



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PIEZAS OBTENIDAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Alumno: Iván Toledano Rama

Tutor: Prof. D. Daniel Carazo Álvarez
Dpto: Mecánica de medios continuos y teoría de
estructuras

Septiembre, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería mecánica y minera

Don Daniel Carazo Álvarez , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Caracterización mecánica de piezas obtenidas mediante impresión 3D, que presenta Iván Toledano Rama, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, 4 de Septiembre de 2019

El alumno:

Iván Toledano Rama

El tutor:

Firmado
digitalmente por
CARAZO ALVAREZ
DANIEL - 75017225B
Fecha: 2019.09.04
11:47:40 +02'00'

Daniel Carazo Álvarez

Índice

Índice de figuras.....	3
Índice de tablas	7
Resumen.....	9
Abstract.....	10
1. Introducción.....	11
2. Estado del arte	13
2.1. Fabricación aditiva	14
2.2. Procesos de fabricación AM.....	16
2.2.1. Base líquida	16
2.2.2. Base en polvo.....	18
2.2.3 Base sólida	22
2.3 Caracterización del Modelado por Deposición Fundida (FDM).....	23
2.4 Parámetros de impresión.....	24
2.5 Aplicación de la tecnología FDM	30
2.6 Correlación digital de imágenes.....	34
3. Objetivos del trabajo.....	35
4. Programa experimental	36
4.1 Descripción del estudio.	36
4.2 Ensayo a tracción	43
4.3 Ensayo de compresión	71
4.4 Ensayo de cortante.....	89
5. Análisis mediante elementos finitos.....	113
6. Análisis de resultados	117
6.1 Resultados ensayos a tracción	117
6.2 Resultados ensayos compresión	124
6.3 Curvas completas tracción/compresión.....	132
6.4 Resultados ensayos cortante	135
6.5 Anisotropía del material	144
6.6 Resultados simulaciones numéricas	145
7. Modelo de transferencia de calor en proceso de manufactura por deposición fundida	156
8. Conclusiones.....	162
ANEXO I. PLANOS PROBETAS	164
9. Bibliografía	167

Índice de figuras

Figura 1 .Proceso de fabricación con Impresión 3D.	15
Figura 2. Esquema proceso SLA.....	17
Figura 3 Esquema proceso DLP.....	17
Figura 4. Esquema proceso MJM.....	18
Figura 5. Esquema proceso SLS.....	19
Figura 6. Esquema proceso DMLD.....	20
Figura 7. Esquema proceso EBM.....	20
Figura 8. Esquema proceso BI.....	21
Figura 9. Esquema proceso LMD.....	21
Figura 10. Esquema proceso LOM.....	22
Figura 11. Esquema proceso FDM.....	23
Figura 12. Air gap.....	24
Figura 13. Mallados para PLA y ABS.....	26
Figura 14. Propiedades para diferentes mallados ABS.....	27
Figura 15. Propiedades para diferentes mallados PLA.....	28
Figura 16. Espesores de capa.....	29
Figura 17. Efecto Talón.....	29
Figura 18. Prótesis mecánicas hechas con Impresión 3D.....	30
Figura 19. Bioimpresión.....	31
Figura 20. Strati.....	32
Figura 21. Big Area Additive Manufacturing.....	32
Figura 22. Casa fabricada con Impresión 3D.....	33
Figura 23 Impresora BQ WITBOX.....	37
Figura 24 Dimensiones probetas tracción.....	43
Figura 25 Esquema probeta tracción.....	44
Figura 26 Dimensiones probeta 1BA.....	44
Figura 27 Posiciones de impresión de las probetas.....	45
Figura 28 Medida de las probetas sometidas a tracción.....	46
Figura 29 Montaje ensayo tracción.....	47
Figura 30 Montaje ensayo tracción.....	48
Figura 31 Cámara BASLER ACE.....	50
Figura 32 Montaje total ensayo tracción.....	51
Figura 33 Velocidades ensayo tracción.....	52
Figura 34 Probeta A1. Ensayo tracción.....	53
Figura 35 Probeta A2. Ensayo tracción.....	54
Figura 36 Probeta A3. Ensayo tracción.....	55
Figura 37 Probeta A4. Ensayo tracción.....	55
Figura 38 Probeta A5. Ensayo tracción.....	56
Figura 39 Probeta A6. Ensayo tracción.....	57
Figura 40. Gráficas medias probeta tipo A.....	58
Figura 41 Probeta B1. Ensayo tracción.....	59

Figura 42	Probeta B2. Ensayo tracción	60
Figura 43	Probeta B3. Ensayo tracción	61
Figura 44	Probeta B4. Ensayo tracción	62
Figura 45	Probeta B5. Ensayo tracción	63
Figura 46	Probeta B6. Ensayo tracción	63
Figura 47	Gráficas medias probeta tipo B.....	64
Figura 48	Probeta C1. Ensayo tracción	65
Figura 49	Probeta C2. Ensayo tracción	66
Figura 50	Probeta C3. Ensayo tracción	67
Figura 51	Probeta C4. Ensayo tracción	67
Figura 52	Probeta C5. Ensayo tracción	68
Figura 53	Probeta C6. Ensayo tracción	69
Figura 54	Gráficas medias probetas tipo C.....	70
Figura 55	Esquema probeta compresión.....	71
Figura 56	Ejes anisotropía probeta compresión.....	72
Figura 57	Medidas probeta compresión	73
Figura 58	Montaje probetas ensayo compresión	74
Figura 59	Máquina de ensayo a compresión. MTS.....	75
Figura 60	Montaje total ensayo compresión	76
Figura 61	Carga previa ensayo compresión	77
Figura 62	Programa MTS 793	78
Figura 63	Probeta C1. Ensayo compresión	78
Figura 64	Probeta C2. Ensayo compresión	79
Figura 65	Probeta C3. Ensayo compresión	80
Figura 66	Probeta C4. Ensayo compresión	81
Figura 67	Probeta C5. Ensayo compresión	82
Figura 68	Probeta C6. Ensayo compresión	82
Figura 69	Probeta C1. Ensayo compresión	84
Figura 70	Probeta C2. Ensayo compresión	85
Figura 71	Probeta C3. Ensayo compresión	86
Figura 72	Probeta C4. Ensayo compresión	86
Figura 73	Probeta C5. Ensayo compresión	87
Figura 74	Probeta C6. Ensayo compresión	88
Figura 75	Esquema probeta cortante	89
Figura 76	Medidas probeta cortante	90
Figura 77	Colocación extensómetros ensayo cortante	91
Figura 78	Mordazas ensayo cortante	92
Figura 79	Colocación mordazas	93
Figura 80	Colocación ensayo cortante	94
Figura 81	Probeta A1. Ensayo cortante.....	96
Figura 82	Probeta A2. Ensayo cortante.....	97
Figura 83	Probeta A3. Ensayo cortante.....	97
Figura 84	Probeta A4. Ensayo cortante.....	98
Figura 85	Probeta A5. Ensayo cortante.....	99
Figura 86	Probeta A6. Ensayo cortante.....	100
Figura 87	Gráfica media probeta tipo A. Ensayo cortante.....	101
Figura 88	Probeta tipo B1. Ensayo cortante	101
Figura 89	Probeta tipo B2. Ensayo cortante	102

Figura 90 Probeta tipo B3. Ensayo cortante	103
Figura 91 Probeta tipo B4. Ensayo cortante	104
Figura 92 Probeta tipo B5. Ensayo cortante	104
Figura 93 Probeta tipo B6. Ensayo cortante	105
Figura 94 Gráfica media probeta tipo B. Ensayo cortante.....	106
Figura 95 Probeta tipo C1. Ensayo cortante	107
Figura 96 Probeta tipo C2. Ensayo cortante	108
Figura 97 Probeta tipo C3. Ensayo cortante	108
Figura 98 Probeta tipo C4. Ensayo cortante	109
Figura 99 Probeta tipo C5. Ensayo cortante	110
Figura 100 Probeta tipo C6. Ensayo cortante	111
Figura 101 Gráficas medias probeta tipo C. Ensayo cortante.....	112
Figura 102 Malla modelo transferencia de calor	157
Figura 103 Cámara termográfica.....	160
Figura 104 Termografía espesor de capa 0,3mm	161
Figura 105 Termografía espesor de capa 0,24mm	161
Figura 106 Termografía espesor de capa 0,18mm	162
Figura 107 Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Tracción	122
Figura 108 Influencia del espesor de capa en el Límite elástico. Tracción.....	123
Figura 109 Influencia del espesor de capa en la tensión de rotura. Tracción.....	123
Figura 110 Influencia del espesor de capa en la deformación última. Tracción	124
Figura 111 Influencia del espesor de capa en el Módulo de Elasticidad Transversal. Cortante	138
Figura 112 Influencia del espesor de capa en el Límite elástico. Cortante.....	138
Figura 113 Influencia del espesor de capa en la deformación . Cortante.....	139
Figura 114 Influencia del espesor de capa en el Módulo de Elasticidad Transversal. Cortante	141
Figura 115 Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Cortante.....	141
Figura 116. Influencia del espesor de capa en la deformación. Cortante.....	142
Figura 117. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Elasticidad Transversal. Comparativa porcentaje de relleno. Cortante	142
Figura 118. Influencia del espesor de capa en el límite elástico .Comparativa porcentaje de relleno. Cortante.....	143
Figura 119. Influencia del espesor de capa en la deformación. Comparativa porcentaje de relleno. Cortante.....	143
Figura 120. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión	126
Figura 121 Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión	126
Figura 122. Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión	128
Figura 123. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión.....	128
Figura 124. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión. Porcentaje de relleno	129
Figura 125. Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión. Porcentaje de relleno	129
Figura 126. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión. Porcentaje de relleno	130
Figura 127. Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión. Porcentaje de relleno	131

Figura 128. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 100% de relleno y espesor de capa 0,24mm	132
Figura 129. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 100% de relleno y espesor de capa 0,18mm	133
Figura 130. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 100% de relleno y espesor de capa 0,3mm	133
Figura 131. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 75% de relleno y espesor de capa 0,24mm	134
Figura 132 Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 75% de relleno y espesor de capa 0,18mm.....	134
Figura 133. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 75% de relleno y espesor de capa 0,3mm	135
Figura 134. Part Abaqus.....	113
Figura 135. Property Abaqus.....	114
Figura 136. Step Abaqus.....	115
Figura 137. Condiciones de contorno Abaqus	116
Figura 138. Condiciones de contorno Abaqus	116
Figura 139. Mallado Abaqus.....	117
Figura 140. Mapa de desplazamientos. Probeta vertical	145
Figura 141 Mapa de desplazamientos. Probeta vertical	146
Figura 142. Mapa de desplazamientos. Probeta vertical	146
Figura 143 .Mapa de desplazamientos. Probeta vertical	147
Figura 144. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	147
Figura 145. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	148
Figura 146. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	148
Figura 147. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	149
Figura 148. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	149
Figura 149 Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	150
Figura 150. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	150
Figura 151 Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal	151
Figura 152. Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	152
Figura 153. Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	152
Figura 154 Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	153
Figura 155 Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	153
Figura 156. Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	154
Figura 157. Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	154
Figura 158. Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	155
Figura 159. Mapa de desplazamientos. Probeta canto.....	155
Figura 160 Planos probetas tracción	164
Figura 161 Planos probetas cortante.....	165
Figura 162 Planos probetas compresión	166

Índice de tablas

Tabla 1 Velocidades de impresión de las probetas de tracción	42
Tabla 2 Velocidades de impresión de las probetas de cortante	42
Tabla 3 Velocidades de impresión de las probetas de compresión	43
Tabla 4 Propiedades mecánicas probeta A1. Ensayo tracción	53
Tabla 5 Propiedades mecánicas probeta A2. Ensayo tracción	54
Tabla 6 Propiedades mecánicas probeta A3. Ensayo tracción	55
Tabla 7 Propiedades mecánicas probeta A4. Ensayo tracción	55
Tabla 8 Propiedades mecánicas probeta A5. Ensayo tracción	56
Tabla 9 Propiedades mecánicas probeta A6. Ensayo tracción	57
Tabla 10 Propiedades mecánicas probeta tipo A. Ensayo tracción	58
Tabla 11 Propiedades mecánicas probeta B1. Ensayo tracción	59
Tabla 12 Propiedades mecánicas probeta B2. Ensayo tracción	60
Tabla 13 Propiedades mecánicas probeta B3. Ensayo tracción	61
Tabla 14 Propiedades mecánicas probeta B4. Ensayo tracción	62
Tabla 15 Propiedades mecánicas probeta B5. Ensayo tracción	63
Tabla 16 Propiedades mecánicas probeta B6. Ensayo tracción	63
Tabla 17 Propiedades mecánicas probeta tipo B. Ensayo tracción	64
Tabla 18 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo tracción	65
Tabla 19 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo tracción	66
Tabla 20 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo tracción	67
Tabla 21 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo tracción	67
Tabla 22 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo tracción	68
Tabla 23 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo tracción	69
Tabla 24 Propiedades mecánicas probeta tipo C. Ensayo tracción	70
Tabla 25 Medidas probeta compresión.....	71
Tabla 26 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo compresión	79
Tabla 27 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo compresión	79
Tabla 28 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo compresión	80
Tabla 29 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo compresión	81
Tabla 30 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo compresión	82
Tabla 31 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo compresión	83
Tabla 32 Propiedades mecánicas probeta tipo C. Ensayo compresión	83
Tabla 33 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo compresión	84
Tabla 34 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo compresión	85
Tabla 35 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo compresión	86
Tabla 36 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo compresión	87
Tabla 37 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo compresión	87
Tabla 38 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo compresión	88
Tabla 39 Propiedades mecánicas probeta C. Ensayo compresión	88
Tabla 40 Propiedades mecánicas probeta A1. Ensayo cortante.....	96
Tabla 41 Propiedades mecánicas probeta A2. Ensayo cortante.....	97
Tabla 42 Propiedades mecánicas probeta A3. Ensayo cortante.....	98
Tabla 43 Propiedades mecánicas probeta A4. Ensayo cortante.....	98

Tabla 44 Propiedades mecánicas probeta A5. Ensayo cortante.....	99
Tabla 45 Propiedades mecánicas probeta A6. Ensayo cortante.....	100
Tabla 46 Propiedades mecánicas probeta tipo A. Ensayo cortante	100
Tabla 47 Propiedades mecánicas probeta B1. Ensayo cortante.....	102
Tabla 48 Propiedades mecánicas probeta B2. Ensayo cortante.....	102
Tabla 49 Propiedades mecánicas probeta B3. Ensayo cortante.....	103
Tabla 50 Propiedades mecánicas probeta B4. Ensayo cortante.....	104
Tabla 51 Propiedades mecánicas probeta B5. Ensayo cortante.....	104
Tabla 52 Propiedades mecánicas probeta B6. Ensayo cortante.....	105
Tabla 53 Propiedades mecánicas probeta tipo B. Ensayo cortante	106
Tabla 54 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo cortante.....	107
Tabla 55 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo cortante.....	108
Tabla 56 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo cortante.....	109
Tabla 57 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo cortante.....	109
Tabla 58 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo cortante.....	110
Tabla 59 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo cortante.....	111
Tabla 60 Propiedades mecánicas probeta tipo C. Ensayo cortante	112
Tabla 61 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.	118
Tabla 62 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.	119
Tabla 63 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.	119
Tabla 64 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.	120
Tabla 65 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.	121
Tabla 66 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.	121
Tabla 67 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.....	136
Tabla 68 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.....	137
Tabla 69 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.....	137
Tabla 70 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.....	139
Tabla 71 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.....	140
Tabla 72 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.....	140
Tabla 73 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión	125
Tabla 74 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión	125
Tabla 75 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión	127
Tabla 76 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión	127

Resumen

La Impresión 3D es un proceso de fabricación que está en pleno auge, es por ello que es necesario investigar dicha tecnología.

En la actualidad se están realizando numerosas investigaciones que tienen como objetivo caracterizar los distintos materiales, debido a que se ha observado que al fundir el material se produce una variación de las propiedades mecánicas del mismo en comparación con las propiedades antes de fundirse.

En el presente trabajo vamos a enfocarnos en otro de los aspectos más importantes como son los parámetros de impresión, y es que se ha observado que en función de estos se pueden obtener mejores o peores acabados, mayor o menor resistencia mecánica, mayor o menor tiempo de fabricación, mayor adhesión entre capas y con ello una menor anisotropía, etc.

Para ello hemos realizado una caracterización mecánica del material PLA (Uno de los más utilizados en la industria de la Impresión 3D) a partir de la variación de parámetros como la densidad de relleno y espesor de capa. Además, nos hemos basado en otros estudios para considerar el tipo de malla con mejores prestaciones para este tipo de material.

El proceso ha consistido en realizar la impresión de las probetas, las cuales han sido definidas por las normas UNE-EN ISO en forma, tamaño y cantidad, en el FAB LAB de la Universidad de Jaén. A continuación, hemos sometido dichas probetas a los ensayos de tracción, compresión y cortante basándonos en las normas UNE-EN ISO y en la normativa D5379/D 5379M para conseguir un estudio completo de dichas probetas.

Finalmente realizaremos un análisis de los datos obtenidos para saber con qué parámetros obtendremos unas prestaciones más óptimas.

El objetivo fundamental de este trabajo es el de definir bajo qué parámetros obtendremos unas mejores prestaciones del material tanto desde el punto de vista de la impresión de las piezas como desde el punto de vista de las propiedades mecánicas que presentarán las piezas de dicho material.

Tras analizar los datos obtenidos observamos como a tracción podemos conseguir reducir el porcentaje de relleno de la pieza, y con ello la cantidad de material necesario para fabricarla, realizando una disminución del espesor de capa en la impresión de la pieza sin que empeoren las propiedades mecánicas de la misma.

Para el ensayo a cortante y compresión hemos obtenido que no hay un comportamiento lineal entre las propiedades mecánicas del material y el espesor de capa. Sin embargo, hemos observado que para un espesor de capa de entorno a un 60% del diámetro de la boquilla del extrusor podemos intentar reducir el relleno de la pieza sin variar en exceso las propiedades mecánicas de la misma, además será para esta altura de capa donde obtendremos un mejor comportamiento mecánico del material.

Abstract

3D Printing is a booming manufacturing process, which is why it is necessary to investigate this technology.

At present, numerous investigations are being carried out which aim to characterize the different materials, because it has been observed that when melting the material there is a variation of the properties of respect to the material before finding it.

In the present work we are going to focus on another aspect more important as are the parameters of printing, and it has been observed that depending on these can be obtained better or worse finish, more or less mechanical resistance, greater or lesser time of Production, greater adhesion between layers and with it an anisotropy manner, etc.

For this I have done a mechanical characterization of PLA material (one of the most used in the 3D printing industry) from the variation of parameters such as filling density and layer thickness. I have also based on other studies to consider the type of mesh with better performance for this type of material.

The process has consisted in making the impression of these specimens, which have been defined by the normal UNE-

EN ISO both in shape, size and quantity, in the FAB LAB of the University of Jaén. We have then subjected these test specimens to the tensile, compression and cutting tests based on the UNE-

EN ISO standards and the D5379/D5379M regulations to obtain a complete study of these specimens.

Finally will perform an analysis of the data obtained to know which parameters will obtain more optimal performance.

The fundamental objective of this work is to define under which parameters we will obtain a better performance of the material from the point of view of the impression of the pieces as from the point of view of the mechanical properties that the pieces of said material.

After analysing the data obtained, we observe how traction can reduce the percentage of filling of the piece, and with it the quantity of material necessary to manufacture it, reducing the thickness of the layer in the printing of the piece without worsening the mechanical properties of the piece.

For the shear and compression test we have obtained that there is a non-linear behaviour between the mechanical properties of the material and the layer thickness. However, we have observed that for a layer thickness of around 60% of the diameter of the extruder nozzle we can try to reduce the filling of the part without excessively varying the mechanical properties of it.

After analysing the data obtained, we observe how traction can be used to reduce the percentage of filling of the piece, and with it the quantity of material needed to manufacture it, reducing the thickness of the layer in the printing of the piece without worsening its mechanical properties.

For the shear and compression test we have obtained that there is no linear behaviour between the mechanical properties of the material and the layer thickness. However, we have observed that for a layer thickness of around 60% of the diameter of the extruder nozzle we can try to reduce the filling of the part without excessively varying the mechanical properties of it.

1. Introducción

El mundo de la manufactura está en constante cambio. Uno de los cambios más significativos que se han realizado en los últimos años es la FDM o Modelado por Deposición Fundida.

Dentro de los procesos FDM el más expandido está siendo la fabricación aditiva o como se llama comúnmente Impresión 3D. Su auge se debe a la extinción del derecho de patente, por lo tanto, ha sido posible investigar y desarrollar dicho proceso con el fin de proporcionar una maquinaria a un precio asequible.

Este proceso consiste en la fabricación de piezas a partir de la deposición de material fundido capa por capa.

Estos procesos de fabricación nos ofrecen muchas ventajas respecto a los procesos de fabricación actuales: [1]

- Mayor eficiencia de los recursos: En este tipo de procesos de fabricación tenemos un aprovechamiento del material aproximado del 100%, es decir, no tenemos restos de material tras el proceso de producción. Esto es muy importante ya que hay que aprovechar lo máximo posible los recursos existentes, y además, al no generar residuos nos permite tener una mayor sostenibilidad con el medio ambiente.
- Duración del producto: Conseguimos una mayor duración del producto con enfoques técnicos como la reparación, remanufactura y remodelación.
- Costes: Este proceso de fabricación no tiene un gran coste inicial como puede pasar con los procesos de fabricación como la fundición, en la que necesitamos un tipo de molde para cada pieza, lo cual supone un gran coste. Sin embargo, en este tipo de procesos de fabricación nos basta con cambiar el diseño en CAD del objeto a imprimir. Tal y como hemos mencionado anteriormente, tenemos un mayor aprovechamiento de los recursos, por lo tanto, reduciremos costes en material e incluso en procesos de tratamiento de residuos.
- Cadenas de valor: Con este proceso de fabricación podemos abarcar cadenas de producto mucho más cortas que con otros procesos.
- También nos permite obtener piezas complejas y productos personalizados a un bajo coste.

Por otra parte, encontramos la amplia aplicación de dicha tecnología. A través de la investigación estamos viendo como esta tecnología está siendo aplicada en industrias como automoción, aviación, fabricación, medicina, etc.

Uno de los últimos avances que se está haciendo en el campo de la medicina es la reproducción de órganos humanos con el objetivo de en un futuro poder sustituir a órganos reales.

Es por todo esto que podemos decir que la Impresión 3D es un proceso de fabricación en pleno auge, con infinitas posibilidades y por lo tanto de especial interés para su estudio.

En este trabajo vamos a analizar la relevancia de los factores de impresión para con las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas con FDM.

En primer lugar, vamos a encontrar una pequeña descripción técnica del trabajo, trabajos previos realizados, etc.

Los factores de impresión dentro de FDM son muy amplios. En este trabajo vamos a analizar principalmente el porcentaje de relleno y el espesor de capa para el material PLA, además nos basaremos en estudios previos para considerar el tipo de malla más óptimo para dicho material. [14] De manera que vamos a tener diferentes configuraciones de probetas, variando el porcentaje de relleno del 75% al 100% y variando el espesor de capa con valores de 0.3mm, 0.24mm y 0.18mm. En apartados posteriores explicaremos el porqué de dichos valores.

Una vez definidas estas configuraciones procederemos a realizar la caracterización mecánica del material. Para realizar una correcta y completa caracterización mecánica vamos a realizar ensayos de tracción, compresión y cortante siguiendo las normativas europeas UNE-EN ISO 527-1, UNE-EN ISO 527-2, UNE 116005 para el ensayo de tracción, UNE-EN ISO 604 para el ensayo de compresión y finalmente debido a la inexistencia de una normativa europea que defina los ensayos a cortante para FDM utilizaremos la norma D 5379/D 5379 M. En dichas normas se definen forma, dimensiones y cantidad de probetas a ensayar, se describe perfectamente el procedimiento a seguir para realizar los ensayos y los cálculos a realizar.

Uno de los datos necesarios para realizar la caracterización mecánica es el cálculo de la deformación que sufre la pieza, normalmente se usa un extensómetro, pero en este caso vamos a utilizar el sistema DIC (Correlación Digital de Imágenes), el cual es un procedimiento no intrusivo que consiste en captar imágenes de la pieza durante el ensayo para posteriormente procesarlas con el programa Vic 2D y así poder calcular la deformación de la pieza.

Una vez tengamos los resultados de nuestros ensayos vamos a recopilar y analizar todos los datos para obtener conclusiones sobre las características mecánicas de la pieza en función de la variación de los parámetros de impresión citados anteriormente.

2. Estado del arte

La Impresión 3D es un proceso de fabricación que está en pleno auge, es por ello que es necesario investigar dicha tecnología.

En la actualidad se están realizando numerosas investigaciones que tienen como objetivo caracterizar los distintos materiales, debido a que se ha observado que al fundir el material se produce una variación de las propiedades mecánicas del material en comparación con las propiedades antes de fundirse.

En el presente trabajo nos vamos a enfocar en otro de los aspectos más importantes como son los parámetros de impresión, y es que se ha observado que en función de estos se pueden obtener mejores o peores acabados, mayor o menor resistencia mecánica, mayor o menor tiempo de producción, mayor adhesión entre capas y con ello una menor anisotropía, etc.

Para ello he realizado una caracterización mecánica del material PLA (Uno de los más utilizados en la industria de la Impresión 3D) a partir de la variación de parámetros como la densidad de relleno y espesor de capa. Además, me he basado en otros estudios para considerar el tipo de malla con mejores prestaciones para este tipo de material.

El proceso ha consistido en realizar la impresión de las probetas, las cuales han sido definidas por las normal UNE-EN ISO en forma, tamaño y cantidad, en el FAB LAB de la Universidad de Jaén. A continuación, hemos sometido dichas probetas a los ensayos de tracción, compresión y cortante basándonos en las normas UNE-EN ISO y en la normativa D5379/D 5379M para conseguir un estudio completo de dichas probetas.

Finalmente realizaremos un análisis de los datos obtenidos para saber con qué parámetros obtendremos unas prestaciones más óptimas.

2.1. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva (Additive Manufacturing, AM), se define, según el Comité Técnico ASTM F42 (The ASTM F42 Technical Committee) como un proceso de unión de materiales a partir de los datos de un modelo en 3D, normalmente capa por capa, en contraposición a las metodologías de fabricación sustractivas. Esto nos evita tener que utilizar moldes, herramientas de corte ,etc.[1]

Algunos de los procesos AM más conocidos son FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Estereolitografía), SLM (Selective Laser Melting), SLS (Selective laser sintering) y DLP (Digital light processing) entre otros. [1]

Dentro de las tecnologías de fabricación aditiva, la más conocida es la impresión mediante filamento o comúnmente conocida como impresión 3D, el cual consiste en la fabricación de piezas en 3D a partir de la deposición de filamentos capa por capa. [2]

Esta tecnología parte del diseño en 3D de la pieza a fabricar a partir del modelado en un software como puede ser Catia o Solidwork entre otros.

A continuación, se convierte el formato de CAD a STL (stereolithgraphy). Este formato define la geometría de los archivos 3D excluyendo información como color texturas o propiedades físicas. El formato utiliza una malla de triángulos cerrados para definir la forma del objeto. A partir de este formato se puede constituir la base para el cálculo de las capas necesarias para la fabricación del objeto [3].

Seguidamente usamos el software de impresión, en nuestro caso utilizamos CURA, en el cual podemos ajustar todos los parámetros de impresión, como velocidad de impresión, espesor de capa, temperatura de extrusión, tipo de malla, material a utilizar, etc. Finalmente obtenemos un archivo de G-Code que es el que finalmente interpreta la máquina 3D.

Una vez tengamos definido el formato G-Code la máquina comienza a imprimir. Este proceso está automatizado, pero es muy importante supervisarlos para comprobar que con los parámetros que hemos introducido se está realizando una correcta impresión de la pieza.

Una vez impresa la pieza procedemos a revisarla para ver si tiene defectos que nos puedan indicar que algunos de los parámetros de impresión no son los correctos.

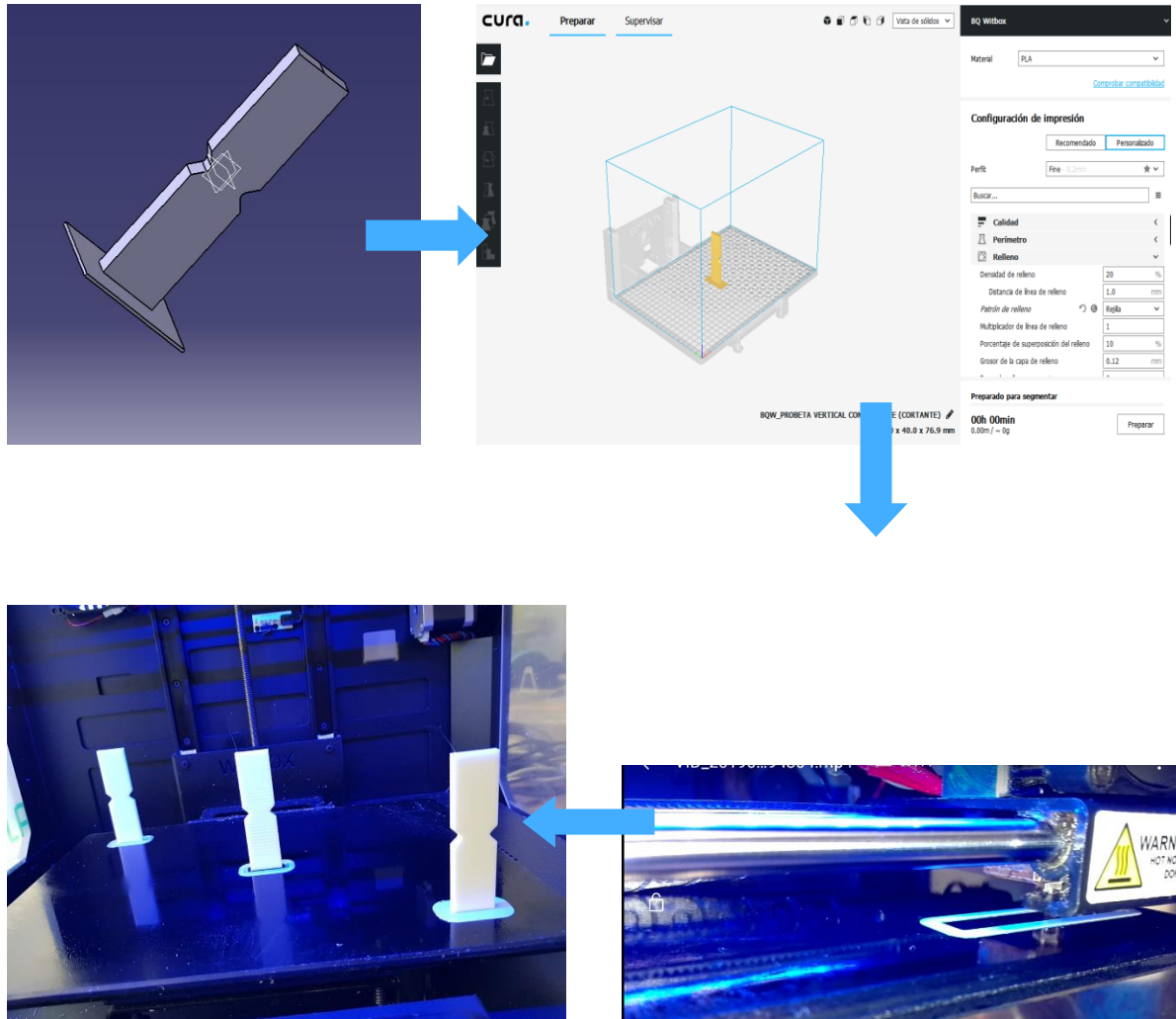


Figura 1 .Proceso de fabricación con Impresión 3D.

2.2. Procesos de fabricación AM.

Existen varios tipos de fabricación aditiva en función de la materia prima utilizada (Base líquida, base en polvo y base sólida) y la técnica utilizada para la deposición de capas. [4]

2.2.1. Base líquida

La pieza final se forma a partir de la solidificación de una resina líquida, la cual es un polímero orgánico sensible a la luz en una determinada longitud de onda (fotopolímero), el cual sufre un cambio en sus propiedades debido a la incisión de una luz ultravioleta. [5]

Existen varios tipos de tecnologías que utilizan el material en base líquida: SLA,DLP,MJM.

- SLA (Estereolitografía): Entre los componentes de una máquina estereolitográfica encontramos una bandeja de resina, una plataforma móvil (Eje Z), un sistema de raspado (Eje X), un láser UV, óptica de enfoque y un espejo galvanométrico (Ejes X e Y).

El láser UV barre la superficie de la resina líquida en función del modelo 3D digital, de manera que cura la resina fotopolimérica provocando así la solidificación de la misma. Una vez haya solidificado la primera capa la plataforma móvil desciende un nivel (en función del espesor de capa), de manera que la capa solidificada se cubre de nuevo con resina líquida y comienza la fabricación de la siguiente capa. [6]

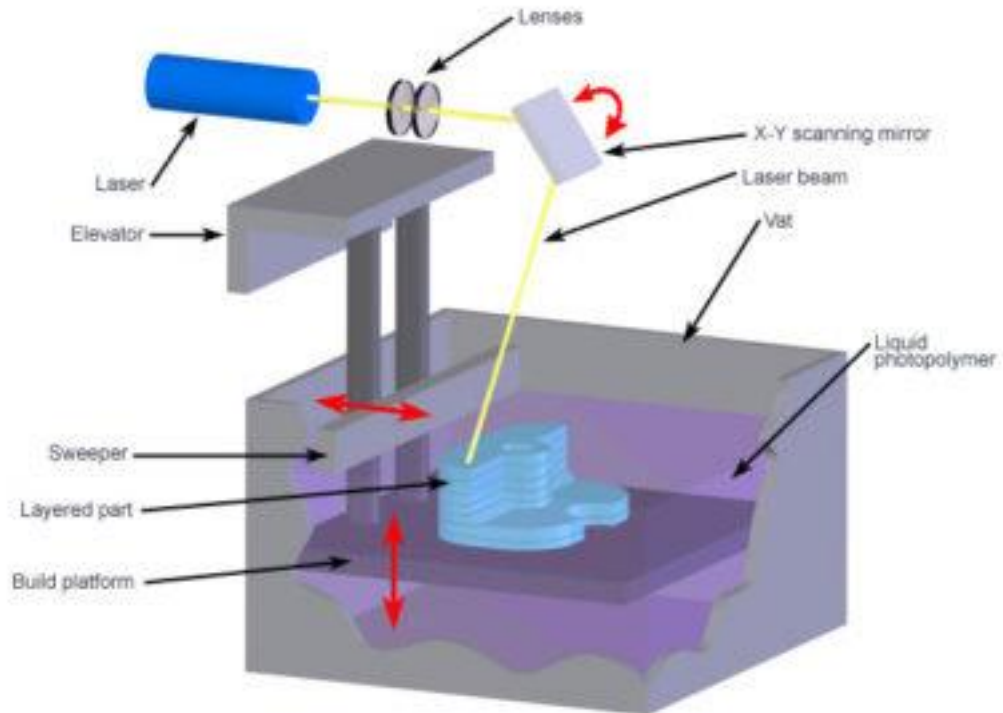


Figura 2. Esquema proceso SLA

- DLP (Digital Light Processing): Es una técnica similar al SLA, pero en este caso se sustituye la luz UV por una fuente de luz convencional (se utiliza una pantalla de proyector).

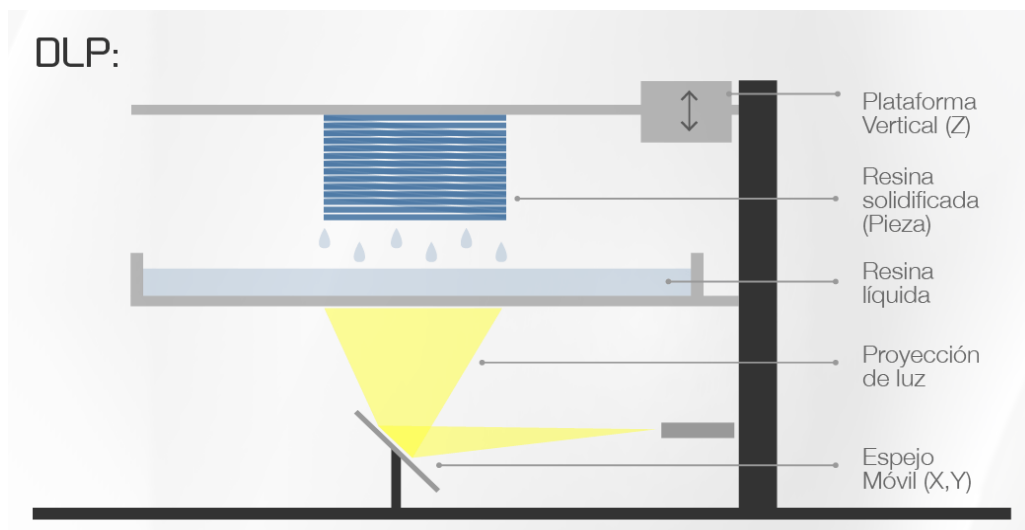


Figura 3 Esquema proceso DLP

- MJM(Multi-jet Modeling): Consiste en cuatro o más cabezas inyectoras de material fotopolímero y lámparas de luz UV. En este proceso la impresora trabaja de forma transversal, va depositando pequeñas gotas de fotopolímero que se solidifican al verse expuestas a la luz UV. El proceso se repite tantas veces como capas tenga la pieza. [7]

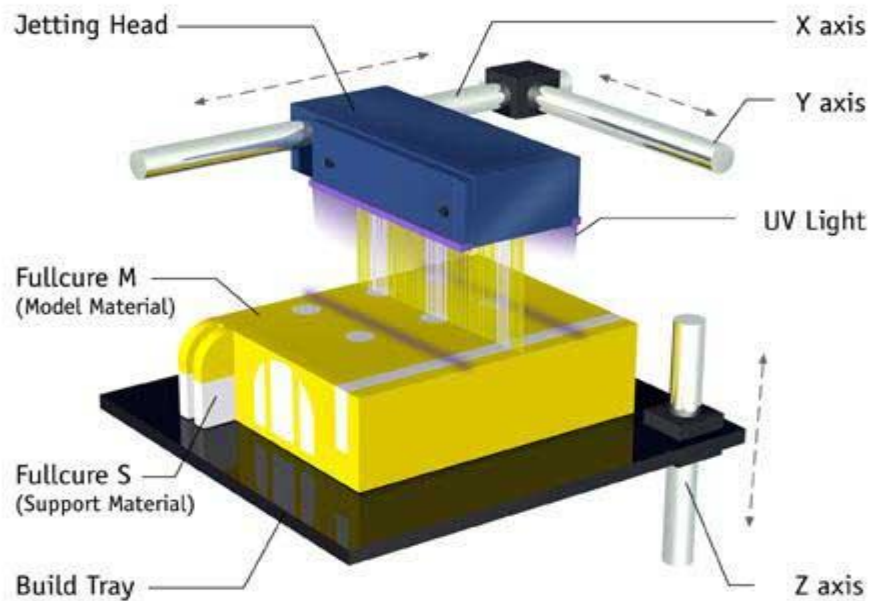


Figura 4. Esquema proceso MJM

2.2.2. Base en polvo

En este caso el material base es polvo. Este solidificará a partir de un aglutinante o por la fusión del mismo. Los materiales que podemos utilizar pueden ser cerámicos, polímeros y metales.

Una de las ventajas que tiene este proceso de fabricación es que no necesita material de soporte, pues el mismo polvo hace dicha función.

Existen varios sistemas que utilizan los sistemas de fabricación con el material en base polvo: SLS, DMLS, EBM, BI y LMD.

- SLS (Selective Laser Sintering): El sintetizado por láser permite imprimir objetos sin tener que recurrir a aglutinantes o a algún tipo de ensamble.

El proceso de impresión se realiza capa por capa a partir de material en forma de polvos, los cuales se encuentran en una cuba a una temperatura inferior a la de fusión del material.

Los materiales que se pueden utilizar son cerámicas, plástico o vidrio.

Además, las impresoras están equipadas con un brazo deslizante interior de metal que distribuye el material en polvo en la plataforma de impresión.

Finalmente se activa el láser de CO₂ que calienta el material a altas temperaturas y fusiona las partículas en polvo, provocando así el material en sólido [8][9].

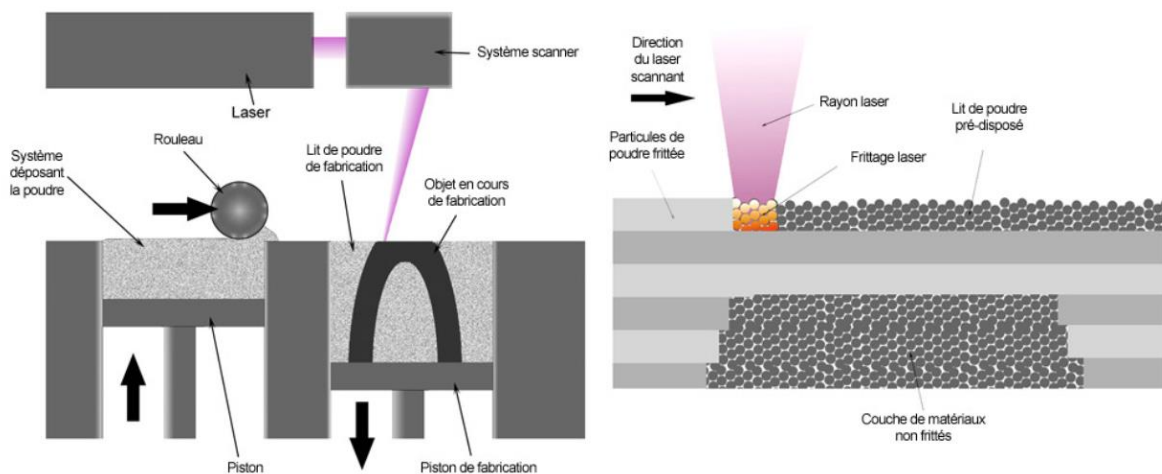


Figura 5. Esquema proceso SLS

- **DMLD (Direct Metal Laser Sintering):** La plataforma de estas máquinas, en la que se realiza la impresión, está compuesta de 2 recipientes, cada uno activado por un pistón. El primero es recubierto de polvo metálico mientras que el segundo se encuentra vacío y situado al nivel de la plataforma. El proceso de impresión empieza añadiendo una fina capa de polvo (de una altura máxima determinada por el software de la impresora) en el recipiente vacío. El láser de fibra óptica (del orden de 200/400

W) fusiona el polvo metálico. Una vez que la materia se consolida, una segunda capa de polvo es aplicada con la ayuda del sistema de pistones, y así sucesivamente hasta la creación completa de la pieza. [10]

En este caso el material que se utiliza es metal.

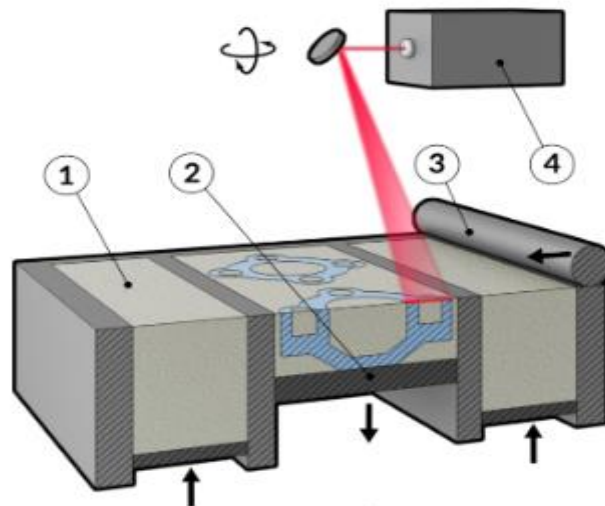


Figura 6. Esquema proceso DMLD

- EBM (Electron Beam Melting): El proceso de fabricación por haz de electrones es igual que los procesos SLS y DMLS, a diferencia de que en este caso la fusión del material se realiza mediante un haz de electrones en vez de un láser [11].

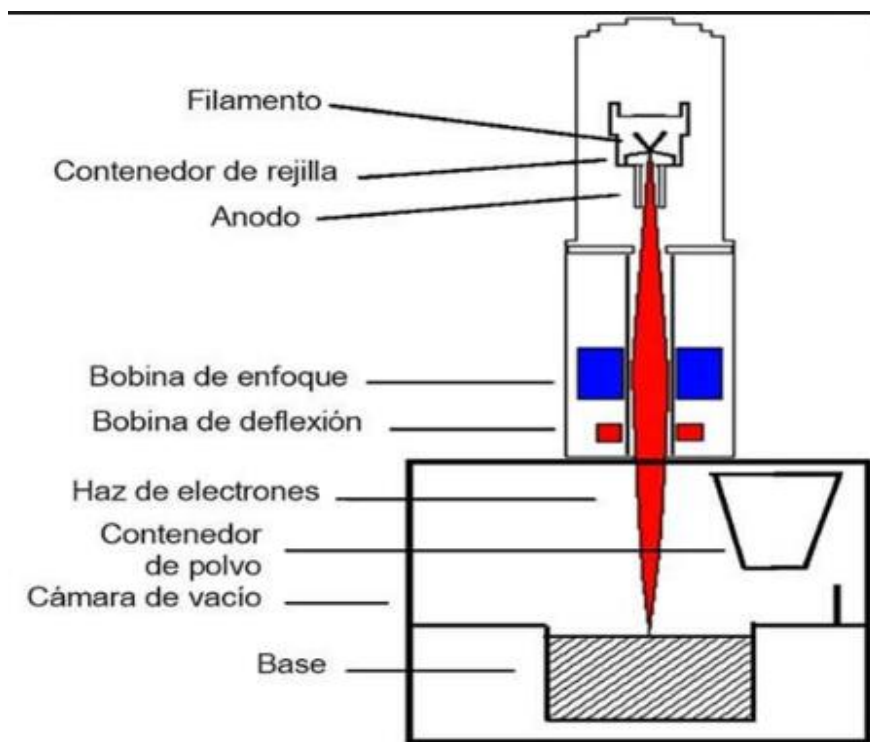


Figura 7. Esquema proceso EBM

- BI (Binder Jetting): En este caso vamos a utilizar un material base en polvo con un aglutinante líquido. El cabezal de la impresora se desplaza horizontalmente y extruye alternativamente material de construcción y de adhesión.

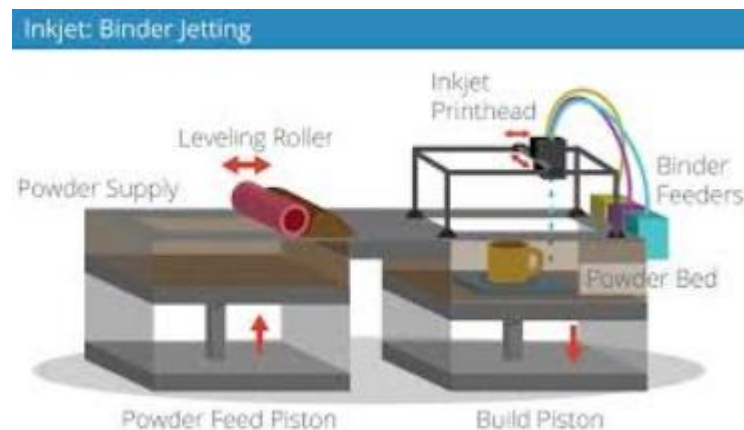


Figura 8. Esquema proceso BI

- LMD (Laser Metal Deposition): El proceso LMD consiste en utilizar un láser cladding (láser de fibra o láser de diodo) y adicionamos polvo metálico en suspensión, que a diferencia del sistema DMLS se encuentra en un depósito. Este polvo metálico se adiciona sobre el haz láser provocando la fusión del mismo.

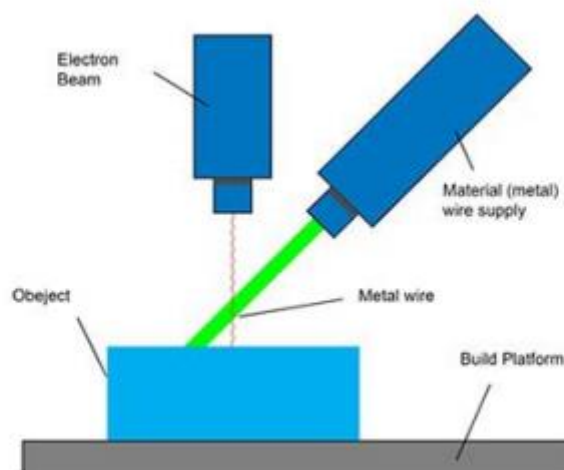


Figura 9. Esquema proceso LMD

2.2.3 Base sólida

En este caso el material utilizado son láminas sólidas o un material sólido.

Los sistemas de fabricación con base sólida con LOM y FDM.

- LOM (Laminated Object Manufacturing): La pieza se fabrica mediante la unión de un conjunto de láminas, las cuales se mecanizan posteriormente con un sistema de cuchillas o por láser. Estas láminas están unidas entre sí mediante un papel adhesivo.

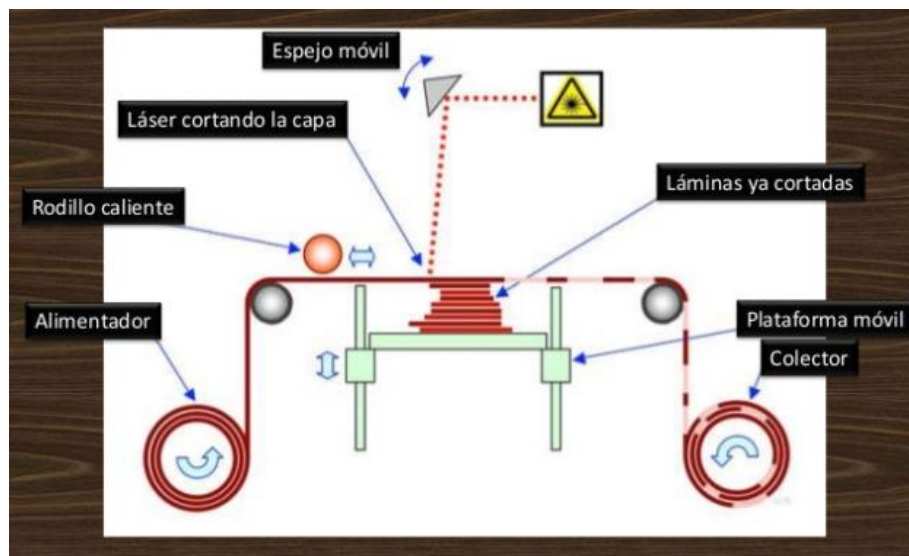


Figura 10. Esquema proceso LOM

- FDM (Fused Deposition Modeling): Es uno de los procesos de fabricación AM más utilizados y con mayor auge hoy en día. El proceso consiste en calentar un cabezal (extrusor), el cual es alimentado con un polímero, de manera que el polímero se funde y a su vez el extrusor deposita el polímero sobre una plataforma para generar una pieza en 3D capa a capa.

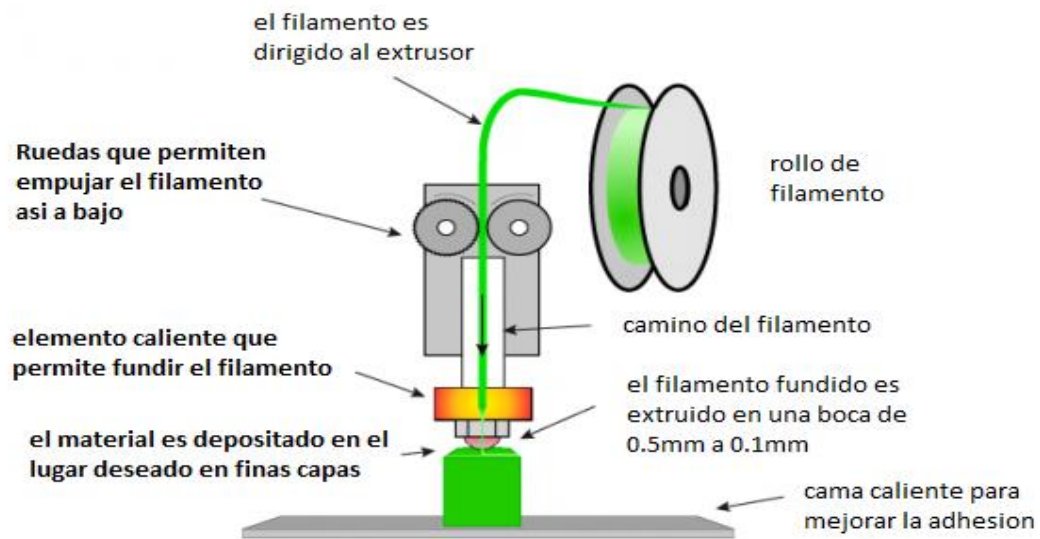


Figura 11. Esquema proceso FDM

2.3 Caracterización del Modelado por Deposición Fundida (FDM)

En los últimos años el proceso de FDM está en pleno auge. Esto se debe a la expiración de la protección de la patente, lo que hizo que esta se pudiera investigar, desarrollar y comercializar.

En la actualidad se están haciendo numerosos estudios acerca de este tipo de tecnología. Por un lado, se estudian los materiales que se pueden utilizar, y por otra parte se investiga sobre el desarrollo de nuevos materiales que ofrezcan diferentes prestaciones.

La Universidad de Tel Aviv ha desarrollado el primer prototipo del mundo de un corazón impreso con 3D a partir de tejido humano, lo que permite pensar que en un futuro se puedan generar órganos mediante este proceso de fabricación [12].

Desde el punto de vista industrial se buscan materiales con mejores propiedades mecánicas. Este tipo de estudios son muy importantes pues se ha demostrado que los materiales cambian sus propiedades tras el proceso de extrusión, ya que estos se funden.

Los materiales más utilizados son el ABS y el PLA, existiendo infinidad de materiales que se usan en menor medida ya sea por el precio o por la propia demanda que estos generan. Los nuevos materiales se pueden generar añadiendo aditivos, considerando este como un material que va disperso físicamente en la matriz polimérica sin afectar a la estructura molecular y generando así modificaciones en las propiedades del material base.

Por otro lado, se investiga mucho sobre los parámetros de impresión como pueden ser el espesor de capa, temperatura de impresión, velocidad de impresión, tipo de mallado, etc. pues se ha demostrado que en función de estos parámetros podemos obtener mejores o peores propiedades mecánicas en la pieza final. [13]

2.4 Parámetros de impresión.

En este apartado vamos a definir algunos de los parámetros de impresión de FDM. Estos son de vital importancia pues modificándolos podemos obtener unas mejores prestaciones, tanto desde el punto de vista de las propiedades mecánicas como desde el punto de vista del propio proceso de fabricación, ya sea por ahorro de material, tiempo, mano de obra, etc.

- En primer lugar, vamos a hablar de la adhesión entre capas. Para ello tenemos que recordar que este proceso de fabricación se realiza capa a capa.
Para tener una mejor adherencia es necesario una mayor unión entre los hilos de diferentes capas, es por ello que tenemos que hablar del Air Gap.
El Air Gap es el espacio existente entre dos filamentos contiguos, de manera que si tenemos un Air Gap positivo quiere decir que los hilos no están en contacto entre sí, es decir, tendremos una adherencia nula, lo que nos genera una mala resistencia a tracción en esa dirección. Sin embargo, un Air Gap negativo quiere decir que los hilos están en contacto entre sí, obteniendo así una mayor resistencia a tracción. Por lo tanto, nos interesa tener un Air Gap negativo.



Figura 12. Air gap

Uno de los principales parámetros que determinan la adherencia entre hilos son la energía térmica de los mismos y las cadenas poliméricas de cada uno de estos. De manera que los hilos que se encuentran en una misma capa tendrán una mayor adherencia que los hilos que se encuentran en diferentes capas, debido a que al imprimir hilos en una misma capa la diferencia de temperatura entre ellos será menor, y la energía térmica de los mismos será mayor que si comparamos

hilos que se encuentran en diferentes capas, pues el tiempo de impresión entre capa y capa será mayor que entre dos hilos que se encuentren en una misma capa, lo cual produce un enfriamiento del hilo de la capa inferior, dando lugar a una peor adherencia entre capas.

Es por todo esto que parámetros como la velocidad de impresión son muy importantes. Se puede pensar que tendremos que imprimir con una velocidad de impresión muy alta para mejorar la adherencia, pero veremos como velocidades de impresión muy altas generan peores acabados en las piezas.

La calidad de estas uniones depende de la formación del cuello en la unión.

- Otro de los parámetros de impresión más importantes es la dirección de extrusión, ya que la resistencia mecánica de la pieza será mayor en la dirección de extrusión, puesto que esta está formada por el propio hilo, sin embargo, en las otras dos direcciones tendremos unas propiedades mecánicas peores ya que en estas dependemos de la unión entre diferentes hilos, en cuyo caso las propiedades dependen del cuello de la unión, del Air Gap, etc.

Por lo tanto, debemos de saber que una pieza fabricada con impresión 3D nos va a ofrecer mejores propiedades en la dirección de impresión, mientras que el eje Z (la dirección en la que se encuentran las diferentes capas), es el eje que presenta una mayor anisotropía, principalmente por la mala adherencia que hay entre hilos de diferentes capas.

Es por esto que podemos concluir que en las piezas obtenidas mediante impresión 3D tendremos anisotropía, pues las propiedades variarán de una dirección a otra [14]

- Relleno: Cuando hablamos del relleno de la pieza podemos distinguir dos conceptos, por un lado, tenemos el porcentaje de relleno, y por otro lado el tipo de mallado. Podemos decir que a mayor porcentaje de relleno tendremos una mayor resistencia de la pieza, pero utilizaremos más material y la pieza será más pesada. Por otro lado, dependiendo del tipo de malla podremos obtener mejores o peores propiedades mecánicas. Las propiedades que ofrece cada malla dependen también del tipo de material. Se han realizado algunos estudios en los que comparamos ABS y PLA para 5 tipos de mallados diferentes, dentro de los cuales encontramos malla cuadrada, poligonal, diagonal, circular y romboidal [15]

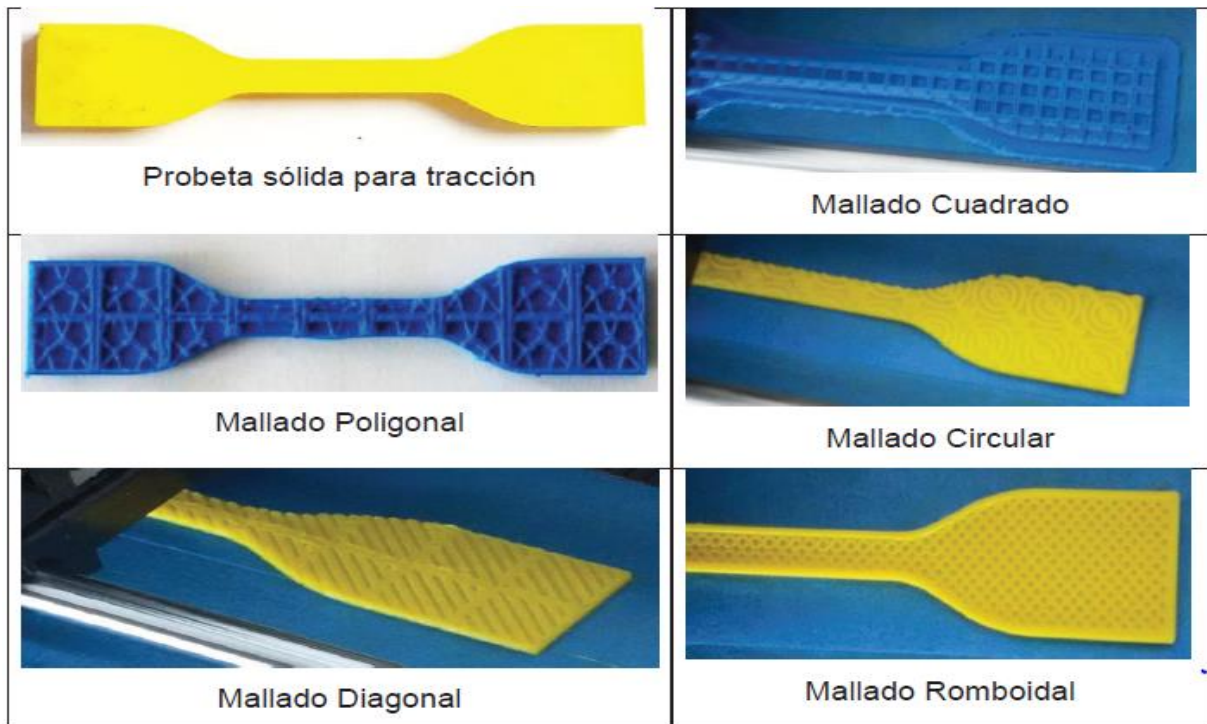


Figura 13. Mallados para PLA y ABS

Se concluye que en el caso del material ABS el tipo de malla cuadrada es la más resistente a tracción y a la fluencia en relación con el resto de mallados, si los comparamos con la relación resistencia-peso, puesto que el relleno del 100% sigue siendo el que tiene una mayor resistencia a tracción, pero su peso es mayor.

Por otro lado, tenemos el caso de la malla romboidal, la cual se caracteriza por tener el menor peso, por lo que puede ser útil para aplicaciones aerodinámicas, en partes de vehículos o aplicaciones similares.

Por otra parte, podemos concluir que en el caso del ABS la resistencia a tracción y a fluencia no depende de la masa, si no que depende del tipo de mallado, tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla. [16]

	CARACTERIZACIÓN DE ABS SEMIRÍGIDOS				
	Pruebas Mecánicas		Datos de Impresión 3D		
Tipo de Configuración	Resistencia a la Fluencia [Mpa]	Resistencia a la Flexión [Mpa]	Masa [g]	Resistencia a la fluencia Fluencia/Masa [Mpa/g]	Resistencia a la Flexión/Masa [Mpa/g]
	35,1	33,67	3,85	9,117	8,745
	30,7	31,30	3,48	8,822	8,994
	28,6	29,60	3,57	8,011	8,291
	27,0	29,30	3,70	7,297	7,919
	28,9	31,50	3,62	7,983	8,702
	22,5	27,50	3,59	6,267	7,660

Figura 14. Propiedades para diferentes mallados ABS

Para el PLA podemos ver que la masa sí es importante, puesto que la mayor resistencia, exceptuando el relleno 100%, sería para un tipo de malla diagonal, pero cuando dividimos por la masa vemos que la mejor relación resistencia/masa es para el caso de la malla circular. [17].

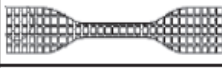
	CARACTERIZACIÓN DE PLA SEMIRÍGIDOS				
	ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)				
Tipo de Configuración	Resistencia a la Fluencia [Mpa]	Resistencia a la Flexión [Mpa]	Masa [g]	Resistencia a la fluencia Fluencia/Masa [Mpa/g]	Resistencia a la Flexión/Masa [Mpa/g]
	57,0	73,32	6,73	8,470	10,895
	41,2	65,50	6,02	6,844	10,880
	40,1	61,78	5,77	6,950	10,707
	46,6	68,80	6,31	7,385	10,903
	44,2	67,90	5,55	7,964	12,234
	36,4	58,50	5,13	7,096	11,404

Figura 15. Propiedades para diferentes mallados PLA

- Espesor de capa: Este es uno de los parámetros que será objeto de estudio en el presente trabajo. Aun así, hay estudios que nos permiten obtener algunas ideas. En primer lugar, sabemos que si tenemos espesores de capa mayores el tiempo de impresión de una de las capas del objeto será mayor, esto hace que se produzca un mayor enfriamiento entre capas logrando así una peor cohesión entre capas. Sin embargo, para espesores de capa más finos el tiempo de impresión de una capa será menor, pero también será menor el tiempo que el hilo necesita para enfriarse. Una de las opciones por las que podríamos optar sería el de aumentar la velocidad de impresión, pero esto supondría un peor acabado de la pieza. Actualmente se aconseja imprimir con espesores de capa que se encuentren entre el 40% y el 80% del diámetro del extrusor. [17]

Por un lado, sabemos que tenemos que mantener el espesor de capa por debajo del 80% del diámetro del extrusor, esto se debe principalmente a que si superamos dicho valor las capas dejarán de adherirse adecuadamente entre sí, porque la boquilla ya no está haciendo presión con la capa actual sobre la capa inferior [18]

Por otro lado, tenemos que el espesor de capa debe ser superior al 40%, esto se debe a que el cabezal del extrusor se encuentra a una temperatura elevada, de manera que el extrusor, que se encuentra muy cerca de la pieza impresa, deforma térmicamente la superficie de la misma [18]

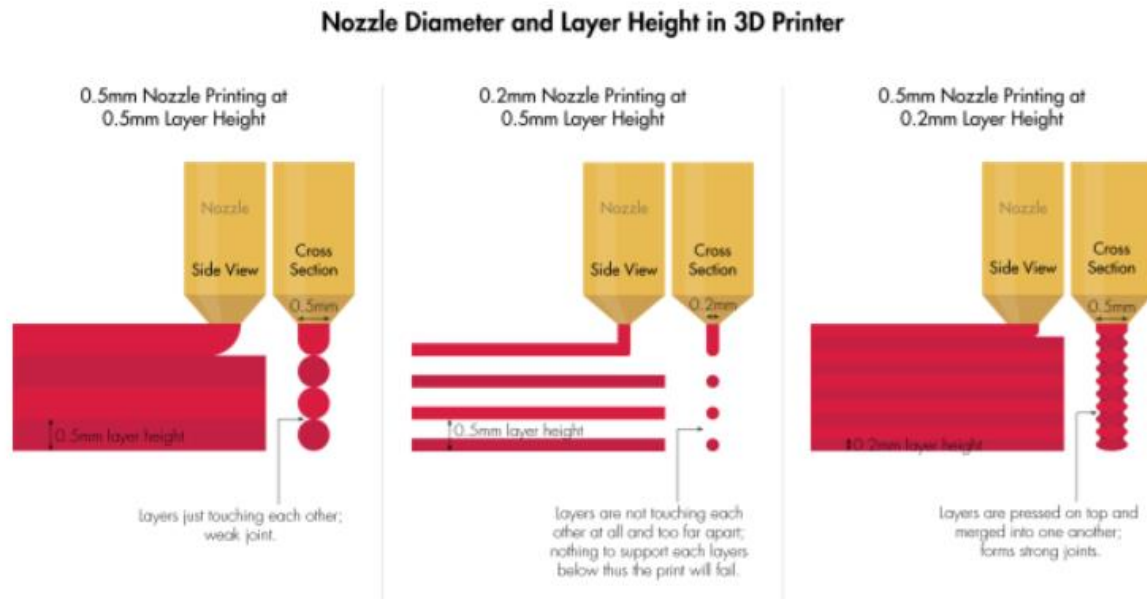


Figura 16. Espesores de capa

Otro aspecto que debemos de tener en cuenta para el espesor de capa es que cuando tenemos piezas con curvas un menor espesor de capa nos ayuda a disminuir el llamado efecto escalón.

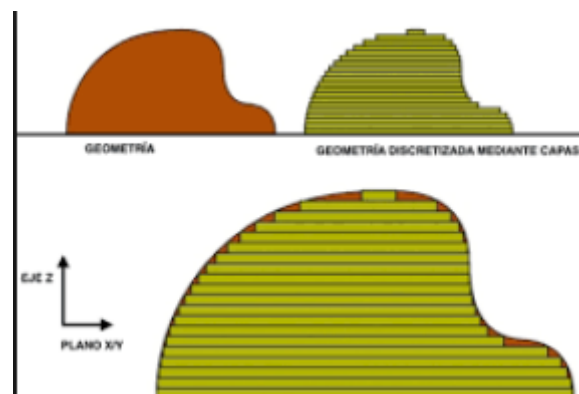


Figura 17. Efecto Talón

2.5 Aplicación de la tecnología FDM

En el inicio del desarrollo de la Impresión 3D no se esperaba que esta tecnología tuviera la importancia que tiene y puede llegar a tener en la industria.

Inicialmente se pensó como una tecnología para realizar prototipados rápidos, pero con el tiempo se está demostrando que permite fabricar piezas más rápido, piezas más complejas, mayor aprovechamiento del material, permite hacer variaciones en el diseño, etc.

Es por ello que esta tecnología está llegando a muchos sectores, entre ellos tenemos:

- Sector medicina:

En el sector de la medicina tenemos dos grandes vertientes.

Por un lado, tenemos el desarrollo de prótesis 3D, ya que la Impresión 3D ofrece poder realizar una personalización de las mismas. Esto ha tenido especial relevancia en zonas de conflicto. [19].

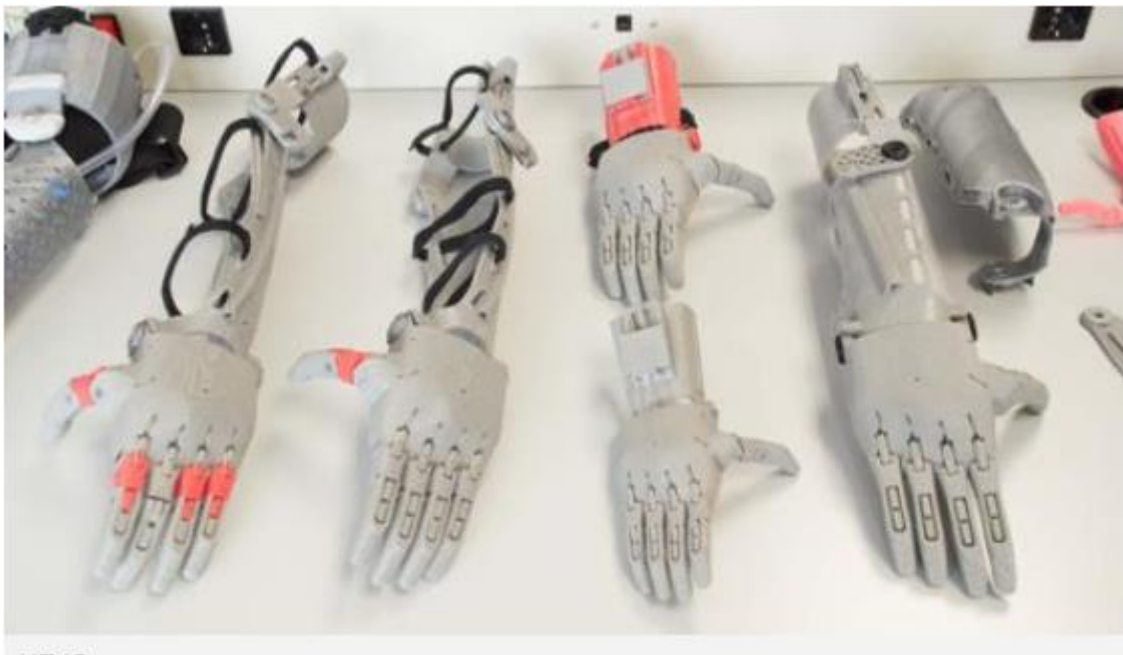


Figura 18. Prótesis mecánicas hechas con Impresión 3D

Otra de las vertientes es la reproducción de órganos mediante la bioimpresión, la primera gran hazaña se hizo en 1999 cuando se logró reproducir el primer hígado humano con impresión 3D. [20].

Actualmente se puede reproducir piel, vasos sanguíneos y diversos órganos. [21]

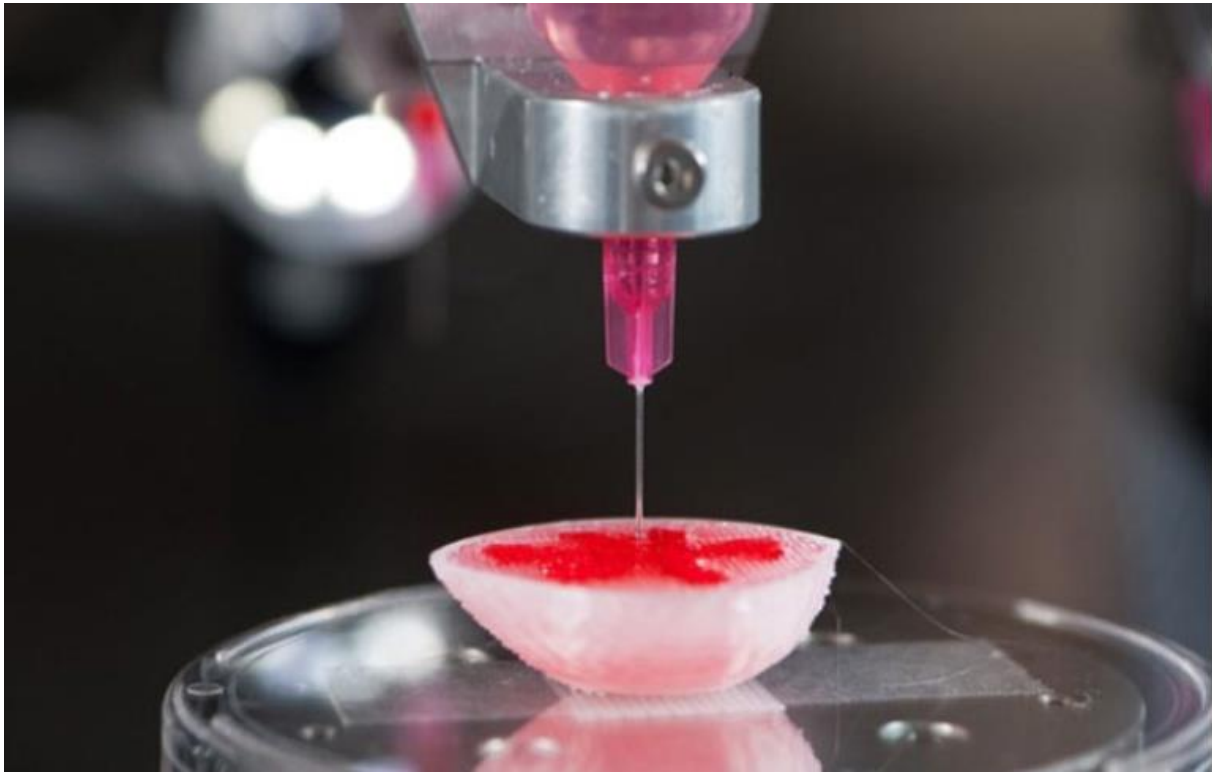


Figura 19. Bioimpresión

- Sector transportes

En este sector lo que se busca es ahorrar tiempo y costes.

Local Motors, es una de las startups que más ha destacado dentro de la industria 3D. Todo comenzó con un proyecto para imprimir en 3D piezas de un coche y ensamblarlas lo más rápidamente posible, así es como se le dio vida a Strati, uno de los primeros vehículos impresos en 3D en 2014.

La estructura del vehículo fue impresa en 44 horas gracias a la máquina creada por Cincinnati Incorporated que se basa en el proceso de deposición de material fundido. Los asientos del coche son retractables y hay posibilidades de convertirlo en descapotable. Todo ha sido creado con fabricación aditiva, excepto el motor que le pertenece a un Twizy de la marca Renault. [22]



Figura 20. Strati

Otro de los proyectos más importantes de Local Motor es el desarrollo de un mini bus fabricado mediante impresión 3D.

El proceso de impresión utilizado se llama BAAM (Big Area Additive Manufacturing) y fue desarrollado por Local Motors en el National Harbor Lab. En donde ha podido imprimir objetos a gran escala de manera muy rápida. [23]



Figura 21. Big Área Additive Manufacturing

- Arquitectura:

En el sector de la arquitectura se ha visto gran potencial puesto que permite fabricar prototipos muy precisos y en poco tiempo.

En 2017, la empresa rusa Apis Cor presentó su primera casa impresa en 3D en sólo 24 horas. Una hazaña en el sector de la arquitectura, realizada por un brazo desmontable capaz de extruir hormigón. [24]



Figura 22. Casa fabricada con Impresión 3D

- Sector industrial:

Una de los sectores en los que más se ha desarrollado esta tecnología es en el sector industrial donde se fabrican desde prototipos de piezas, piezas originales para todo tipo de maquinaria, cadenas de producción en serie, etc.

2.6 Correlación digital de imágenes

La correlación digital de imágenes (DIC) es un método óptico no intrusivo en el que se adquieren imágenes de un sólido que experimenta una deformación, posteriormente se analizan esas imágenes para obtener la deformación.

En concreto las imágenes se toman de la muestra, la cual ha sido pintada con un patrón, el cual consiste en pintar inicialmente las probetas de blanco, aproximadamente media hora antes de realizar el ensayo, y posteriormente se le hace un moteado en color negro con el objetivo de generar el mayor contraste posible, de manera que los cambios de posición que experimenta el moteado permite la medición de desplazamiento y deformaciones mediante la comparación entre la pieza deformada y la pieza sin deformar. De manera que para calcular la deformación que ha sufrido la pieza tomaremos dos puntos de referencia y calcularemos el incremento de longitud que hay entre dichos puntos, obteniendo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Esta técnica se puede utilizar para medir deformaciones en 2D y en 3D.

3. Objetivos del trabajo

La impresión 3D es una tecnología de fabricación que se encuentra en pleno desarrollo y cada vez con más aplicaciones. En nuestra Universidad disponemos de un laboratorio para el desarrollo, fabricación y validación de prototipos y nuevos productos (FAB-LAB).

Para el análisis del comportamiento mecánico de estos productos es necesario conocer la curva tensión-deformación del material, lo cual se obtiene mediante un programa de caracterización mecánica. La singularidad de estas piezas y prototipos es que el método de fabricación introduce ortotropía en el material resultante, de manera que las propiedades mecánicas no son las mismas en todas las direcciones.

En el presente Trabajo Fin de Grado se propone realizar una caracterización mecánica detallada de piezas obtenidas mediante impresión 3D, mediante un programa experimental en el que se ensayen piezas según las tres direcciones principales del problema, de distintos materiales e impresas modificando algunos de los parámetros de impresión (relleno, ángulo de malla.). La obtención de la deformación en la pieza se realizará mediante la técnica de correlación digital de imágenes DIC, que permite la obtención de mapas completos de deformación de la superficie objeto de estudio.

Los ensayos se diseñarán acordes a la normativa aplicable. En el análisis de los resultados se buscará cuantificar la influencia de determinados parámetros de la impresión en las propiedades mecánicas de la pieza. El trabajo se plantea en colaboración con el FAB-LAB con el fin de analizar los materiales y procesos de impresión comúnmente empleados por este laboratorio, y contrastar los resultados con los aportados inicialmente por los proveedores.

El trabajo supone, por tanto, un completo programa experimental que abarca desde el diseño de ensayos y la preparación de muestras, la ejecución en sí de los ensayos y el posterior análisis de los resultados y redacción de conclusiones. El alumno adquirirá importantes conocimientos sobre caracterización mecánica, métodos de correlación digital de imágenes e impresión 3D.

Dentro de los objetivos del trabajo tenemos:

- Aprender a diseñar y realizar un programa experimental de caracterización mecánica de materiales, partiendo de la normativa existente, establecer número y geometría de las muestras, metodología de ensayo, adquisición de datos, procesamiento de resultados y valoración del error cometido.
- Analizar el proceso de fabricación mediante impresión 3D, materiales empleados, parámetros a ajustar y cómo repercuten en la ortotropía del material resultante.
- Conocer y aplicar adecuadamente el método experimental para análisis de

deformaciones denominado Correlación digital de imágenes (DIC), sus principios, opciones, potencial y limitaciones.

4. Programa experimental

4.1 Descripción del estudio.

El objetivo de nuestro TFG es lograr una caracterización mecánica de una pieza fabricada con impresión 3D a partir de la modificación de distintos parámetros de impresión. En nuestro caso vamos a tener en cuenta parámetros como espesor de capa y porcentaje de relleno. Hay otros parámetros como pueden ser el tipo de malla o el tipo de material que ya han sido estudiados y sobre estos nos apoyaremos en el trabajo.

Con el objetivo de conseguir un estudio completo vamos a realizar ensayos de tracción, compresión y cortante, para ello vamos a basarnos en las normas UNE- EN ISO, para los ensayos de tracción y compresión, y para el caso del ensayo a cortante nos encontramos con que no tenemos una normativa española que lo defina, es por ello que utilizaremos la norma D 5379/D 5379M.

En nuestro caso solo vamos a utilizar el material PLA. Este material es un filamento biodegradable y sin contracción térmica, lo cual nos permite evitar defectos de impresión como el warping y nos evita tener que utilizar cama caliente en el proceso de impresión, además se consiguen buenos acabados.

4.2 Impresión de las probetas

Para la impresión de las probetas vamos a utilizar la impresora BQ WithBox, la cual es compatible con el tipo de material que vamos a utilizar. La impresión la vamos a realizar en el FAB LAB de la Universidad de Jaén.



Figura 23 Impresora BQ WITBOX

Las principales características de estas impresoras son:

- Velocidad de impresión máxima de 200mm/s
- Resolución de capa hasta 20 micras

- Volumen de impresión: 297 x 210 x 200 mm
- Los materiales que se pueden utilizar son filamentos de PLA, madera, bronce y Filaflex
- Software recomendado: Cura

En nuestro caso son muy importantes los parámetros de impresión, a continuación, definiremos los utilizados para cada ensayo, tipo de probeta y dirección de impresión de probeta.

La mayoría de los parámetros permanece constante, exceptuando el porcentaje de relleno, espesor de capa, velocidad de impresión, velocidad de relleno, líneas de rejilla y número de capas totales.

A continuación, reflejaremos los parámetros generales y después especificaremos los que se han modificado en cada caso.

Calidad	
Altura de capa	0.18 mm
Altura de capa inicial	0.24 mm
Ancho de línea	0.1 mm
Ancho de línea de pared	0.1 mm
Ancho de línea de la pared exterior	0.1 mm
Ancho de línea d...d(es) interna(s)	0.1 mm
Ancho de línea superior/inferior	0.1 mm
Ancho de línea de relleno	0.1 mm

En el submenú de calidad podemos definir la altura de capa que vamos a utilizar, en nuestro caso vamos a realizar ensayos con el 45%, 60% y 75% del diámetro del extrusor.

Siempre vamos a poner una diferencia de 0,06mm en la capa inicial respecto al resto de capas.

En cuanto al ancho de línea son funciones que establece el programa y que van en función del espesor de capa

Perímetro	
Grosor de la pared	1 mm
Recuento de líneas de pared	10
Grosor superior/inferior	1 mm

Relleno	
Densidad de relleno	20 %
Distancia de línea de relleno	1.0 mm
Patrón de relleno	Rejilla
Multiplicador de línea de relleno	1
Porcentaje de superposición del relleno	10 %
Grosor de la capa de relleno	0.18 mm

En cuanto al relleno podemos definir la densidad de relleno, contemplaremos un 75% y un 100%.

Por otra parte, podemos definir el tipo de malla, tal y como hemos deducido en apartados anteriores utilizaremos el patrón de rejilla.

El grosor de la capa de relleno se corresponde con el espesor de la capa.

Por lo tanto, podemos concluir que tendremos 6 configuraciones de impresión.

Para nuestro caso, en el que vamos a centrarnos en el espesor de capa y en el porcentaje de relleno tendremos las siguientes configuraciones:

- Relleno del 100% y una altura de capa del 60% (Esta será la muestra que utilizaremos como base)
- Relleno del 100% y una altura de capa del 45%
- Relleno del 100% y una altura de capa del 75%
- Relleno del 75% y una altura de capa del 60%
- Relleno del 75% y una altura de capa del 45%
- Relleno del 75% y una altura de capa del 75%

Como ya citaremos en los apartados posteriores veremos como para el ensayo de tracción necesitamos 90 probetas, para el ensayo de cortante necesitamos 90 probetas y para el ensayo de compresión necesitamos 60 probetas, es decir, tendremos que imprimir un total de 240 probetas.

Material	
Temperatura de impresión	200 °C
Temperatura de impr... de la capa inicial	200 °C
Temperatura de impresión inicial	190 °C
Temperatura de impresión final	185 °C
Habilitar la retracción	☒

La temperatura de impresión es importante para lograr una correcta fundición del material base.

Velocidad	
Velocidad de impresión	40 mm/s
Velocidad de relleno	40 mm/s
Velocidad de pared	20.0 mm/s
Velocidad de pared exterior	20.0 mm/s
Velocidad de pared interior	40.0 mm/s
Velocidad superior/inferior	20.0 mm/s

La velocidad de impresión para un mismo tipo de probeta ha permanecido constante, sin embargo, cuando hemos modificado la dirección de impresión hemos tenido que modificar dicha velocidad, principalmente hemos tenido problemas con la impresión de probetas en la posición vertical, puesto que a las velocidades de impresión a las que trabajábamos obteníamos un acabado malo y al desarrollar el mallado interno se provocaba un excesivo desplazamiento de la capa perimetral.

Otro de los factores que tuvimos que modificar fue el modo de impresión de las probetas, para el caso de relleno 100% imprimíamos primero la capa perimetral y después de hacía el relleno, pero cuando hemos realizado el relleno del 75%, siguiendo este mismo procedimiento se producía un aplastamiento de la malla interna de la probeta, de manera que no se garantizaba que finalmente el relleno fuera del 75%, es por ello que para este último caso hacíamos en primer lugar el relleno(la malla) y en segundo lugar realizábamos la capa perimetral.

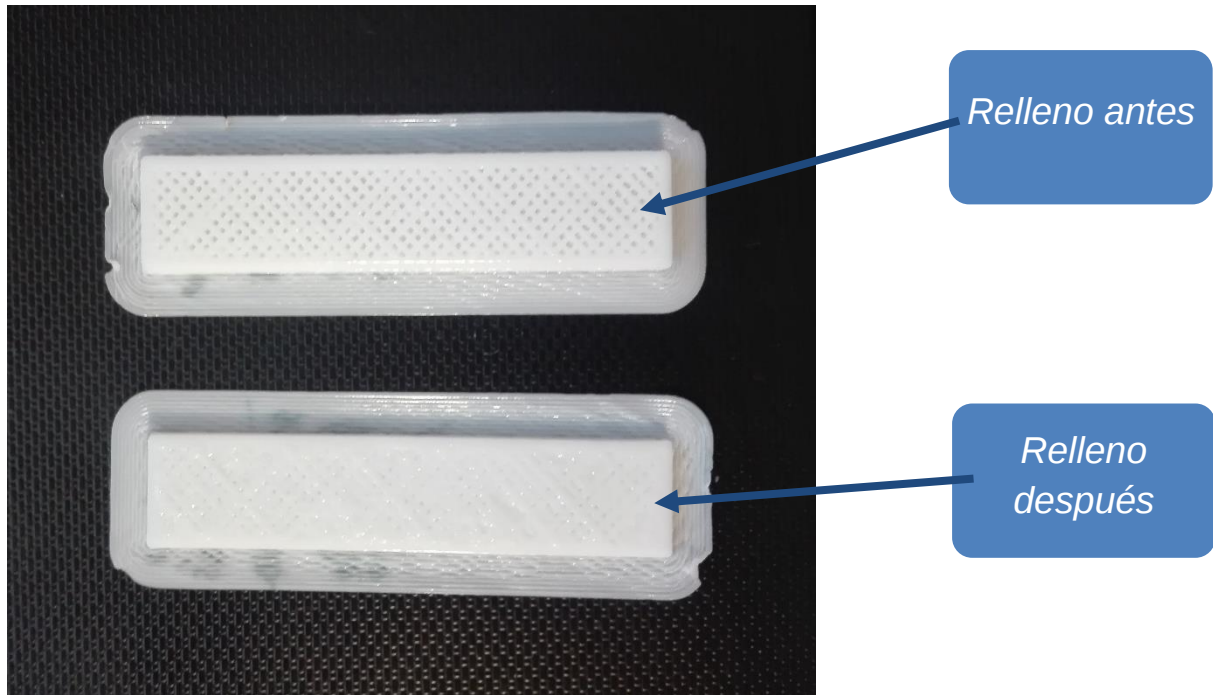
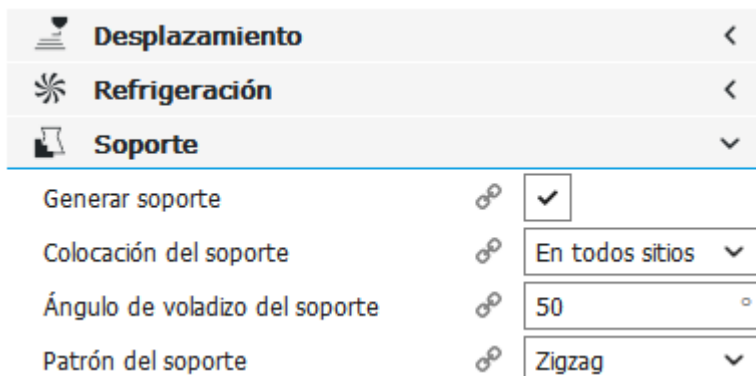


Figura 24. Relleno



En un principio vimos la posibilidad de generar un soporte para imprimir las partes en voladizo de las probetas impresas en la dirección vertical pero finalmente no fue necesario.

→ Ensayo de tracción:

- ✓ Posición vertical (Representada por a)
- ✓ Posición horizontal (Representada por b)
- ✓ Posición de canto (Representa por c)

a)			b)				c)		
velocidad de relleno (mm/s)	velocidad de impresión (mm/s)	líneas de pared	velocidad de relleno (mm/s)	velocidad de impresión (mm/s)	líneas de pared	Capas con rejilla/capas totales	velocidad de relleno (mm/s)	velocidad de impresión (mm/s)	líneas de pared
15	20	1	67	40	1	-	15	20	1
15	20	1	67	40	1	-	15	20	1
15	20	1	67	40	1	-	15	20	1
15	20	1	20	40	1	5/9	15	20	1
15	20	1	20	40	1	6/12.	15	20	1
15	20	1	20	40	1	5/7	15	20	1

Tabla 1 Velocidades de impresión de las probetas de tracción

Tal y como podemos ver para las probetas verticales y de canto utilizamos velocidades de impresión y de relleno más bajas para asegurar una correcta impresión y un buen acabado.

Sin embargo, las probetas impresas en posición horizontal nos permitieron velocidades de impresión mayores.

Como podemos ver el número de capas varía ya que hemos variado el espesor de las capas.

→ Ensayo de cortante

- ✓ Posición vertical (Representada por a)
- ✓ Posición horizontal (Representada por b)
- ✓ Posición de canto (Representa por c)

a)			b)			c)		
velocidad de relleno (mm/s)	velocidad de pared (mm/s)	líneas de pared	velocidad de relleno (mm/s)	velocidad de pared (mm/s)	líneas de pared	velocidad de relleno (mm/s)	velocidad de pared (mm/s)	líneas de pared
15	20	2	67	40	2	15	20	2
15	20	2	67	40	2	15	20	2
15	20	2	67	40	2	15	20	2
15	20	2	20	40	2	15	20	2
15	20	2	20	40	2	15	20	2
15	20	2	20	40	2	15	20	2

Tabla 2 Velocidades de impresión de las probetas de cortante

→ Ensayo de compresión

- ✓ Posición horizontal

velocidad de relleno (mm/s)	velocidad de pared (mm/s)	líneas de pared
67	40	2
67	40	2
67	40	2
20	40	2
20	40	2
20	40	2

Tabla 3 Velocidades de impresión de las probetas de compresión

En este caso solo tenemos que imprimir en una sola dirección.

4.2 Ensayo a tracción

Para el ensayo a tracción vamos a utilizar las normas UNE-EN ISO 527-1, UNE-EN ISO 527-2 y la norma UNE 116005.

1º) En primer lugar vamos a definir las dimensiones y forma de las probetas, para ello nos vamos a la norma UNE 116005.

En dicha norma podemos encontrar que tendremos dos tipos de probetas, las tipo 1A, que son las utilizadas para las probetas impresas en posición horizontal y de canto, y las tipo 1AV que son las utilizadas para las impresas en posición vertical.

Tipo de probeta	Medidas en milímetros	
	1A	1AV
l_1 Longitud de la zona paralela estrecha	80 ± 2	
l_2 Distancia entre zonas paralelas anchas	104 a 113	74 a 83
l_3 Longitud total	≥ 150	≥ 120
r Radio	20 a 25	
b_1 Anchura en la zona estrecha	$10 \pm 0,2$	
b_2 Anchura en los extremos	$20 \pm 0,2$	
h Espesor recomendado	$4 \pm 0,2$	$5 \pm 0,2$
L_0 Distancia entre marcas	$50 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$
L Distancia inicial entre mordazas	115 ± 1	85 ± 1

Figura 24 Dimensiones probetas tracción[25]

La forma de las probetas será tipo hueso.

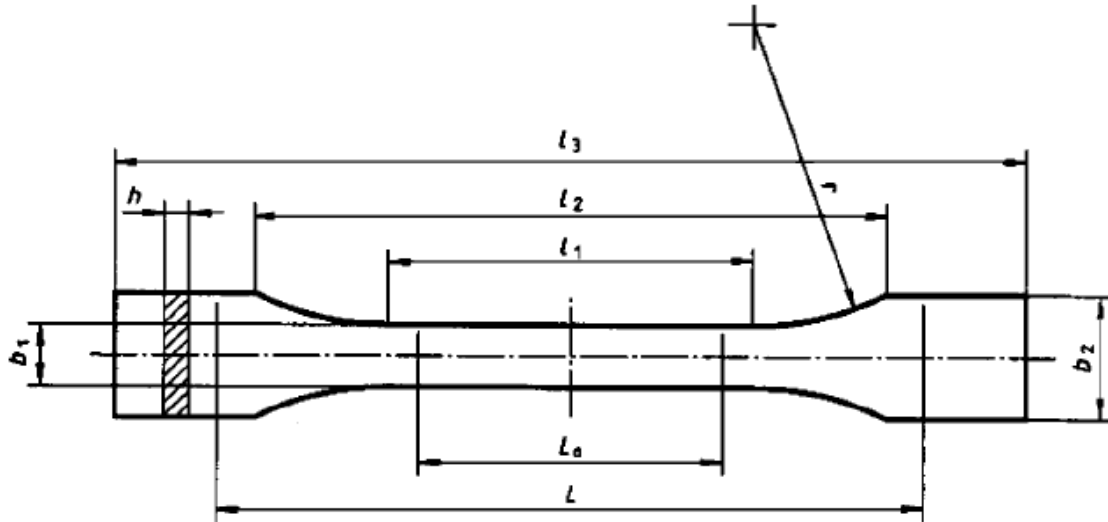


Figura 25 Esquema probeta tracción [25]

Una vez que fuimos a imprimir las probetas nos dimos cuenta que las dimensiones de estas eran muy grandes, por lo que tenía unos tiempos de impresión muy altos, pero en la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 nos presenta una alternativa para estas probetas, que tendrá la misma forma, pero las dimensiones están reducidas al 50%, reduciendo en gran medida los tiempos de impresión. Finalmente nos decantamos por las probetas tipo 1BA.

Medidas en milímetros

	Tipo de probetas	1BA	1BB
l_3	Longitud total	≥ 75	≥ 30
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	$30,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r	Radio	≥ 30	≥ 12
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas	58 ± 2	23 ± 2
b_2	Anchura en los extremos	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1	Anchura de la parte estrecha	$5,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,2$
h	Espesor	≥ 2	≥ 2
L_0	Longitud de referencia	$25,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,2$
L	Distancia inicial entre las mordazas	$l_2 + \frac{2}{0}$	$l_2 + \frac{1}{0}$

NOTA Los tipos de probetas 1BA y 1BB son una reducción proporcional de las probetas tipo 1B con un factor de reducción del 1:2 y 1:5, respectivamente, con excepción del espesor.

Figura 26 Dimensiones probeta 1BA[26]

2º) En segundo lugar vemos que debemos de realizar los ensayos en las posiciones horizontal, vertical y de canto.

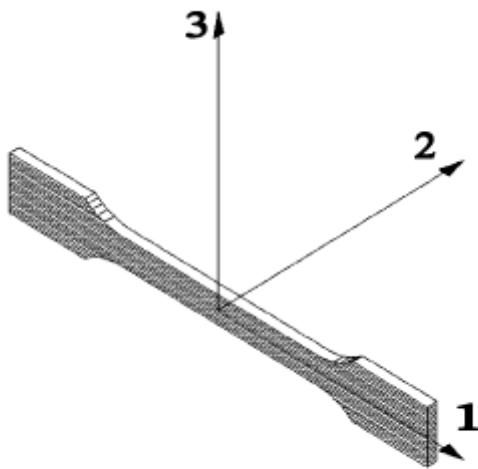


Figura 3b – Probeta tipo 1A. Posición de canto

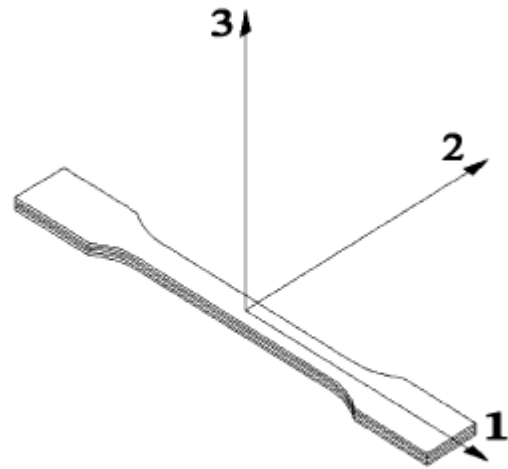


Figura 3a – Probeta tipo 1A. Posición horizontal

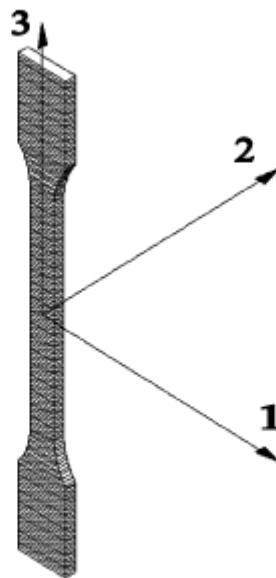


Figura 3c – Probeta tipo 1AV. Posición vertical

Figura 27 Posiciones de impresión de las probetas[26]

3º) A continuación vamos a definir el número de probetas que vamos a ensayar. Según la normativa UNE- EN ISO 527-1:2012 debemos de ensayar 5 probetas para cada una de las direcciones y para cada uno de los ensayos. Esto se debe a que las probetas presentarán anisotropía.

4º) Por último, vamos a realizar una descripción del ensayo.

- ✓ **Atmósfera de ensayo:** Realizaremos el ensayo en la atmósfera especificada en la Norma ISO 291.
- ✓ **Tolerancia dimensional de las probetas:** En primer lugar, vamos a medir el espesor, anchura y longitud de las probetas en tres puntos distintos y se calcula el valor medio de su sección transversal.

Debido a la gran cantidad de probetas que hemos ensayado pondremos a modo orientativo las mediciones de algunas probetas.

PROBETAS PARA ENSAYO TRACCIÓN									
POSICIÓN VERTICAL									
Relleno 100% Espesor 0,24 (A1)					Relleno 100% Espesor 0,18 (A2)				
PROBE.1	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)	PROBE.1	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)
Medida1	76	10,4	2,3	5,15	Medida1	76	10,15	2,3	5,1
Medida2	76	10,2	2,2	5,2	Medida2	75,9	10,15	2,3	5,1
Medida3	75,9	10,2	2,25	5,2	Medida3	75,9	10,2	2,3	5,2
Medo. Teóri	> 75	10±0,5	>2	5±0,5	Medo. Teóri	> 75	10±0,5	>2	5±0,5
MEDIA	75,96666667	10,26666667	2,25	5,133333333	MEDIA	75,93333333	10,16666667	2,3	5,133333333
PROBE.2	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)	PROBE.2	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)
Medida1	76	10,1	2,2	5,2	Medida1	76,6	10,1	2,2	5,1
Medida2	76,1	10,15	2,2	5,2	Medida2	76,5	10,1	2,3	5,1
Medida3	76,1	10,1	2,3	5,15	Medida3	76,6	10,15	2,2	5,1
MEDIA	76,06666667	10,11666667	2,233333333	5,133333333	MEDIA	76,56666667	10,11666667	2,233333333	5,1
PROBE.3	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)	PROBE.3	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)
Medida1	75,9	10,1	2,2	5,2	Medida1	76,1	10	2,2	5
Medida2	76	10,1	2,2	5,15	Medida2	76	10,1	2,3	5
Medida3	76	10,1	2,2	5,2	Medida3	76	10,1	2,2	5,1
MEDIA	75,96666667	10,1	2,2	5,133333333	MEDIA	76,03333333	10,06666667	2,233333333	5,033333333
MEDIA TOTAL PROBETAS=			2,227777778	5,133333333	MEDIA TOTAL PROBETAS=			2,255555556	5,088888889
ÁREA SECCIÓN(mm2)=		11,54731481			ÁREA SECCIÓN(mm2)=		11,4782716		

Figura 28 Medida de las probetas sometidas a tracción

- ✓ **Montaje:** La probeta se coloca en unas garras, teniendo en cuenta que hay que alinear el eje longitudinal de la probeta con el eje de la máquina de ensayo. Es muy importante recalcar que no hay que impedir la rotación de las garras puesto que de esta forma le estaríamos transmitiendo momento a la probeta.



Figura 29 Montaje ensayo tracción

En nuestro caso la máquina de ensayo que vamos a utilizar es la Instron 5567A de 30 KN de capacidad.



Figura 30 Montaje ensayo tracción

Como podemos ver en la imagen vamos a poner una cartulina tras las garras para mejorar el contraste a la hora de utilizar DIC.

El programa BLUEHILL será el empleado para utilizar la máquina.

Antes de comenzar con el ensayo debemos de calibrar la INSTRON, una vez calibrada activamos el bastidor y a continuación vamos a diseñar el método que se va a utilizar para realizar el ensayo.

En mi caso vamos a emplear probetas de PLA.

Como modo de control utilizaremos extensión.

- ✓ Según la norma Hay que someter a la probeta a un esfuerzo de precarga que se encuentra entre $0 \leq \sigma \leq E/2000$, es decir, según la norma, tenemos que meter una precarga de 20 N, pero el montaje de las garras y útiles de ensayo suponen 55N, es por ello que finalmente añadimos una precarga de 75 N y la realizaremos a la mitad de la velocidad del ensayo. Todo esto se hace con el objetivo de eliminar la región irregular que se presenta al inicio de la curva tensión deformación, es decir, el llamado Efecto Escalón.

Una vez que realizamos el ensayo vimos que tardaba demasiado y que los efectos de la precarga apenas eran significativos, es por ello que decidimos eliminarla.

- ✓ Medición: En la norma podemos ver que el aparato que se utiliza para medir la deformación de las probetas es un extensómetro, pero en nuestro caso vamos a utilizar la Correlación Digital de Imágenes (DIC).

El procedimiento de DIC consiste en primer lugar en pintar las probetas con pintura blanca aproximadamente 30 min o 1h antes de realizar los ensayos, una vez que se seque la pintura realizaremos un moteado en negro.

En nuestro caso las probetas son blancas por lo que hemos probado a realizar solo el moteado con algunas de ellas, pero cuando las pusimos antes la cámara del DIC vimos que el contraste no era suficiente, por lo tanto, las pintamos finalmente de blanco y posteriormente realizamos el moteado.

A continuación, comenzará el ensayo, el cual será grabado por una cámara BASLER ACE.



Figura 31 Cámara BASLER ACE

Esta cámara se pondrá frente a las garras de la INSTRON mediante un trípode.

Inicialmente es necesario enfocar manualmente la cámara para obtener la mejor resolución posible. Para ello vamos a modificar las miras de zoom y contraste, además modificaremos el menú del programa Basler Video Recording para mejorar la calidad de la imagen.

Para mejorar aún más el contraste añadiremos un foco de luz.

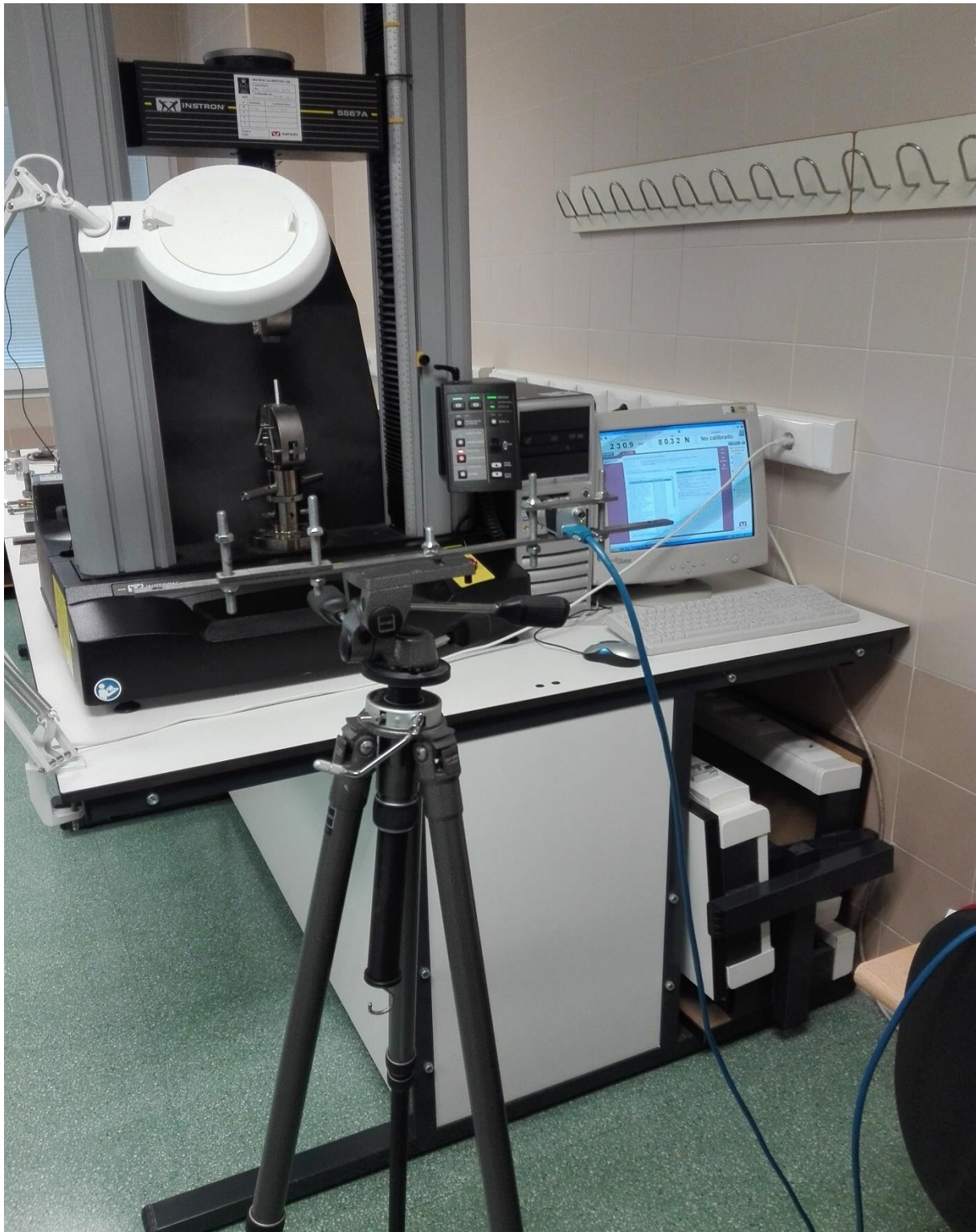


Figura 32 Montaje total ensayo tracción

Una vez que se haya realizado el ensayo y tengamos las imágenes grabadas procederemos a procesar dichas imágenes con el programa Vic 2D.

- ✓ Otro de los valores característicos del ensayo es la velocidad de impresión, la cual queda definida en la norma UNE-EN ISO 527-1:2012 en el apartado 5.1.2, donde podemos ver las velocidades a las que podemos realizar el ensayo en función de la tolerancia.

Velocidad de ensayo v mm/min	Tolerancia %
0,125	± 20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	± 10
10	
20	
50	
100	
200	
300	
500	

Figura 33 Velocidades ensayo tracción[27]

Finalmente vamos a emplear una velocidad de ensayo de 0,5 mm/min. Esta velocidad tan baja se debe a la baja resistencia que tendrán las probetas, de manera que si realizamos los ensayos a una velocidad mayor no vamos a ver nada.

4.2.1 Resultados del ensayo de tracción

- PROBETA TIPO A

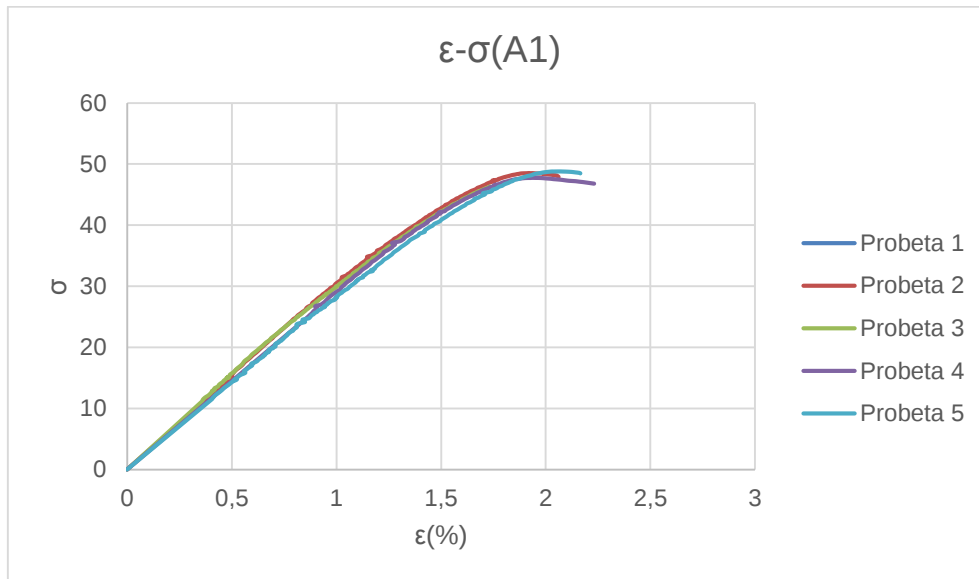


Figura 34 Probeta A1. Ensayo tracción

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\epsilon(f_y)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$	A	B	C
Probeta 1	-	48,1707	-	48,337	0,0227616	-2,00E+06	1,13E+05	-1,24E+03
Probeta 2	3117,6	48,5209	0,01910021	48,542989	0,0192003	-2,32E+05	1,33E+04	-1,41E+02
Probeta 3	3142,4	45,9572878	0,017062	45,9572878	0,0170619	-	-	-
Probeta 4	2912,9	47,581712	0,018666	47,00022	0,0219219	-1,04E+05	2,22E+03	3,59E+01
Probeta 5	2862,4	48,8184	0,020672	48,666	0,0214073	-2,77E+03	1,64E+04	-1,94E+02
Media	3008,825	47,8098	0,01887505	47,7006994	0,0204706	-5,85E+05	3,61E+04	-3,86E+02
Desv. Típica(%)	4,08121942	2,12008534	6,810854	2,21392529	10,121677	-140,43418	123,140309	130,391298

Tabla 4 Propiedades mecánicas probeta A1. Ensayo tracción

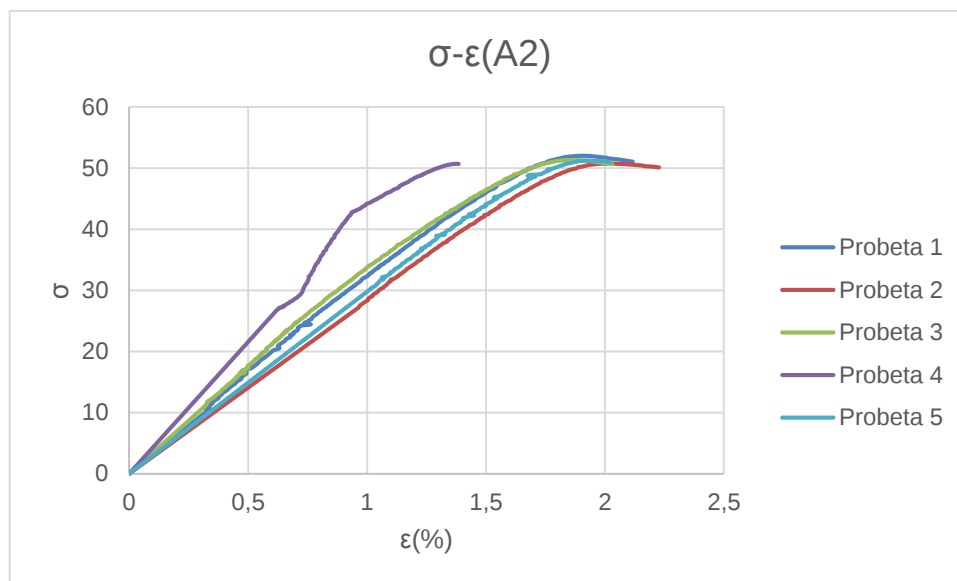


Figura 35 Probeta A2. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	3326	51,944	0,0186725	51,40597	0,0180574	0,00E+00	1,00E+00	5,00E-11
Probeta 2	2857,4	50,7591	0,0198	50,454269	0,0215647	-1,41E+05	2,94E+03	3,54E+01
Probeta 3	3094,3	51,281458	0,017106	50,84349	0,0199104	-2,15E+05	1,24E+04	-1,28E+02
Probeta 4	3508,7	50,685087	0,013544	50,685087	0,018254	-	-	-
Probeta 5	2957,7	51,243281	0,0193	50,857787	0,0206658	-	-	-
Media	3148,82	51,1674113	0,01728063	50,847204	0,01944663	-7,04E+04	1,47E+03	1,77E+01
Desv.Típica(%)	7,5865067	0,88274174	13,0786729	0,61755061	6,99151215	126,412748	359,314806	395,631103

Tabla 5 Propiedades mecánicas probeta A2. Ensayo tracción

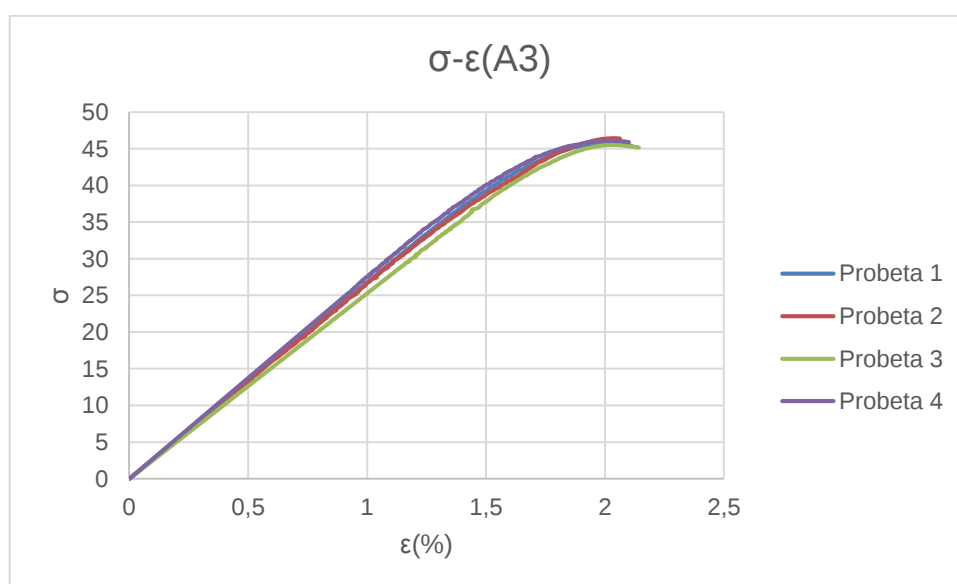


Figura 36 Probeta A3. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2675,9	45,65238	0,020296	45,46979	0,0209456	-67221	1029,4	4,19E+01
Probeta 2	2652,4	46,381149	0,0201181	46,381149	0,020116	-	-	-
Probeta 3	2527,8	45,4918	0,020342	45,235697	0,02126001	-2,43E+05	4,35E+03	2,61E+01
Probeta 4	2752,5	46,076186	0,020544	46,076186	0,02054412	-	-	-
Probeta 5	-	-	-	-	-	-	-	-
Media	2652,15	45,9003788	0,02032503	45,7907055	0,02071643	-6,72E+04	1,03E+03	4,19E+01
Desv.Típica(%)	3,0455703	0,7629007	0,7457502	1,00144661	2,07368704	130,735931	161,093841	18,9128257

Tabla 6 Propiedades mecánicas probeta A3. Ensayo tracción

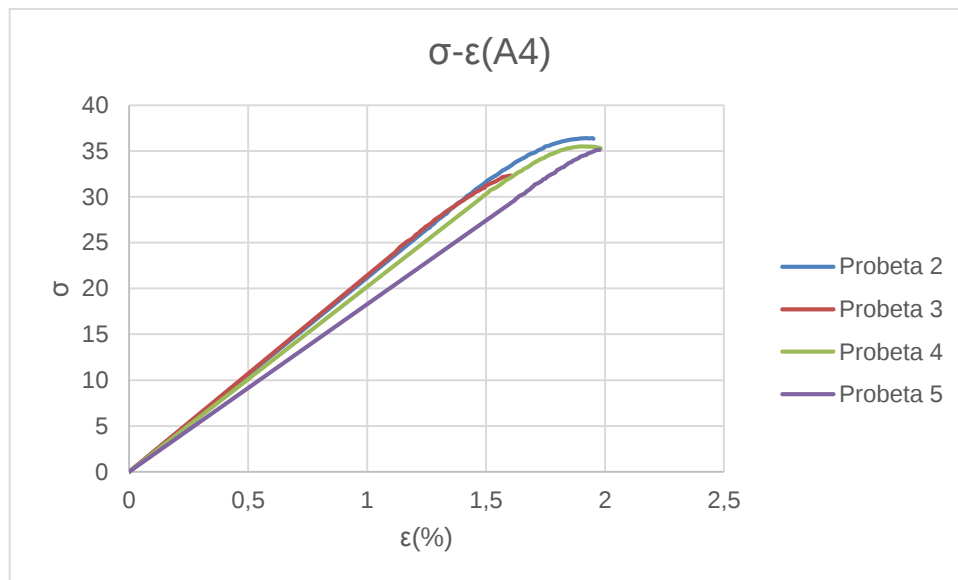


Figura 37 Probeta A4. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	-	-	-	-	-	-	-	-
Probeta 2	2117	36,3857	0,0189907	36,3857	0,01931268	-9,37E+05	1,26E+04	-6,02E+00
Probeta 3	2147	32,25	0,01589	32,25	0,01588929	-	-	-
Probeta 4	2018,9	35,467512	0,0188888	35,2691	0,01982504	-2,69E+05	2,39E+03	3,02E+01
Probeta 5	1831,5	34,9531	0,0193276	34,9531	0,0195106	-	-	-
Media	2028,6	34,764078	0,01827428	34,714475	0,0186344	-6,03E+05	7,50E+03	1,21E+01
Desv.Típica(%)	6,07628705	4,42855112	7,58501582	4,376108	8,5615158	55,3700408	68,1491459	149,800337

Tabla 7 Propiedades mecánicas probeta A4. Ensayo tracción

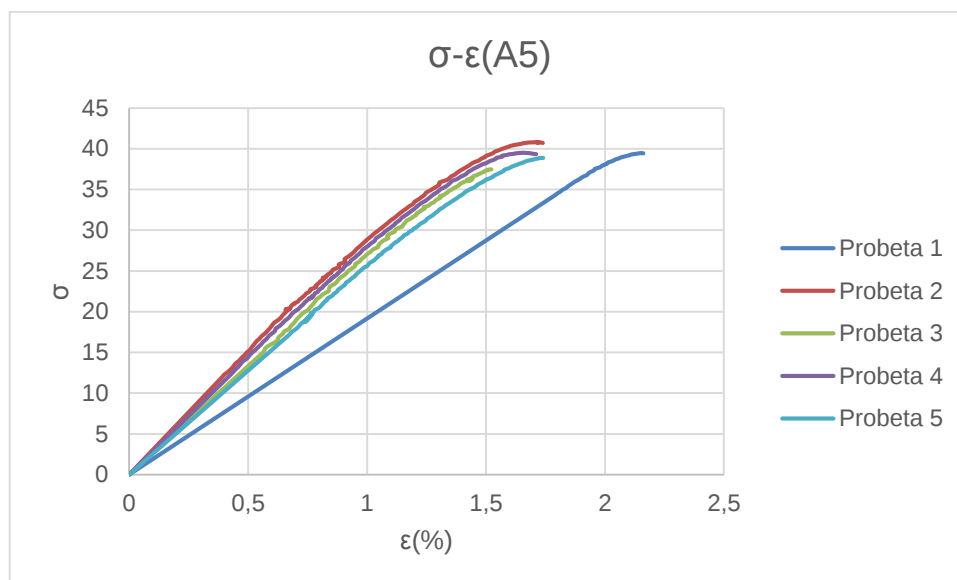


Figura 38 Probeta A5. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	ε(fy)	fy(N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	1917,7	0,02142	39,44505	39,44505	0,0214201	-	-	-
Probeta 2	3040,8	0,0171289	40,7891	40,7529	0,01731366	-2,00E+06	1,62E+04	4,61E+00
Probeta 3	2677,8	0,015085	37,4375	37,4375	0,01508538	-	-	-
Probeta 4	2888,6	0,01683	39,4723	39,4742	0,01680953	-	-	-
Probeta 5	2551,8	0,01785	38,8381	38,8381	0,01739778	-	-	-
Media	2615,34	0,01766278	39,19641	39,18955	0,01760529	-2000000	16186	4,6123
Desv.Típica(%)	14,8119502	11,815104	2,77060764	2,74436926	11,823382	0	0	0

Tabla 8 Propiedades mecánicas probeta A5. Ensayo tracción

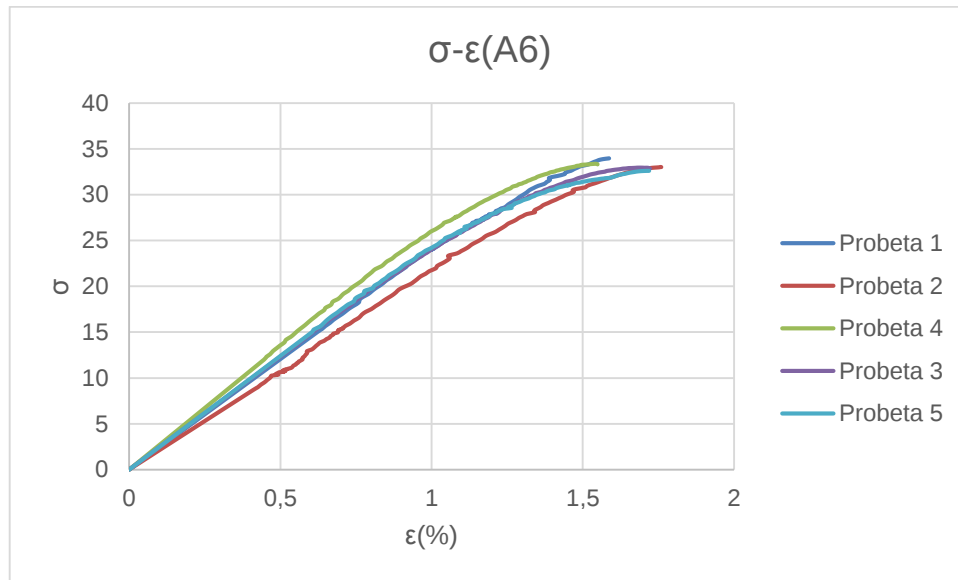


Figura 39 Probeta A6. Ensayo tracción

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\epsilon(f_y)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$	A	B	C
Probeta 1	2412,9	34,0149	-	34,0149	0,0159166	-	-	-
Probeta 2	2190,9	32,962	0,017349	33,025	0,01759084	7,58E+04	2,66E+02	-4,00E-04
Probeta 3	2465,1	32,9086	0,01661	32,8518	0,01722859	-4,50E-03	3,57E-02	-2,98E-02
Probeta 4	2712	33,3696	0,01541	33,3696	0,01541438	-	-	-
Probeta 5	2489,6	32,61411	0,01719	32,61411	0,01719386	-	-	-
Media	2454,1	33,173842	0,01663975	33,175082	0,01666885	37889,4978	133,01285	-0,0151
Desv.Típica(%)	6,79078019	1,460817	4,57585	1,46735757	5,07533744	100,000012	99,9731605	97,3509934

Tabla 9 Propiedades mecánicas probeta A6. Ensayo tracción

A continuación represento los valores medios obtenidos para cada tipo de probeta.

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	E _{última}	A	B	C
A1	3008,825	47,8098	47,7006994	0,0204706	-5,85E+05	3,61E+04	-3,86E+02
A2	3148,82	51,1674113	50,847204	0,01944663	-7,04E+04	1,47E+03	1,77E+01
A3	2652,15	45,9003788	45,7907055	0,02071643	-6,72E+04	1,03E+03	4,19E+01
A4	2028,6	34,764078	34,714475	0,0186344	-6,03E+05	7,50E+03	1,21E+01
A5	2615,34	39,19641	39,18955	0,01760529	-2000000	16186	4,6123
A6	2454,1	33,173842	33,175082	0,01666885	37889,4978	133,01285	-0,0151

Tabla 10 Propiedades mecánicas probeta tipo A. Ensayo tracción

⇒ GRÁFICA MEDIA PROBETA TIPO A

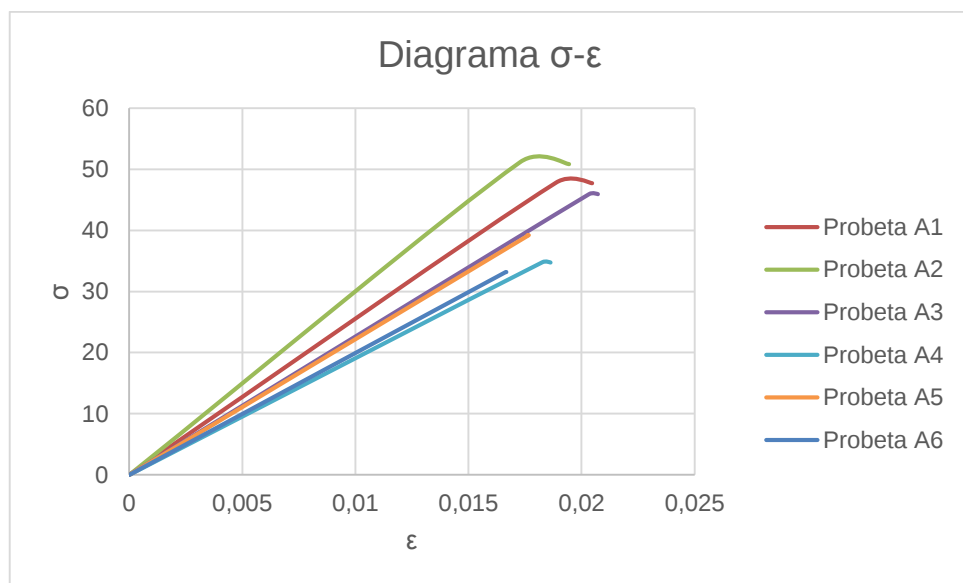


Figura 40. Gráficas medias probeta tipo A

- PROBETA TIPO B

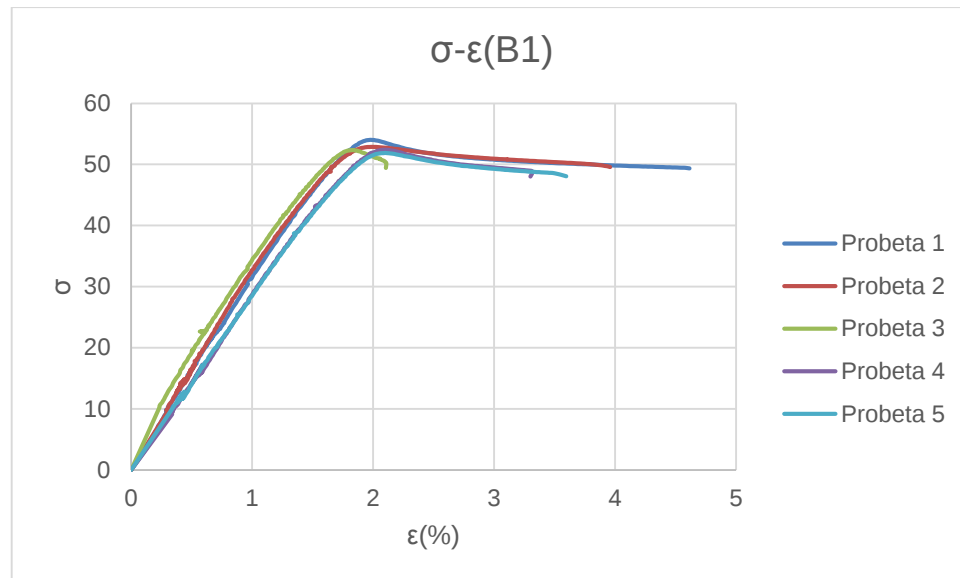


Figura 41 Probeta B1. Ensayo tracción

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\epsilon(f_y)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$	A	B	C
Probeta 1	3281,3	54,03997	0,0197879	49,3632	0,04616719	7,72E+03	-3,51E+02	-3,92E-01
Probeta 2	3317,8	52,881556	0,020225	49,11786	0,03958942	4,36E+03	-2,37E+02	-1,36E-02
Probeta 3	3277,9	52,342	0,0182652	49,4177	0,02104553	-1,62E+05	-3,29E+02	1,11E-02
Probeta 4	2827,7	52,38497	0,020948	48,024	0,03299276	1,56E+04	-4,81E+02	6,20E-02
Probeta 5	2839,9	51,8947	0,020992	46,9565	0,03596351	1,39E+04	-4,29E+02	9,67E-02
Media	3108,92	52,7086392	0,02004362	48,575852	0,03515168	1,04E+04	-3,75E+02	-6,18E-02
Desv.Típica(%)	7,24054734	1,39520667	4,97832904	1,96364942	23,6423894	664,752972	-22,465717	285,997305

Tabla 11 Propiedades mecánicas probeta B1. Ensayo tracción

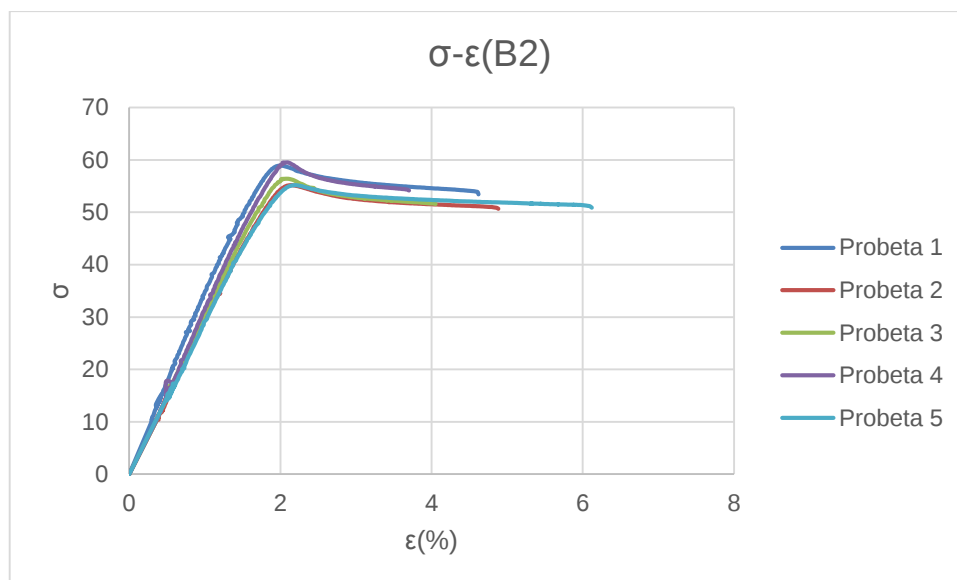


Figura 42 Probeta B2. Ensayo tracción

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\epsilon(f_y)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$	A	B	C
Probeta 1	3528,1	58,9079	0,0200256	53,42146	0,04621301	6,58E+03	-3,40E+02	-3,01E-01
Probeta 2	2919,7	55,165875	0,02141293	50,65015	0,04882923	6,67E+03	-3,19E+02	-1,97E-01
Probeta 3	3068,3	56,41709	0,0207132	51,60207	0,04050882	1,48E+04	-5,11E+02	9,72E-02
Probeta 4	3026,9	59,4909	0,0209617	53,9804	0,00679347	2,50E+04	-6,74E+02	-3,03E-01
Probeta 5	2845,1	55,20297	0,02192	50,8977	0,05914174	2,41E+03	-1,75E+02	-4,86E-01
Media	3077,62	57,036947	0,02100669	52,110356	0,04029725	1,02E+04	-3,77E+02	-3,22E-01
Desv.Típica(%)	7,75200979	3,21098019	3,04803532	2,58562591	44,1892182	78,9279013	45,6123643	59,5617265

Tabla 12 Propiedades mecánicas probeta B2. Ensayo tracción

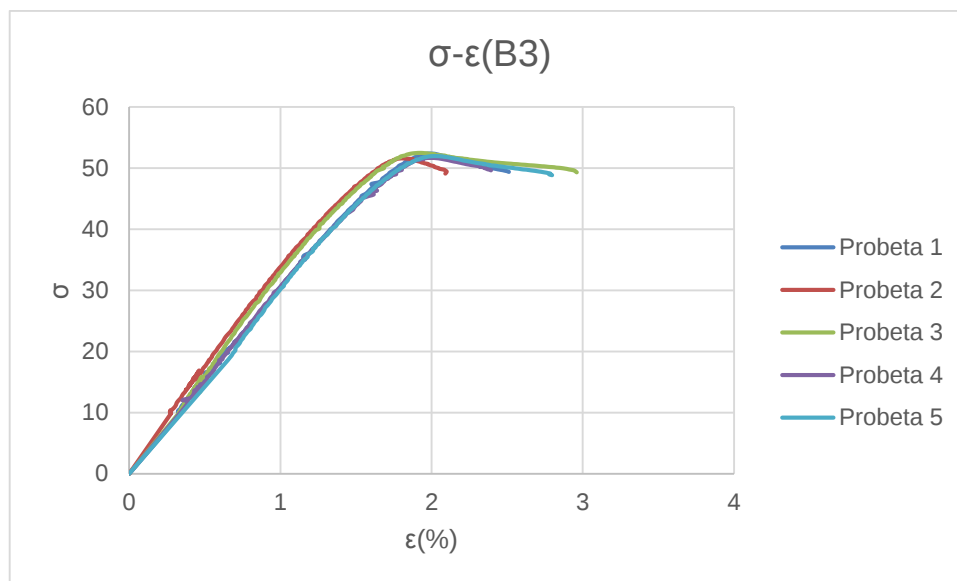


Figura 43 Probeta B3. Ensayo tracción

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\epsilon(f_y)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$	A	B	C
Probeta 1	3057,4	52,3964	0,019985	48,9598	0,0067488	3,01E+04	-7,53E+02	2,31E-01
Probeta 2	3503,8	51,6192	0,0181451	49,12798	0,02090978	-1,38E+05	-4,00E+02	5,08E-02
Probeta 3	3315,1	52,48716	0,0191372	49,30661	0,02959591	1,23E+04	-3,81E+02	8,21E-02
Probeta 4	3070,9	51,69314	0,019965	49,6282	0,0239185	-3,88E+04	-3,55E+02	4,08E-02
Probeta 5	3021,3	51,96087	0,0201831	48,8366	0,02796217	8,10E+03	-4,47E+02	1,22E-01
Media	3193,7	52,031354	0,01948308	49,171838	0,02182703	-3,45E+04	-4,89E+02	1,11E-01
Desv.Típica(%)	5,84579704	0,68234605	3,89813316	0,56483579	37,2518757	175,635298	29,8739112	62,0804288

Tabla 13 Propiedades mecánicas probeta B3. Ensayo tracción

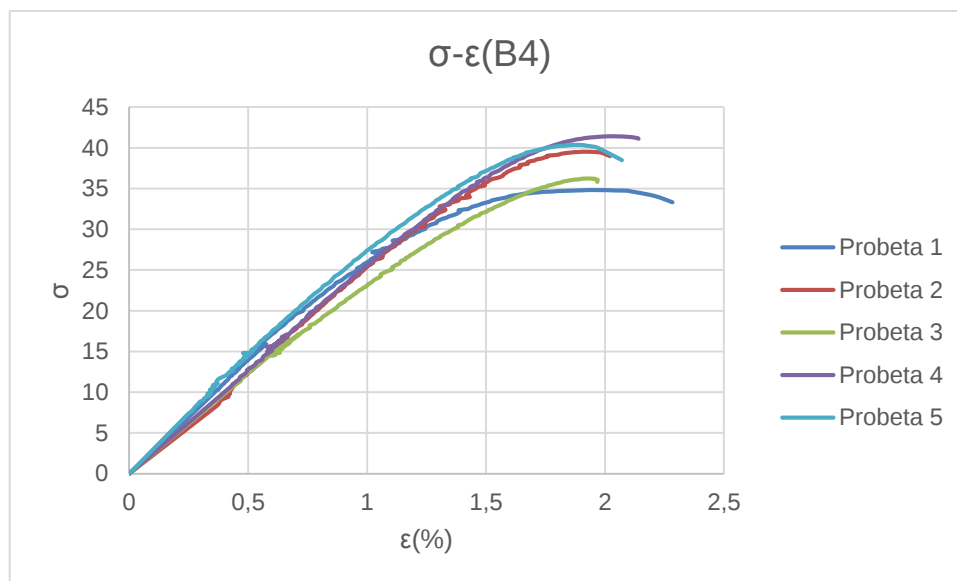


Figura 44 Probeta B4. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2796,4	34,83856	0,0194497	33,328486	0,02283303	-1,97E+05	2,48E+02	-5,88E-02
Probeta 2	2541,5	39,53285	0,0190746	38,9785	0,02020596	-7,05E+05	3,49E+02	-2,78E-02
Probeta 3	2462,3	36,2339	0,0193545	34,647	0,01901427	-2,00E+06	1,60E+00	-1,33E-01
Probeta 4	2573,8	41,4255	0,0201497	41,4255	0,02025952			
Probeta 5	2588,4	40,36338	0,0187072	38,4909	0,02071412	-5,27E+05	-7,66E+01	8,70E-03
Media	2592,48	38,478838	0,01934714	37,3740772	0,02060538	-4,76E+05	1,73E+02	-2,60E-02
Desv.Típica(%)	4,27778148	6,53714531	2,46638156	7,94080405	6,05570545	143,813451	100,305875	200,063907

Tabla 14 Propiedades mecánicas probeta B4. Ensayo tracción

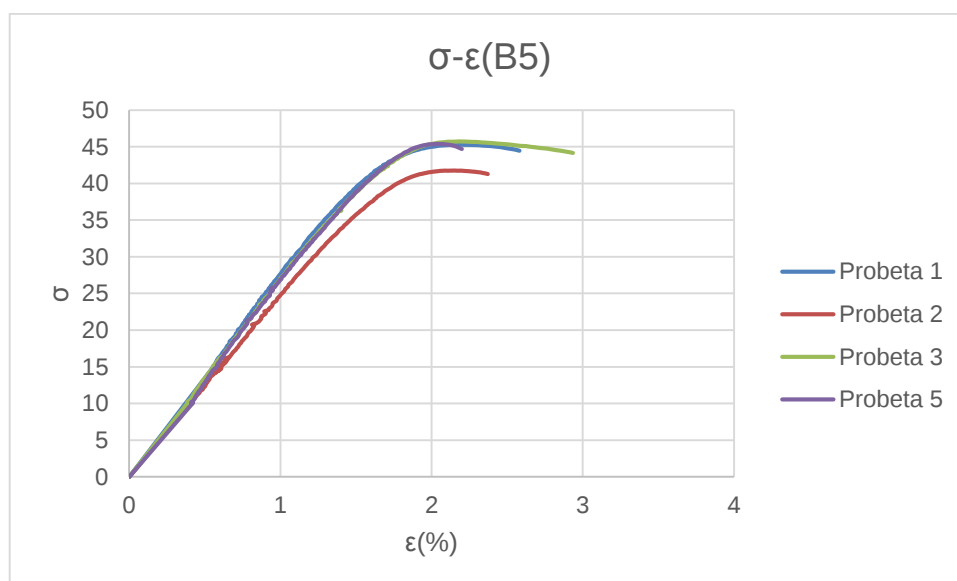


Figura 45 Probeta B5. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2776,8	45,316042	0,02195521	44,805	0,0258007	-6,00E+04	2,51E+01	-2,25E-02
Probeta 2	2473,2	41,76265	0,02153609	41,2845	0,02371849	-9,03E+04	-1,66E+00	-7,50E-03
Probeta 3	2699,1	45,7296045	0,02180533	43,994887	0,01657587	-1,90E+04	-6,42E+01	4,50E-03
Probeta 4	-	-	-	-	-	-	-	-
Probeta 5	2443,2	45,3694	0,0226235	44,687455	0,02428122	-3,39E+05	1,66E+02	-1,49E-02
Media	2598,075	44,5444241	0,02198003	43,6929605	0,02259407	-1,63E+05	6,33E+01	-1,50E-02
Desv.Típica(%)	5,5018106	3,6231605	1,82306156	3,26038951	15,7435379	76,6504692	133,386283	66,5406388

Tabla 15 Propiedades mecánicas probeta B5. Ensayo tracción

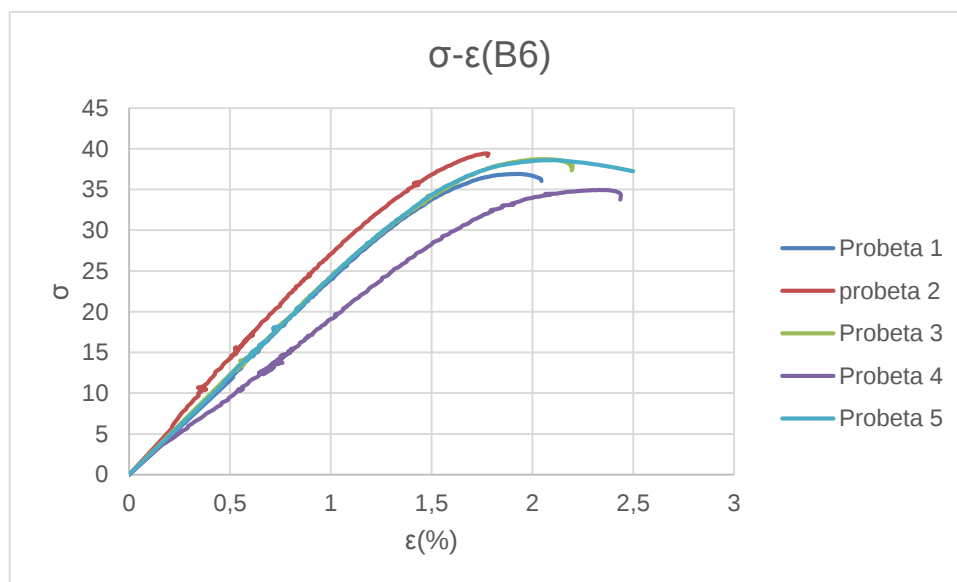


Figura 46 Probeta B6. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2393,4	36,9077	0,0192185	35,069398	0,02612916	-1,51E+05	3,11E+02	5,10E-03
Probeta 2	2889,5	39,4129	0,0177032	37,28047	0,0029668	2,07E+04	1,86E+03	-2,69E-01
Probeta 3	2430	38,7379	0,0204756	35,23132	0,0215122	-3,04E+05	-3,36E+02	9,36E-02
Probeta 4	1907,3	34,94135	0,0224418	33,759529	2,35E-02	-1,00E+06	9,01E+02	-8,11E-02
Probeta 5	2444,5	38,59001	0,0211427	37,2379	0,02499794	-4,94E+04	-1,62E+02	-4,00E-04
Media	2412,94	37,717972	0,02019636	35,7157234	0,01981493	-2,95E+05	7,27E+02	-8,64E-02
Desv.Típica(%)	12,9000981	4,28153709	8,04127006	3,80713293	43,2265174	124,881275	109,633246	141,877736

Tabla 16 Propiedades mecánicas probeta B6. Ensayo tracción

A continuación represento los valores medios obtenidos para cada tipo de probeta.

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
B1	3108,92	52,7086392	48,575852	0,03515168	1,04E+04	-3,75E+02	-6,18E-02
B2	3077,62	57,036947	52,110356	0,04029725	1,02E+04	-3,77E+02	-3,22E-01
B3	3193,7	52,031354	49,171838	0,02182703	-3,45E+04	-4,89E+02	1,11E-01
B4	2629,66	38,478838	37,3740772	0,02060538	-4,76E+05	1,73E+02	-2,60E-02
B5	2598,075	44,7944241	43,6929605	0,02259407	-1,63E+05	6,33E+01	-1,50E-02
B6	2412,94	37,717972	35,7157234	0,01981493	-2,95E+05	7,27E+02	-8,64E-02

Tabla 17 Propiedades mecánicas probeta tipo B. Ensayo tracción

⇒ Gráfica media probeta tipo B

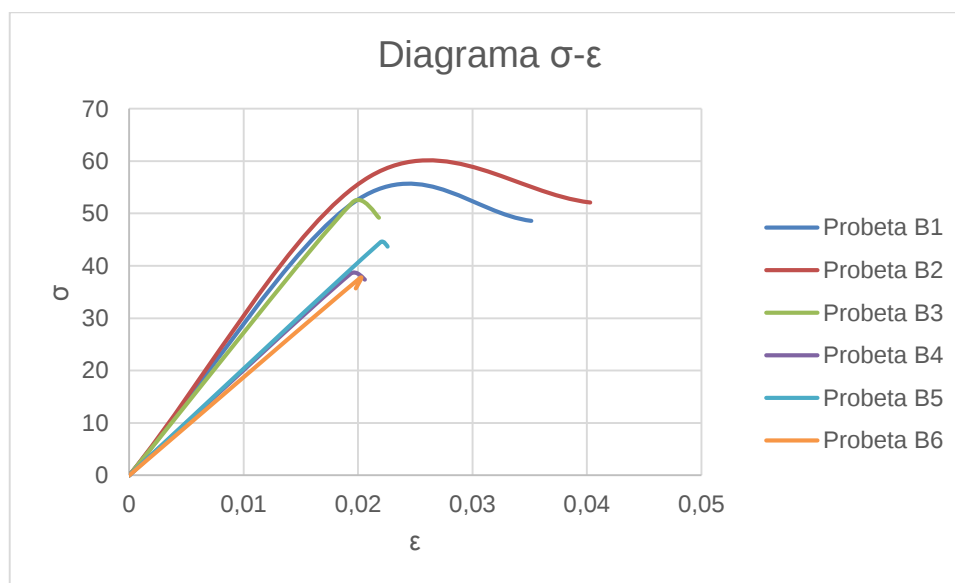


Figura 47 Gráficas medias probeta tipo B

- PROBETA TIPO C

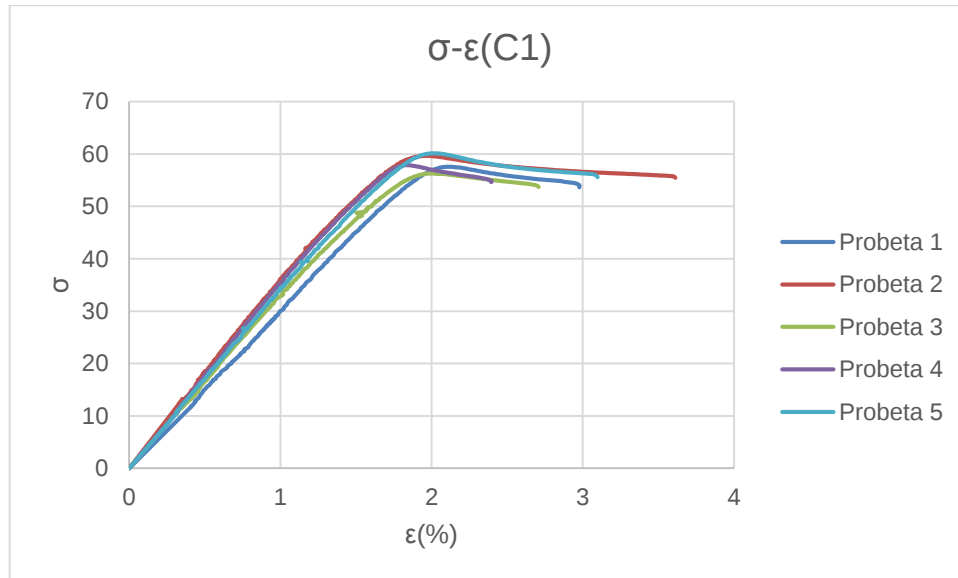


Figura 48 Probeta C1. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2976,3	57,54052	0,0209978	53,62076	0,02977781	8,70E+03	-4,71E+02	1,44E-01
Probeta 2	3644,2	59,6710359	0,0196883	55,4815	0,0361218	1,16E+04	-4,22E+02	3,17E-02
Probeta 3	3333,5	56,2819	0,0201555	53,7081	0,02709159	-4,62E+03	-3,12E+02	6,13E-02
Probeta 4	3550	57,87394	0,0182828	54,6355	2,40E-02	3,06E+03	-5,46E+02	4,54E-02
Probeta 5	3426,7	60,13635	0,020225	55,5845	0,03096664	2,46E+04	-6,63E+02	2,53E-01
Media	3386,14	58,3007492	0,01986988	54,606072	0,02958509	8666,62	-482,912	0,10708
Desv.Típica(%)	6,8094504	2,43576491	4,51921647	1,53255807	13,7256346	111,817154	24,4168127	77,3777115

Tabla 18 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo tracción

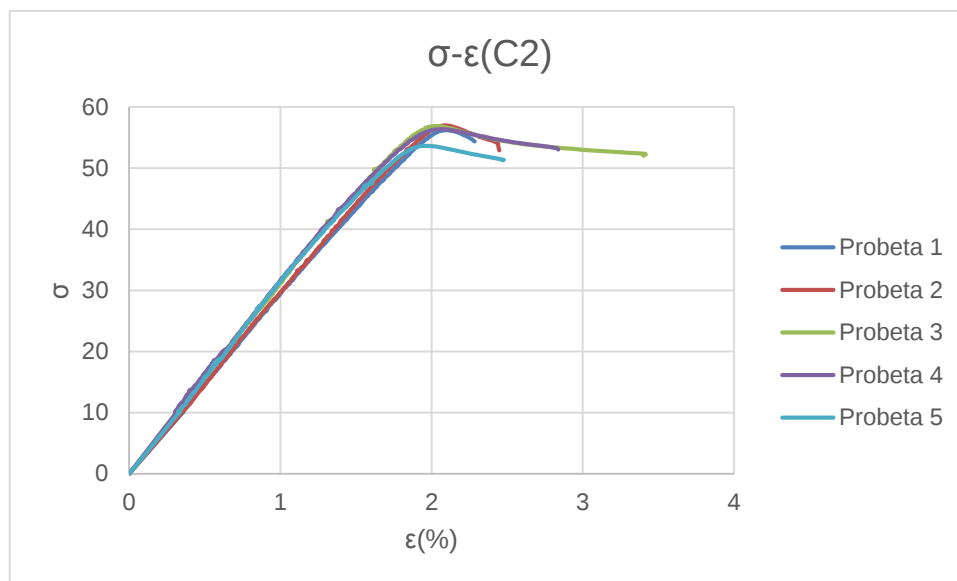


Figura 49 Probeta C2. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2937,5	56,2005	0,0209694	53,1956	0,00990422	-1,37E+05	-7,20E+02	1,66E-02
Probeta 2	2984,6	56,9985	0,0188643	52,9078	0,02248275	-1,05E+05	-5,58E+02	7,52E-02
Probeta 3	3156,4	56,9081	0,0202079	52,05549	0,03396855	2,21E+04	-6,35E+02	1,08E-01
Probeta 4	3168,1	56,4	0,0206118	53,0705	2,84E-02	1,35E+04	-5,34E+02	1,79E-01
Probeta 5	3154,1	53,6715	0,019773	51,3059	0,01546203	-1,47E+04	-4,30E+02	7,35E-02
Media	3080,14	56,03572	0,02008528	52,507058	0,02204317	-6,09E+04	-5,60E+02	8,62E-02
Desv.Típica(%)	3,19742671	2,17650691	3,63295949	1,37305372	39,2069975	106,363598	17,4479707	61,769066

Tabla 19 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo tracción

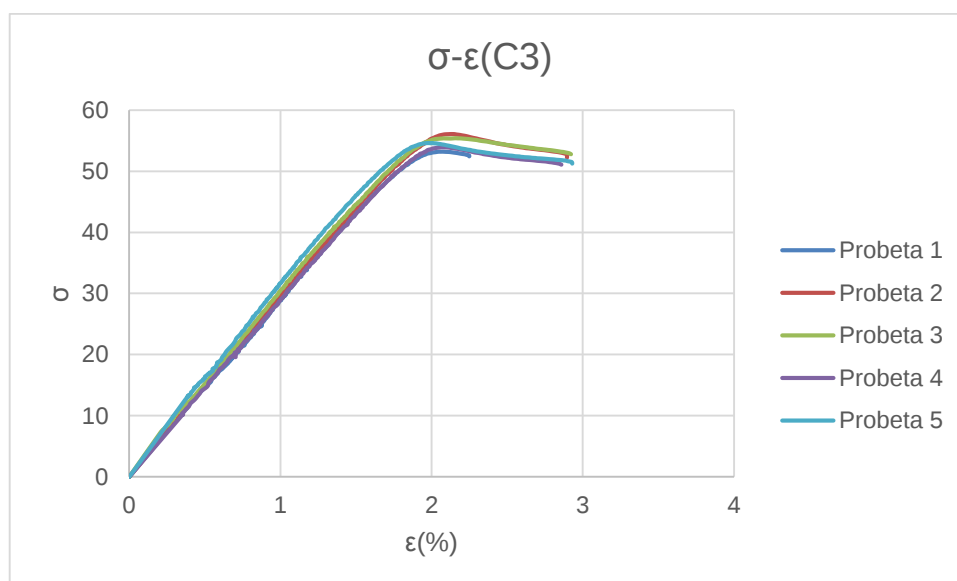


Figura 50 Probeta C3. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2866,9	53,22085	0,0207199	52,4549	0,02247778	-1,96E+05	-2,86E+01	-8,20E-03
Probeta 2	2975,2	56,0993	0,0214057	52,2553	0,02895263	1,51E+04	-5,58E+02	6,91E-02
Probeta 3	3040,8	55,3871	0,0215727	52,76618	0,02921737	-1,28E+03	-3,27E+02	9,85E-02
Probeta 4	2882	53,9321	0,020654	51,0732	2,86E-02	1,81E+04	-5,01E+02	1,64E-01
Probeta 5	3177,4	54,6283	0,0200561	51,2648	0,02930126	1,94E+04	-5,05E+02	2,98E-02
Media	2988,46	54,65353	0,02088168	51,962876	0,02770936	-3,60E+04	-3,98E+02	6,37E-02
Desv.Típica(%)	3,80715772	1,86631032	2,63319007	1,29145713	9,48151755	233,756778	-48,722762	92,5869098

Tabla 20 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo tracción

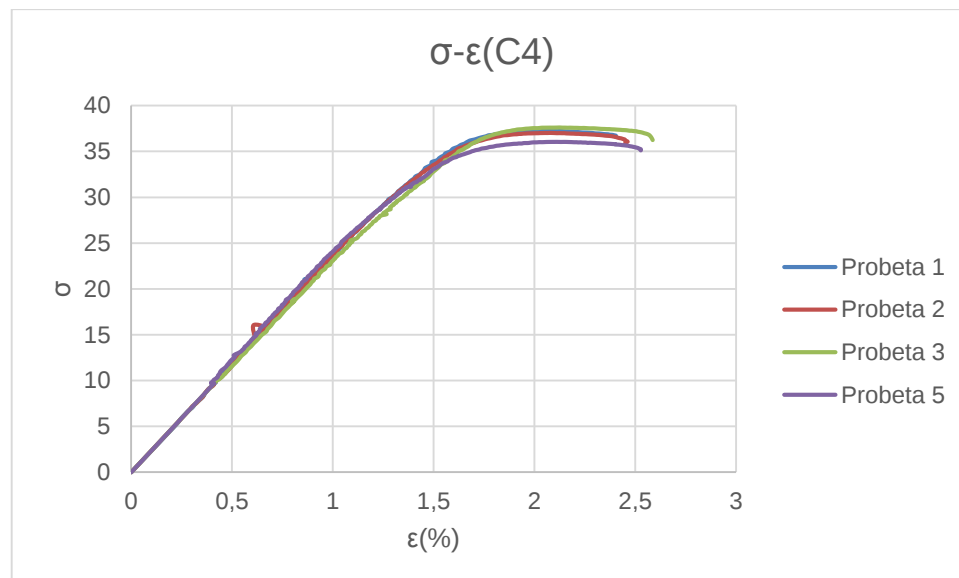


Figura 51 Probeta C4. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2390,4	37,26498	0,0201581	36,6174	0,02402977	-3,69E+04	7,81E+00	-8,10E-03
Probeta 2	2384,1	37,031239	0,0207596	35,7653	0,0244599	-1,01E+05	1,89E+02	-1,01E-01
Probeta 3	2310,7	37,60448	0,0212574	35,8521	-	-2,79E+04	-7,03E+01	9,46E-02
Probeta 4	-	-	-	-	-	-	-	-
Probeta 5	2435,8	36,0567	0,0214732	34,757	-	-6,27E+04	9,78E+01	-5,40E-02
Media	2380,25	36,9893498	0,02091208	35,74795	0,02424483	-6,68E+04	9,81E+01	-5,42E-02
Desv.Típica(%)	1,8836422	1,55652635	2,42165444	1,84979195	0,8870569	42,3148795	98,8605885	133,257261

Tabla 21 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo tracción

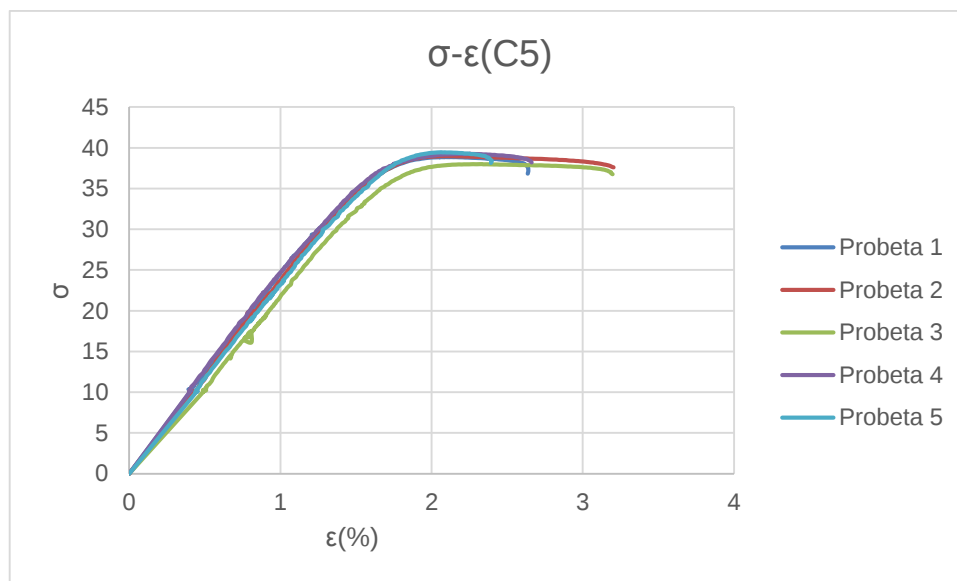


Figura 52 Probeta C5. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2469,3	38,85	0,0208336	36,81459	0,02635677	-7,89E+04	2,54E+02	-1,87E-01
Probeta 2	2401,6	38,97	0,0210501	37,5908	0,03201224	-6,83E+03	-1,14E+01	-3,58E-02
Probeta 3	2152,1	38,009	0,0233645	36,5501	0,03201901	-8,31E+04	5,34E+02	-6,02E-01
Probeta 4	2542,4	39,2708	0,0218052	38,222	2,67E-02	-5,90E+04	1,25E+02	-6,31E-02
Probeta 5	2346,7	39,4589	0,0152194	37,418	0,0234006	-8,23E+04	1,69E+01	2,47E-02
Media	2382,42	38,91174	0,02045456	37,319098	0,02809093	-5,68E+04	9,60E+01	-6,52E-02
Desv.Típica(%)	5,56320553	1,28519242	13,5126562	1,58287624	12,1081027	51,0500529	206,696942	345,657029

Tabla 22 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo tracción

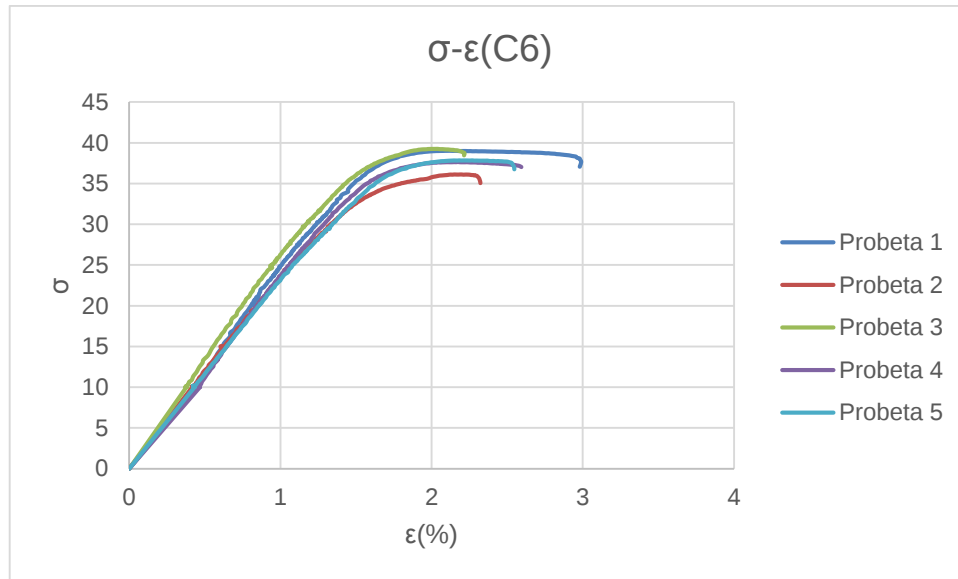


Figura 53 Probeta C6. Ensayo tracción

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
Probeta 1	2746	39,03526	0,0211991	37,0769	0,02980122	-2,37E+04	1,12E+02	-1,38E-01
Probeta 2	2394	36,1211	0,0214811	34,505	0,02263084	-1,00E+06	1,24E+03	-1,64E-01
Probeta 3	2629,1	39,2617	0,0204065	38,466	0,0221378	-2,87E+05	2,24E+02	-6,00E-02
Probeta 4	2368,6	37,6572	0,0217348	37,0366	2,59E-02	-3,13E+04	1,82E+01	-3,67E-02
Probeta 5	2330,3	37,83559	0,0221079	36,7442	0,02546251	-1,09E+05	2,72E+02	-1,18E-01
Media	2493,6	37,98217	0,02138588	36,76574	0,02518959	-2,91E+05	4,11E+02	-1,14E-01
Desv.Típica	6,57189684	2,96396155	2,68304993	3,47735152	10,9051874	126,270048	107,885531	41,9101145

Tabla 23 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo tracción

→ Gráfica media probeta tipo C

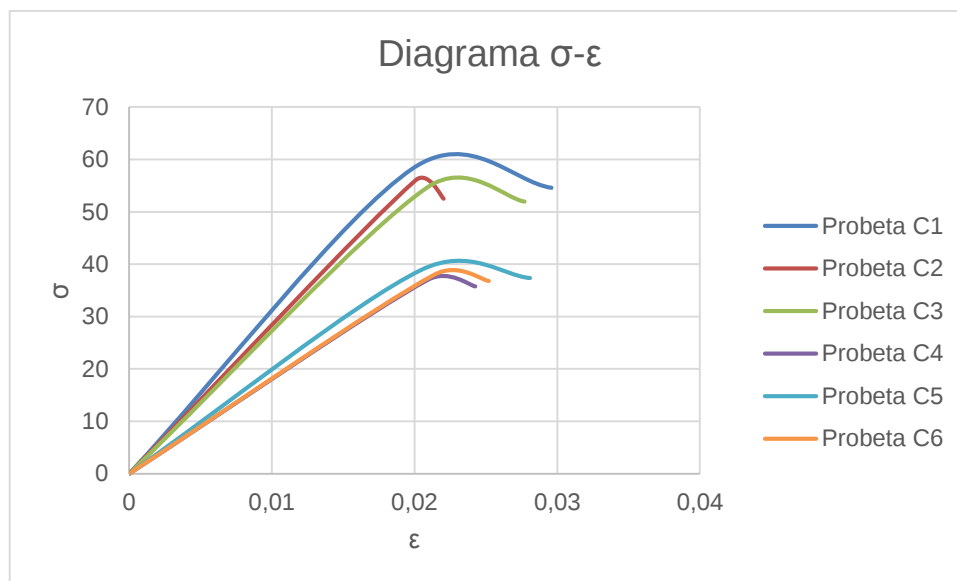


Figura 54 Gráficas medias probetas tipo C

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)	E _{última}	A	B	C
C1	3386,14	58,3007492	54,606072	0,02958509	8666,62	-482,912	0,10708
C2	3080,14	56,03572	52,507058	0,02204317	-6,09E+04	-5,60E+02	8,62E-02
C3	2988,46	54,65353	51,962876	0,02770936	-3,60E+04	-3,98E+02	6,37E-02
C4	2380,25	36,9893498	35,74795	0,02424483	-6,68E+04	9,81E+01	-5,42E-02
C5	2382,42	38,91174	37,319098	0,02809093	-5,68E+04	9,60E+01	-6,52E-02
C6	2413,36	37,98217	36,76574	0,02518959	-2,91E+05	4,11E+02	-1,14E-01

Tabla 24 Propiedades mecánicas probeta tipo C. Ensayo tracción

4.3 Ensayo de compresión

Para el ensayo de compresión vamos a utilizar la norma UNE-EN ISO 604.

1º) Forma y dimensiones de la probeta: En este caso las probetas tendrán forma rectangular, y las dimensiones están especificadas en la siguiente tabla.

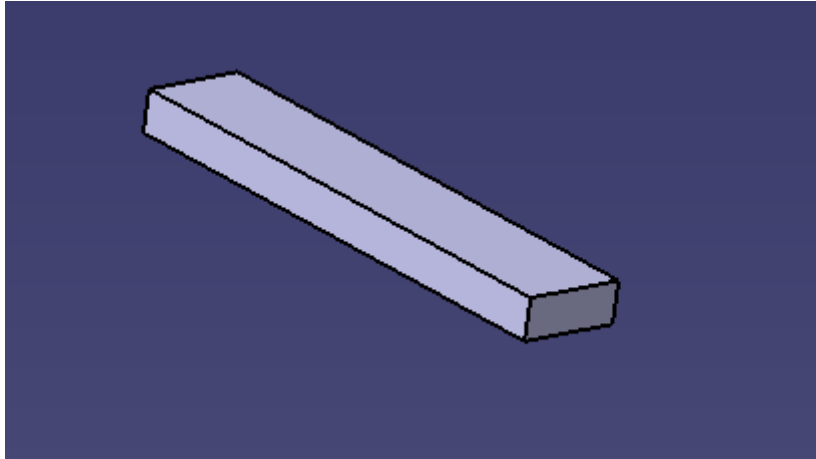


Figura 55 Esquema probeta compresión

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		

Tabla 25 Medidas probeta compresión [28]

2º) Posiciones del ensayo

En este caso vamos a realizar los ensayos en la dirección paralela al eje de anisotropía y en la dirección perpendicular al eje de anisotropía.

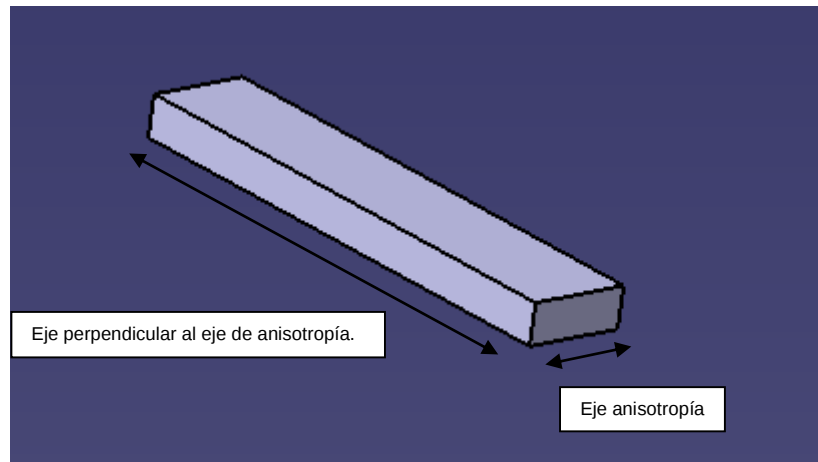


Figura 56 Ejes anisotropía probeta compresión

Tenemos otro eje de anisotropía que es el eje Z (en la dirección de deposición de las capas), pero en el apartado 6.4.1 de la norma nos dice que no hay que ensayarlo puesto que los ensayos se realizan en la dirección en que trabajarán los objetos. Considerando que en el eje Z las propiedades mecánicas empeoran mucho y es el eje que peor trabaja de todos deduzco que ninguna pieza se diseñará para trabajar en dicha dirección.

3º) Número de probetas

En el apartado 7.2 de la norma UNE-EN ISO 604:2002 nos dice que hay que ensayar al menos 10 probetas de cada muestra, 5 de ellas las ensayaremos en la dirección paralela al eje de anisotropía y otras 5 en el eje perpendicular a este.

De nuevo tendremos las mismas configuraciones que para el ensayo de tracción, con la diferencia de que ahora nos salen un total de 60 probetas a ensayar.

4º) Descripción del ensayo

- ✓ **Atmósfera de ensayo:** Realizaremos el ensayo en la atmósfera especificada en la Norma ISO 291.
- ✓ **Tolerancia dimensional de las probetas:** En primer lugar vamos a medir el espesor, anchura y longitud de las probetas en tres puntos distintos y se calcula el valor medio de su sección transversal.

De nuevo mostraremos algunas de las mediciones realizadas y al final las añadimos todas en un anexo.

PROBETAS PARA ENSAYO COMPRESIÓN											
Relleno 100% Espesor 0.24				Relleno 100% Espesor 0.10				Relleno 100% Espesor 0.3			
PROBE.1	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.1	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.1	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)
Medida1	50	10,2	4,1	Medida1	50,1	10,2	4	Medida1	50,05	10,15	4,1
Medida2	50,05	10,2	4,05	Medida2	50,15	10,2	4,1	Medida2	50,15	10,15	4
Medida3	50,05	10,15	4,15	Medida3	50,2	10,15	4,1	Medida3	50,05	10,1	4,2
Medio, Teó	50,2	10,0,2	4,0,2	Medio, Teó	50,0,2	10,0,2	4,0,2	Medio, Teó	50,2	10,0,2	4,0,2
MEDIA	50,03333333	10,18333333	4,1	MEDIA	50,15	10,18333333	4,06666667	MEDIA	50,08333333	10,13333333	4,1
PROBE.2	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.2	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.2	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)
Medida1	50,1	10,2	4,15	Medida1	50,15	10,2	4,1	Medida1	50	10,2	4,15
Medida2	50,05	10,3	4,1	Medida2	50,15	10,2	4,1	Medida2	50,1	10,2	4,1
Medida3	50,1	10,01	4,1	Medida3	50,2	10,15	4,1	Medida3	50,1	10,2	4,2
MEDIA	50,08333333	10,17	4,16666667	MEDIA	50,16666667	10,18333333	4,1	MEDIA	50,06666667	10,2	4,15
PROBE.3	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.3	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.3	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)
Medida1	50,05	10,1	4,2	Medida1	50,15	10,2	4,1	Medida1	50,1	10,2	4,2
Medida2	50,1	10,1	4,2	Medida2	50,1	10,2	4,15	Medida2	50,05	10,15	4,2
Medida3	50,05	10,1	4,1	Medida3	50,1	10,2	4,15	Medida3	50,1	10,2	4,2
MEDIA	50,06666667	10,1	4,16666667	MEDIA	50,16666667	10,2	4,13333333	MEDIA	50,08333333	10,18333333	4,2
PROBE.4	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.4	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.4	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)
Medida1	50,05	10,1	4,2	Medida1	50,1	10,2	4,2	Medida1	50	10,1	4,15
Medida2	50,05	10,2	4,2	Medida2	50,1	10,2	4,2	Medida2	50	10,1	4,1
Medida3	50,1	10,2	4,2	Medida3	50,05	10,2	4,15	Medida3	50,05	10,15	4,15
MEDIA	50,06666667	10,16666667	4,2	MEDIA	50,08333333	10,2	4,18333333	MEDIA	50,01666667	10,11666667	4,13333333
PROBE.5	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.5	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	PROBE.5	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)
Medida1	50	10,2	4,2	Medida1	50,15	10,1	4,15	Medida1	50,1	10,2	4,15
Medida2	50	10,2	4,2	Medida2	50,1	10,2	4,3	Medida2	50,05	10,15	4,1
Medida3	50,05	10,15	4,2	Medida3	50,1	10,2	4,1	Medida3	50,1	10,15	4,1
MEDIA	50,01666667	10,18333333	4,2	MEDIA	50,11666667	10,16666667	4,18333333	MEDIA	50,08333333	10,16666667	4,11666667
		10,16066667	4,15666667			10,18666667	4,13333333			10,16	4,14
Sección media=	42,2345			Sección media=	42,10489			Sección media=	42,0624		

Figura 57 Medidas probeta compresión

- ✓ Montaje: Las probetas las colocaremos entre dos discos de compresión y se alinea la línea central de dichas superficies, de manera que las superficies de las probetas se alinean con las superficies de los discos de compresión.



Figura 58 Montaje probetas ensayo compresión

Durante el proceso de compresión es posible que se produzca un deslizamiento de las probetas a lo largo de las placas de compresión, es por ello que para obtener una mayor precisión vamos a añadir discos de papel abrasivo fino entre la probeta y los discos de compresión.

En nuestro caso la máquina utilizada es la 810 Material Test System, disponible en el laboratorio de ciencias de los materiales de nuestra Universidad, cuyas propiedades se muestran a continuación.



Figura 59 Máquina de ensayo a compresión. MTS

Para este ensayo vamos a utilizar el método DIC para el cálculo de deformaciones, por lo tanto, dispondremos utilizaremos de nuevo la cámara BASLER, el trípode y un foco de luz con el objetivo de mejorar la calidad de las imágenes tomadas. Finalmente, el montaje quedará:

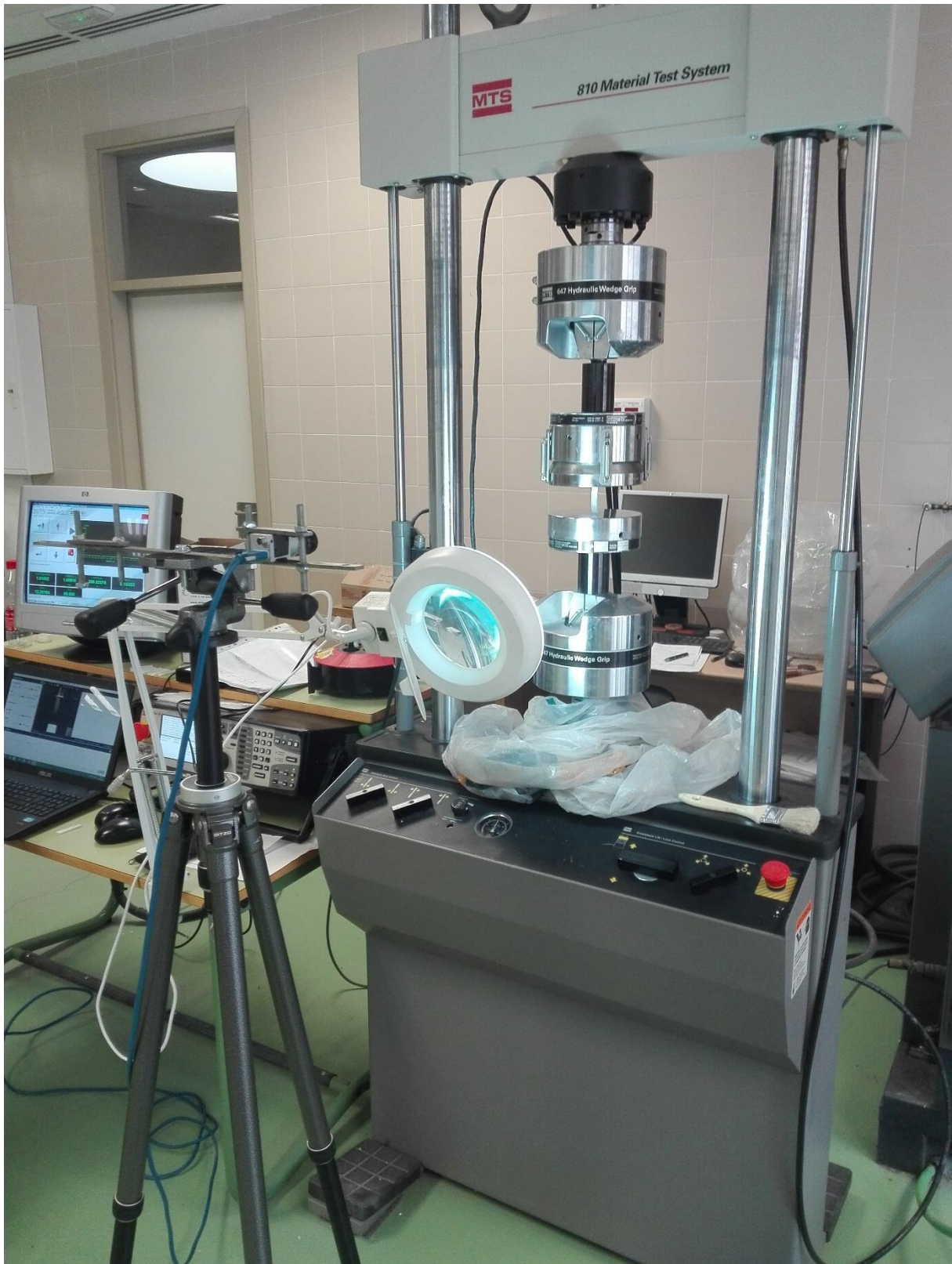


Figura 60 Montaje total ensayo compresión

- ✓ Carga previa: La probeta no debe de ser sometida a una carga previa, pero puede ser necesario someter a la probeta a dicha carga con el objetivo de eliminar el efecto escalón. (La carga previa ha de ser entre un 5% y un 10% del límite elástico).

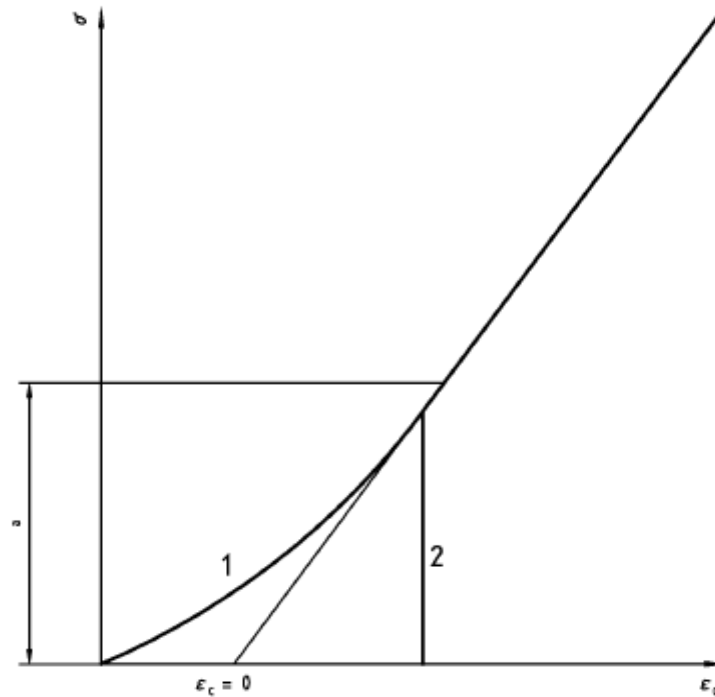


Figura 61 Carga previa ensayo compresión [28]

- ✓ Velocidad de ensayo: Las velocidades de ensayo depende de los parámetros que queremos medir y de si las probetas rompen antes o después del punto de fluencia, quedando finalmente.

Para las probetas preferentes (véase el apartado 6.1.2) las velocidades de ensayo son

1 mm/min para las mediciones del módulo ($l = 50$ mm);

1 mm/min para las mediciones de la resistencia de materiales que rompen antes de la fluencia ($l = 10$ mm);

5 mm/min para las mediciones de la resistencia de materiales con punto de fluencia ($l = 10$ mm).

- ✓ Registro de datos

Para el registro de datos utilizaremos el programa MTS 793.

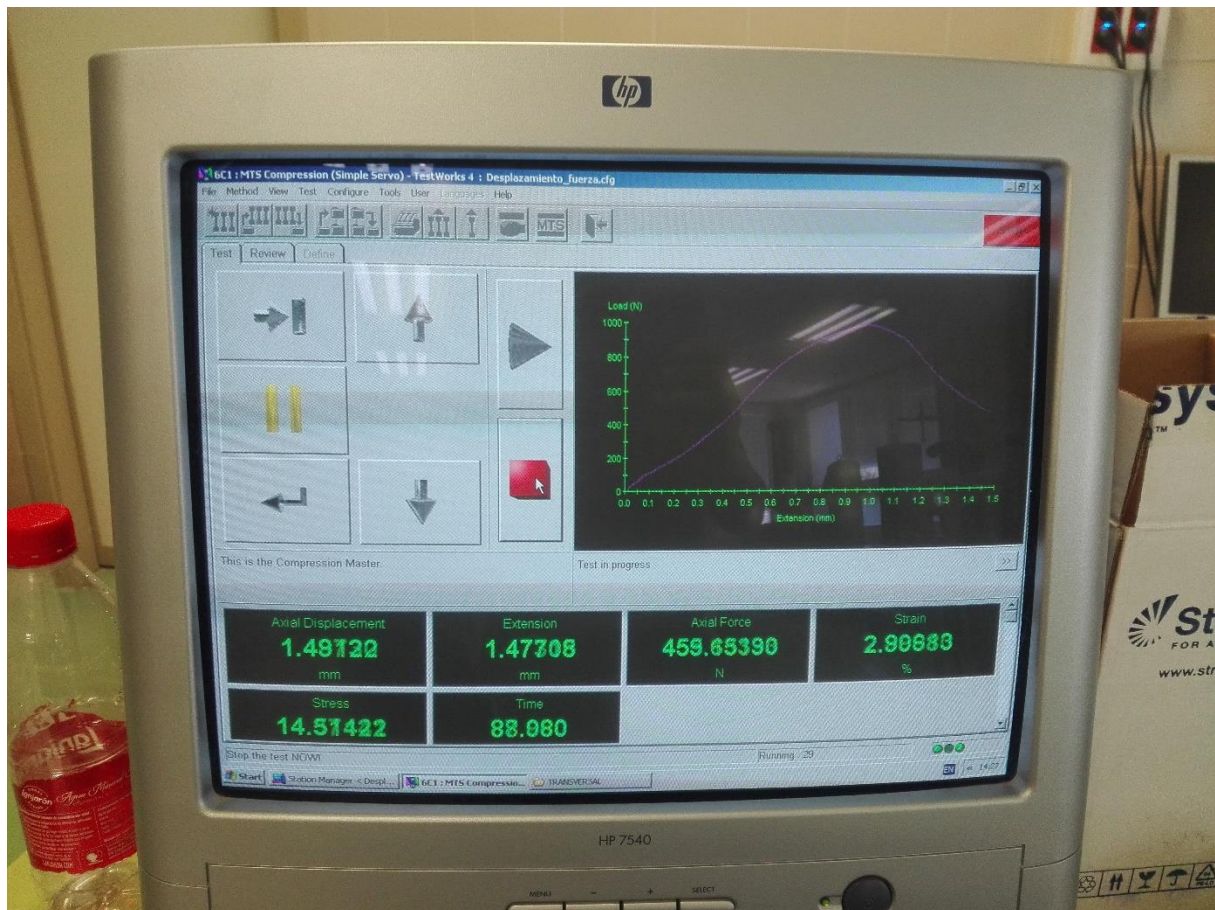


Figura 62 Programa MTS 793

4.3.1 Resultados del ensayo de compresión

- ENSAYO DIRECCIÓN LONGITUDINAL

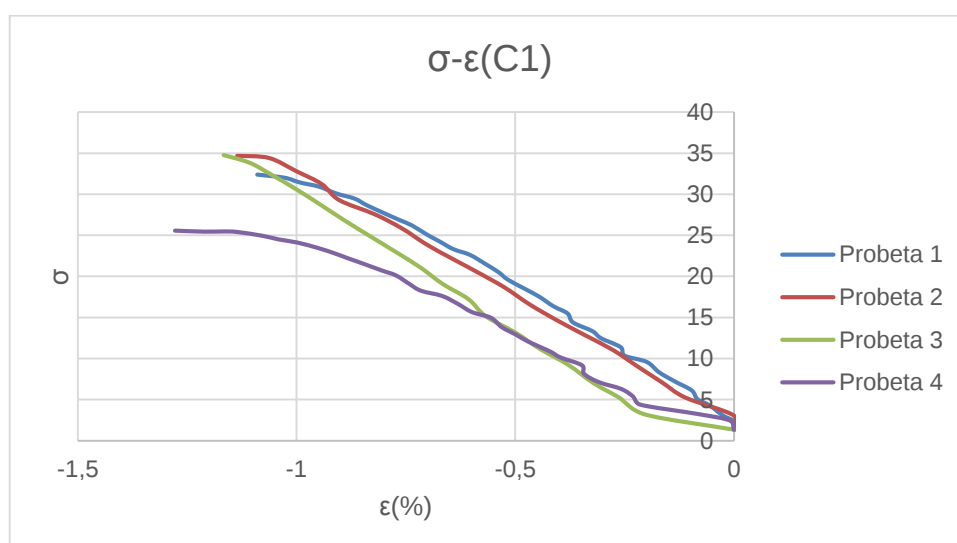


Figura 63 Probeta C1. Ensayo compresión

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
Probeta 1	3155,4	32,41121
Probeta 2	3069,5	34,67
Probeta 3	3479,2	34,78
Probeta 4	2480,7	25,577
Probeta 5	-	-
Media	3046,2	31,8595525
Desv.Típica(%)	11,8333441	11,7654311

Tabla 26 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo compresión

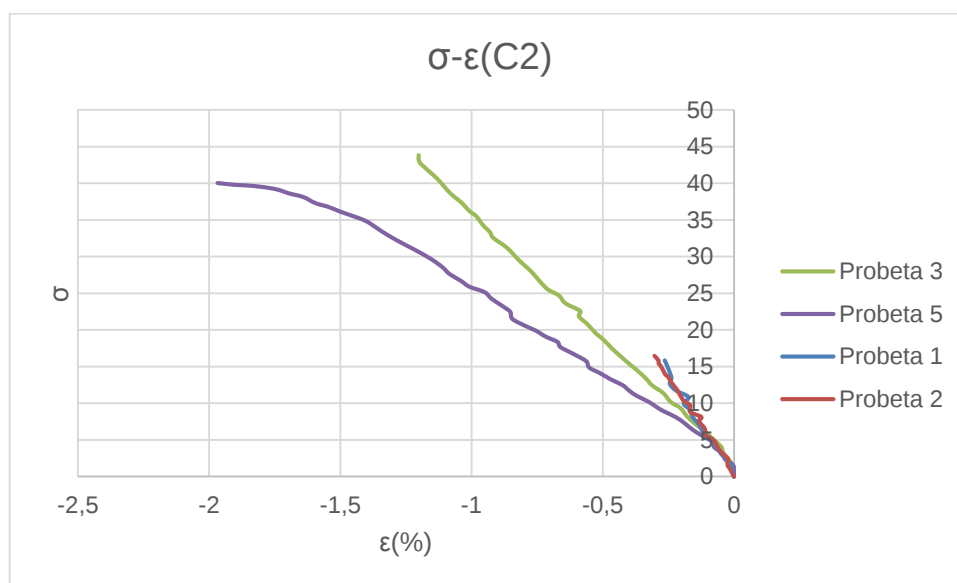


Figura 64 Probeta C2. Ensayo compresión

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
Probeta 1		
Probeta 2		
Probeta 3	3244,6	43,8197
Probeta 4	2237,6	40,0421
Probeta 5		
Media	2741,1	41,9309
Desv.Típica(%)	18,3685382	4,50455392

Tabla 27 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo compresión

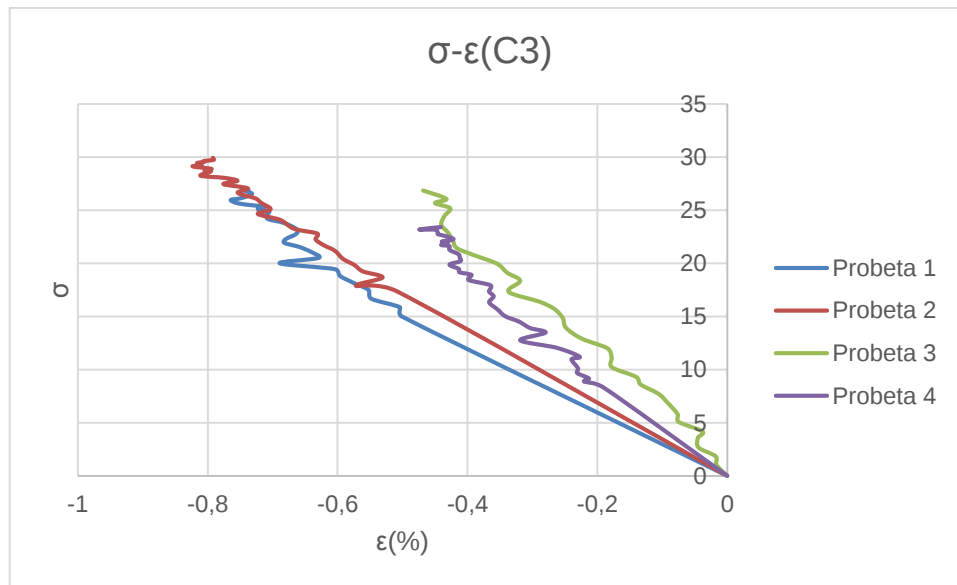


Figura 65 Probeta C3. Ensayo compresión

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$
Probeta 1	26,94589	3133,3
Probeta 2	29,94984	3416,2
Probeta 3		
Probeta 4		
Probeta 5		
Media	28,447865	3274,75
Desv.Típica(%)	4,3194137	5,27974595

Tabla 28 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo compresión

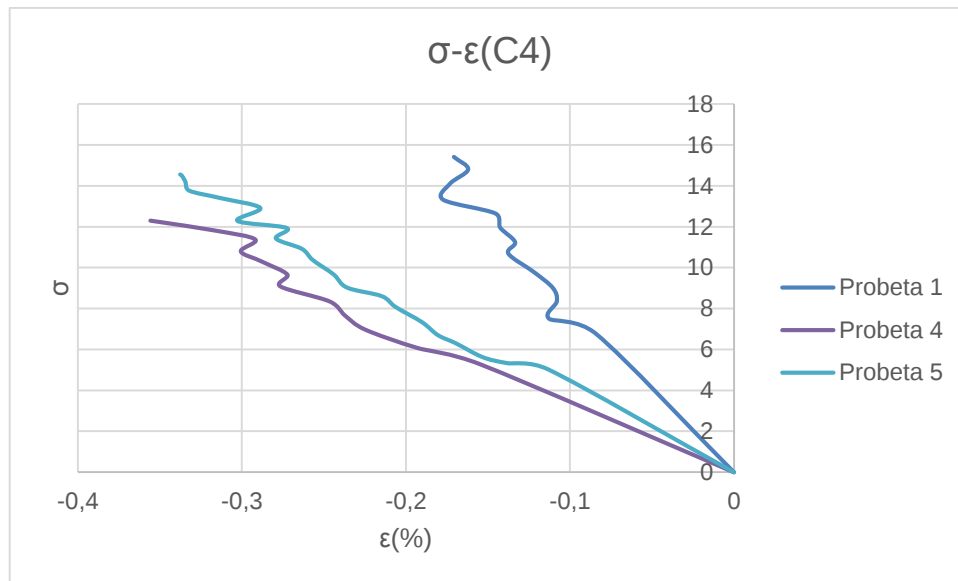


Figura 66 Probeta C4. Ensayo compresión

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$
Probeta 1	15,41129	-
Probeta 2	-	-
Probeta 3	-	-
Probeta 4	12,29709	3257,8
Probeta 5	14,555034	3944,9
Media	14,0878047	3601,35
Desv.Típica(%)	9,53947825	9,32432357

Tabla 29 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo compresión

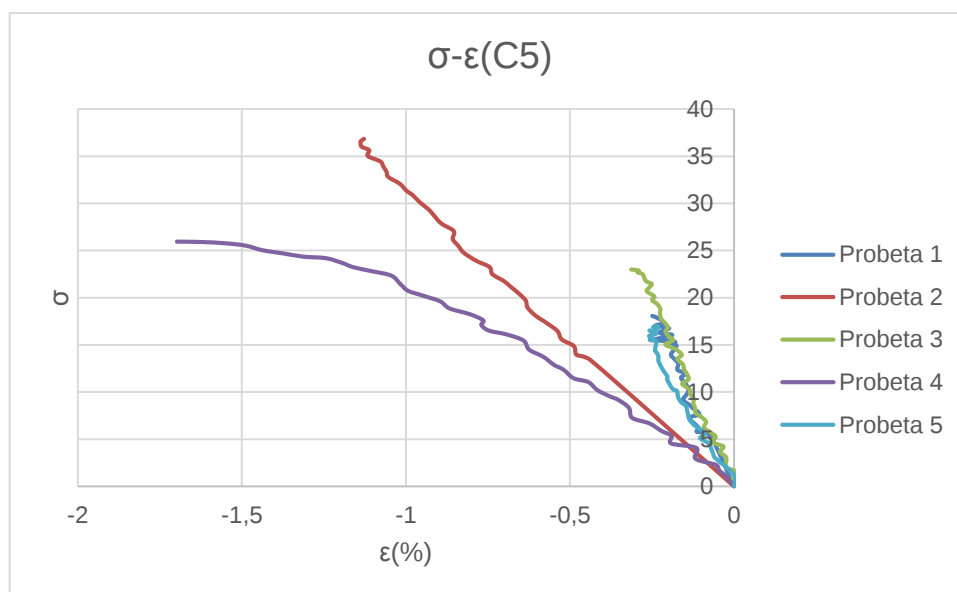


Figura 67 Probeta C5. Ensayo compresión

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$
Probeta 1		
Probeta 2	3006,8	36,833
Probeta 3	4451,7	23,002
Probeta 4	1993,9	25,9369
Probeta 5		
Media	3150,8	28,5906333
Desv.Típica(%)	32,0092004	20,8114261

Tabla 30 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo compresión

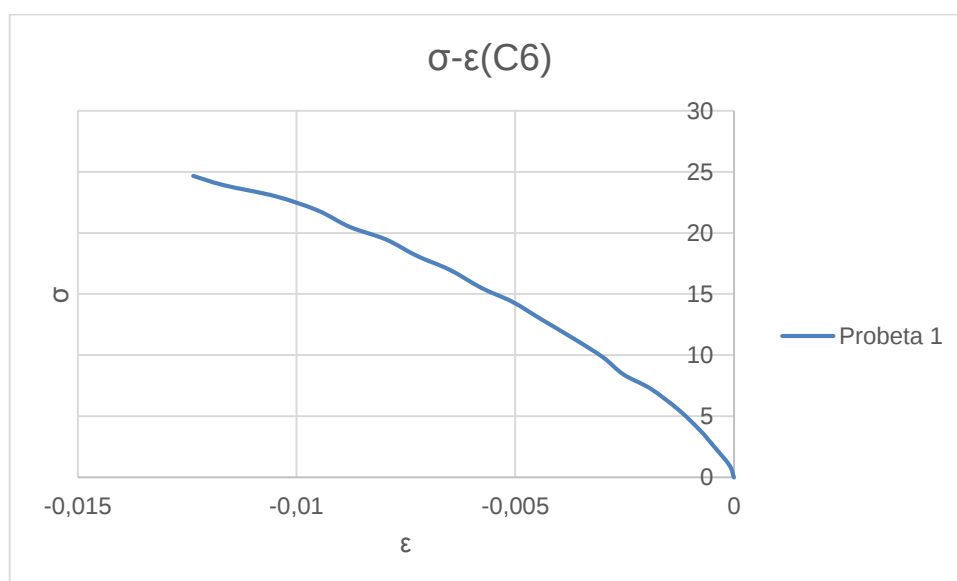


Figura 68 Probeta C6. Ensayo compresión

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
PROBETA 1	1672,1	24,657
PROBETA 2	-	-
PROBETA 3	-	-
PROBETA 4	-	-
PROBETA 5	-	-
MEDIA	1672,1	24,657
DESV.TÍPICA	0	0

Tabla 31 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo compresión

A continuación, se muestran los valores medios para estas probetas:

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
C1	3046,2	31,8595525
C2	2741,1	41,9309
C3	3274,75	28,447865
C4	3601,35	14,0878047
C5	3150,8	28,5906333
C6	1672,1	24,657

Tabla 32 Propiedades mecánicas probeta tipo C. Ensayo compresión

- ENSAYO DIRECCIÓN TRANSVERSAL

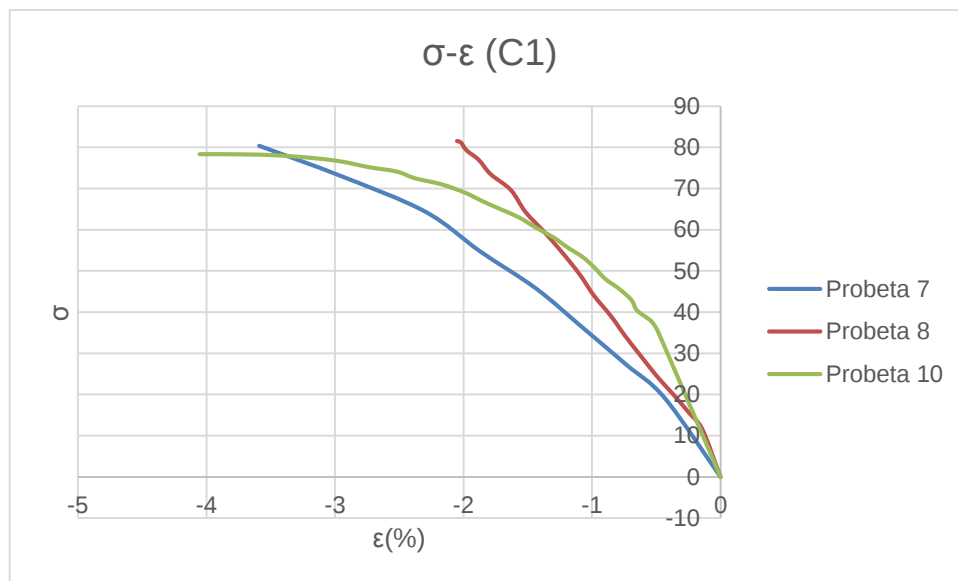


Figura 69 Probeta C1. Ensayo compresión

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$
Probeta 1	-	-
Probeta 2	2817,4	84,57189
Probeta 3	4628,9	81,5034
Probeta 4	-	-
Probeta 5	3272,3	78,3556
Media	3572,86667	81,4769633
Desv.Típica(%)	21,5366357	3,11481738

Tabla 33 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo compresión

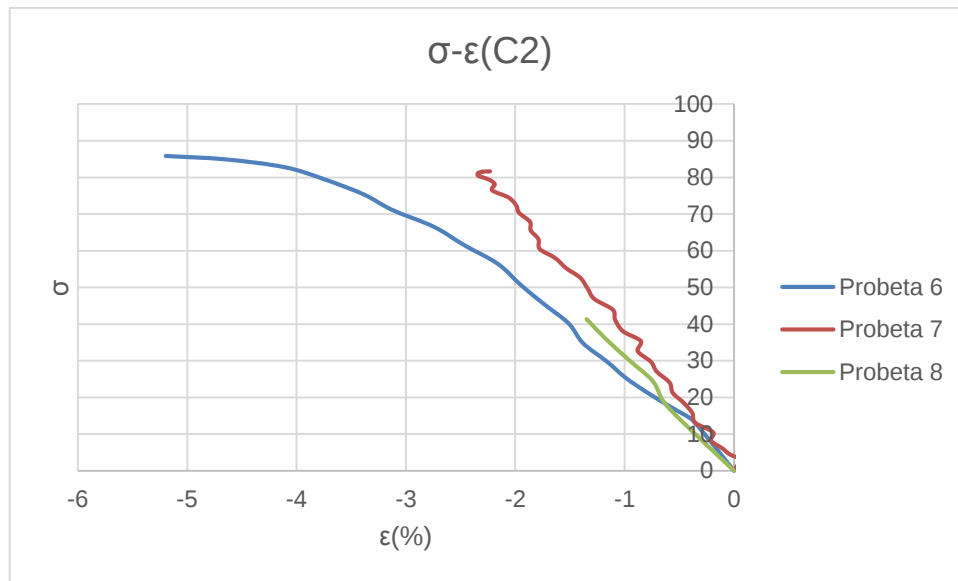


Figura 70 Probeta C2. Ensayo compresión

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
Probeta 1	2598,3	85,8131
Probeta 2	3623	81,6833
Probeta 3	3114,4	84,6633
Probeta 4	-	-
Probeta 5	-	-
Media	3111,9	84,0532333
Desv.Típica(%)	13,4430977	2,07046946

Tabla 34 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo compresión

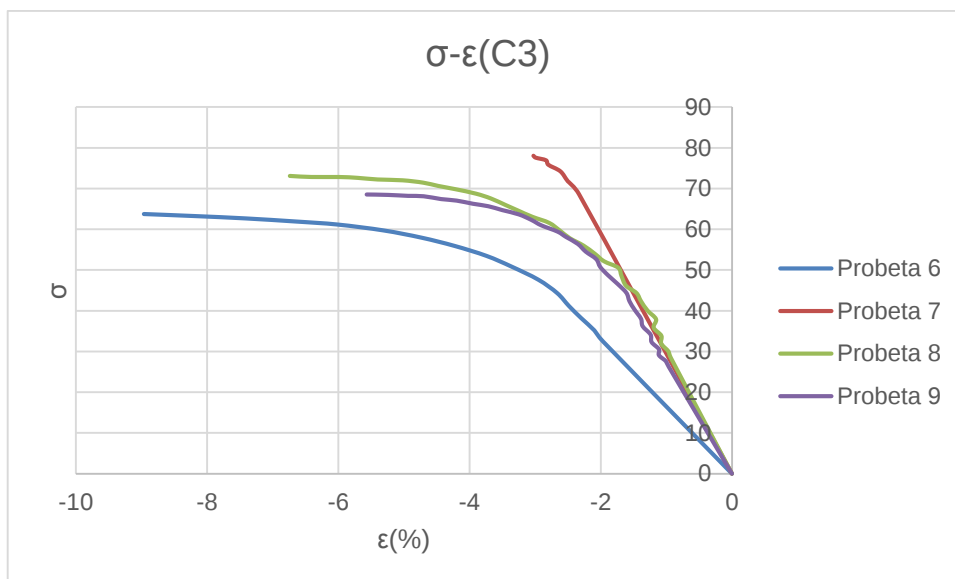


Figura 71 Probeta C3. Ensayo compresión

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$
Probeta 1	1662,7	64,4252
Probeta 2	3001,6	78,06752
Probeta 3	3089,6	73,06414
Probeta 4	2707,1	68,57759
Probeta 5	-	-
Media	2932,76667	73,2364167
Desv.Típica	5,57714441	5,29267073

Tabla 35 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo compresión

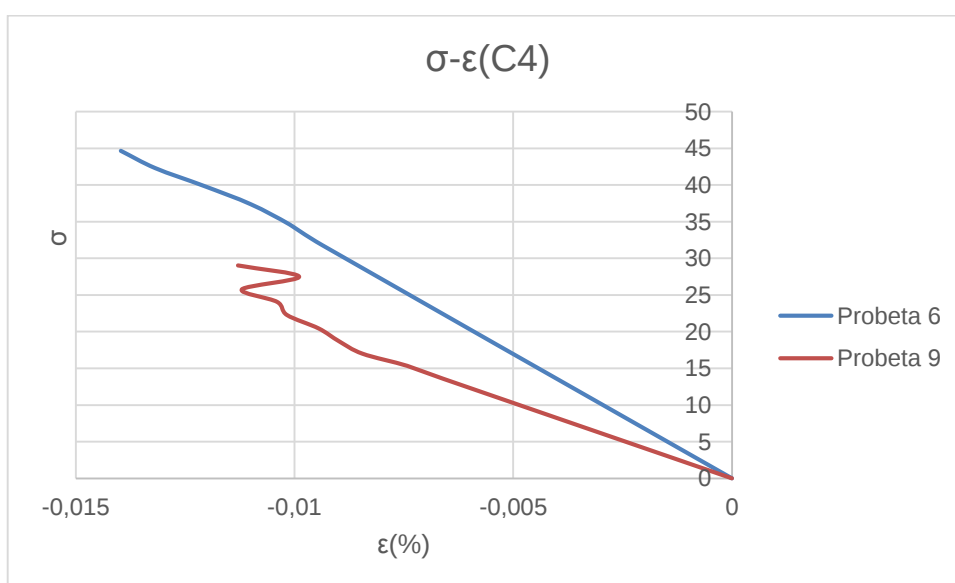


Figura 72 Probeta C4. Ensayo compresión

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$
Probeta 1	3405,7	44,675
Probeta 2		
Probeta 3		
Probeta 4	2053,6	30,5563
Probeta 5		
Media	2729,65	37,61565
Desv.Típica	24,7669115	18,7670557

Tabla 36 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo compresión

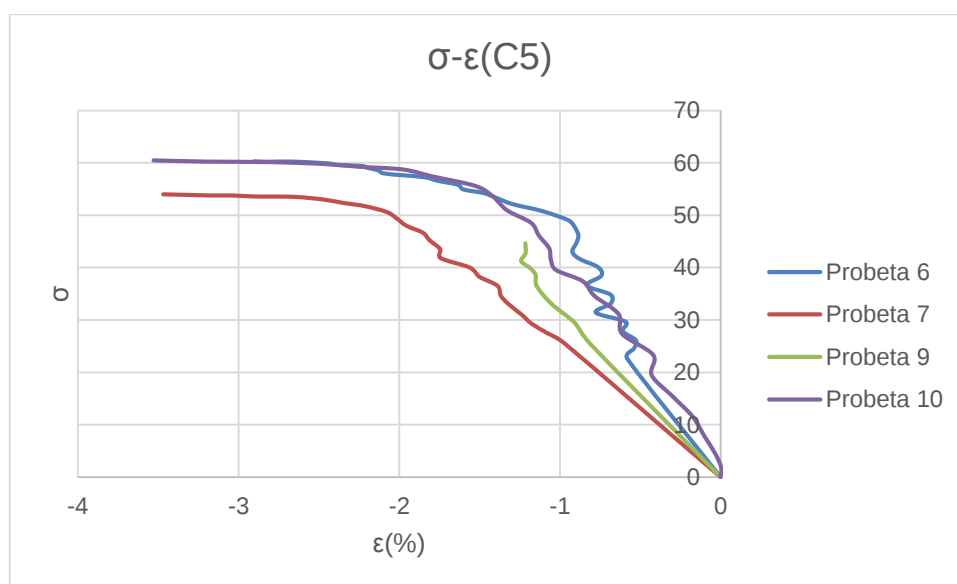


Figura 73 Probeta C5. Ensayo compresión

	$E(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$
Probeta 1	4708,7	60,25534
Probeta 2	2547,8	53,96629
Probeta 3	-	-
Probeta 4	3177,3	44,62919
Probeta 5	3159,6	60,4664
Media	2961,56667	53,0206267
Desv.Típica(%)	9,88214915	12,2593812

Tabla 37 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo compresión

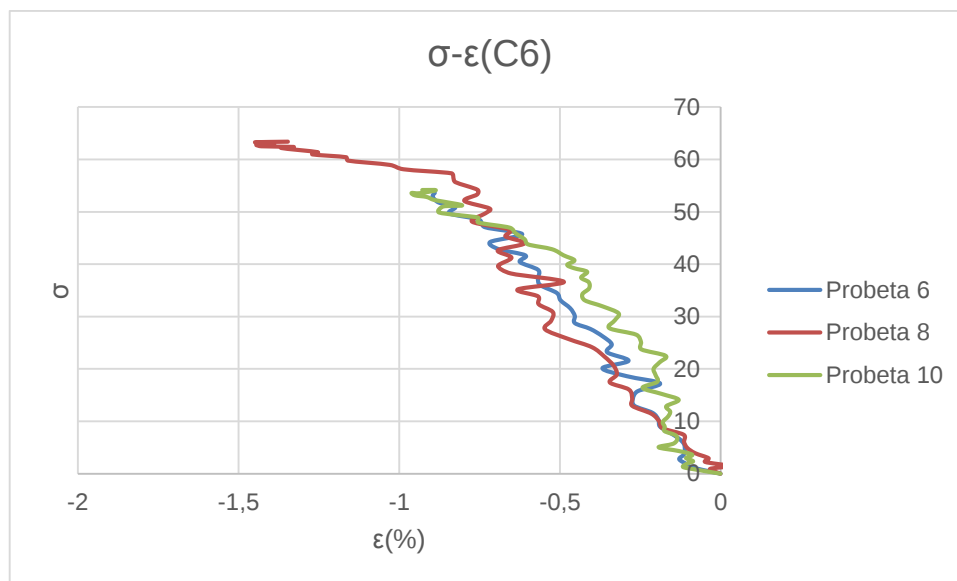


Figura 74 Probeta C6. Ensayo compresión

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
Probeta 1	6018,7	51,59428
Probeta 2	-	-
Probeta 3	7054,2	63,53128
Probeta 4	-	-
Probeta 5	5509,9	51,14967
Media	6194,26667	55,4250767
Desv.Típica(%)	10,3735334	10,3469853

Tabla 38 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo compresión

A continuación, se muestran los valores medios de las propiedades de las probetas:

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)
C1	3572,86667	81,4769633
C2	3111,9	84,0532333
C3	2932,76667	73,2364167
C4	2729,65	37,61565
C5	2961,56667	53,0206267
C6	6194,26667	55,4250767

Tabla 39 Propiedades mecánicas probeta C. Ensayo compresión

4.4 Ensayo de cortante

Para realizar el ensayo a cortante vamos a utilizar la norma D 5379/D 5379 M.

1º En primer lugar vamos a definir la forma y dimensiones de las probetas.

Para este ensayo las probetas tendrán forma rectangular con dos muescas en forma de V situadas en el centro de la probeta de forma simétrica. A continuación, mostramos un esquema y dimensiones de las mismas.

4.1 A material coupon in the form of a rectangular flat strip with symmetrical centrally located v-notches, shown schematically in Fig. 2, is loaded in a mechanical testing machine by a

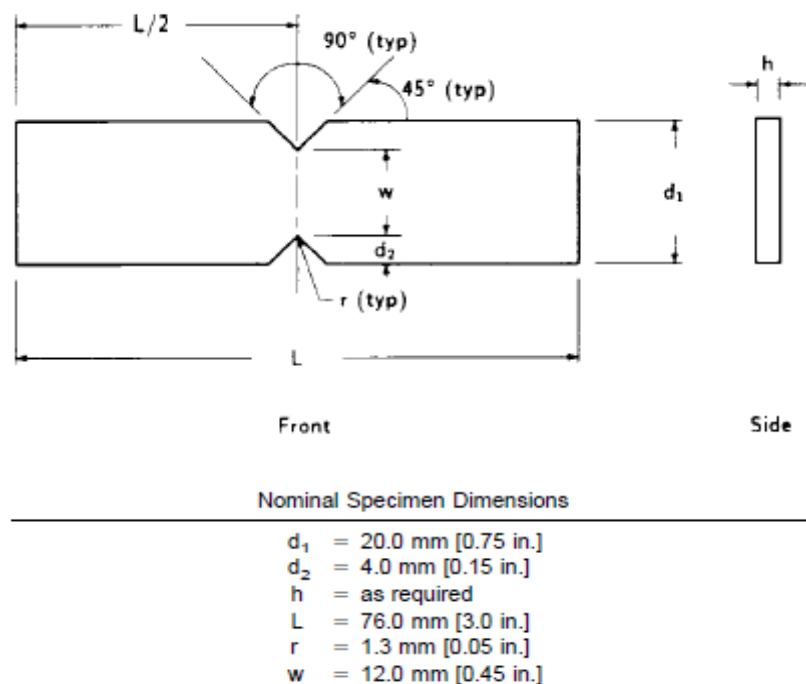


FIG. 2 V-Notched Beam Test Coupon Schematic

Figura 75 Esquema probeta cortante [29]

2º Para llevar a cabo este ensayo tenemos que ensayar las probetas impresas en posición horizontal, vertical y de canto.

3º A continuación vamos a definir el número de probetas que debemos ensayar. Según el apartado 8 de la norma D5379/D 5379M debemos de ensayar 5 probetas para cada una de las posiciones y condiciones en las que nos encontramos. En nuestro caso vamos a variar el espesor de capa y el porcentaje de relleno tal y como hemos explicado en apartados anteriores.

3º Descripción del ensayo

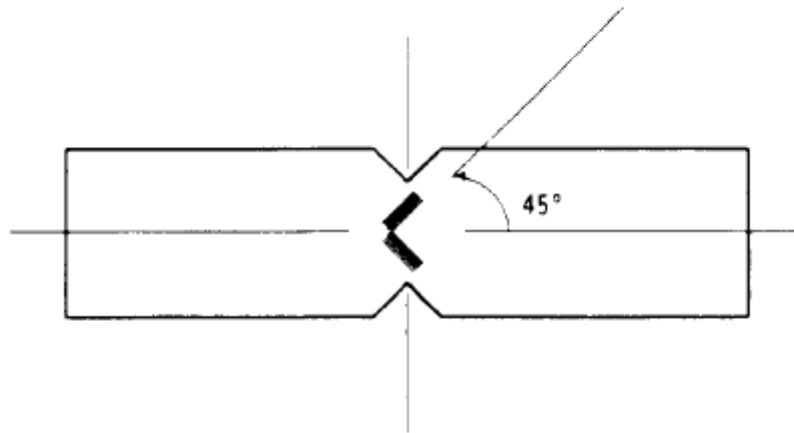
- ✓ Antes de comenzar con los ensayos debemos de comprobar las medidas de las probetas, para ello vamos a medir longitud, espesor, anchura, ángulo y radio de cada probeta en la zona de la muesca, con el objetivo de comprobar que cumplen las tolerancias dimensionales citadas anteriormente.
Una vez testeadas dichas dimensiones vamos a calcular la sección de la zona de la muesca.

PROBETAS PARA ENSAYO CORTANTE				
POSICIÓN VERTICAL				
	Relleno 100%	Espesor 0,24	(A1)	
PROBE.1	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)
Medida1	76	20	4	13
Medida2	76	20,05	4,1	13
Medida3	75,9	20,05	4,05	13
Medo.Teórico	76	20	-	12 (NOTA ABAJO)
MEDIA	75,96666667	20,03333333	4,05	13
PROBE.2	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)
Medida1	75,8	20	4,1	13,2
Medida2	75,9	20	4,2	13,3
Medida3	75,9	20	4,15	13,3
MEDIA	75,86666667	20	4,15	13,26666667
PROBE.3	Longitud(mm)	Anchura, b(mm)	Espesor, h(mm)	anchura(Sección pequeña)(mm)
Medida1	75,9	20	4,1	13,1
Medida2	75,8	20	4,15	13,2
Medida3	75,9	20	4,1	13,15
MEDIA	75,86666667	20	4,116666667	13,15
			4,105555556	13,13888889
Sección media=	53,94243827			

Figura 76 Medidas probeta cortante

- ✓ A continuación, nos dice donde tenemos que situar el extensómetro. En nuestro caso no vamos a utilizar extensómetro, pero sí es necesario tomar la referencia para el procesado con DIC. En concreto dice que debemos de colocarlo en la región de la muesca con un ángulo de 45°.

¹² A typical gage would have a 0.062- to 0.125-in. active gage length, 350- Ω resistance, a strain rating of 3 % or better, and the appropriate environmental resistance and thermal coefficient.



NOTE 1—The active elements of two orthogonal strain gages are centered between the notch roots at the angle shown. The elements may be independent, or in a stacked or or unstacked rosette.

FIG. 6 Strain Gage Locations

Figura 77 Colocación extensómetros ensayo cortante [29]

- ✓ En tercer lugar, vamos a definir la velocidad de ensayo, según la norma la velocidad estándar está en 2mm/min, en nuestro caso utilizamos 1mm/min debido a que las probetas rompían muy rápido.
- ✓ La maquinaria que vamos a utilizar para este ensayo en la INSTRON, para ello vamos a utilizar las siguientes mordazas.



Figura 78 Mordazas ensayo cortante

Una de ellas debe de permanecer fija, en mi caso es la superior, y otra debe permanecer móvil.



Figura 79 Colocación mordazas

Finalmente colocamos la probeta en las mordazas y comenzamos con el ensayo.



Figura 80 Colocación ensayo cortante

4.4.1 Resultados del ensayo de cortante

La deformación se ha obtenido, al igual que en los ensayos anteriores, mediante el procesado DIC de las imágenes obtenidas. En la imagen se observa la ventana del programa VIC, donde se ha empleado un extensómetro virtual para extraer los valores de deformación a lo largo del ensayo.

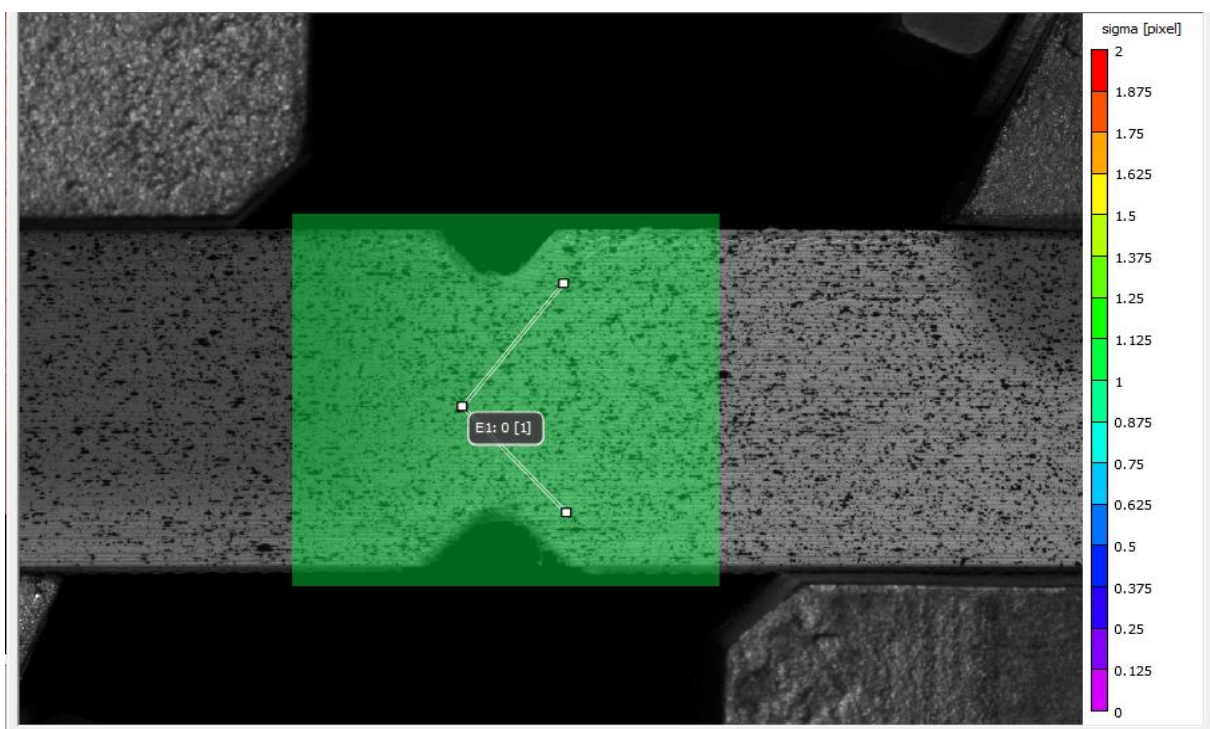


Figura 81 Colocación extensómetro en Vic 2D para el cálculo de las deformaciones

- PROBETA TIPO A

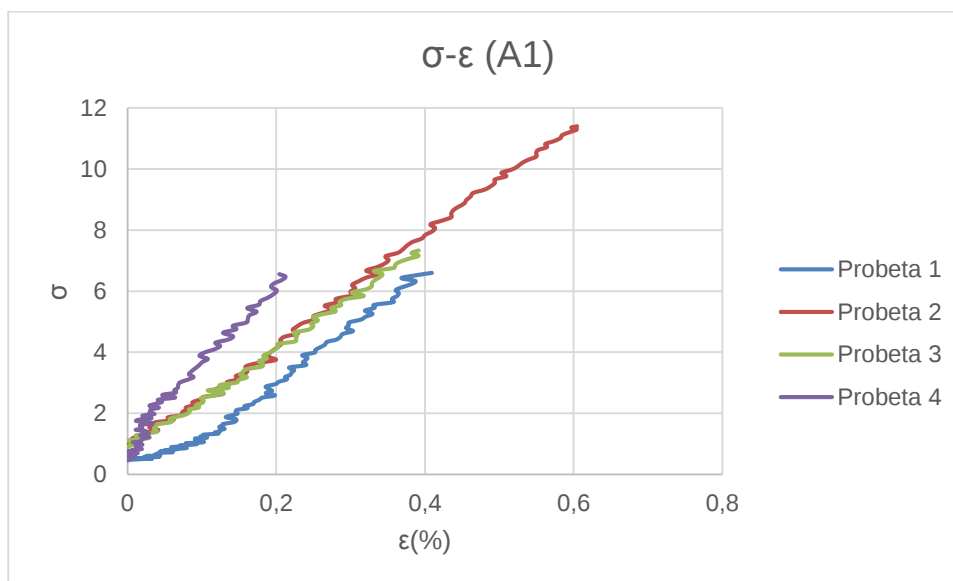


Figura 82 Probeta A1. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2039,1	6,6018	6,6018	0,00409
Probeta 2	1803,4	11,396	11,396	0,006047
Probeta 3	1672,9	7,33238	7,33238	0,003916
Probeta 4	2206,2	6,5526	6,5526	0,00204
Probeta 5	-	-	-	-
Media	1930,4	7,970695	7,970695	0,00402325
Desv.Típica(%)	10,6893466	25,1115316	25,1115316	35,2493152

Tabla 40 Propiedades mecánicas probeta A1. Ensayo cortante

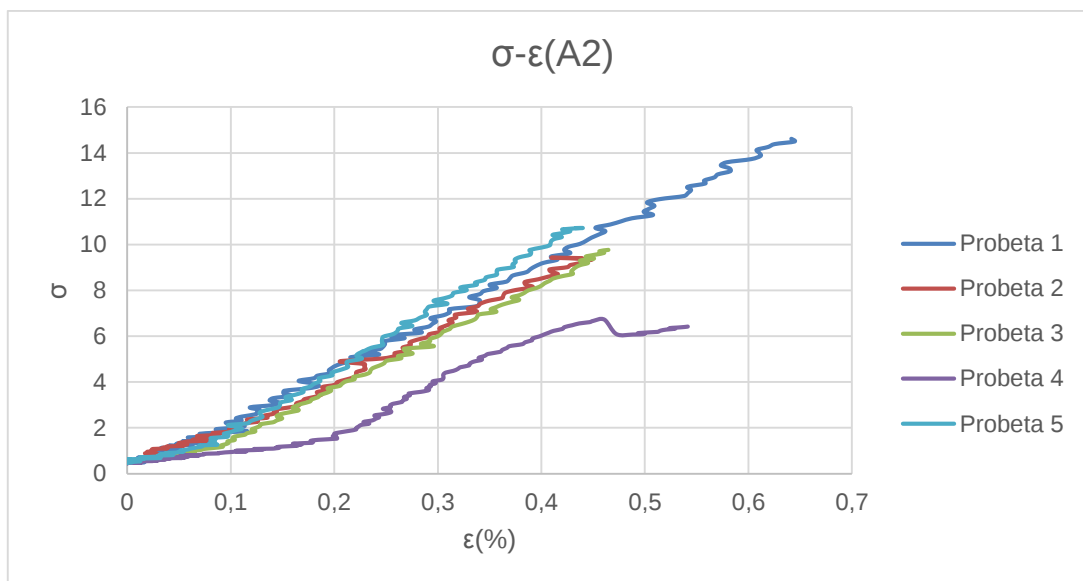


Figura 83 Probeta A2. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2336,5	14,6203	14,6203	0,0064
Probeta 2	1913,5	9,4023	9,4023	0,00439
Probeta 3	2272	9,7627	9,7627	0,004648
Probeta 4	2297,2	6,4155	6,4155	0,00541
Probeta 5	2779,6	10,7175	10,7175	0,004329
Media	2319,76	10,18366	10,18366	0,0050354
Desv.Típica(%)	11,8773076	25,963844	25,963844	15,5565864

Tabla 41 Propiedades mecánicas probeta A2. Ensayo cortante

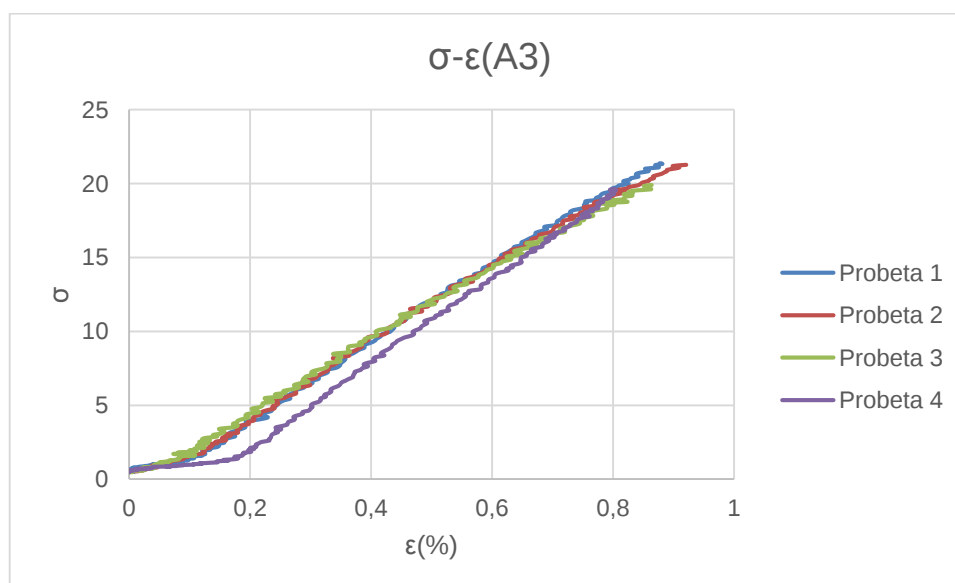


Figura 84 Probeta A3. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2710,7	21,37492	21,37492	0,00877
Probeta 2	2687,6	21,27949	21,27949	0,0092
Probeta 3	2589,8	19,9017	19,9017	0,008641
Probeta 4	3064	19,5885	19,5885	0,00795
Probeta 5	-	-	-	-
Media	2763,025	20,5361525	20,5361525	0,00864025
Desv.Típica(%)	6,4999974	3,89302453	3,89302453	5,1972428

Tabla 42 Propiedades mecánicas probeta A3. Ensayo cortante

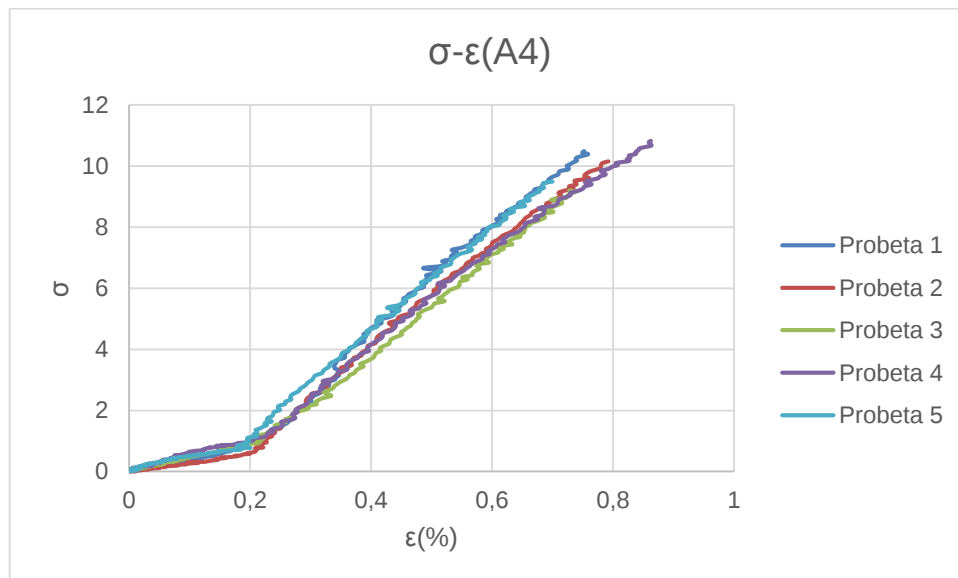


Figura 85 Probeta A4. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	1759	10,4848	10,4848	0,0075
Probeta 2	1735	10,1566	10,1566	0,0079
Probeta 3	1642,7	9,2033	9,2033	0,007278
Probeta 4	1633,9	10,8271	10,8271	0,0086
Probeta 5	1657,5	9,4976	9,4976	0,007
Media	1685,62	10,03388	10,03388	0,0076556
Desv.Típica(%)	3,04019457	6,02119994	6,02119994	7,26863918

Tabla 43 Propiedades mecánicas probeta A4. Ensayo cortante

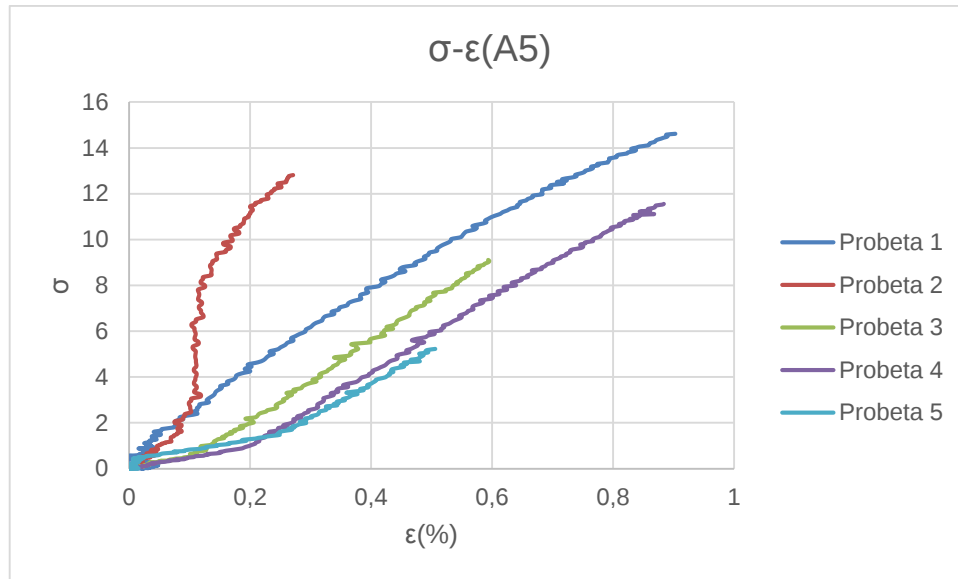


Figura 86 Probeta A5. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	1880,5	14,6118	14,6118	0,00903
Probeta 2	-	-	-	-
Probeta 3	1802,2	9,10797	9,10797	0,00594
Probeta 4	1684,1	11,5548	11,5548	0,0088
Probeta 5	1447,1	-	-	0,00506
Media	1703,475	11,75819	11,758799	0,0072075
Desv.Típica(%)	9,60964488	19,1485863	19,1414988	24,1070827

Tabla 44 Propiedades mecánicas probeta A5. Ensayo cortante

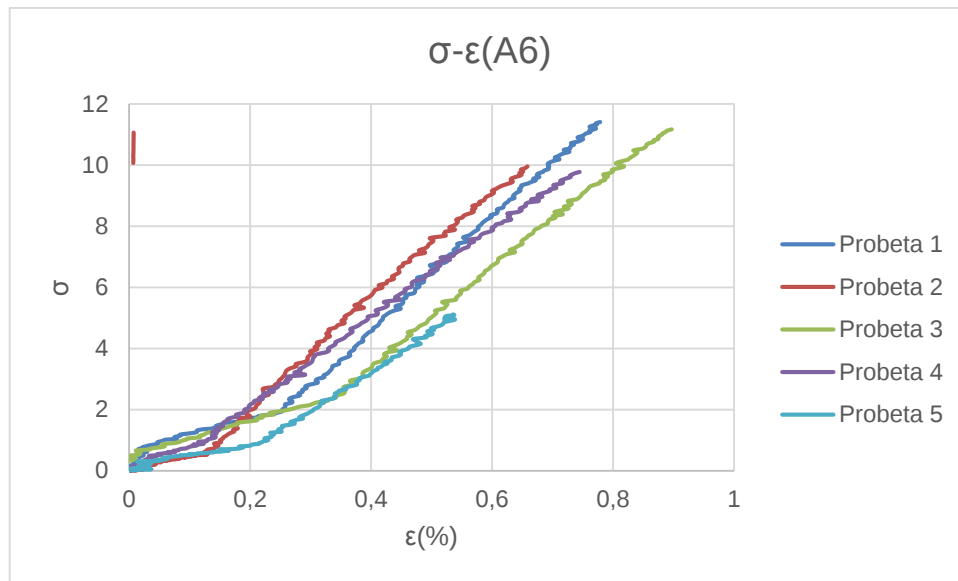


Figura 87 Probeta A6. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	1913,1	11,4158	11,4158	0,00778
Probeta 2	1796,4	11,07158	11,07158	0,00729
Probeta 3	1633,5	11,1747	11,1747	0,00897
Probeta 4	1490,5	9,78278	9,78278	0,00745
Probeta 5	-	-	-	-
Media	1708,375	10,861215	10,861215	0,0078725
Desv.Típica(%)	9,38100129	5,84687715	5,84687715	8,35584139

Tabla 45 Propiedades mecánicas probeta A6. Ensayo cortante

A continuación, se muestran los valores medios de las probetas:

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
A1	1930,4	7,970695	7,970695	0,00402325
A2	2319,76	10,18366	10,18366	0,0050354
A3	2763,025	20,5361525	20,5361525	0,00864025
A4	1685,62	10,03388	10,03388	0,0076556
A5	1703,475	11,75819	11,758799	0,0072075
A6	1708,375	10,861215	10,861215	0,0078725

Tabla 46 Propiedades mecánicas probeta tipo A. Ensayo cortante

⇒ Gráfica media probeta tipo A

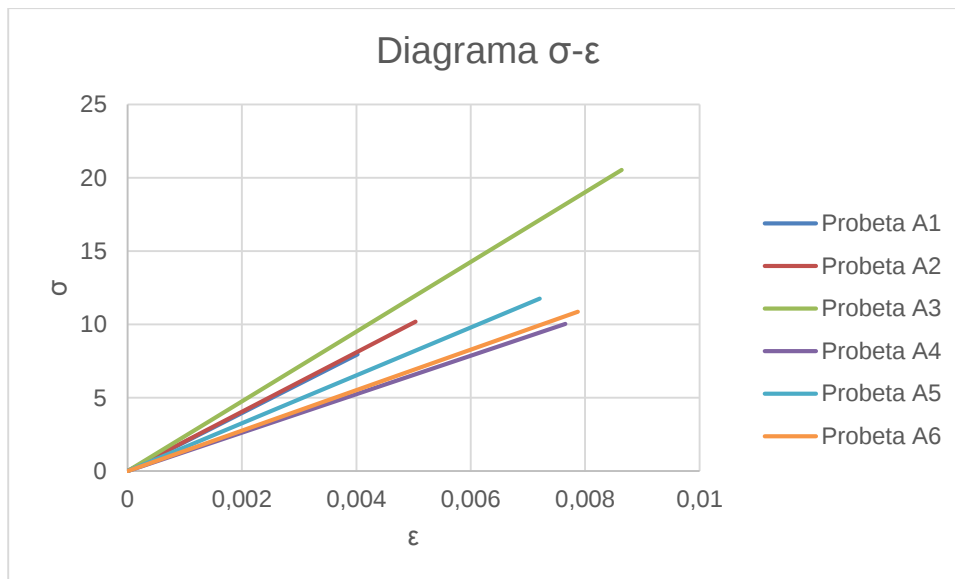


Figura 88 Gráfica media probeta tipo A. Ensayo cortante

- PROBETA TIPO B

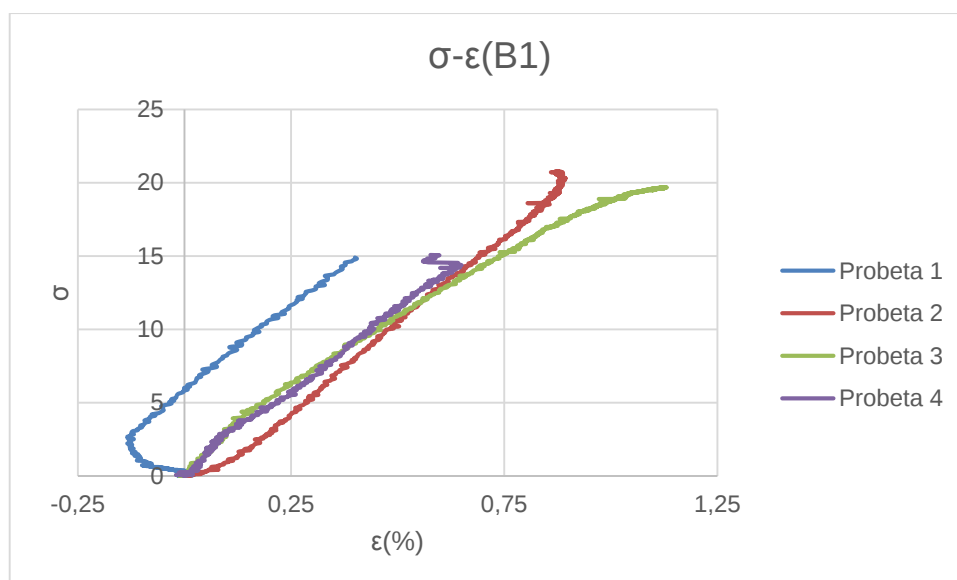


Figura 89 Probeta tipo B1. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	-	-	-	-
Probeta 2	2494,3	20,6175	20,6175	0,008699
Probeta 3	1766,5	19,5954	19,468	0,01098
Probeta 4	2371,2	17,8255	17,8255	0,0109
Probeta 5	2805,9	17,43	17,43	
Media	2359,475	18,8671	18,83525	0,010193
Desv.Típica(%)	15,9881595	6,88240128	6,80484116	10,369099

Tabla 47 Propiedades mecánicas probeta B1. Ensayo cortante

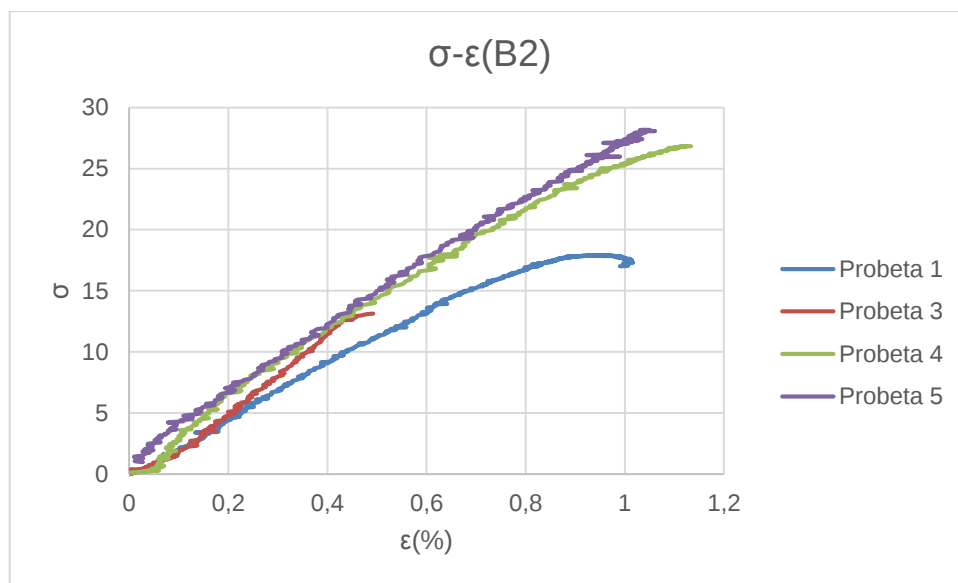


Figura 90 Probeta tipo B2. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2278	17,88127	17,005	0,0099
Probeta 2	-	-	-	-
Probeta 3	3283,5	19,49	19,49	-
Probeta 4	2480,4	26,8347	26,8347	0,011337
Probeta 5	2708,4	28,149	28,149	0,0103
Media	2687,575	24,2883233	23,9962333	0,01051233
Desv.Típica(%)	13,9993274	18,7832384	20,7223428	5,76048211

Tabla 48 Propiedades mecánicas probeta B2. Ensayo cortante

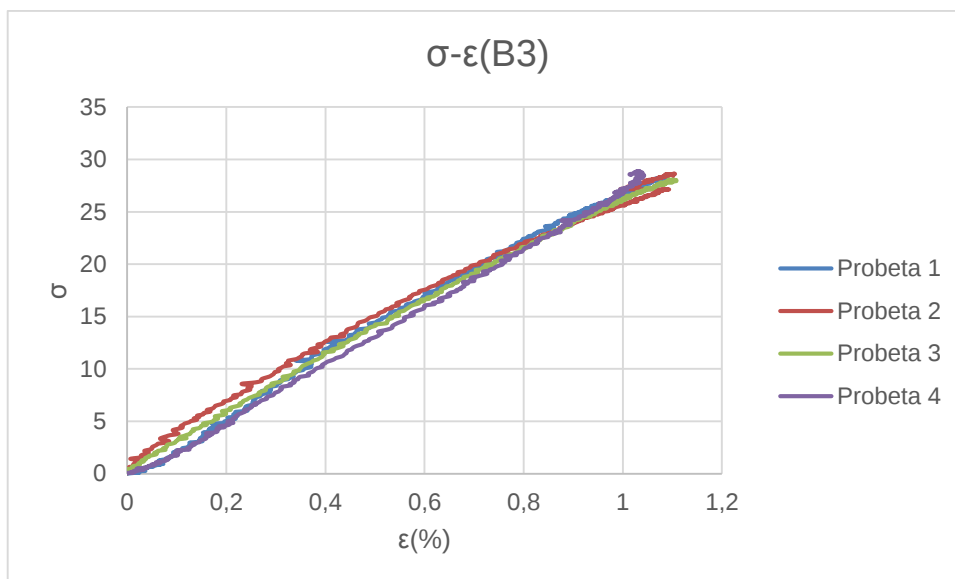


Figura 91 Probeta tipo B3. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2463,5	28,2075	28,2075	0,0107
Probeta 2	2525,7	28,4139	28,4139	0,01102
Probeta 3	2567,7	28,061	28,061	0,011023
Probeta 4	2675,4	28,5103	28,5103	0,010169
Probeta 5	-	-	-	-
Media	2558,075	28,298175	28,298175	0,010728
Desv.Típica	3,01859097	0,6193306	0,6193306	3,2476559

Tabla 49 Propiedades mecánicas probeta B3. Ensayo cortante

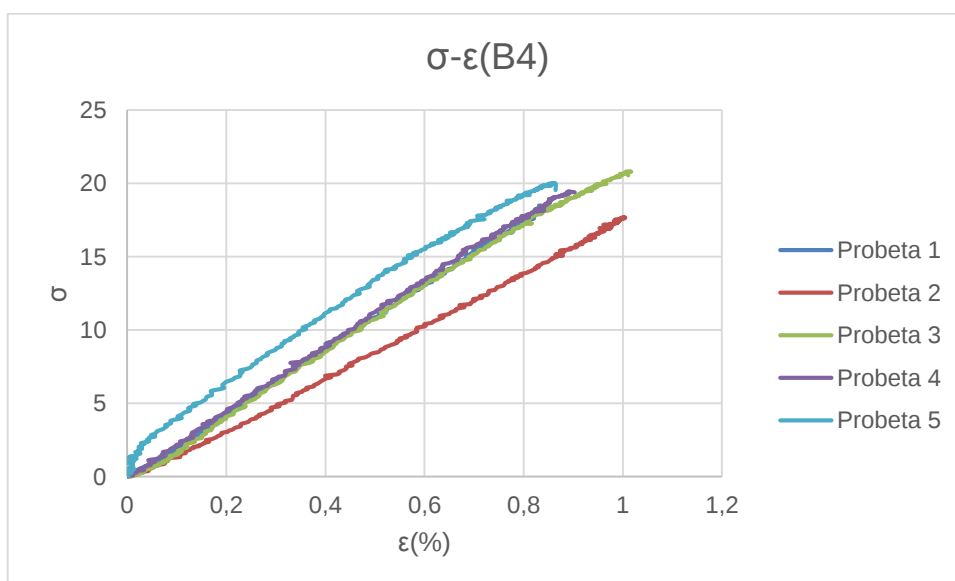


Figura 92 Probeta tipo B4. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2149,8	18,4855	18,4855	0,0083
Probeta 2	1794,9	17,564	17,564	0,00997
Probeta 3	2249,6	20,8163	20,8163	0,01007
Probeta 4	2267,1	19,3955	19,3955	0,00903
Probeta 5	2298,8	20,004	20,004	0,0086
Media	2152,04	19,25306	19,25306	0,009194
Desv.Típica(%)	8,61466674	5,90836184	5,90836184	7,76523354

Tabla 50 Propiedades mecánicas probeta B4. Ensayo cortante

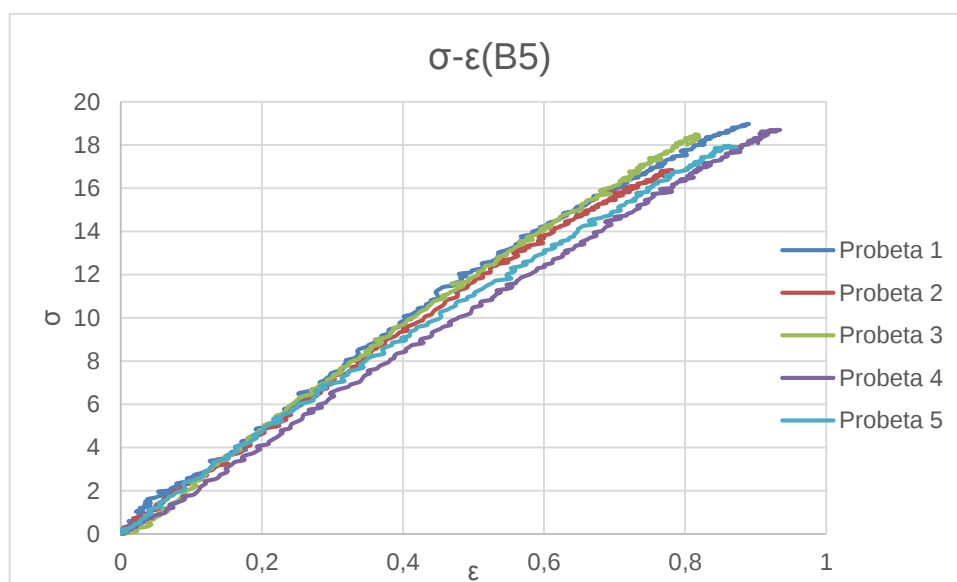


Figura 93 Probeta tipo B5. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2473,8	18,97495	18,97495	0,0089
Probeta 2	2237,2	16,5419	16,5419	0,00769
Probeta 3	2197,6	18,4753	18,4753	0,008167
Probeta 4	2008,5	18,6956	18,6956	0,00934
Probeta 5	2017,5	17,5534	17,5534	0,00836
Media	2186,92	18,04823	18,04823	0,0084914
Desv.Típica(%)	7,79978113	4,93973658	4,93973658	6,76888216

Tabla 51 Propiedades mecánicas probeta B5. Ensayo cortante

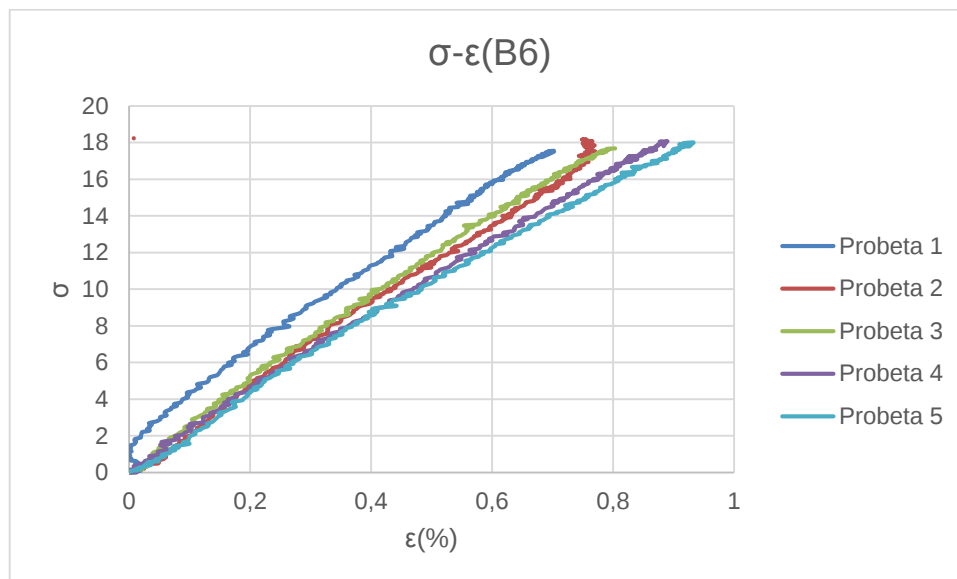


Figura 94 Probeta tipo B6. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2177,7	17,5547	17,5547	0,007018
Probeta 2	2170,7	18,2436	18,2436	0,007485
Probeta 3	2208,2	17,6864	17,6864	0,00803
Probeta 4	1911,3	18,0755	18,0755	0,00889
Probeta 5	1955,2	17,966	17,966	0,00916
Media	2084,62	17,90524	17,90524	0,0081166
Desv.Típica(%)	5,99668151	1,40833304	1,40833304	10,0094241

Tabla 52 Propiedades mecánicas probeta B6. Ensayo cortante

A continuación, se representan los valores medios:

	G(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
B1	2359,475	18,8671	18,83525	0,010193			
B2	2687,575	24,2883233	23,9962333	0,01051233	4,00E+16	-8,00E+13	5,00E+10
B3	2558,075	28,298175	28,298175	0,010728			
B4	2152,04	19,25306	19,25306	0,009194			
B5	2186,92	18,04823	18,04823	0,0084914			
B6	2084,62	17,90524	17,90524	0,0081166			

Tabla 53 Propiedades mecánicas probeta tipo B. Ensayo cortante

⇒ Gráfica media probeta tipo B

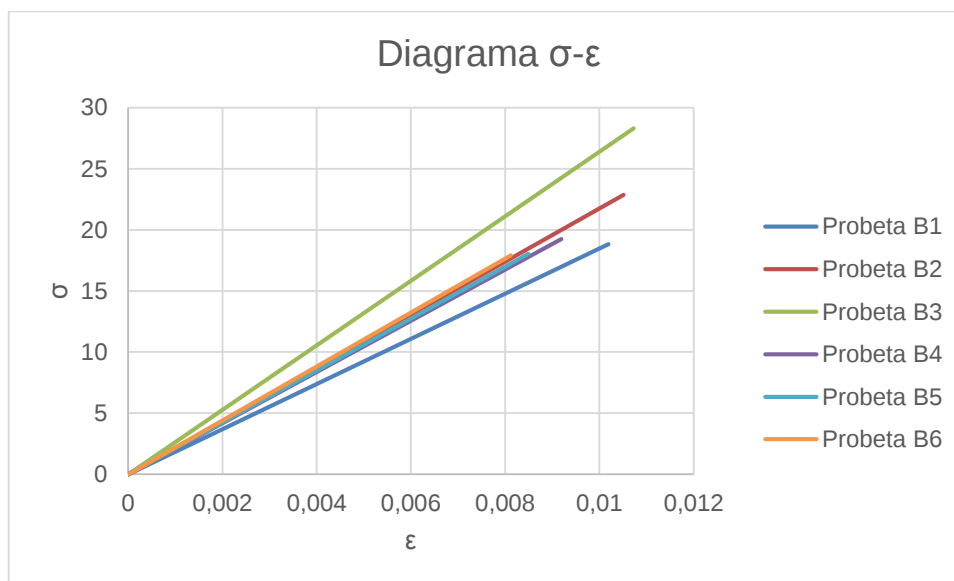


Figura 95 Gráfica media probeta tipo B. Ensayo cortante

- PROBETA TIPO C

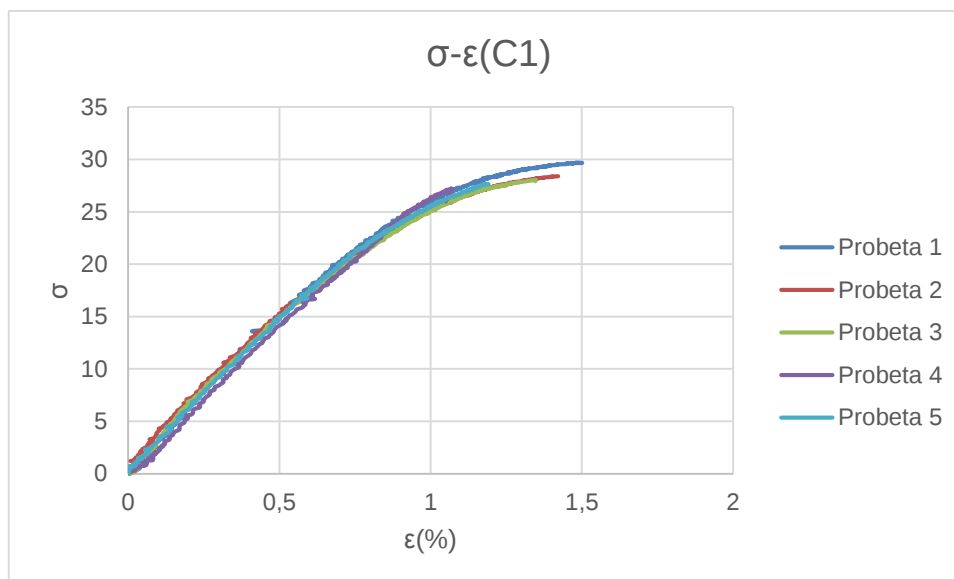


Figura 96 Probeta tipo C1. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2961,8	29,6756	29,6756	0,015009
Probeta 2	3437,5	28,3977	28,3977	0,01421
Probeta 3	2734,8	28,0457	28,0457	0,01349
Probeta 4	2931,5	27,065	27,065	0,01069
Probeta 5	3072,4	27,6564	27,6564	0,01181
Media	3027,6	28,16808	28,16808	0,0130418
Desv.Típica(%)	7,66570685	3,10261631	3,10261631	12,1157388

Tabla 54 Propiedades mecánicas probeta C1. Ensayo cortante

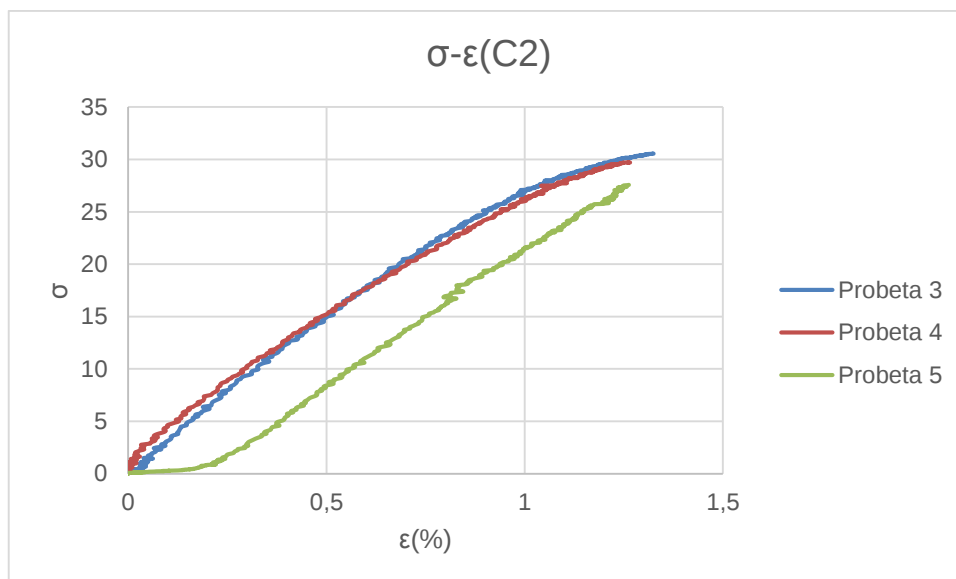


Figura 97 Probeta tipo C2. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	-	-	-	-
Probeta 2	-	-	-	-
Probeta 3	3183	30,582	30,582	0,013227
Probeta 4	2644,1	29,6829	29,6829	0,01257
Probeta 5	2781,3	27,57287	27,57287	0,01263
Media	2869,46667	29,2792567	29,2792567	0,012809
Desv.Típica(%)	7,96899391	4,3074626	4,3074626	2,31543355

Tabla 55 Propiedades mecánicas probeta C2. Ensayo cortante

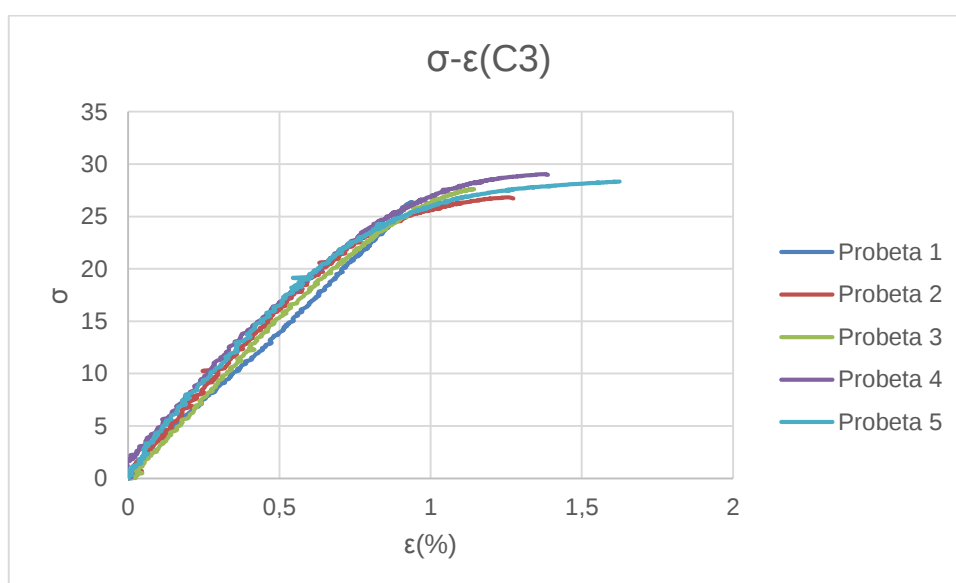


Figura 98 Probeta tipo C3. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2427	26,357	26,357	0,00939
Probeta 2	3202,2	26,82626	26,82626	0,01247
Probeta 3	3024,8	27,6005	27,6005	0,011438
Probeta 4	3125,4	29,0158	29,0158	0,0138
Probeta 5	3435,4	28,3435	28,3435	0,0162
Media	3042,96	27,628612	27,628612	0,0126596
Desv.Típica(%)	11,055754	3,50802047	3,50802047	18,0313362

Tabla 56 Propiedades mecánicas probeta C3. Ensayo cortante

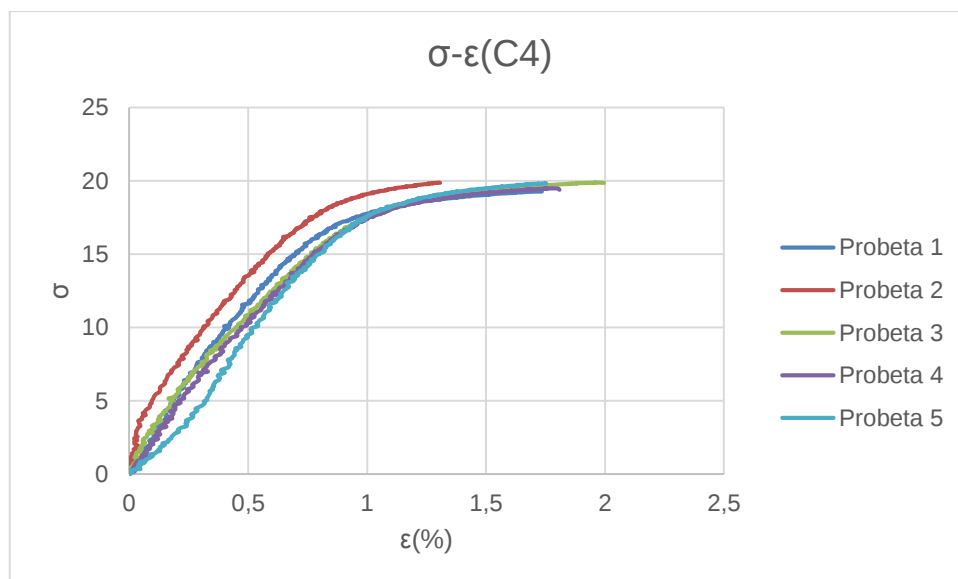


Figura 99 Probeta tipo C4. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$
Probeta 1	2820,6	19,2657	19,2657	0,01725
Probeta 2	2514	19,8608	19,8608	0,013068
Probeta 3	2057,9	19,85067	19,85067	0,01996
Probeta 4	2351,3	19,4646	19,4646	0,01809
Probeta 5	2334,9	19,82708	19,82708	0,017509
Media	2415,74	19,65377	19,65377	0,0171754
Desv.Típica(%)	10,3455455	1,24226549	1,24226549	13,1686757

Tabla 57 Propiedades mecánicas probeta C4. Ensayo cortante

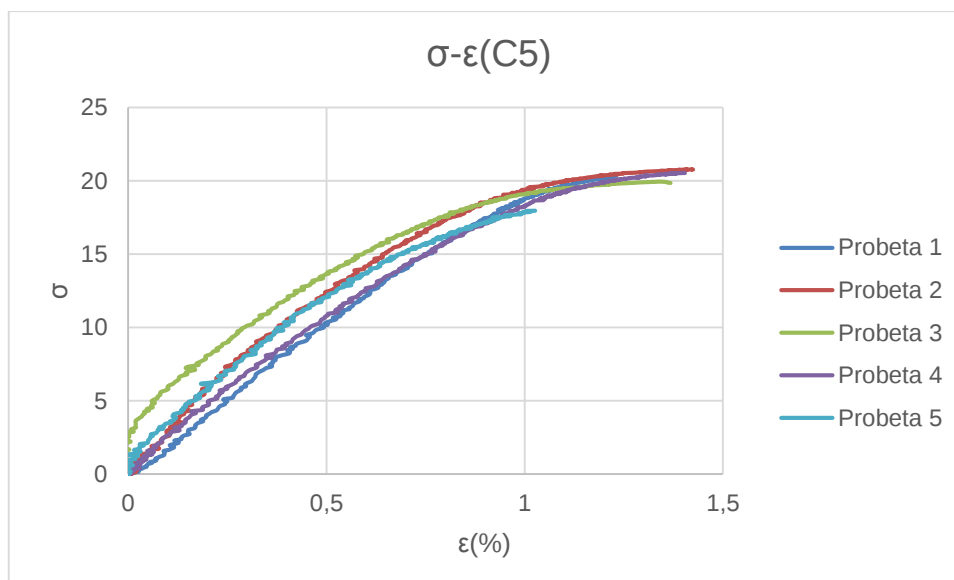


Figura 100 Probeta tipo C5. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$	A	B	C
Probeta 1	2183	20,268	20,268	0,012239			
Probeta 2	-	-	-	-			
Probeta 3	2077,7	19,94536	19,8533	0,01367	0	3,00E+15	2,00E+12
Probeta 4	2163,9	20,5376	20,5376	0,01404			
Probeta 5	2329,6	17,968	17,968	0,01026			
Media	2188,55	19,67974	19,656725	0,01255225	0	3E+15	-2E+12
Desv.Típica(%)	4,13895867	5,1335533	5,11271085	11,8267929	0	0	0

Tabla 58 Propiedades mecánicas probeta C5. Ensayo cortante

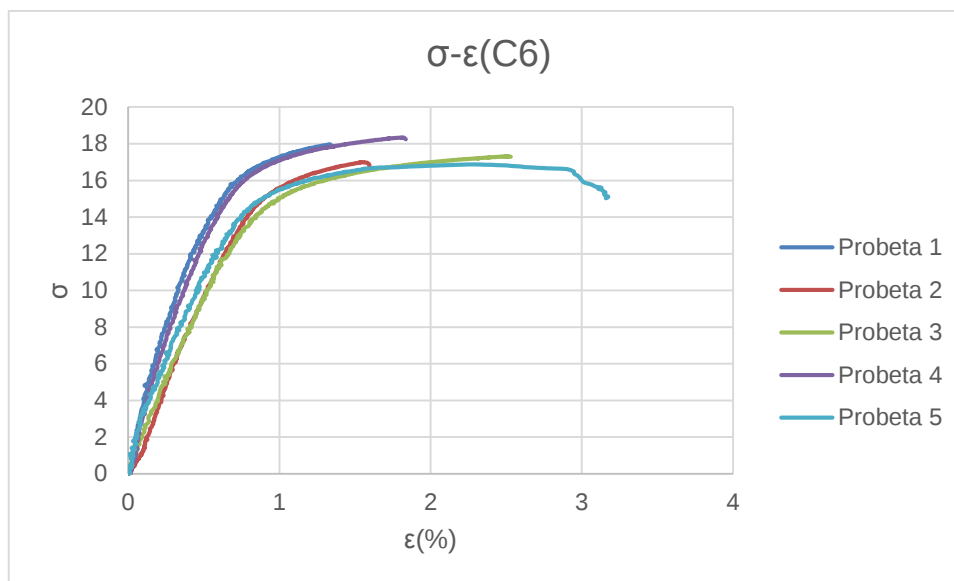


Figura 101 Probeta tipo C6. Ensayo cortante

	$G(N/mm^2)$	$f_y(N/mm^2)$	$\epsilon(f_y)$	$\sigma_r(N/mm^2)$	$\epsilon_{\text{última}}$	A	B	C
Probeta 1	-	-	-	-	-			
Probeta 2	2369,3	16,9871	0,0155798	16,7342	0,01597	3,00E+06	5,82E+02	-7,40E-03
Probeta 3	1927,4	17,3158	0,0251451	17,2985	0,02529	2,82E+05	6,84E+01	-1,60E-03
Probeta 4	2990,1	18,3406	0,0182045	18,3406	0,0182			
Probeta 5	1957,5	16,87347	0,022855	14,9585	0,03157	4,14E+04	2,02E+02	-1,94E-01
Media	2311,075	17,379242	0,0204461	16,83295	0,0227575	1,52E+06	3,92E+02	-1,01E-01
Desv.Típica(%)	18,569381	3,3276462	18,396097	7,2837918	26,990516	88,22390	68,05289	88,7468059

Tabla 59 Propiedades mecánicas probeta C6. Ensayo cortante

A continuación se muestran los valores medios:

	G(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}	A	B	C
C1	3027,6	28,16808	28,16808	0,0130418			
C2	2869,46667	29,2792567	29,2792567	0,012809			
C3	3042,96	27,628612	27,628612	0,0126596			
C4	2415,74	19,65377	19,65377	0,0171754			
C5	2188,55	19,67974	19,656725	0,01255225	0	3E+15	-2E+12
C6	2311,075	17,3792425	16,83295	0,0227575	1,52E+06	3,92E+02	-1,01E-01

Tabla 60 Propiedades mecánicas probeta tipo C. Ensayo cortante

⇒ Gráfica media probeta tipo C

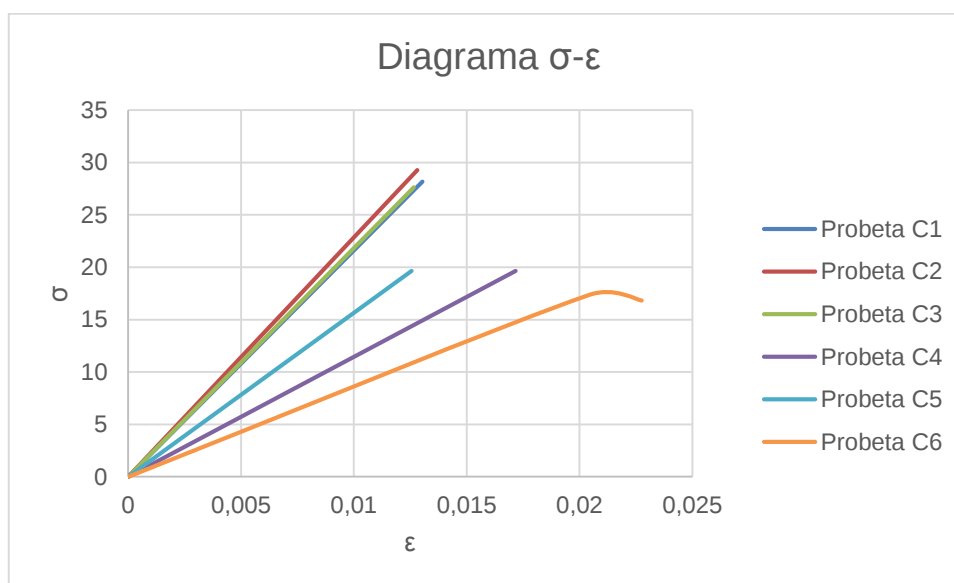


Figura 102 Gráficas medias probeta tipo C. Ensayo cortante.

5. Análisis mediante elementos finitos

En este último apartado vamos a realizar una simulación en Abaqus para comprobar que el material es anisótropo y para ver si podemos obtener una simulación parecida a la realidad considerando un sólido rígido con comportamiento elástico lineal y una malla estructurada. Para ello vamos a analizar el desplazamiento vertical que sufre la pieza durante el ensayo a cortante.

A continuación, vamos a hacer una breve explicación de la simulación:

En primer lugar, creamos un Part con la forma de la probeta utilizada para el ensayo a cortante.

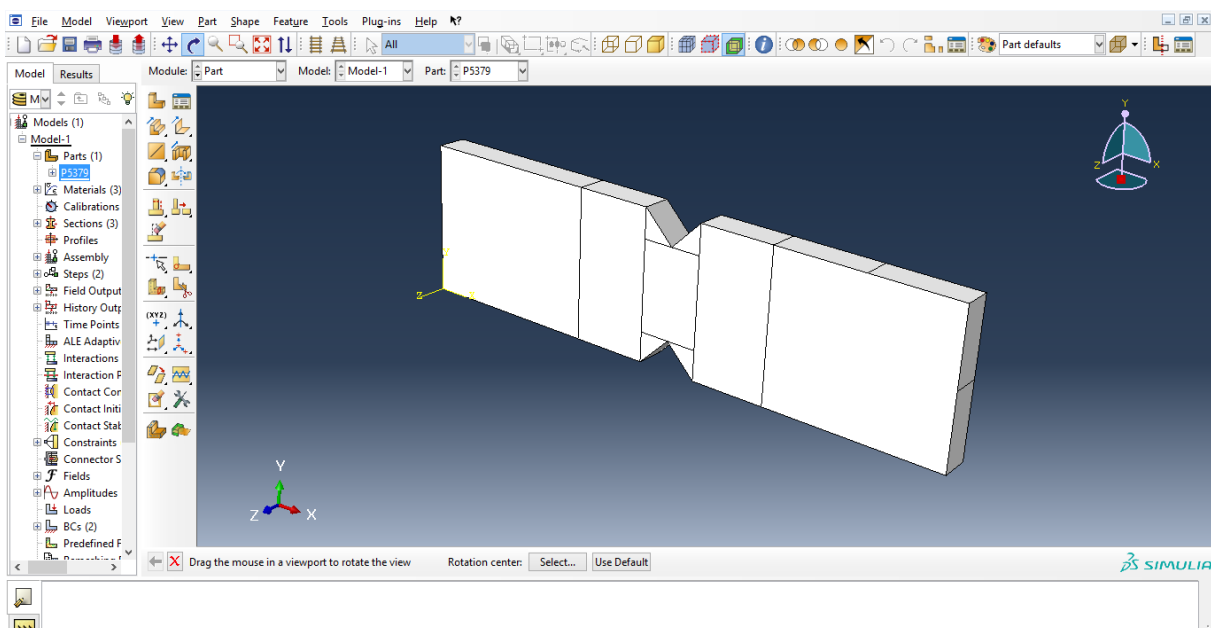


Figura 103. Part Abaqus

Entramos en el módulo 'Property' donde vamos a definir el material, en nuestro caso tendremos PLA 3D870.

Para definir el material debemos introducir las propiedades elásticas del material, siendo necesario para ello el Módulo de Young, Módulo de elasticidad transversal y Coeficiente de Poisson para cada una de las direcciones.

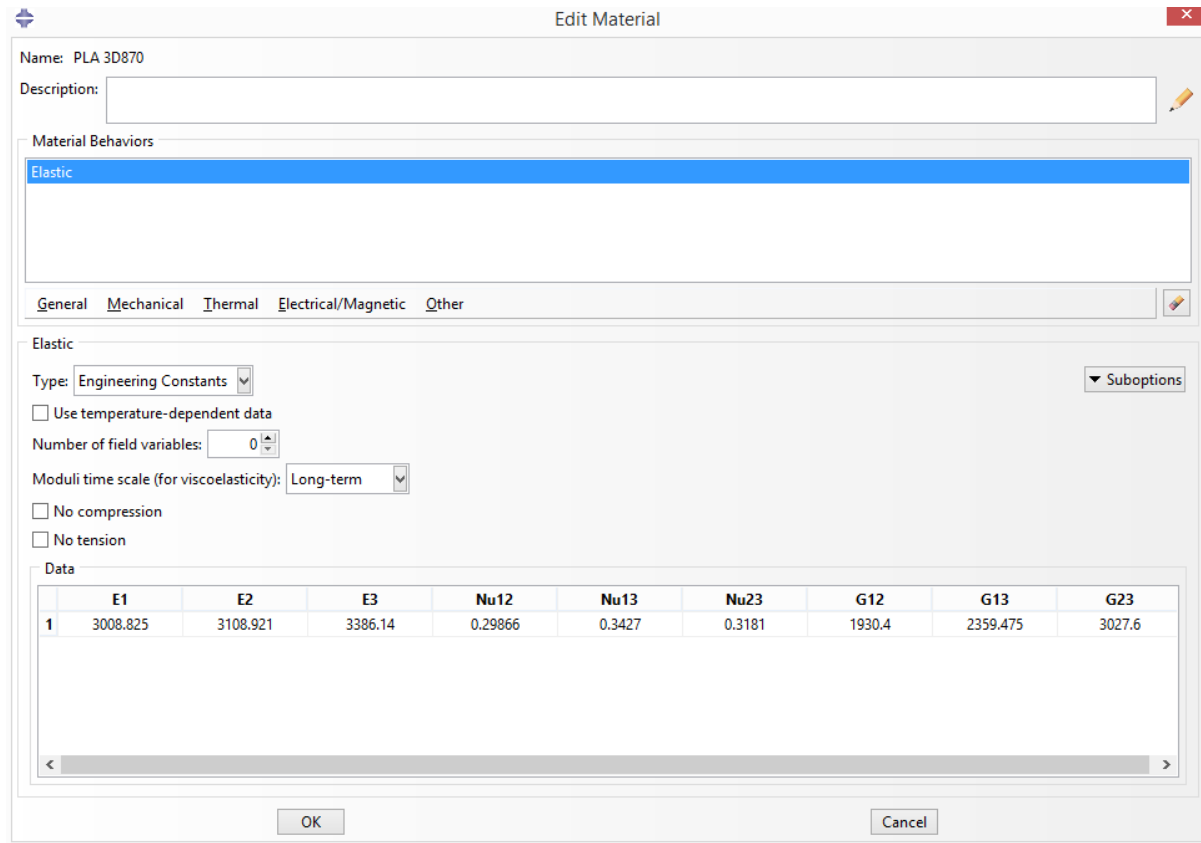


Figura 104. Property Abaqus

Podemos representar los valores del Módulo de Young y del Módulo de elasticidad transversal para el material PLA 3D870 en forma matricial como:

$$\begin{pmatrix} E11 & G12 & G13 \\ G12 & E22 & G23 \\ G13 & G23 & E33 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 3008,825 & 1930,4 & 2359,475 \\ 1930,4 & 3108,921 & 3027,6 \\ 2359,475 & 3386,14 & 3386,14 \end{pmatrix}$$

Una vez generado el material se lo asignamos al 'Part' generado.

A continuación, vamos al módulo 'Step'.

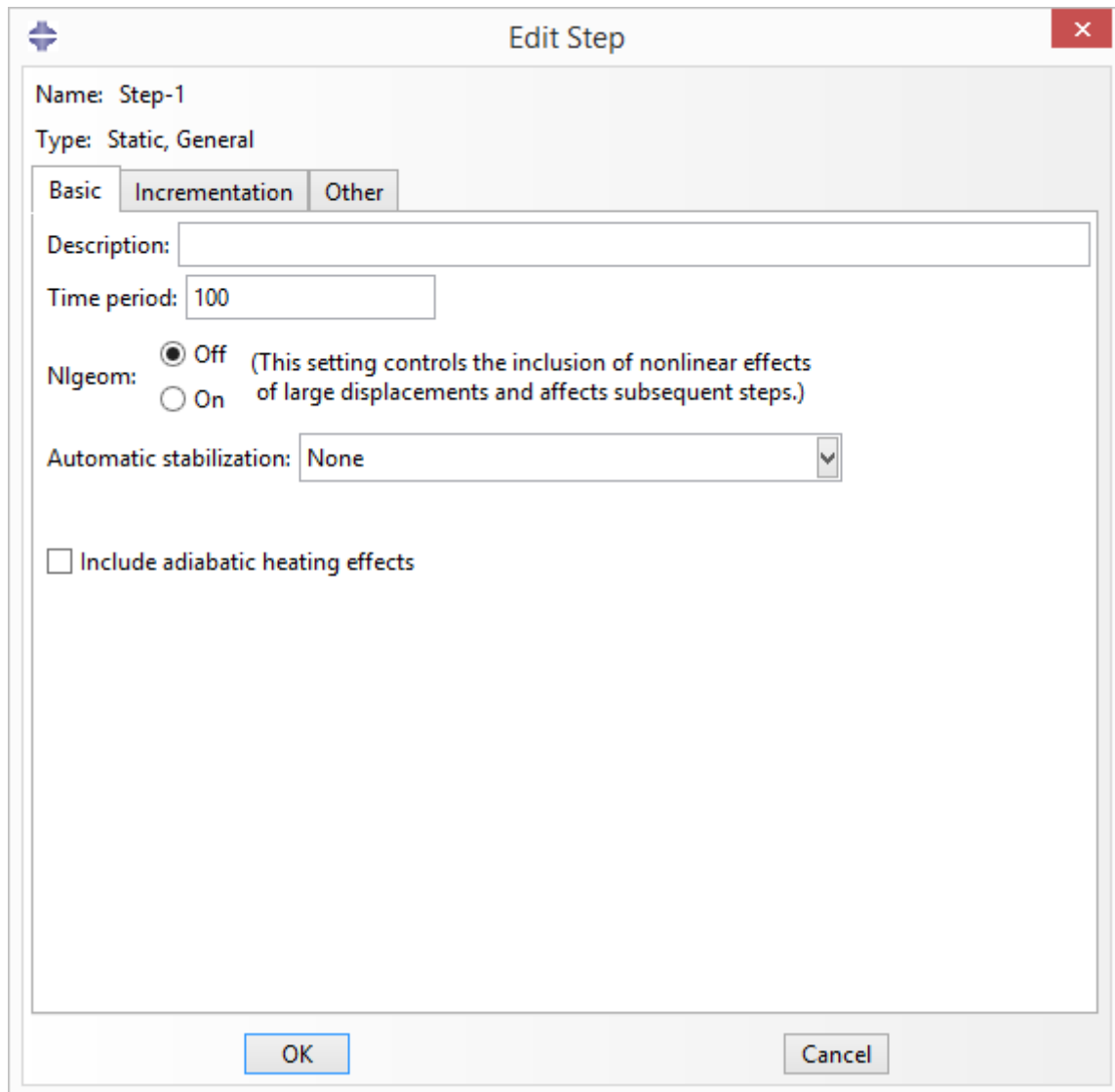


Figura 105. Step Abaqus

En este módulo vamos a definir el tiempo que durará la simulación, en nuestro caso ponemos el tiempo que nos marca la INSTRON cuando la pieza deja de tener un comportamiento lineal. Es por ello que aparece marcado Nlgeom en OFF, puesto que estamos eliminando las no linealidades geométricas.

Tras definir el Step de nuestro problema vamos a definir las condiciones de contorno del mismo, para ello vamos al módulo 'Load'.

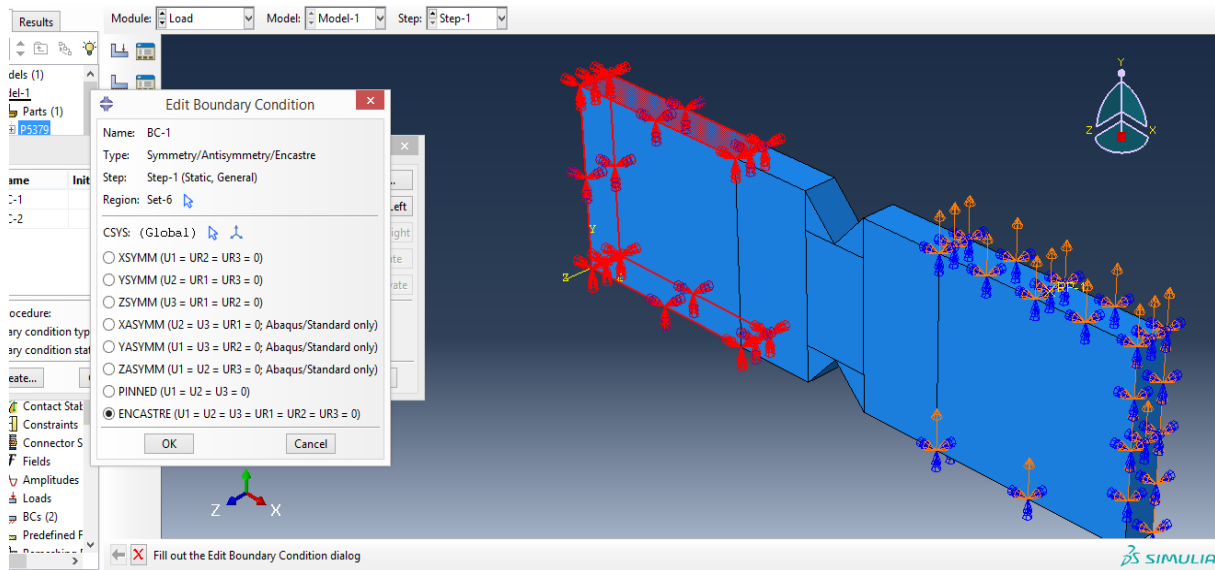


Figura 106. Condiciones de contorno Abaqus

Como hemos explicado anteriormente en el ensayo a cortante los extremos de las probetas están sujetos con unas mordazas, es por ello que las condiciones de contorno que hemos asignado es que los desplazamientos en las direcciones X, Y Z para la parte de izquierda de la probeta sean nulos, es decir, hacemos como un empotramiento en la parte izquierda de la probeta, sin embargo, la mordaza de la derecha será la que se desplaza verticalmente para generar el esfuerzo a cortante, es por ello que las condiciones de contorno para esta parte es que se desplaza verticalmente y hacia arriba.

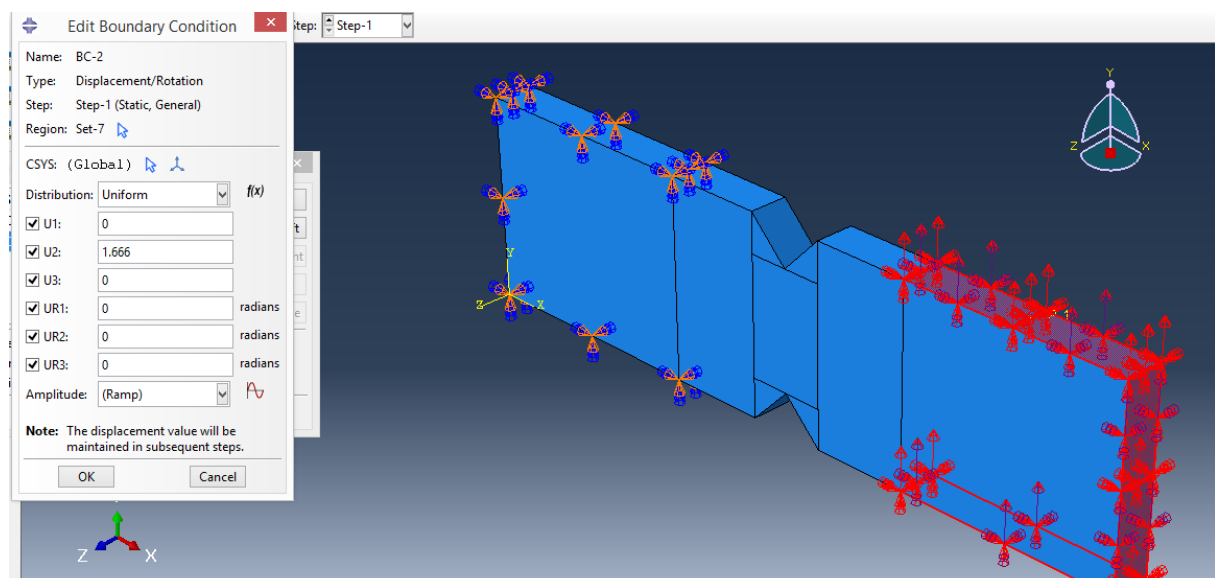


Figura 107. Condiciones de contorno Abaqus

El valor 1,666 se corresponde con el producto de la velocidad de ensayo por el tiempo transcurrido durante el mismo.

El último paso a realizar para definir totalmente el problema es la definición de la malla. En nuestro caso es de especial interés la zona central de la probeta pues es ahí donde se produce la rotura de la misma y tenemos una concentración de tensiones, es por ello que pondremos una malla más fina ahí que en los extremos de la probeta.

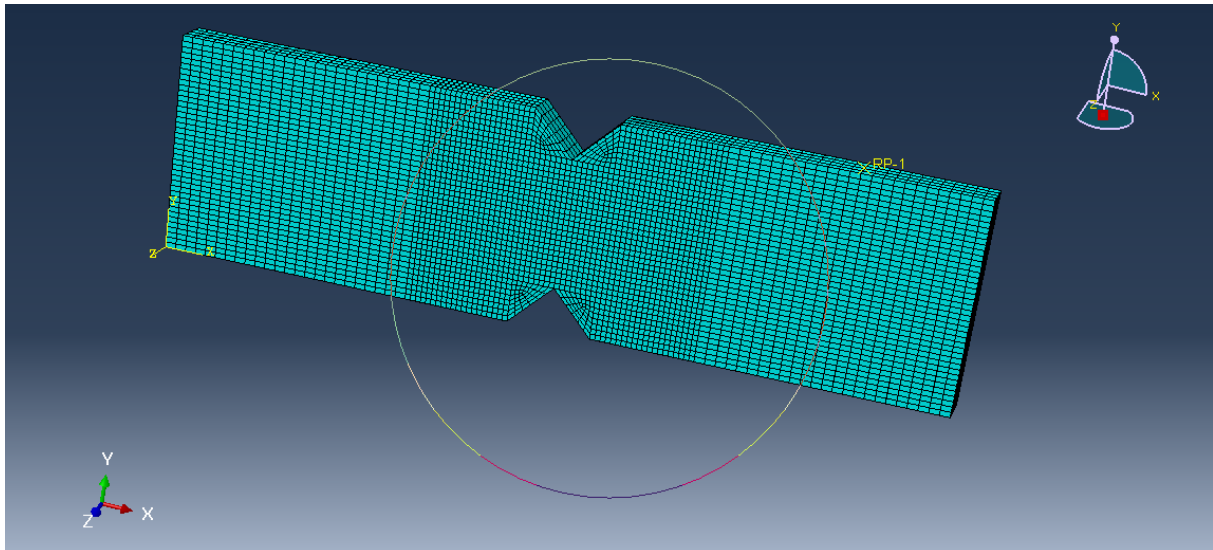


Figura 108. Mallado Abaqus

Ya tenemos definido totalmente el problema.

6. Análisis de resultados

6.1 Resultados ensayos a tracción

En este apartado vamos a comentar los resultados obtenidos en el ensayo a tracción para las diferentes muestras.

Debido a que en este trabajo hacemos hincapié en la influencia de los parámetros de impresión y por lo tanto tenemos varias configuraciones desde el punto de vista de la fabricación de las probetas, haremos un análisis por partes.

En primer lugar, vamos a hacer dos grupos, por un lado, el de relleno 100% y por otro lado el de relleno 75%.

Dentro de estos dos grupos tendremos tres subgrupos debido a la variación del espesor de capa.

⇒ Porcentaje de relleno 100%:

- Espesor de capa 0,3 mm.

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A3 (POSI.VERTICAL)	2652,15	45,9003788	0,02032503	45,7907055	0,02071643
B3 (POSI. HORIZONTAL)	3193,7	52,031354	0,01948308	49,171838	0,02182703
C3 (POSI.CANTO)	2988,46	54,65353	0,02088168	51,962876	0,02770936

Tabla 61 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.

En primer lugar, podemos apreciar como en el caso de las probetas impresas en posición horizontal y de canto tenemos una mayor deformación de la pieza en la región plástica. Esto se debe a que en estas direcciones los filamentos del material están depositados en la misma dirección en que se ejerce la fuerza durante el ensayo a tracción, sin embargo, en el caso de las probetas impresas en dirección vertical la dirección de aplicación de la fuerza durante el ensayo es igual a la dirección de deposición de las capas, por lo tanto el material no llega a romperse, si no que se produce la delaminación de la probeta, produciendo así el colapso de la misma antes de que llegue a la tensión de rotura del material.

Por otro lado, podemos ver como el módulo de Young, la tensión máxima, la tensión de rotura, y por tanto el comportamiento mecánico de las probetas en las direcciones horizontal y de canto es muy similar, esto se debe de nuevo a la orientación paralela de los filamentos de la probeta con la dirección de aplicación de la fuerza, permitiendo así obtener una mayor resistencia del material a la fuerza ejercida ya que en estos casos se produce el desgarre de las probetas. Sin embargo, podemos ver como para las probetas impresas en posición vertical las propiedades como el módulo de Young y la tensión disminuyen desde un 11% hasta un 17%, esto se debe a que como hemos dicho anteriormente, no se produce un desgarre de la pieza si no que se produce la delaminación de la misma.

- Espesor de capa 0,24 mm.

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A1 (POSI.VERTICAL)	3008,825	47,8098	0,01887505	47,7006994	0,0204706
B1 (POSI. HORIZONTAL)	3108,92	52,7086392	0,02004362	48,575852	0,03515168

C1 (POSI.CANTO)	3386,14	58,3007492	0,01986988	54,606072	0,02958509
-----------------	---------	------------	------------	-----------	------------

Tabla 62 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.

En este caso vemos de nuevo como en el caso de las probetas impresas en posición horizontal y de canto obtenemos una mayor deformación última que para el caso de las probetas impresas en posición vertical. A diferencia del caso anterior la variación de esta deformación es mucho mayor, encontrándose entre 30,8077% y el 41,7649%.

El motivo por el que sucede esto es igual que lo comentado anteriormente, es decir, debido a la dirección de deposición de los filamentos respecto a la dirección de aplicación de la carga.

En segundo lugar, podemos ver cómo tanto el Módulo de Young como las tensiones son mayores para las posiciones horizontal y de canto que para la posición vertical, sin embargo, se puede apreciar como en este caso no hay una semejanza tan grande entre los resultados obtenidos para la posición horizontal y de canto, obteniendo así mayores resultados para las probetas impresas en la posición de canto. En el caso de la posición de canto el Modulo de Young es en torno a un 8,19% mayor que en la posición horizontal y un 11,14% mayor que en la posición vertical. Para la tensión máxima en la posición de canto obtenemos entre un 9,5918% y un 17,9945% mayor que respecto a las otras dos posiciones.

- Espesor de capa 0,18 mm.

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A2 (POSI.VERTICAL)	3148,82	51,1674113	0,01728063	50,847204	0,01944663
B2 (POSI. HORIZONTAL)	3077,62	57,036947	0,02100669	52,110356	0,04029725
C2 (POSI.CANTO)	3107,58	56,03572	0,02008528	52,507058	0,02204317

Tabla 63 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.

En este caso vemos algo más parecido al caso de espesor 0,3 mm, las propiedades de Modulo de Young, tensión máxima y tensión de rotura son bastante similares para el caso de posición horizontal y de canto. Sin embargo, respecto a la posición vertical varían entorno a un 17%.

Respecto al deformación de rotura sucede lo mismo que en casos anteriores, aunque en este caso la probeta impresa en la posición de canto es mayor que en la impresa en posición horizontal.

Otro de los aspectos a tener en cuenta es que, a pesar de ser similares, la tensión de rotura de la posición de canto suele ser superior a la posición horizontal, esto puede deberse a que la sección de la posición de canto es algo superior a la posición horizontal.

Realmente ambas secciones han de ser iguales, pero durante el proceso de impresión si le decimos una altura de capa y una altura total de pieza el programa CURA tiende siempre a

imprimir capas redondeando siempre hacia arriba, es decir, si la altura de la sección es de 2mm y un espesor de capa de 0,3 mm necesitaremos 6.66 capas, de manera que la impresora redondea a 7 capas obteniendo así una altura ligeramente superior, y por lo tanto una variación entre las secciones.

Por último, vamos a comparar la influencia de los espesores de capa, para ello nos vamos a fijar en la posición vertical puesto que es en ella donde podemos ver una mejor representación de la relación entre capas.

En primer lugar, vemos como la tensión de rotura es mayor para menores espesores de capa, sin embargo, vemos que a menor espesor de capa la pieza se deforma menos antes de romperse.

En cuanto al límite elástico vemos como es mayor cuanto menor sea el espesor de capa.

En último lugar podemos ver como el Módulo de Young es mayor cuanto menos sea el espesor de capa, es decir, para espesores de capa inferiores alcanzaremos el límite elástico con una menor deformación del material.

En conclusión, podemos decir que el espesor de capa tiene bastante influencia en las propiedades mecánicas del material, a menos espesor de capa obtenemos un mayor límite elástico y tensión de rotura, sin embargo, el material puede deformarse menos.

⇒ Porcentaje de relleno del 75%.

- Espesor de capa 0,3mm

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A4 (POSÍ. VERTICAL)	2028,6	34,764078	0,01827428	34,714475	0,0186344
B4 (POSÍ. HORIZONTAL)	2592,48	38,478838	0,01934714	37,3740772	0,02060538
C4 (POSÍ. CANTO)	2380,25	36,9893498	0,02091208	35,74795	0,02424483

Tabla 64 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.

En primer lugar, podemos apreciar que las probetas que se encuentran en posición horizontal y de canto tienen una mayor deformación de rotura que las probetas que se encuentran en posición vertical.

En cuanto al Módulo de Young vemos como la probeta situada en posición horizontal tiene un mayor E, esto se traduce en que se alcanza la tensión del límite elástico con una menor deformación del material. En el lado contrario tenemos la posición vertical, la cual tiene un menor Módulo de Young, por lo tanto, la pieza alcanza el límite elástico con una menor deformación de la pieza, esto se debe a que las capas están dispuestas de forma paralela a la dirección de aplicación de la carga de tracción, de manera que se produce antes la

delaminación de la pieza que el desgarre de la misma, a diferencia de las posiciones horizontal y canto.

- Espesor de capa 0,24mm

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A5 (POSI.VERTICAL)	2615,34	39,19641	0,01766278	39,18955	0,01760529
B5 (POSI. HORIZONTAL)	2690,45	44,5444241	0,02198003	43,6929605	0,02259407
C5 (POSI.CANTO)	2382,42	38,91174	0,02045456	37,319098	0,02809093

Tabla 65 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.

Para el espesor de capa de 0,24 vemos de nuevo que la deformación de rotura en la posición de canto es mayor que en las otras dos posiciones, en concreto entre un 19,568% y un 37,327%.

En cuanto al módulo de Young encontramos valores bastante similares entre las posiciones horizontal, de canto y vertical, en este caso apenas tenemos una variación del 3% entre la posición horizontal y vertical.

- Espesor de capa 0,18mm

	E(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	ε(f _y)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A6 (POSI.VERTICAL)	2454,1	33,173842	0,01663975	33,175082	0,01666885
B6 (POSI. HORIZONTAL)	2462,48	37,717972	0,02019636	35,7157234	0,01981493
C6 (POSI.CANTO)	2493,6	37,98217	0,02138588	36,76574	0,02518959

Tabla 66 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo tracción.

En este caso vemos como de nuevo se produce una mayor deformación de rotura para las posiciones horizontal y de canto, apreciándose una mayor diferencia respecto a la posición vertical, en concreto entre un 15,877% y un 33,834%.

Por otra parte, podemos ver como el Módulo de Young es muy similar entre las tres posiciones, aunque sigue siendo algo menor en el caso de la posición vertical, experimentando por tanto una menor deformación cuando se alcanza el límite elástico.

A continuación, vamos a comparar la relación que hay entre los diferentes espesores de capa para el relleno del 75%. De nuevo nos interesa más ver la posición vertical pues es en esta donde se ve menor la influencia que puede tener el espesor de capa.

En este caso apreciamos como para un menor porcentaje de relleno el espesor de capa del 60% del diámetro del extrusor nos ofrece un mejor comportamiento en la región elástica. En este caso obtenemos una mayor tensión del límite elástico, un mayor Módulo de Young, y junto con el diámetro de 0,3 mm una mayor deformación del límite elástico, es decir, la pieza tendrá una mayor capacidad de deformarse en el régimen elástico.

Por otra parte, podemos ver como tendremos una mayor tensión de rotura para el caso del espesor de capa del 60% del diámetro del extrusor.

Si comparamos los datos con los obtenidos con el relleno del 100% vemos como se cumple de nuevo que a menor espesor de capa la pieza se puede deformar menos antes de romperse. Por otro lado, también se cumple que a mayor espesor de capa obtendremos una mayor tensión de rotura y límite elástico, aunque en este caso no es lineal.

Finalmente vamos a comparar los resultados para el porcentaje de relleno del 100% y del 75%. Como era de esperar para un mayor porcentaje de relleno vamos a obtener un mayor Módulo de Young, mayor tensión máxima, mayor tensión de rotura y mayor deformación de la pieza, es decir, obtendremos unas mejores propiedades mecánicas a consta de un mayor peso de la pieza, mayores costes de tiempo y material.

Podemos concluir pues que si tenemos unas propiedades mecánicas en una pieza con relleno 100% podemos intentar reducir el porcentaje de relleno de la pieza disminuyendo el espesor de capa con el objetivo de tener unas propiedades mecánicas lo más próximas posibles. Esto se puede ver reflejado en los resultados, para ello nos vamos a fijar en el caso de 100% de relleno y espesor de capa de 0,3 mm y el caso de 75% de relleno y espesor de capa 0,24mm. Podemos ver con el Módulo de Young varía entorno a un 1,38%, la tensión de rotura y el límite elástico varía sobre un 14,41% y la deformación de rotura varía alrededor de un 15,017%, es decir, con un ahorro de material de un 25% estamos consiguiendo una propiedad que distan en torno a un 14%.

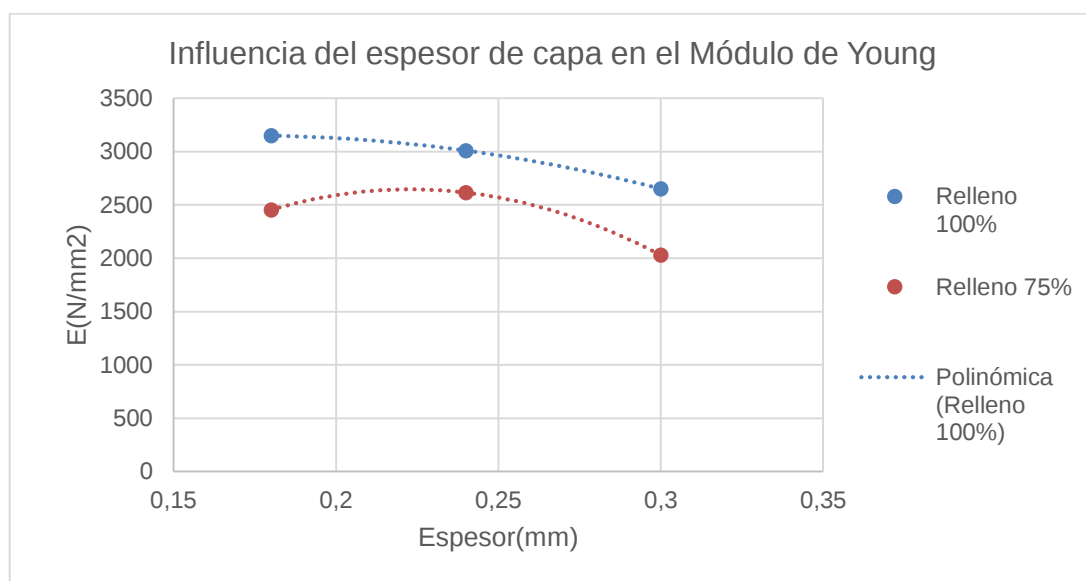


Figura 109 Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Tracción

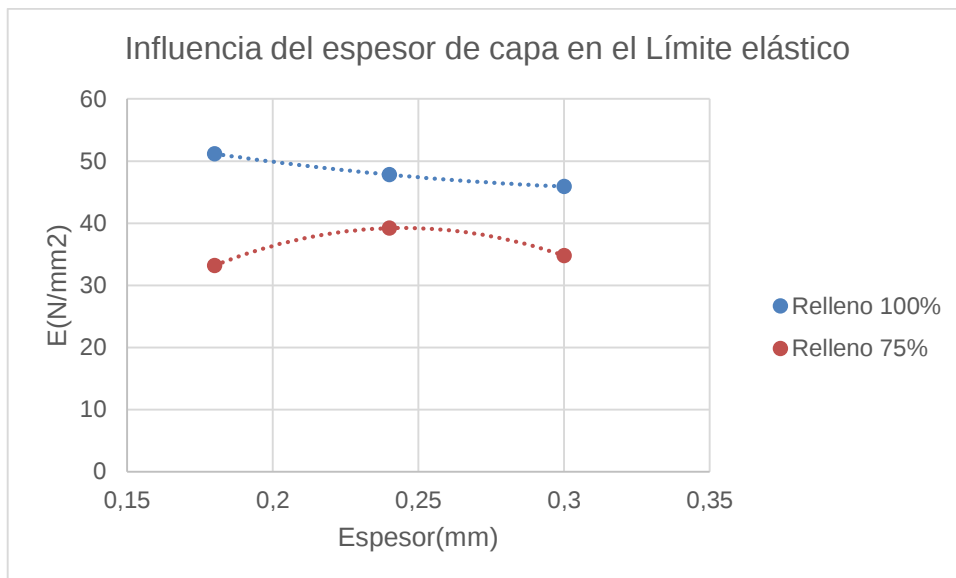


Figura 110 Influencia del espesor de capa en el Límite elástico. Tracción

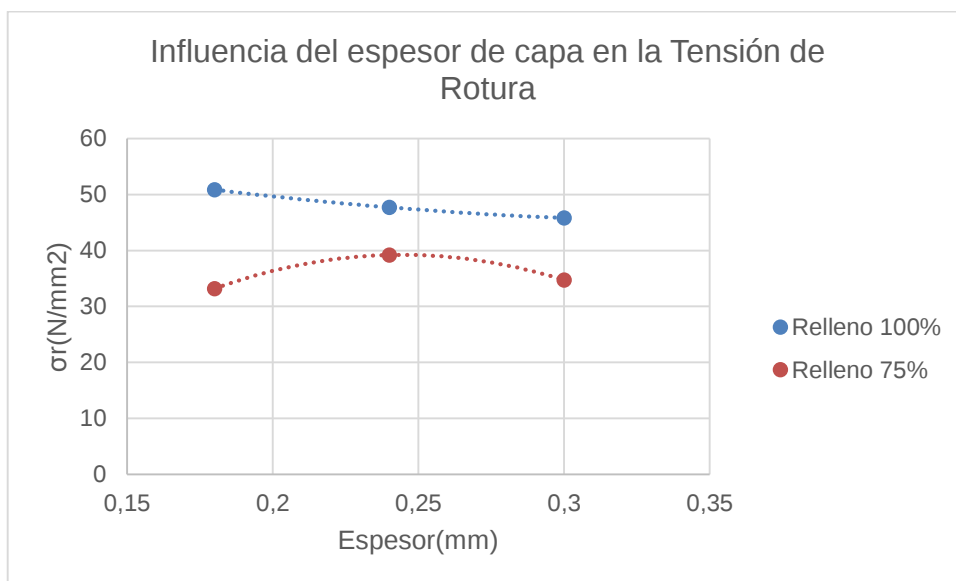


Figura 111 Influencia del espesor de capa en la tensión de rotura. Tracción

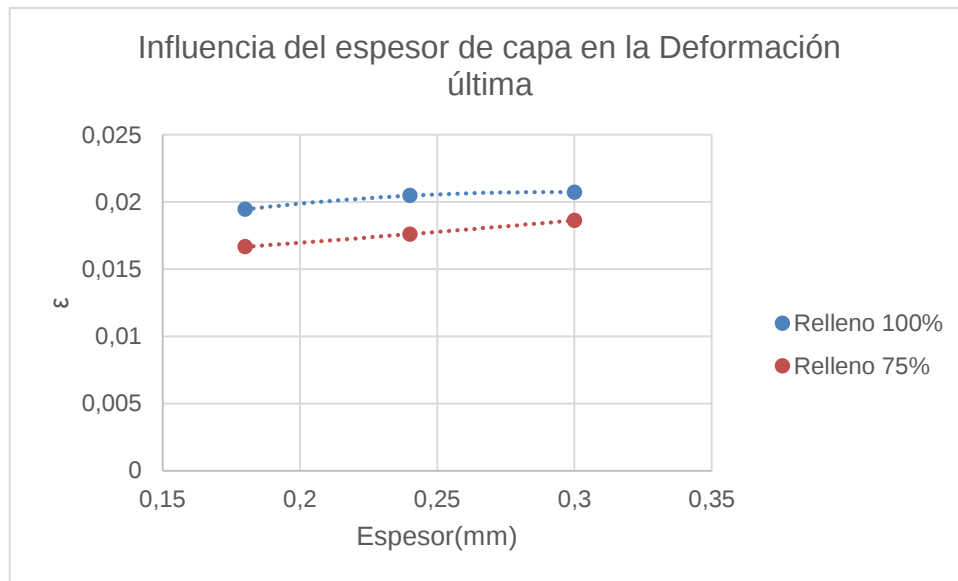


Figura 112 Influencia del espesor de capa en la deformación última. Tracción

6.2 Resultados ensayos compresión

Para el análisis del comportamiento a compresión hemos ensayado en la dirección paralela y perpendicular al eje principal de anisotropía, teniendo en cuenta cual será el funcionamiento de la pieza.

En las piezas vamos a tener dos ejes de anisotropía, el correspondiente al eje Z y en nuestro caso, en el cual hemos hecho una impresión de las probetas en la dirección horizontal, el eje Y.

Como ya hemos deducido anteriormente el eje Z es el de peor comportamiento mecánico puesto que es la dirección entre capas, es por ello que consideramos que la pieza no va a estar diseñada para trabajar en dicho eje, por lo tanto, las dos direcciones que hemos ensayado son la paralela y perpendicular al eje Y.

Para realizar el análisis de los resultados del ensayo a compresión vamos a dividir de nuevo en dos grupos, uno correspondiente con el 100% de relleno y otro para el 75% de relleno y

dentro de estos tendremos dos subgrupos, uno correspondiente a la dirección paralela al eje Y y otro correspondiente a la dirección perpendicular al eje Y.

⇒ Porcentaje de relleno del 100%:

- Dirección paralela al eje Y:

	$f_y(\text{N/mm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$
Espesor 0,3mm	28,447865	3274,75
Espesor 0,24mm	31,8595525	3046,2
Espesor 0,18mm	41,9309	2471,1

Tabla 67 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión

- Dirección perpendicular al eje Y:

	$f_y(\text{N/mm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$
Espesor 0,3mm	81,4769633	3572,86667
Espesor 0,24mm	84,0532333	3111,9
Espesor 0,18mm	73,2364167	2932,76667

Tabla 68 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión

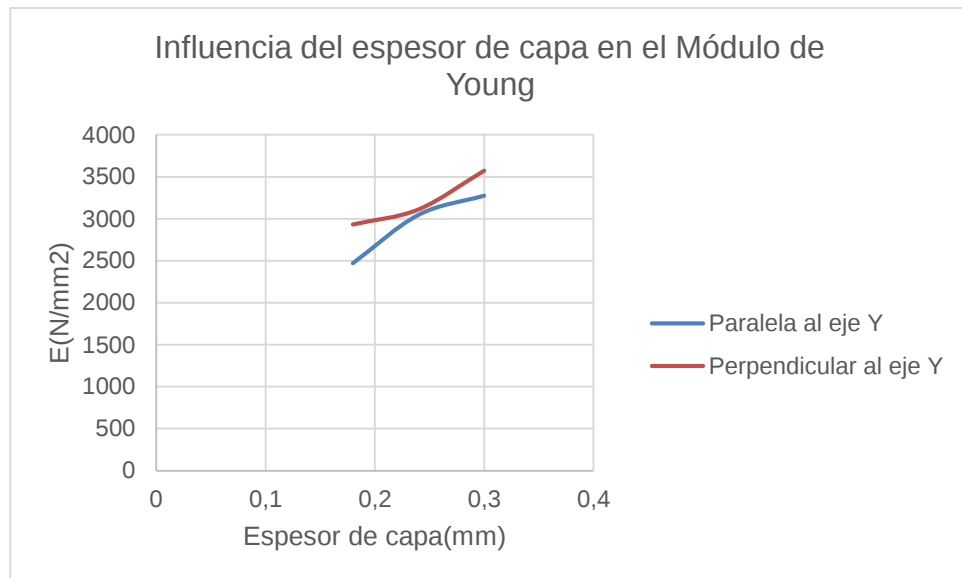


Figura 113. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión

Como podemos observar el valor del Módulo de Young es muy similar para ambas direcciones, sin embargo, podemos ver como para la dirección paralela al eje Y el Módulo de Young es algo menor, esto se debe a que en esta dirección la pieza es muy esbelta, por lo tanto, falla por pandeo. Sin embargo, en la dirección perpendicular al eje Y obtenemos mejores propiedades mecánicas, y es que en este caso la pieza no falla por pandeo si no que falla por aplastamiento.

Para ambas direcciones vemos como a medida que aumenta el espesor de capa aumenta el Módulo de Young.

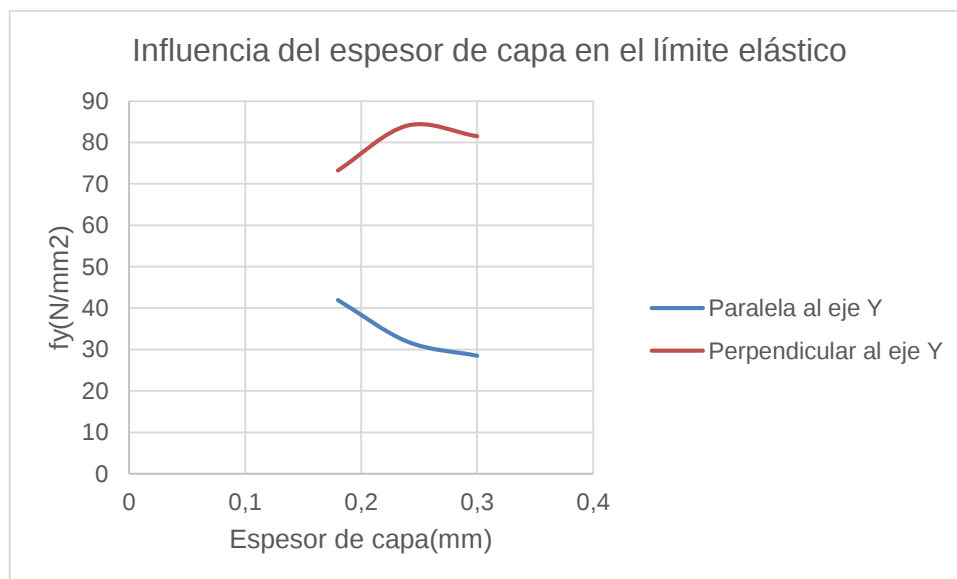


Figura 114 Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión

En cuanto al límite elástico vemos como en la dirección perpendicular al eje la tensión que resiste es mucho mayor, principalmente se debe a que la pieza es muy esbelta, por lo tanto, tiende a fallar por pandeo.

⇒ Porcentaje de relleno del 75%:

- Dirección paralela al eje Y:

	$f_y(\text{N/mm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$
Espesor 0,3mm	24,657	1672,1
Espesor 0,24mm	14,087805	3601,35
Espesor 0,18mm	28,590633	3150,8

Tabla 69 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión

- Dirección perpendicular al eje Y:

	$f_y(\text{N/mm}^2)$	$E(\text{N/mm}^2)$
Espesor 0,3mm	37,61565	2729,65
Espesor 0,24mm	53,0206267	2961,56667
Espesor 0,18mm	55,4250767	6194,26667

Tabla 70 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo compresión

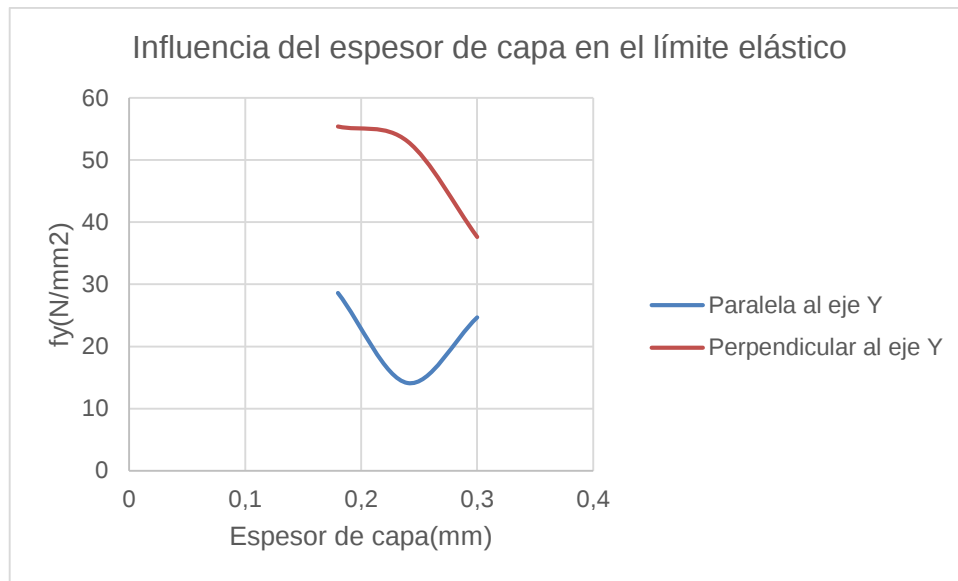


Figura 115. Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión

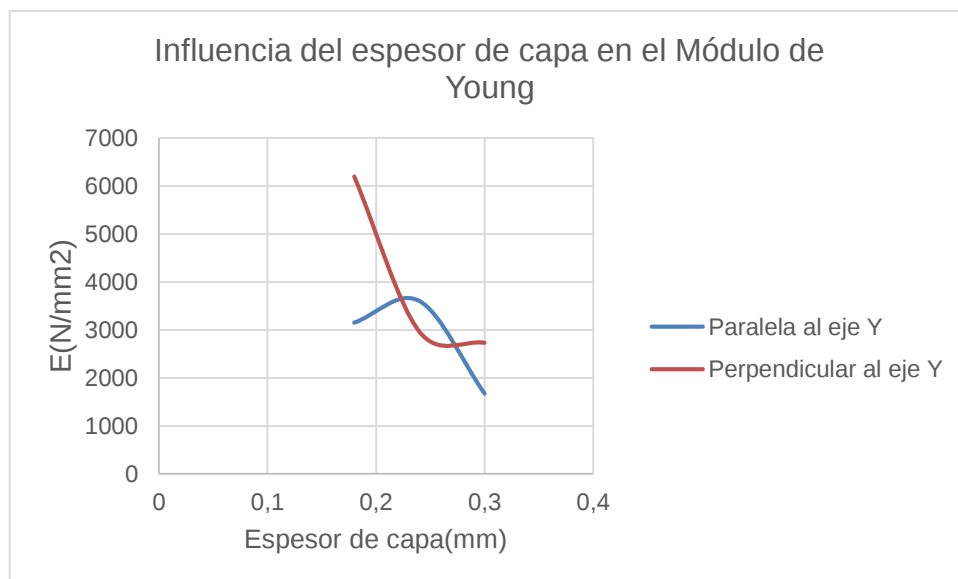


Figura 116. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión

Podemos ver como el comportamiento del límite elástico es similar al dado en el caso del 100%, tenemos un límite elástico mucho menor en la dirección paralela al eje Y debido a la esbeltez de la pieza y por tanto tendremos un fallo por pandeo.

En cuanto al Módulo de Young observamos como para pequeños espesores de capa los valores de este difieren mucho, sin embargo, para espesores de capa superiores al 60% del diámetro del extrusor la diferencia no es tanta.

En último lugar vamos a comparar los resultados obtenidos para los diferentes porcentajes de relleno:

⇒ Dirección paralela al eje Y

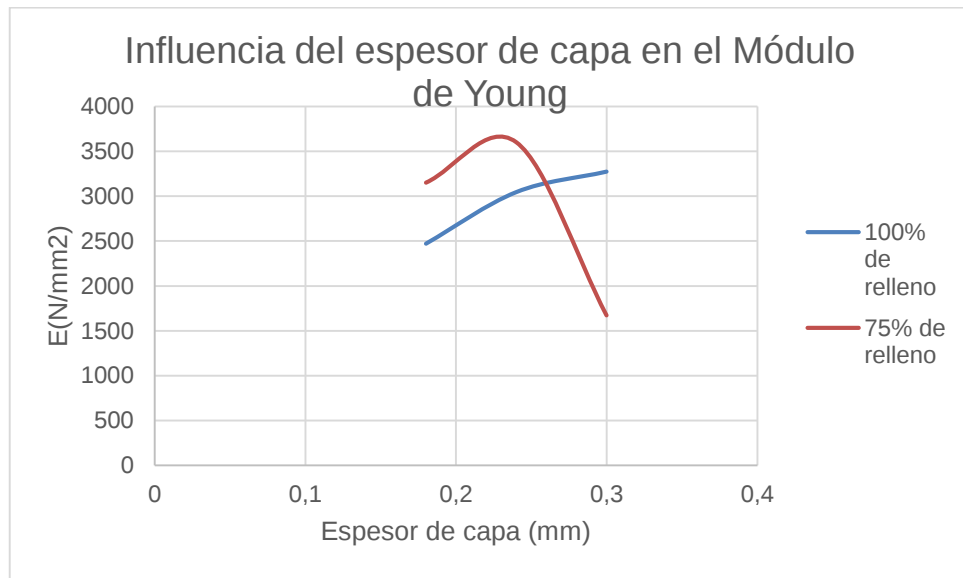


Figura 117. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión. Porcentaje de relleno

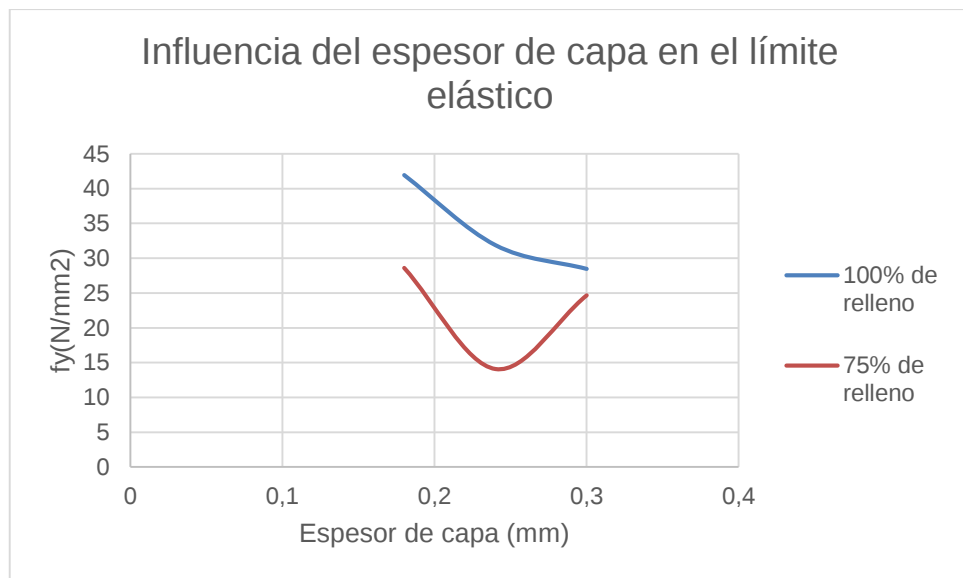


Figura 118. Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión. Porcentaje de relleno

Como podemos observar la tendencia en el comportamiento del límite elástico es similar para ambos porcentajes de relleno.

Como era de esperar para el relleno del 100% obtendremos un mayor límite elástico que para el relleno del 75%, para un espesor de capa de un 60% obtenemos que el valor del límite elástico para el 100 de relleno es en torno a un 31,815% mayor que para el relleno del 75%. Además, podemos ver como para el espesor de capa del 75% obtenemos valores de límite elástico que varía entorno a un 13,323%, sin embargo, desde el 40% hasta el 60% de espesor de capa estos valores difieren bastante, entorno a un 55,781% para el espesor de capa del 60%.

⇒ Dirección perpendicular al eje Y

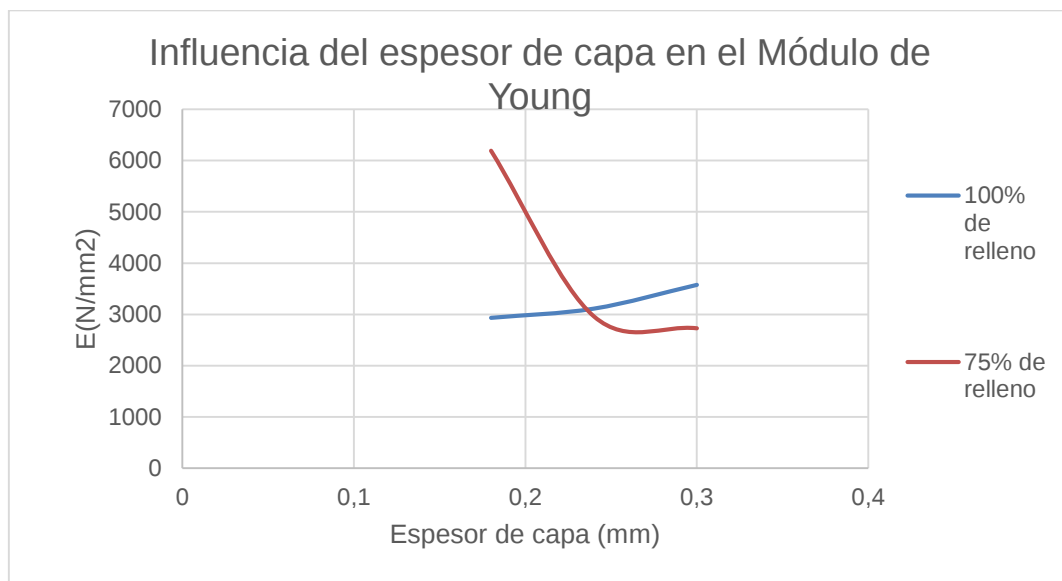


Figura 119. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Young. Compresión. Porcentaje de relleno

Podemos observar que para espesores de capa del 60%, el Módulo de Young para ambos porcentajes de relleno es muy similar. Esto puede deberse a que en el caso del relleno 75% las fibras lleguen a ponerse en contacto entre sí debido al esfuerzo de compresión, simulando un comportamiento del 100% de relleno, y obteniendo así valores similares de Módulo de Young.

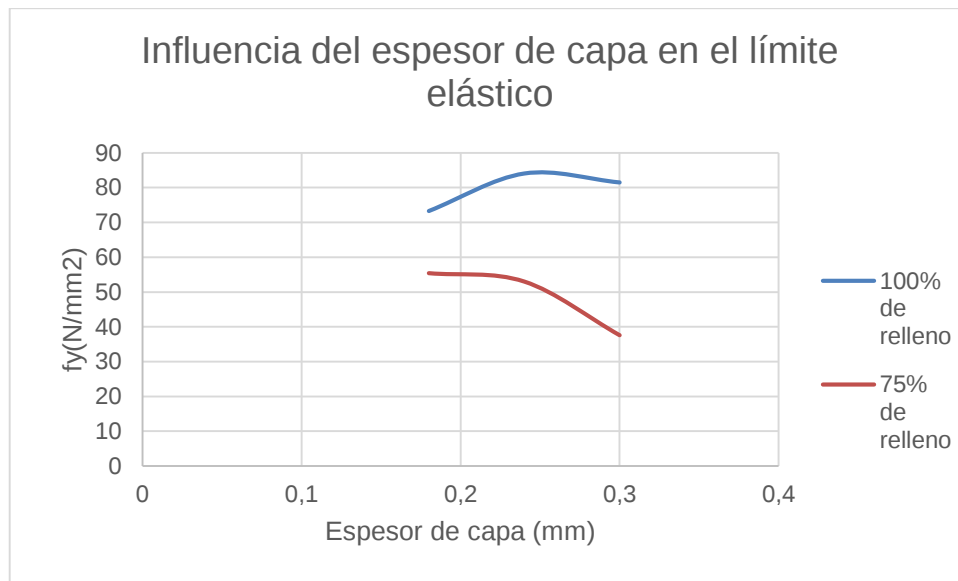


Figura 120. Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Compresión. Porcentaje de relleno

En último lugar observamos de nuevo que el valor del límite elástico para el relleno del 100% es mucho mayor que para el relleno del 75%, esto era de esperar pues para un mayor porcentaje de relleno tenemos unas mejores propiedades mecánicas.

Por otra parte, podemos ver como para el espesor de capa del 60% del diámetro del extrusor tenemos un punto de inflexión, es por ello que podemos deducir que la pieza tendrá un mejor comportamiento mecánico para este espesor de capa.

6.3 Curvas completas tracción/compresión

En último lugar vamos a representar en conjunto las gráficas del ensayo a tracción y compresión. En concreto estamos comparando las probetas de tracción con sus correspondientes a compresión, que son las ensayadas en la dirección paralela al eje de anisotropía.

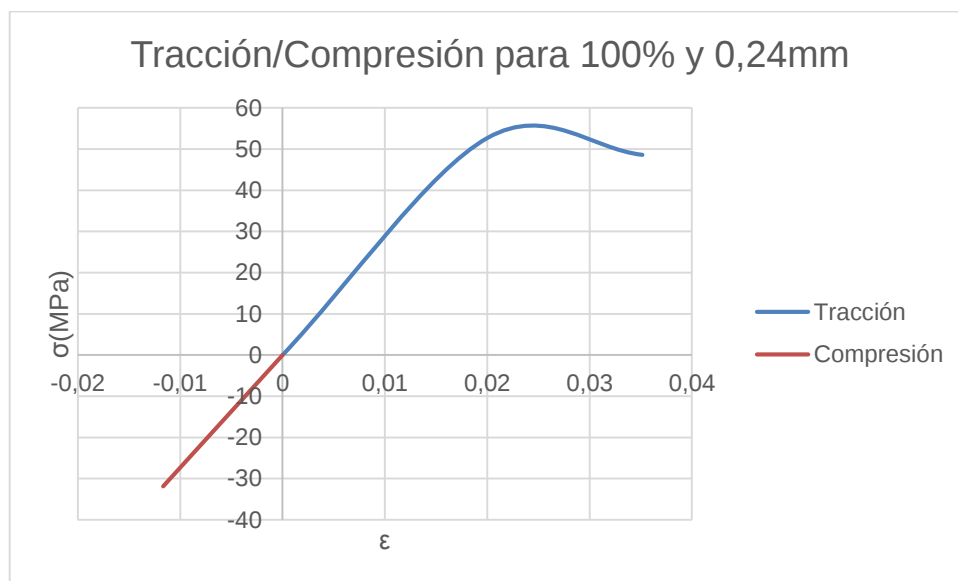


Figura 121. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 100% de relleno y espesor de capa 0,24mm

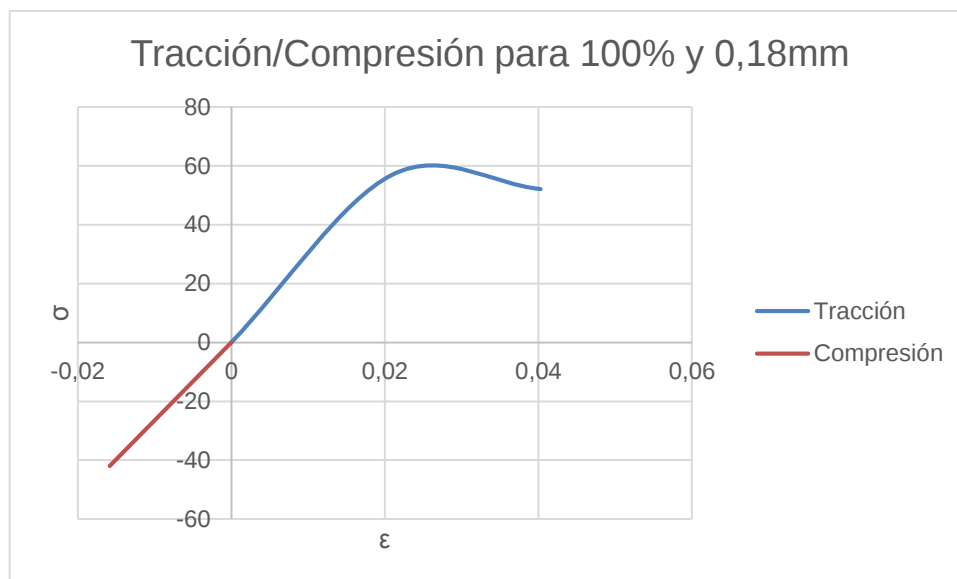


Figura 122. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 100% de relleno y espesor de capa 0,18mm

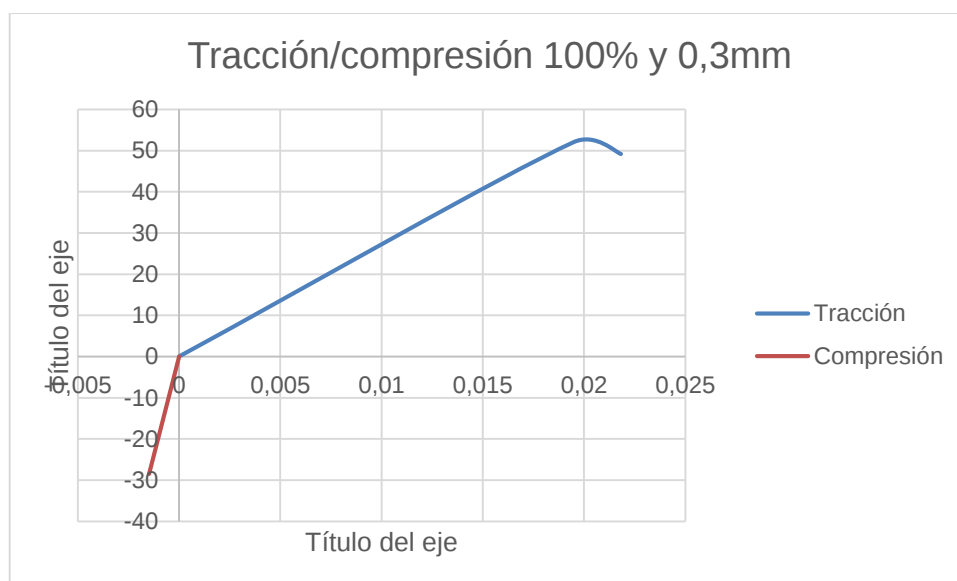


Figura 123. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 100% de relleno y espesor de capa 0,3mm

En primer lugar, podemos observar como las probetas resisten mucho más a tracción que a compresión.

Para el espesor de capa de 0,24mm la tensión máxima a tracción es de un 34,4129% mayor que a compresión.

Para el espesor de capa de 0,18mm la tensión máxima a tracción es de un 30,1151% mayor que a compresión.

Para el caso de relleno del 100% y espesores de capa de 0,18mm y 0,24mm el Módulo de Young es similar en tracción y compresión, esto quiere decir que para una tensión en concreto la pieza se deformará de forma similar a tracción y a compresión. Sin embargo, para el espesor de capa de 0,3mm el Módulo de Young es mucho mayor, por lo tanto, para una misma carga la pieza se deforma mucho menos que en el ensayo a tracción.

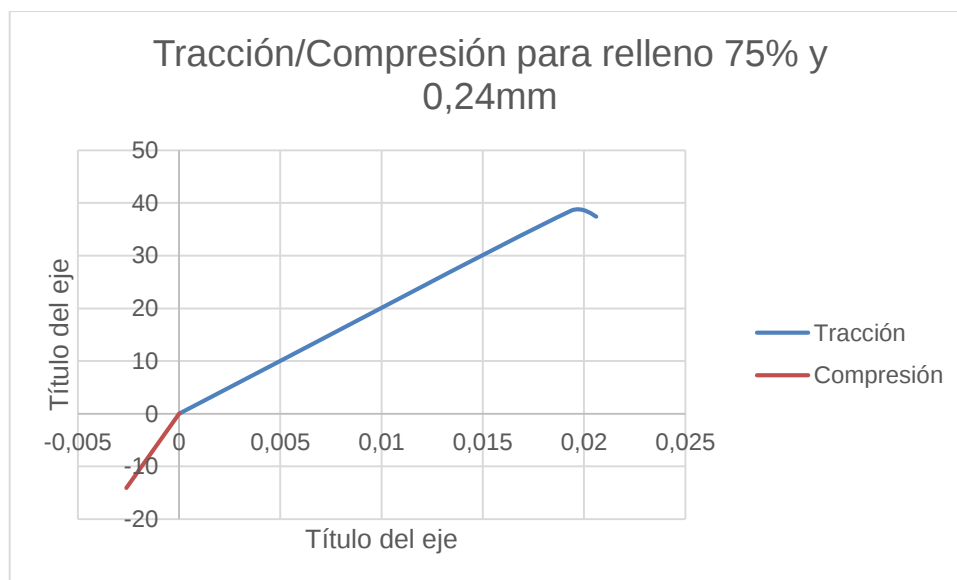


Figura 124. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 75% de relleno y espesor de capa 0,24mm

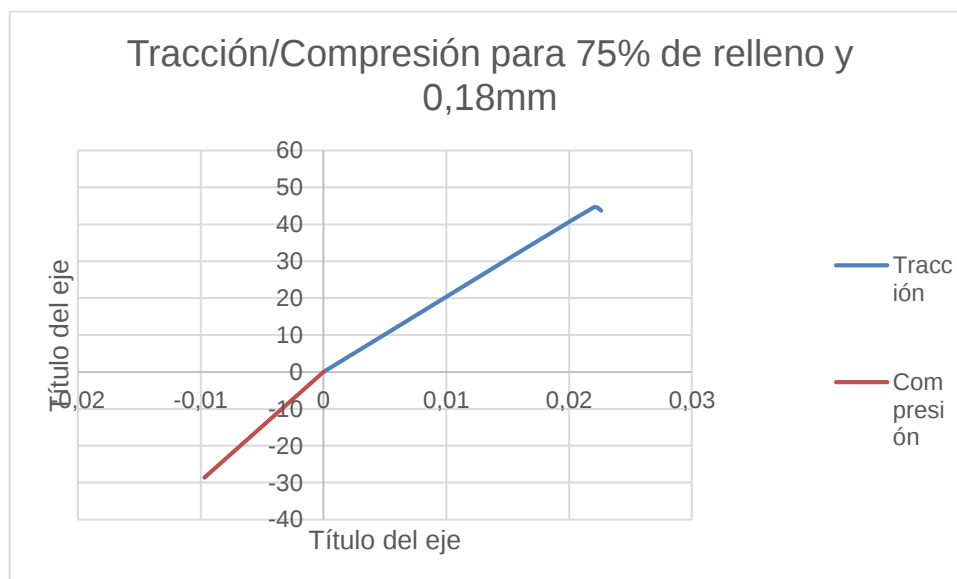


Figura 125 Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 75% de relleno y espesor de capa 0,18mm

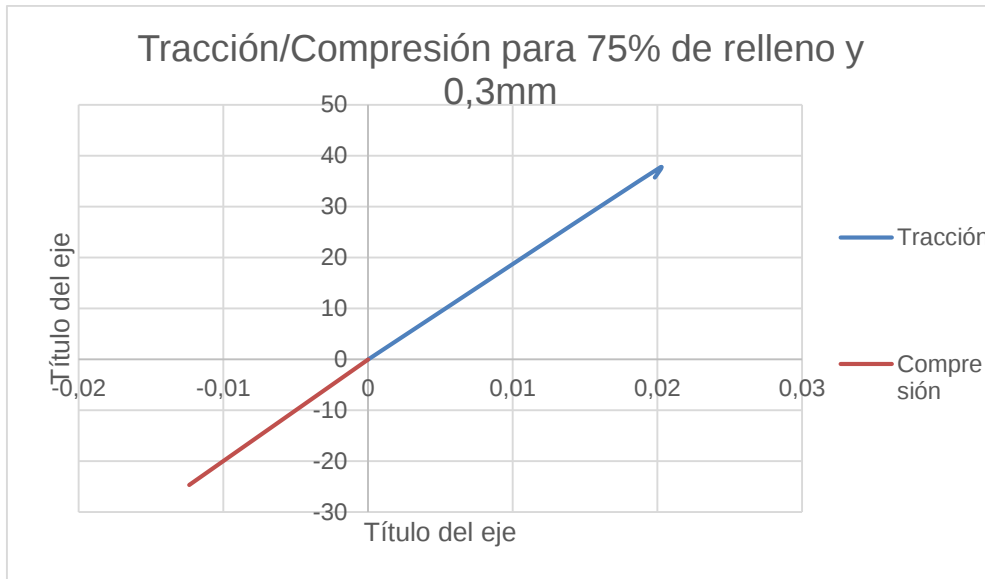


Figura 126. Comparativa comportamiento a tracción y compresión. 75% de relleno y espesor de capa 0,3mm

Para el relleno del 75% la diferencia entre la tensión máxima que soporta la pieza a tracción y a compresión no es tan grande.

Para el espesor de capa de 0,3mm la tensión máxima que soporta la pieza a tracción es un 34,628% mayor que a compresión.

Para el espesor de capa de 0,18 mm la tensión máxima que soporta la pieza a tracción es de un 34,5646% mayor que a compresión.

Por lo tanto, podemos concluir que en cuanto a la tensión máxima que resisten las piezas a tracción y a compresión la relación es similar y está entre el 30% y el 35%.

Si queremos que tengan un comportamiento similar en cuanto a tensión/deformación vemos que para el caso de 100% y espesores de capa entre el 40% y el 60% tendremos unos valores similares.

6.4 Resultados ensayos cortante

Al igual que con el análisis a tracción en este caso vamos a dividir los resultados en dos grupos, uno para el 100% de relleno y otro para el 75%, para finalmente compararlos entre sí.

⇒ Porcentaje de relleno 100%:

- Espesor de capa 0,3mm

	G(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A3 (POSI.VERTICAL)	2763,025	20,5361525	20,5361525	0,00864025
B3 (POSI. HORIZONTAL)	2558,075	28,298175	28,298175	0,010728
C3 (POSI.CANTO)	3042,96	27,628612	27,628612	0,0126596

Tabla 71 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.

En primer lugar, podemos ver como para la posición de canto obtenemos un mayor Módulo de Elasticidad Transversal, entorno a un 9,199% respecto a la posición de canto y un 15,934% respecto a la posición horizontal, es decir, la pieza se deformará menos al aplicar una mayor carga a cortante.

Por otro lado, podemos ver que el valor del límite elástico y de la tensión de rotura es el mismo, esto se debe a que las probetas no han tenido comportamiento plástico antes de romper.

Como podemos observar para las posiciones horizontal y de canto tendremos un valor similar de resistencia mecánica, siendo este entorno a un 2,366% mayor en la dirección horizontal que en la de canto, y siendo estos mayores, entorno a un 27,42959% respecto a la posición vertical.

Esto puede deberse de nuevo a la dirección de impresión puesto que en el caso de las posiciones horizontales y de canto los filamentos están depositados en la dirección perpendicular a la aplicación del esfuerzo a cortante, sin embargo, para la posición vertical la dirección perpendicular a la aplicación del esfuerzo cortante es la de deposición de capas, es por ello que la probeta puede colapsar o las capas pueden separarse entre sí antes de alcanzar la rotura del material.

- Espesor de capa 0,24mm

	G(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A1 (POSI.VERTICAL)	1930,4	7,970695	7,970695	0,00402325
B1 (POSI. HORIZONTAL)	2359,475	18,8671	18,83525	0,010193

C1 (POSI.CANTO)	3027,6	28,16808	28,16808	0,0130418
-----------------	--------	----------	----------	-----------

Tabla 72 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.

Para el espesor de capa del 60% podemos ver como en la posición de canto tenemos mejores propiedades mecánicas como Módulo de Elasticidad Transversal, límite elástico y tensión de rotura,

A diferencia del espesor de capa del 75% podemos ver como la diferencia de las propiedades mecánicas de la posición de canto respecto a la horizontal es mayor, en torno a un 33,0195% el valor del límite elástico y la tensión de rotura. (Podemos apreciar como seguimos sin tener un comportamiento plástico de la pieza).

- Espesor de capa 0,18mm

	G(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A2 (POSI.VERTICAL)	2319,76	10,18366	10,18366	0,0050354
B2 (POSI. HORIZONTAL)	2687,575	23,0887425	22,869675	0,01051233
C2 (POSI.CANTO)	2869,46667	29,2792567	29,2792567	0,012809

Tabla 73 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.

De nuevo podemos ver como dentro de un mismo espesor de capa obtendremos mejores propiedades mecánicas para la posición de canto y horizontal, siendo peores para la posición vertical. Como hemos dicho anteriormente esto se debe a la dirección de deposición de las capas.

Dentro de las posiciones horizontal y de canto podemos ver como el valor del límite elástico en la posición de canto es mayor que en la posición horizontal, entorno a un 21,143%.

A continuación, vamos a comparar los resultados obtenidos entre los diferentes espesores de capa.

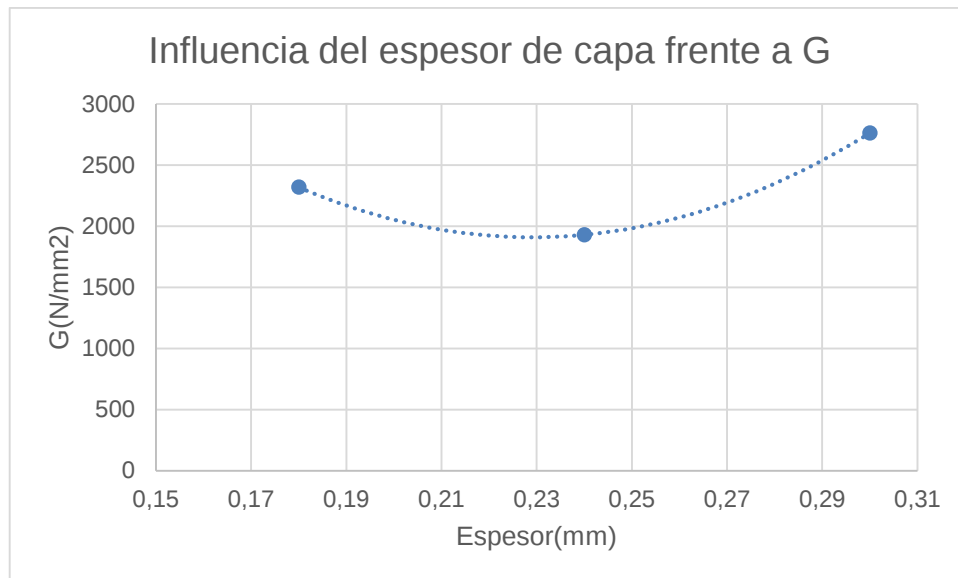


Figura 127 Influencia del espesor de capa en el Módulo de Elasticidad Transversal. Cortante

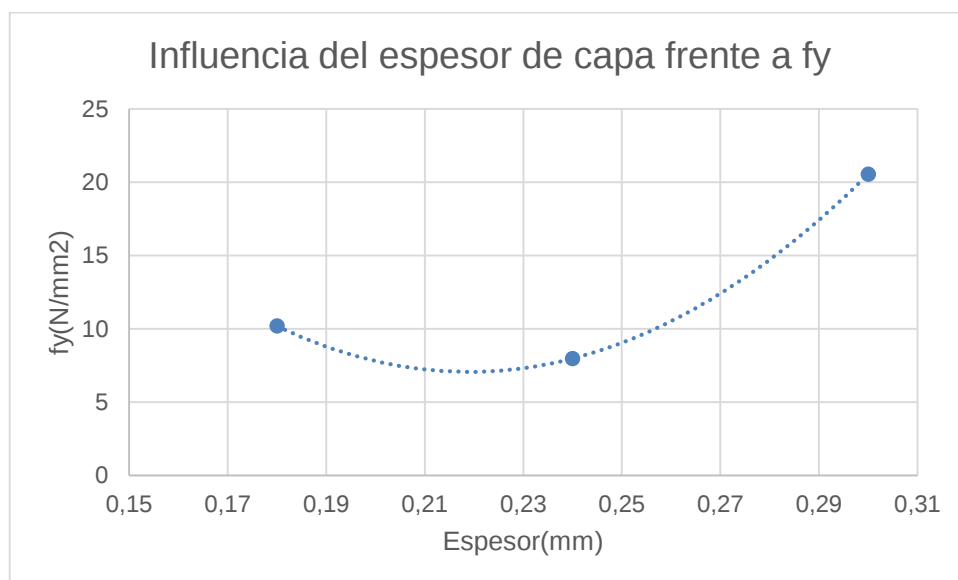


Figura 128 Influencia del espesor de capa en el Límite elástico. Cortante

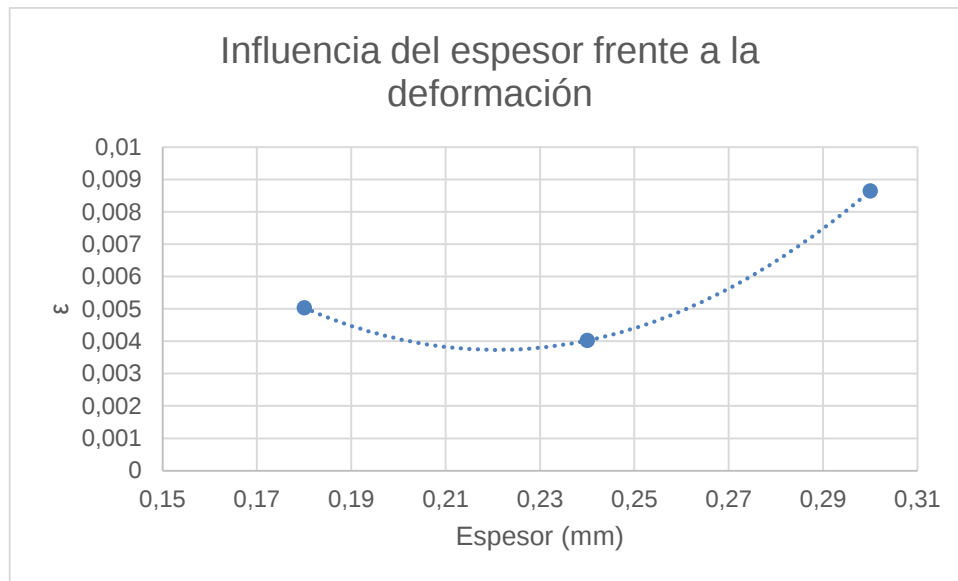


Figura 129 Influencia del espesor de capa en la deformación . Cortante

Como podemos ver no hay una tendencia lineal de las propiedades mecánicas. Para todas las propiedades tenemos un punto de inflexión en torno al 60% del espesor de capa, es por ello que para el esfuerzo a cortante podemos decir que entre el 40% del diámetro de la boquilla del extrusor y el 50/60% la tendencia será que al aumentar el espesor de capa disminuirán las propiedades mecánicas de la pieza, sin embargo, entre el 60% y el 80% a medida que aumentemos dicho espesor aumentarán las propiedades mecánicas de la pieza.

⇒ Porcentaje de relleno del 75%:

- Espesor de capa 0,3mm

	G(N/mm2)	f _y (N/mm2)	σ _r (N/mm2)	ε _{última}
A6 (POSI.VERTICAL)	1708,375	10,861215	10,861215	0,0078725
B6 (POSI. HORIZONTAL)	2084,62	17,90524	17,90524	0,0081166
C6 (POSI.CANTO)	2311,075	17,3792425	16,83295	0,0227575

Tabla 74 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.

Para el espesor del 75% observamos que en la posición de canto tenemos un mayor Módulo de Elasticidad transversal, entorno a un 26,07877%. Sin embargo, vemos como la diferencia en el límite elástico y la tensión de rotura no varían mucho entre la posición horizontal y de canto, siendo estas un 39,3405% mayores que en la posición vertical.

- Espesor de capa 0,24mm

	G(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A4 (POSI.VERTICAL)	1685,62	10,03388	10,03388	0,0076556
B4 (POSI. HORIZONTAL)	2152,04	19,25306	19,25306	0,009194
C4 (POSI.CANTO)	2415,74	19,65377	19,65377	0,0171754

Tabla 75 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.

Para el espesor de capa de 0,24mm podemos ver como el Módulo de Elasticidad Transversal en la posición de canto es un 10,9159% mayor que en la posición horizontal y un 30,223% mayor que en la posición vertical.

En cuanto a la tensión máxima esta será similar para las posiciones horizontal y de canto. Si nos fijamos para la posición de canto G es mayor, por lo tanto, para una misma tensión de rotura de la pieza obtendremos una mayor deformación última.

La tensión máxima será un 48,9466% mayor en las posiciones de canto y horizontal que en la posición vertical.

- Espesor de capa 0,18mm

	G(N/mm ²)	f _y (N/mm ²)	σ _r (N/mm ²)	ε _{última}
A5 (POSI.VERTICAL)	1703,475	11,75819	11,75819	0,0072075
B5 (POSI. HORIZONTAL)	2186,92	18,04823	18,04823	0,0084914
C5 (POSI.CANTO)	2188,55	19,67974	19,656725	0,01255225

Tabla 76 Comparativa de propiedades mecánicas. Ensayo cortante.

Para el espesor de capa del 60% las propiedades mecánicas en las posiciones horizontal y vertical son muy similares. El Módulo de elasticidad transversal es un 22,164% mayor en la posición de canto que en la posición vertical y la tensión de rotura es un 40,1823% mayor en la posición de canto que en la posición vertical.

A continuación, vamos a comparar los resultados obtenidos para los diferentes espesores de capa.

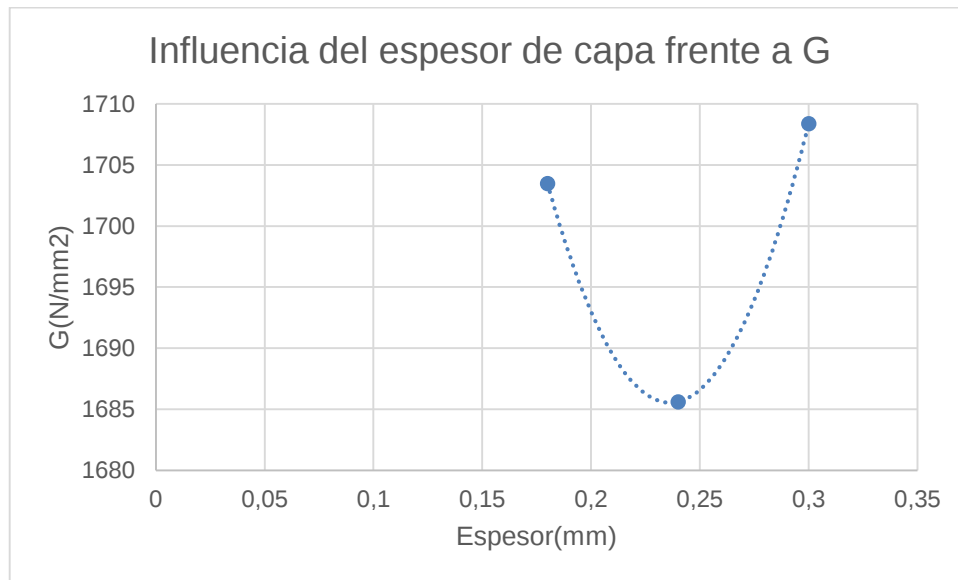


Figura 130 Influencia del espesor de capa en el Módulo de Elasticidad Transversal. Cortante

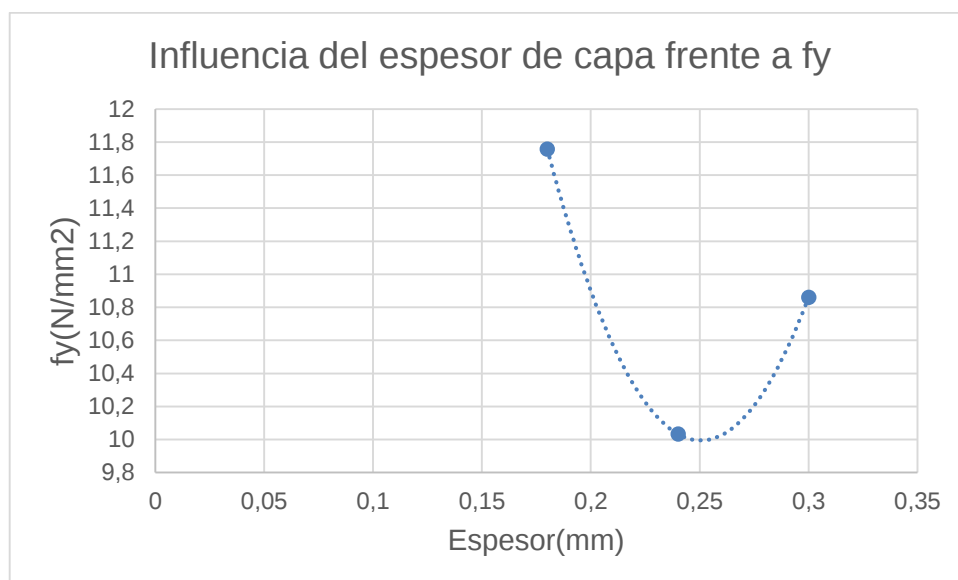


Figura 131 Influencia del espesor de capa en el límite elástico. Cortante

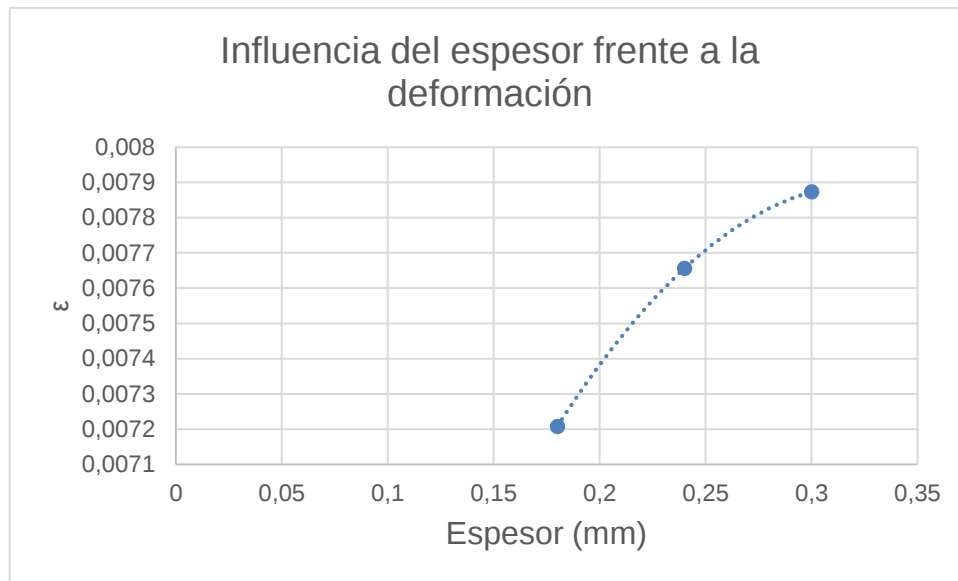


Figura 132. Influencia del espesor de capa en la deformación. Cortante

Como podemos ver tenemos el mismo comportamiento que el obtenido anteriormente, para espesores que se encuentran entre el 40% y el 60% tendremos una disminución de las propiedades mecánicas a medida que aumenta el espesor de capa, sin embargo, a partir del 60% la tendencia es inversa, es decir, a mayor espesor de capa se produce un aumento de las propiedades mecánicas.

En último lugar vamos a comparar los resultados obtenidos para los diferentes rellenos:

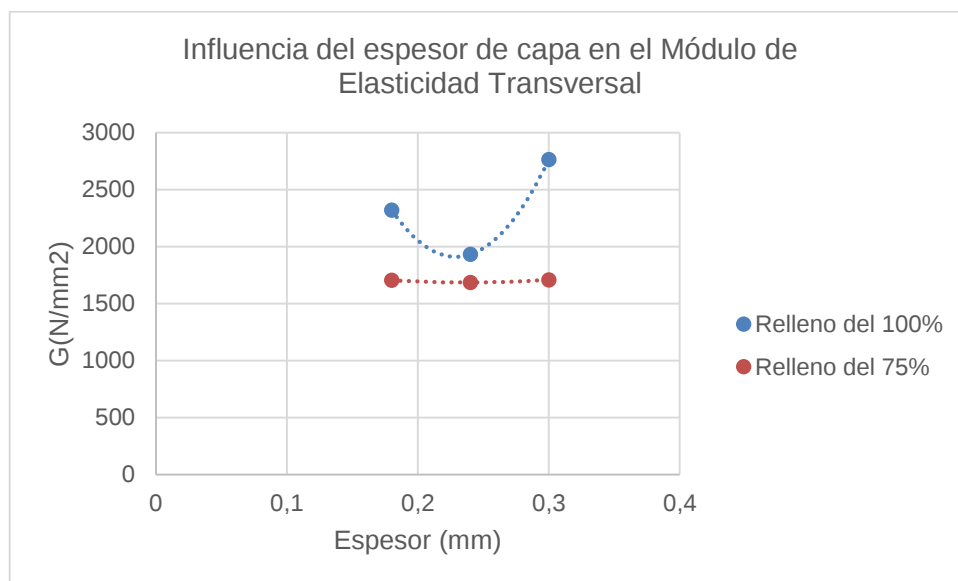


Figura 133. Influencia del espesor de capa en el Módulo de Elasticidad Transversal. Comparativa porcentaje de relleno. Cortante

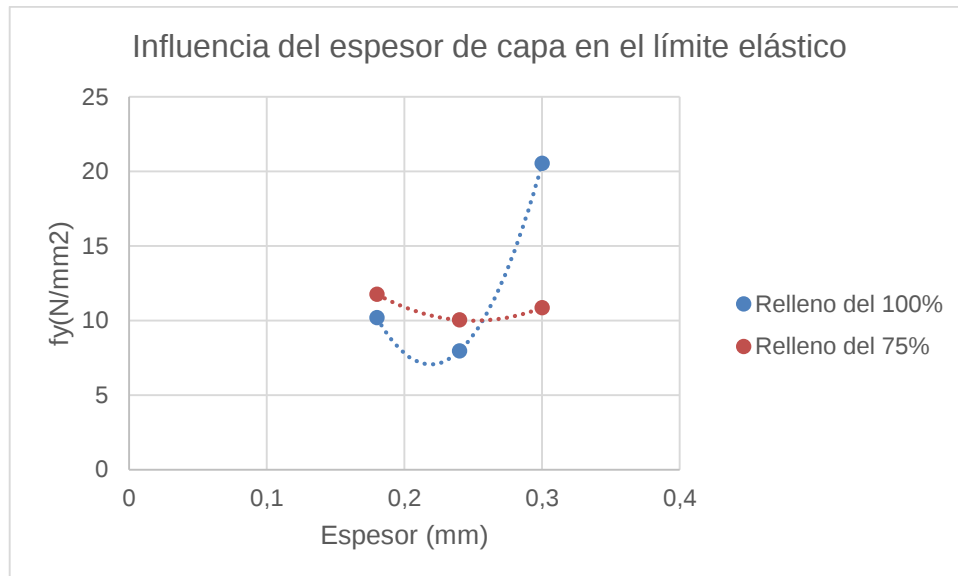


Figura 134. Influencia del espesor de capa en el límite elástico .Comparativa porcentaje de relleno. Cortante

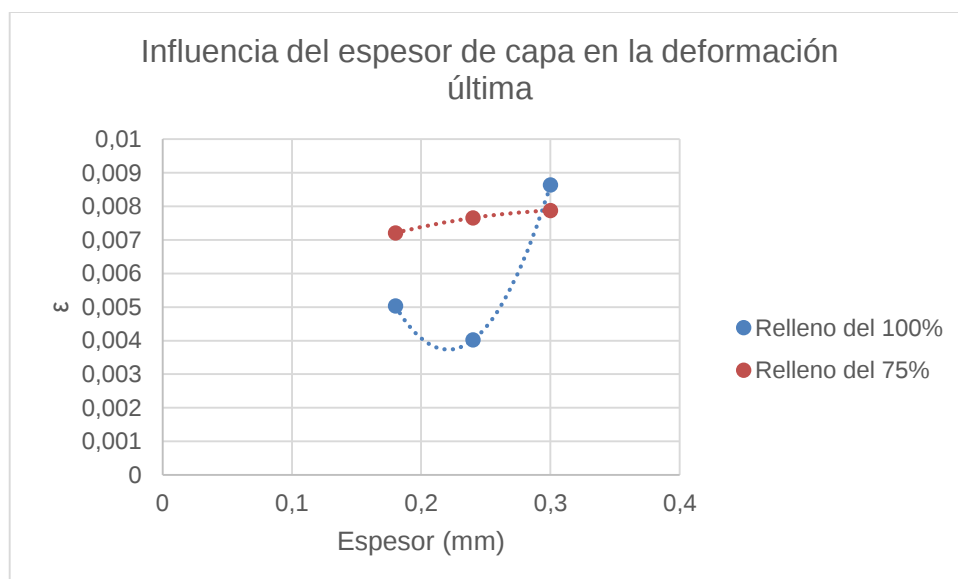


Figura 135. Influencia del espesor de capa en la deformación. Comparativa porcentaje de relleno. Cortante

Como era de esperar para el relleno del 100% obtenemos mejores propiedades mecánicas en cuanto a Módulo de Elasticidad Transversal, límite elástico y tensión de rotura. En cuanto a la deformación de rotura para el relleno del 75% obtenemos una mayor deformación de la probeta que en el caso del 100% de relleno.

Podemos concluir que para el esfuerzo a cortante podemos reducir el porcentaje de relleno de la pieza cuando usamos un espesor de capa en torno al 60% sin tener una variación excesiva de las propiedades mecánicas de la pieza. En concreto podemos ver como el Módulo de elasticidades transversal para un espesor del 60% disminuye un 10,52% con una reducción del porcentaje de relleno del 25%. Para el límite elástico para el 75% de relleno es un 20,5622% mayor que para el 100% de relleno.

6.5 Anisotropía del material

Con los datos obtenidos en el ensayo de tracción (Módulo de Young), en el ensayo de cortante (Módulo de elasticidad transversal) y con el coeficiente de Poisson podemos hacer una caracterización mecánica del material. Dicha caracterización mecánica la vamos a representar de forma matricial.

Para ello tenemos que aclarar que el plano de corte 1-2 corresponde con el ensayo de la probeta impresa de canto, el plano de corte 1-3 corresponde con el ensayo de la probeta impresa en la dirección vertical y el plano de corte 2-3 corresponde con el ensayo de la probeta impresa en la dirección horizontal.

La nomenclatura expresada de forma matricial queda:

$$\begin{pmatrix} E_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{12} & E_{22} & G_{23} \\ G_{13} & G_{23} & E_{33} \end{pmatrix}$$

A continuación, vamos a representar las matrices para los siguientes casos:

- Probeta tipo 1

$$\begin{pmatrix} 3008.825 & 3027.6 & 1930.4 \\ Sim & 3108.92 & 2359.475 \\ Sim & Sim & 3386.14 \end{pmatrix}$$

- Probeta tipo 2

$$\begin{pmatrix} 3148.82 & 2869.466 & 2319.76 \\ Sim & 3077.62 & 2687.575 \\ Sim & Sim & 3107.58 \end{pmatrix}$$

- Probeta tipo 3

$$\begin{pmatrix} 2652.15 & 3042.96 & 2763.025 \\ Sim & 3193.7 & 2558.075 \\ Sim & Sim & 2988.46 \end{pmatrix}$$

- Probeta tipo 4

$$\begin{pmatrix} 2028.6 & 2415.74 & 1685.62 \\ Sim & 2592.48 & 2152.04 \\ Sim & Sim & 2380.25 \end{pmatrix}$$

- Probeta tipo 5

$$\begin{pmatrix} 2615.34 & 2188.55 & 1703.475 \\ Sim & 2690.45 & 2186.92 \\ Sim & Sim & 2382.42 \end{pmatrix}$$

- Probeta tipo 6

$$\begin{pmatrix} 2454.1 & 2311.075 & 1708.375 \\ Sim & 2462.48 & 2084.62 \\ Sim & Sim & 2493.6 \end{pmatrix}$$

6.6 Resultados simulaciones numéricas

A continuación, vamos a presentar la comparación entre los resultados obtenidos con DIC y con la simulación de ABAQUS.

Para realizar la comparativa hemos analizado el caso de 100% de relleno y espesor de capa 0,24mm para las posiciones horizontal, vertical y canto.

11.1 Posición vertical

- Pixel 100

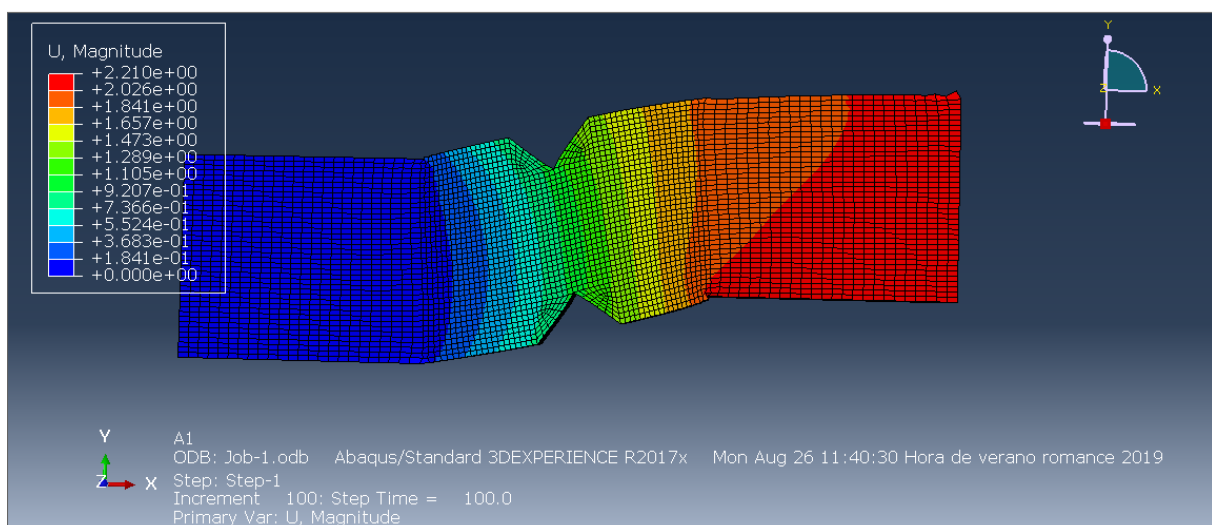


Figura 136. Mapa de desplazamientos. Probeta vertical

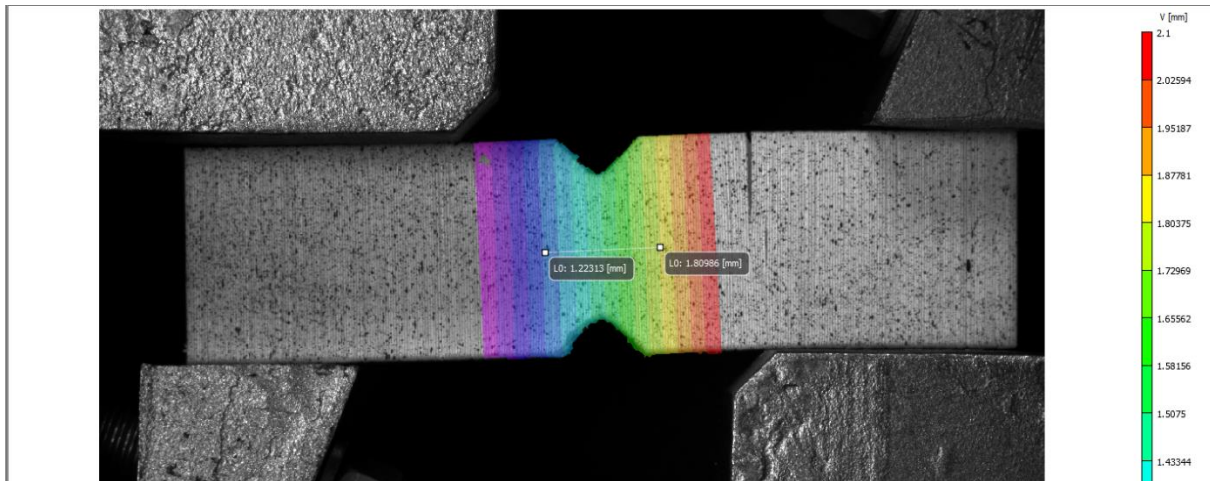


Figura 137 Mapa de desplazamientos. Probeta vertical

Como podemos ver la región roja del Vic 2D tiene un desplazamiento de (2.0259 – 2.1) mm.

Esta región se corresponde con la región naranja de ABAQUS y tiene un valor de (2.02 – 2.21) mm

- Pixel 50

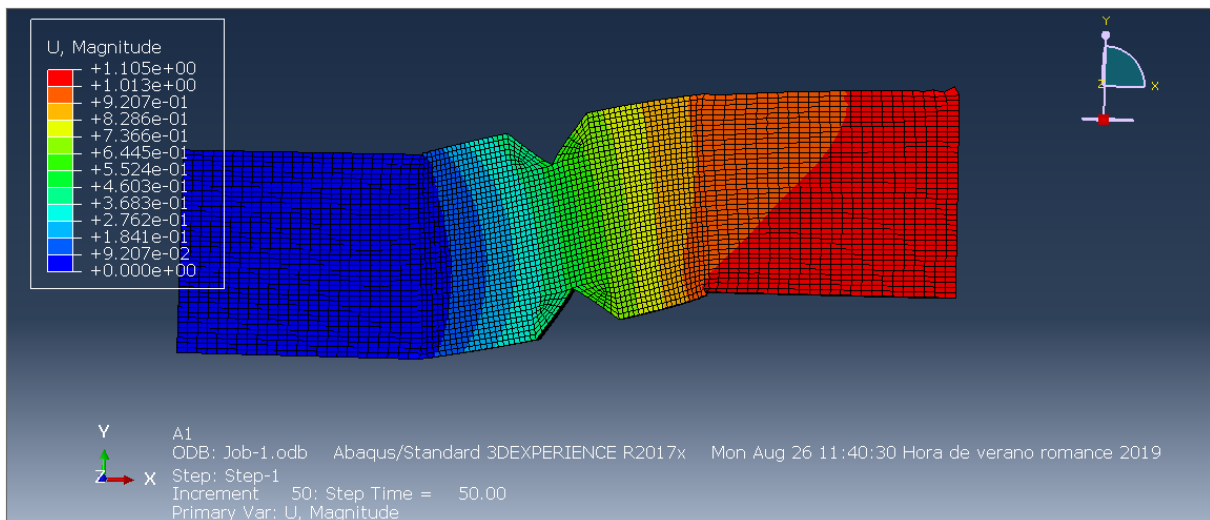


Figura 138. Mapa de desplazamientos. Probeta vertical

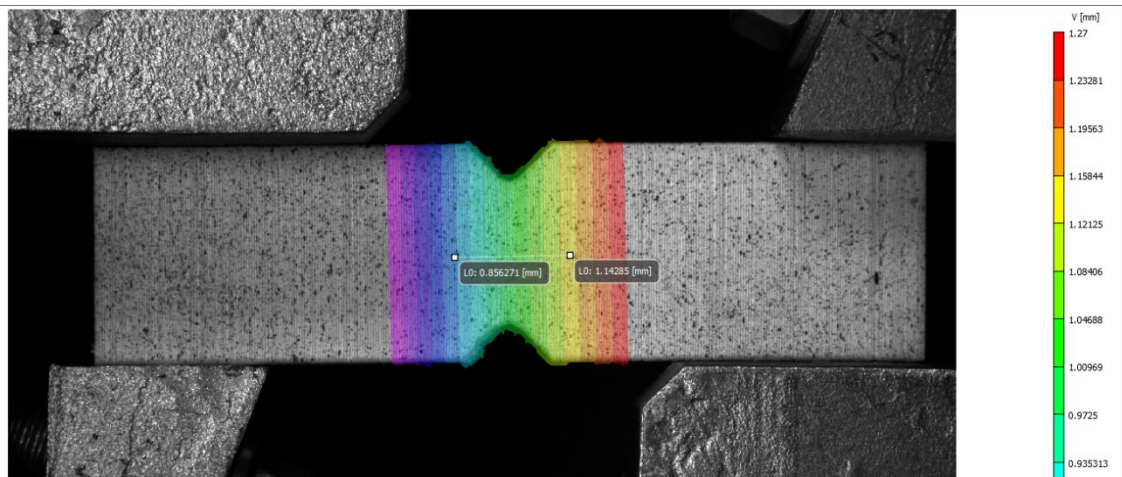


Figura 139 .Mapa de desplazamientos. Probeta vertical

Como podemos ver en la región roja de Vic 2D el desplazamiento está entre (1.2328 – 1.27) mm. Esta región se corresponde con naranja de ABAQUS y está en torno a 1.01mm

11.2 Posición horizontal

- Pixel 150

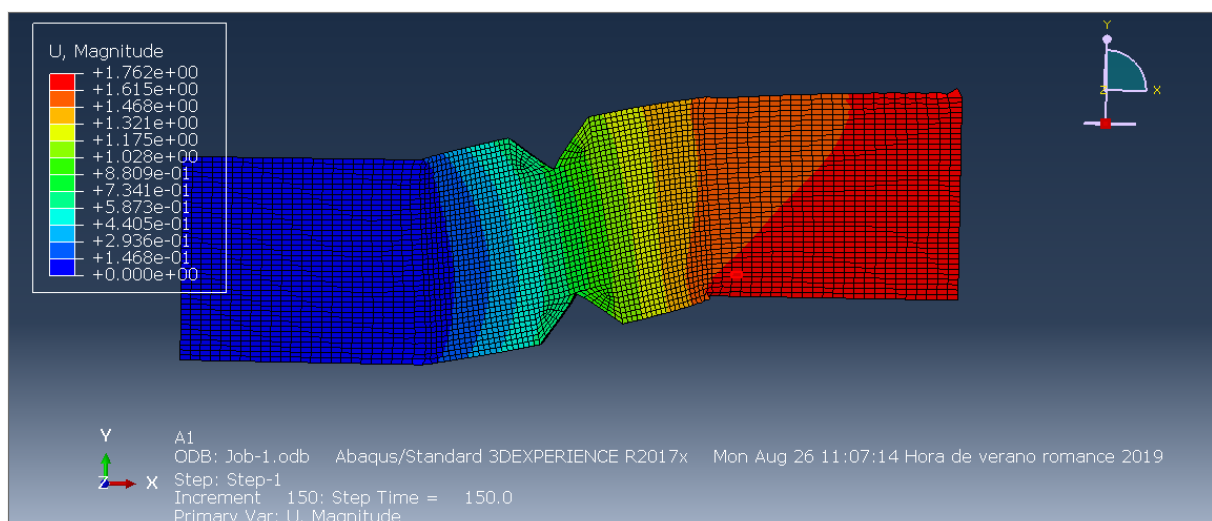


Figura 140. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

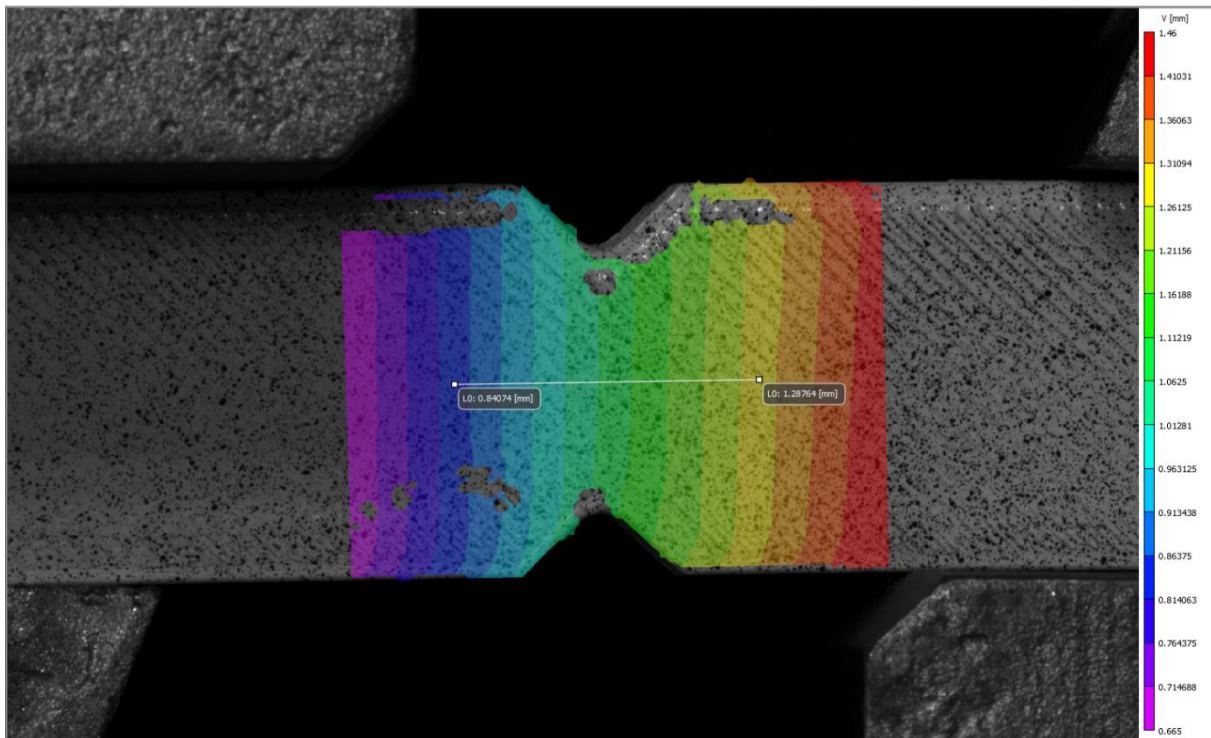


Figura 141. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

La región roja obtenida con Vic 2D se corresponde con la región amarilla oscura-naranja obtenida con ABAQUS, en ambos obtenemos un desplazamiento entre 1.41mm y 1.46mm.

- Pixel 250

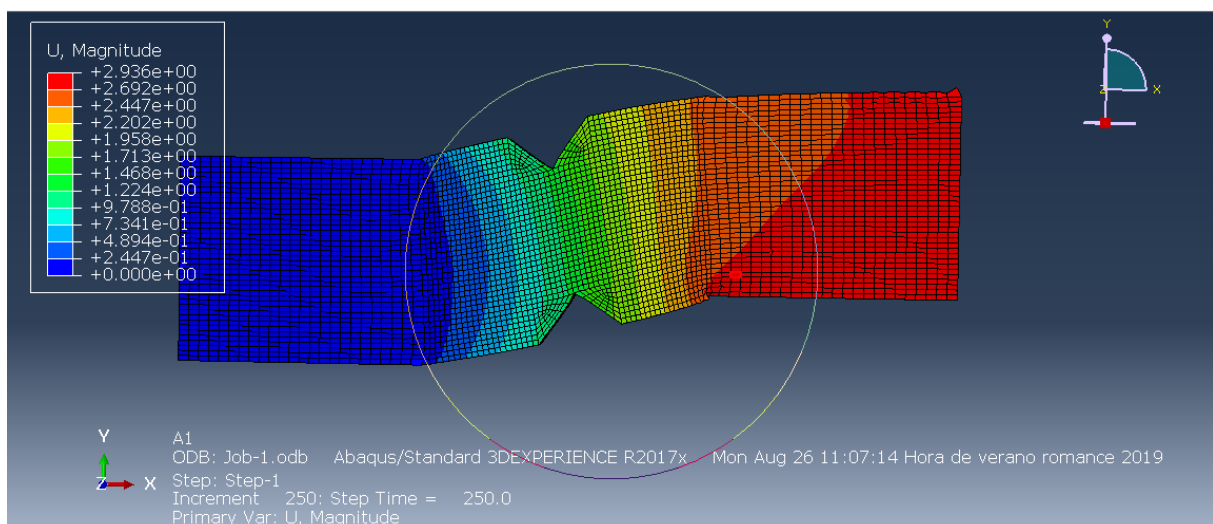


Figura 142. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

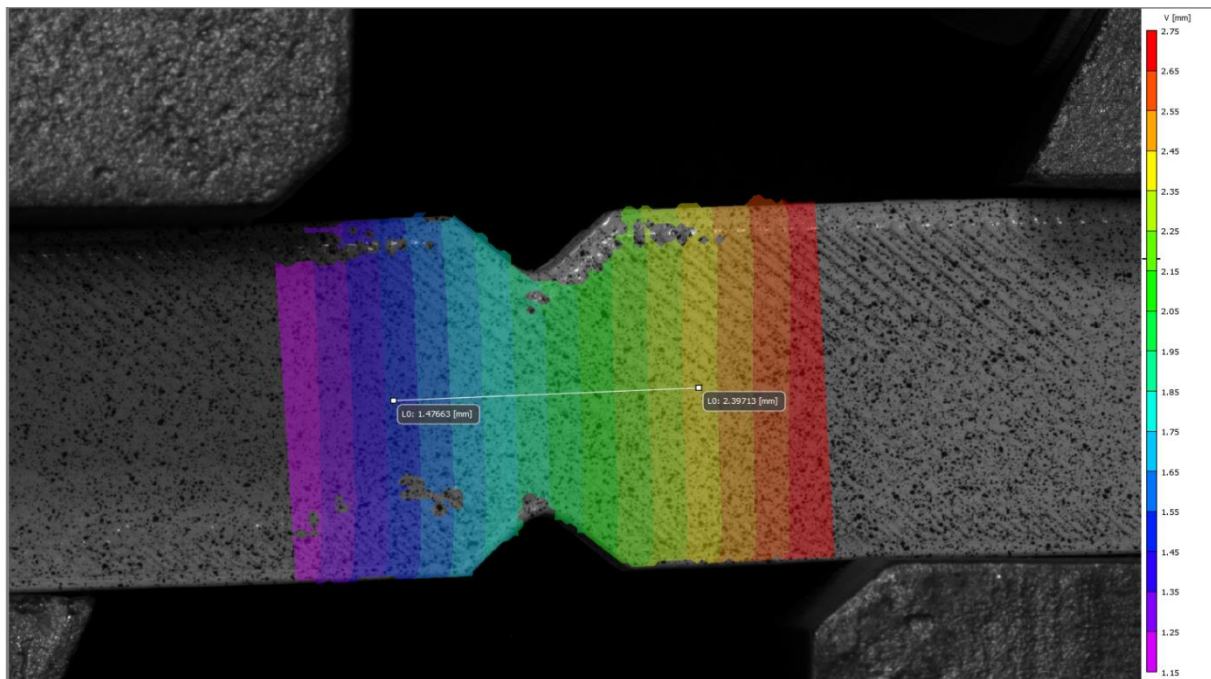


Figura 143. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

En este caso en la región roja obtenida con Vic 2D obtenemos unos desplazamientos entre 2.65mm y 2.75mm. Dicha región se corresponde con la región naranja obtenida con ABAQUS, y en ella obtenemos unos desplazamientos entre 2.44mm y 2.69mm.

- Pixel 350

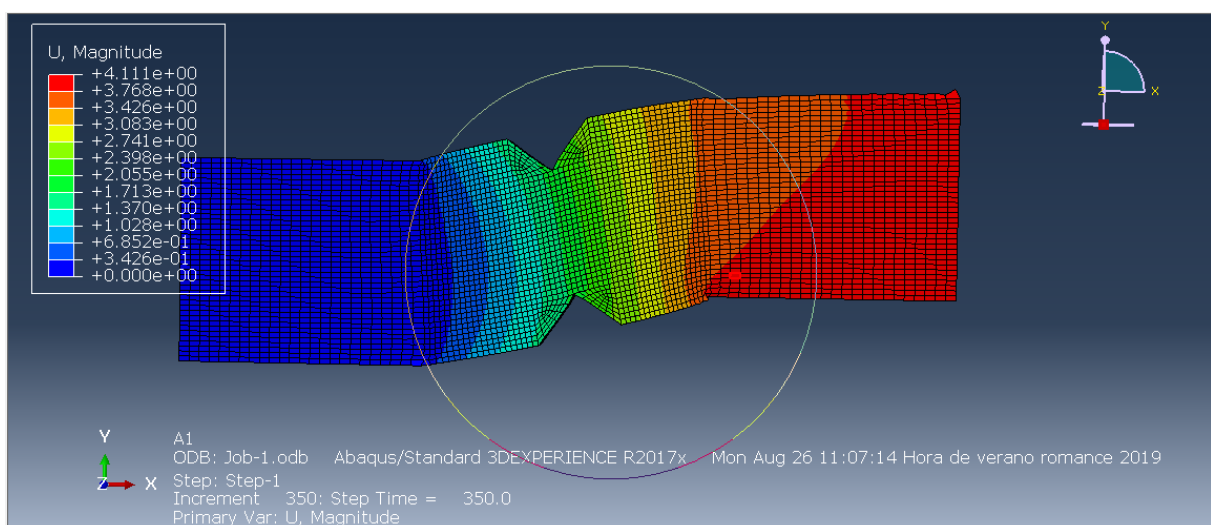


Figura 144. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

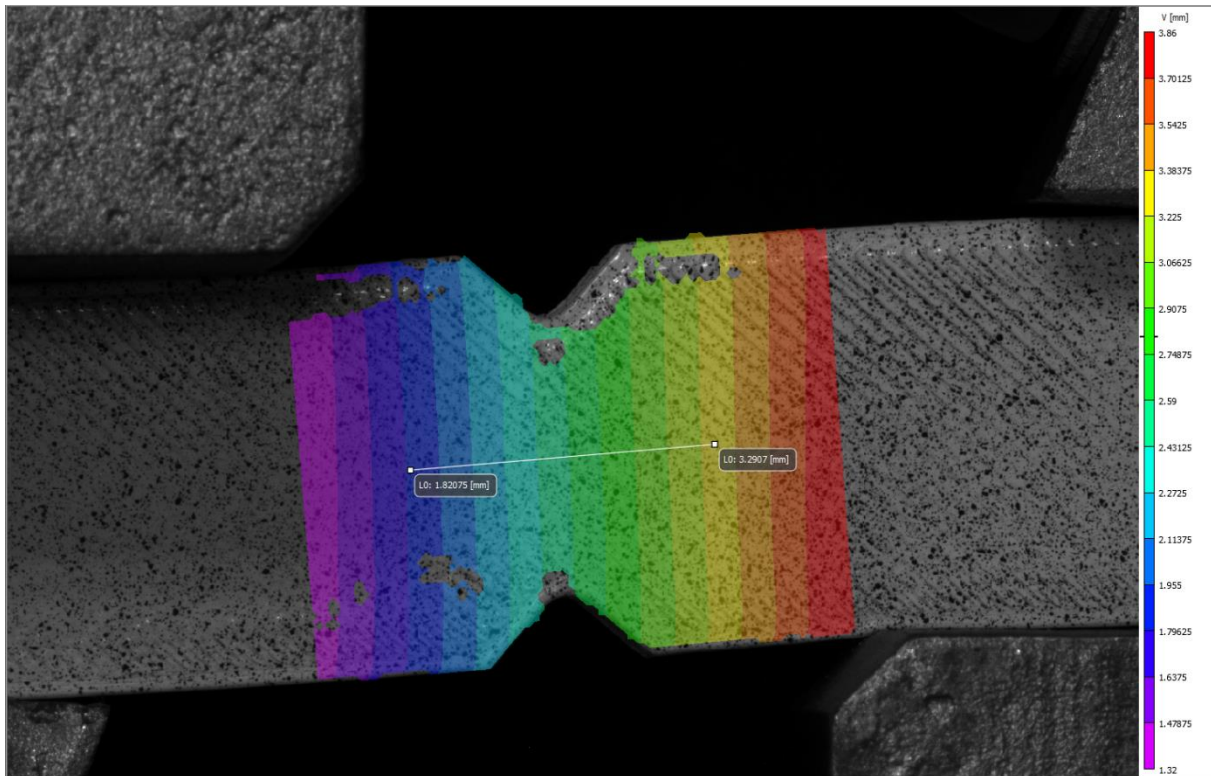


Figura 145 Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

- Pixel 430

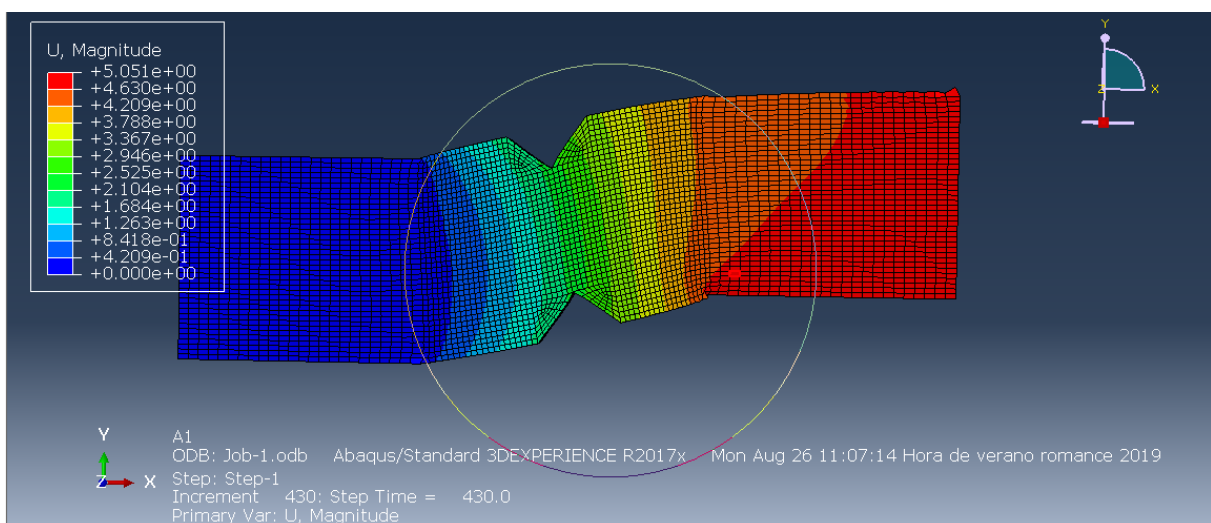


Figura 146. Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

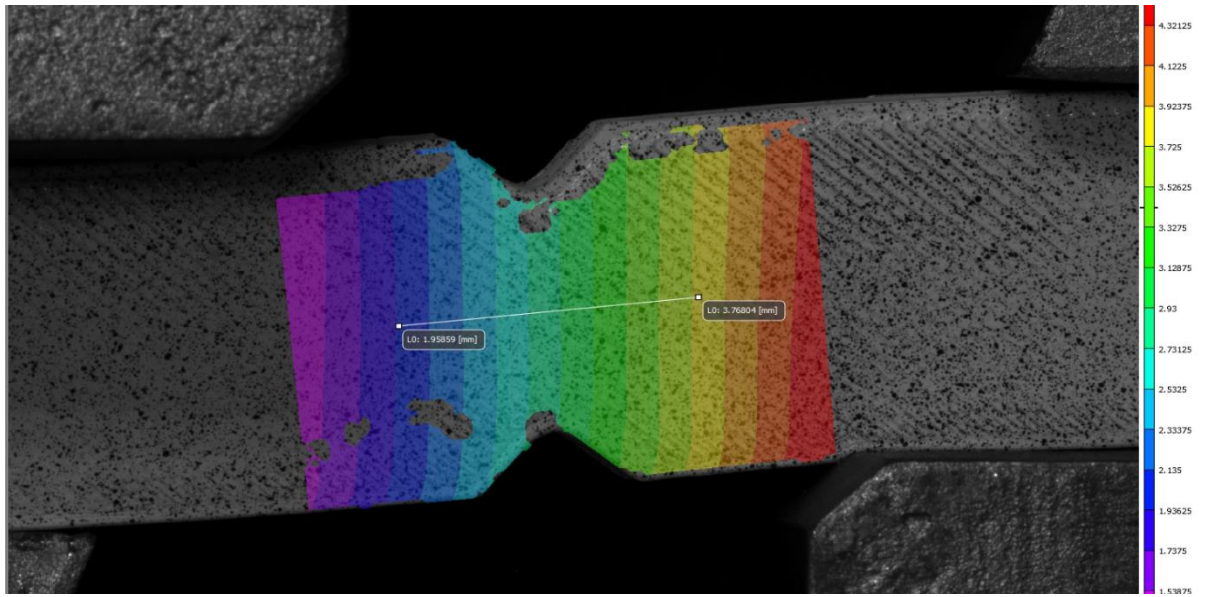


Figura 147 Mapa de desplazamientos. Probeta horizontal

De nuevo podemos ver como la región obtenida con Vic 2D que se corresponde con unos desplazamientos de entre 4.12mm y 4.32mm corresponde con la región naranja obtenida con ABAQUS, en la cual se obtienen unos desplazamientos entre 4.2mm y 4.62mm.

11.3 Posición canto

En último lugar representaremos los resultados obtenidos para las probetas impresa de canto, y veremos cómo, al igual que en los casos anteriores los resultados obtenidos con ABAQUS se corresponden con los obtenidos con Vic 2D.

- Pixel 50

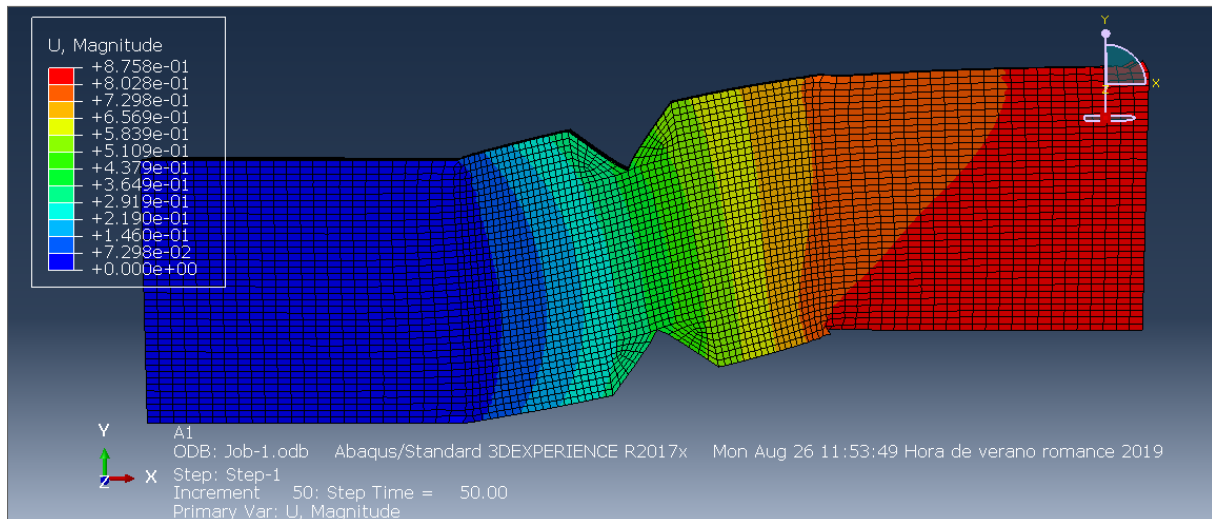


Figura 148. Mapa de desplazamientos. Probeta canto

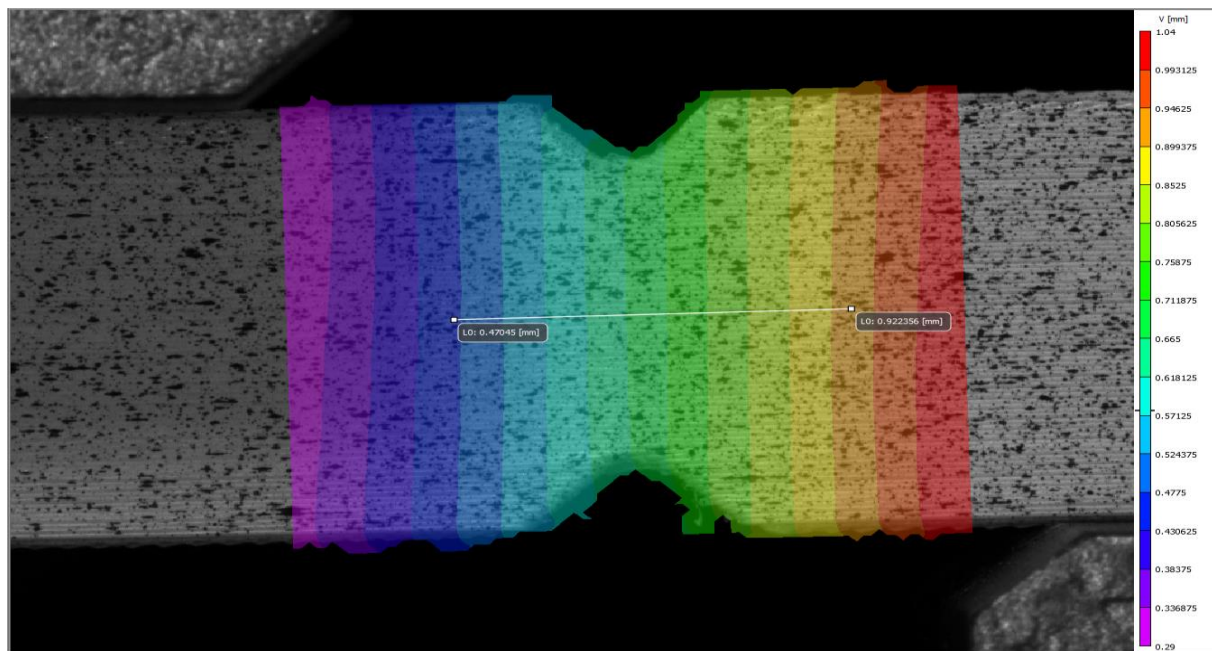


Figura 149. Mapa de desplazamientos. Probeta canto

- Pixel 100

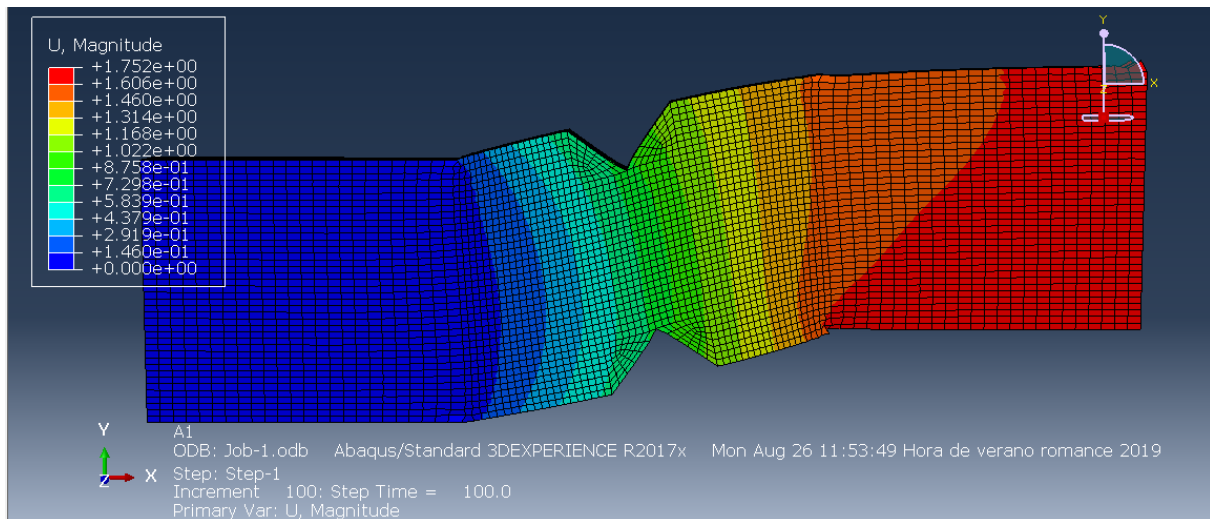


Figura 150 Mapa de desplazamientos. Probeta canto

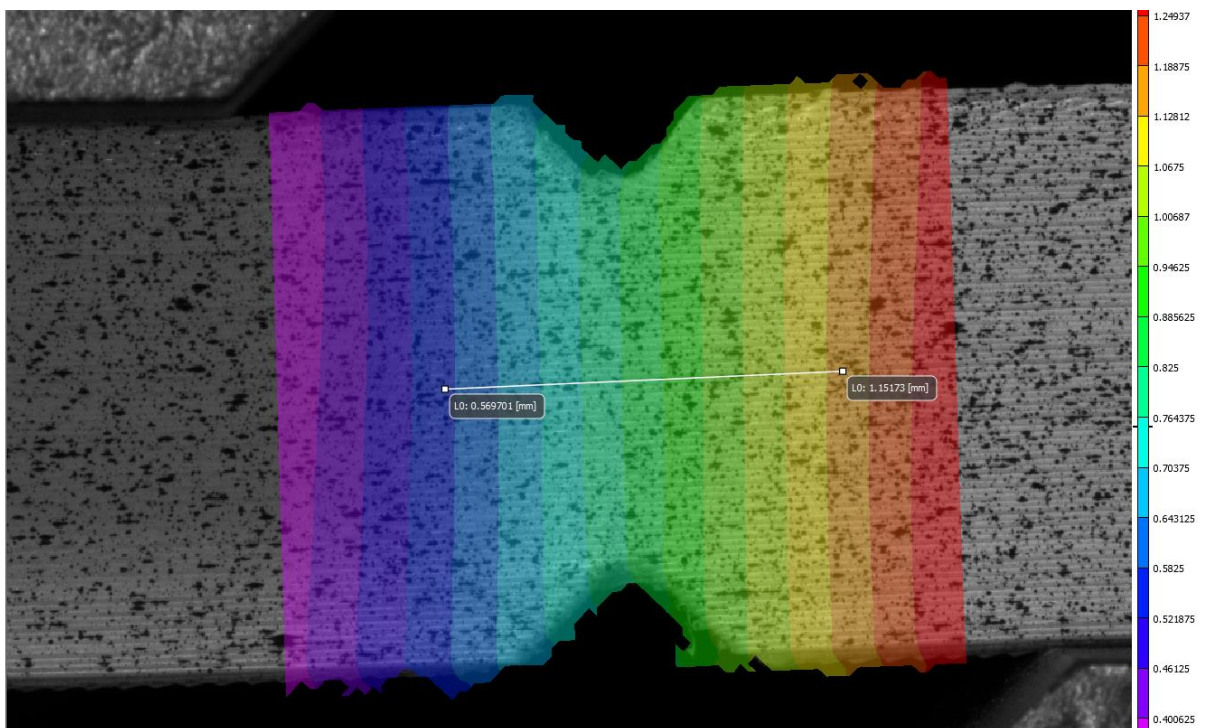


Figura 151 Mapa de desplazamientos. Probeta canto

- Pixel 150

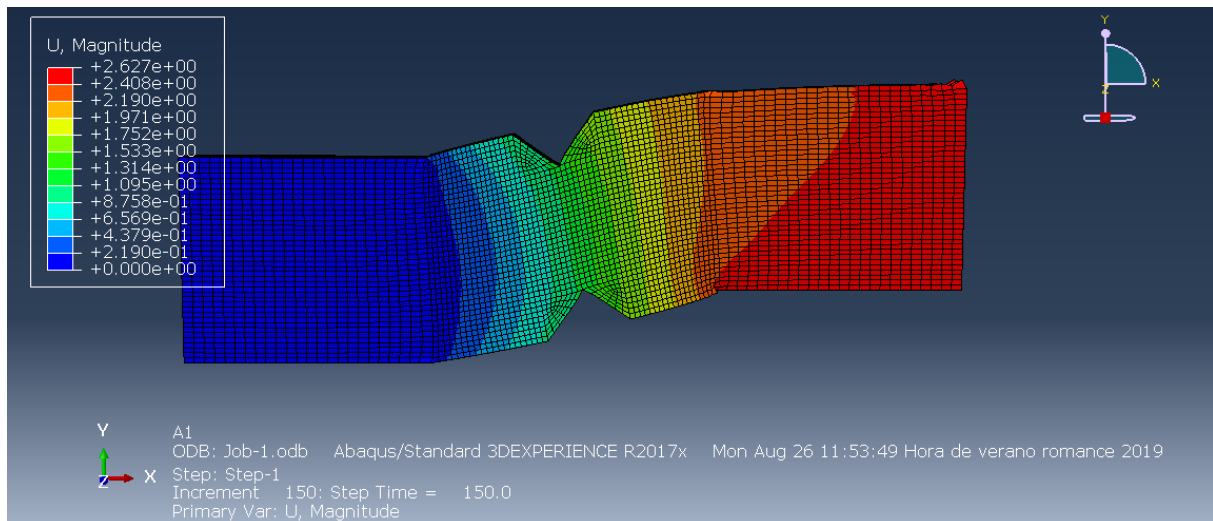


Figura 152. Mapa de desplazamientos. Probeta canto

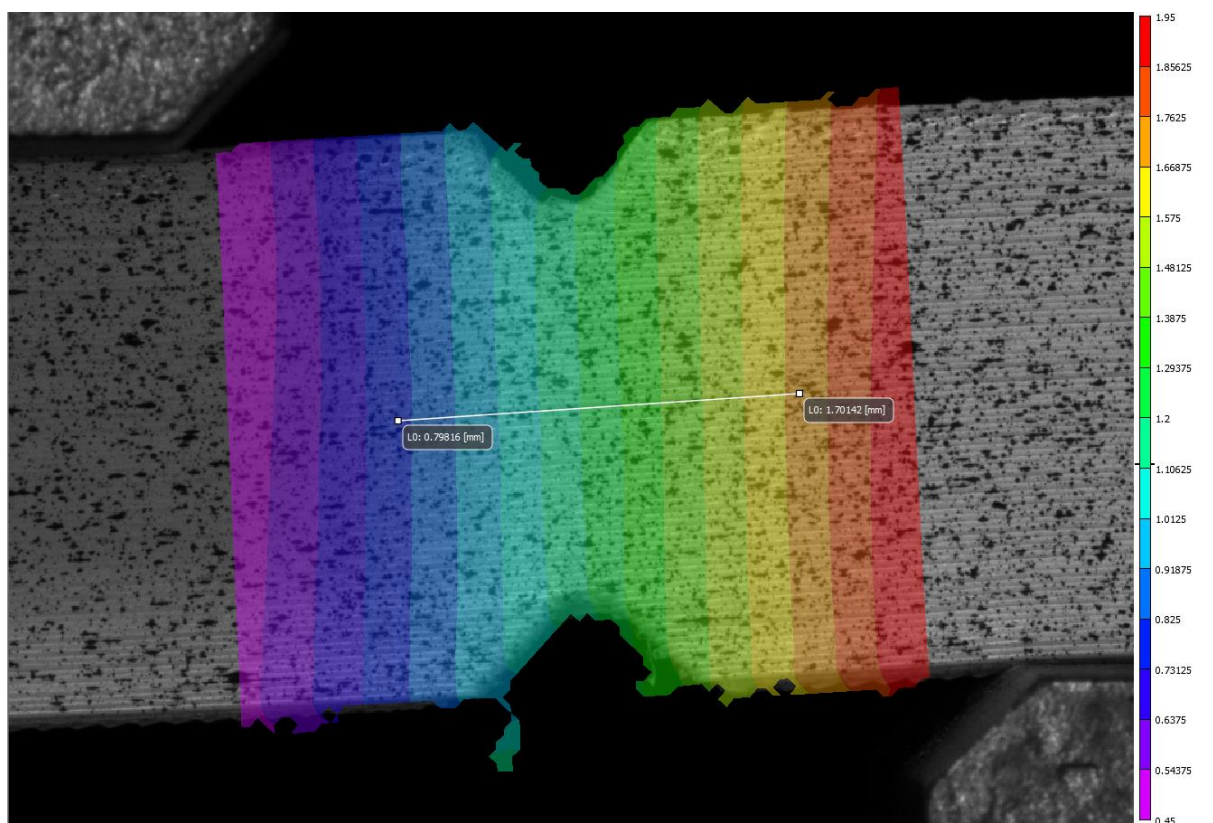


Figura 153. Mapa de desplazamientos. Probeta canto

- Pixel 170

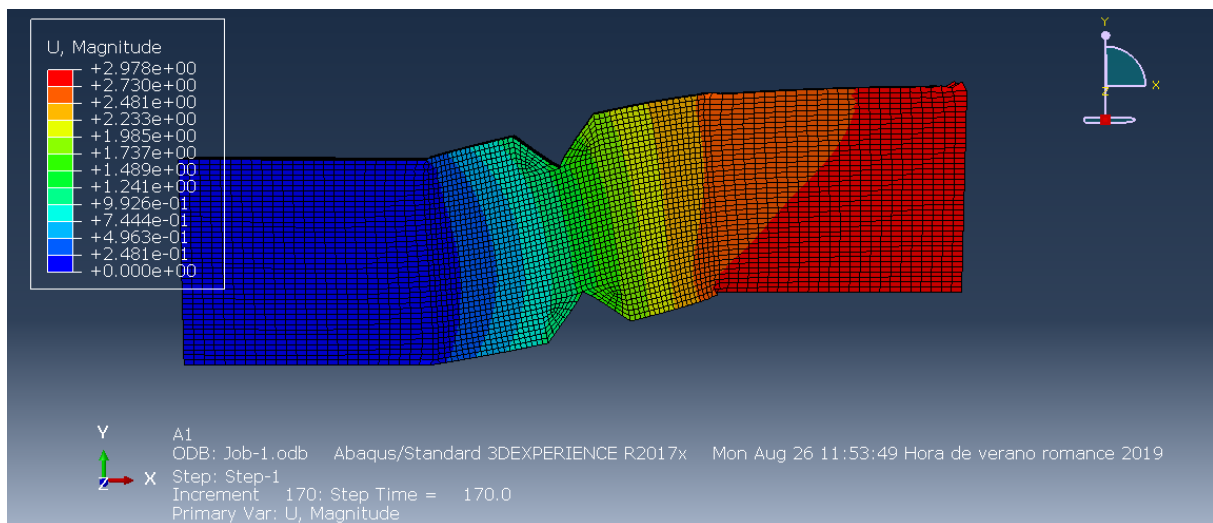


Figura 154. Mapa de desplazamientos. Probeta canto

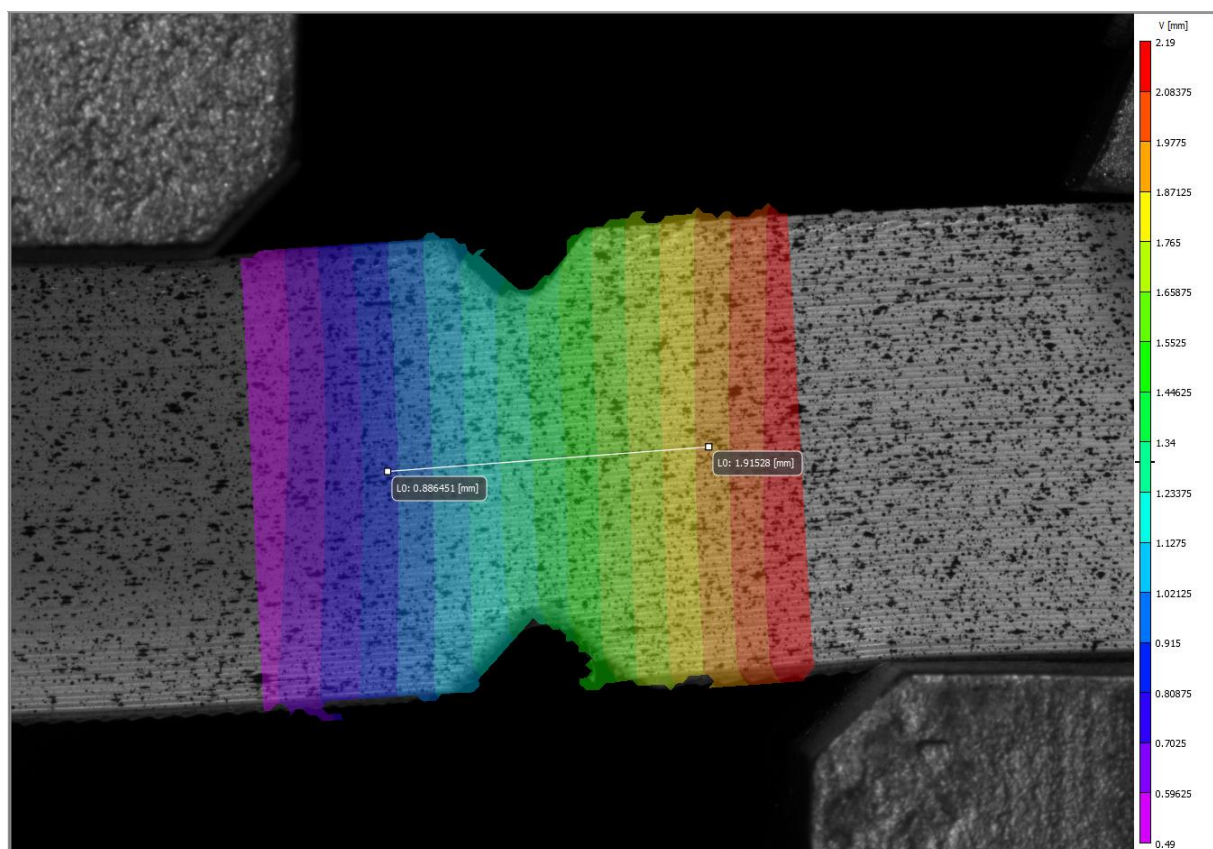


Figura 155. Mapa de desplazamientos. Probeta canto

Finalmente podemos concluir que tal y como hemos supuesto en la simulación las piezas fabricadas por FDM presentan ortotropía.

Además, se demuestra que utilizando un modelo numérico en el cual hemos considerado sólido rígido con comportamiento elástico lineal y una malla estructurada obtenemos valores muy parecidos a los obtenidos con DIC.

7. Modelo de transferencia de calor en proceso de manufactura por deposición fundida

Uno de los parámetros en los que queremos centrarnos para este trabajo es en la adherencia entre capas. Es por ello que nos parece de especial interés la transferencia real de calor que sufre un cordón de material fundido depositado con el objetivo de conocer la temperatura a la que se puede encontrar un cordón y sus colindantes en el momento de la deposición del hilo, basándonos en que una menor diferencia de temperaturas entre cordones nos aportará una mayor cohesión entre capas.

Para el estudio vamos a centrarnos en parámetros como el tiempo de impresión de cada capa y el espesor del hilo con el objetivo de concluir para que velocidades, dentro de las que nos permitan el propio proceso de impresión y para que espesor de capa obtenemos una mayor cohesión. Esto no está realmente claro porque por una parte podemos pensar que un cordón de mayor tamaño tardará más tiempo en enfriarse, pero por otro lado debemos pensar que una capa con un cordón de mayor tamaño tarda más tiempo en imprimirse, es por ello que no sabemos cuantitativamente cuál de las dos opciones es la más adecuada.

Para realizar dicho estudio vamos a proponer un modelo en diferencias finitas y posteriormente vamos a aplicar dicho modelo a los resultados obtenidos con una cámara termográfica para ver si este es válido.

El método numérico lo aplicaremos para los tres espesores de capa que hemos considerado para poder finalmente concluir para que espesor tenemos un mayor enfriamiento y por tanto una mayor diferencia de temperatura entre capas.

3.1 Desarrollo del Modelo en Diferencias Finitas

I. Identificación de los parámetros y variables del problema

Para el desarrollo del modelo vamos a basarnos en la ecuación del flujo de calor para un caso transitorio y sin generación de energía interna:

$$\sum E_{entra} - \sum E_{sale} + (Q_v * V_c) = \frac{\partial u}{\partial t}$$

Donde:

- E_{entra} : Son los flujos de calor entrantes al nodo
- E_{sale} : Son los flujos de calor salientes del nodo
- Q_v : Es la energía interna generada (En nuestro caso consideramos que no se genera energía interna por lo tanto despreciamos este término)
- V_c : Es el volumen de control
- K : Conductividad térmica
- h : Entalpía de convección
- $\frac{\partial u}{\partial t}$: Es la variación de la energía interna con el tiempo y se puede expresar como:

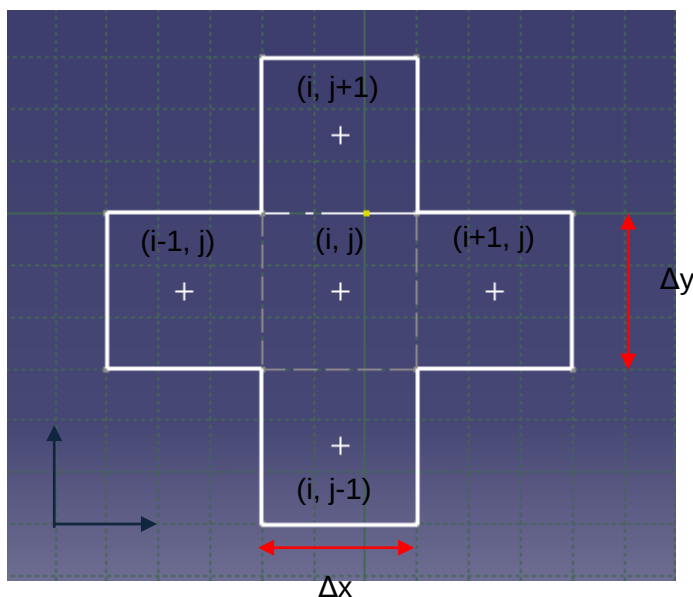
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \rho * C_p * V_c * \frac{\partial T}{\partial t}$$

- ρ : Densidad
- C_p : Calor específico
- $\frac{\partial T}{\partial t}$: Variación de la temperatura con el tiempo

Finalmente, la ecuación queda:

$$\sum E_{entra} - \sum E_{sale} = \rho * C_p * V_c * \frac{\partial T}{\partial t}$$

II. Definición de la malla y nomenclatura



Donde:

$$T_{i,j}^n = T(x_i, y_j, t_n)$$

$$i = (0, m+1)$$

$$j = (0, n+1)$$

$\Delta x = \Delta y = a \rightarrow$ Paso de malla (que será igual al diámetro del cordón)

Figura 156 Malla modelo transferencia de calor

III. Condiciones de contorno

Para las condiciones de contorno vamos a tener en cuenta dos situaciones distintas.

CASO A: Por un lado vamos a tener el caso de un hilo que se está depositando a continuación de otro y sobre una capa ya impresa, en cuyo caso tendremos en los nos de la izquierda y abajo transferencia de calor por conducción, y para los nodos superior y derecha tendremos transferencia de calor por convección.

En este caso las condiciones de contorno serán:

$T_{i,j+1}^n = T_{\infty}$, donde T_{∞} se corresponde con la temperatura ambiente de la cámara de la impresora.

$$T_{i+1,j}^n = T_{\infty}$$

CASO 2: El segundo caso es el correspondiente al primer hilo que se imprime en una capa, en este caso tendremos transferencia de calor por conducción solo en el nodo inferior, sin embargo, en el resto de nodos tendremos transferencia de calor por convección.

En este caso las condiciones de contorno serán:

$$T_{i,j+1}^n = T_{\infty}$$

$$T_{i+1,j}^n = T_{\infty}$$

$$T_{i-1,j}^n = T_{\infty}$$

IV. Discretizamos

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) / \Delta t$$

Donde Δt será el paso de malla temporal

El método numérico que vamos a utilizar es Euler Explícito.

V. Desarrollo de la ecuación para cada caso

CASO A:

Aplicamos la ecuación del calor al primer caso y obtenemos:

$$K \cdot \Delta z (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + k \cdot \Delta z (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + h \cdot \Delta x \Delta z (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) + h \cdot \Delta y \Delta z (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) = \rho \cdot Cp \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \cdot (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) / \Delta t ;$$

Simplificamos y agrupamos:

$$- T_{i,j}^n (2k\Delta z + 2h\Delta z a + \frac{\rho \cdot Cp \cdot a^2 \cdot \Delta z}{\Delta t}) + T_{i-1,j}^n (k \cdot \Delta z) + T_{i,j-1}^n (k \cdot \Delta z) + T_{i,j+1}^n (h \cdot a \cdot \Delta z) + T_{i+1,j}^n (h \cdot a \cdot \Delta z) = \frac{\rho \cdot Cp \cdot a^2 \cdot \Delta z}{\Delta t} \cdot T_{i,j}^{n+1};$$

Para simplificar la ecuación consideramos $\frac{\rho \cdot Cp \cdot a^2 \cdot \Delta z}{\Delta t} = B$, por lo tanto la ecuación queda:

$$- T_{i,j}^n [(2k\Delta z + 2h\Delta z a)/B - 1] + T_{i-1,j}^n [(k \cdot \Delta z)/B] + T_{i,j-1}^n [(k \cdot \Delta z)/B] + T_{i,j+1}^n [(h \cdot a \cdot \Delta z)/B] + T_{i+1,j}^n [(h \cdot a \cdot \Delta z)/B] = T_{i,j}^{n+1}$$

CASO B:

Aplicamos la ecuación del calor al segundo caso:

$$K \cdot \Delta z (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + h \cdot a \cdot \Delta z (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + h \cdot a \cdot \Delta z (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) + h \cdot a \cdot \Delta z (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) = \rho \cdot Cp \cdot a^2 \Delta z \cdot (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n)/\Delta t;$$

Agrupamos y simplificamos:

$$- T_{i,j}^n (K \cdot \Delta z + 3 h \cdot a \cdot \Delta z - (\rho \cdot Cp \cdot a^2 \Delta z)/\Delta t) + T_{i,j-1}^n (K \cdot \Delta z) + T_{i-1,j}^n (h \cdot a \cdot \Delta z) + T_{i,j+1}^n (h \cdot a \cdot \Delta z) + T_{i+1,j}^n (h \cdot a \cdot \Delta z) = \rho \cdot Cp \cdot a^2 \Delta z \cdot (T_{i,j}^{n+1})/\Delta t;$$

Para simplificar la ecuación consideramos $\frac{\rho \cdot Cp \cdot a^2 \cdot \Delta z}{\Delta t} = B$, por lo tanto la ecuación queda:

$$- T_{i,j}^n [(K \cdot \Delta z + 3 h \cdot a \cdot \Delta z)/B - 1] + T_{i,j-1}^n [(K \cdot \Delta z)/B] + T_{i-1,j}^n [(h \cdot a \cdot \Delta z)/B] + T_{i,j+1}^n [(h \cdot a \cdot \Delta z)/B] + T_{i+1,j}^n [(h \cdot a \cdot \Delta z)/B] = T_{i,j}^{n+1}$$

3.2 Comprobación del método numérico

En segundo lugar, utilizamos una cámara termográfica para medir los campos de temperatura de la probeta justo después de la impresión.



Figura 157 Cámara termográfica

La cámara termográfica mide la temperatura del cuerpo teniendo en cuenta la irradiación del cuerpo. Para calibrar correctamente la cámara termográfica tenemos que usar un láser, el cual mide la temperatura sin tener en cuenta la irradiación del cuerpo.

La forma de proceder es medir con el láser la temperatura de un cuerpo y a la vez medir la temperatura con la cámara termográfica, de forma que tendremos que corregir el factor de forma de la cámara hasta que la temperatura que esta nos proporcione sea la misma que la que nos da el láser.

Finalmente obtuve un factor de forma $\epsilon = (0.93 - 0.95)$.

El objetivo de esto es aplicar el método numérico desarrollado y ver que cumple. Para ello medimos el paso de tiempo desde que el extrusor deja de proporcionarnos material hasta el momento en que se toman las imágenes.

Como la cámara termográfica no tiene mucha precisión no nos sirve para medir las temperaturas justo en el momento de impresión (-tenemos muchos focos de calor como los ventiladores o el extrusor), es por ello que para hacer las capturas hemos sacado la probeta de la impresora con el objetivo de evitar esos focos calientes, como consecuencia de ello la temperatura de la probeta desciende mucho.

Para ver que nuestro método numérico es correcto voy a medir el tiempo t que pasa desde que sacamos la probeta hasta que le hacemos la captura con el objetivo de ver si cuadra el método numérico, aunque la variación de tiempo sea mayor.

El tiempo desde que deja de imprimir hasta que se hace la captura es de 22 segundos.

A continuación, se muestran las imágenes captadas con la cámara:

⇒ Espesor de capa de 0,3 mm

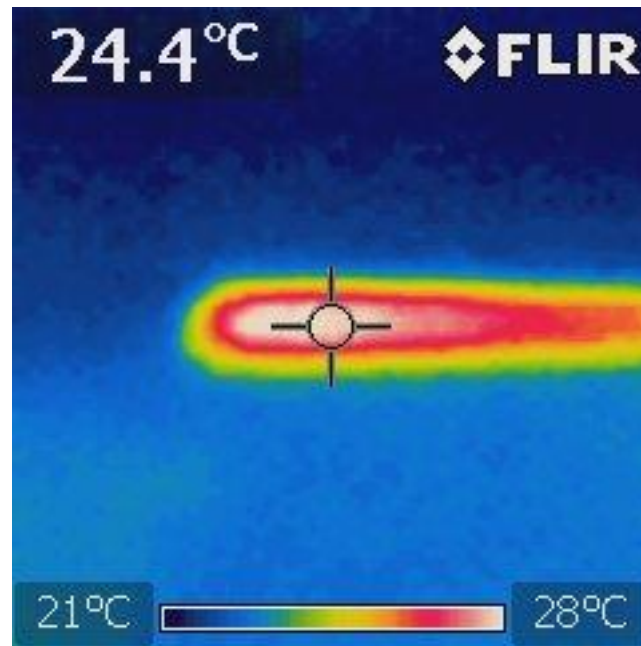


Figura 158 Termografía espesor de capa 0,3mm

⇒ Espesor de capa de 0,24 mm

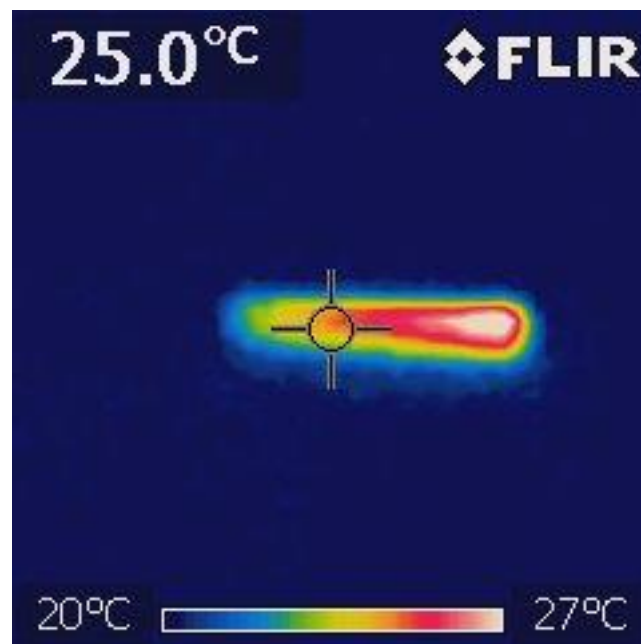


Figura 159 Termografía espesor de capa 0,24mm

⇒ Espesor de capa de 0,18 mm

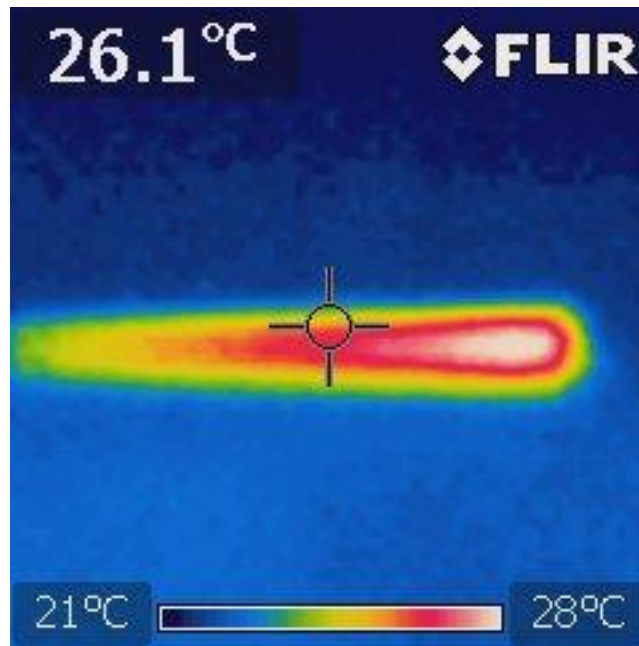


Figura 160 Termografía espesor de capa 0,18mm

Tras analizar las capturas de la cámara vemos que esta es muy poco precisa por lo que no podemos medir cuantitativamente las temperaturas de cada capa, y por lo tanto no podemos corroborar el método numérico.

Es por ello que vamos a dejar este tema como propuesta para trabajos futuros, ya sea con la ayuda de una cámara termográfica de mayor precisión o realizando simulaciones numéricas.

8. Conclusiones

Llegados a este punto podemos obtener una serie de conclusiones.

En primer lugar, vamos a centrarnos en la fase de fabricación de las probetas, en nuestro proceso de fabricación hemos visto como la velocidad de impresión es muy importante, por un lado, desde el punto de vista del acabado de la pieza, ya que a velocidades de impresión muy altas este no es muy bueno. Por otro lado, durante la impresión de las probetas de tracción en posición vertical vimos como en caso de tener secciones muy pequeñas una velocidad de impresión muy alta puede provocar el desplazamiento de la capa perimetral. Es por ello que en nuestro caso tuvimos que reducir la velocidad de impresión en el caso citado.

Por otra parte, podemos hablar de la forma de impresión, y es que en el caso de imprimir piezas con 100% de relleno la forma de impresión es hacer en primer lugar la capa perimetral de la pieza y en segundo lugar la malla de la misma. Sin embargo, para el caso de relleno del 75% vimos como siguiendo esta forma de imprimir se producía un aplastamiento de la malla interna haciendo imposible asegurar que se respetara el relleno del 75%, es por ello que en estos casos de relleno inferior al 100% lo que se hace es imprimir en primer lugar la malla y después la capa perimetral.

En segundo lugar, hablaremos de las propiedades a tracción, por una parte, podemos comprobar como a mayor porcentaje de relleno de una pieza obtenemos mejores propiedades mecánicas, pero también debemos de tener en cuenta que esto supone un mayor peso de la pieza y mayor coste de producción entre otros.

Por otra parte, hemos visto que el comportamiento de las propiedades mecánicas a tracción como son el Modulo de Young, la tensión de rotura y el límite elástico frente al espesor de capa tiene una tendencia casi lineal. De manera que a menores espesores de capa vemos como mejoran las propiedades mecánicas de la pieza como el Módulo de Young, límite elástico y tensión de rotura, sin embargo, la deformación última de la pieza es inferior. Es por ello que podemos intentar reducir el porcentaje de relleno de la pieza a consta de reducir el espesor de capa.

Por otra parte, hemos visto como los ensayos de cortante y compresión no han tenido ese comportamiento lineal presente durante el ensayo a tracción. En estos ensayos hemos obtenido un claro punto de inflexión para el espesor de capa del 60% del diámetro del extrusor. Es por ello que concluimos que el comportamiento óptimo de la pieza se producirá a dicha altura de capa.

En cuanto a la simulación numérica con Abaqus hemos podido ver que con un problema de sólido rígido con malla estructurada e introduciendo las propiedades elásticas del material en las tres direcciones principales obtenemos una simulación muy próxima a la realidad.

Por último, vamos a proponer como continuación al trabajo aquí desarrollado una idea de trabajo futura. Como hemos podido ver el modelo teórico aquí desarrollado para ver como varía la temperatura de los hilos durante el proceso de impresión de las piezas no ha podido ser validado debido a la baja resolución de la cámara térmica. Es por ello que se propone como trabajo futuro la realización de ensayos con una cámara termográfica de mayor resolución y la comprobación del modelo teórico con simulaciones numéricas.

En un modo más personal puedo concluir que este trabajo me ha permitido aprender a desarrollar un programa experimental completo, tanto desde el punto de vista del desarrollo de la normativa como desde el punto de vista del manejo de la maquinaria necesaria para el desarrollo de los ensayos.

Por otra parte, he podido aprender mucho sobre impresión 3D, tanto la impresión de las probetas como el uso del programa CURA. Además, he aprendido a usar programas de procesamiento de imágenes como el Vic 2D, programa para la impresión de probetas como es el CURA y programas de simulación como es Abaqus.

ANEXO I. PLANOS PROBETAS

⇒ PROBETAS TRACCIÓN

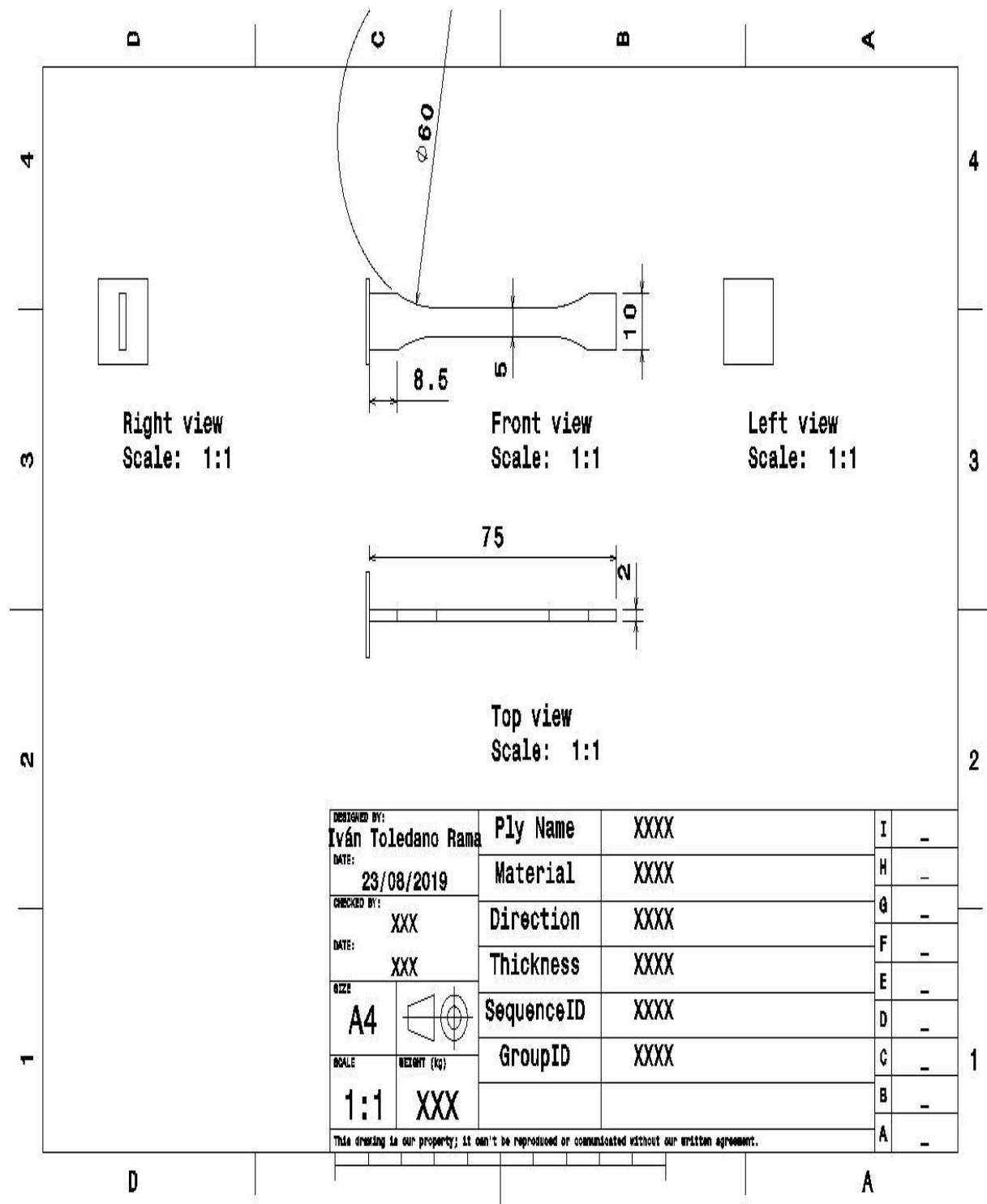


Figura 161 Planos probetas tracción

⇒ PROBETAS CORTANTE

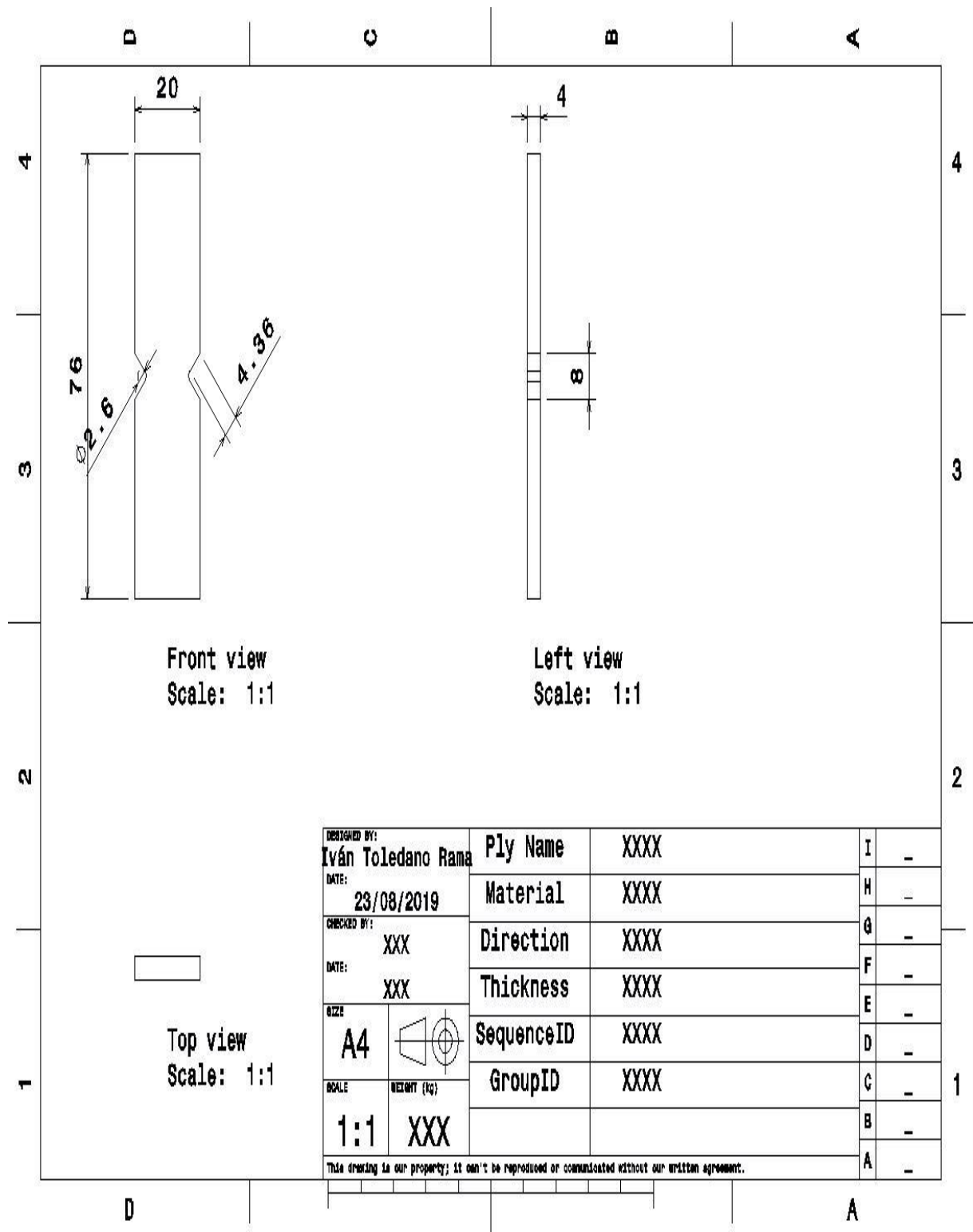


Figura 162 Planos probetas cortante

⇒ PROBETAS COMPRESIÓN

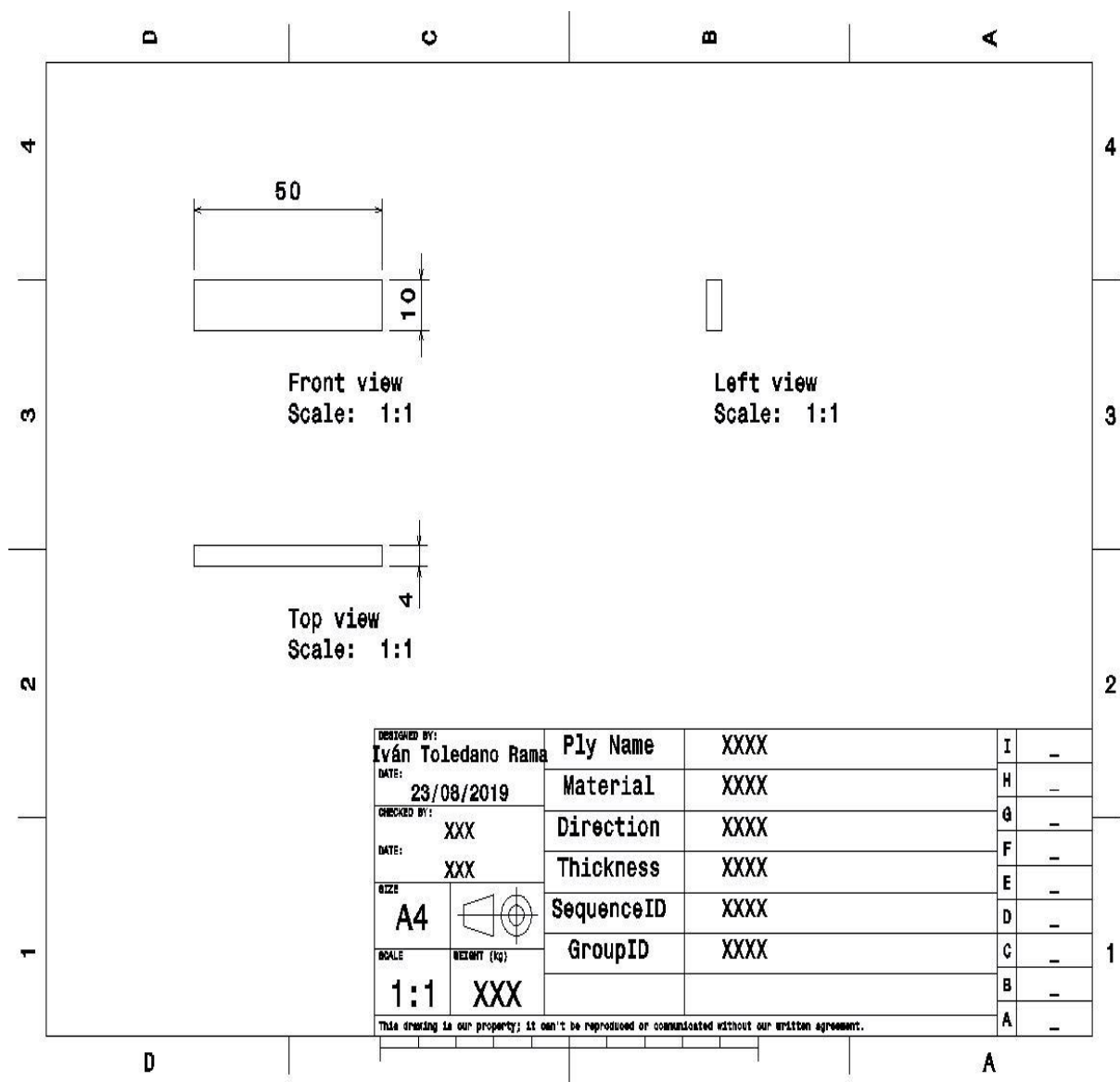


Figura 163 Planos probetas compresión

9. Bibliografía

[1] Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. Ford ,Simon and Melanie Despeisse. Centre for Technology Management, Institute for Manufacturing, University of Cambridge, CB3 0FS, United Kingdom.

[2] Antonio Torres Expósito. Trabajo fin de master. Caracterización mecánica de nuevos materiales para impresión 3D.

[3] <http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl>

[4] Dielyson Martins Galina, Davi Pereira Garcia, Giuliano Gonçalves de Souza, Luiz Rafael Resende da Silva, Rômulo Maziero. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CUERPOS DE PRUEBA ABS CONFECCIONADOS CON DIFERENTES PARÁMETROS DE EXTRUSIÓN VÍA IMPRESIÓN 3D.

[5] **Materiales de impresión 3D (III): Resinas fotopoliméricas.**

<http://hxx.es/2015/04/06/materiales-de-impresion-3d-iii-resinas-fotopolimericas/>

[6] Estereolitografía

<https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>

[7] MultiJet Modeling)

<https://kilo3d.com/impresion-3d-fdm-o-mjm-multijet-modeling/>

[8] Sintetizado Selectivo por Láser, SLS

<https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/>

[9] Sintetizado por Láser

<http://es.3dilla.com/impresora-3d/selective-laser-sintering/>

[10] Sintetizado directo de metal por Láser

<https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>

[11] Fusión por haz de electrones

<https://www.3dnatives.com/es/fusion-por-haz-de-electrones-les-explicamos-todo/>

[12] Sergio Romero Fuentes. Trabajo fin de carrera. Estudio Comparativo de los Métodos de Fabricación Aditiva para el Titanio y sus Aleaciones

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/114428/Estudio%20Comparativo%20de%20los%20M%C3%A9todos%20de%20Fabricaci%C3%B3n%20Aditiva%20para%20el%20Titanio%20y%20sus%20Aleaciones.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[13] Impresión de un corazón humano mediante Impresión 3D

<https://www.eluniversal.com.mx/ciencia-y-salud/cientificos-imprimen-el-primer-corazon-3d-con-tejido-humano>

[14] Anisotropía en Impresión 3D

<https://eddm.es/blog-ingenius/design-for-additive-manufacturing-anisotropia-en-impresion-3d/>

[15] [16][17] Jaime Vinicio Molina Osejos. Trabajo fin de carrera. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS DE ABS Y PLA SEMI.RÍGIDO IMPRESOS EN 3D CON CINCO MALLADOS INTERNOS DIFERENTES.

[18] Espesor de capa

<https://trimaker.com/ventajas-de-usar-distintos-tamanos-de-boquilla/>

<https://trello.com/c/LGp7BmPu/63-nozzle-vs-altura-de-cap>

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73940/TFG.pdf?sequence=3>

[19] https://www.abc.es/tecnologia/abci-espanol-disena-brazos-proteticos-impresora-para-personas-sin-recursos-kenia-201709021308_noticia.html

[20] <https://www.3dnatives.com/es/aplicaciones-por-sector/>

[21] <https://impresiontresde.com/9-aplicaciones-medicas-de-la-impresion-3d/>

[22] [23] <https://www.3dnatives.com/es/top-12-vehiculos-impresos-en-3d-02022017/>

[24] <https://clipset.20minutos.es/ya-se-construyen-casas-impresas-en-3d-en-24-horas/>

[25] Norma UNE- EN ISO 527-2

[26] Norma UNE 116005

[27] Norma UNE- EN ISO 527- 1

[28] Norma UNE- EN ISO 604

[29] D 5379/D 5379M - 98