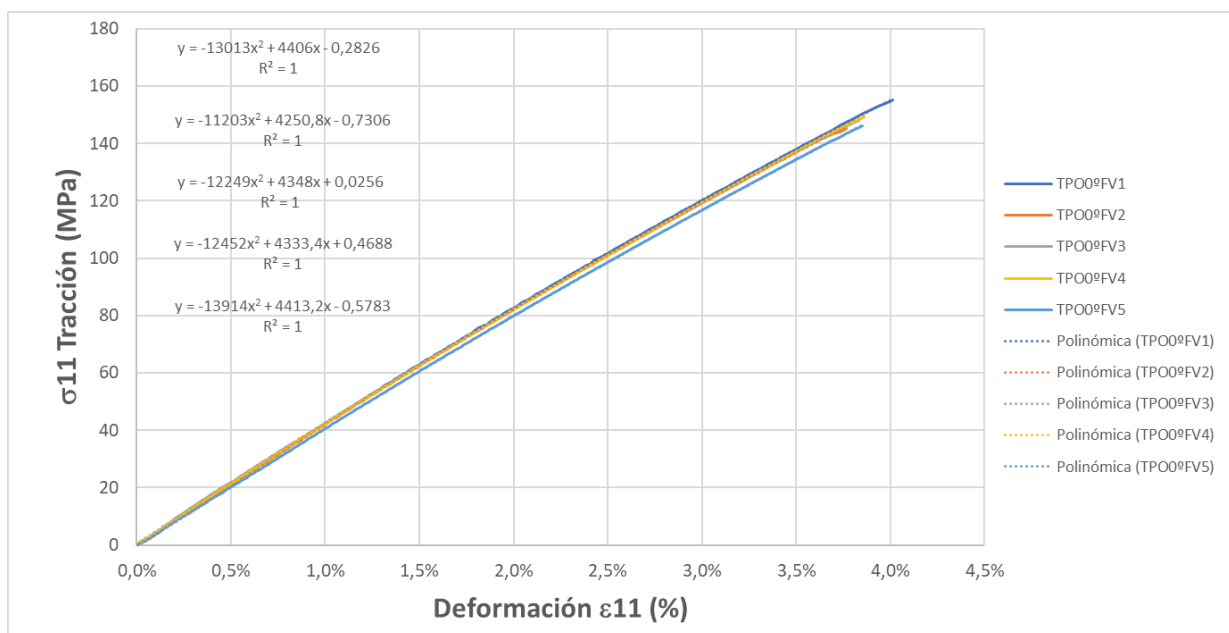


ILUSTRACIÓN 154. Líneas de tendencia de las probetas TPO0°FV.

Una vez insertadas las líneas de tendencia junto a su ecuación y regresión cuadrática, se seleccionan los valores fijos de la ecuación y se realiza su promedio.

	A	B	C
TPO0°FV1	-13013	4406	-0,2826
TPO0°FV2	-11203	4250,8	-0,7306
TPO0°FV3	-12249	4348	0,0256
TPO0°FV4	-12452	4333,4	0,4688
TPO0°FV5	-13914	4413,2	-0,5783
PROMEDIO	-12566,2	4350,28	-0,21942

TABLA 44. Valores fijos ecuaciones segundo orden de las probetas TPO0°FV.

Obtenidos los valores indicados en la tabla 45, se introduce la siguiente ecuación entre el rango de deformaciones que abarca los ensayos realizados.

$$y = -12566,2x^2 + 4350,28x - 0,21942$$

Introduciendo los valores de las deformaciones a la ecuación anterior se obtiene la curva media del lote de probetas estudiadas. A continuación, se muestra curvas tensión-deformación de cada probeta y su curva media.

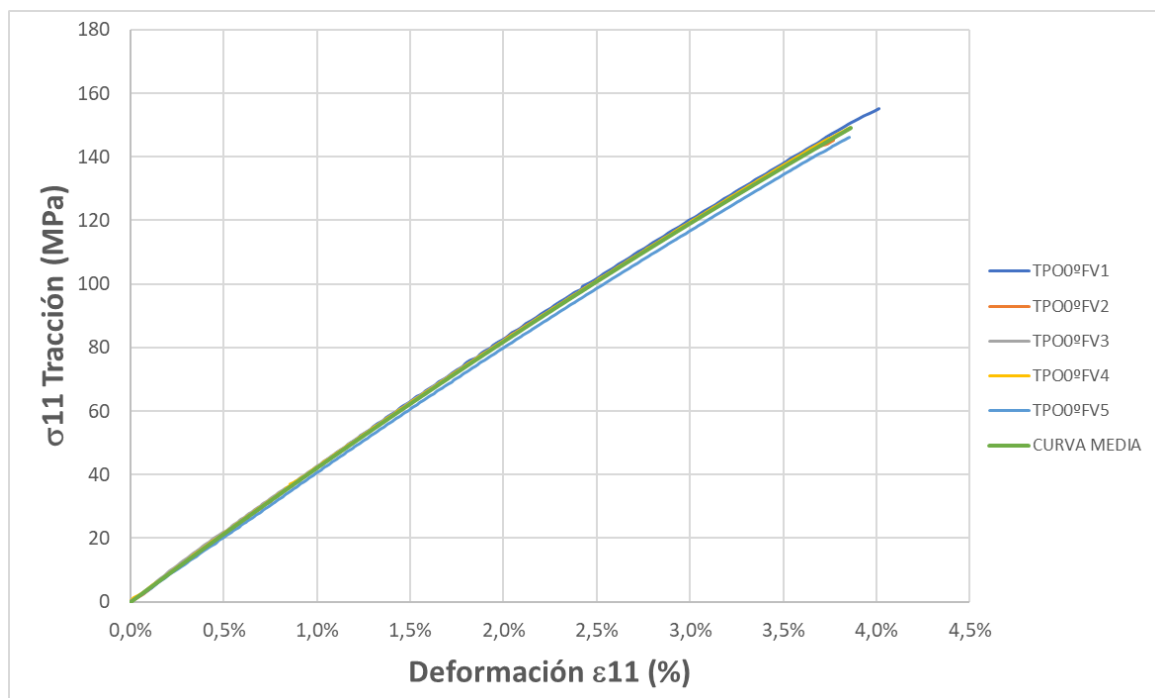


ILUSTRACIÓN 155. Representación de la curva media para el lote de probetas TPO0°FV.

Una vez explicado el procedimiento realizado para obtener la curva tensión-deformación media de un lote de probetas, este mismo estudio se realiza para cada uno de los demás lotes.

Obtenidas todas las curvas medias de cada lote de probetas, se procede a realizar nuevas gráficas para la comparación de cada propiedad con respecto a cada uno de los materiales

estudiados. Para ello se han agrupado todas las probetas de tracción planas en una misma gráfica, pues de estas se estudia las tensiones en la dirección 1, para el caso de las probetas de canto en tracción se estudia las tensiones en la dirección 2.

Hay que recordar que las probetas impresas en dirección horizontal a la superficie de impresión corresponden a la dirección 1 y al plano de corte 1-2, en el caso de las probetas imprimidas de canto estas corresponden a la dirección 2 y al plano de corte 1-3, y, por último, las probetas imprimidas verticalmente corresponden a la dirección 3 y al plano de corte 2-3.

A continuación, se mostrará la comparativa de las curvas medias tensión-deformación para cada propiedad estudiada.

6.6.1. Tracción

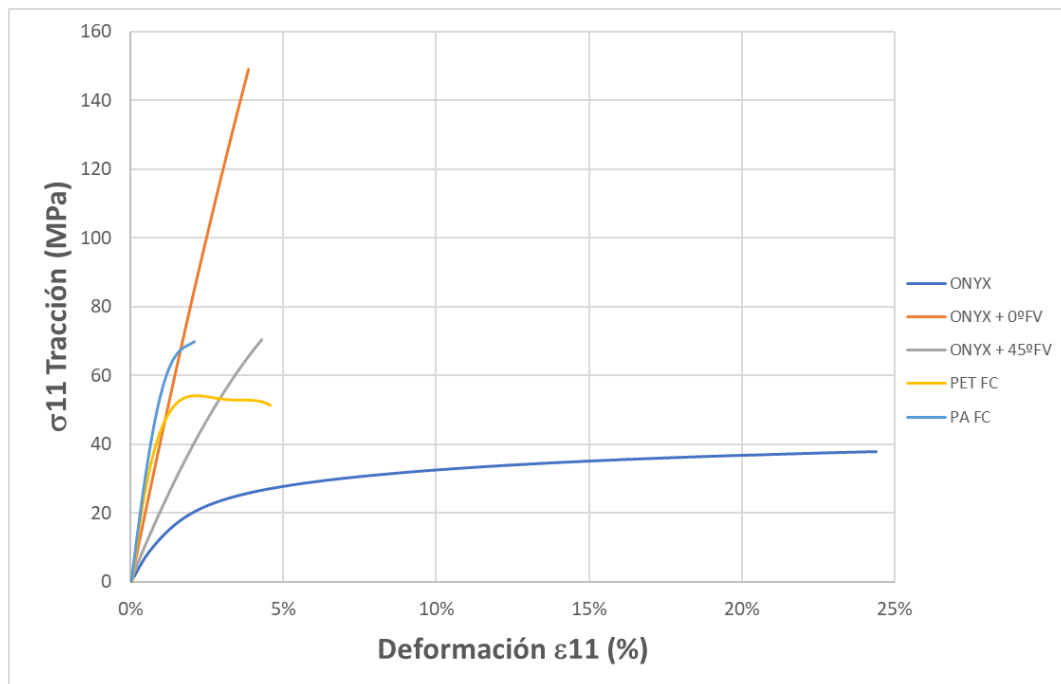


ILUSTRACIÓN 156. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Tracción dirección 1.

En la ilustración 158 se muestra el comportamiento medio en la dirección 1 de cada uno de los materiales. Como se puede observar el onyx es el material más dúctil, consiguiendo una deformación de casi el 25%, aun así, no llega a tener deformaciones idénticas a las de los polímeros, las cuales pueden alcanzar entre el 40-50%. A la vez de que es el material más dúctil es el material con menor tensión máxima.

Los siguientes materiales con una mayor deformación son el onyx con fibra de vidrio a 0° y a 45° y el PET FC. En el caso de estos últimos, poseen prácticamente el mismo rango de deformaciones, cerca del 5%, pero con una gran diferencia de módulos de Young, debido a

que el onyx con fibra de vidrio a 0° posee una tensión máxima de 148 MPa, mientras que el onyx con fibra de vidrio a 45° posee un valor de 68 MPa y el PET de 53 MPa. En el caso del PET se puede observar que en un pequeño rango de deformaciones se obtiene la tensión máxima, y a partir de este punto, la curva comienza a decaer hasta cerca del 5% de deformación.

Con respecto a la poliamida es el material con menor deformación, menos del 2,5% y con una tensión máxima del 69,79 MPa, provocando de esta manera un módulo de Young bastante similar al del onyx con fibra de vidrio a 0°.

A continuación, se muestra unas graficas comparativas según los materiales comercializados por cada empresa.

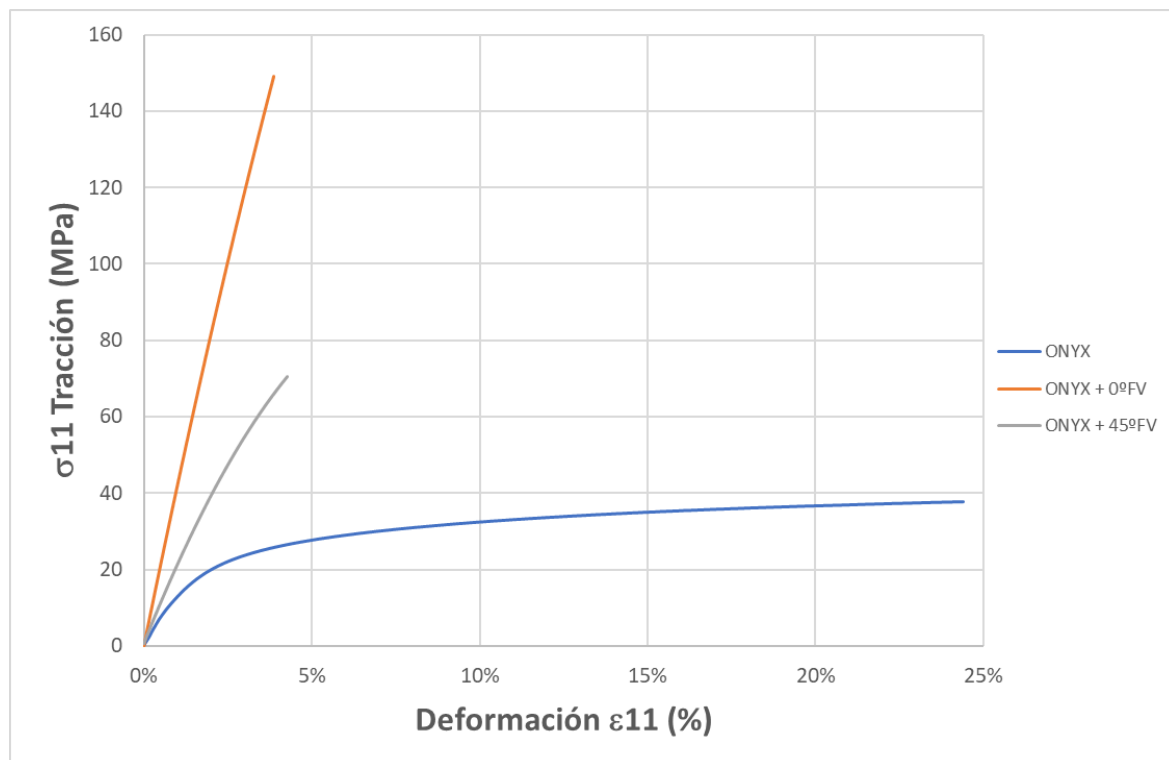


ILUSTRACIÓN 157. Comparativa comportamiento tensión-deformación Markforged. Tracción dirección 1.

En la ilustración 157 se puede observar cómo influye en el comportamiento del onyx la fibra de vidrio. Claramente se puede observar como el onyx gana sustancialmente en tensión máxima, pero pierde en deformación, provocando de esta manera que se convierta en un material menos plástico y con una tensión máxima bastante elevada en el caso de la fibra de vidrio a 0°. Propiedades bastante diferentes, lo que conlleva a deducir que cada uno será escogido según los requisitos que se necesiten.

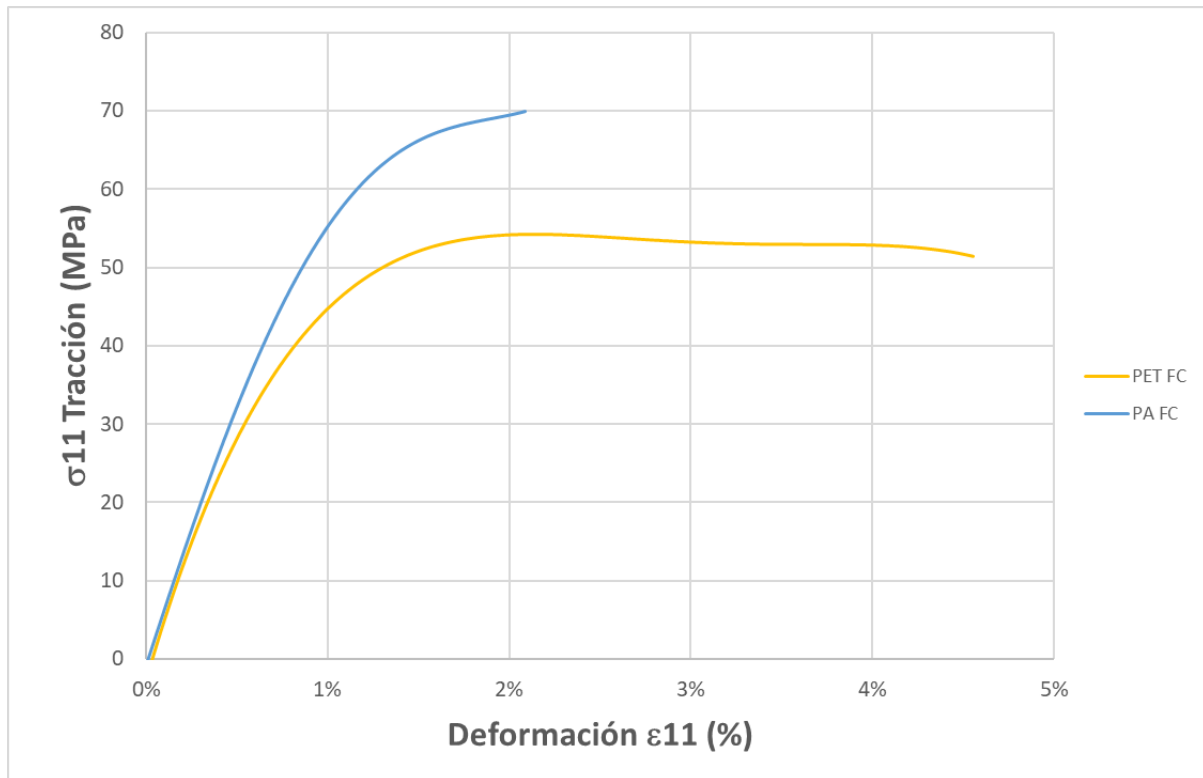


ILUSTRACIÓN 158. Comparativa comportamiento tensión-deformación Smartmaterials3D. Tracción dirección 1.

En la ilustración 158 se compara el comportamiento obtenido de los materiales fabricados por Smartmaterials3D, el PET FC y al PA FC. Se puede observar claramente que el PET posee un comportamiento mucho más plástico que la poliamida, consiguiendo plastificar después de su punto de tensión máxima, mientras que, en el caso de la poliamida, una vez que esta alcanza el punto de tensión máxima fractura. Se puede deducir que, a pesar de poseer una estructura bastante parecida, poseen comportamientos distintos, el PET es un material más plástico y con una tensión menor, mientras que la poliamida es un material más frágil, el cual no se deforma, pero con un punto de tensión máxima más elevado.

A continuación, se muestran una graficas comparativas del módulo de Young, la tensión máxima, la deformación de rotura y el límite elástico de cada uno de los materiales.

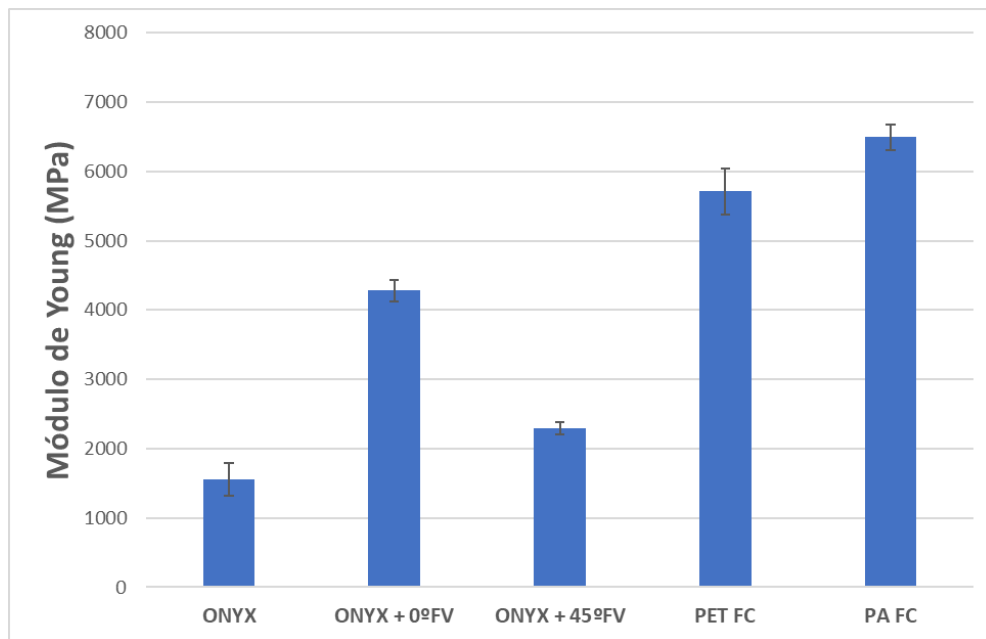


ILUSTRACIÓN 159. Comparativa Módulo de Young. Tracción dirección 1.

En la ilustración 159 se puede observar claramente que los materiales con mayor módulo de Young son el PET FC y la poliamida, lo cual es razonable, pues poseen un rango de deformación relativamente pequeño y con unos valores de tensión máxima elevados. Seguidamente se encuentra el onyx con fibra de vidrio a 0°, del cual se puede apreciar claramente la mejora que proporciona la fibra de vidrio en esta dirección al onyx, caso que no ocurre con una dirección a 45°.

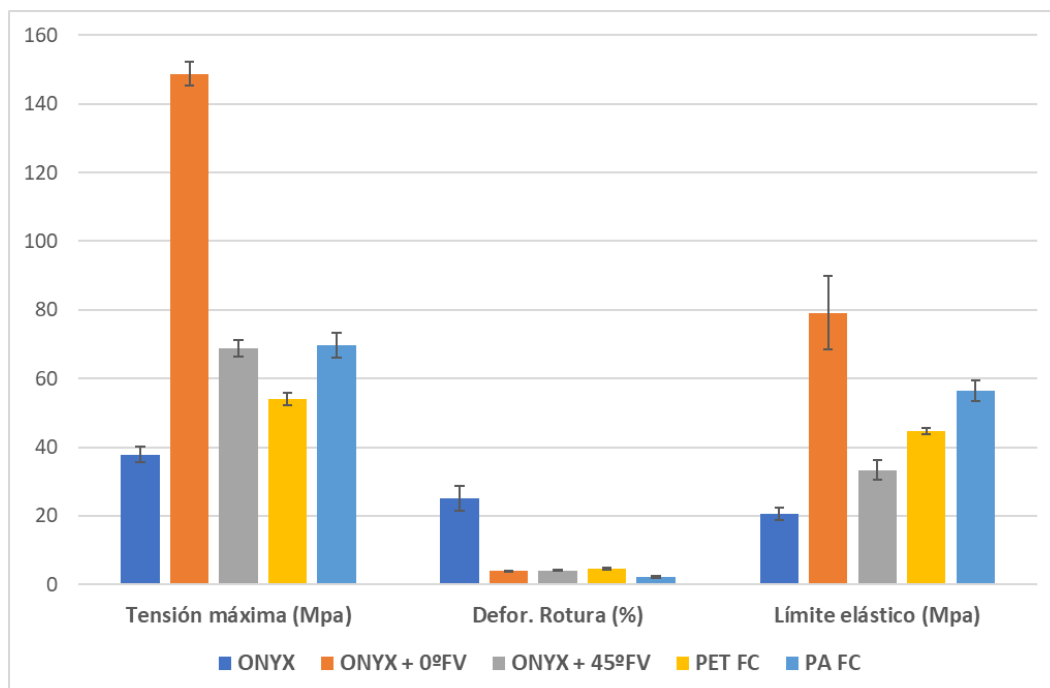


ILUSTRACIÓN 160. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Tracción dirección 1.

Con respecto a la tensión máxima, claramente el mejor material es el onyx con fibra de vidrio a 0°, el cual llega a alcanzar los 148,73 MPa, un valor bastante elevado para ser un material obtenido por impresión 3D. Hay que destacar también los valores obtenidos en el onyx con fibra de vidrio a 45° y la poliamida, rondando los 70 MPa, pero destacar ante todo la poliamida pues a diferencia del onyx no posee refuerzo con fibra de vidrio.

Por otro lado, se puede observar claramente que la deformación de rotura es prácticamente la misma en todos los materiales, excepto para el onyx, el cual ronda el 30% de deformación, convirtiendo de esta manera en el material más dúctil.

Por último, el valor con mayor límite elástico lo posee el onyx con fibra de vidrio a 0° con unos 80 MPa, pero resaltar que posee una mayor variación entre los resultados obtenidos de los ensayos. Seguidamente se encuentra la poliamida que ronda los 60 MPa.

De entre todos los materiales, hay que destacar ante todo la sustancial mejora que se obtiene en el onyx con la fibra de vidrio a 0°, una mejora que lo convierte en un material bastante competitivo en todos los aspectos.

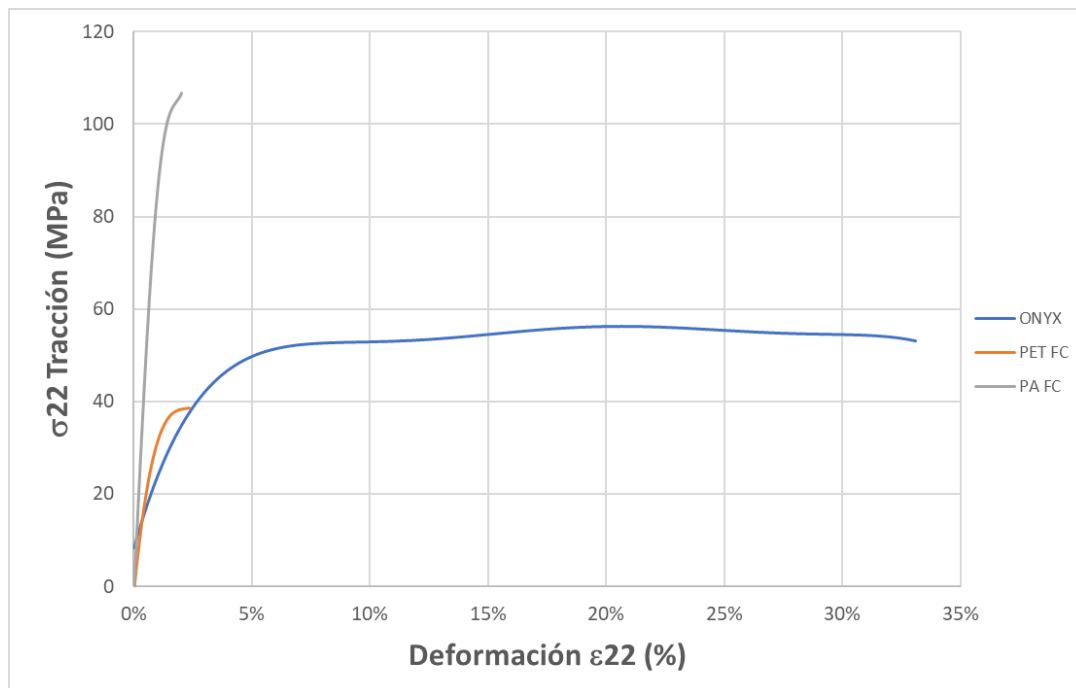


ILUSTRACIÓN 161. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Tracción dirección 2.

En la ilustración 161 se muestra el comportamiento medio en la dirección 2 de cada uno de los materiales, excepto los del onyx con fibra, pues como se ha explicado anteriormente, en estos materiales es imposible estudiarlos en dicha dirección pues supone cambiar la estructura interna de la fibra para su impresión.

En el caso del onyx, al igual que en su dirección 1, posee un comportamiento bastante dúctil llegando incluso cerca del 35% de deformación, lo cual lo acerca aún más a un material plástico. Con respecto a la poliamida y al PET, estos presentan un comportamiento mucho más frágil, sin apenas estricción, en el caso del PET este presenta una tensión última menor a la del onyx, mientras que el claro ganador es la poliamida con una tensión última de 106,54 MPa, un valor bastante competitivo para materiales obtenidos por impresión 3D.

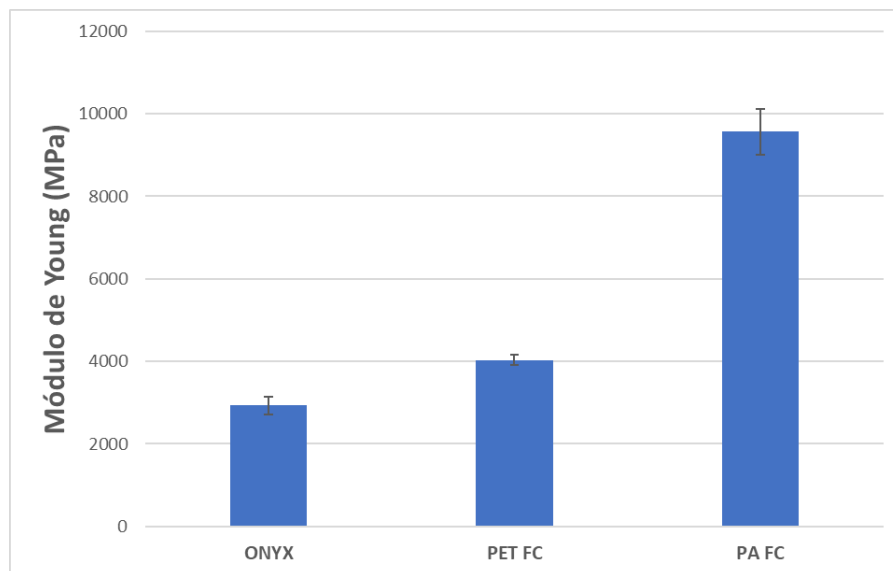


ILUSTRACIÓN 162. Comparativa Módulo de Young. Tracción dirección 2.

En la ilustración 162 se muestra una comparativa de los módulos de Young obtenidos para cada material en la dirección 2, de la cual se puede apreciar claramente un alto módulo de Young para la poliamida, con un valor que ronda los 9,5 GPa, un valor bastante aceptable para ser un material obtenido por impresión 3D.

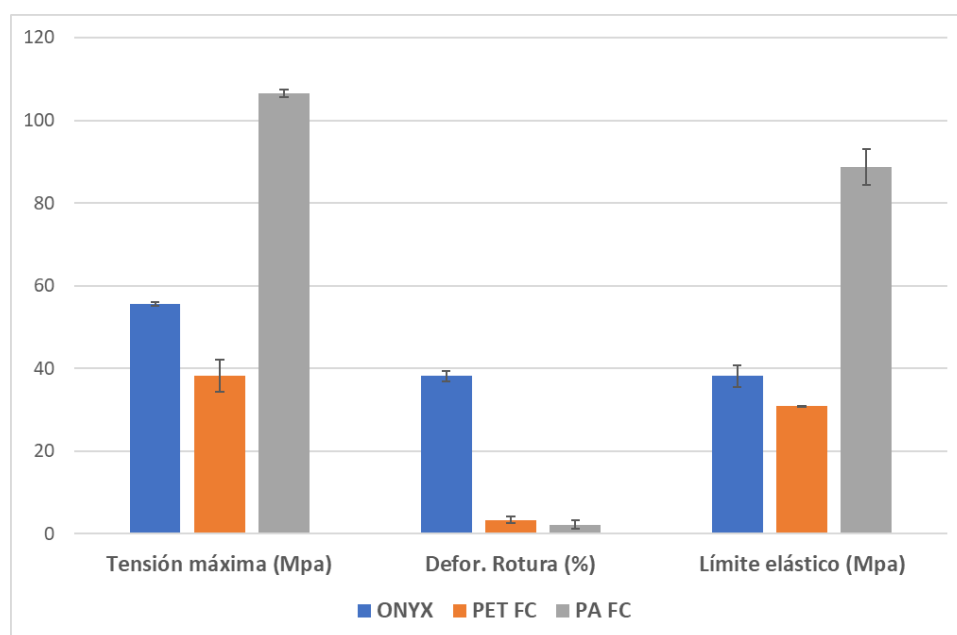


ILUSTRACIÓN 163. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Tracción dirección 2.

En la ilustración 163 se muestra la comparativa de la tensión máxima, la deformación de rotura y el límite elástico en la dirección 2. Con respecto a la tensión máxima, como se ha comentado anteriormente, la poliamida es el claro ganador, obteniendo un valor medio de 106 MPa. Debido a que el onyx es el material más plástico de entre estos tres, este posee una deformación de rotura del 40% del material, mientras que límite elástico más elevado lo posee de nuevo la poliamida con un valor medio de 90 MPa.

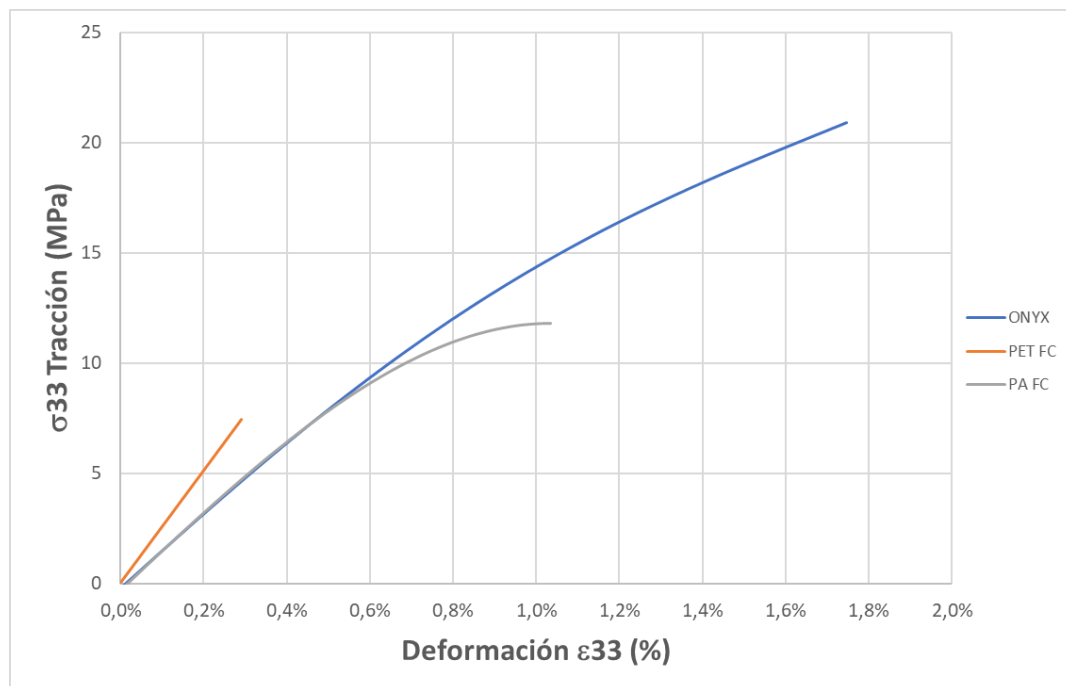


ILUSTRACIÓN 164. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Tracción dirección 3.

En la ilustración 164 se representa el comportamiento medio en la dirección 3 del onyx, el PET y la poliamida. Lo más destacado es el comportamiento del PET, pues como se ha explicada con anterioridad, el PET posee muy poca adherencia en su proceso de impresión verticalmente, por lo que le convierte en un material bastante frágil en dicha dirección.

Con respecto a la poliamida y el onyx, estos poseen una mayor adherencia, consiguiendo tensiones máximas superiores a los 10 MPa y del 1% de deformación. De entre estos materiales, claramente el onyx es el material con mayor adherencia y mejor comportamiento, pues fue el único material que no se fracturó con el simple hecho de colocarlo en las mordazas y del cual se obtuvo una tensión máxima superior de 20 MPa en algunas probetas.

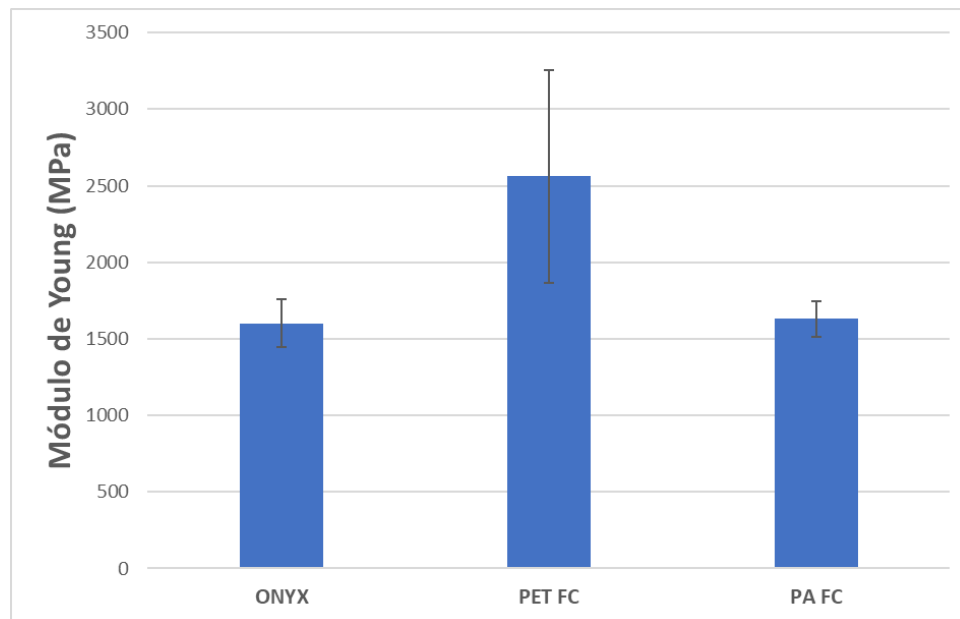


ILUSTRACIÓN 165. Comparativa Módulo de Young. Tracción dirección 3.

Comparando los módulos de Young en dicha dirección, se puede apreciar claramente que estos poseen unos valores relativamente parecidos, rondando los 2000 MPa. En el caso del PET como se ha comentado en repetidas ocasiones, fue bastante complejo su estudio, por lo que sus valores son los más dispares, provocando de esta manera unos resultados menos fiables.

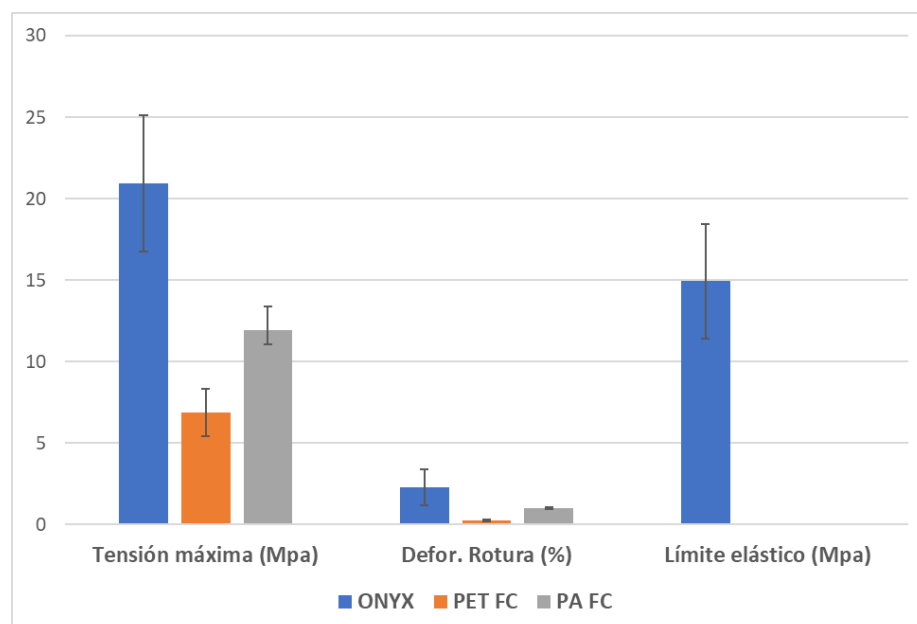


ILUSTRACIÓN 166. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Tracción dirección 3.

En la ilustración 166 se puede observar claramente como el onyx es el material con mayor tensión máxima, acercándose incluso a los 30 MPa en una de sus probetas, mientras que el PET no alcanza ni los 10 MPa. Con respecto a la deformación de rotura, prácticamente es la misma para todos los materiales, llegando el onyx a deformarse un poco más, pero sin

llegar a ser unos valores sustanciales. Mientras que el límite elástico, ha sido obtenido solo para el onyx, pues para el PET y la poliamida es imposible debido a que fracturan demasiado rápido sin llegar a plastificar en ningún momento.

6.6.1.1. Coeficiente de Poisson

En los ensayos de tracción no solo existe la deformación longitudinal en la probeta, no obstante, también existe una deformación transversal, la cual es provocada por la contracción que se produce en la sección transversal de la probeta al alargarse esta.

La relación que existe entre estas dos deformaciones se conoce como el coeficiente de Poisson, y como se ha explicado en la norma ASTM D3039, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\nu = -\Delta\varepsilon_t / \Delta\varepsilon_l$$

Cabe destacar que el coeficiente de Poisson posee dos valores, uno con respecto a la zona elástica y otro para la zona plástica. De estos, el valor que posee una mayor importancia es el de la región elástica, pues en esta región el material es capaz de volver a su estado inicial, en el momento en el que se alcanza la zona plástica, existen más probabilidades de que este valor obtenga un mayor ruido.

En las tablas de propiedades de cada material en el apartado 6.2 se presentan los valores de los coeficientes de Poisson en las dos regiones. Antes de realizar una comparación de resultados obtenidos entre los materiales, se recuerda una serie de valores del coeficiente de Poisson para unos determinados materiales [8].

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez G		Relación de Poisson ν	Peso específico w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lbf/pulg ³	lbf/ft ³	kN/m ³
Aluminio (todas las aleaciones)	10.4	71.7	3.9	26.9	0.333	0.098	169	26.6
Cobre al berilio	18.0	124.0	7.0	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Latón	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
Acero al carbono	30.0	207.0	11.5	79.3	0.292	0.282	487	76.5
Hierro fundido (gris)	14.5	100.0	6.0	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Cobre	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Abeto Douglas	1.6	11.0	0.6	4.1	0.33	0.016	28	4.3
Vidrio	6.7	46.2	2.7	18.6	0.245	0.094	162	25.4
Inconel	31.0	214.0	11.0	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Plomo	5.3	36.5	1.9	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Magnesio	6.5	44.8	2.4	16.5	0.350	0.065	112	17.6
Molibdeno	48.0	331.0	17.0	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Metal Monel	26.0	179.0	9.5	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Plata niquelada	18.5	127.0	7.0	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Acero al níquel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.291	0.280	484	76.0
Bronce fosforado	16.1	111.0	6.0	41.4	0.349	0.295	510	80.1
Acero inoxidable (18-8)	27.6	190.0	10.6	73.1	0.305	0.280	484	76.0
Aleaciones de titanio	16.5	114.0	6.2	42.4	0.340	0.160	276	43.4

ILUSTRACIÓN 167. Coeficientes de Poisson de materiales típicos utilizados en ingeniería.

La ilustración 163 se muestra los coeficientes de Poisson de una gran lista de materiales, que en su mayoría son metales. Hay que destacar que los materiales que posean un coeficiente de Poisson relativamente pequeño, entre 0,2 y 0,5, se pueden considerar isótropos, es decir, un material que posee las mismas propiedades para cada una de sus direcciones, aunque puede existir ocasiones especiales, en las cuales los coeficientes de Poisson varían en las distintas direcciones aun teniendo valores pequeños, este hecho es un indicio de que el material es anisotrópico, este caso se puede observar en todos los materiales estudiados. En el caso de que posean un valor mayor a 0,5 e inferior a 0,6, se considerará un material anisotrópico, es decir, posee diferentes propiedades para cada una de sus direcciones. Una vez que se supere el valor de 0,6 los resultados no son fiables.

A continuación, se muestra una serie de gráficas comparativas de los valores medios en cada dirección de los materiales.

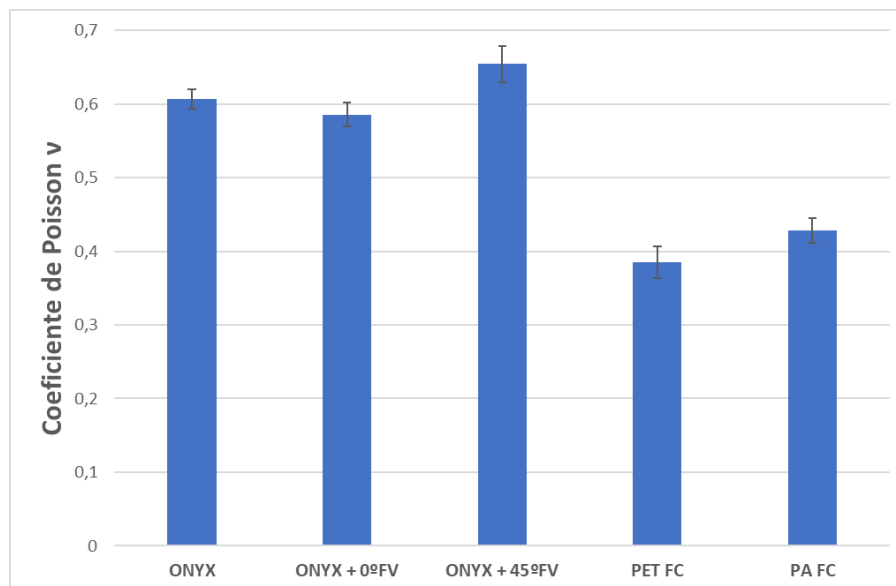


ILUSTRACIÓN 168. Comparativa valores medios coeficiente de Poisson dirección 1.

En la ilustración 168 se muestran los valores medios del coeficiente de Poisson en la dirección 1 de cada uno de los materiales. Lo primero que se puede observar son los valores que poseen tanto el onyx como el onyx con fibra de vidrio, los cuales rondan el 0,6. Este valor es indicativo de la anisotropía de estos materiales, se justifica en las diferencias significativas registradas en los módulos de Young según distintas direcciones.

En el caso del PET y la poliamida, estos poseen unos valores de 0,38 y 0,43 respectivamente, cuyos valores se encuentran dentro de unos valores aceptables, por lo que sus resultados si son fiables. En este caso si comparamos las propiedades que poseen cada uno

de los materiales en sus distintas direcciones podemos observar que poseen distintos valores, por lo que podemos deducir que son materiales anisotrópicos.

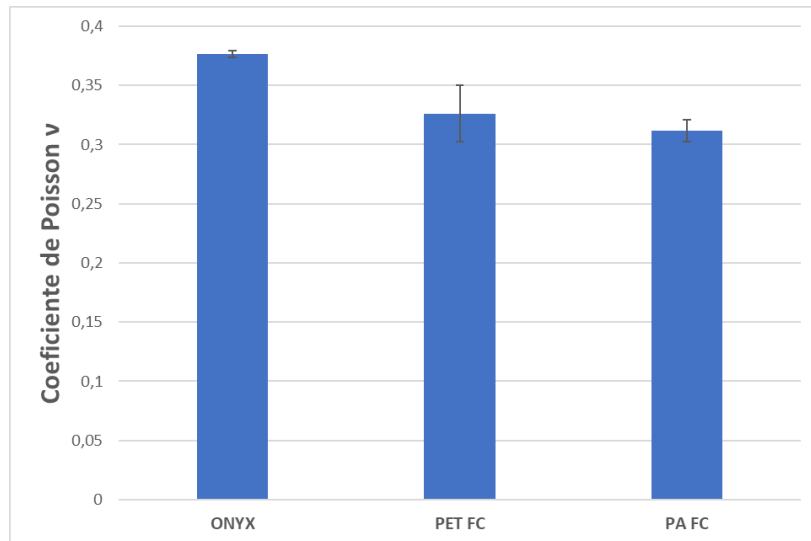


ILUSTRACIÓN 169. Comparativa valores medios coeficiente de Poisson dirección 2.

En la ilustración 169 se muestra los valores de coeficiente de Poisson en la dirección 2 de cada uno de los materiales. En este caso se obtienen unos valores bastante aceptables para todos los materiales. Para el onyx un 0,38, para el PET un 0,33 y para la poliamida un 0,31, valores que se encuentran dentro de un rango de resultados fiables. En el caso del onyx, al haber obtenido unos resultados distintos en la dirección 1, pero estudiando las propiedades que posee en cada una de sus direcciones, se podría afirmar que es un material anisotrópico, pues también posee un comportamiento similar a los plásticos.

Con respecto al PET y a la poliamida, también se afirma que son materiales anisotrópicos, pues poseen distintas propiedades para cada una de sus direcciones.

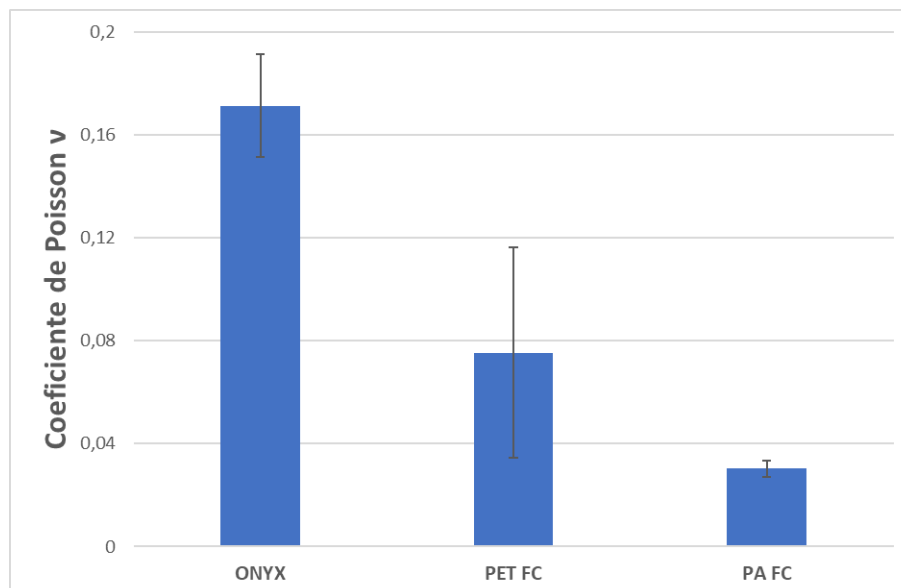


ILUSTRACIÓN 170. Comparativa valores medios coeficiente de Poisson dirección 3.

En el caso de las probetas imprimidas verticalmente, no se pueden obtener unos valores fiables pues fallaban por separación de capas y sus propiedades son bastante distintas a sus demás direcciones en cada uno de los materiales.

6.6.2. Cortante

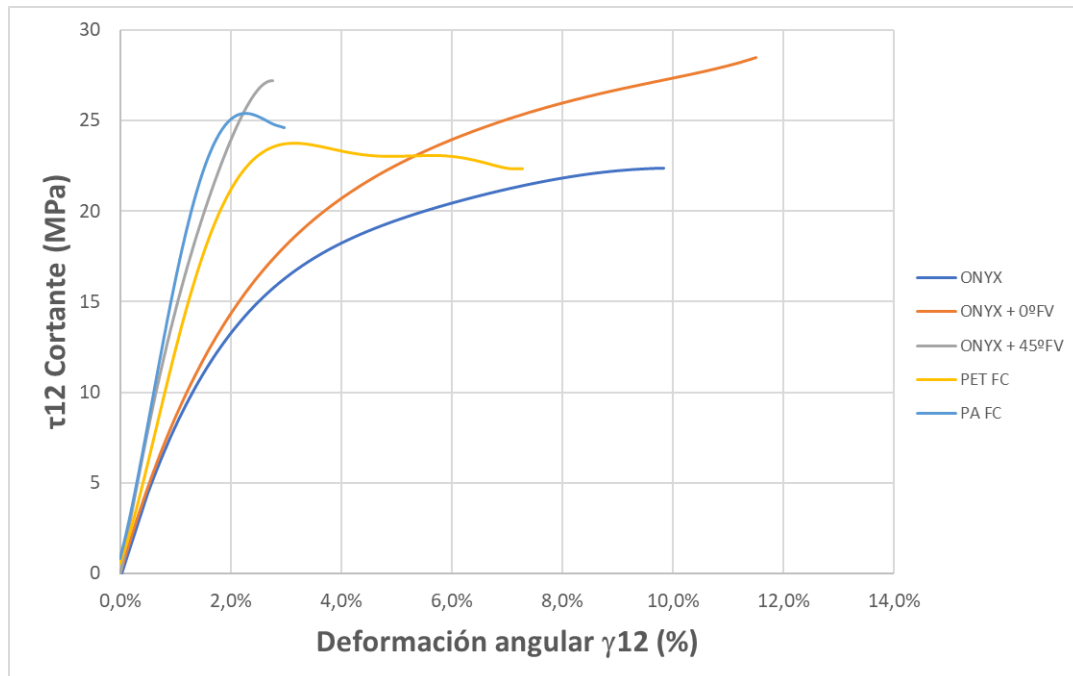


ILUSTRACIÓN 171. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Cortante plano 12.

En la ilustración 171 se muestra el comportamiento medio de cada uno de los materiales en el plano de corte 12. Hay que recordar que en dicha gráfica se encuentra la deformación angular, la cual es el doble a la deformación cortante, por lo tanto, las deformaciones a cortante son la mitad de lo indicado.

Lo primero a destacar es el comportamiento del onyx con fibra de vidrio a 0°, pues en este caso es el material con un mayor alargamiento, a diferencia de su comportamiento a tracción, en el cual el onyx sin fibra era el material más elástico. Con respecto a los demás materiales, estos poseen prácticamente el mismo comportamiento que en sus propiedades a tracción, el onyx es el material con menor módulo de elasticidad transversal, pero con una tensión a cortante más similar a los demás materiales. El PET se comporta exactamente igual a su dirección 1 en tracción, consigue rápidamente una tensión máxima transversal y desciende lentamente hasta fracturar.

A continuación, se realiza una comparación de sus comportamientos en el plano de corte 12 según los materiales comercializados por empresa.

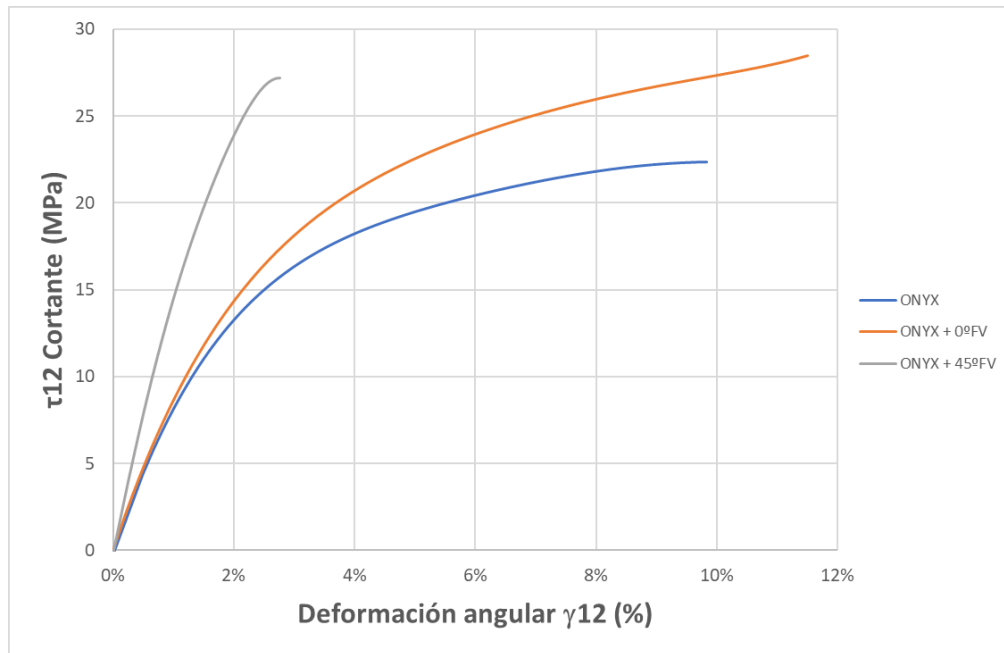


ILUSTRACIÓN 172. Comparativa comportamiento tensión-deformación Markforged. Cortante plano 12.

En la ilustración 172 se muestra el comportamiento del onyx, y su cambio al insertarle fibra de vidrio. Como se puede observar el onyx sin fibra posee un comportamiento correcto a cortante, alcanzando alrededor de los 25 MPa y una deformación angular del 10%. Lo primero a destacar el distinto comportamiento que se obtiene insertando el onyx en una dirección o en otra, si el onyx se inserta a 0° se obtiene un material más plástico y con una mayor deformación, además de alcanzar cerca de los 30 MPa de tensión última, mientras que si la fibra se inserta a 45°, esta apenas posee deformación, pero si alcanza rápidamente valores cercanos a los 30 MPa. Comportamientos bastante diferentes dependiendo de cómo se introduce la fibra.

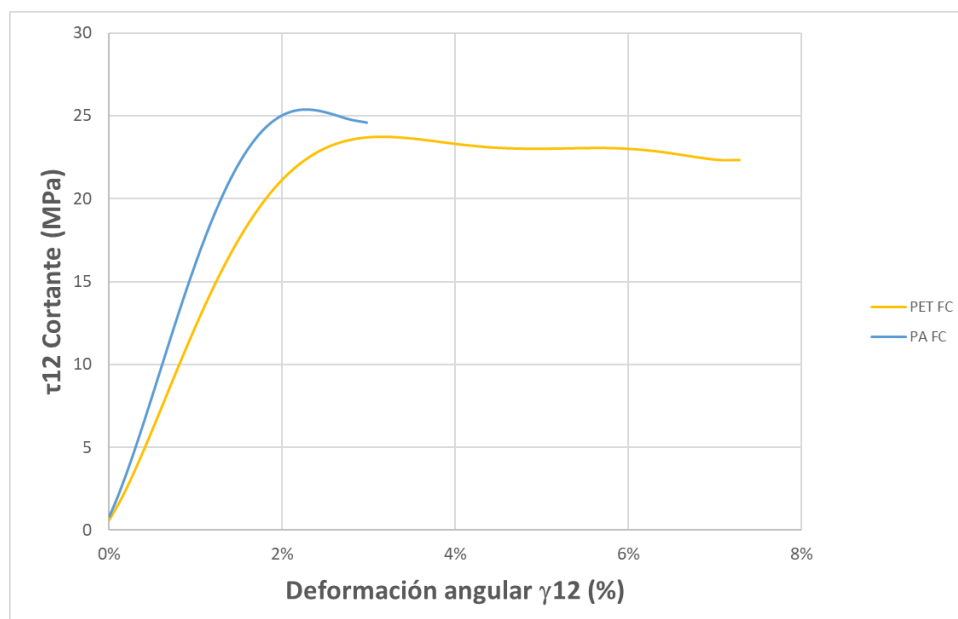


ILUSTRACIÓN 173. Comparativa comportamiento tensión-deformación Smartmaterials3D. Cortante plano 12.

En la ilustración 173 se compara los materiales comercializados por Smartmaterials3D, en los cuales lo primero que se puede observar que prácticamente poseen el mismo comportamiento, pero el PET es capaz de seguir deformándose bastante más que la poliamida, indicio de que el PET es un material más plástico, pero sin llegar a la deformación que posee el onyx en la ilustración 172.

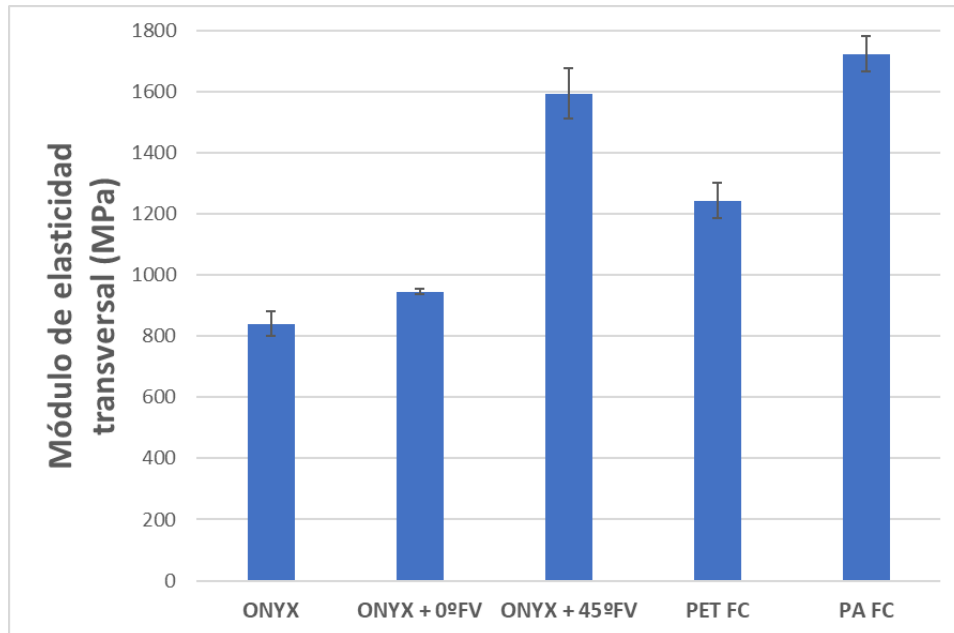


ILUSTRACIÓN 174. Comparativa Módulo de elasticidad transversal. Cortante plano 12.

En la ilustración 174 se compara el módulo de elasticidad transversal de cada uno de los materiales en el plano de corte 12. Los principales destacados son el onyx con fibra de vidrio a 45° y la poliamida, debido a su poco rango de deformación angular. Mientras que el onyx y el onyx con fibra a 0°, poseen valores menores a los 1000 MPa.

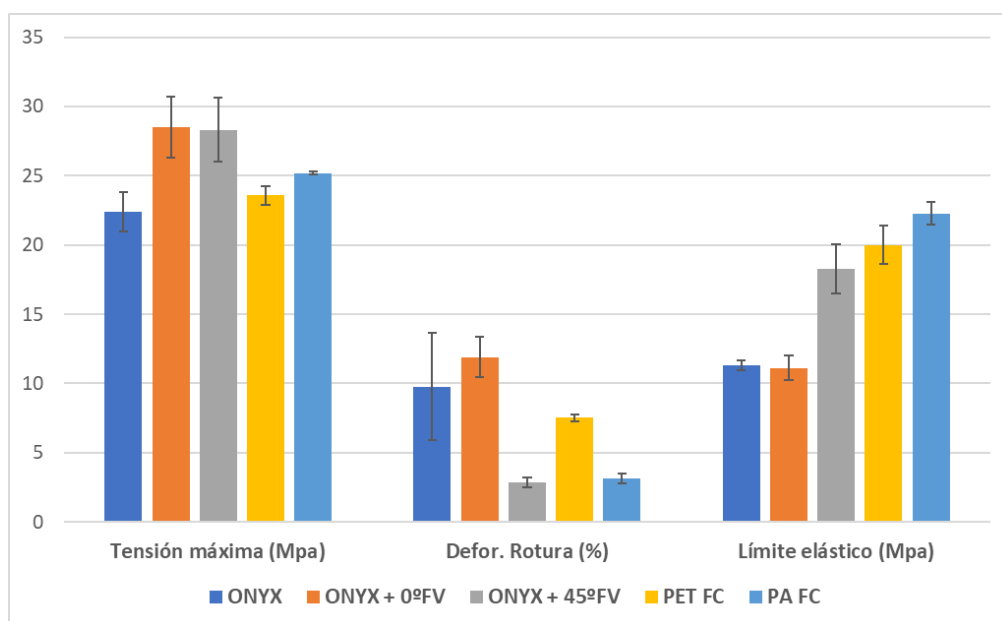


ILUSTRACIÓN 175. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Cortante plano 12.

En la ilustración 175 se muestra una comparación de la tensión máxima a cortante, la deformación angular a rotura y el límite elástico transversal de cada uno de los materiales. Como se ha comentado anteriormente los materiales que más resisten en este plano son el onyx con fibra de vidrio, con valores cercanos a los 30 MPa, hay que destacar que la mejora sustancial que sucede en tracción no ocurre en cortante, a pesar de que si mejoran sus propiedades.

Con respecto a la deformación a rotura, los materiales que más se deforman son claramente el onyx y el onyx con fibra a 0°, mientras que los que menos son el onyx con fibra a 45° y la poliamida. Mientras que, para el límite elástico, este lo tendrá lo más elevado aquellos materiales que poseen un menor rango de deformaciones, los cuales son el onyx con fibra a 45°, el PET y la poliamida, rondando un valor de 20 MPa.

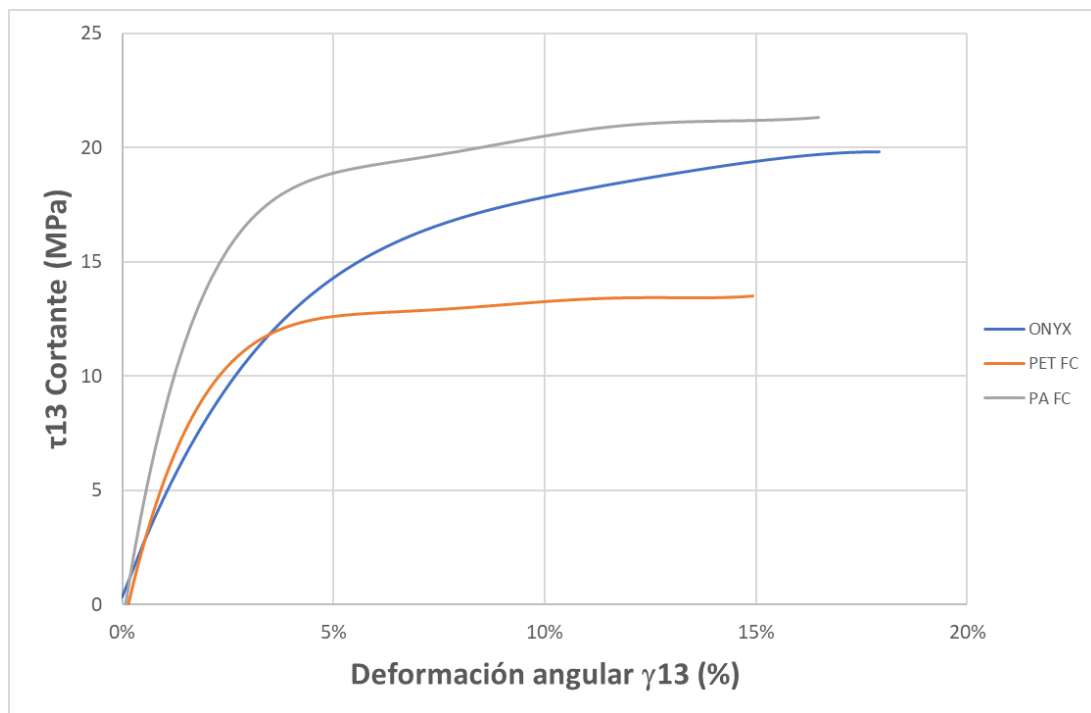


ILUSTRACIÓN 176. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Cortante plano 13.

En la ilustración 176 se puede comprobar el comportamiento medio que posee el onyx, el PET y la poliamida en el plano de corte 13. Lo primero a destacar es el comportamiento del PET en dicho plano, en el cual una vez que alcanza el punto de límite elástico, asciende lentamente hasta fracturar y conseguir la tensión máxima. En cambio, el onyx posee un ascenso más progresivo hasta su tensión máxima teniendo prácticamente el mismo módulo de elasticidad transversal. Con respecto a la poliamida, este posee un mayor módulo de elasticidad transversal y mayor límite elástico que el PET y el onyx, pero al igual que el PET, una vez que alcanza dicho límite asciende lentamente hasta fracturar.

Cabe destacar que los tres materiales poseen prácticamente el mismo rango de deformaciones en dicho plano.

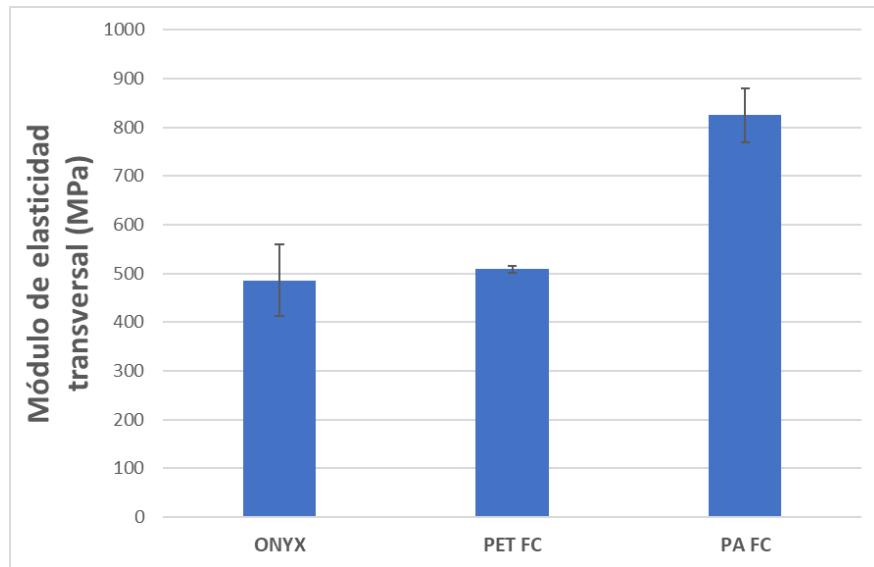


ILUSTRACIÓN 177. Comparativa Módulo de elasticidad transversal. Cortante plano 13.

Al igual que en el plano de corte 12, se realiza una comparación de las propiedades más importantes de cada material. En la ilustración 177 se muestra los módulos de elasticidad transversal, de los cuales ningún material supera los 1000 MPa, a diferencia del plano 12. Hay que destacar ante todo la poliamida con un valor medio de 825,02 MPa.

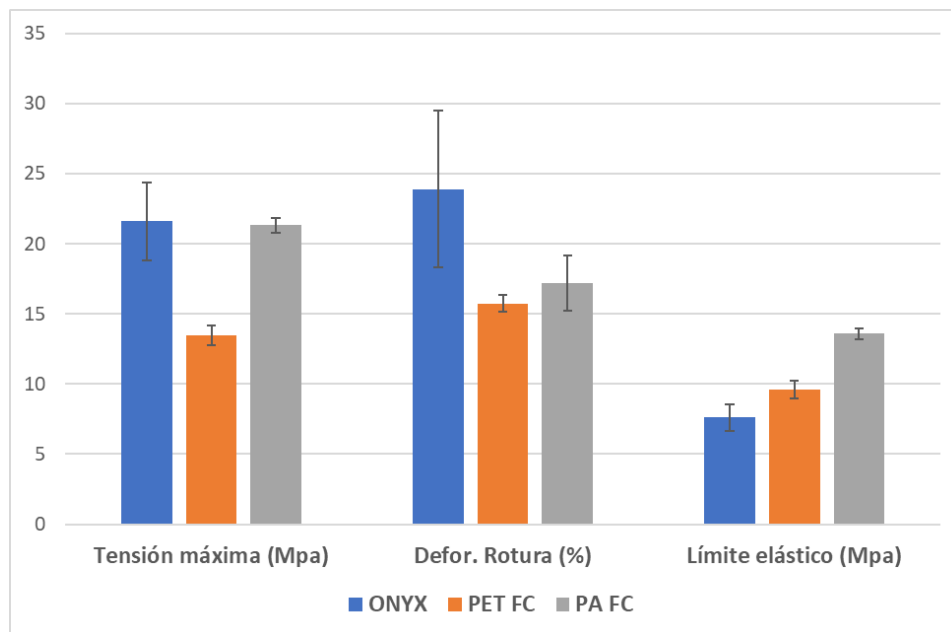


ILUSTRACIÓN 178. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Cortante plano 13.

Con respecto a la tensión máxima, tanto el onyx y la poliamida posee prácticamente los mismos valores, rondando los 22 MPa, mientras que el PET posee menos de 15 MPa, una pérdida importante con respecto al plano 12. En el caso de la deformación a rotura, claramente el onyx es el material más plástico, pero sin llegar a distanciarse mucho con los

demás materiales. Al tener unas propiedades relativamente similares, los valores de límite elástico son prácticamente los mismos para cada material, por lo que se puede deducir que las propiedades en este plano son prácticamente las mismas en todos los materiales.

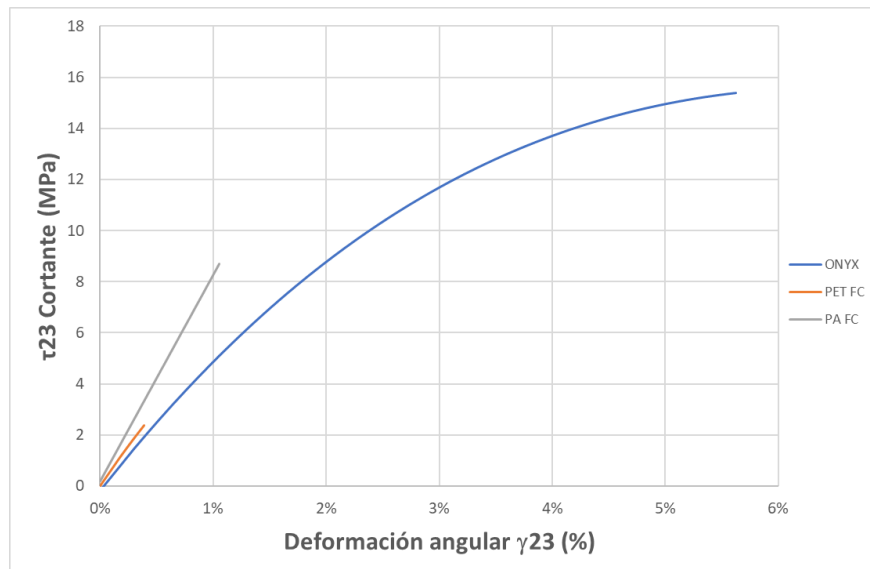


ILUSTRACIÓN 179. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Cortante plano 23.

En la ilustración 179, al igual que las anteriores, se compara el comportamiento medio de los materiales en el plano de corte 23. En primer lugar, el PET no se puede tomar como un resultado fiable, pues como se ha comentado en repetidas ocasiones, su fractura en dicho plano y en la dirección 3 es inminente e imprevisible, lo que le convierte en un material bastante frágil en dicho plano y dirección. En el caso de la poliamida se puede obtener un comportamiento más óptimo, pero distanciado del onyx, el cual es el único que posee un buen comportamiento en dicho plano gracias a su gran capacidad de adherencia entre capas.

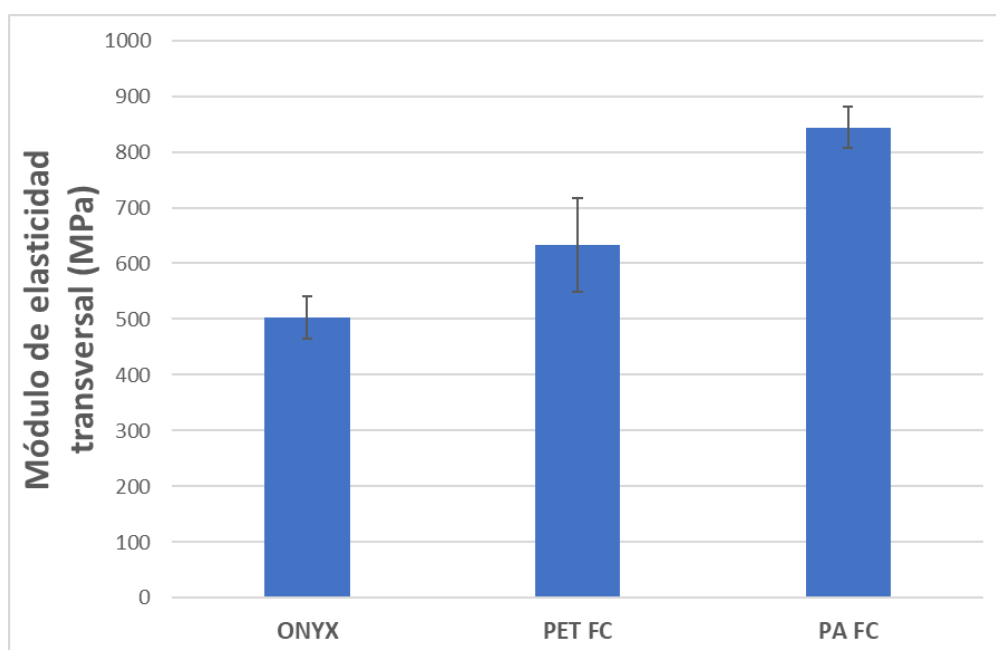


ILUSTRACIÓN 180. Comparativa Módulo de elasticidad transversal. Cortante plano 23.

Comparando los módulos de elasticidad transversal en el plano 23, se puede observar que los valores medios de cada material se asemejan a sus respectivos valores en el plano 13. Ninguno de ellos supera los 1000 MPa, y el único que se acerca a dicho valor, es la poliamida con unos 843,97 MPa, valor muy similar a su plano 13 (825,02 MPa). Seguidamente estaría el PET con un valor de 633,26 MPa y es su plano 13 es de 508,89 MPa, valores bastante similares para distintos formatos de impresión.

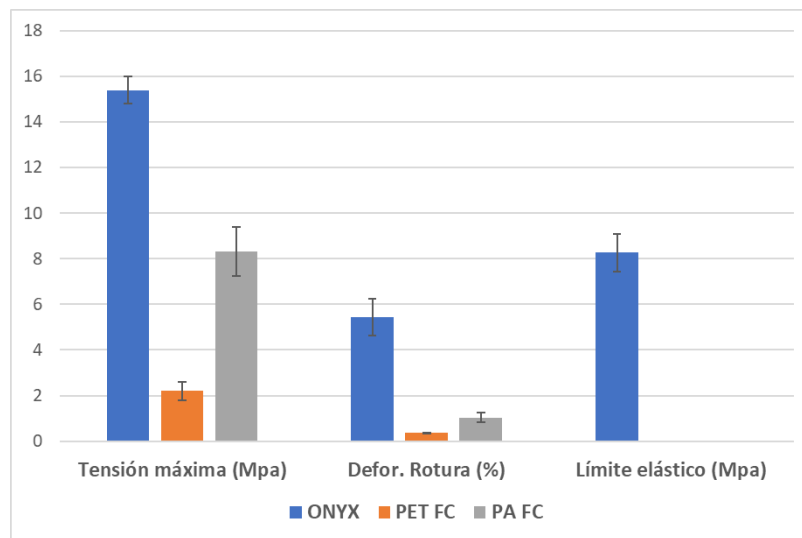


ILUSTRACIÓN 181. Comparativa Tensión máxima / Defor. Rotura / Límite elástico. Cortante plano 23.

Al igual que en las propiedades de tracción en la dirección 3, no se pudo obtener los valores de límite elástico del PET y la poliamida, debido a su fractura inminente, en este caso ocurre exactamente lo mismo. Otro hecho más para alabar la gran adherencia que posee el onyx, pues aun siendo imprimido en vertical es capaz de poseer límite elástico.

6.6.3. Compresión

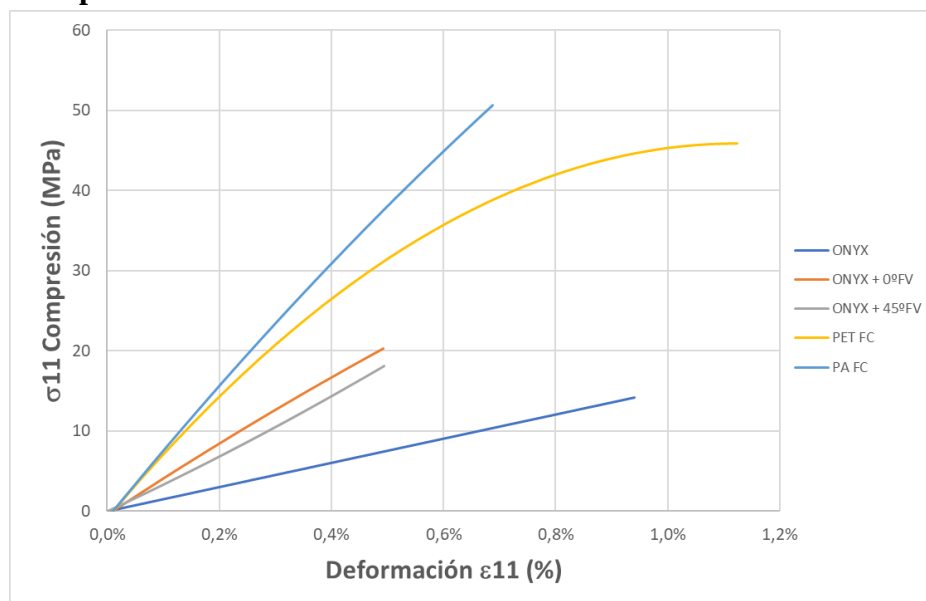


ILUSTRACIÓN 182. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Compresión dirección 1.

En la ilustración 182 se muestra el comportamiento medio en compresión para la dirección 1 de cada uno de los materiales. Lo primero a destacar es la alta resistencia que poseen los materiales de Smartmaterials3D, el PET y la poliamida, mientras que el onyx no mejora en gran cantidad su resistencia cuando se le inserta fibra de vidrio, y además sufre una menor deformación, por lo tanto, para aspectos de compresión, la fibra de vidrio no es una mejora sustancial para el onyx. En cambio, el PET y la poliamida poseen resistencias bastantes aceptables lo que les convierte en las mejores opciones entre los materiales estudiados en situaciones de compresión para la dirección 1.

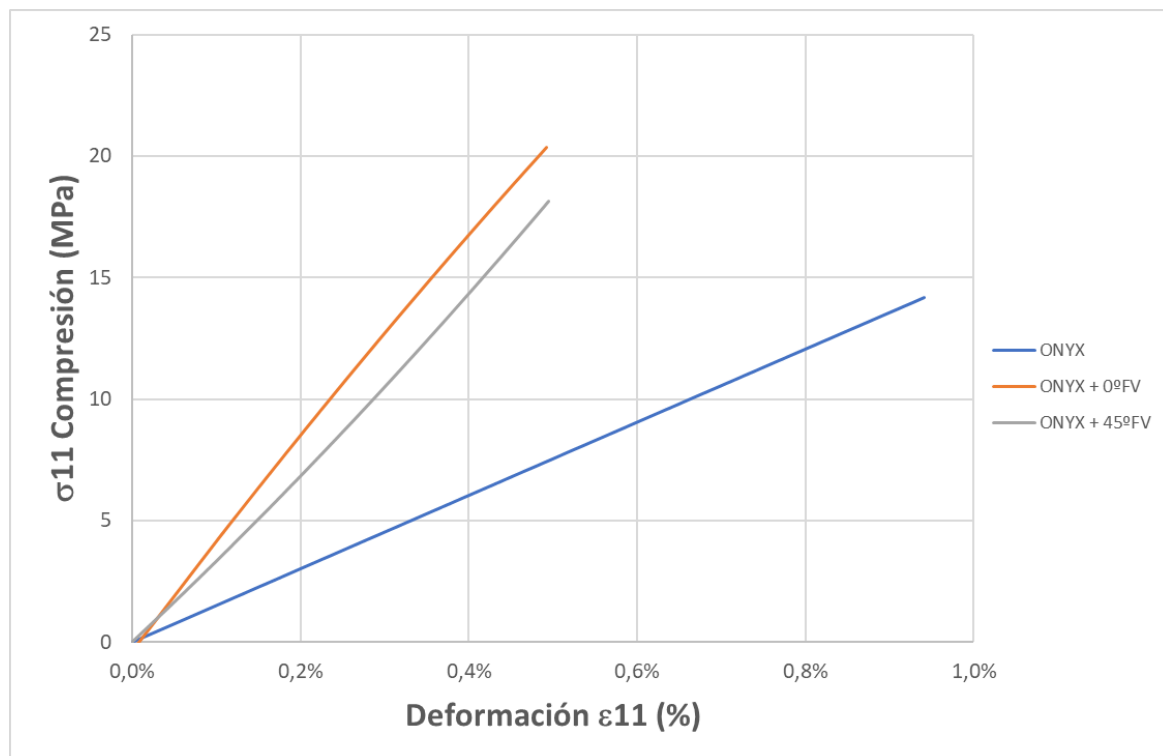


ILUSTRACIÓN 183. Comparativa comportamiento tensión-deformación Markforged. Compresión dirección 1.

Como se puede observar en la ilustración 183 no se aprecia una gran mejora del onyx con la inclusión de la fibra de vidrio en la resistencia máxima, además si a esto se le añade que posee una menor deformación, se puede deducir que la fibra de vidrio no ayuda en gran medida al onyx en aspectos de compresión.

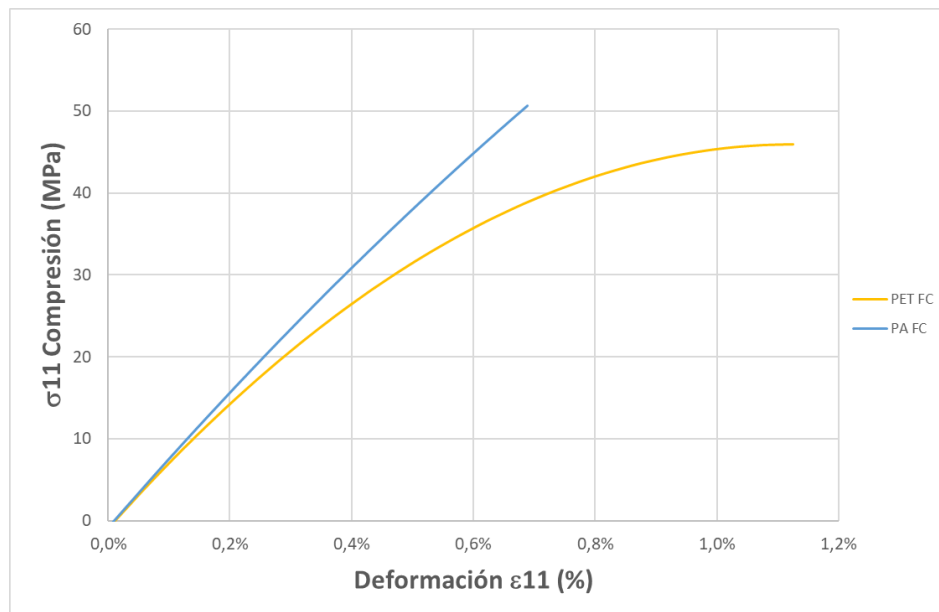


ILUSTRACIÓN 184. Comparativa comportamiento tensión-deformación Smartmaterials3D. Compresión dirección 1.

En el caso de los materiales de Smartmaterials3D, son claramente los ganadores en aspectos de esfuerzos a compresión, alcanzando resistencias cercanas a 50 MPa, valores bastante aceptables para materiales obtenidos por impresión 3D.

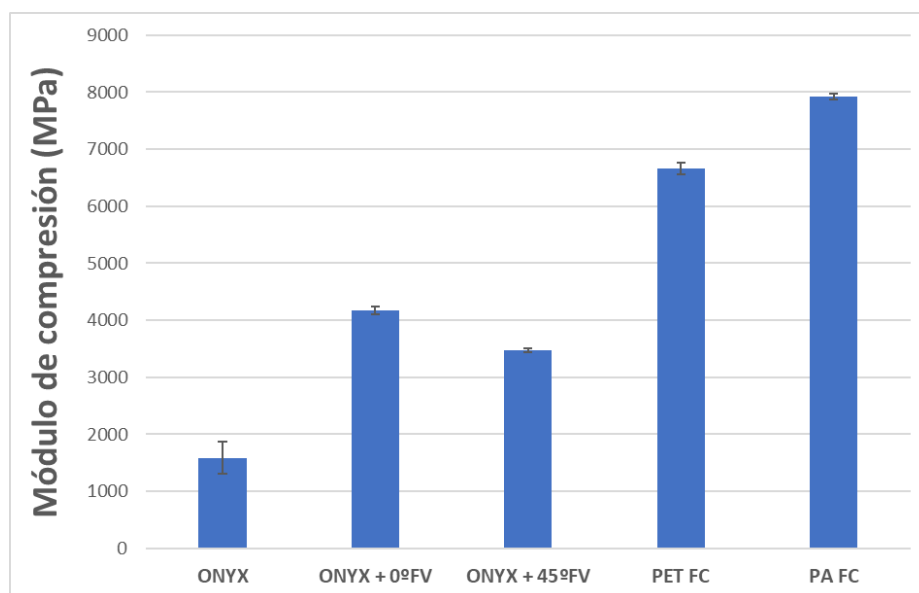


ILUSTRACIÓN 185. Comparativa Módulo de compresión. Compresión dirección 1.

En la ilustración 185 se muestra una comparativa de los módulos de compresión de cada material. Como es lógico, los materiales de Smartmaterials3D son los que poseen unos valores mayores debido a su alta resistencia en el mismo rango de deformaciones que los demás materiales. Para el caso del onyx con fibra, tanto a 0° y a 45°, si se obtiene un mayor módulo de compresión comparado con el onyx sin fibra, esto se debe a que estos primeros poseen un poco más de resistencia, pero en un rango de deformaciones menor, cercado al 0,5%.

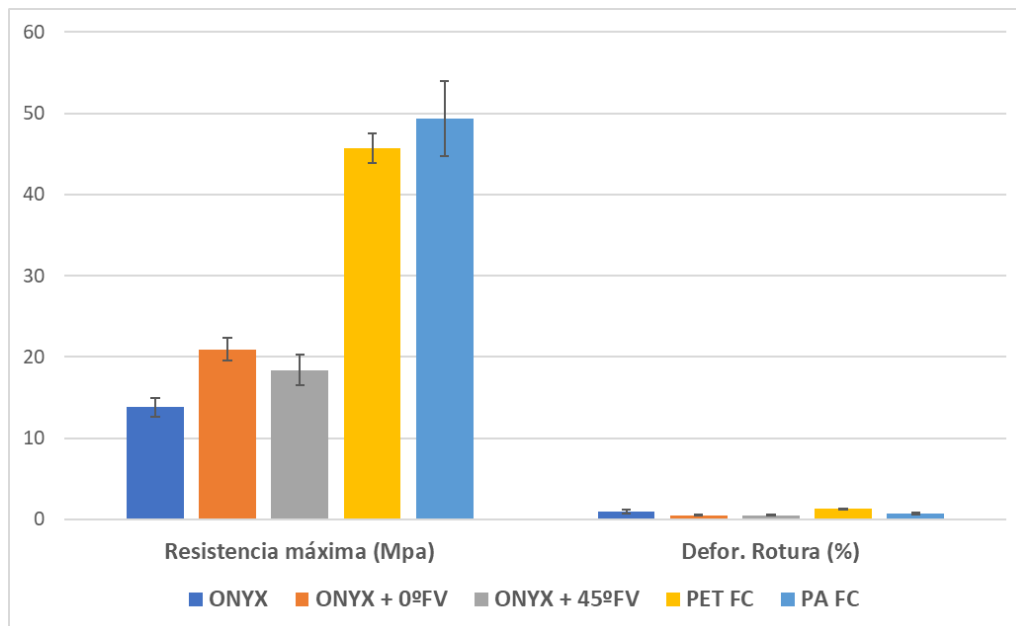


ILUSTRACIÓN 186. Comparativa Resistencia máxima / Defor. Rotura. Compresión dirección 1.

Como se ha comentado antes, claramente los materiales de Smartmaterials3D, y ante todo la poliamida son los materiales que más resisten a compresión en la dirección 1. También hay que destacar que la deformación a rotura es prácticamente la misma en todos los materiales, excepto en el onyx con fibra la cual es la mitad a las demás.

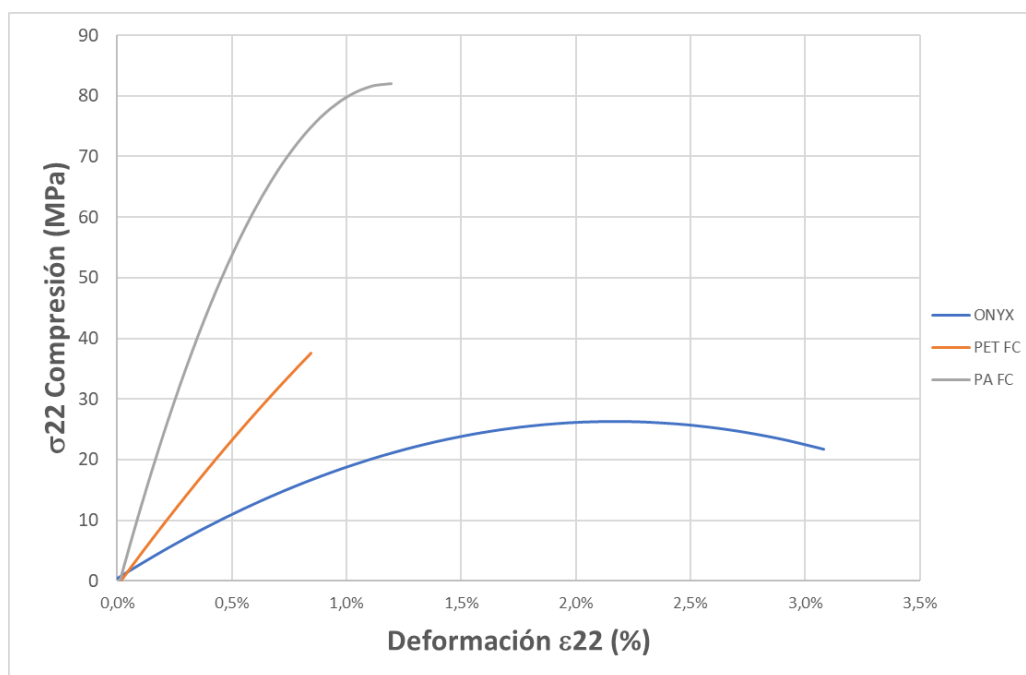


ILUSTRACIÓN 187. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Compresión dirección 2.

En la ilustración 187 se muestra el comportamiento medio a compresión de cada material para la dirección 2. En esta dirección, la poliamida es el material que obtiene la mayor resistencia a compresión, con un valor de 81,73 MPa, lo que la convierte en una gran opción para distintas utilidades. En cambio, el PET obtiene una peor resistencia que en su

dirección 1, menos de 40 MPa y una deformación menor del 1%, mientras que el onyx aumenta su resistencia cerca de los 30 MPa y es el material que posee mayor deformación, superando el 3%.

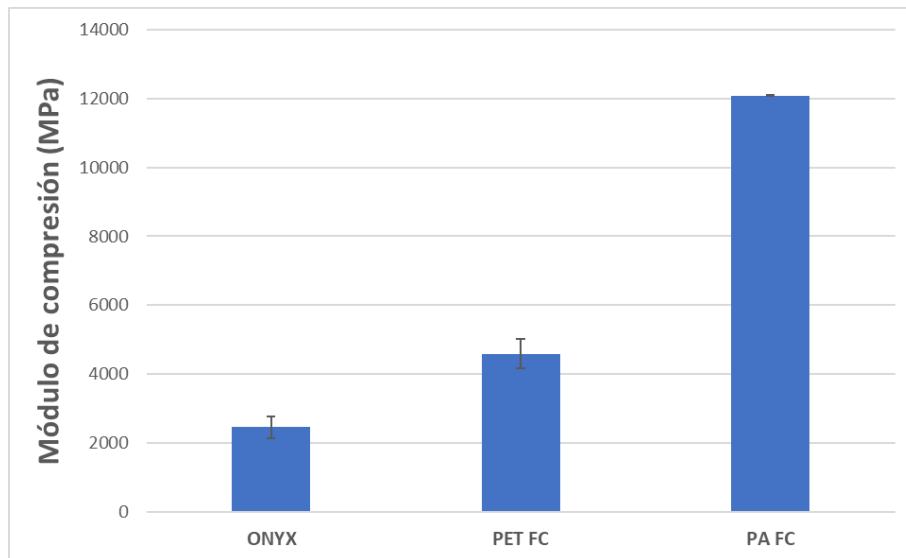


ILUSTRACIÓN 188. Comparativa Módulo de compresión. Compresión dirección 2.

Hay que destacar ante todo de la ilustración 188 el alto módulo de compresión de la poliamida con un valor de 12,09 GPa, cuyo valor es bastante elevado para ser un material obtenido por impresión 3D. Con respecto al onyx, este posee una cierta mejora en la dirección 2 con respecto a la dirección 1, en cambio el PET disminuye su valor.

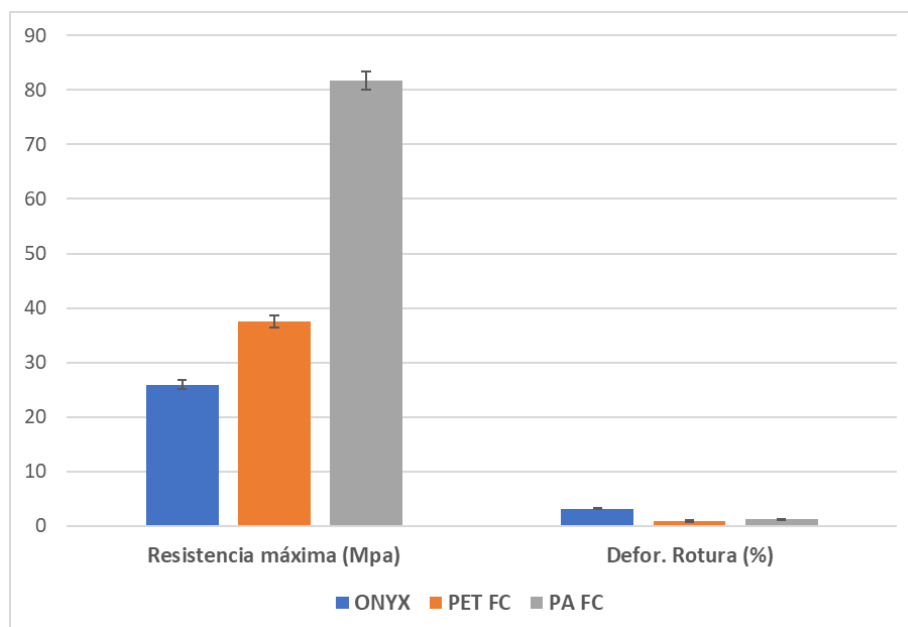


ILUSTRACIÓN 189. Comparativa Resistencia máxima / Defor. Rotura. Compresión dirección 2.

En la ilustración 189 se puede apreciar claramente la resistencia máxima de la poliamida comparada con el onyx y el PET, los cuales se encuentran más iguales en esta dirección. Con respecto a la deformación de rotura, el onyx es el material que más se deforma,

pues como se viene estudiando es el material más plástico, en cambio el PET y la poliamida poseen prácticamente el mismo valor.

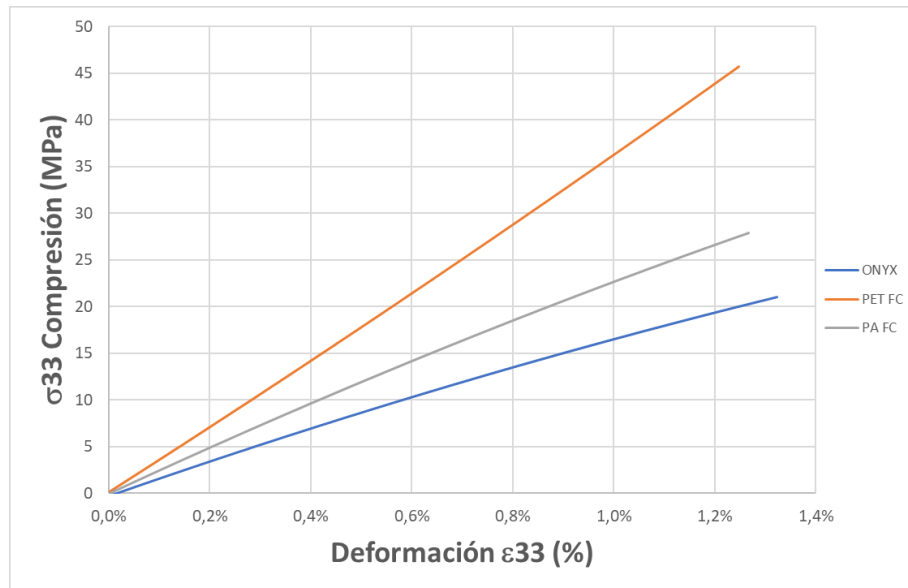


ILUSTRACIÓN 190. Comparativa comportamiento tensión-deformación. Compresión dirección 3.

Con respecto al comportamiento medio de los materiales en la dirección 3 se obtienen unos resultados relativamente parecidos entre el onyx y la poliamida, lo que convierte a la poliamida en un material bastante anisotrópico en los esfuerzos a compresión, pues en esta dirección, la poliamida no consigue alcanzar los 30 MPa de resistencia, mientras que en su dirección 2 alcanzaba más de 80 MPa. En esta dirección, el mejor material es el PET, el cual consigue una resistencia a compresión de 44,32 MPa y un mayor rango de deformaciones.

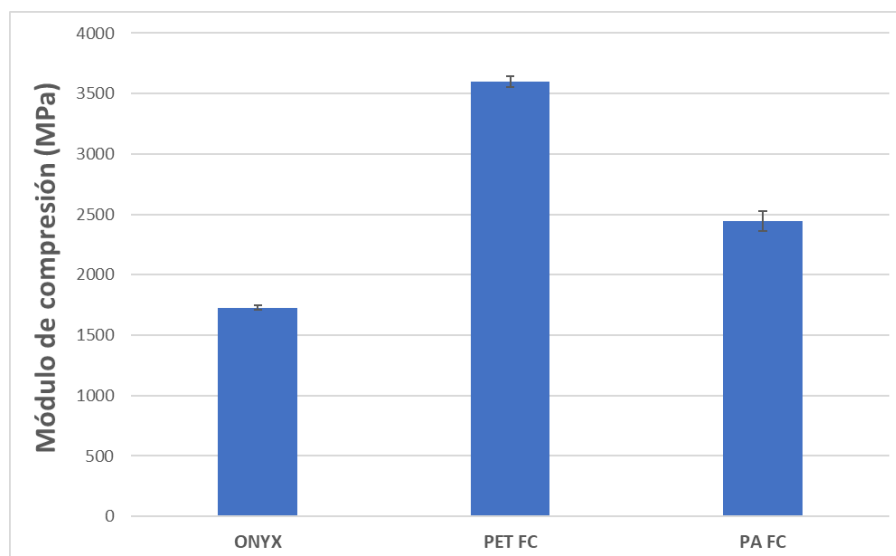


ILUSTRACIÓN 191. Comparativa Módulo de compresión. Compresión dirección 3.

En la ilustración 191 se muestra los módulos de compresión de cada material para la dirección 3, de los cuales el PET es el material que posee un mayor módulo, pues con el

mismo rango de deformaciones, posee la mayor resistencia, la cual se puede comprobar en la siguiente ilustración.

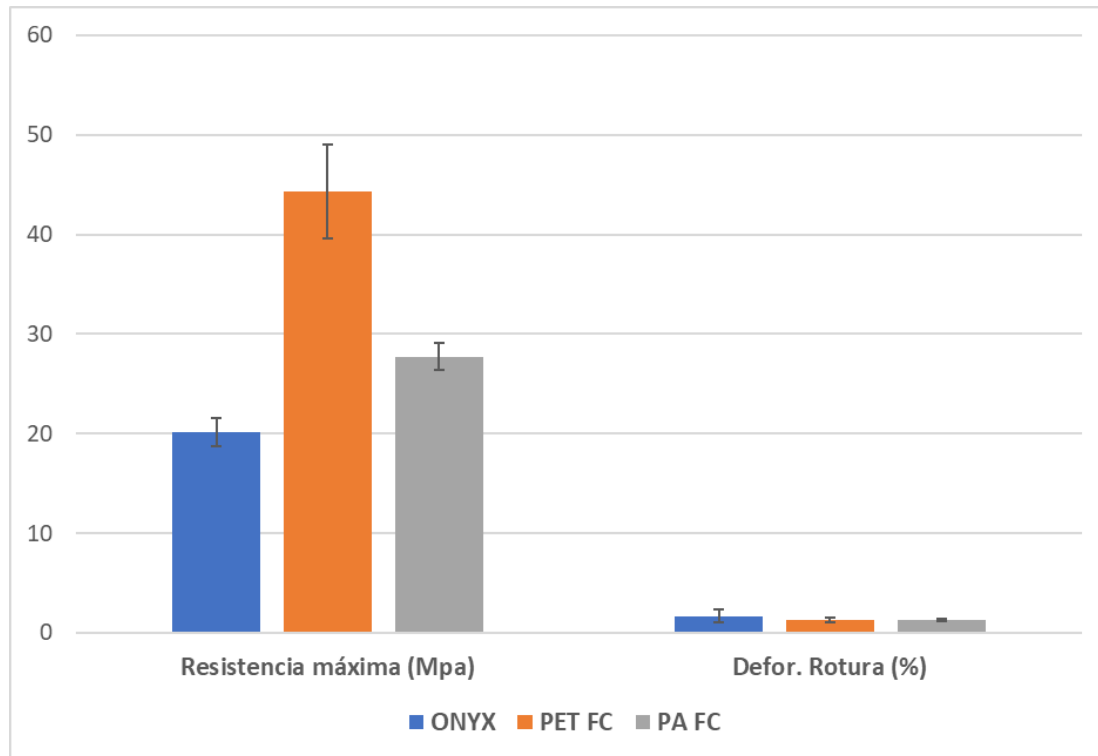


ILUSTRACIÓN 192. Comparativa Resistencia máxima / Defor. Rotura. Compresión dirección 3.

En la ilustración 192 se puede apreciar claramente como el onyx y la poliamida poseen unos valores de resistencia máxima bastante similares, superando este último por un poco, mientras que el gran vencedor es el PET con un valor medio de 44,32 MPa. Con respecto a la deformación de rotura es prácticamente la misma para todos los materiales.

Estudiando los valores obtenidos a compresión se puede apreciar claramente que tanto el onyx como el PET son los materiales más isótropos en los esfuerzos de compresión, pues posee prácticamente los mismos valores de resistencias máximas y mismo rango de deformaciones en todas las direcciones.

6.7. Anisotropía de los materiales

Una vez obtenidas las propiedades de cada material con el ensayo de tracción (tensión máxima y módulo de Young), el ensayo de cortante (tensión máxima transversal y módulo de elasticidad transversal) y el ensayo de compresión (resistencia máxima y módulo de compresión) se puede expresar de forma matricial dichas propiedades.

En primer lugar, se recuerda que el plano de corte 1-2 corresponde a las probetas impresas en dirección horizontal a la superficie de impresión, el plano de corte 1-3 corresponde a las probetas imprimidas de canto y para el plano de corte 2-3 corresponde las probetas impresas verticalmente.

La nomenclatura expresada para la matriz de tensiones y de resistencias a la compresión en MPa es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \sigma_{c11} & - & - \\ - & \sigma_{c22} & - \\ - & - & \sigma_{c33} \end{pmatrix}$$

A continuación, se presentan las matrices de cada uno de los materiales:

➤ Onyx

$$\begin{pmatrix} 37,85 & 22,38 & 21,61 \\ Sim & 55,59 & 15,39 \\ Sim & Sim & 20,93 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 13,81 & - & - \\ - & 25,91 & - \\ - & - & 20,13 \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ Onyx + 0°FV

$$\begin{pmatrix} 148,73 & 28,51 & - \\ Sim & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 20,92 & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ Onyx + 45°FV

$$\begin{pmatrix} 68,77 & 28,3 & - \\ Sim & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 18,39 & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ PET FC

$$\begin{pmatrix} 53,95 & 23,58 & 13,49 \\ \text{Sim} & 38,26 & 2,2 \\ \text{Sim} & \text{Sim} & 6,88 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 45,72 & - & - \\ - & 37,48 & - \\ - & - & 44,32 \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ PA FC

$$\begin{pmatrix} 69,79 & 25,19 & 21,31 \\ \text{Sim} & 106,54 & 8,31 \\ \text{Sim} & \text{Sim} & 11,91 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 49,37 & - & - \\ - & 81,73 & - \\ - & - & 27,75 \end{pmatrix} [MPa]$$

Con respecto al módulo de Young, el módulo de elasticidad transversal y el módulo de compresión se puede obtener en forma matricial su caracterización mecánica, al igual que las matrices de tensiones.

La nomenclatura expresada para la matriz es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} E_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & E_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & E_{33} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} E_{c11} & - & - \\ - & E_{c22} & - \\ - & - & E_{c33} \end{pmatrix}$$

Seguidamente se representa las matrices de los módulos de elasticidad de cada material:

➤ Onyx

$$\begin{pmatrix} 1559,15 & 840,17 & 485,92 \\ \text{Sim} & 2925,13 & 502,71 \\ \text{Sim} & \text{Sim} & 1600,54 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1586,1 & - & - \\ - & 2450,45 & - \\ - & - & 1727,62 \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ Onyx + 0°FV

$$\begin{pmatrix} 4278,5 & 945,91 & - \\ \text{Sim} & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 4166,7 & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ Onyx + 45°FV

$$\begin{pmatrix} 2290,94 & 1593,83 & - \\ \text{Sim} & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 3480,43 & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ PET FC

$$\begin{pmatrix} 5711,83 & 1242,53 & 508,89 \\ \text{Sim} & 4032,28 & 633,26 \\ \text{Sim} & \text{Sim} & 2559,97 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 6655,5 & - & - \\ - & 4591,67 & - \\ - & - & 3597,82 \end{pmatrix} [MPa]$$

➤ PA FC

$$\begin{pmatrix} 6492,15 & 1722,8 & 825,02 \\ \text{Sim} & 9567,05 & 843,97 \\ \text{Sim} & \text{Sim} & 1629,5 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 7919,28 & - & - \\ - & 12089,25 & - \\ - & - & 2443,425 \end{pmatrix} [MPa]$$

6.8. Comparativa de costes

Una vez estudiados los materiales también es necesario realizar una comparativa de costes. Para ello a continuación se realiza un resumen de los costes de cada bobina que se ha utilizado:

- Bobina de Onyx de 800 cm³ (960 g): 230 € → **0,239 €/g**
- Bobina de fibra de vidrio CFF de 50 cm³ (75 g): 96,8 € → **1,29 €/g**
- Bobina de PET FC de 500 g: 47,55 € → **0,0951 €/g**
- Bobina de PA FC de 500 g: 50,95 € → **0,1019 €/g**

Lo primero que hay que destacar es el elevado precio que posee tanto el onyx como la fibra de vidrio, precios que duplican a los materiales de Smartmaterials3D, por lo que la fabricación de una pieza con onyx y fibra de vidrio será mucho más costosa que una fabricada con PET o poliamida. Convirtiendo de esta manera a los materiales de Smartmaterials3D mucho más accesibles para cualquier tipo de usuario. Un factor que se debe tener en cuenta a la hora de elegir los materiales con los que se quiera fabricar un tipo de pieza.

7. CONCLUSIONES

Una vez estudiados todos los materiales, es el momento de obtener una serie de conclusiones con las que se completa este trabajo final de grado.

En primer lugar, hay que mencionar que se ha cumplido el objetivo propuesto en este TFG, es cual era la caracterización mecánica de los materiales reforzados con fibra, tanto con microfibra como con fibra continua, y el empleo de la técnica de la correlación digital de imágenes durante los ensayos. La impresión 3D es una tecnología de fabricación aditiva muy innovadora y con un gran camino por delante, de la cual se comienza a obtener cada vez más materiales con unas mejores propiedades, unos mejores acabados superficiales, geometrías cada vez más complejas, y todo ello a un bajo coste. Avances que provocan que el paso a la industria 4.0 se realice con una mayor fuerza y seguridad.

Con respecto a los materiales estudiados, cada uno es diferente, cada uno posee unas determinadas propiedades que los convierten en materiales adecuados para diferentes situaciones. En el caso del onyx, es el material más plástico y con unos valores de tensiones y resistencias algo menores a los demás, pero con unos acabados superficiales excelentes, por lo tanto, lo convierte en un material idóneo para piezas que no necesitan estar sometidas a altos esfuerzos, pero si necesitan tener unos acabados perfectos. Cabe destacar que una vez que se le introduce fibra de vidrio al onyx se convierte en un material menos plástico, pero con una alta tensión a la tracción, lo que le convierte en un material muy atractivo en piezas que requieran de unas mayores exigencias.

También hay que destacar la gran labor que realiza la impresora Markforged, pues posee una gran configuración y unos acabados superiores a la competencia.

Los materiales de Smartmaterials3D poseen unas propiedades mayores a la de los polímeros comunes de impresión 3D, entre el PET y la poliamida hay que destacar ante todo este último, un material con unas elevadas resistencias tanto a tracción como en compresión en una de sus direcciones, convirtiéndolo en uno de los materiales más atractivos para seguir estudiándolo, pues es un material con la misma base que el onyx, nylon más microfibra de carbono, pero posee unas propiedades mucho mayores a las del onyx. Lo que conlleva a plantear el estudio de la combinación entre la poliamida y la fibra de vidrio, un material del cual se podrían obtener unos resultados bastante interesantes, un estudio que se podría

realizar como trabajo futuro. Cabe destacar que los acabados superficiales del PET y la poliamida son correctos y no llegan a tener una calidad como la del onyx, pero aun así son acabados aceptables para determinadas piezas.

Como conclusión final con respecto a los materiales, según las necesidades y el presupuesto que se tenga, se elegirá un material u otro. Los materiales de Smartmaterials3D son unos materiales muy equilibrados con detalles bastantes atractivos a un precio asequible para todo tipo de usuario, pero son bastantes frágiles en la dirección 3 y el plano de corte 23, además de este último detalle, son materiales que necesitan de una alta temperatura de impresión, por lo que utilizarlos en una impresora 3D económica será imposible. Con respecto a los materiales de Markforged, hay que destacar ante todo sus acabados superficiales, los cuales son excelentes y su alta capacidad de adherencia entre capas. En el caso del onyx sin fibra es un material más plástico y con unas peores propiedades que los materiales de Smartmaterials3D, por otro lado, si al onyx le insertamos fibra de vidrio a 0°, este material mejora sustancialmente, pero también hay que recordar que la impresión con estos materiales solo se puede realizar con una impresora propia de Markforged, la cual no es económica, ni el coste de cada material.

En segundo lugar, hay que destacar la innovadora tecnología de la correlación digital de imágenes, de la cual se pueden obtener a partir de una serie de fotografías realizadas durante el ensayo, las deformaciones y los desplazamientos de los materiales. Además de lo mencionado anteriormente, es una herramienta que no solo estudia las probetas de un material, también puede estudiar los desplazamientos y deformaciones de cualquier tipo de pieza, tanto en 2D como en 3D. Es una herramienta impresionante y muy importante para el estudio de nuevos materiales.

Como se ha podido observar, los materiales estudiados en este presente trabajo son unos materiales con diferentes propiedades y para distintas aplicaciones, destacando ante todo el onyx con refuerzo de fibra de vidrio y la poliamida con microfibra de carbono, unos materiales que poseen un gran camino de estudio e investigación por delante, pues los materiales reforzados con fibra fabricados por FDM tendrán un gran impacto en el futuro y conseguirán expandir el abanico de materiales que existen en la industria.

En el tema personal, a pesar de numerosas dificultades se ha obtenido el conocimiento para realizar ensayos experimentales a partir de la comprensión de normas, la utilización y

fabricación de materiales a partir de la impresión 3D y el procesado de las fotografías a partir de la correlación digital de imágenes. Unas herramientas con un gran valor y con un gran futuro que complementan a lo aprendido durante el grado.

Como conclusión general, los materiales reforzados con fibra obtenidos a partir de la impresión 3D poseen un gran futuro, de los cuales comienzan a obtenerse unos materiales con unas propiedades bastante competentes. Pero también poseen ciertos inconvenientes como puede ser su impresión vertical, convirtiéndolos en materiales frágiles, y sus acabados superficiales, los cuales existen mejores acabados en la industria a partir de otras tecnologías.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANDREW N. DICKSON (2017), *FABRICATION OF CONTINUOUS CARBON, GLASS AND KEVLAR FIBRE REINFORCED POLYMER COMPOSITES USING ADDITIVE MANUFACTURING*, Elsevier/Additive Manufacturing.
- [2] ASTM. (1998). STANDARD TEST METHOD FOR SHEAR PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BY THE V-NOTCHED BEAM METHOD. *ASTM D5379/D5379M – 98*.
- [3] LUIS O. BERROCAL (Madrid; 2010), *RESISTENCIA DE LOS MATERIALES*, McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.
- [4] ASTM. (2014). STANDARD TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS. *ASTM D3039/D3039M – 14*.
- [5] ASTM. (2012). STANDARD TEST METHOD FOR SHEAR PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BY THE V-NOTCHED RAIL SHEAR METHOD. *ASTM D7078/D7078M – 12*.
- [6] UNE-EN ISO 604. (octubre, 2003). PLÁSTICOS; Determinación de las propiedades en compresión. ISO 604:2002.
- [7] WILLIAM N. SHARPE, JR. (2008), *SPRINGER HANDBOOK OF EXPERIMENTAL SOLID MECHANICS*.
- [8] RICHARD G. BUDYNAS / J. KEITH NISBETT (México; 2008), *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY – 9ª Edición*, McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V.