

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Caracterización de propiedades mecánicas de polímeros  
impresos en 3D**

Trabajo de graduación presentado por O'Brien Ernesto Oliva Martínez  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala  
2022







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



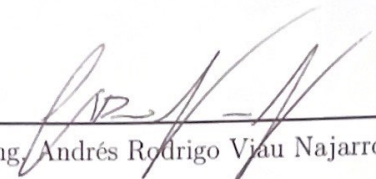
**Caracterización de propiedades mecánicas de polímeros  
impresos en 3D**

Trabajo de graduación presentado por O'Brien Ernesto Oliva Martínez  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala  
2022

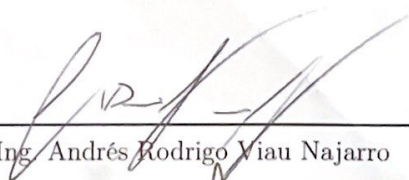


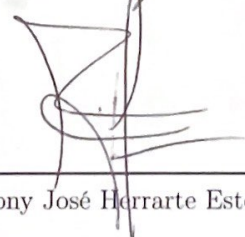
Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Víctor Hugo Ayerdi Bardales

(f)   
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

(f)   
Ing. Rony José Herrarte Estevez

Fecha de aprobación: Guatemala, 08 de diciembre de 2022.





<b>Lista de figuras</b>	XI
<b>Lista de cuadros</b>	XIV
<b>Resumen</b>	XV
<b>Abstract</b>	XVII
<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Antecedentes</b>	3
<b>3. Justificación</b>	7
<b>4. Objetivos</b>	9
4.1. Objetivo general . . . . .	9
4.2. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>5. Marco teórico</b>	11
5.1. Impresión 3D . . . . .	11
5.2. Ensayos a tensión . . . . .	13
5.3. Propiedades mecánicas de materiales de impresión 3D . . . . .	14
5.3.1. ABS . . . . .	14
5.3.2. PETG . . . . .	14
5.3.3. CPE HG100 . . . . .	15
5.3.4. Onyx . . . . .	15
<b>6. Metodología</b>	17
6.1. Descripción de la metodología . . . . .	17
6.2. Requisitos y recursos . . . . .	18
6.2.1. Requisitos de impresión . . . . .	18
6.2.2. Requisitos de dimensiones . . . . .	19
6.2.3. Requisitos de ensayo . . . . .	19
6.2.4. Recursos . . . . .	20

6.3. Código de probetas	20
6.4. Diseño preliminar	21
6.5. Cálculos y diseño	21
6.5.1. Diseño	21
6.6. Cálculos	22
6.7. Fabricación	25
6.8. Ensayos	29
6.8.1. Alcance	29
6.8.2. Antecedentes	29
6.8.3. Tracker	31
6.8.4. Protocolos de seguridad	31
6.8.5. Protocolos de ensayo a tensión	32
6.8.6. Resultados de ensayos	34
6.8.7. Protocolo de procesamiento de vídeos en Tracker	34
6.8.8. Protocolo de procesamiento de datos	36
<b>7. Resultados</b>	<b>39</b>
7.1. Cumplimiento de requisitos	39
7.2. Resultados de ABS	40
7.2.1. ABS 100% de relleno	40
7.2.2. ABS 50% patrón GRID	42
7.2.3. ABS 75% patrón GRID	46
7.2.4. ABS 50% patrón LINES	49
7.2.5. ABS 75% patrón LINES	52
7.2.6. ABS 50% patrón ZIGZAG	56
7.2.7. ABS 75% ZIGZAG	60
7.3. Resultados de PETG	63
7.3.1. PETG 100%	63
7.3.2. PETG 50% patrón GRID	67
7.3.3. PETG 75% patrón GRID	70
7.3.4. PETG 50% patrón LINES	74
7.3.5. PETG 75% patrón LINES	78
7.3.6. PETG 50% patrón ZIGZAG	82
7.3.7. PETG 75% patrón ZIGZAG	86
<b>8. Análisis de resultados</b>	<b>91</b>
8.1. Comparación ABS	92
8.2. Comparación PETG	95
8.3. Comparación ABS y PETG	98
<b>9. Conclusiones</b>	<b>101</b>
<b>10. Recomendaciones</b>	<b>103</b>
10.1. Impresión 3D	103
10.2. Ensayos a tensión	103
10.3. Grabación de vídeos	104
10.4. Análisis de vídeo en Tracker	104
<b>11. Bibliografía</b>	<b>105</b>

<b>12. Anexos</b>	<b>109</b>
12.1. Planos de construcción . . . . .	109
12.2. Tracker . . . . .	112



---

## Lista de figuras

---

1. Mallado cuadrado	4
2. Mallado poligonal	4
3. Mallado diagonal	4
4. Código de probetas	20
5. Diseño preliminar de probeta de ensayo a tensión	21
6. Diseño de probeta para ensayos a tensión	21
7. Cura Ultimaker	25
8. Modelo impresora, extrusor y material	26
9. Modelo a imprimir	26
10. Modelo a imprimir	26
11. Patrón de Top/Bottom	26
12. Patrón de Top/Bottom	26
13. Patrón de adhesión a la plancha	27
14. Botón slice	27
15. Botón de Preview	27
16. Impresión real de probetas	27
17. Compresora Universal, Soiltest Versa Tester	30
18. Gráfica esfuerzo vs deformación AT100P1	40
19. Gráfica esfuerzo vs deformación AT100P2	41
20. Gráficas de resultados AT100	42
21. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP1	42
22. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP2	43
23. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP3	43
24. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP4	44
25. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP5	44
26. Gráficas de resultados AT50G	45
27. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP1	46
28. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP2	46
29. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP3	47
30. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP5	47
31. Gráficas de resultados AT75G	48

32. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP1	49
33. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP2	49
34. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP3	50
35. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP4	50
36. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP5	51
37. Gráficas de resultados AT50L	52
38. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP2	53
39. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP3	53
40. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP4	54
41. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP5	54
42. Gráficas de resultados AT75L	55
43. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP1	56
44. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP2	56
45. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP3	57
46. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP4	57
47. Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP5	58
48. Gráficas de resultados AT50Z	59
49. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP1	60
50. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP2	60
51. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP3	61
52. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP4	61
53. Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP5	62
54. Gráficas de resultados AT75Z	63
55. Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P2	64
56. Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P3	64
57. Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P4	65
58. Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P5	65
59. Gráficas de resultados PT100	66
60. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP1	67
61. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP2	67
62. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP3	68
63. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP4	68
64. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP5	69
65. Gráficas de resultados PT50G	70
66. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP1	71
67. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP3	71
68. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP4	72
69. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP5	72
70. Gráficas de resultados PT75G	73
71. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP1	74
72. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP2	74
73. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP3	75
74. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP4	75
75. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP5	76
76. Gráficas de resultados PT50L	77
77. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP1	78
78. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP2	78
79. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP3	79

80. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP4	79
81. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP5	80
82. Gráficas de resultados PT75L	81
83. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP1	82
84. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP2	82
85. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP3	83
86. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP4	83
87. Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP5	84
88. Gráficas de resultados PT50Z	85
89. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP1	86
90. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP2	86
91. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP3	87
92. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP4	87
93. Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP5	88
94. Gráficas de resultados PT75Z	89
95. Comparación de resistencias de ABS	92
96. Comparación de módulo de Young de ABS	93
97. Comparación de % de reducción de área y deformación total de ABS	94
98. Comparación de resiliencia y tenacidad de ABS	94
99. Comparación de resistencias de PETG	95
100. Comparación de módulo de Young de PETG	96
101. Comparación de % de reducción de área y deformación total de PETG	96
102. Comparación de resiliencia y tenacidad de PETG	97
103. Comparación de resistencias de ABS y PETG	98
104. Comparación de módulo de Young de ABS y PETG	98
105. Comparación de % de reducción de área y deformación total de ABS y PETG	99
106. Comparación de resiliencia y tenacidad de ABS y PETG	99
107. Plano probetas AT100P	110
108. Plano probetas	111
109. Elementos software Tracker	112
110. Ajuste de corte	112
111. Exportar datos	113





---

## Lista de cuadros

---

1. Propiedades mecánicas de ABS	14
2. propiedades mecánicas de PETG	14
3. Propiedades mecánicas de CPE HG100	15
4. Propiedades mecánicas de Onyx	15
5. Símbolos	18
6. Requisitos de dimensiones	19
7. Requisitos de ensayo	19
8. Recursos	20
9. Dimensiones AT100P	22
10. Dimensiones probetas	22
11. Símbolos	23
12. Configuración de impresión de probetas de ABS	28
13. Configuración de impresión de probetas de PETG	28
14. Protocolos sanitarios	31
15. Protocolos de seguridad	32
16. Protocolo ensayo a tensión	33
17. Anotaciones de ensayos	34
18. Protocolo procesamiento de vídeos	34
19. Protocolo de procesamiento de datos	37
20. Requisitos de impresión	39
21. Requisitos de dimensiones	39
22. Requisitos de Ensayo	40
23. Reducción de área y deformación	41
24. Módulo de Young y resistencias	41
25. Resiliencia y tenacidad	41
26. Reducción de área y deformación	44
27. Módulo de Young y resistencias	45
28. Resiliencia y tenacidad	45
29. Reducción de área y deformación	47
30. Módulo de Young y resistencias	48
31. Resiliencia y tenacidad	48

32. Reducción de área y deformación	51
33. Módulo de Young y resistencias	51
34. Resiliencia y tenacidad	52
35. Reducción de área y deformación	54
36. Módulo de Young y resistencias	55
37. Resiliencia y tenacidad	55
38. Reducción de área y deformación	58
39. Módulo de Young y resistencias	58
40. Resiliencia y tenacidad	59
41. Reducción de área y deformación	62
42. Módulo de Young y resistencias	62
43. Resiliencia y tenacidad	63
44. Reducción de área y deformación	65
45. Módulo de Young y resistencias	66
46. Resiliencia y tenacidad	66
47. Reducción de área y deformación	69
48. Módulo de Young y resistencias	69
49. Resiliencia y tenacidad	70
50. Reducción de área y deformación	72
51. Módulo de Young y resistencias	73
52. Resiliencia y tenacidad	73
53. Reducción de área y deformación	76
54. Módulo de Young y resistencias	76
55. Resiliencia y tenacidad	77
56. Reducción de área y deformación	80
57. Módulo de Young y resistencias	80
58. Resiliencia y tenacidad	81
59. Reducción de área y deformación	84
60. Módulo de Young y resistencias	84
61. Resiliencia y tenacidad	85
62. Reducción de área y deformación	88
63. Módulo de Young y resistencias	88
64. Resiliencia y tenacidad	89

Actualmente en Guatemala el diseño de impresión 3D se encuentra en una fase primaria de expansión, donde cada día son más las empresas que implementan esta tecnología en sus procesos de diseño y producción. Por ejemplo, Master Tool y Dremel introdujeron al mercado guatemalteco la impresión 3D para soluciones en distintas industrias como la de proveedores y consumidores de materiales polímeros hasta joyas y calzado. (Juan, 2016)

En la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), en el laboratorio D-Hive, se encuentra una variedad de materiales rígidos para impresión: Nylon con fibra de carbono (Onyx) con o sin revestimiento de fibra de vidrio, el ABS, el PET G y CPE HG100. Estos materiales se utilizan para proyectos personales o para proyectos relacionados a la universidad pero en la mayoría de ocasiones se imprimen sin mayores consideraciones en cuanto a sus características mecánicas. Los usuarios ocasionales no poseen el conocimiento técnico sobre lo que se puede realizar con la impresión 3D a nivel de diseño en ingeniería, quedando su uso limitado a componentes cuyo uso principal es forma y no función. Solo cuando el usuario ha usado por mucho tiempo y con mucha versatilidad la impresión 3D puede tomar decisiones técnicas basadas en experiencias previas. Muchas veces estos conocimientos y experiencias quedan almacenadas en comunidades o nichos especializados y se pierde la oportunidad de divulgar información técnica importante.

Es por eso que, este trabajo demuestra como se obtuvieron propiedades mecánicas a través de ensayos estandarizados a tensión, como esfuerzo máximo de tensión y módulo de Young, y el uso de Tracker como análisis de vídeo de los diferentes materiales de impresión 3D. Se tomarán en cuenta las impresoras actualmente disponibles en el D-Hive y los parámetros de impresión que se modifican más frecuentemente por parte de los usuarios. Esto se realizó a través de ensayos a tensión en probetas de ABS y PETG diseñadas previamente con variaciones en parámetros como el porcentaje de relleno y patrón de impresión.

Con los resultados anteriores, se encuentran datos cuantitativos de los materiales que ayuden a los estudiantes de ingeniería a realizar análisis de función y análisis de resistencia, obteniendo resultados con miras a producir impresiones que incorporen diseño de ingeniería mecánica no solo para trabajos de graduación si no para que en general los estudiantes no impriman diseños a prueba y error.



Currently in Guatemala, 3D printing design is in a primary phase of expansion, where more and more companies are implementing this technology in their design and production processes. For example, Master Tool and Dremel introduced 3D printing to the Guatemalan market for solutions in different industries such as suppliers and consumers of polymer materials to jewelry and footwear. (Juan, 2016)

At the Universidad del Valle de Guatemala (UVG), in the D-Hive lab, there are a variety of rigid materials for printing: Nylon with Carbon Fiber (Onyx) with or without Fiberglass coating, ABS, PET G and CPE HG100. These materials are used for personal projects or for university related projects but in most occasions they are printed without major considerations regarding their mechanical characteristics. Occasional users do not have the technical knowledge about what can be done with 3D printing at the engineering design level, being its use limited to components whose main use is form and not function. Only when the user has used 3D printing for a long time and with a lot of versatility can he/she make technical decisions based on previous experiences. Many times this knowledge and experiences are stored in communities or specialized niches and the opportunity to disseminate important technical information is lost.

That is why, this work demonstrates how mechanical properties were obtained through standardized tensile tests, such as maximum tensile stress and Young's Modulus, and the use of Tracker as video analysis of different 3D printing materials. The printers currently available in the D-Hive and the printing parameters that are most frequently modified by users will be taken into account. This was done through tensile testing on previously designed ABS and PETG specimens with variations in parameters such as percentage of fill and print pattern.

With the above results, quantitative data of the materials are found to help engineering students to perform function analysis and strength analysis, obtaining results with a view to produce prints that incorporate mechanical engineering design not only for graduation work but also so that students in general do not print trial and error designs.



En la actualidad Guatemala cada día implementa más la impresión 3D en el área ingenieril, en donde las características mecánicas del material utilizado son de mucha importancia para definir diseños. En el área de impresión 3D hay muchas formas y métodos de impresión por ejemplo: estereolitografía, fotopolimerización por luz ultravioleta, impresión por inyección, entre otras. Para cada uno de los métodos de impresión existen mallados los cuales se pueden emplear ajustando un porcentaje de relleno y esto hace a la impresión 3D un tema en donde se pueden tener muchas variantes de una misma impresión.

Por esta razón el objetivo de este trabajo consistirá en determinar las propiedades mecánicas (% de reducción de área, deformación total, módulo de Young, resistencia a la fluencia, resistencia última a la tensión, resistencia a la rotura, resiliencia y tenacidad) de materiales de impresión 3D, mediante ensayos de tensión a probetas impresas con modelado por deposición fundida.

En el D-Hive se cuentan con los siguientes materiales rígidos: ABS, PETG, ONYX, PLA. Debido a que no se puede abarcar todos los materiales por tiempo, se escoge los materiales ABS y PETG. Pero, para cada material se utilizará el mallado de GRID, LINES y ZIGZAG utilizando 50 % y 75 % de relleno, además se harán pruebas en probetas sólidas las cuales requieren de un relleno del 100 %.

Teniendo en cuenta lo anterior, primero se creó un código especializado para poder diferenciar cada variante. Luego se realizó un diseño de probeta la cual fue sometida a pruebas de ensayos a tensión para validar las dimensiones de la misma. Teniendo un diseño aprobado, se comenzó a imprimir las probetas de ABS y PETG para poder marcar líneas estratégicas en el área reducida y comenzar las pruebas a tensión.

Para realizar los ensayos a tensión se utilizaron dos cámaras, una instalada para grabar directamente a la probeta y la otra grabando al medidor de fuerza, para luego procesar los videos en el programa Tracker y así obtener el % de elongación en el área reducida de la probeta y poder enlazar estos resultados con la fuerza que arroja el medidor de fuerza. Luego, se ingresaron los datos a la hoja de cálculo de Excel para obtener las características

mecánicas de las variantes.

Por último, se realizó un análisis estadístico de promedio y varianza para poder obtener y validar los resultados.

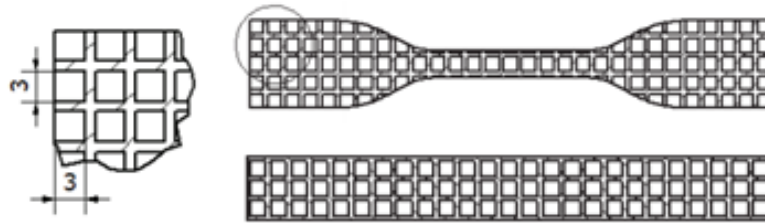


Actualmente, la impresión en 3D es una técnica que se usa cada día más alrededor del mundo y ha impactado varias áreas de forma positiva. La impresión 3D ha revolucionado la educación, ya que el 77% de los profesores implementan el uso de impresoras 3D. Los profesores implementan la impresión 3D ya que mejora las habilidades de los estudiantes. Además, la impresión 3D ha cambiado la medicina, en el área de prótesis o en la impresión de tejidos humanos. Por último, en facilitar la construcción ya que cada día se puede imprimir piezas más grandes y algún día se podrá imprimir incluso edificios completos (Mimeo, [s.f.](#)).

El uso de normas en la ingeniería es de suma importancia, en lo que respecta a determinar las características de los plásticos, dependiendo del tipo de ensayo que se realiza es la norma que se usa; para el ensayo de tensión se sugiere usar la norma ASTM D638-14 y para el ensayo de flexión la norma ASTM D790-92. Pero siempre es importante el valorar el tamaño de las piezas ya que a cierto tamaño el espécimen ya no puede ser sometido a las pruebas convencionales de flexión y tensión (Denis, [2001](#)).

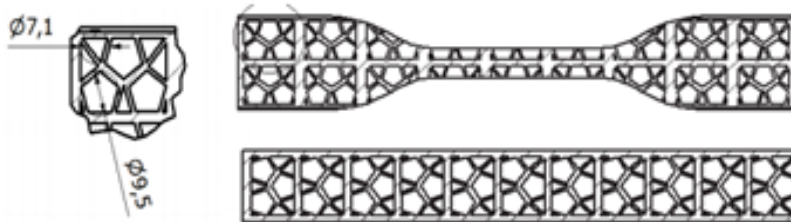
La aplicación de normas puede llegar a ser muy variada dependiendo el estudio que se realice, por ejemplo, se puede estudiar el ABS, PLA, Alcohol Polivinilo PVA, Laywoo-D3 entre otros más. Y no solo se puede tener variedad en los materiales si no en la forma de impresión. En la impresión 3D se puede tener varios patrones de relleno en las probetas.

Figura 1: Mallado cuadrado



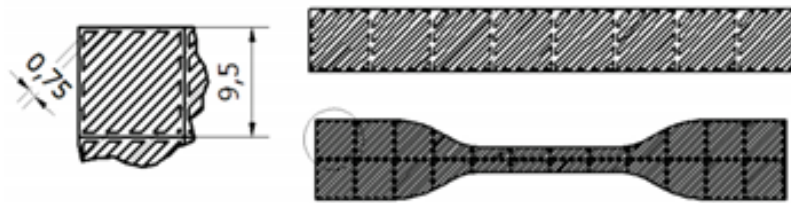
Fuente: (Jaime, 2016)

Figura 2: Mallado poligonal



Fuente: (Jaime, 2016)

Figura 3: Mallado diagonal



Fuente: (Jaime, 2016)

Para cada uno de los mallados internos que se utilice se obtienen diferentes características mecánicas (Jaime, 2016). Además del mallado interno hay otras técnicas que se estudian para ver si se mejoran las propiedades mecánicas como la impresión 3D bajo una atmósfera de nitrógeno, al implementar estos cambios en los ensayos si se obtiene una mejora en las propiedades mecánicas (Lederle et al., 2016).

El análisis de las diferencias entre el tamaño de las probetas, o el tipo de mallado interno o incluso en la atmosfera donde se imprimen es importante pero el analizar el grosor de las

probetas y observar si hay algún cambio es también importante; por eso varios especímenes se prueban al ser mojados en agua con diferentes grosores, ya que se ve la absorción de algunos materiales plásticos que tienen partículas de madera. Efectivamente el agua afecta las características de los materiales de impresión 3D, los resultados se analizaron con base en la norma ISO 62 (Ayrilmis et al., 2019). Las normas ISO tienen el mismo objetivo que las normas ASTM, pero ¿por qué algunos usan ISO y otros ASTM? Se ha determinado que no hay una diferencia significativa en los resultados de las propiedades mecánicas de materiales de impresión 3D cuando se utiliza una de las dos normas en los ensayos diferentes (Chander et al., 2019).

En los últimos años ya se han implementado diferentes técnicas que puedan ayudar a aplicaciones más específicas, ya que la impresión 3D cada día avanza muy rápido. Se ha experimentado con la aplicación de químicos abrasivos como el alcohol, hipoclorito y amonio, sobre las probetas de ensayo para ver su aplicación en diferentes áreas de alto riesgo y ver si se ven afectadas de gran manera en sus propiedades mecánicas y vida útil (Ushiña, 2020). También, se ha implementado en el área médica con impresiones 3D con materiales mucho más específicos, como la resina dental, en donde se somete a temperaturas altas y a rayos UV y ver su comportamiento para determinar sus propiedades mecánicas (Bayarsaikhan et al., 2021).



De acuerdo con Griffey (2014), la impresión 3D, también conocida como manufactura aditiva, es el proceso de crear objetos sólidos en tres dimensiones a partir de un archivo digital. En la actualidad, la impresión 3D es una de las tecnologías más relevantes de la industria, debido a que esta posee una diversidad de aplicaciones, y por esta razón, se ha invertido significativamente en su investigación y aplicación. (Novak et al., 2021).

La impresión 3D ha permitido la innovación en la fabricación de prototipos, piezas de reemplazo, medicina precisa, organogénesis, comida impresa en 3D, entre otras (Forbes, 2019). La tecnología ha permitido la creación de objetos de gran durabilidad obtenidos en poco tiempo. Los avances en la impresión 3D no serían posibles sin el estudio de las características mecánicas de los materiales, lo cual permite conocer el comportamiento de la estructura de los objetos previo a su ejecución.

En Guatemala, la impresión 3D se ha realizado a pequeña escala, debido a que es una industria en crecimiento, y haciendo uso de una amplia variedad de materiales, por ejemplo: aleaciones avanzadas de níquel, fibra de carbono, vidrio, tinta conductora, electrónica, productos farmacéuticos y materiales biológicos (Juan, 2016). Los estudios existentes en el país, consultados para este trabajo, tienen aplicaciones específicas en las que se parte de las características ya conocidas del diseño de una determinada pieza, produciendo así, réplicas de las piezas en 3D como ocurrió por ejemplo, en el estudio de Ixcoy (2014), en el que se formuló como objetivos de investigación la fabricación de suministros y repuestos para el proceso de manufactura industrial con una impresora 3D. En igual sentido, Ortiz (2020) realizó su estudio con el objetivo de desarrollar un software capaz de imprimir figuras 3D de material cementante, pero esquivó el estudio mecánico de los materiales a imprimir.

Ambos estudios, al igual que otros similares se enfocan en la aplicación de la tecnología 3D, orientándose así a la réplica de piezas u objetos específicos, y en menor medida se exploran las propiedades mecánicas de los materiales de impresión 3D.

Ahart (2019) indica que considerando que, a partir de cada tipo de impresora se obtiene un resultado diferente en las características mecánicas de los objetos impresos, es importante

conocer las propiedades de los materiales y los parámetros específicos para su impresión. Por tanto, al conocer las propiedades de los diferentes materiales de impresión 3D se logra mayor eficiencia en su ejecución, pudiéndose desarrollar con mayor precisión los análisis de simulación del comportamiento en software de ingeniería y así optimizar el uso del material.

Por lo anterior, el siguiente trabajo de investigación se ha diseñado con el objetivo principal de obtener las propiedades mecánicas a través de ensayos a tensión de algunos de los materiales de impresión 3D, utilizando las impresoras Ultimaker S3 y S5 de modelado por deposición fundida que se tienen en la UVG.

La principal ventaja de obtener las propiedades de los materiales es ahorrar presupuesto en cualquier proyecto, ya que al desconocer las características mecánicas de los materiales se deben de realizar más pruebas físicas para determinar el diseño correcto (Bayraktar et al., 2017). En el D-Hive, laboratorio de impresión, se tienen distintos materiales rígidos de impresión 3D, como ABS, PETG, CPE HG100, ONYX y ONYX con revestimiento de fibra de vidrio, y se utilizan para muchos trabajos personales, trabajos de graduación y proyectos de clase. Al obtener las propiedades de estos materiales se pueden realizar trabajos mucho más específicos y con mayor respaldo en diseño mecánico. Por esta razón, la elaboración del presente proyecto es importante, ya que en UVG se cuenta con todas las herramientas para su desarrollo, y particularmente con impresoras 3D y máquinas de ensayo disponibles para lograr alcanzar los objetivos de investigación propuestos.

### 4.1. Objetivo general

Determinar las propiedades mecánicas (porcentaje de reducción de área, deformación total, módulo de Young, resistencia a la fluencia, resistencia última a la tensión, resistencia a la rotura, resiliencia y tenacidad) de materiales de impresión 3D, mediante ensayos de tensión a probetas impresas con modelado por deposición fundida.

### 4.2. Objetivos específicos

1. Definir los materiales a utilizar para obtener las propiedades mecánicas a través de ensayos a tensión.
2. Diseñar una probeta de prueba para los ensayos a tensión.
3. Definir los parámetros de impresión 3D que se usarán para cada material.
4. Definir la metodología de pruebas a realizar con las probetas.
5. Obtener las propiedades mecánicas de los materiales mediante análisis de video de Tracker y el uso de una hoja de cálculo.
6. Realizar un análisis estadístico los resultados de las pruebas para determinar la validez de estos.





## 5.1. Impresión 3D

Lima (2020) en su estudio hizo uso de la técnica de manufactura modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés), la que también fue utilizada por (Amit & Heer, 2018). Se trata de una tecnología desarrollada por Stratasys, y para su correcto funcionamiento se requieren tres elementos principales; una placa de impresión la cual es la base para la pieza. Una bobina de filamento que funciona como materia de impresión, y una cabeza de extrusión. Esta técnica básicamente se basa en mantener al extrusor a una temperatura controlada y suficiente para fundir el filamento que está siendo tirado, depositando sobre la base el material en capas y formando así el diseño ingresado a la máquina. De acuerdo con (Stoklasek et al., 2018), una de las ventajas relacionada al uso de esta técnica es su facilidad de uso, y además, la rápida limpieza en el área trabajo, a lo que se agrega su posibilidad de uso en cualquier área.

De acuerdo con Lima (2020), los termoplásticos que pueden ser utilizados en esta técnica son mecánicamente estables, y las geometrías que resultan complicadas de reproducir con otras técnicas de manufactura son más fácil de ejecutarse con impresión 3D. Los materiales, al estar estandarizados, presentan propiedades mecánicas estables y de mayor duración a lo largo del tiempo por lo que Lima (2020) insiste en su versatilidad, fundamentándose en que con el solo el cambio de la cabeza extrusora es posible obtener mejores resoluciones. Sin embargo, apunta a que las ventajas de esta técnica se encuentran relacionadas al tipo de impresora que se utilice, por lo que insiste en que la selección de la máquina es un punto trascendental para alcanzar los resultados propuestos. En su trabajo de graduación, Lima (2020) también indican que un parámetro de gran influencia en el resultado de la pieza es el porcentaje de relleno. Al referirse al relleno de la pieza, hacen mención a la estructura interna de la pieza impresa ya que en la pieza, será necesario considerar un mayor tiempo de impresión, y, por lo tanto, debe considerarse un incremento en los costos relacionados a la cantidad de material utilizado. Por otro lado, al referirse la resistencia del diseño, de acuerdo a su estudio se encontró que esta resistencia está directamente vinculada con el

porcentaje de relleno, que regularmente es un 20 por ciento de relleno el utilizado en la mayoría las aplicaciones. En su estudio se realizaron pruebas con 20 %, 50 % y 100 % para determinar qué porcentaje de relleno producía mayores beneficios. Con respecto a este punto, la investigación también encontró que el patrón de relleno es un parámetro determinante en la impresión, y al respecto, de acuerdo con Walter et al. (2018) el patrón de relleno sustituye el relleno sólido de las partes por geometrías más simples, lo que permite alcanzar una mayor eficiencia con respecto al material.

Los patrones de relleno son generados por un algoritmo que se utiliza para producir el código que posteriormente se ingresa a la impresora. Actualmente existen una gran variedad de patrones de rellenos, los que brindan distintas estructuras a las piezas, entre los más comunes se encuentran el rectangular, triangular y el honeycomb (Stratasys, 2018). El rectangular se considera un patrón estándar para impresiones con FDM, y presenta resistencia en todas direcciones, permitiendo una impresión relativamente rápida, mientras que el triangular se utiliza cuando se busca resistencia en la dirección de las paredes, mientras que el patrón Honeycomb brinda fuerza a las piezas, y resistencia en todas las direcciones (Beatti et al., 2021).

El modelado por deposición fundida, permite la construcción de piezas al depositar el material fundido. En esta, cada capa depositada es fundida con la capa anterior, resultando en la formación de una pieza única. De manera que las fuerzas de adhesión entre las capas es el resultado la fundición entre ambas. Sin embargo, la fuerza de fundición puede formar burbujas de aire entre las capas generando así ciertos puntos de debilidad en la pieza, lo que generaría un comportamiento anisotrópico debido a que la resistencia en el eje Z (siendo este el eje perpendicular a la base de impresión) resulta menor que la resistencia presentada por la probeta en el plano XY, siendo esta una circunstancia a tener en cuenta al configurar la impresión (Stratasys, 2018).

En el estudio de Hajjha et al. (2019) se analizó el comportamiento de probetas que fueron impresas mediante ensayos a tensión y a las que se le realizaron modificaciones con respecto al porcentaje de relleno y al patrón de relleno. Una vez aplicadas trece pruebas se encontró que el patrón hexagonal presentó un esfuerzo último de tensión superior con respecto al rectangular, y además mostró mayor fuerza y rigidez. Las pruebas que aquí se realizaron utilizaron PLA como material, por lo que encuentran ciertas restricciones de efectividad vinculada a este material, es decir, los resultados encontrados en cuanto al patrón hexagonal están relacionados a este tipo de material y no a otro.

Por lo anterior, de acuerdo con Nahal et al. (2017) otro factor que es posible alterar al realizar impresiones 3D es el material, por lo que considera que para lograr una mejor optimización en el proceso de impresión es recomendable utilizar material que provenga recomendado por el mismo proveedor de la impresora.

Sin embargo, para que las impresoras pueden imprimir el material seleccionado y así lograr el modelo esperado, siempre necesario calentar el material de una boquilla hasta alcanzar el punto de fundición, para así realizar la estructura en las condiciones adecuadas. En el estudio de Kozior y Kundera (2018) se analizaron los efectos provocados en las propiedades físicas y mecánicas del PLA a alta temperatura de la boquilla, para lo cual se imprimieron probetas de acuerdo al estándar ISO 527, para luego realizar pruebas a tensión que permitieran verificar la diferencia entre las probetas impresas y las inyectadas. En estas

pruebas se realizaron variaciones de temperatura en las boquillas, utilizando índices entre  $180^{\circ}C$  y  $240^{\circ}C$ .

Los investigadores de este estudio notaron que una vez que aumentaba la temperatura, la resistencia a la rotura aumentaba, aunque no llegó a alcanzarse la resistencia de probetas de PLA inyectado, por lo que a manera de conclusión determinaron las propiedades del modelo final impreso en 3D tienen una alta dependencia de la temperatura de la boquilla de impresión, sin llegar a alcanzar las propiedades de ejemplares inyectados. Koziar y Kundera (2018) también encontraron resultados similares en cuanto a la importancia que tiene la temperatura de la boquilla de impresión sobre las propiedades del modelo final.

En otro estudio citado por Kasmi et al. (2021) sobre las propiedades mecánicas del polipropileno para la impresiones se trabajaron temperaturas de la boquilla entre  $215^{\circ}C$ ,  $230^{\circ}C$  y  $240^{\circ}C$ . A las probetas se les hizo un análisis dinámico de espectroscopia Raman, lo que permitió analizar las frecuencias y desarrollar análisis térmicos y microscópicos. Como resultado de investigación se obtuvo una ecuación que relaciona la velocidad de difusión con la temperatura de la boquilla, de acuerdo a esta ecuación, al elevarse la temperatura de la boquilla se tendría una velocidad de difusión superior, lo que permite una mejora de las propiedades mecánicas. De acuerdo con este estudio las propiedades del polipropileno mejorarían en relación al incremento de la temperatura de la boquilla.

## 5.2. Ensayos a tensión

Tanikella et al. (2017) refieren que en una investigación realizada por la Universidad Tecnológica de Michigan se analizó el comportamiento de las probetas a partir del uso de diferentes materiales para filamentos comerciales. En este estudio, los ensayos fueron realizados siguiendo el estándar ASTM 0638, incluyendo pruebas a ABS, policarbonato, nylon, T-Glase, poliestireno y materiales con propiedades para una mejor flexibilidad. A partir de los datos recolectados el estudio demuestra que el esfuerzo a tensión presenta una fuerte dependencia en la masa de la probeta, sin importar el material. Sin embargo, el material que presentó o una mayor resistencia la tensión fue el policarbonato con un esfuerzo máximo promedio de 49 MPa.

La dureza del policarbonato sumado a la claridad óptica permite que este material tenga múltiples aplicaciones, como por ejemplo para protección en el uso de maquinarias, señalizaciones, máscara de protección, y mostradores de productos, esto se debe a la facilidad que brindan las placas para ser trabajadas, pudiendo reemplazar al material acrílico en aplicaciones de alto impacto.

Wittbrodt y Pearce (2015) encontraron que de acuerdo con el estándar D-638 este material policarbonato, presenta una resistencia a la tensión de 10000 psi, con un porcentaje de elongación del 60 %.

En cuanto a la determinación de las propiedades del material plástico, la norma ASTM-0638 hace referencia a diferentes tipos de probetas de ensayos para plásticos semirrígidos y rígidos de distintos y espesores. Sin embargo, Hartmann y Sudduth (2020) consideran que a pesar de la existencia de una norma, es importante mencionar que en términos generales

la predicción de las propiedades mecánicas de las piezas es difícil de definir previamente debido a la ausencia de normativas que resulten de la validación de procedimientos, aunque la mayoría de procedimiento se guían por la norma ASTM-0638 en probetas. Esta norma cubre la determinación de las propiedades de tensión para plástico reforzado y no reforzado considerando un espesor máximo de 14 mm, esta norma además presenta información sobre la máquina a utilizar para las pruebas, y sobre las probetas adecuadas para cada situación, además de la velocidad de la prueba recomendada, las condiciones óptimas para la prueba y los cálculos para encontrar las propiedades adecuadas tomando en cuenta la estadística necesaria.

### 5.3. Propiedades mecánicas de materiales de impresión 3D

Se realizó una investigación para poder obtener valores teóricos de resistencia a la tensión, flexión y módulo de Young de referencia para poder contrastarlos contra los resultados obtenidos.

#### 5.3.1. ABS

Cuadro 1: Propiedades mecánicas de ABS

Resistencia a la tensión ( <i>MPa</i> )	Resistencia a la flexión ( <i>MPa</i> )	Módulo a la tensión ( <i>GPa</i> )
27.6 – 55.2	47.8 – 76	1.1 – 2.9

Fuente: Universidad de Barcelona (2020)

#### 5.3.2. PETG

Cuadro 2: propiedades mecánicas de PETG

Resistencia a la tensión ( <i>MPa</i> )	Resistencia a la flexión ( <i>MPa</i> )	Módulo a la tensión ( <i>GPa</i> )
25 – 35	68.65	1.3 – 1.5

Fuente: Josef Prusa (2020)

### 5.3.3. CPE HG100

Cuadro 3: Propiedades mecánicas de CPE HG100

Resistencia a la tensión ( <i>MPa</i> )	Resistencia a la flexión ( <i>MPa</i> )	Módulo a la tensión ( <i>GPa</i> )	Módulo a la flexión ( <i>GPa</i> )
40	73	2.865	2.414

Fuente: Alberto Prieto (2020)

### 5.3.4. Onyx

Cuadro 4: Propiedades mecánicas de Onyx

Resistencia a la tensión ( <i>MPa</i> )	Resistencia a la flexión ( <i>MPa</i> )	Módulo a la tensión ( <i>GPa</i> )	Módulo a la flexión ( <i>GPa</i> )
40	71	2.4	3.0

Fuente: Markforged (2021)



### 6.1. Descripción de la metodología

Se desea realizar ensayos a tensión para poder obtener propiedades mecánicas de los materiales ABS y PETG. Para eso se requieren seis fases:

1. Delimitación del campo de trabajo y estudio: Con los resultados adquiridos en la investigación de campo e investigación bibliográfica se delimita cuáles y cuántos serán los materiales de impresión 3D que serán utilizados para las pruebas de ensayo y los parámetros de impresión. Los materiales de interés son los materiales rígidos que se encuentran en el D-Hive: ABS y PETG
2. Diseño de probetas para ensayos: Conociendo los materiales a utilizar, se crea el diseño de las probetas en el software Autodesk Inventor los cuales son útiles para los ensayos de tensión utilizando normas existentes como guía para ensayos de materiales.
3. Definición de condiciones de impresión: En esta fase se definen todos los parámetros de impresión con el uso del software “Cura Ultimaker”. En todos los materiales se define el mismo patrón y relleno de impresión. Algunos parámetros de impresión varían según el material debido a sus propiedades de impresión.
4. Impresión de probetas: En esta fase se realiza la impresión de las probetas diseñadas. Esto se lleva a cabo en el laboratorio D-Hive de la Universidad del Valle de Guatemala con las impresoras “S3” y “S5” de Cura Ultimaker, además se realiza una inspección de la calidad de la impresión haciendo mediciones de dimensiones con sus respectivas incertidumbres.
5. Realizar ensayos: Esta fase se lleva a cabo en la Universidad del Valle de Guatemala, taller de Ingeniería Civil, en donde se realizan las pruebas de tensión de las probetas

impresas. Los ensayos de tensión se llevan a cabo en la “Compresora universal: Soiltest Versa Tester”, y se realizarán 5 ensayos para cada configuración de impresión.

6. Análisis de datos: A través de los datos adquiridos en los ensayos de taller, se realizan los cálculos pertinentes para hacer un análisis en donde se establece si la información tiene coherencia, de ser así, se procede a hacer un análisis estadístico de tendencia central, para determinar las propiedades mecánicas reales de los materiales de impresión 3D.

## 6.2. Requisitos y recursos

Las tablas a continuación muestran todos los requisitos que se deben de cumplir para poder obtener las propiedades mecánicas de los materiales ABS y PETG y así poder hacer un análisis de los mismos y poder compararlos.

### 6.2.1. Requisitos de impresión

Cuadro 5: Símbolos

Código	Nombre	Descripción
I01	Densidad de relleno	La densidad de relleno que se debe utilizar es de 50 %, 75 % y 100 %. (Cura Ultimaker, 2022).
I02	Patrón de impresión de capas superficiales	El patrón que se debe utilizar es el “concéntrico” el cual es lineal y el más estándar de todos (Cura Ultimaker, 2022).
I03	Patrón de impresión interior	Los patrones de impresión para todos los rellenos solo pueden ser los siguientes: “Lines”, “Grid”, “Zig-Zag”.
I04	Altura de capa	La altura de capa debe estar entre 0.2 – 0.4mm (Maz Vargas, 2018).
I05	Orientación de capa	La orientación de capa debe ser de 0° (Maz Vargas, 2018).
I06	Temperatura de cama de impresión	La temperatura de cama debe estar entre 70°C – 100°C (Cura Ultimaker, 2022).
I07	Adhesión a la cama de impresión	La adhesión debe ser nula en casos donde se permita. Si la impresión da error al inicio se debe colocar adhesión tipo Brim (Cura Ultimaker, 2022).
I08	Temperatura de impresión de ABS	La temperatura que se debe de imprimir el ABS es de entre 225°C – 260°C (Cura Ultimaker, 2022).



Código	Nombre	Descripción
I09	Temperatura de impresión de PETG	La temperatura que se debe de imprimir el PETG es de entre $225^{\circ}C - 245^{\circ}C$ (Cura Ultimaker, 2022).

### 6.2.2. Requisitos de dimensiones

Cuadro 6: Requisitos de dimensiones

Código	Nombre	Descripción
DT01	Incertidumbre de dimensiones $W_c, W_O$ . Ensayo a tensión. Las dimensiones se pueden observar en la Figura 6	La incertidumbre aceptada para estas dimensiones debe ser de $\pm 0.5mm$ (Maz Vargas, 2018).
DT02	Incertidumbre de la dimensión $L_O$ . Ensayo a tensión. Las dimensiones se pueden observar en la Figura 6	No hay máximo ni mínimo en incertidumbre para esa dimensión. (Maz Vargas, 2018)
DT03	Incertidumbre de la dimensión $T$ . Ensayo a tensión. Las dimensiones se pueden observar en la Figura 6	La incertidumbre aceptada para esta dimensión debe ser de $\pm 4mm$ (Maz Vargas, 2018)

### 6.2.3. Requisitos de ensayo

Cuadro 7: Requisitos de ensayo

Código	Nombre	Descripción
ET01	Distancia de las mordazas	La distancia de las mordazas debe ser de $24mm$ .
ET02	Velocidad de ensayo a tensión	La velocidad de prueba debe ser de entre $3 - 5 \frac{mm}{min}$ (Maz Vargas, 2018)

## 6.2.4. Recursos

Cuadro 8: Recursos

Cantidad	Descripción	Costo unitario	Costo total
62.07 m	Metros totales de filamento ABS utilizado en total para realizar 35 probetas a tensión material ABS	6.32 Q/m	Q392.28
58.35 m	Metros totales de filamento PETG utilizado en total para realizar 35 probetas a tensión material PETG	6.94 Q/m	Q404.95

## 6.3. Código de probetas

Para poder tener un orden de todos los ensayos de cada probeta se diseñó un código especializado y así poder saber de que material, relleno, patrón de impresión y número de probeta se esta haciendo referencia. A continuación se explica el código:

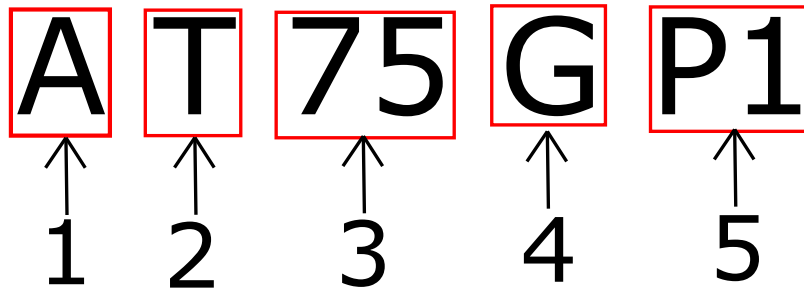


Figura 4: Código de probetas

- El elemento 1 nos indica si es el material ABS o PETG. Si se muestra una “A” es para ABS y si se muestra una “P” es para PETG.
- El elemento 2 nos indica si es una prueba de tensión. “T” indica que es un ensayo a tensión.
- El elemento 3 indica el porcentaje de relleno que se utilizó. En este caso el número indica de forma directa ese porcentaje, puede ser 50 %, 75 % o 100 %.
- El elemento 4 nos indica el patrón de relleno, este elemento puede o no encontrarse, esto depende del elemento 3; si se utiliza un porcentaje de relleno del 100 % no se usa ningún patrón, si se usa otro relleno si existe un patrón. “G” es para GRID, “L” es para LINEs y “Z” es para ZIGZAG.
- El elemento 5 indica el numero de probeta del ensayo. El rango es de “P1” a “P5”.

## 6.4. Diseño preliminar

Se realizaron pruebas de tracción con diferentes materiales, y la mayoría de estas pruebas utilizan la forma "Y". Al realizar la investigación se encuentra esta repetición en todos los trabajos serios acerca del tema. La razón la cual se encuentra este patrón es debido a la norma ASTM D638, ya que la norma muestra este estándar para hacer cualquier ensayo de tracción con diferentes materiales. Por esto mismo se utiliza la norma de base para comprender la geometría más no se basa en ella estrictamente.

Para poder verificar que la geometría sea adecuada para el ensayo de tracción, se realizaron cinco pruebas de tracción utilizando iguales dimensiones para todas con el material de ABS y así encontrar si rompen dentro del área reducida. Además, se toma nota de la deformación y la fuerza durante el ensayo para poder obtener todos los resultados de interés del material y que estos sean similares a encontrados en otros estudios relacionados.

La forma de la probeta es la siguiente:

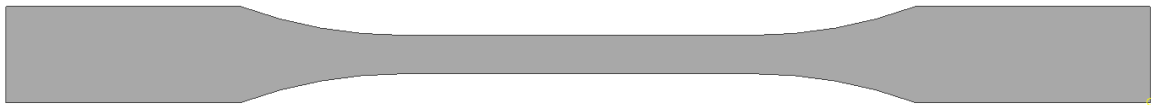


Figura 5: Diseño preliminar de probeta de ensayo a tensión

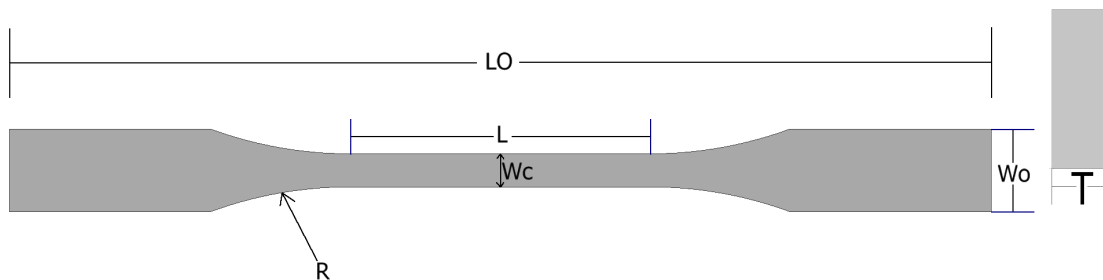
Las dimensiones y forma utilizadas en el diseño preliminar son las que se utilizan en el diseño final, por lo que si se desea verificar estas se pueden observar en el apartado de diseño final.

## 6.5. Cálculos y diseño

### 6.5.1. Diseño

Luego de aprobar la geometría observando que las probetas tuvieran la rotura dentro del área reducida se tiene el siguiente diseño:

Figura 6: Diseño de probeta para ensayos a tensión



En donde:

- $L_o$  es el largo total de la probeta
- $L$  es el largo de la sección reducida
- $W_c$  es el ancho de la sección reducida
- $W_o$  es el ancho de la probeta
- $T$  es el grosor de la probeta

En donde se tienen las siguientes dimensiones para las probetas de AT100P:

Cuadro 9: Dimensiones AT100P

Símbolo	Dimensión	Unidad de medida
$L_o$	180	<i>mm</i>
$L$	55	<i>mm</i>
$W_c$	6.5	<i>mm</i>
$W_o$	15	<i>mm</i>
$T$	6.5	<i>mm</i>

Cuadro 10: Dimensiones probetas

Símbolo	Dimensión	Unidad de medida
$L_o$	180	<i>mm</i>
$L$	55	<i>mm</i>
$W_c$	6	<i>mm</i>
$W_o$	15	<i>mm</i>
$T$	6.5	<i>mm</i>

Entre los cuadros [9](#) y [10](#)  $W_c$  aumenta 0.5 *mm* debido a las incertidumbres que debe de cumplir la probeta en esta dimensión, ya que al imprimir las 5 probetas no cumplía con esta, por lo que se realiza este cambio para no imprimir de nuevo. Con este lote se debe de estar seguro que siempre la probeta falle en el área reducida para validar el cambio.

## 6.6. Cálculos

Los ensayos a tensión proveen información acerca de la resistencia y ductilidad que tiene un material, esto se hace mediante tensores de tracción en una sola dirección. Toda esta información es importante para poder comparar un material entre otro y mantener un control sobre cualquier circunstancia de diseño (Levinson, [2020](#)).

De los ensayos de tensión se puede obtener mucha información pero se selecciona solo la que se puede aplicar a fórmulas cuyo resultado nos indiquen una comparación entre materiales como esfuerzo máximo, módulo de Young y tenacidad. Por ello se selecciona la distancia que se elonga en la sección reducida de la probeta, la fuerza y las medidas de la probeta antes y después del ensayo.

Los cálculos del ensayo a tensión se realizan bajo las siguientes suposiciones:

1. Temperatura de impresión: La temperatura ambiente teórica del laboratorio D-Hive es de a  $20^{\circ}C$ , y la temperatura real del laboratorio es de  $22^{\circ}C$ .
2. Temperatura de ensayos: La temperatura del taller de ingeniería civil es la temperatura ambiente del día que se realizó los ensayos, la cual es de entre  $25^{\circ}C$ - $29^{\circ}C$ .
3. Esfuerzos: Se asume que el esfuerzo de tensión es el mismo en todo el área reducida de la probeta.
4. Dimensiones probetas: Las dimensiones de las probetas son uniformes en cualquier parte de la misma. Las mediciones se realizaron con un micrómetro con precisión de  $0.01mm$  para garantizar esta uniformidad.

Los siguientes símbolos son utilizados en las fórmulas que se requieren en los ensayos a tensión:

Cuadro 11: Símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad de medida
$W_p$	Es la carga que se aplica a la probeta en determinado punto de la prueba	$N$
$W_{max}$	Es la carga máxima que soportó la probeta	$N$
$W_{ult}$	Es la última carga antes de la ruptura de la probeta	$N$
$A_i$	Es el área transversal inicial de la sección de estudio de la probeta	$mm^2$
$A_f$	Es el área transversal final de la sección de estudio de la probeta	$mm^2$
$L_i$	Es el largo inicial de la sección de estudio	$mm$
$L_p$	Es el largo en cualquier punto del ensayo de la sección de estudio	$mm$
$\% \varepsilon$	Porcentaje de elongación de la sección reducida	—
$\sigma_p$	Esfuerzo a la tensión en cualquier punto	$MPa$
$\sigma_T$	Esfuerzo último a la tensión	$MPa$
$\sigma_R$	Esfuerzo de rotura a la tensión	$MPa$
$\sigma_f$	Esfuerzo a la fluencia	$MPa$
$E$	Módulo de Young en el punto de esfuerzo a la fluencia	$MPa$
$T_p$	Tenacidad en cada punto	$\frac{MJ}{m^3}$

Símbolo	Descripción	Unidad de medida
$T_r$	Tenacidad real del material	$\frac{MJ}{m^3}$
$\rho$	Resiliencia del material	$\frac{MJ}{m^3}$

Teniendo en cuenta los diferentes símbolos, se tienen las siguientes ecuaciones que se utilizan para encontrar las propiedades mecánicas de los materiales:

$$\% \varepsilon = \left| \frac{L_i - L_p}{L_i} \right| * 100 \quad (1)$$

La ecuación 1 nos permite conocer cuanto se tensó la probeta respecto al largo inicial antes de realizar el ensayo.

$$\sigma_p = \frac{W_p}{A_i} [\text{MPa}] \quad (2)$$

$$\sigma_T = \frac{W_{max}}{A_i} [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$\sigma_f = \text{Se obtiene del análisis de la gráfica esfuerzo-elongación} [\text{MPa}] \quad (4)$$

$$\sigma_R = \frac{W_{ult}}{A_f} [\text{MPa}] \quad (5)$$

Las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 muestran esfuerzos en diferentes puntos de interés durante todo el ensayo a tensión, para obtener cualquier esfuerzo se hace una división entre la fuerza ejercida en la probeta y el área transversal de interés. El esfuerzo nos permite hacer comparaciones entre materiales o configuraciones del mismo material.

$$E = \frac{W_p L_i}{A(L_p - L_i)} [\text{MPa}] \quad (6)$$

(En donde  $L_p$  es el largo del punto de esfuerzo a la fluencia)

La ecuación 6 muestra el cálculo para el Módulo de Young, el cual nos muestra el comportamiento elástico que tiene el material aplicándole una fuerza específica.

$$T_p = \sigma_p \% \varepsilon_p - \% \varepsilon_{p-1} \left[ \frac{MJ}{m^3} \right] \quad (7)$$

La ecuación 7 muestra como se calcula la tenacidad del material en cualquier punto del ensayo de tensión. La tenacidad es la energía de deformación por unidad de volumen que puede soportar antes de romperse.

$$T_r = \sum_{i=0}^p T_i \left[ \frac{MJ}{m^3} \right] \quad (8)$$

La ecuación 8 muestra la tenacidad real del material , ya que suma todos los puntos obtenidos del ensayo a tensión.

$$\rho = \sum_{i=0}^p T_i \left[ \frac{MJ}{m^3} \right] \quad (9)$$

(En donde  $p$  es el punto de esfuerzo a la fluencia)

La ecuación 9 muestra la resiliencia. La resiliencia es la energía de deformación por unidad de volumen pero solo durante la deformación elástica.

$$\%A = \frac{A_i - A_f}{A_i} \quad (10)$$

La ecuación 10 muestra la reducción de área que se obtuvo luego del ensayo respecto al área inicial de la probeta.

## 6.7. Fabricación

Todo el proceso de fabricación es el mismo para todas las probetas y para los dos materiales utilizados. Para realizar la impresión (fabricación) de las probetas a tensión se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Primero se debe de abrir el programa de “Ultimaker Cura 4.13.1”, como se observa en la Figura 7.

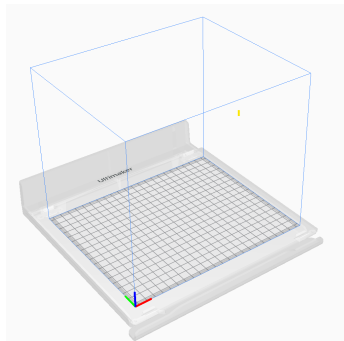


Figura 7: Cura Ultimaker

2. Luego se debe de seleccionar la impresora y extrusor a utilizar con el respectivo material de impresión como se observa en la Figura 8.



Figura 8: Modelo impresora, extrusor y material

- Al tener estas configuraciones listas se procede a cargar el modelo o los modelos a imprimir y la cantidad deseada, como se observa en la Figura 9.

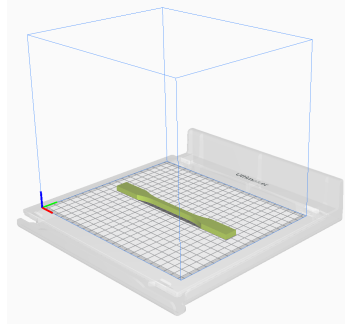


Figura 9: Modelo a imprimir

- Después se comienza a configurar las opciones en Cura, la primera es la de “Quality” en donde el “layer height” debe ser 0.2 como se observa en la Figura 10.

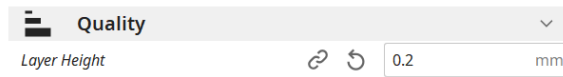


Figura 10: Modelo a imprimir

- La segunda configuración a editar es la de “Top/Bottom” en donde “Top/Bottom Pattern” y “Bottom pattern initial layer” deben de ser “Lines” como se observa en la Figura 11.



Figura 11: Patrón de Top/Bottom

- La tercera configuración es la de “Infill” en donde se selecciona el patrón y densidad de relleno que se desea como se observa en la Figura 12.

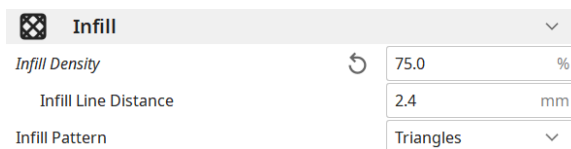


Figura 12: Patrón de Top/Bottom



7. La última configuración es la de “*Build plate adhesion*” en donde el tipo que se debe seleccionar es “*Skirt*” así se reduce el tiempo de impresión, esto se puede observar en la Figura 13.



Figura 13: Patrón de adhesión a la plancha

8. Por último se debe de hacer clic en “*Slice*” y ver el “*Preview*” y ver si la impresión es la adecuada a como se configura desde el inicio. Esto se puede observar en las Figuras 14 y 15.



Figura 14: Botón slice

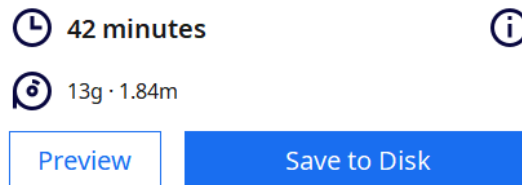


Figura 15: Botón de Preview

Las probetas se pueden observar en la Figura 16 en donde se ve a la impresora haciendo la fundición del material para hacer la forma de la misma.



Figura 16: Impresión real de probetas

Cuadro 12: Configuración de impresión de probetas de ABS

ABS	Tamaño extrusor [mm]	Máquina	Gramos	Cantidad [m]	Tiempo [H : M]
100 %	AA 0.8	S3 extrusor 1	67	9.53	02:33
50 % y 75 % GRID	AA 0.8	S3 extrusor 1	123	17.48	04:42
50 % y 75 % LINES	AA 0.8	S3 extrusor 1	123	17.56	04:44
50 % y 75 % ZIGZAG	AA 0.8	3 extrusor 2	123	17.5	06:46

Cuadro 13: Configuración de impresión de probetas de PETG

PETG	Tamaño extrusor [mm]	Máquina	Gramos	Cantidad [m]	Tiempo [H : M]
100 %	AA 0.4	S5 extrusor 2	77	9.47	03:58
50 % y 75 % GRID	AA 0.4	S5 extrusor 2	127	16.62	06:45
50 % y 75 % LINES	AA 0.4	3 extrusor 2	131	16.13	08:48
50 % y 75 % ZIGZAG	AA 0.4	3 extrusor 2	131	16.13	08:47

En los cuadros [12](#) y [13](#) se puede observar todas las configuraciones que se utilizaron para poder imprimir las probetas. Independiente del material siempre se buscó utilizar una misma impresora para así mantener la misma calidad en todas las probetas, desafortunadamente muchas de las impresoras se fueron averiando, y se tardaba de 5 a 7 días en repararse es por esto que se utilizaron otras impresoras pero buscando que el lote de 5 probetas se hicieran en la misma impresora para así asegurar la misma calidad en el lote de probetas, por ejemplo hubieron varias impresiones en las que habían 4 probetas de buena calidad y fue la última probeta la que tenía una capa averiada, pero se repetía la impresión para no tener ruido por cambios de impresora en un mismo lote de probetas. El cambio de impresoras para cada patrón y relleno se traducían en mayor o menor tiempo, esto debido a el tamaño de la impresora y la velocidad que podía llegar a tener.

Cada vez que se imprimía probetas de ABS se tuvieron casi 1 a 2 fallas de impresión en las capas, esto era de esperarse debido a que el ABS es un material muy difícil de imprimir; al imprimir este material se debe de estar seguro que no hayan corrientes de aire fuertes ya que es muy susceptible al cambio de temperatura, por esto mismo se hacían varias impresiones y cerrando las puertas para que no hubieran estas corrientes de aire. A diferencia del ABS, el PETG no se tuvieron fallas de impresión con frecuencia, se obtuvieron solo tres fallas en todas las impresiones y esto es debido a que el PETG no es tan susceptible al cambio de temperatura.

Se realizó un cambio en el grosor de extrusor, ya que al hacer el análisis de incertidumbre se obtuvo un problema con las probetas con código AT100P, se puede ver el cambio en los

cuadros 9 y 10. Además con los patrones de relleno se obtuvieron dimensiones muy cercanas al límite superior, es por esto que se cambió de un grosor de  $0.8\text{ mm}$  a  $0.4\text{ mm}$ . Esto resultó en una mejora en las dimensiones de 100% de relleno y con patrones, ya que la dimensión final tuvo mucho más holgura, esto se traduce a una mayor precisión de impresión.

## 6.8. Ensayos

### 6.8.1. Alcance

Este protocolo pretende brindar una lista de pasos a seguir para poder realizar cualquier ensayo de tensión o de flexión, de materiales de impresión 3D, en el taller de Ingeniería Civil utilizando la compresora universal, Soiltest Versa Tester y la prensa mecánica Soiltest P/CBR. Además, brinda una lista de prerequisites que se deben de cumplir para poder comenzar a realizar las pruebas. Todas las pruebas de ensayos son grabadas en el momento y su análisis se hace con el video del ensayo a través del software de Tracker.

### 6.8.2. Antecedentes

#### Compresora Universal, Soiltest Versa Tester

Es una máquina de ensayo de tensión-compresión que se acciona hidráulicamente para ensayos de metales, concreto, y madera. Tiene una capacidad de  $60,000\text{ lbs}$  en compresión y  $10,000\text{ lbs}$  en tensión.



Figura 17: Compressora Universal, Soiltest Versa Tester

### 6.8.3. Tracker

Tracker es un programa gratuito de análisis de vídeo y construcción de modelos hechos en el ambiente de JAVA Física de Código Abierto (OSP, por sus siglas en inglés). Este programa está diseñado para ser utilizado en análisis físicos y para enseñanza en física.

Todos los cuadros a continuación son protocolos que se siguieron para poder realizar los ensayos a tensión al año en curso.

### 6.8.4. Protocolos de seguridad

#### COVID-19

Debido al Covid-19 se deben seguir las siguientes indicaciones:

Cuadro 14: Protocolos sanitarios

No.	Acción	Descripción	Marcar con "X" si se ha realizado
1	Uso de mascarilla	El uso de mascarilla es obligatorio en todo el campus de la UVG. Se debe de utilizar mascarilla que no posea filtro.	
2	Gel antibacterial	Se debe de aplicar gel antibacterial antes de manipular cualquier material dentro del laboratorio.	

#### Integridad física

Para asegurar la integridad física del estudiante se debe de seguir los siguientes cuidados para poder entrar y manipular cualquier objeto y/o máquina dentro del laboratorio:

Cuadro 15: Protocolos de seguridad

No.	Acción	Descripción	Marcar con "X" si se ha realizado
1	Botas de acero	Es obligatorio el uso de botas con punta de acero para manipular las máquinas, debido a que muchas partes de esta son peligrosas.	
2	Bata	El uso de bata es importante para saber que el estudiante está haciendo uso de las instalaciones dentro del laboratorio.	
3	Lentes	Es obligatorio el uso de lentes protectores para disminuir el riesgo de lesiones en los ojos. Si el estudiante hace uso de lentes de contacto no es necesario usar otros de seguridad.	
4	Comportamiento	Dentro del laboratorio esta rotundamente prohibido cualquier conducta inadecuada que pueda provocar un accidente. Ejemplos: empujar, golpear o hacer uso inadecuado de herramientas y/o maquinas.	

### 6.8.5. Protocolos de ensayo a tensión

Los ensayos a tensión se realizan en la compresora universal, Soiltest Versa Tester. Para poder realizar cualquier ensayo a tensión se debe de seguir los siguientes pasos:

Cuadro 16: Protocolo ensayo a tensión

No.	Acción	Descripción	Marcar con “X” si se ha realizado
1	Colocar marco de tensión	Se debe de colocar el marco de tensión sobre la mesa de la compresora universal.	
2	Placa superior de marco de tensión	Al colocar el marco de tensión se le coloca la placa superior ya que se coloca sin esta para que pueda entrar en la compresora universal.	
3	Asegurar marco de tensión	Se coloca los tornillos especiales al marco de tensión en la parte superior e inferior.	
4	Mordaza superior	Colocar la mordaza superior atornillada a la placa superior del marco de tensión.	
5	Mordaza inferior	Colocar la mordaza inferior en la base café de la compresora universal.	
6	<i>Switch</i> de “start”	Asegurarse que el <i>switch</i> de “start” se encuentre en “stop” se encuentre en “neutral”.	
7	Palanca de movimiento	Asegurarse que la palanca de movimiento se encuentre en “neutral”.	
8	Electricidad de máquina	Se conecta la compresora universal a la red de electricidad.	
9	Electricidad de sensor de movimiento	El sensor de movimiento se conecta a la red eléctrica.	
10	Colocación superior de probeta de ensayo	Se coloca la parte superior de la probeta a la mordaza superior.	
11	Colocación inferior de probeta de ensayo	Se mueve la palanca de movimiento a “release” o “load” para ajustar la mordaza inferior y colocar la parte inferior de la probeta.	
12	Loading rate	Ajustar la velocidad del ensayo.	
13	Tarar la carga	Se pone el test pilot en cero para comenzar la prueba.	

Para realizar los ensayos se procede exactamente todos los días a realizar los pasos del Cuadro 16. Los primeros ensayos que se realizaron con las probetas AT100P se tuvo el problema de la iluminación, ya que se creía que la luz solar que entraba por la ventana era suficiente, pero a la hora de realizar el análisis de vídeo no se pudo analizar todos las probetas. Por esto mismo para el otro día de ensayos se compró una linterna de exteriores para poder enfocar la luz directamente a la probeta que se esta sometiendo a ensayo. Otro problema que se enfrentó tiene que ver con las mordazas superiores e inferiores en donde se

coloca las probetas; estas mordazas se esconden a la hora de apretarlas por lo que calcular que las mordazas quedaran en la línea marcada en la probeta era bastante difícil, para poder realizarlo se debía hacerlo entre dos personas, para ello el encargado del taller ayudó en la colocación de cada una de las probetas. Por último, a la hora de usar Tracker se necesita una forma de dejar indicado en el vídeo una medida para analizarla luego, por eso se utilizó una cinta métrica pegada paralela a la base.

Para la colocación de las cámaras se utilizó la mesa que se encontraba de frente a la máquina de ensayos y se utilizó un trípode para colocarla en posición fija, sin inclinación y lo más alejada posible para evitar el efecto de apertura normal en las cámaras. Pero una cámara no era suficiente por lo que se utilizó otra cámara la cual era sostenida manualmente para poder grabar el medidor de fuerza para poder luego enlazar ambos vídeos.

### 6.8.6. Resultados de ensayos

El Cuadro 17 muestra un ejemplo de las tablas que se debían ir llenando durante los ensayos, para llevar un control de lo que se iba realizando.

Cuadro 17: Anotaciones de ensayos

No.	Código de probeta	Fecha de prueba	Duración de vídeo
1	AT50GP1	11/05/2022	02:10
2	AT50GP2	11/05/2022	02:12
3	AT50GP3	11/05/2022	02:17
4	AT50GP4	11/05/2022	02:03
5	AT50GP5	11/05/2022	02:41

### 6.8.7. Protocolo de procesamiento de vídeos en Tracker

Luego de realizar los ensayos se procede a hacer el análisis de los vídeos en el programa Tracker. A continuación se muestra el proceso que se debe de seguir para poder obtener los datos.

Cuadro 18: Protocolo procesamiento de vídeos

No.	Acción	Descripción	Marcar con una "X" si se ha realizado
1	Editar vídeos	Se edita el vídeo de la probeta y del medidor de fuerza de modo que se tuviera el mismo momento y duración de ambos vídeos	
2	Abrir Tracker	Se procede a abrir el programa de Tracker.	



No.	Acción	Descripción	Marcar con una "X" si se ha realizado
3	Abrir un vídeo	Se abre el vídeo que se desea analizar. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">109</a>	
4	Guardar proyecto	Se procede a guardar el proyecto. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">109</a>	
5	Ajuste de corte	Hacer clic en la opción de ajuste de corte. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">109</a>	
6	Fotogramas	Dentro de la opción de ajuste de corte, se debe de confirmar que los FPS están acorde a los que se grabaron originalmente para no cortar partes del vídeo. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">110</a>	
7	Vara de calibración	Se hace clic en la opción de vara de calibración y crear una nueva. Luego colocarla a la par del metro del vídeo e indicarle que medida tiene. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">109</a> .	
8	Ejes	Se hace clic en la opción de ejes y luego se colocan a la par de la probeta. Si se tiene una inclinación la probeta se debe de inclinar el eje hasta que quede paralela a la probeta. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">109</a> .	
9	Masa puntual	Se debe hacer clic luego en el botón de control de trayectorias y colocar una masa puntual nueva. Esta de debe colocar en la marca de la probeta siguiendo la siguiente rutina: Crtl+shift+click. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">109</a> .	
10	Analizar	Al colocar la masa puntual solo damos clic en analizar y esperamos a que analice cada <i>frame</i> del vídeo. Referencia se puede observar la Figura <a href="#">109</a> .	

No.	Acción	Descripción	Marcar con una "X" si se ha realizado
11	Exportar datos	Al tener todos los resultados del movimiento del punto de masa se procede a exportar datos. El procedimiento se puede observar en la Figura 111.	

Es importante mencionar que la acción, nueve y diez del cuadro 18, se debe hacer dos veces por vídeo. Las probetas tienen dos marcas: una al inicio del área reducida y otra al final de la misma. Una masa puntual va al inicio y otra al final de estas dos marcas; las dos masas puntuales son de uso a la hora de hacer el procesamiento de datos por eso mismo estas acciones se hacen dos veces por vídeo.

Al procesar los vídeos de la mayoría de probetas de ABS se tuvo el problema de grabación. Se grabó las probetas de ABS con una Nikon Coolpix P520 y el medidor de fuerza con una Samsung HMX-F80, pero a la hora de editar y procesar los vídeos de probetas se tuvo un problema de desenfoque en la cámara Nikon, esto ocasionaba que al colocar el punto de masa en Tracker y analizar *frame* por *frame* arrojara un error. Para solucionar este problema se debía corregir la posición del punto de masa manualmente y estar atentos al vídeo para ir corrigiendo cada vez que el programa lo solicitara. Parecía ser suficiente esto, pero muchas veces Tracker se alejaba de la marca en la probeta, por eso se debía hacer varias pruebas en toda la marca de la probeta hasta que Tracker no moviera de lugar la masa puntual sin preguntar. Para evitar todo este retraso y pérdida de tiempo, para las grabaciones de las probetas de PETG se utilizó la Samsung HMX-F80 para los vídeos de probetas ya que no presentaba este desenfoque involuntario.

Debido a que las mordazas no eran de alta precisión las probetas muchas veces no quedaban a 90° con respecto al suelo, por esto mismo al colocar ejes en Tracker se podía observar la inclinación de la probeta, para poder arreglar este problema se inclinaba el eje hasta que el eje Y estuviera paralelo a la probeta y así poder obtener datos líneas y no tener que convertirlos con los grados desfasados.

### 6.8.8. Protocolo de procesamiento de datos

Al tener los datos en formato .txt se procede a hacer una depuración de todos los datos mediante una hoja de cálculo de Excel. A continuación se muestra el proceso que se debe de seguir para obtener los datos importantes:

Cuadro 19: Protocolo de procesamiento de datos

No.	Acción	Descripción	Marcar con una "X" si se ha realizado
1	Importar datos	Se debe de importar los datos obtenido de Tracker a Excel	
2	Copiar tabla	Al exportar los datos se crea una tabla, se copia estos datos y se pegan sin formato en otra hoja de Excel.	
3	Agregar columna de diferencial	Se debe de agregar una columna "dx", la cual es la resta del punto más lejano y el punto más cercano del eje Y.	
4	Aplicar ecuación	Se debe de aplicar la fórmula $\frac{dx}{x}$ para obtener el porcentaje de elongación	
5	Intervalo de selección	El total de tiempo se debe dividir entre 20 datos. Esto nos muestra cada cuanto tiempo se debe de seleccionar un valor	
6	Selección de datos	Para cada intervalo de segundos se debe de escoger el menor valor seguido del último valor escogido. Además siempre debe de estar incluido el segundo en donde se obtuvo la fuerza máxima	
7	Emparejar con fuerza	Al tener todos los puntos seleccionados, se debe de emparejar con el vídeo de fuerza. Esto se realiza mediante los <i>frames</i> del vídeo, ya que ambos estas emparejados desde la edición.	

El procesamiento de datos es el último paso antes de pasar a obtener los esfuerzos y demás características mecánicas del material. El problema que se enfrentó durante este paso fue el de no un valor certero en el segundo de donde se obtiene el porcentaje de elongación; algunas veces el valor era más pequeño que el anterior que se había escogido, por lo que se debía de recurrir al segundo anterior o siguiente para poder obtener el valor real. Esto sucede debido a que Tracker no es preciso al 100 % por lo que por cambios de luz o algún movimiento en el vídeo puede ocasionar estos valores erróneos.



Para poder obtener los resultados se utilizó un programa de Excel, en donde se colocan todos los datos obtenidos del Cuadro 17 y del análisis de vídeos en el programa Tracker de todos los vídeos tomados para cada ensayo de probetas.

### 7.1. Cumplimiento de requisitos

Cuadro 20: Requisitos de impresión

Código	¿Se ha cumplido?
I01	Sí
I02	Sí
I03	Sí
I04	Sí
I05	Sí
I06	Sí
I07	Sí
I08	Sí
I09	Sí

Cuadro 21: Requisitos de dimensiones

Código	¿Se ha cumplido?
DT01	Sí
DT02	Sí
DT03	Sí

Cuadro 22: Requisitos de Ensayo

Código	¿Se ha cumplido?
ET01	Sí
ET02	Sí

## 7.2. Resultados de ABS

El ABS, acrilonitrilo butadieno estireno, es un polímero termoplástico muy común en la industria, conocido por la buena resistencia a la bajas temperaturas y su peso liviano. Es muy utilizado en la fabricación de electrodomésticos, cascos de barcos, decoración o juguetes, por ejemplo los ladrillos LEGO están fabricados con ABS; por estas y más razones este material es bastante utilizado en la impresión 3D (Contreras, 2019a)

### 7.2.1. ABS 100 % de relleno

En los cuadros a continuación podrán observar que se tienen solo dos ensayos, esto se debe a que no se tuvo una buena iluminación a la hora de realizar por lo que fue imposible que Tracker pudiera reconocer la marca en la probeta y seguir el movimiento durante todo el ensayo.

Figura 18: Gráfica esfuerzo vs deformación AT100P1

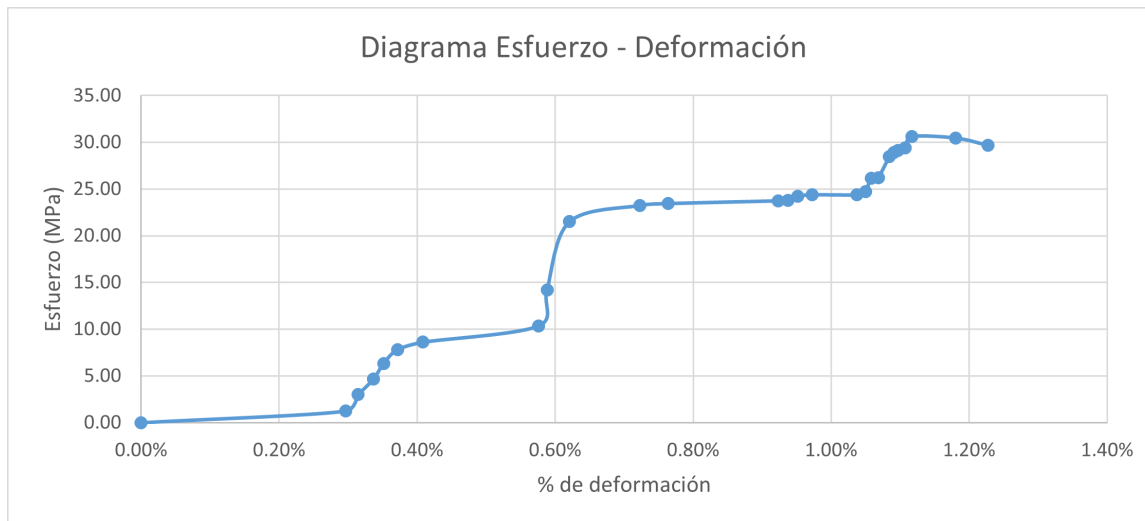
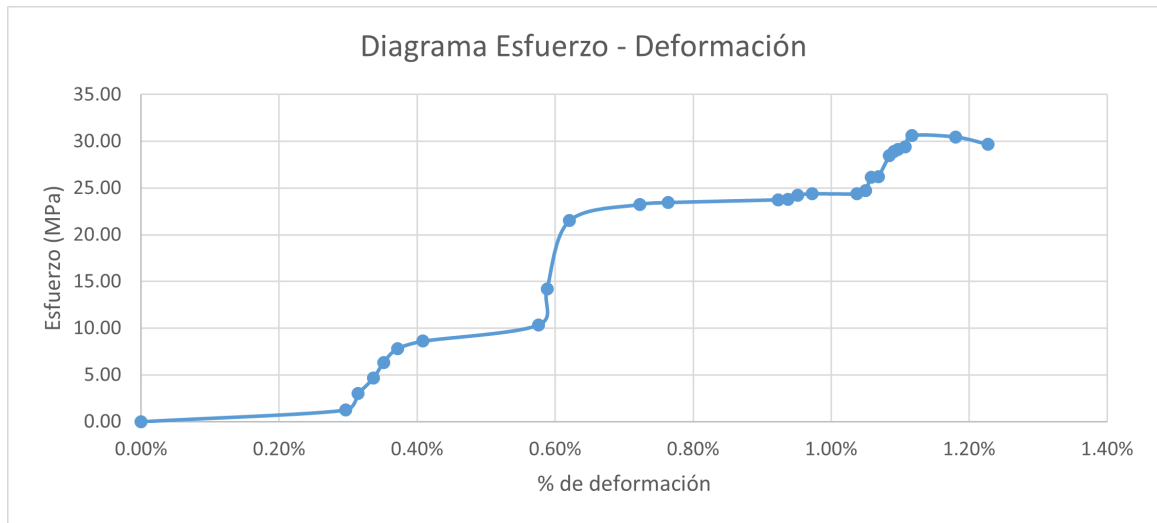


Figura 19: Gráfica esfuerzo vs deformación AT100P2



Cuadro 23: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
AT100P	1	0.65 %	3.48 %
AT100P	2	0.15 %	1.23 %
$\bar{X}$ AT100P		0.40 %	2.35 %
$\sigma$ AT100P		0.35 %	1.59 %

Cuadro 24: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
AT100P	1	1.98	25.41	30.79	29.84
AT100P	2	2.89	24.74	30.61	29.71
$\bar{X}$ AT100P		2.44	25.08	30.70	29.78
$\sigma$ AT100P		0.64	0.47	0.13	0.09

Cuadro 25: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	tenacidad
AT100P	1	0.09	0.73
AT100P	2	0.14	0.19
$\bar{X}$ AT100P		0.12	0.46
$\sigma$ AT100P		0.04	0.38

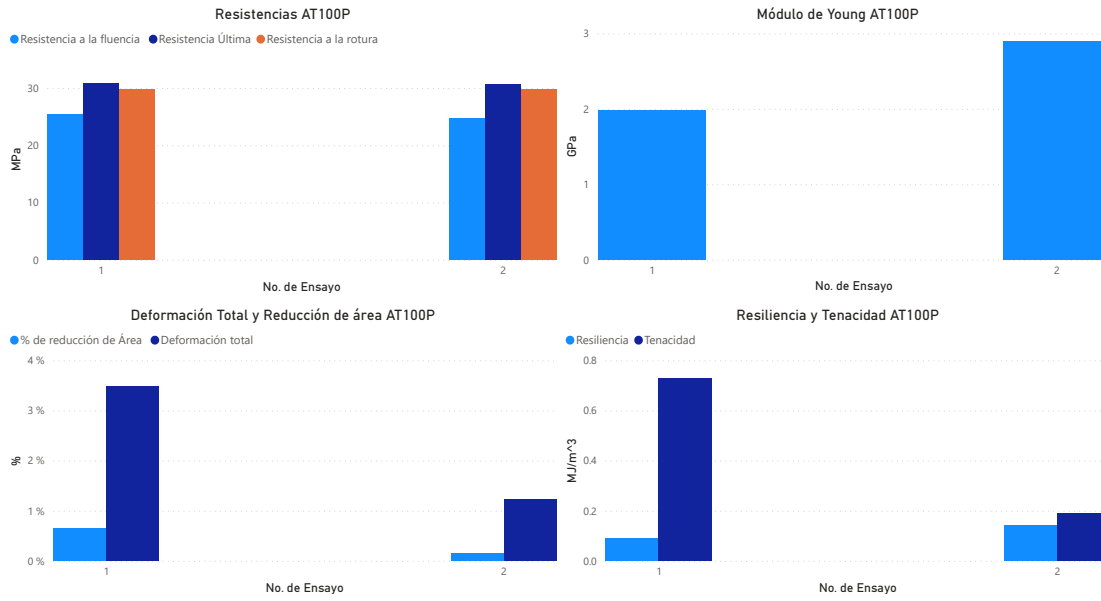


Figura 20: Gráficas de resultados AT100

### 7.2.2. ABS 50% patrón GRID

Figura 21: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP1

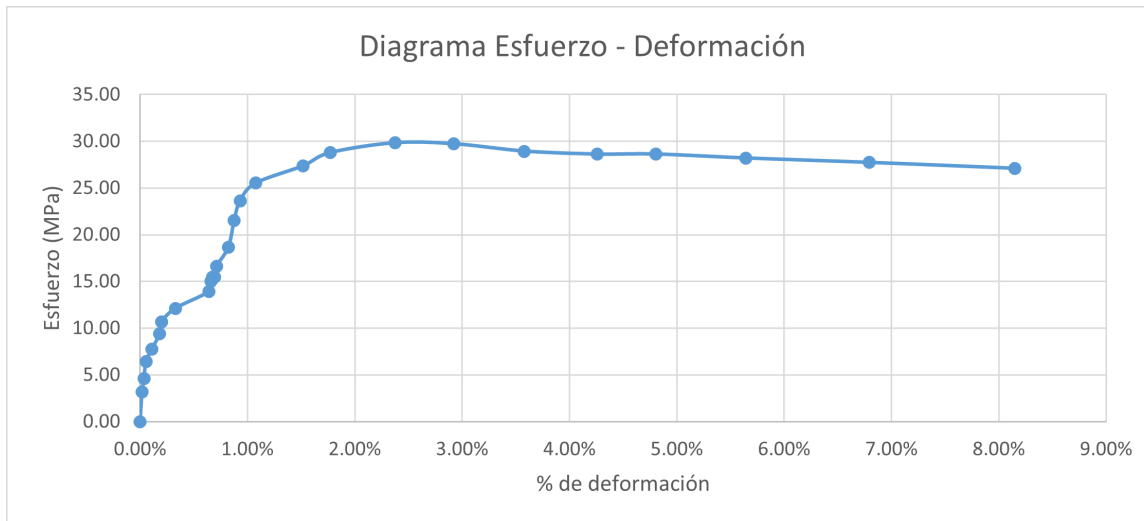




Figura 22: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP2

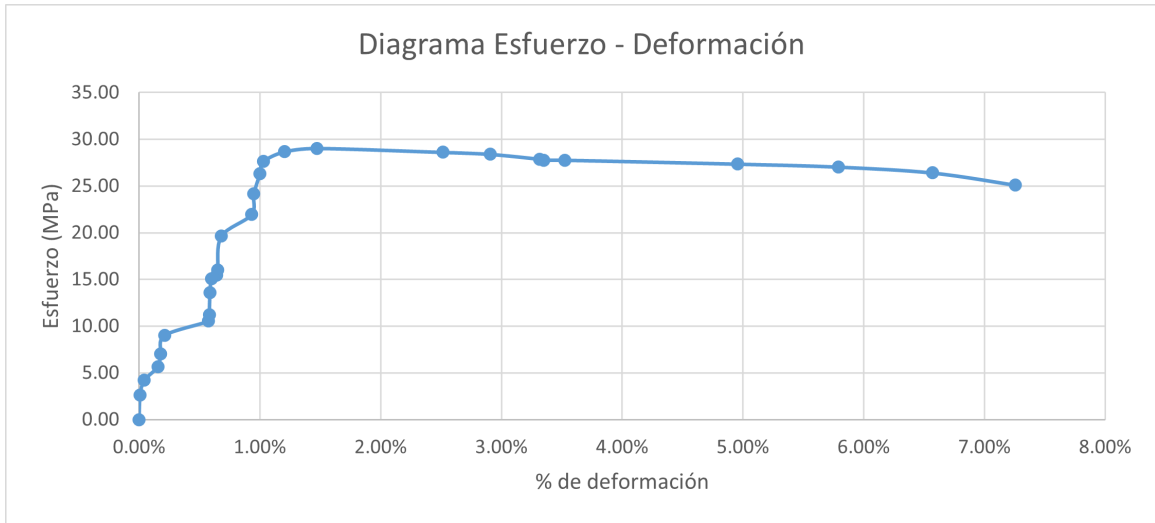


Figura 23: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP3

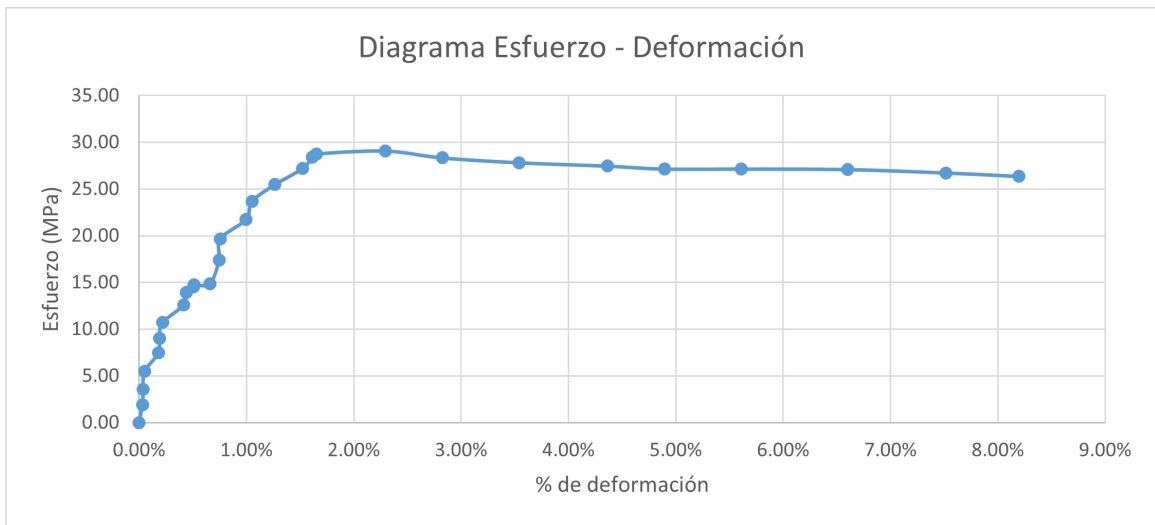


Figura 24: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP4

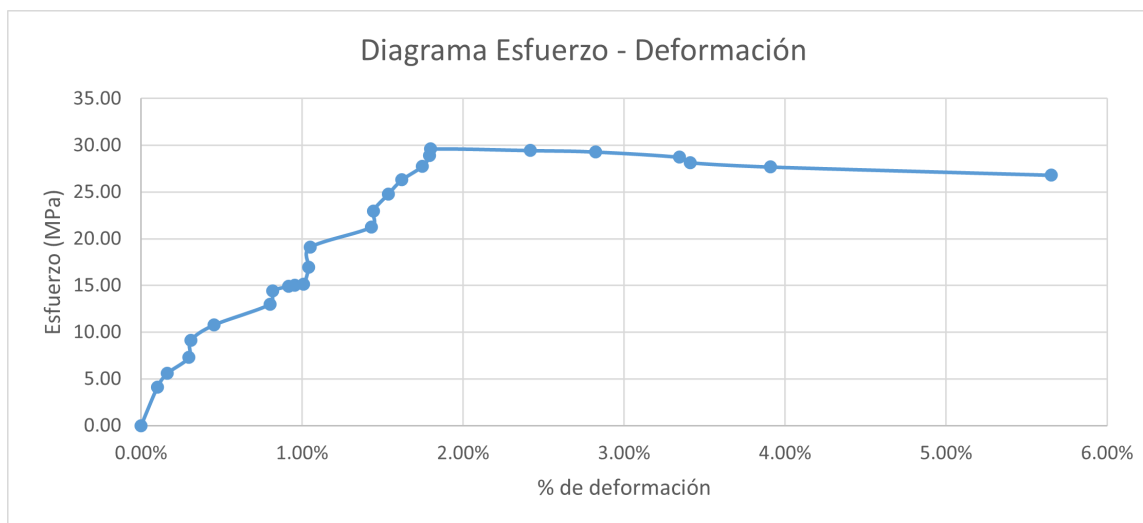
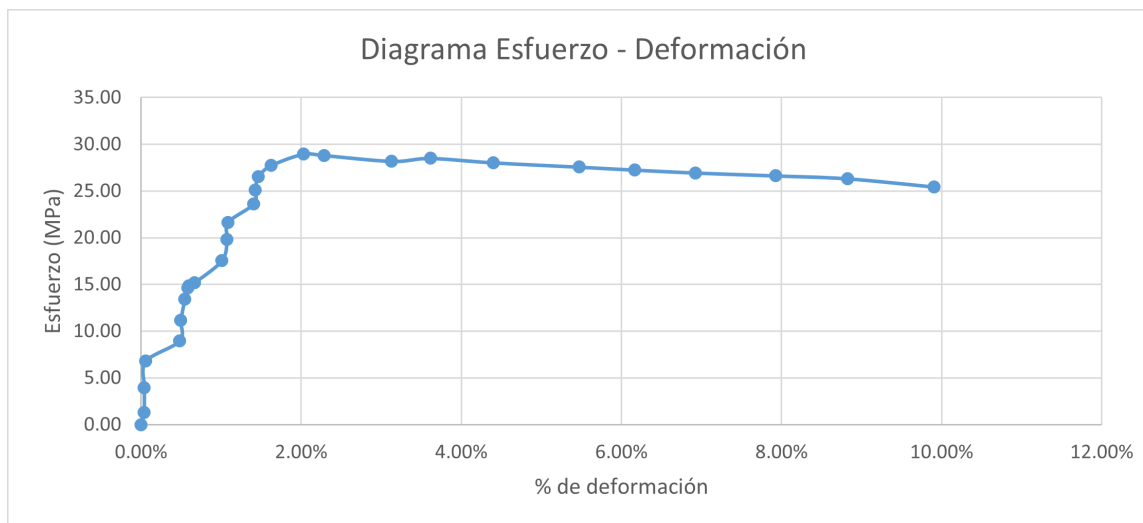


Figura 25: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50GP5



Cuadro 26: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
AT50GP	1	0.52 %	8.15 %
AT50GP	2	0.92 %	7.26 %
AT50GP	3	1.88 %	8.19 %
AT50GP	4	1.35 %	5.65 %
AT50GP	5	1.11 %	9.91 %
$\bar{X}$ AT50GP		1.16 %	7.83 %
$\sigma$ AT50GP		0.51 %	1.55 %

Cuadro 27: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
AT50GP	1	1.89	25.52	29.83	27.24
AT50GP	2	2.29	27.62	29.04	25.33
AT50GP	3	1.64	28.39	29.07	26.86
AT50GP	4	1.43	28.88	29.61	27.18
AT50GP	5	1.56	27.72	28.97	25.73
$\bar{X}$ AT50GP		1.76	27.63	29.30	26.47
$\sigma$ AT50GP		0.34	1.28	0.39	0.88

Cuadro 28: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
AT50GP	1	0.17	2.17
AT50GP	2	0.15	1.85
AT50GP	3	0.31	2.11
AT50GP	4	0.29	1.37
AT50GP	5	0.28	2.53
$\bar{X}$ AT50GP		0.24	2.01
$\sigma$ AT50GP		0.07	0.43

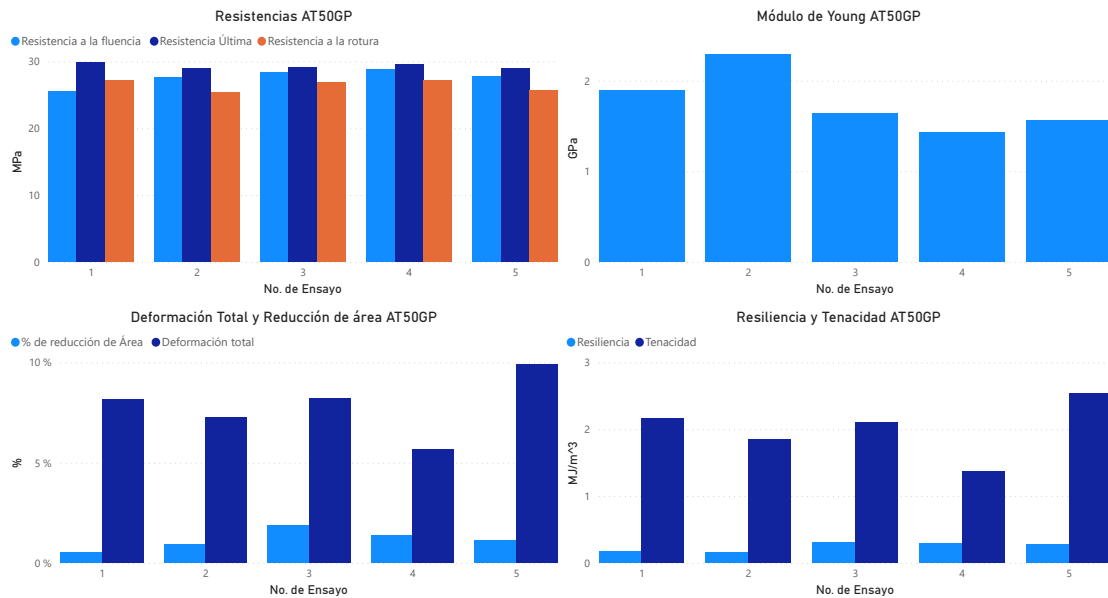


Figura 26: Gráficas de resultados AT50G

### 7.2.3. ABS 75% patrón GRID

En los cuadros a continuación el ensayo número cuatro no esta disponible debido a que la cámara dejo de grabar durante el ensayo y no se tiene el ensayo completo para poder ser analizado.

Figura 27: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP1

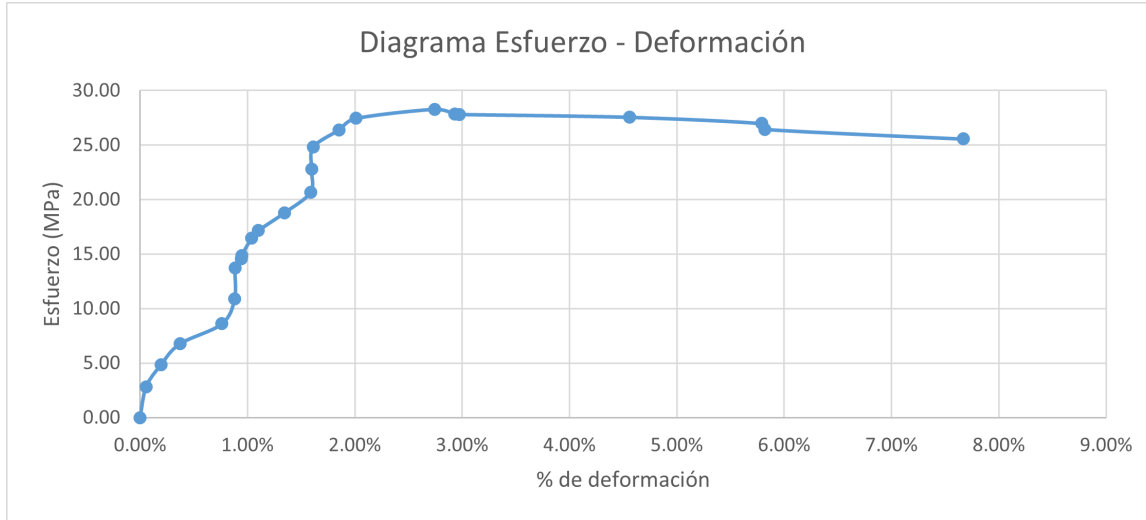


Figura 28: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP2

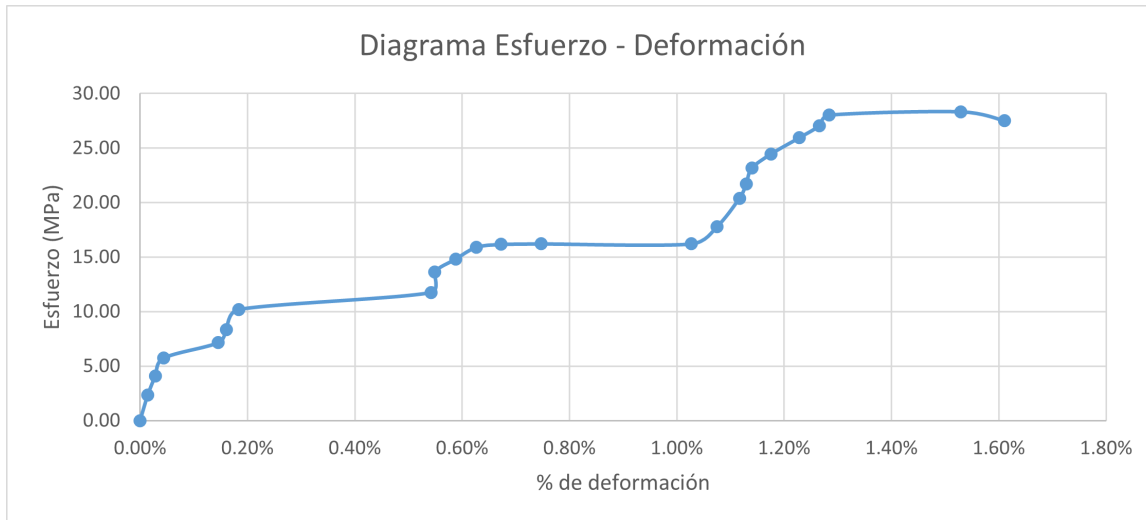


Figura 29: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP3

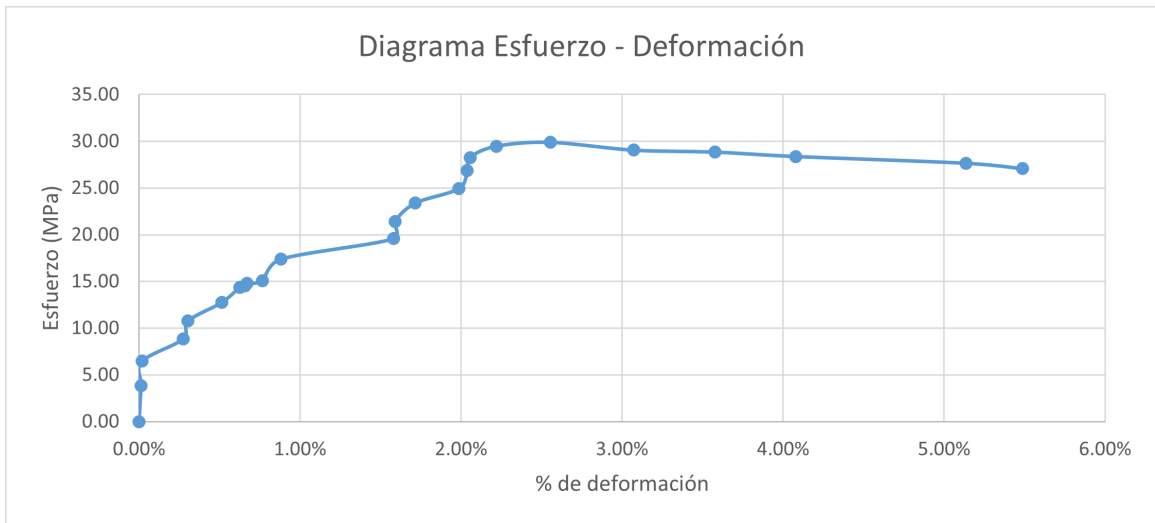
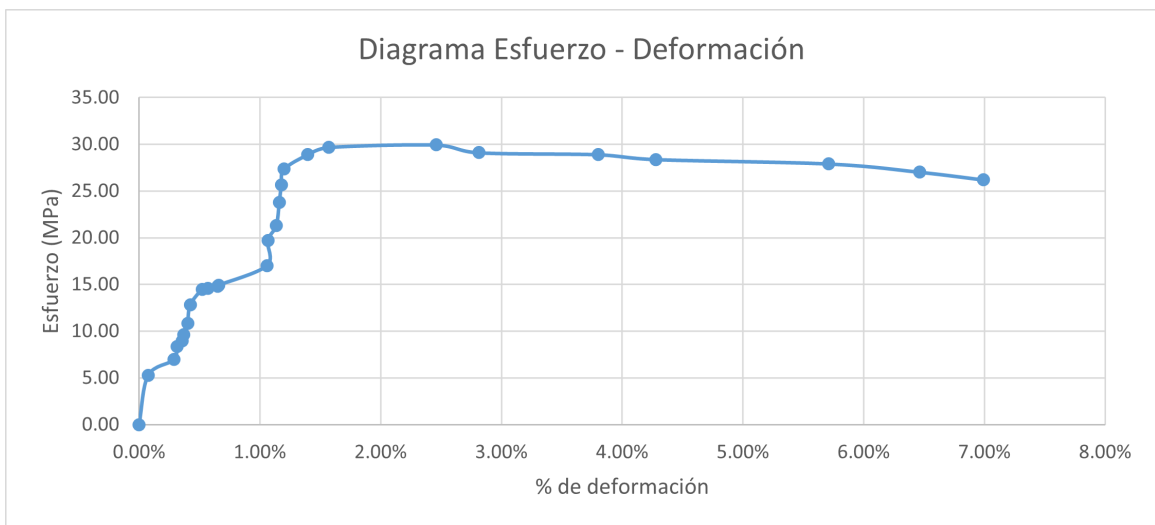


Figura 30: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75GP5



Cuadro 29: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
AT75GP	1	0.77 %	7.67 %
AT75GP	2	1.26 %	1.61 %
AT75GP	3	0.77 %	5.49 %
AT75GP	5	0.86 %	6.99 %
$\bar{X}$ AT75GP		0.91 %	5.44 %
$\sigma$ AT75GP		0.24 %	2.71 %

Cuadro 30: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
AT75GP	1	1.34	27.45	28.29	25.76
AT75GP	2	1.62	27.04	28.33	27.85
AT75GP	3	1.04	28.27	29.88	27.28
AT75GP	5	1.76	29.67	29.93	26.42
$\bar{X}$ AT75GP		1.44	28.11	29.11	26.83
$\sigma$ AT75GP		0.32	1.16	0.92	0.92

Cuadro 31: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
AT75GP	1	0.31	1.83
AT75GP	2	0.19	0.28
AT75GP	3	0.37	1.34
AT75GP	5	0.28	1.81
$\bar{X}$ AT75GP		0.29	1.32
$\sigma$ AT75GP		0.08	0.73

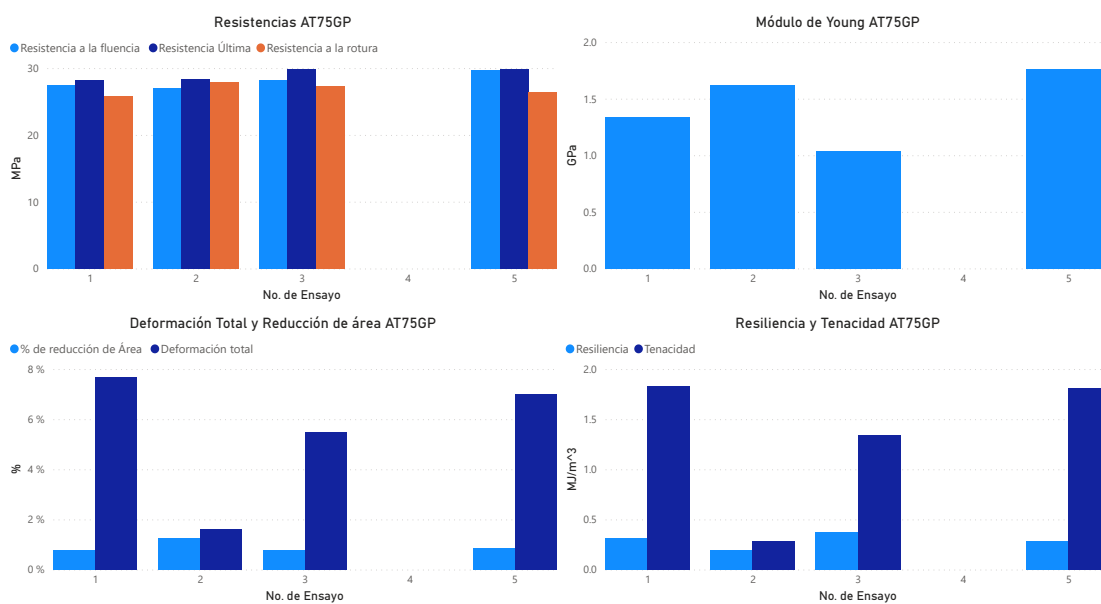


Figura 31: Gráficas de resultados AT75G

#### 7.2.4. ABS 50% patrón LINES

Figura 32: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP1

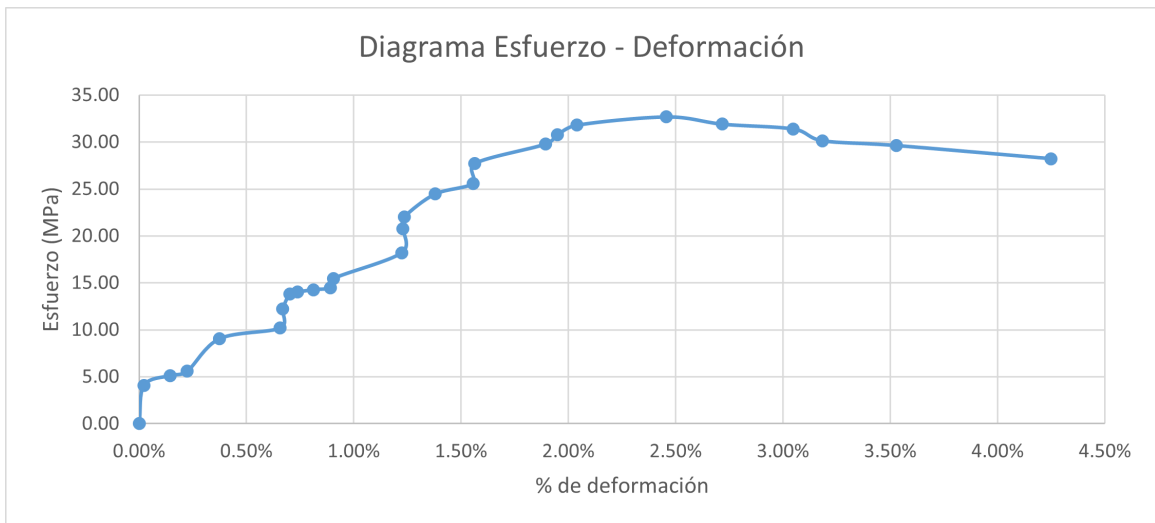


Figura 33: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP2

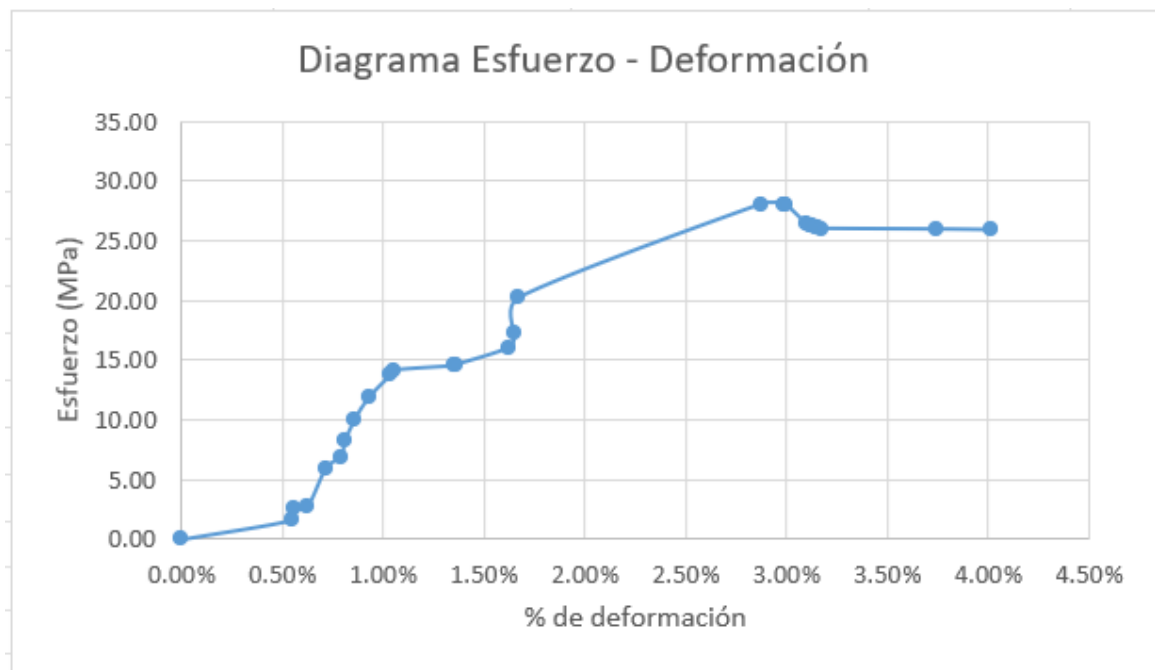


Figura 34: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP3

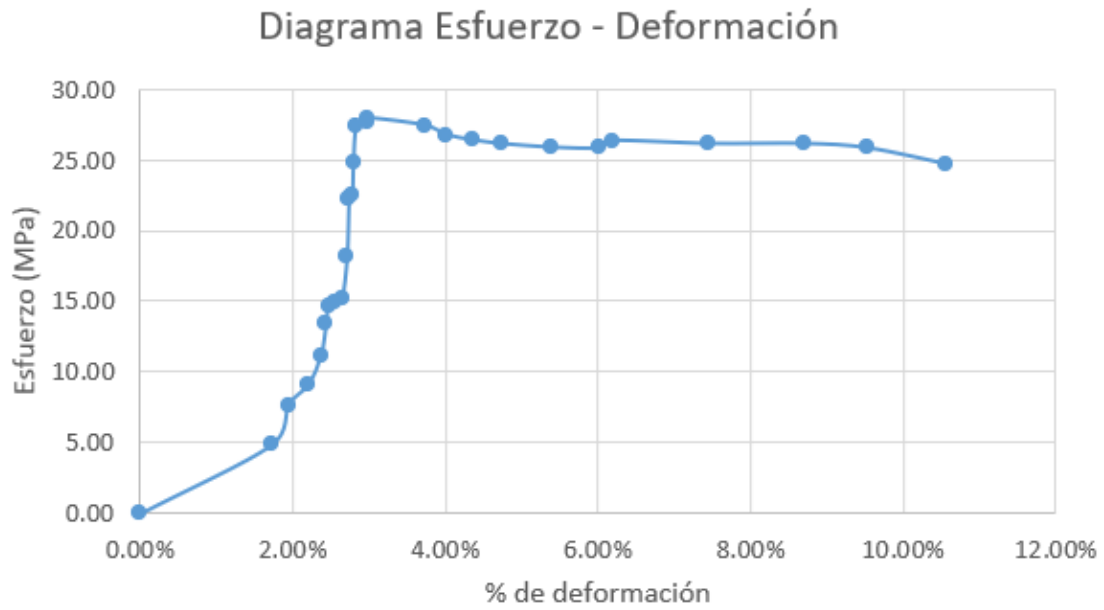


Figura 35: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP4

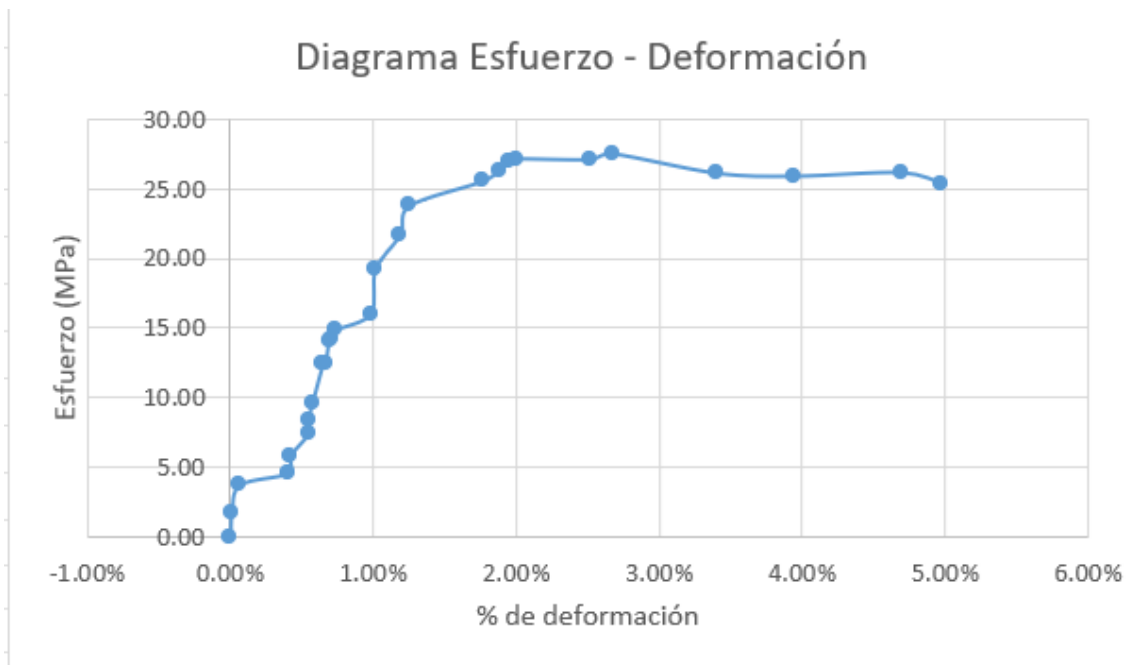
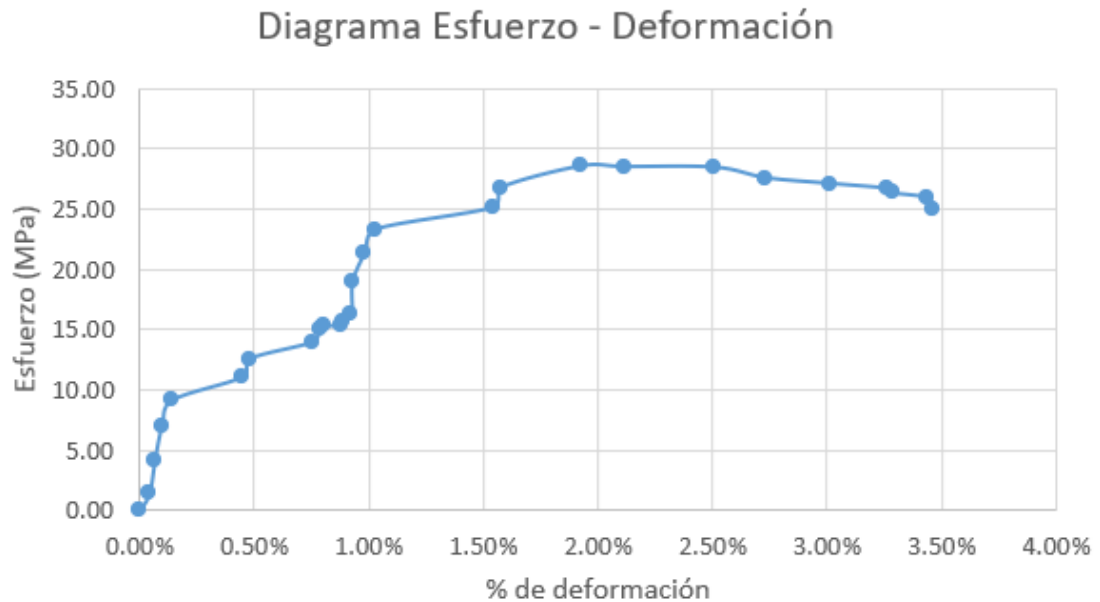




Figura 36: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50LP5



Cuadro 32: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
AT50LP	1	0.96 %	4.25 %
AT50LP	2	0.92 %	4.01 %
AT50LP	3	0.06 %	10.57 %
AT50LP	4	0.92 %	4.97 %
AT50LP	5	0.72 %	3.46 %
$\bar{X}$ AT50LP		0.71 %	5.45 %
$\sigma$ AT50LP		0.38 %	2.91 %

Cuadro 33: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
AT50LP	1	1.50	30.77	32.68	28.51
AT50LP	2	1.11	28.28	28.34	26.38
AT50LP	3	0.95	28.04	28.30	25.01
AT50LP	4	1.42	27.04	27.56	25.67
AT50LP	5	1.55	27.17	28.96	25.46
$\bar{X}$ AT50LP		1.31	28.26	29.17	26.21
$\sigma$ AT50LP		0.26	1.50	2.02	1.38

Cuadro 34: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de Ensayo	Resiliencia	Tenacidad
AT50LP	1	0.35	1.05
AT50LP	2	0.49	0.79
AT50LP	3	0.27	2.27
AT50LP	4	0.33	1.13
AT50LP	5	0.28	0.80
$\bar{X}$ AT50LP		0.34	1.21
$\sigma$ AT50LP		0.09	0.61

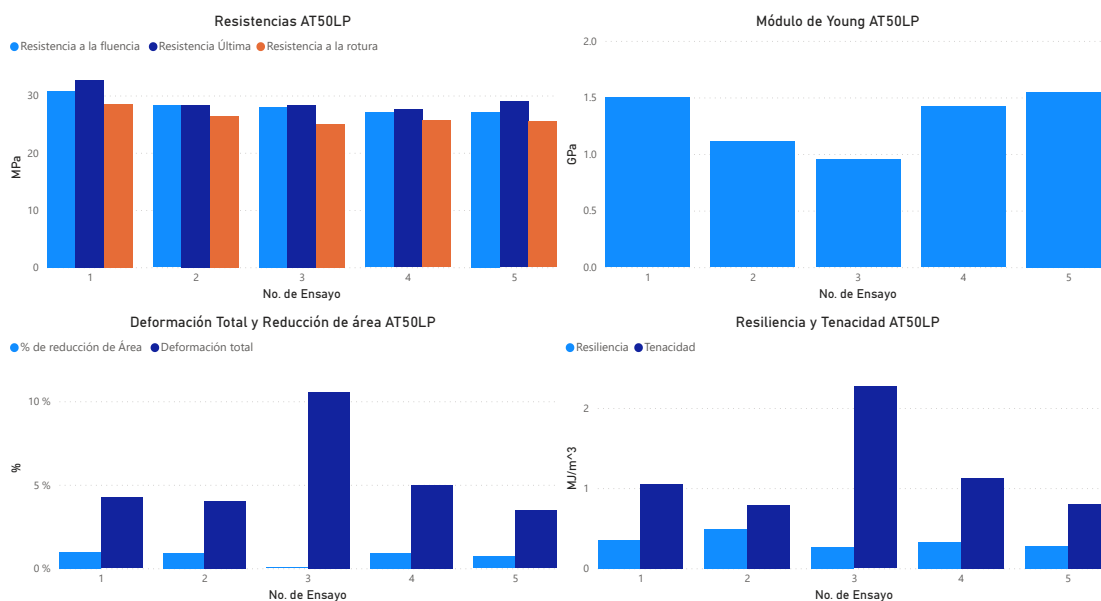


Figura 37: Gráficas de resultados AT50L

### 7.2.5. ABS 75 % patrón LINES

En los cuadros a continuación solo se tienen los ensayos del dos al cinco debido a que en el ensayo uno se apagó el medidor de fuerza sin previo aviso por lo que el ensayo está incompleto y no se puede unir con edición ya que no se tuvo el ensayo como los demás y esto ocasionaría ruido en los resultados.

Figura 38: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP2

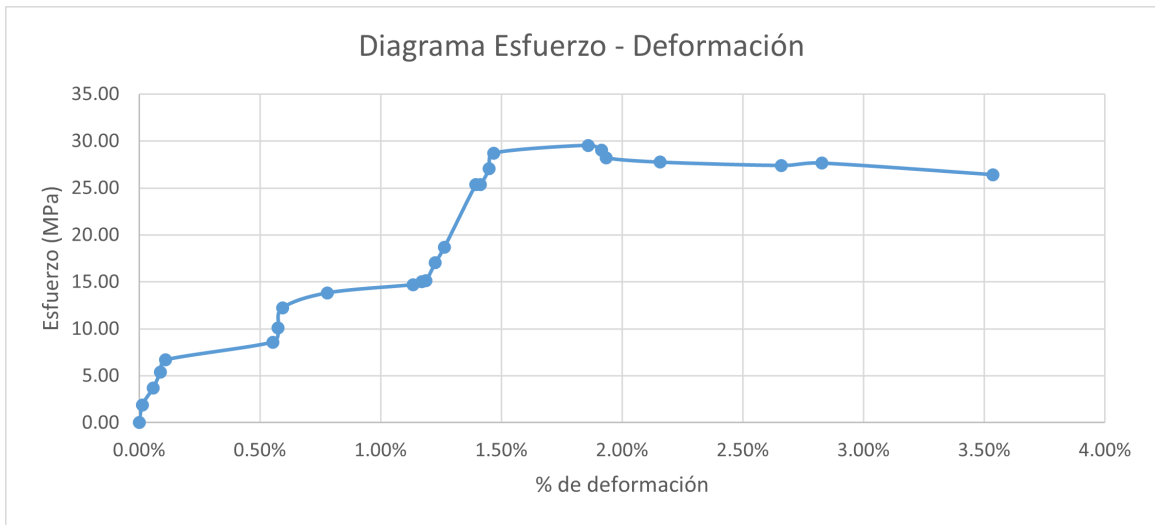


Figura 39: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP3

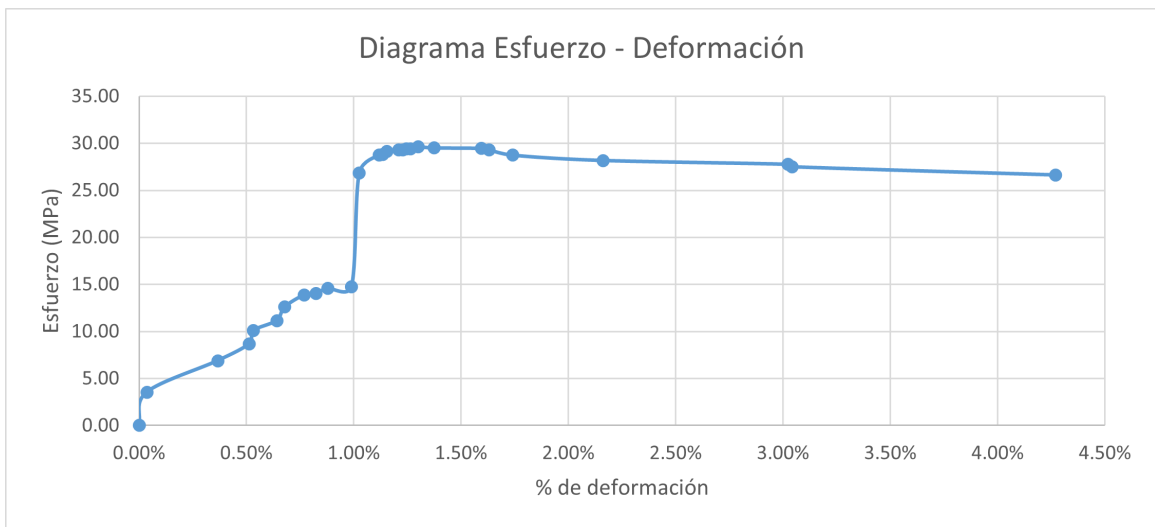


Figura 40: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP4

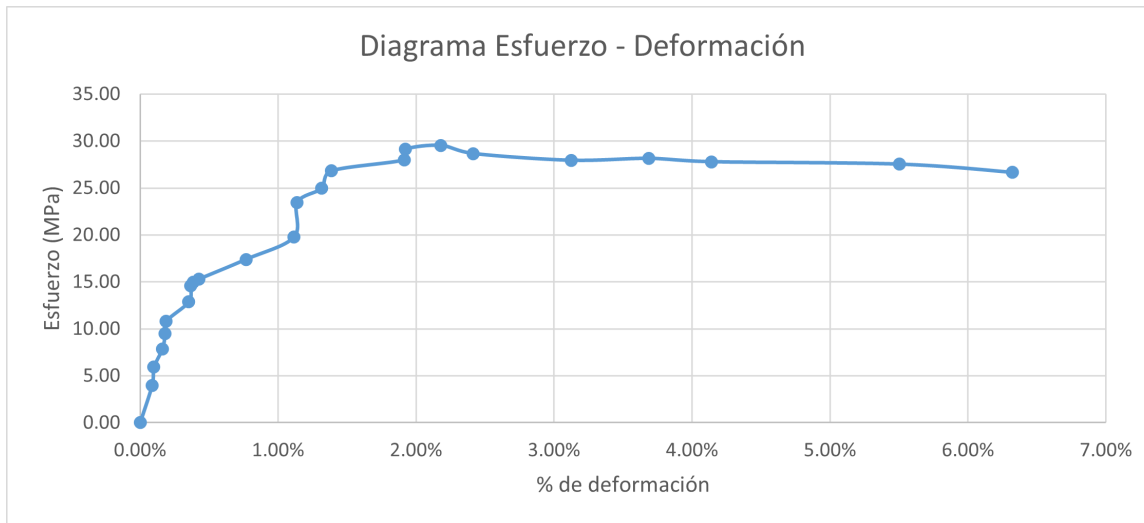
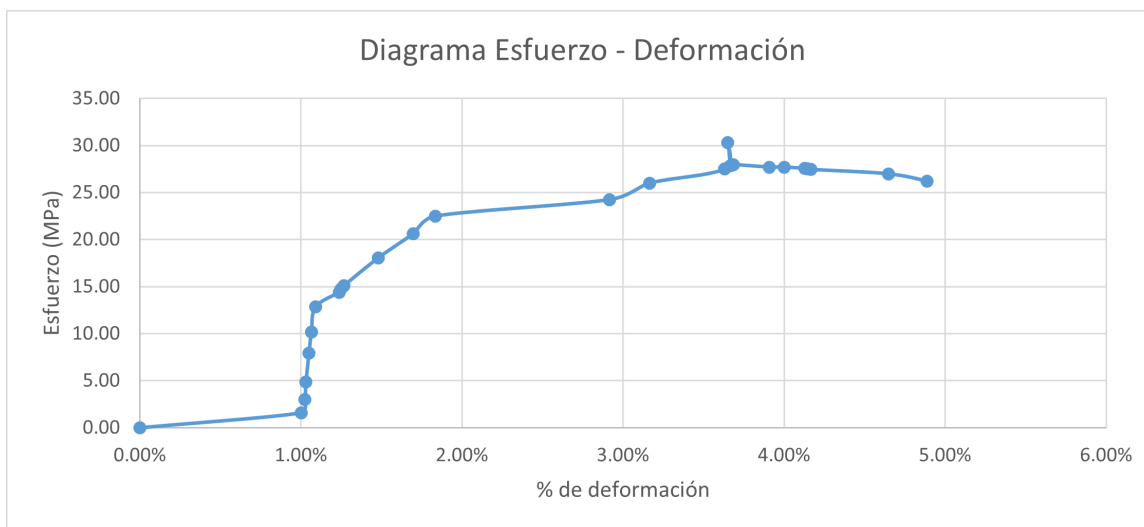


Figura 41: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75LP5



Cuadro 35: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
AT75LP	2	1.25 %	3.53 %
AT75LP	3	1.36 %	4.27 %
AT75LP	4	1.00 %	6.32 %
AT75LP	5	1.01 %	4.89 %
$\bar{X}$ AT75LP		1.16 %	4.75 %
$\sigma$ AT75LP		0.18 %	1.18 %

Cuadro 36: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
AT75LP	2	1.47	28.72	29.55	26.75
AT75LP	3	1.81	26.83	29.61	26.99
AT75LP	4	1.35	28.00	29.54	26.93
AT75LP	5	1.42	22.49	30.28	26.47
$\bar{X}$ AT75LP		1.51	26.51	29.75	26.79
$\sigma$ AT75LP		0.20	2.79	0.36	0.23

Cuadro 37: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
AT75LP	2	0.20	0.77
AT75LP	3	0.11	1.01
AT75LP	4	0.39	1.61
AT75LP	5	0.16	0.96
$\bar{X}$ AT75LP		0.22	1.09
$\sigma$ AT75LP		0.12	0.36

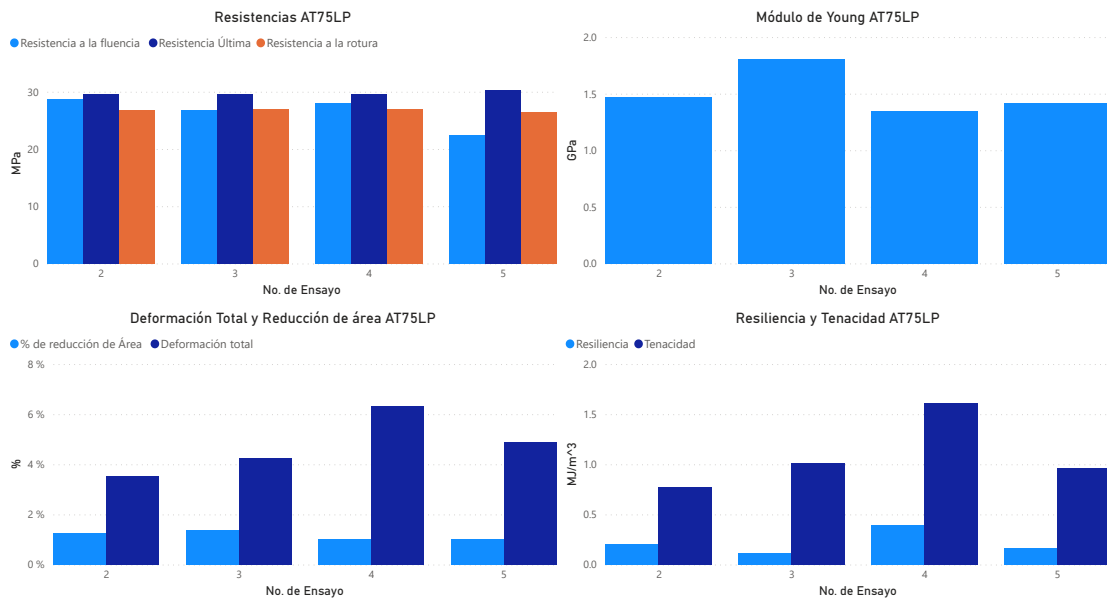


Figura 42: Gráficas de resultados AT75L

### 7.2.6. ABS 50% patrón ZIGZAG

Figura 43: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP1

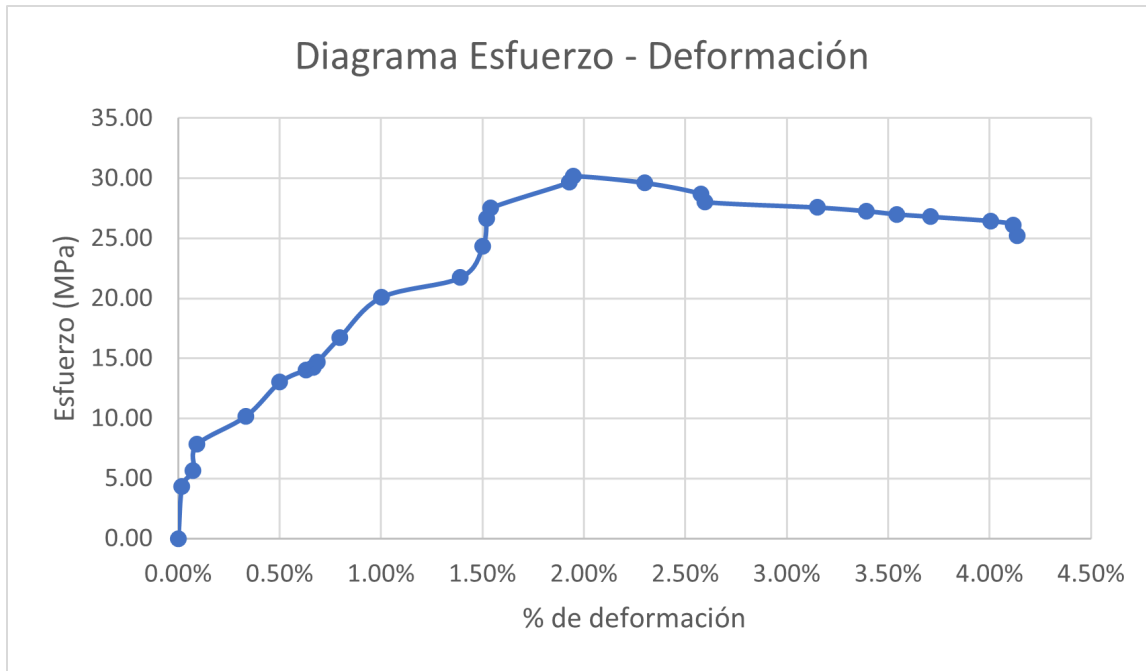


Figura 44: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP2

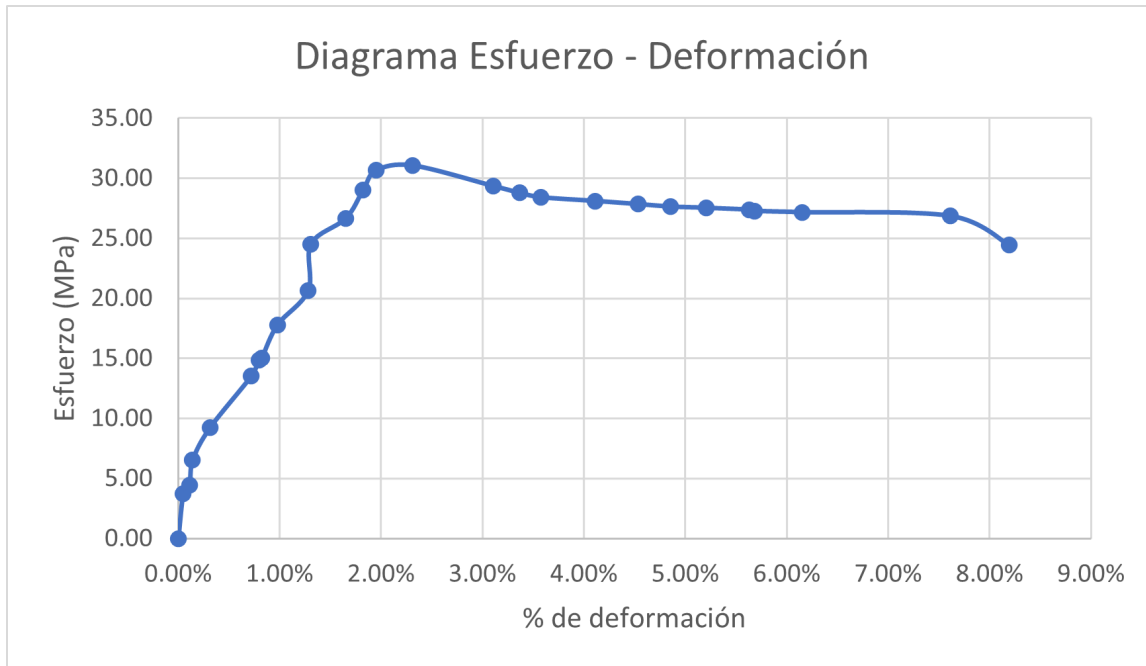


Figura 45: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP3

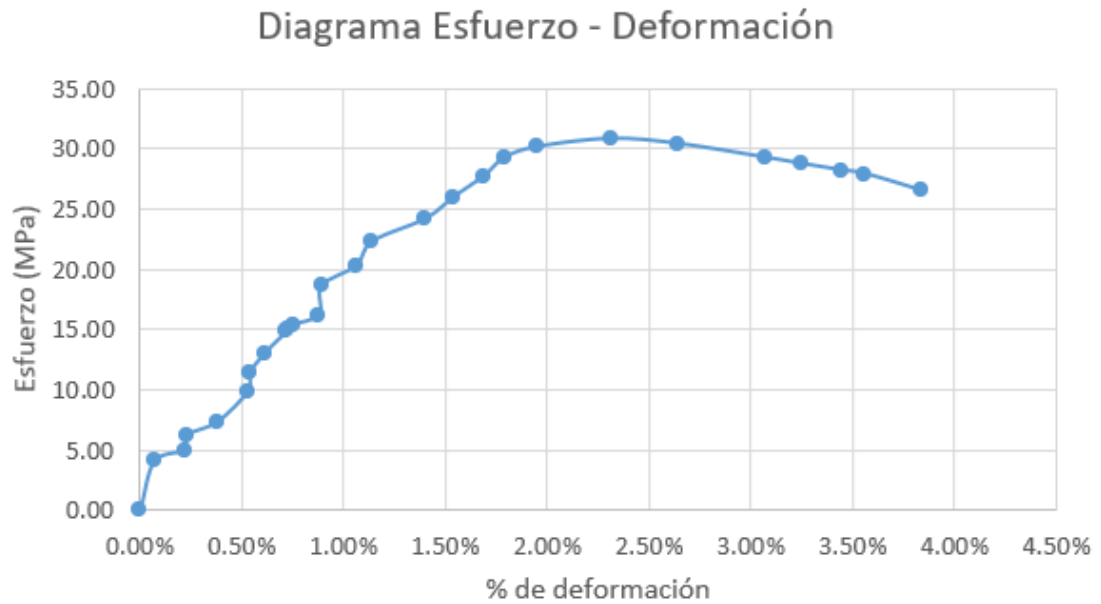


Figura 46: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP4

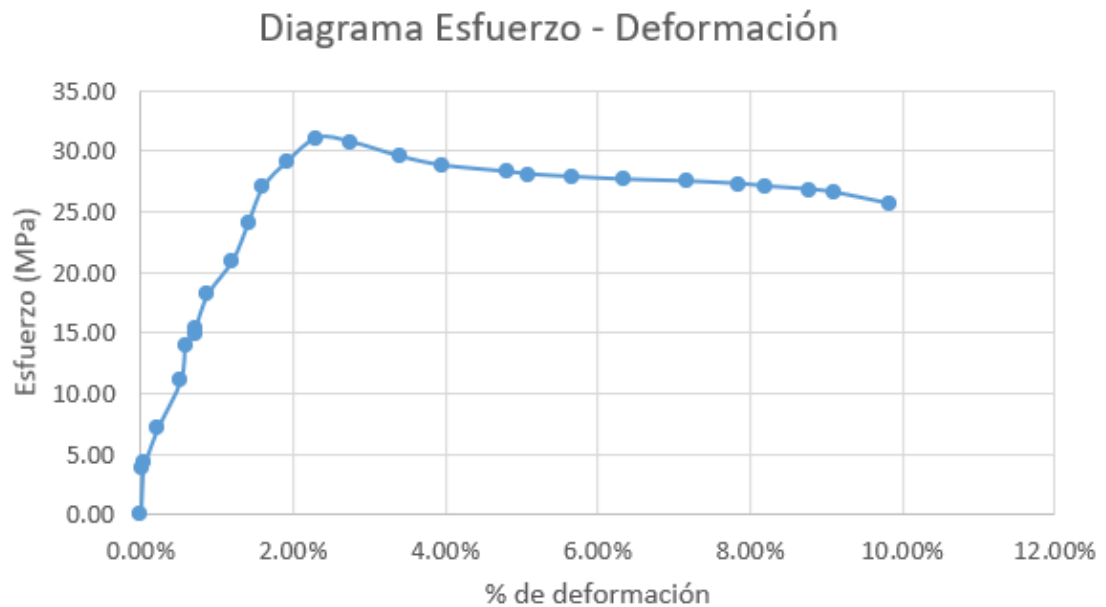
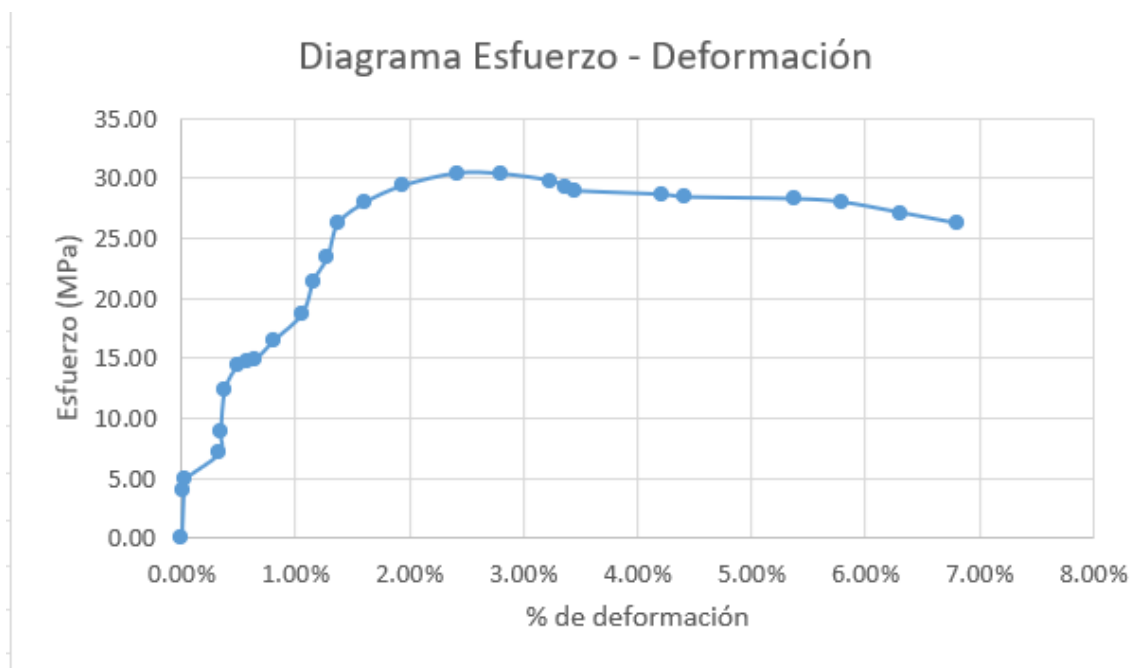


Figura 47: Gráfica esfuerzo vs deformación AT50ZP5



Cuadro 38: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
AT50ZP	1	0.40 %	4.13 %
AT50ZP	2	0.92 %	8.19 %
AT50ZP	3	0.26 %	3.84 %
AT50ZP	4	0.41 %	9.83 %
AT50ZP	5	1.08 %	6.80 %
$\bar{X}$ AT50ZP		0.61 %	6.56 %
$\sigma$ AT50ZP		0.36 %	2.58 %

Cuadro 39: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
AT50ZP	1	1.43	27.59	30.27	25.38
AT50ZP	2	1.45	30.62	31.03	24.63
AT50ZP	3	1.56	29.07	30.61	26.40
AT50ZP	4	1.45	29.23	31.16	25.80
AT50ZP	5	1.45	29.34	30.37	26.51
$\bar{X}$ AT50ZP		1.47	29.17	30.69	25.74
$\sigma$ AT50ZP		0.05	1.08	0.39	0.77



Cuadro 40: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
AT50ZP	1	0.26	0.99
AT50ZP	2	0.37	2.09
AT50ZP	3	0.31	0.91
AT50ZP	4	0.37	2.59
AT50ZP	5	0.38	1.76
$\bar{X}$ AT50ZP		0.34	1.67
$\sigma$ AT50ZP		0.05	0.72

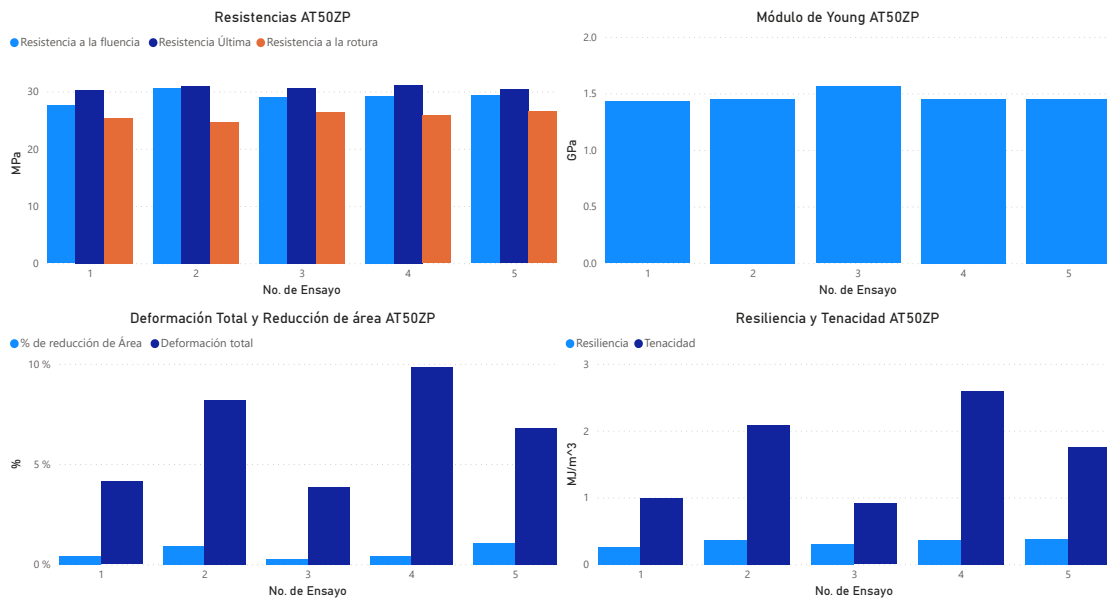


Figura 48: Gráficas de resultados AT50Z

### 7.2.7. ABS 75% ZIGZAG

Figura 49: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP1

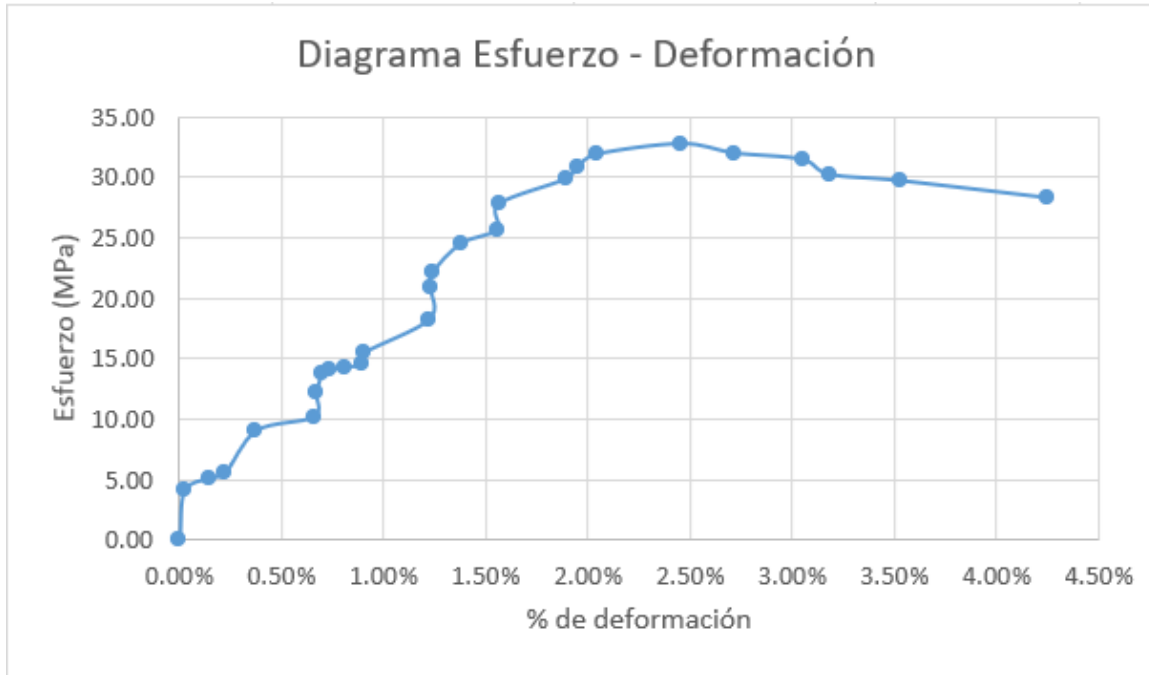


Figura 50: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP2

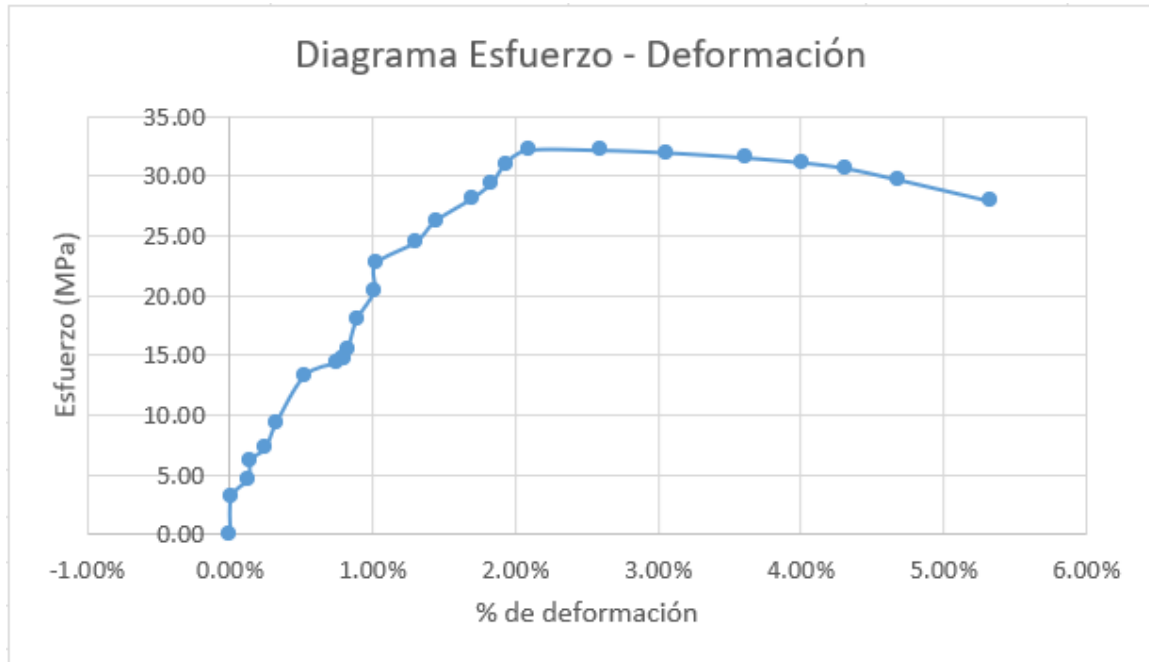


Figura 51: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP3

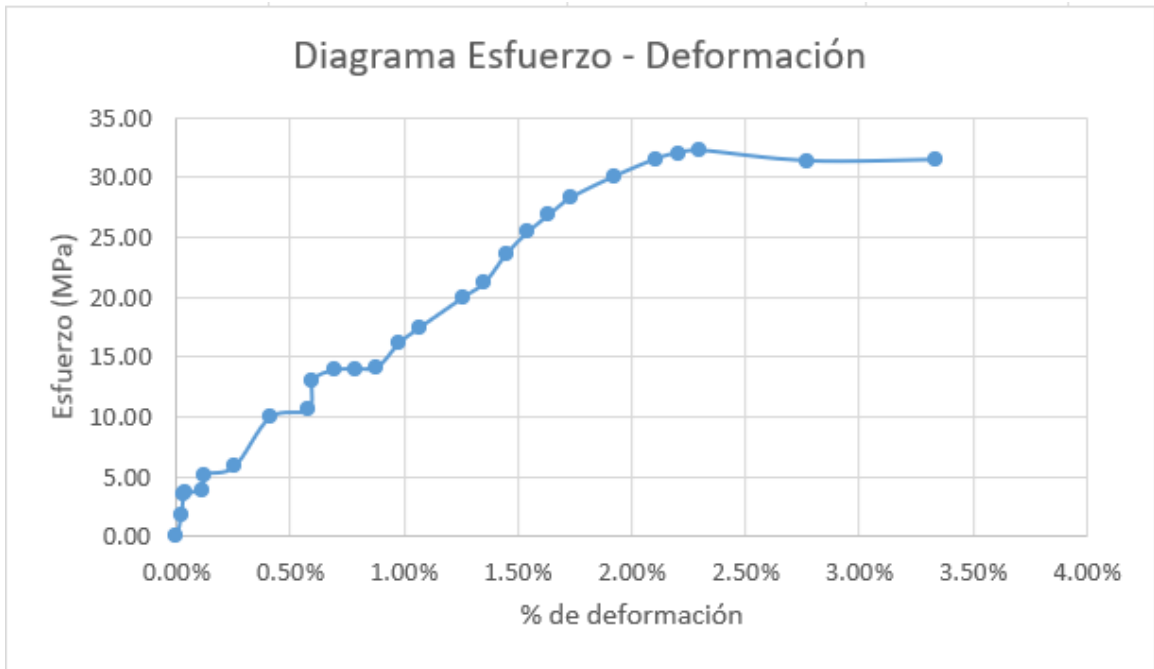


Figura 52: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP4

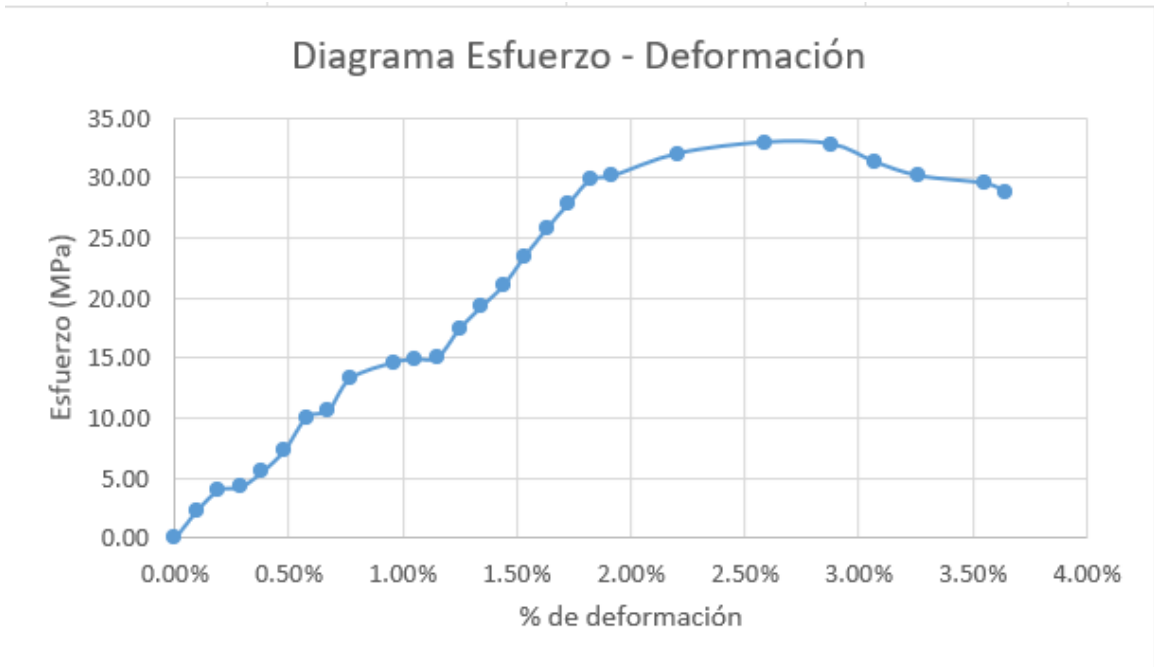
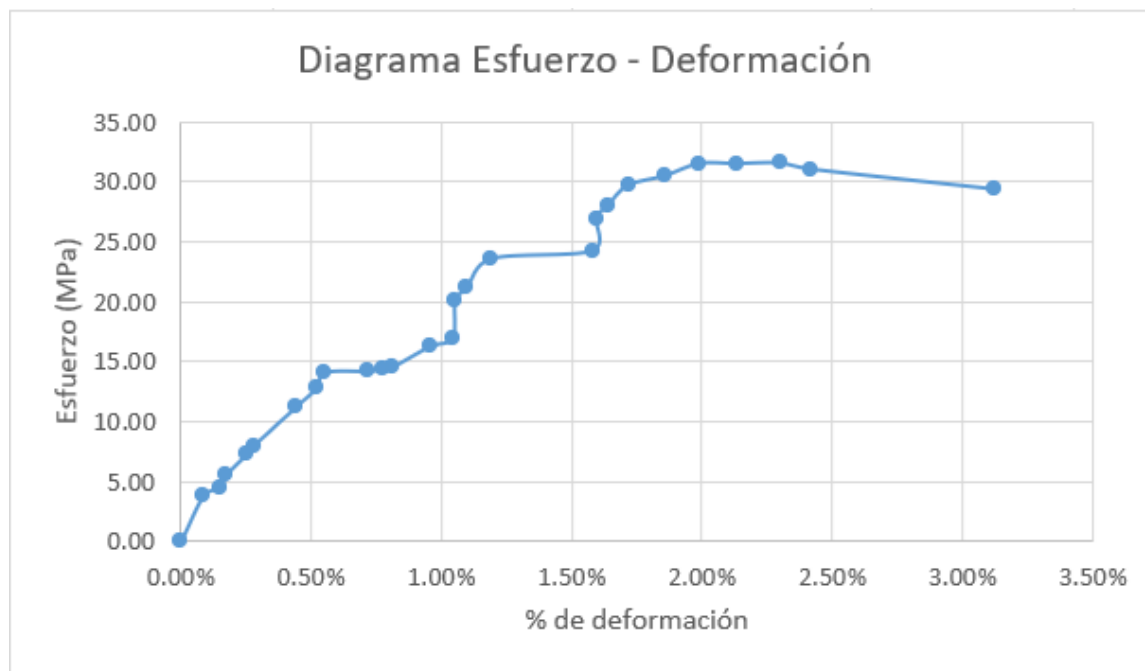


Figura 53: Gráfica esfuerzo vs deformación AT75ZP5



Cuadro 41: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
AT75ZP	1	1.59 %	4.25 %
AT75ZP	2	2.73 %	5.33 %
AT75ZP	3	2.36 %	3.34 %
AT75ZP	4	2.40 %	3.65 %
AT75ZP	5	0.45 %	3.12 %
$\bar{X}$ AT75ZP		1.90 %	3.94 %
$\sigma$ AT75ZP		0.91 %	0.89 %

Cuadro 42: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
AT75ZP	1	1.47	31.59	32.46	28.50
AT75ZP	2	1.49	30.62	31.74	28.32
AT75ZP	3	1.42	31.24	31.91	31.89
AT75ZP	4	1.50	29.59	32.68	29.26
AT75ZP	5	1.51	29.44	31.29	29.27
$\bar{X}$ AT75ZP		1.48	30.50	32.02	29.45
$\sigma$ AT75ZP		0.04	0.96	0.56	1.43

Cuadro 43: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
AT75ZP	1	0.37	1.04
AT75ZP	2	0.37	1.40
AT75ZP	3	0.39	0.77
AT75ZP	4	0.27	0.84
AT75ZP	5	0.29	0.71
$\bar{X}$ AT75ZP		0.34	0.95
$\sigma$ AT75ZP		0.05	0.28

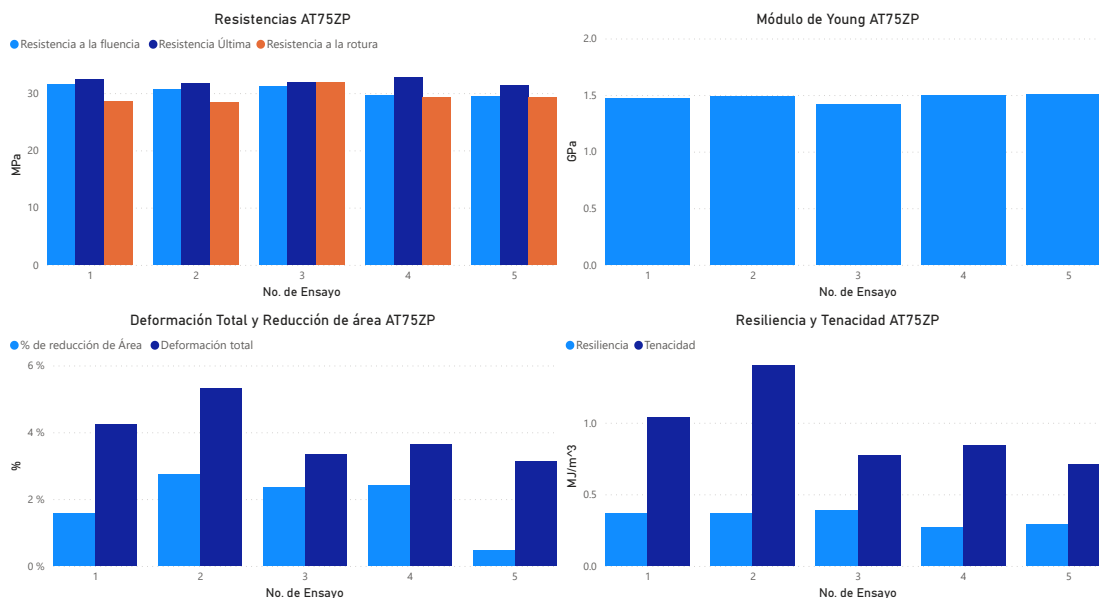


Figura 54: Gráficas de resultados AT75Z

## 7.3. Resultados de PETG

El PETG, poliéster de glicol, es un termoplástico popular en la fabricación aditiva ya que combina la facilidad de impresión del PLA como la resistencia del ABS. El PET ha sido muy utilizado en los años 90, para hacer envases, botellas de alimentos, es uno de los plásticos más utilizados en el mundo llegando a un 18% de la producción total. Pero el PET tiende a sobre calentarse es por eso que ahora se utiliza el PETG (Contreras, 2019b)

### 7.3.1. PETG 100%

Los cuadros a continuación muestran solo ensayos del dos al cinco debido a que el primer ensayo fue imposible de analizar por problemas de desenfoque ya mencionados en la sección de protocolo de procesamiento de vídeos en Tracker.

Figura 55: Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P2

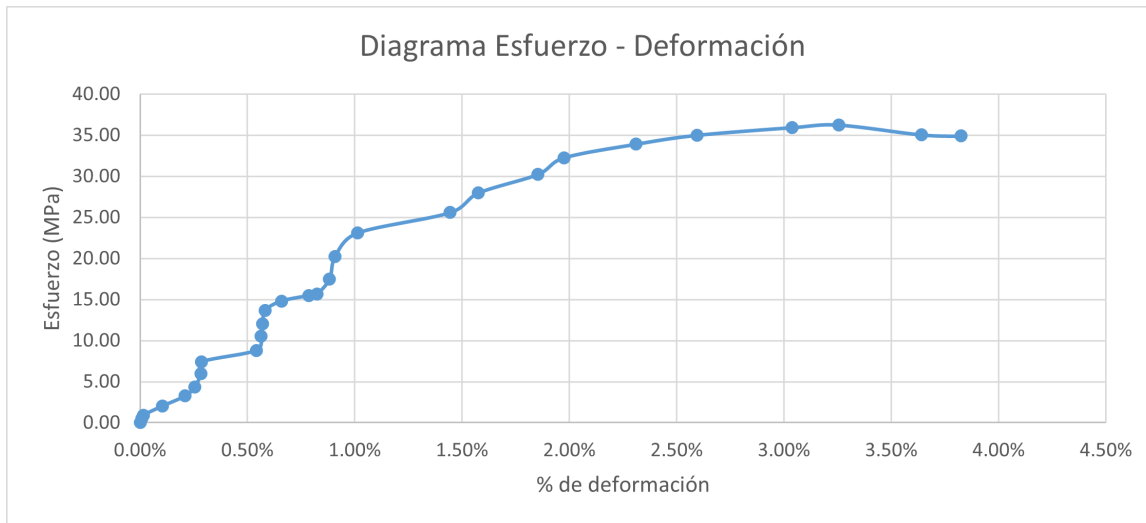


Figura 56: Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P3

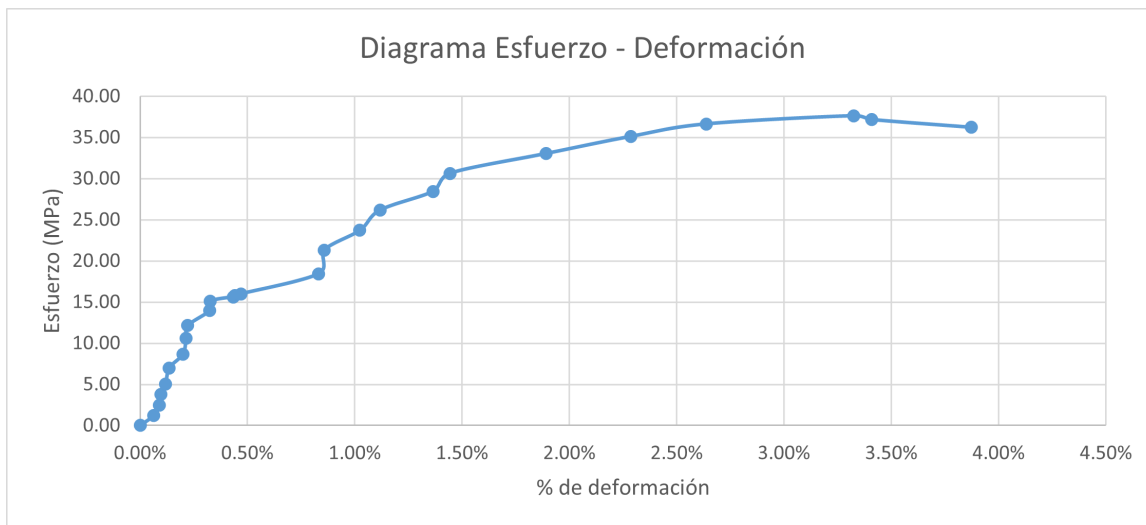


Figura 57: Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P4

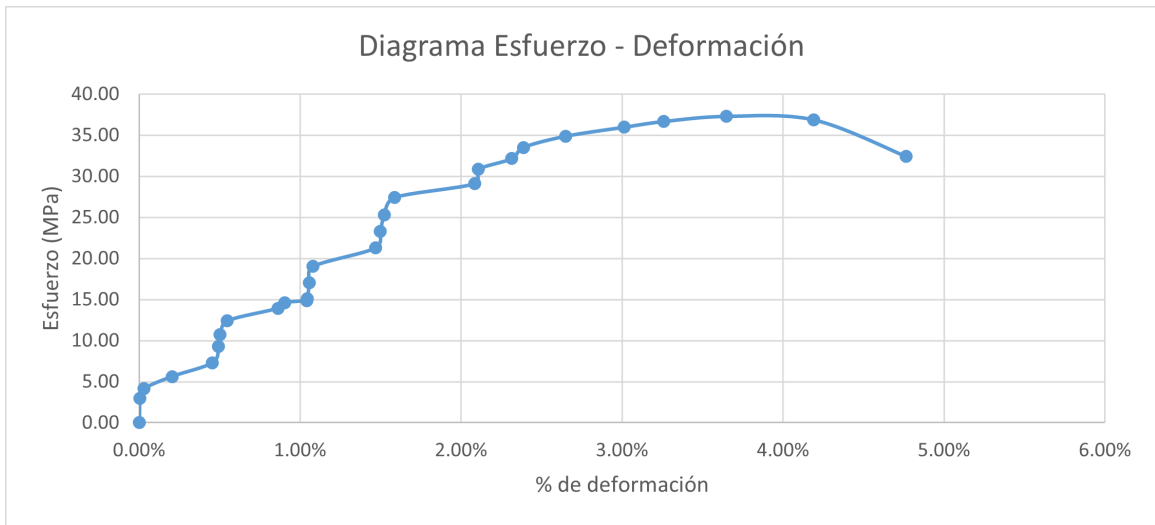
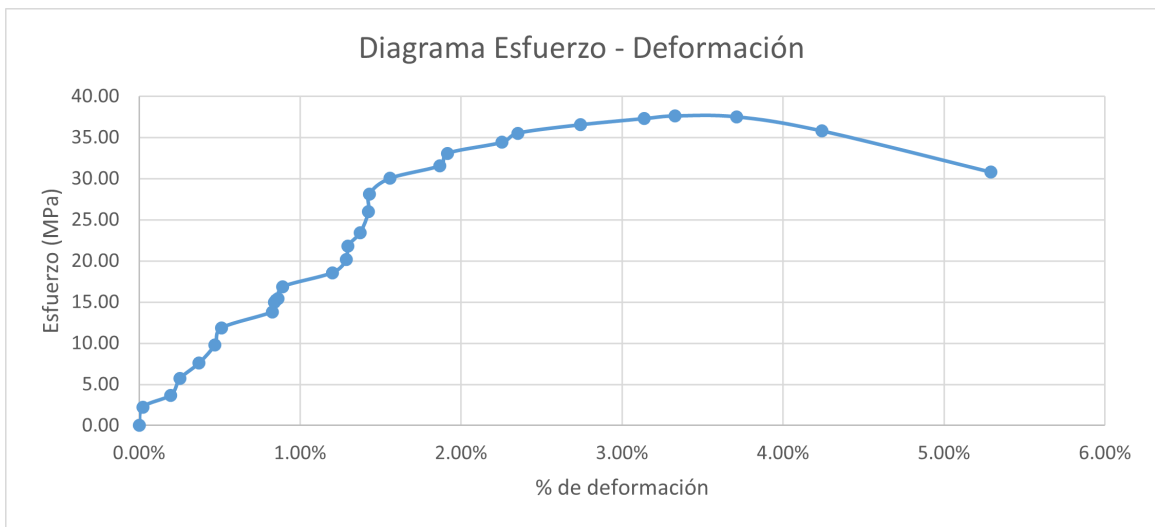


Figura 58: Gráfica esfuerzo vs deformación PT100P5



Cuadro 44: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
PT100P	2	1.35 %	3.83 %
PT100P	3	0.89 %	3.87 %
PT100P	4	1.15 %	4.76 %
PT100P	5	0.65 %	5.29 %
$\bar{X}$ PT100P		1.01 %	4.44 %
$\sigma$ PT100P		0.31 %	0.71 %

Cuadro 45: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
PT100P	2	1.69	32.26	36.25	35.38
PT100P	3	1.92	30.64	37.63	36.54
PT100P	4	1.36	30.84	37.30	32.79
PT100P	5	1.67	33.07	37.60	30.98
$\bar{X}$ PT100P		1.66	31.70	37.20	33.92
$\sigma$ PT100P		0.23	1.16	0.65	2.51

Cuadro 46: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
PT100P	2	0.38	1.03
PT100P	3	0.28	1.15
PT100P	4	0.38	1.32
PT100P	5	0.35	1.52
$\bar{X}$ PT100P		0.35	1.26
$\sigma$ PT100P		0.05	0.21

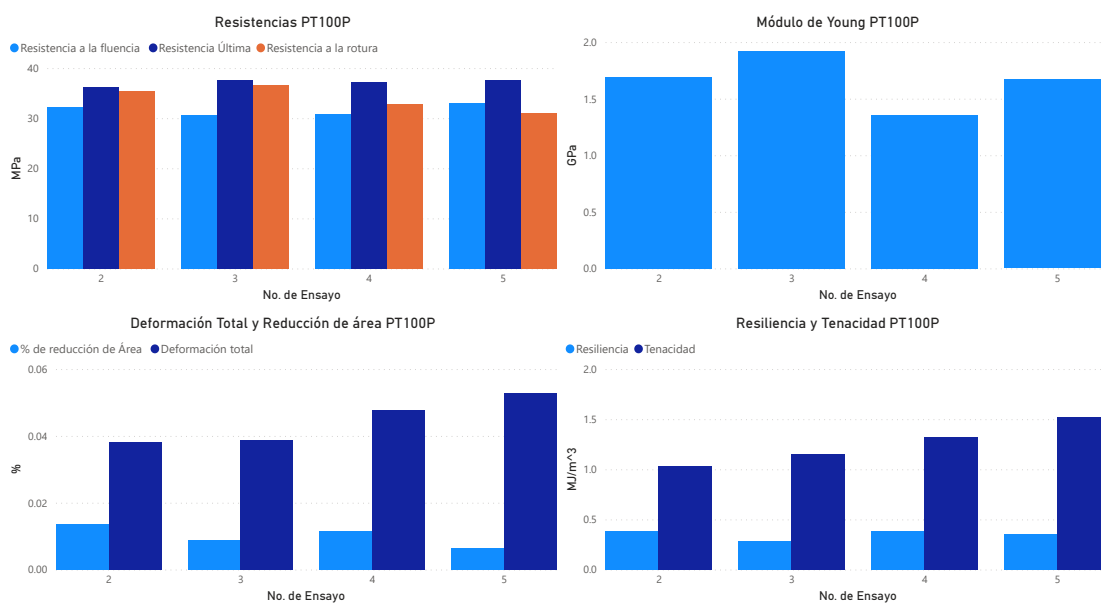


Figura 59: Gráficas de resultados PT100



### 7.3.2. PETG 50% patrón GRID

Figura 60: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP1

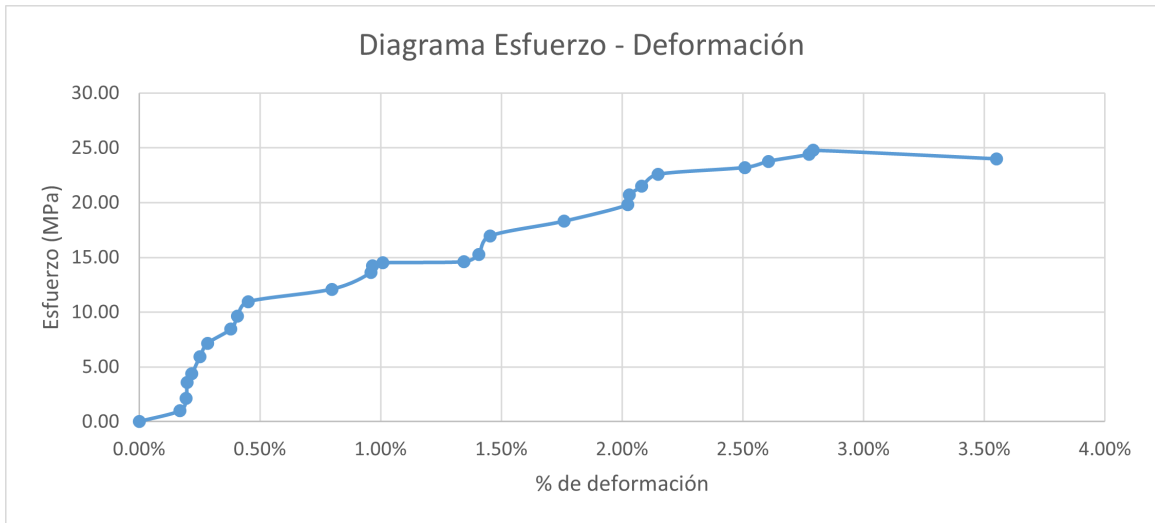


Figura 61: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP2

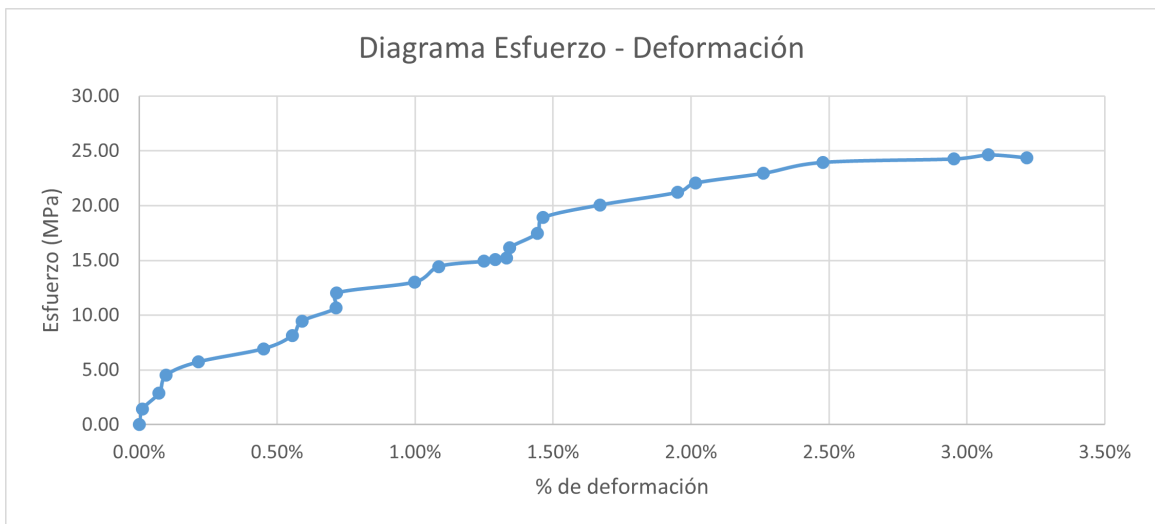


Figura 62: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP3

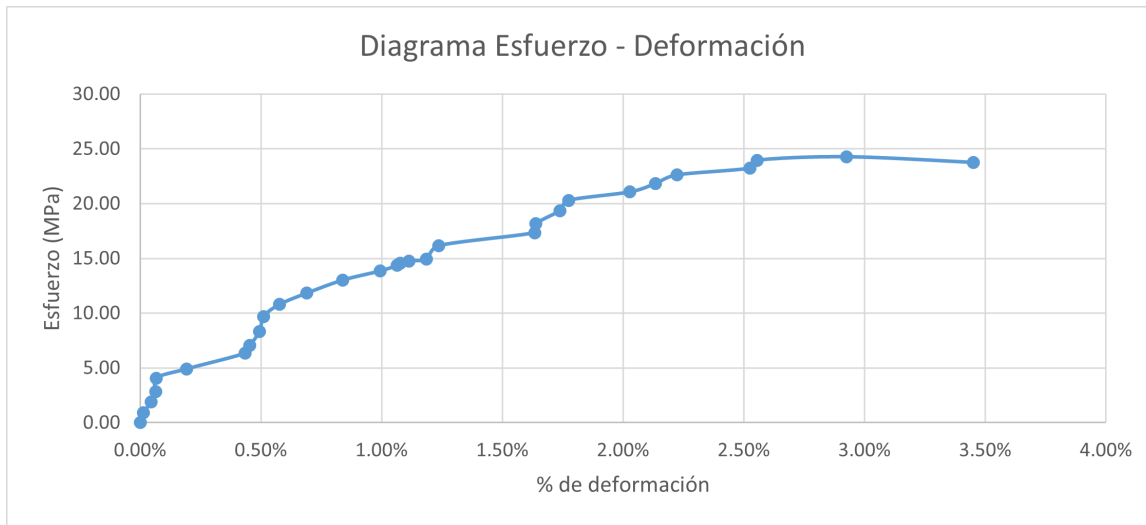


Figura 63: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP4

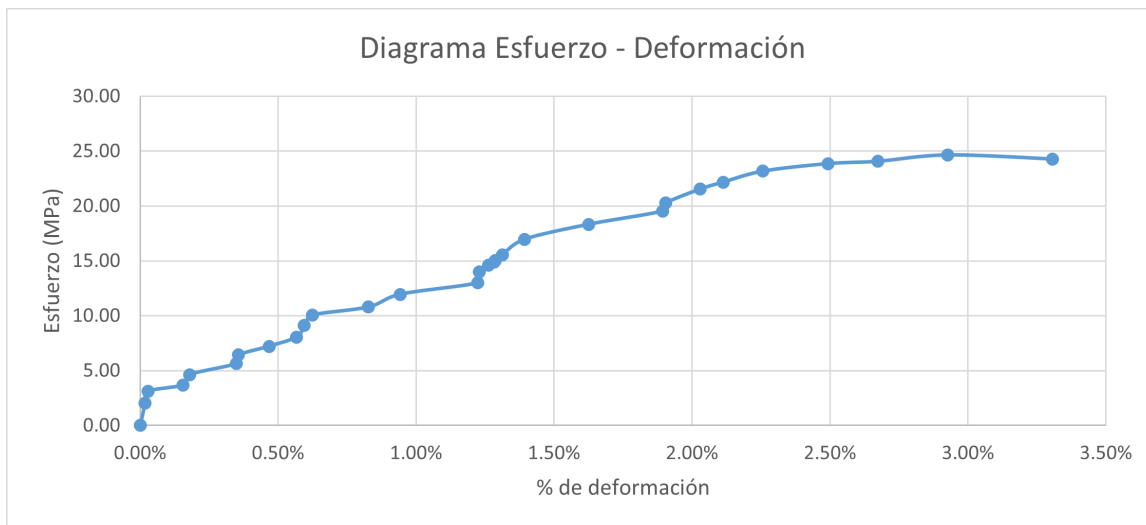
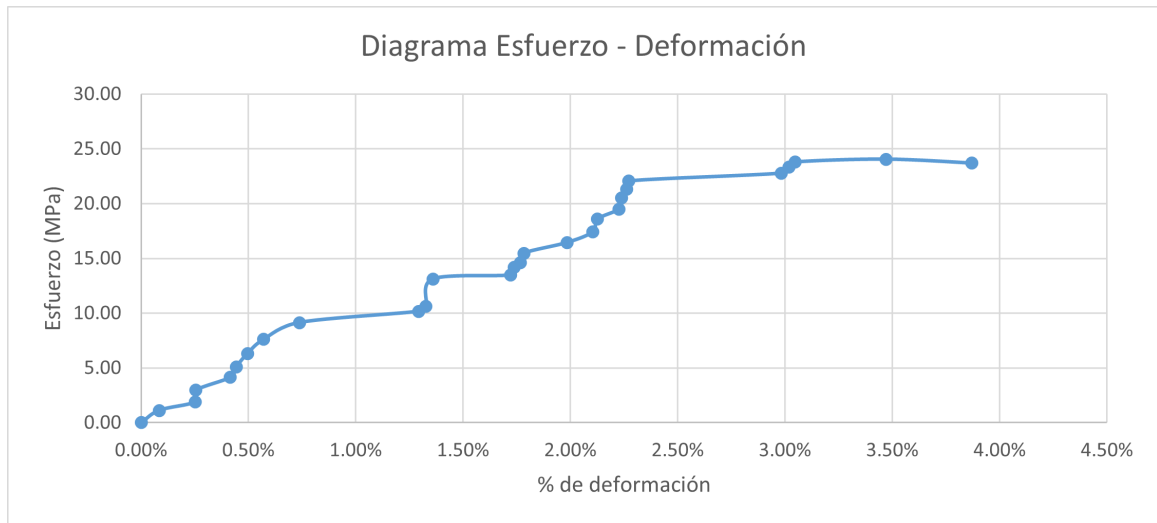


Figura 64: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50GP5



Cuadro 47: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
PT50GP	1	0.42 %	3.55 %
PT50GP	2	0.85 %	3.22 %
PT50GP	3	1.23 %	3.45 %
PT50GP	4	0.28 %	3.31 %
PT50GP	5	1.41 %	3.87 %
$\bar{X}$ PT50GP		0.84 %	3.48 %
$\sigma$ PT50GP		0.49 %	0.25 %

Cuadro 48: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
PT50GP	1	0.90	22.58	24.77	24.09
PT50GP	2	0.94	23.95	24.63	24.58
PT50GP	3	0.99	21.07	24.27	24.05
PT50GP	4	0.96	20.28	24.65	24.35
PT50GP	5	0.84	22.06	24.05	24.03
$\bar{X}$ PT50GP		0.93	21.99	24.47	24.22
$\sigma$ PT50GP		0.06	1.41	0.30	0.24

Cuadro 49: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
PT50GP	1	0.30	0.63
PT50GP	2	0.38	0.56
PT50GP	3	0.28	0.61
PT50GP	4	0.23	0.57
PT50GP	5	0.25	0.62
$\bar{X}$ PT50GP		0.29	0.60
$\sigma$ PT50GP		0.06	0.03

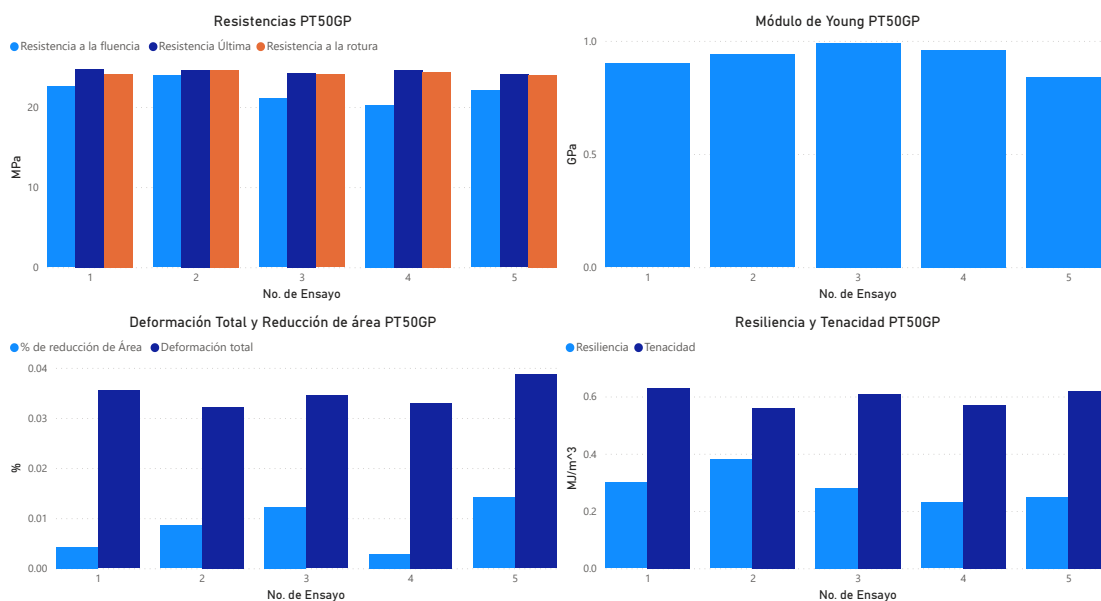


Figura 65: Gráficas de resultados PT50G

### 7.3.3. PETG 75% patrón GRID

Los cuadros a continuación no muestran el ensayo número dos debido a un error humano de grabación. Al querer verificar que todo estaba correcto con la probeta se dejó de grabar el medidor de fuerza por casi 30 segundos por lo que no se puede enlazar el ensayo con la fuerza.

Figura 66: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP1

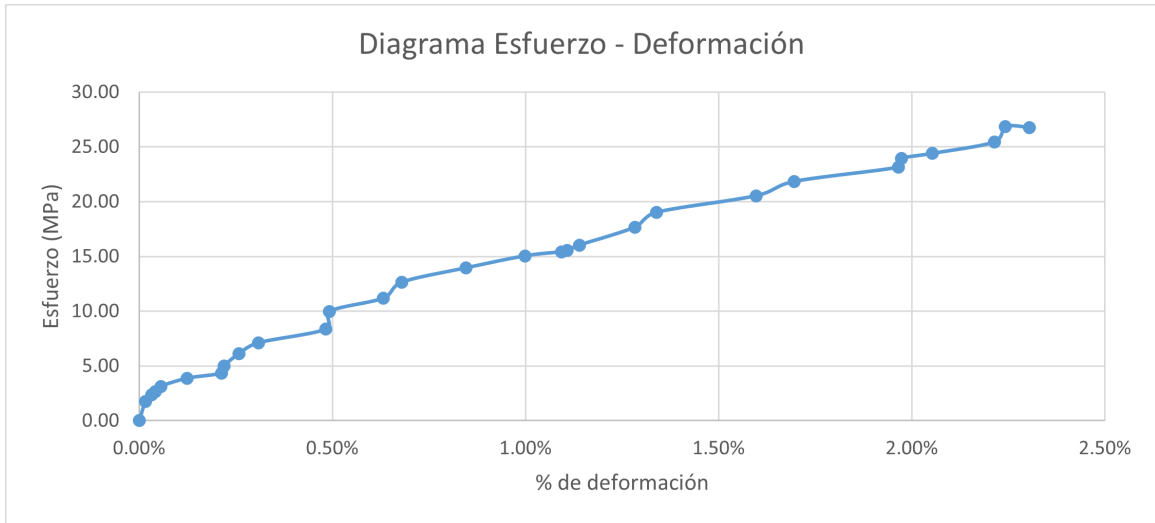


Figura 67: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP3

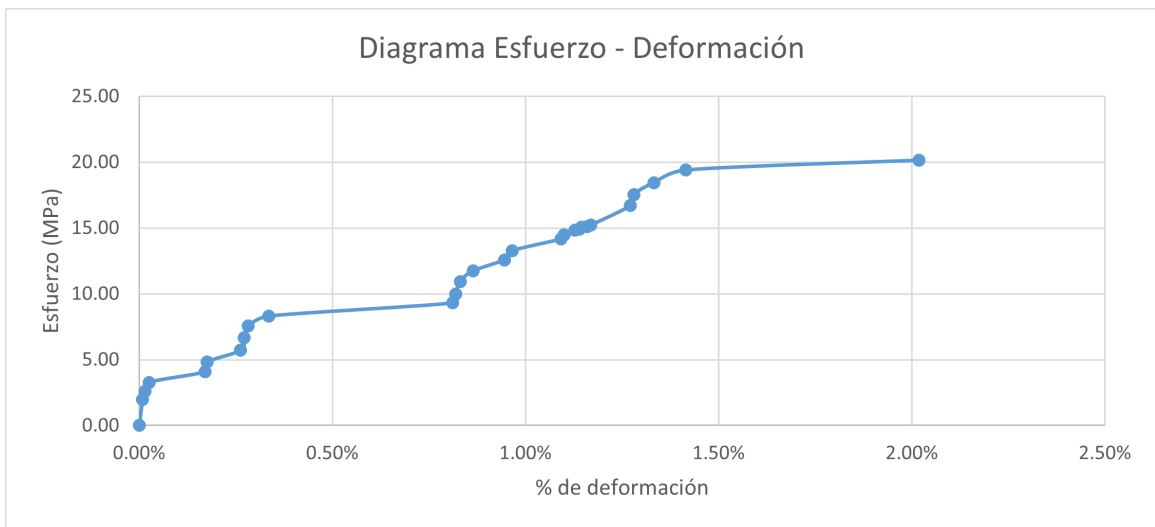


Figura 68: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP4

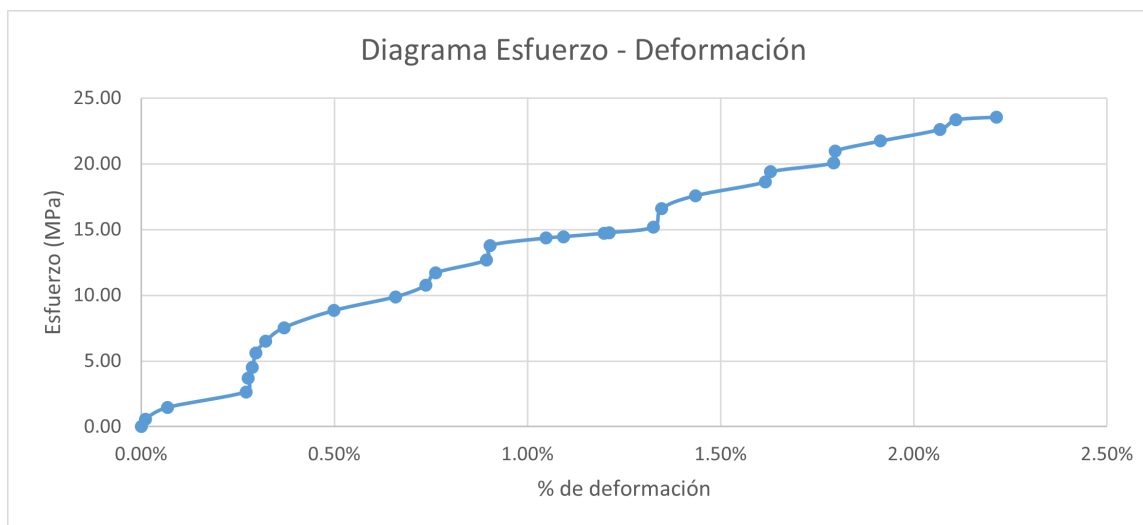
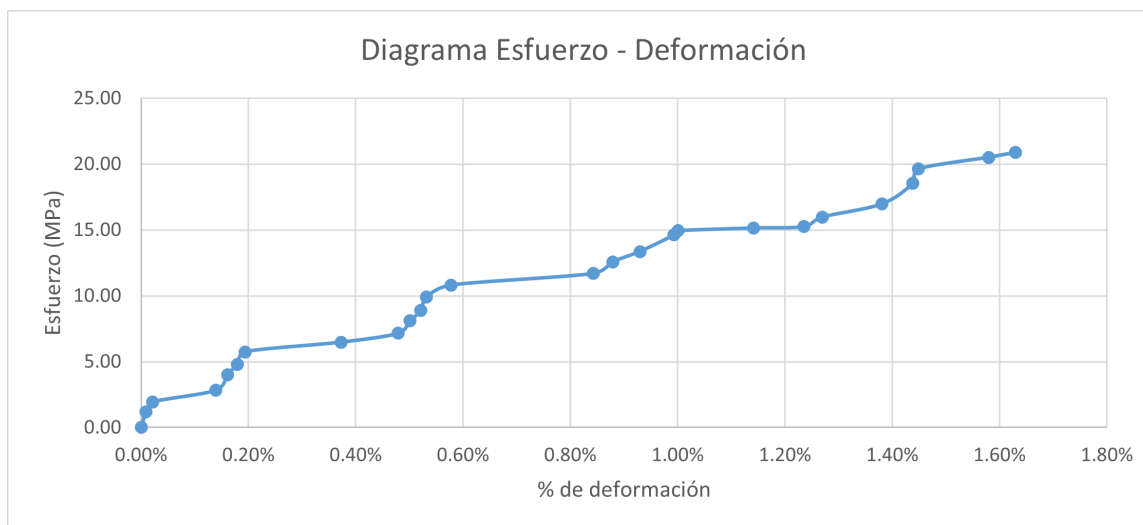


Figura 69: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75GP5



Cuadro 50: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
PT75GP	1	6.93 %	2.30 %
PT75GP	3	6.37 %	2.02 %
PT75GP	4	0.69 %	2.21 %
PT75GP	5	1.67 %	1.63 %
$\bar{X}$ PT75GP		3.92 %	2.04 %
$\sigma$ PT75GP		3.19 %	0.30 %

Cuadro 51: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
PT75GP	1	1.10	25.44	26.85	28.74
PT75GP	3	1.12	19.40	20.14	21.51
PT75GP	4	1.07	22.62	23.56	23.72
PT75GP	5	1.17	19.63	20.89	21.24
$\bar{X}$ PT75GP		1.12	21.77	22.86	23.80
$\sigma$ PT75GP		0.04	2.85	3.04	3.47

Cuadro 52: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
PT75GP	1	0.35	0.38
PT75GP	3	0.15	0.28
PT75GP	4	0.28	0.32
PT75GP	5	0.16	0.20
$\bar{X}$ PT75GP		0.24	0.30
$\sigma$ PT75GP		0.10	0.08

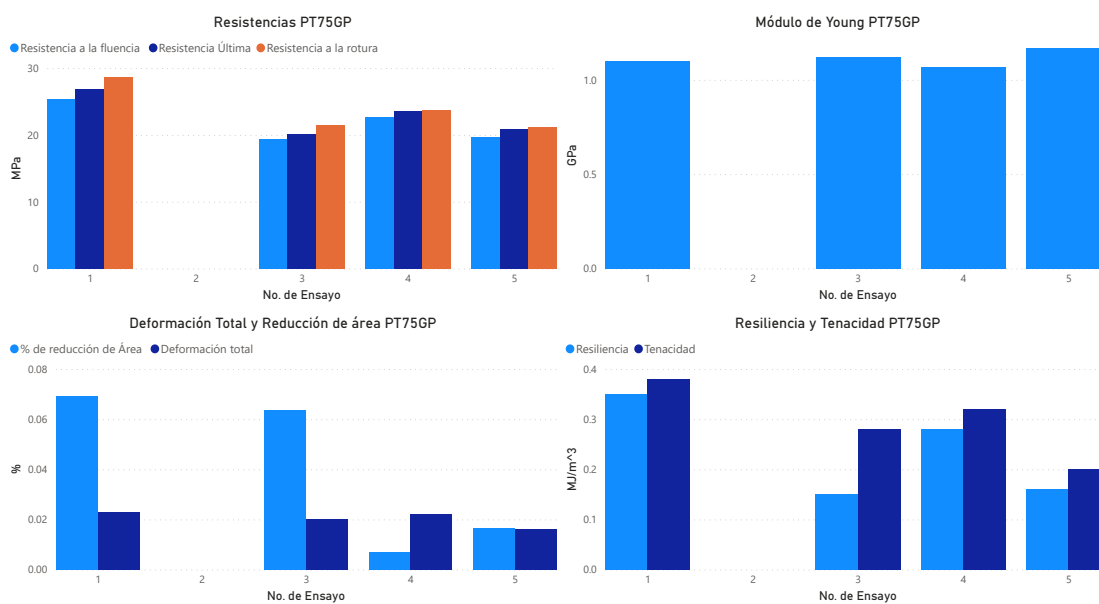


Figura 70: Gráficas de resultados PT75G

### 7.3.4. PETG 50% patrón LINES

Figura 71: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP1

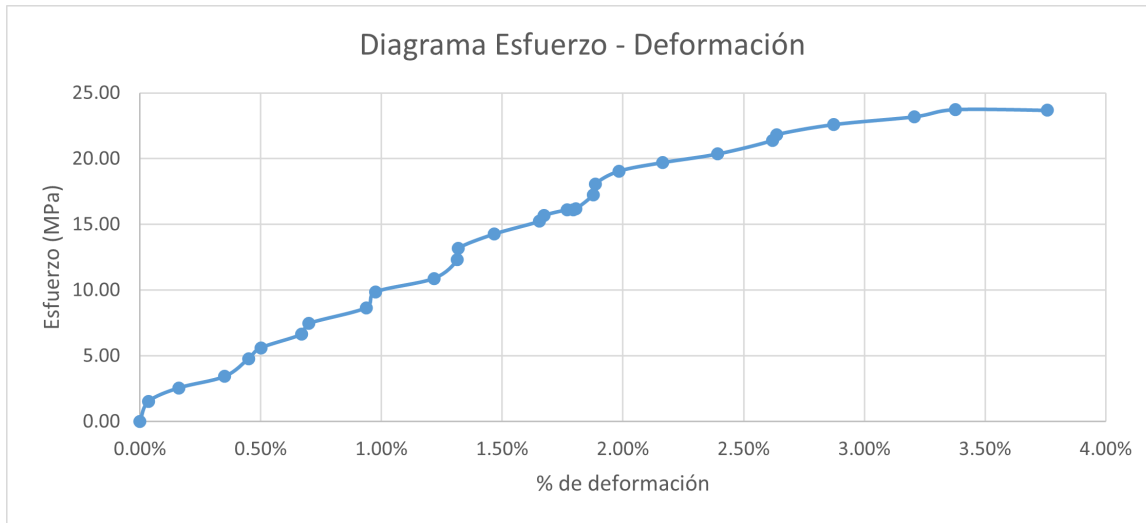


Figura 72: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP2

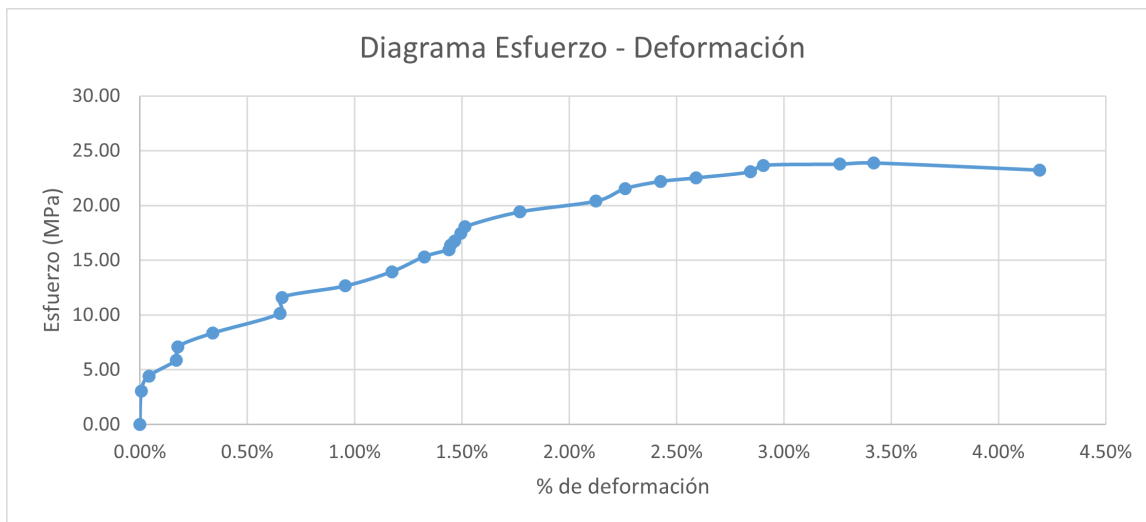




Figura 73: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP3

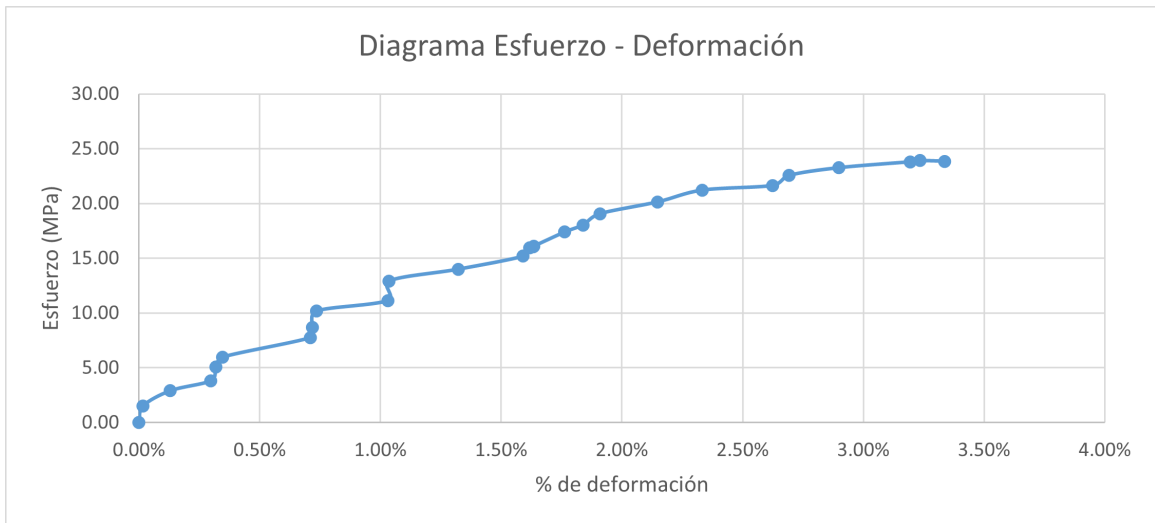


Figura 74: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP4

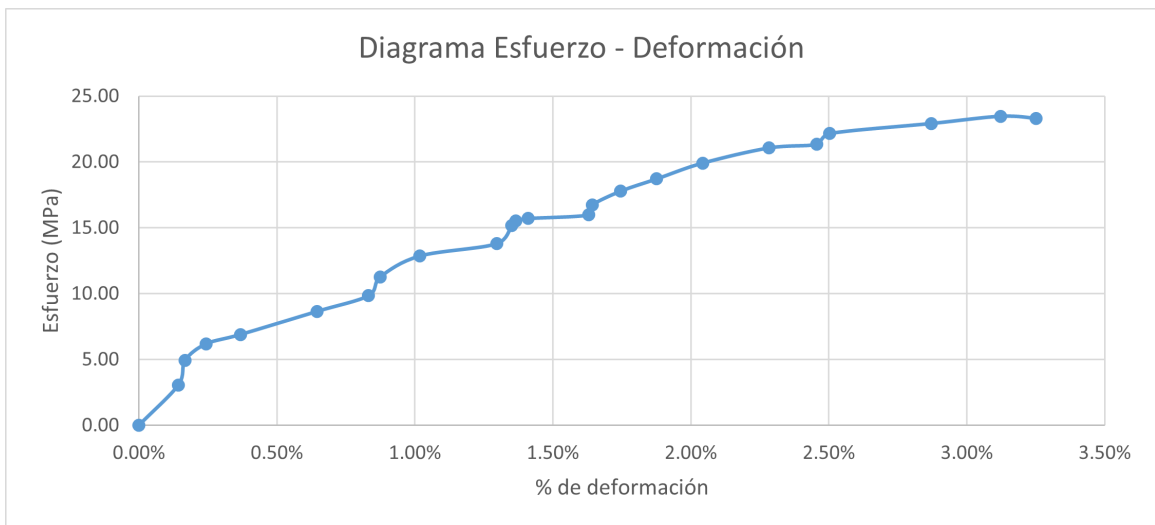
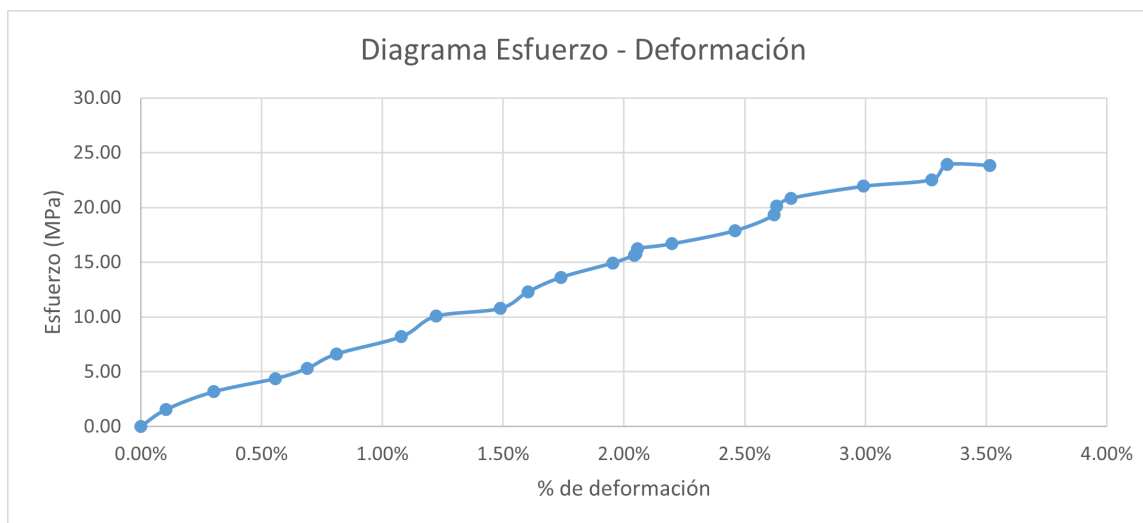


Figura 75: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50LP5



Cuadro 53: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
PT50LP	1	3.44 %	3.76 %
PT50LP	2	2.69 %	4.19 %
PT50LP	3	3.17 %	3.34 %
PT50LP	4	2.81 %	3.25 %
PT50LP	5	2.90 %	3.52 %
$\bar{X}$ PT50LP		3.00 %	3.61 %
$\sigma$ PT50LP		0.30 %	0.38 %

Cuadro 54: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
PT50LP	1	0.83	21.83	23.73	24.52
PT50LP	2	0.86	20.39	23.88	23.87
PT50LP	3	0.87	21.21	23.91	24.63
PT50LP	4	0.85	21.06	23.47	23.98
PT50LP	5	0.74	20.85	23.91	24.57
$\bar{X}$ PT50LP		0.83	21.07	23.78	24.31
$\sigma$ PT50LP		0.05	0.53	0.19	0.36

Cuadro 55: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
PT50LP	1	0.34	0.60
PT50LP	2	0.30	0.78
PT50LP	3	0.30	0.53
PT50LP	4	0.30	0.52
PT50LP	5	0.30	0.48
$\bar{X}$ PT50LP		0.31	0.58
$\sigma$ PT50LP		0.02	0.12

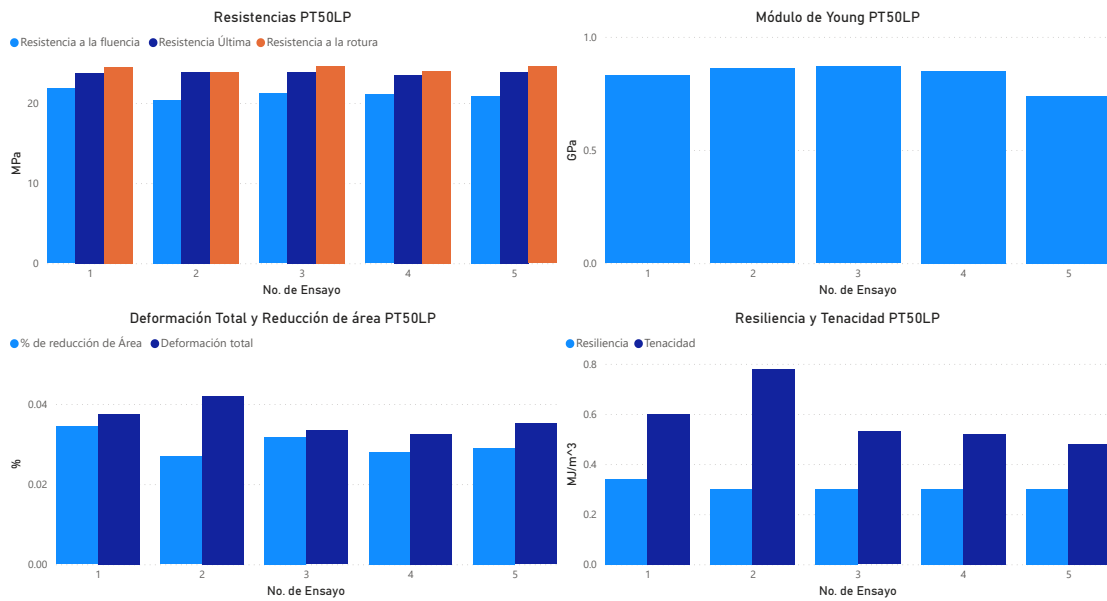


Figura 76: Gráficas de resultados PT50L

### 7.3.5. PETG 75 % patrón LINES

Figura 77: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP1

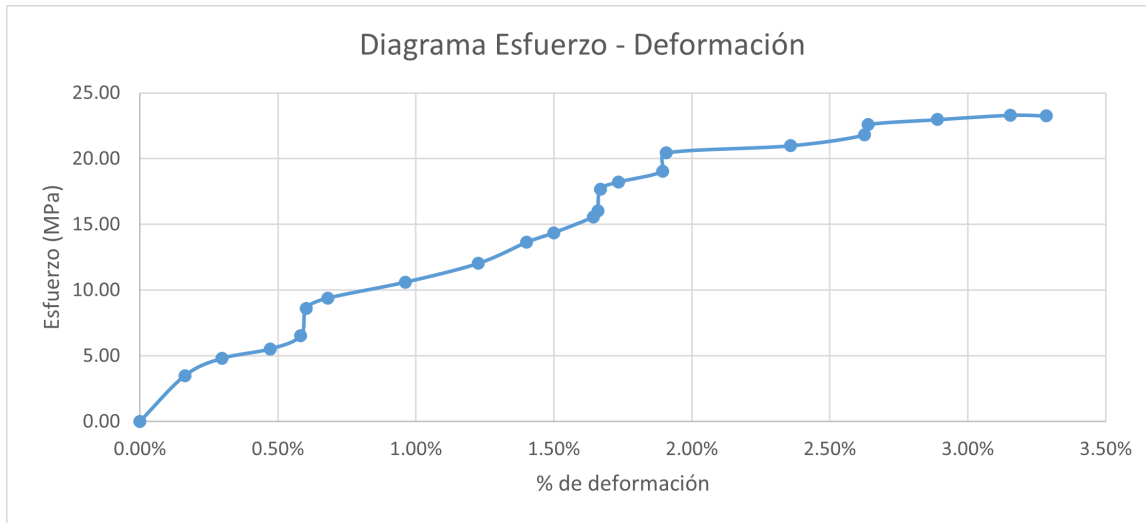


Figura 78: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP2

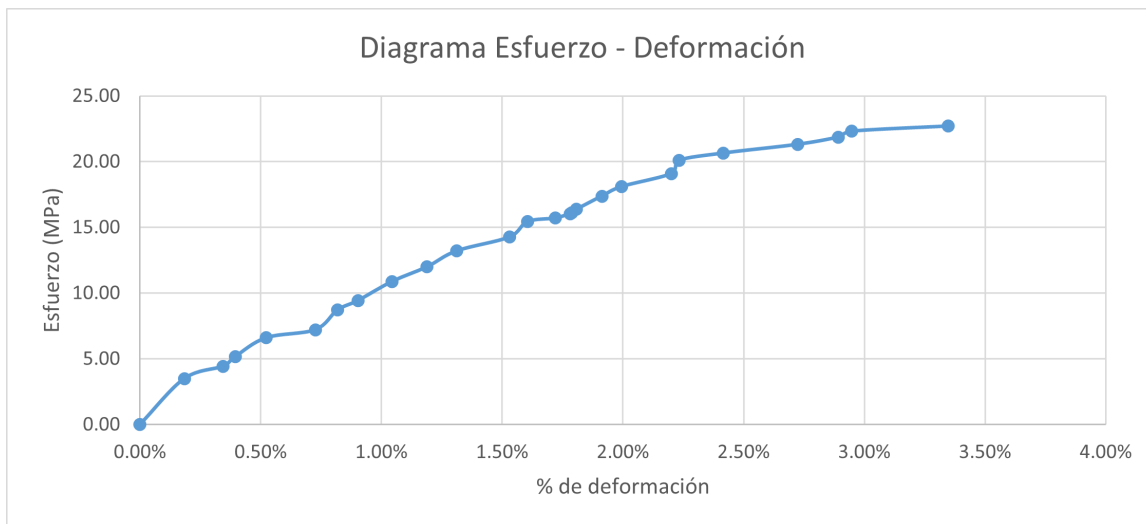


Figura 79: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP3

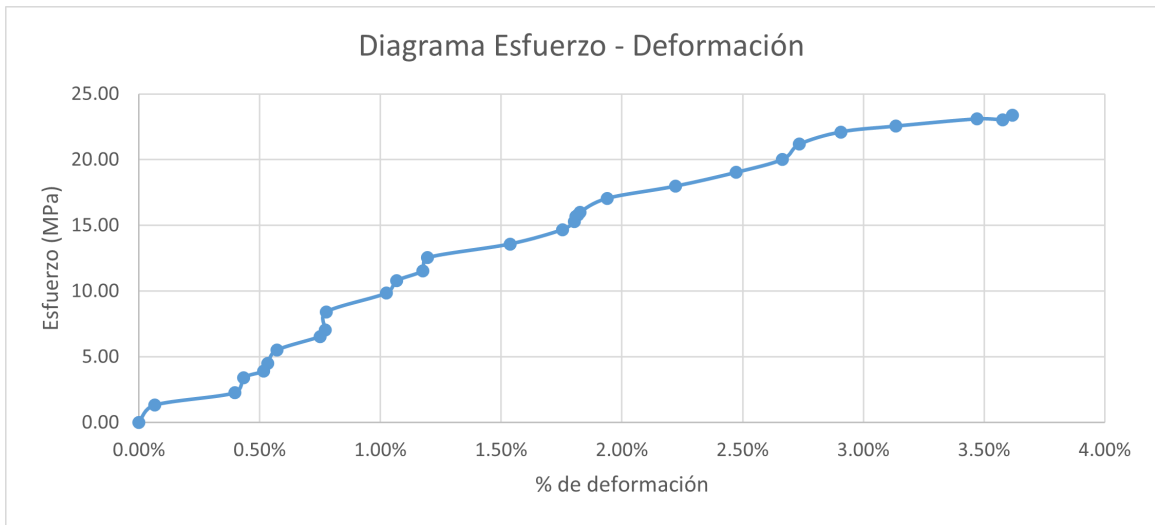


Figura 80: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP4

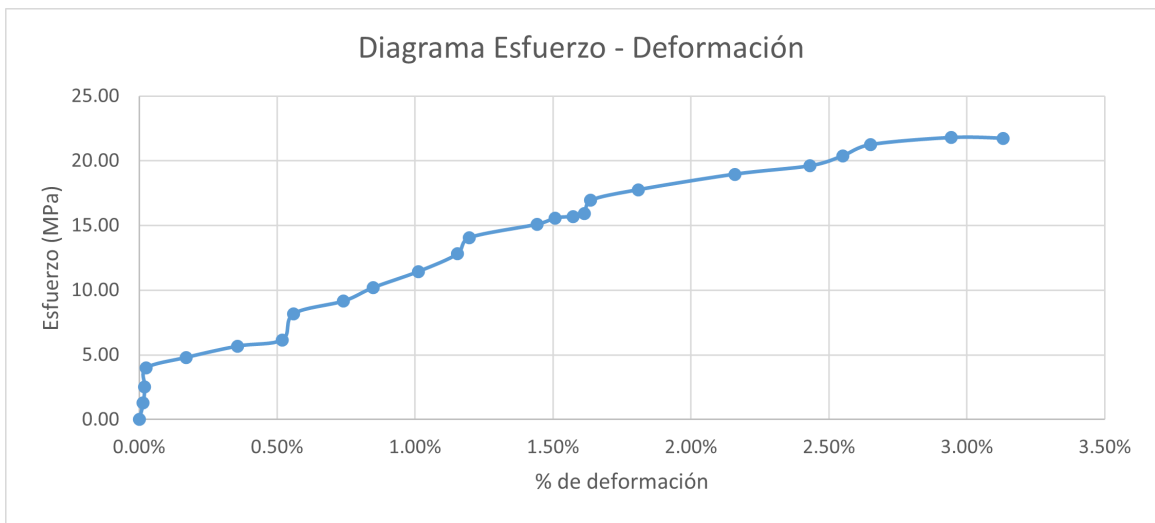
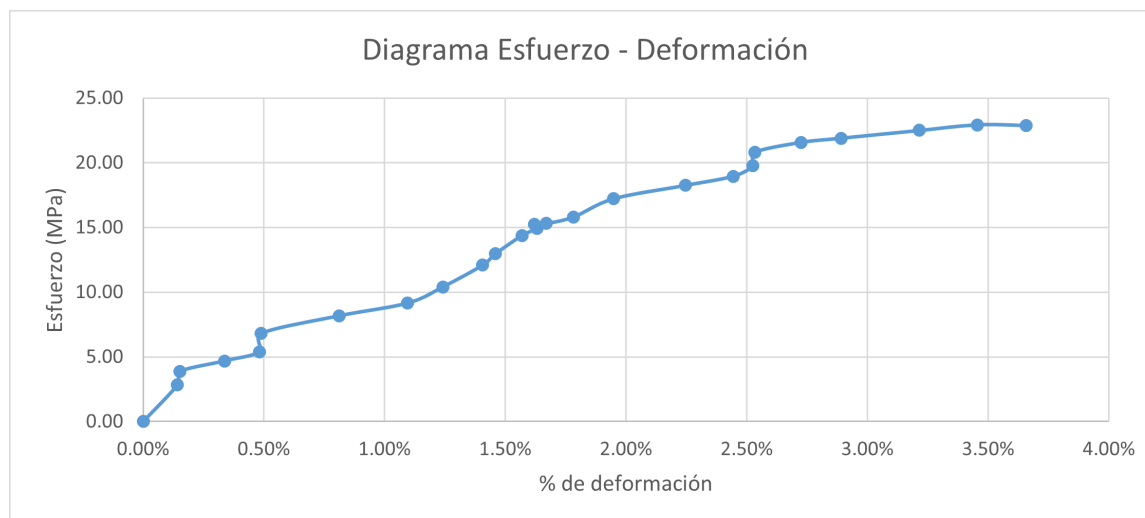


Figura 81: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75LP5



Cuadro 56: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
PT75LP	1	0.90 %	3.28 %
PT75LP	2	1.57 %	3.35 %
PT75LP	3	1.71 %	3.62 %
PT75LP	4	3.02 %	3.13 %
PT75LP	5	3.31 %	3.66 %
$\bar{X}$ PT75LP		2.10 %	3.41 %
$\sigma$ PT75LP		1.02 %	0.22 %

Cuadro 57: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
PT75LP	1	0.92	20.43	23.30	23.46
PT75LP	2	0.82	20.09	22.70	23.06
PT75LP	3	0.78	21.17	23.37	23.78
PT75LP	4	0.81	19.61	21.79	22.41
PT75LP	5	0.74	19.77	22.93	23.66
$\bar{X}$ PT75LP		0.81	20.21	22.82	23.27
$\sigma$ PT75LP		0.07	0.62	0.64	0.55

Cuadro 58: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
PT75LP	1	0.21	0.51
PT75LP	2	0.26	0.50
PT75LP	3	0.33	0.53
PT75LP	4	0.32	0.47
PT75LP	5	0.30	0.55
$\bar{X}$ PT75LP		0.28	0.51
$\sigma$ PT75LP		0.05	0.03

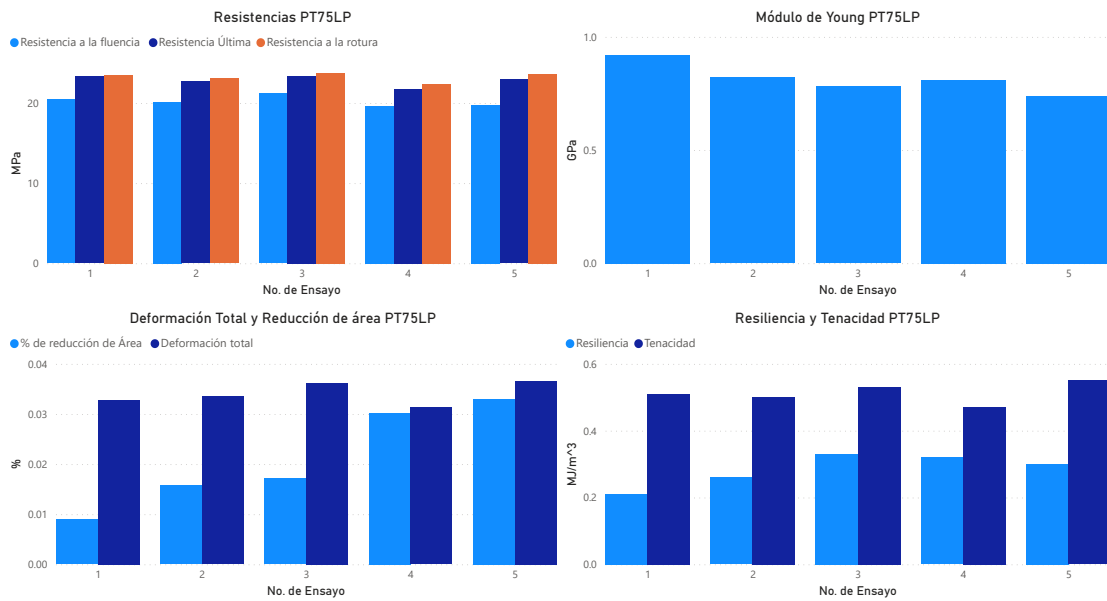


Figura 82: Gráficas de resultados PT75L

### 7.3.6. PETG 50% patrón ZIGZAG

Figura 83: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP1

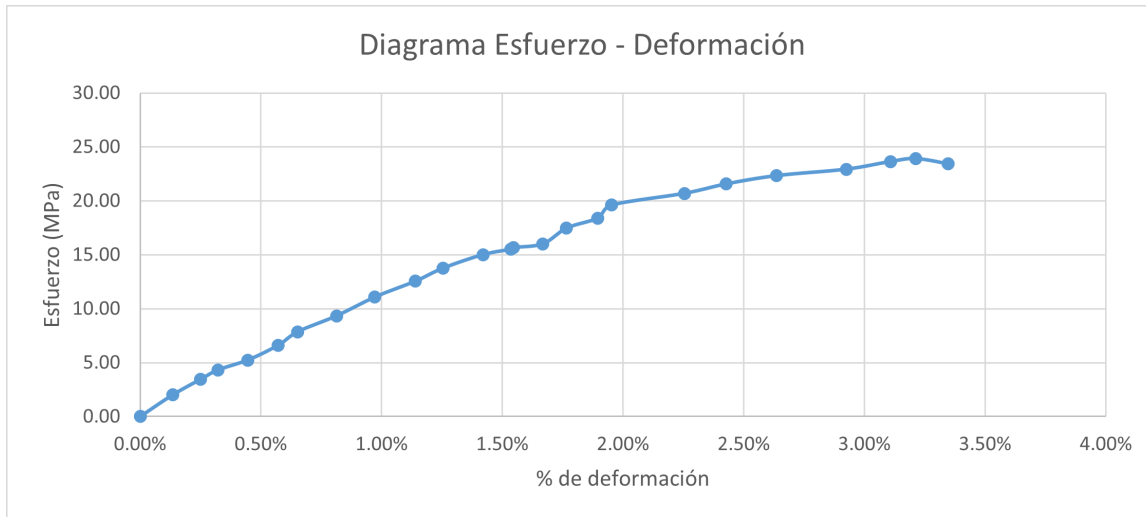


Figura 84: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP2

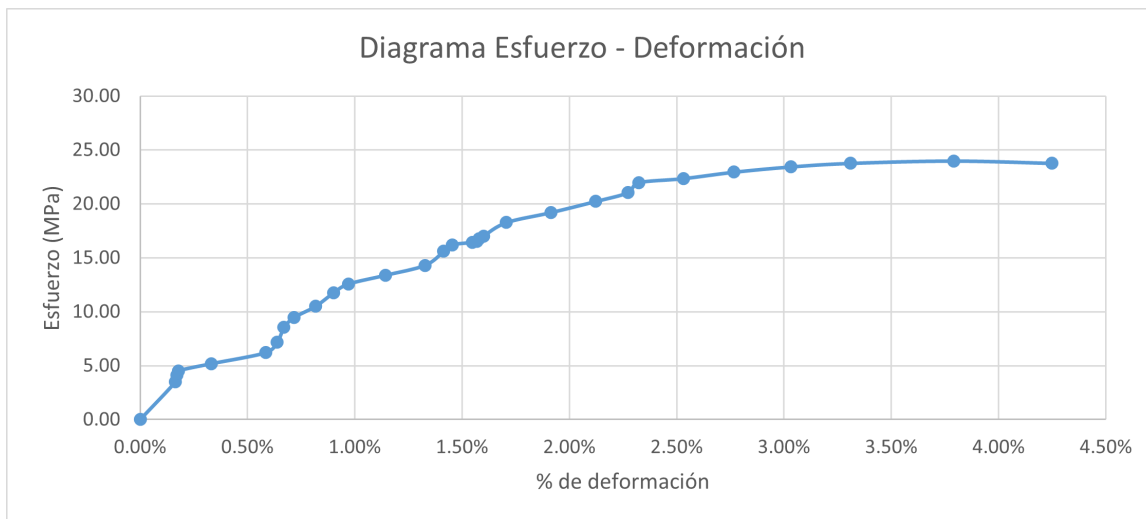




Figura 85: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP3

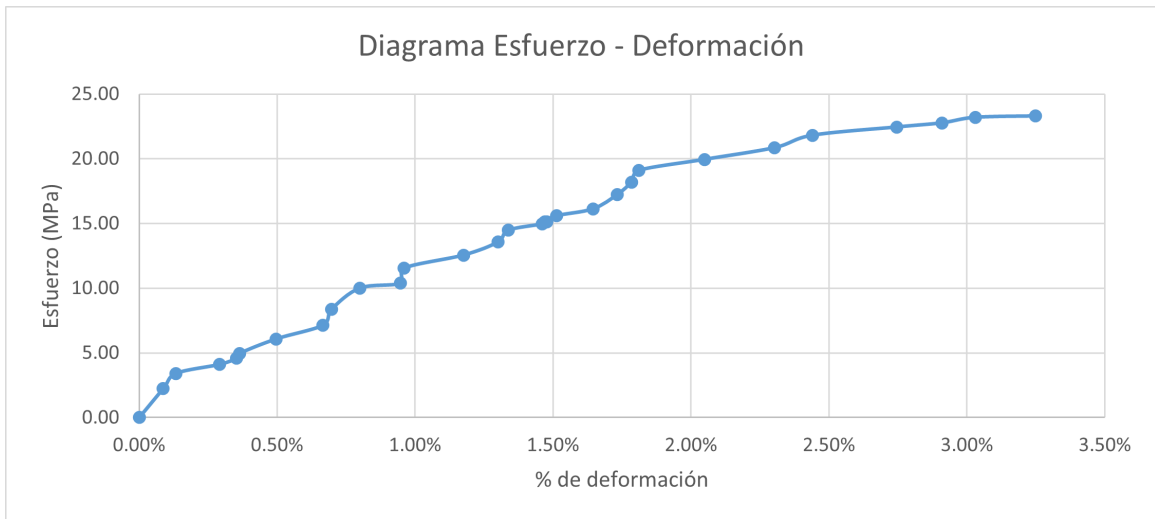


Figura 86: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP4

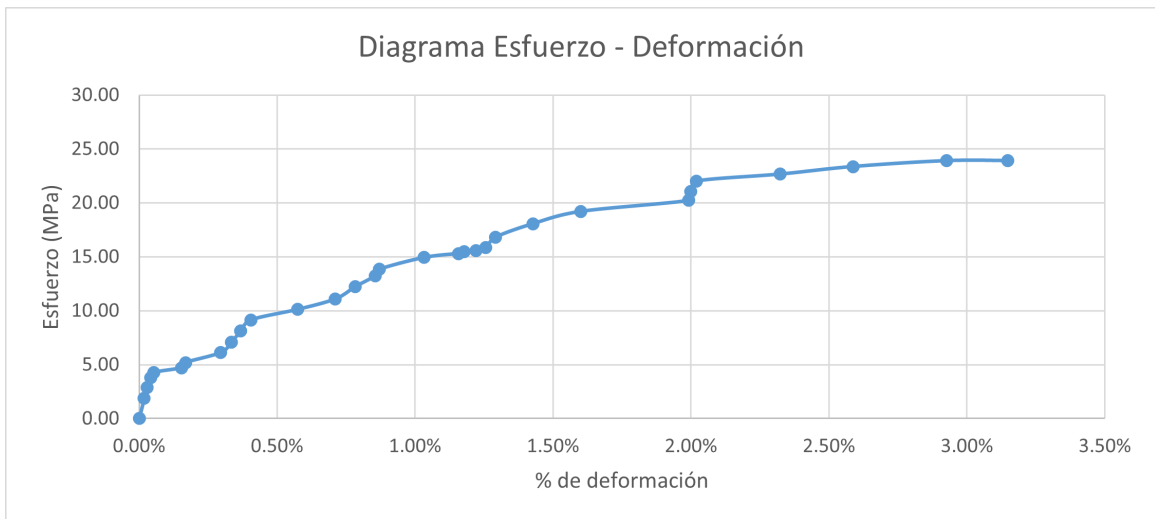
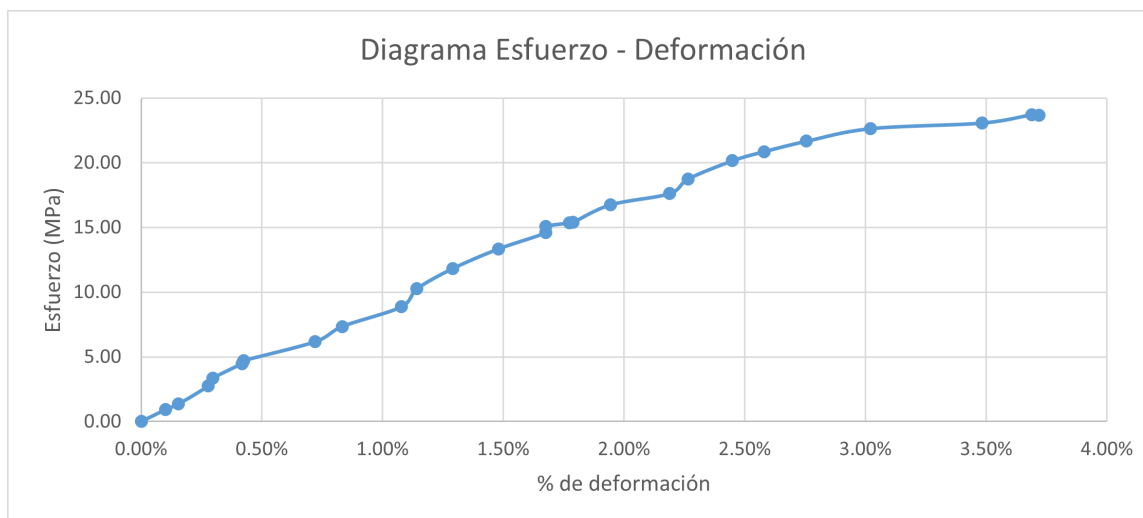


Figura 87: Gráfica esfuerzo vs deformación PT50ZP5



Cuadro 59: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
PT50ZP	1	1.29 %	3.35 %
PT50ZP	2	1.43 %	4.25 %
PT50ZP	3	2.15 %	3.25 %
PT50ZP	4	1.75 %	3.15 %
PT50ZP	5	2.09 %	3.72 %
$\bar{X}$ PT50ZP		1.74 %	3.54 %
$\sigma$ PT50ZP		0.38 %	0.45 %

Cuadro 60: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
PT50ZP	1	0.95	19.61	23.92	23.73
PT50ZP	2	0.90	21.05	23.98	24.11
PT50ZP	3	0.89	21.81	23.30	23.81
PT50ZP	4	0.96	22.01	23.91	24.33
PT50ZP	5	0.78	22.65	23.73	24.18
$\bar{X}$ PT50ZP		0.90	21.43	23.77	24.03
$\sigma$ PT50ZP		0.07	1.16	0.28	0.25

Cuadro 61: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
PT50ZP	1	0.22	0.53
PT50ZP	2	0.30	0.76
PT50ZP	3	0.32	0.51
PT50ZP	4	0.28	0.55
PT50ZP	5	0.40	0.56
$\bar{X}$ PT50ZP		0.30	0.58
$\sigma$ PT50ZP		0.07	0.10

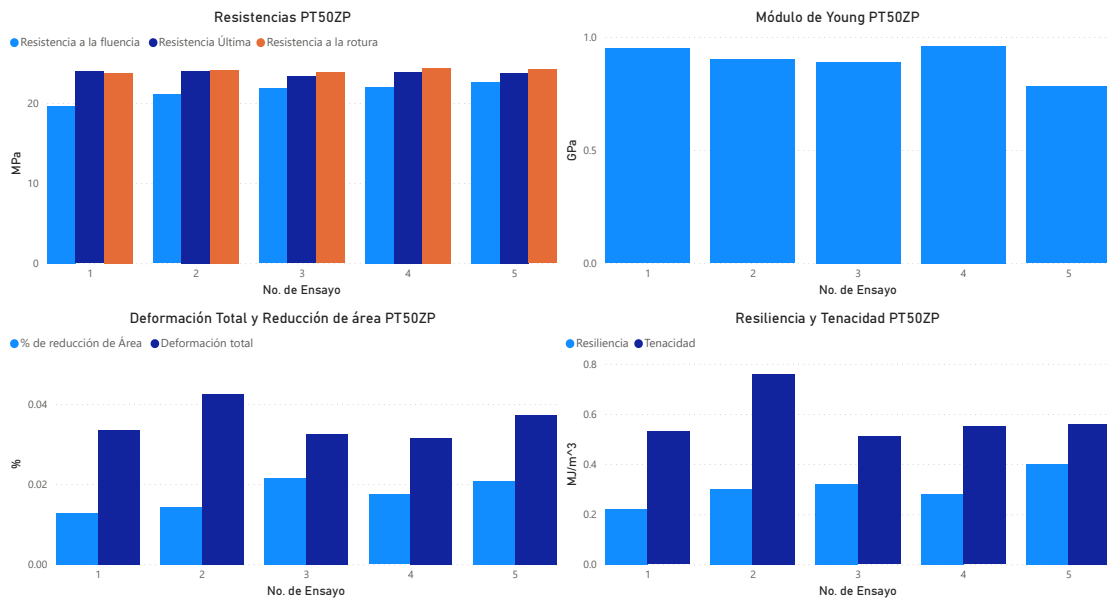


Figura 88: Gráficas de resultados PT50Z

### 7.3.7. PETG 75 % patrón ZIGZAG

Figura 89: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP1

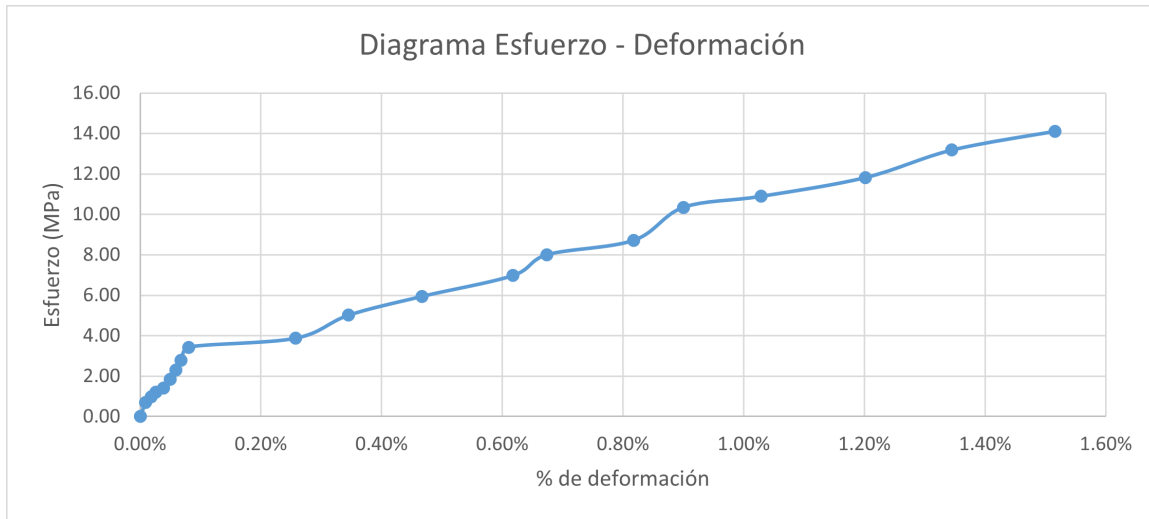


Figura 90: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP2

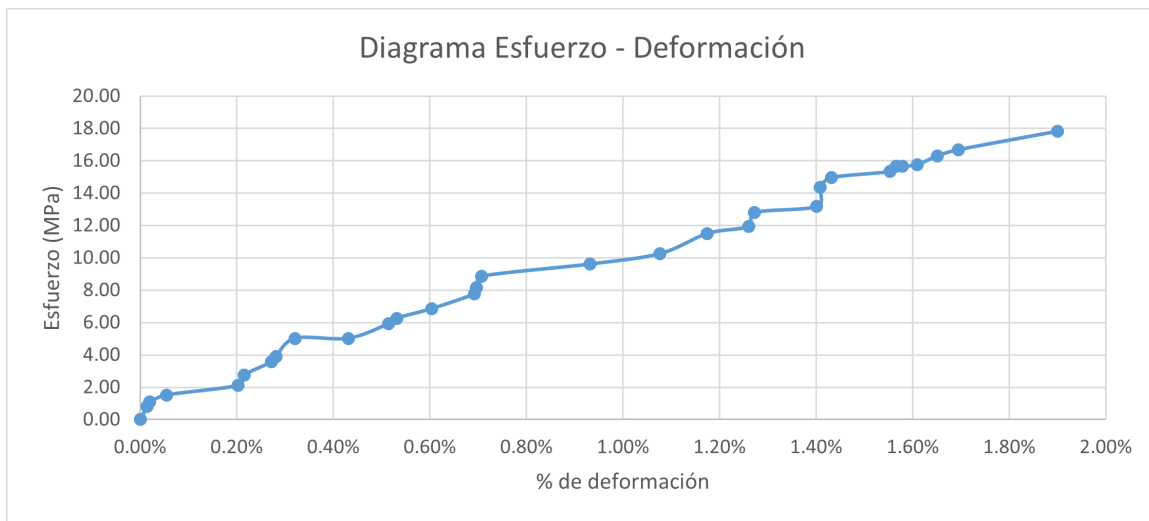


Figura 91: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP3

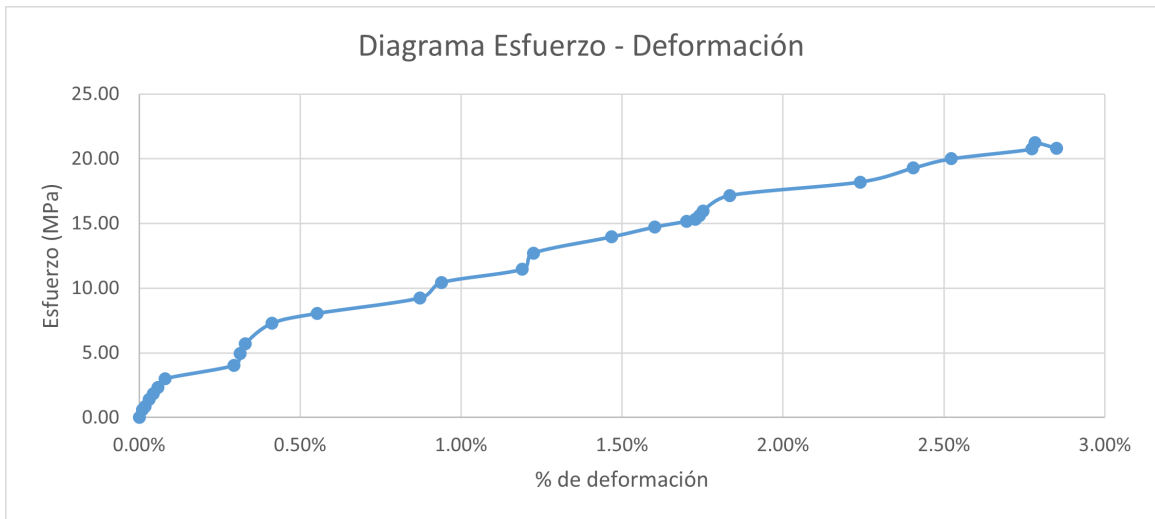


Figura 92: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP4

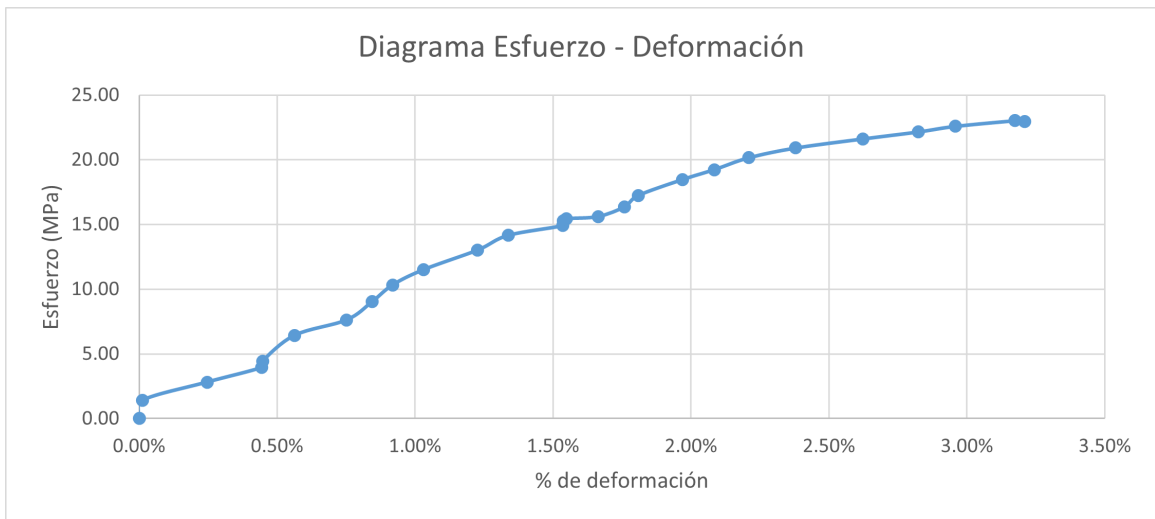
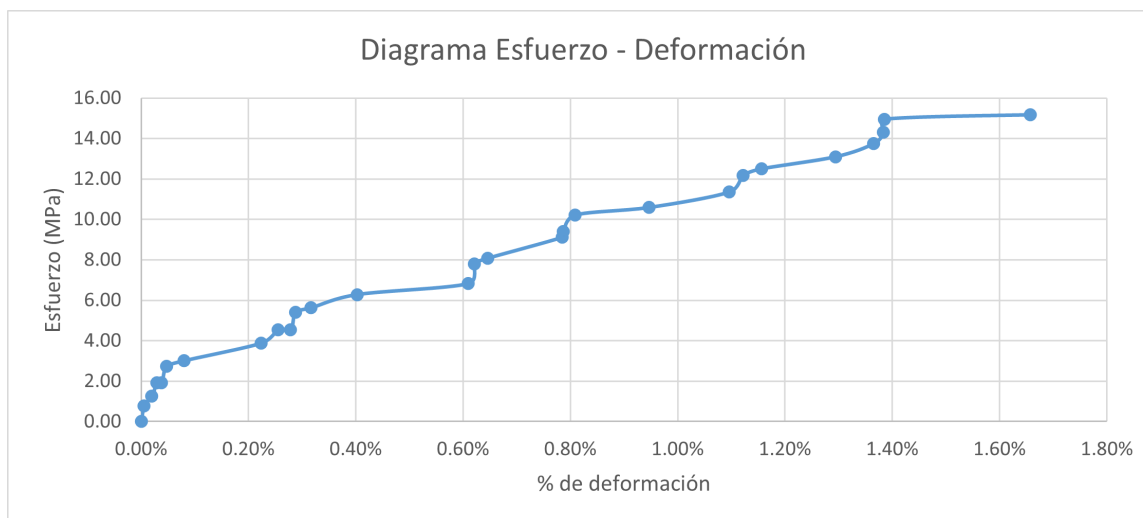


Figura 93: Gráfica esfuerzo vs deformación PT75ZP5



Cuadro 62: Reducción de área y deformación

Código	No. de ensayo	% de reducción de área	Deformación total
PT75ZP	1	1.23 %	1.52 %
PT75ZP	2	1.84 %	1.90 %
PT75ZP	3	1.63 %	2.85 %
PT75ZP	4	2.15 %	3.21 %
PT75ZP	5	0.93 %	1.66 %
$\bar{X}$ PT75ZP		1.55 %	2.23 %
$\sigma$ PT75ZP		0.48 %	0.76 %

Cuadro 63: Módulo de Young y resistencias

Código	No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última	Resistencia a la rotura
PT75ZP	1	0.98	10.35	14.11	14.29
PT75ZP	2	0.93	14.95	17.81	18.15
PT75ZP	3	0.83	17.17	21.24	21.15
PT75ZP	4	0.94	17.24	23.02	23.47
PT75ZP	5	0.96	12.50	15.17	15.32
$\bar{X}$ PT75ZP		0.93	14.44	18.27	18.48
$\sigma$ PT75ZP		0.06	3.00	3.82	3.86

Cuadro 64: Resiliencia y tenacidad

Código	No. de ensayo	Resiliencia	Tenacidad
PT75ZP	1	0.06	0.13
PT75ZP	2	0.11	0.19
PT75ZP	3	0.19	0.39
PT75ZP	4	0.18	0.48
PT75ZP	5	0.09	0.16
$\bar{X}$ PT75ZP		0.13	0.27
$\sigma$ PT75ZP		0.06	0.16

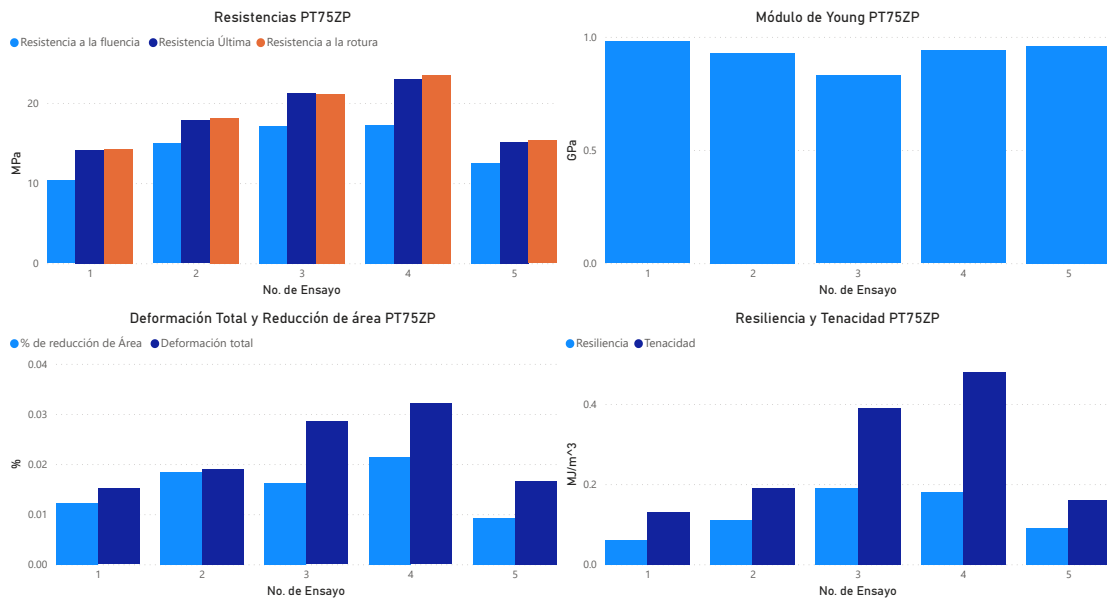


Figura 94: Gráficas de resultados PT75Z





---

### Análisis de resultados

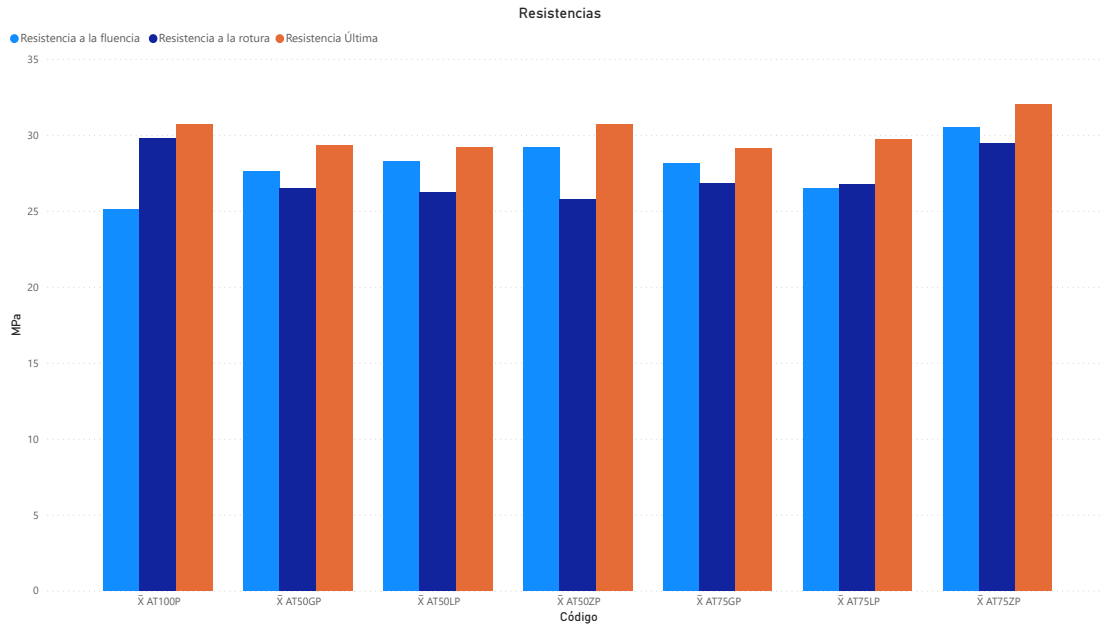
---

Todas las características mecánicas que se exponen anteriormente en los resultados se deben de comparar para poder llegar a una conclusión clara, es por esto que se realiza un análisis por material y luego entre los dos materiales.

Los gráficos a continuación pretenden mostrar de una forma ordenada los resultados para poder ver las diferencias entre cada uno de las variantes. Los gráficos están ordenados de la siguiente manera: Resistencias, Módulo de Young, % de reducción de área y deformación, Resiliencia y tenacidad.

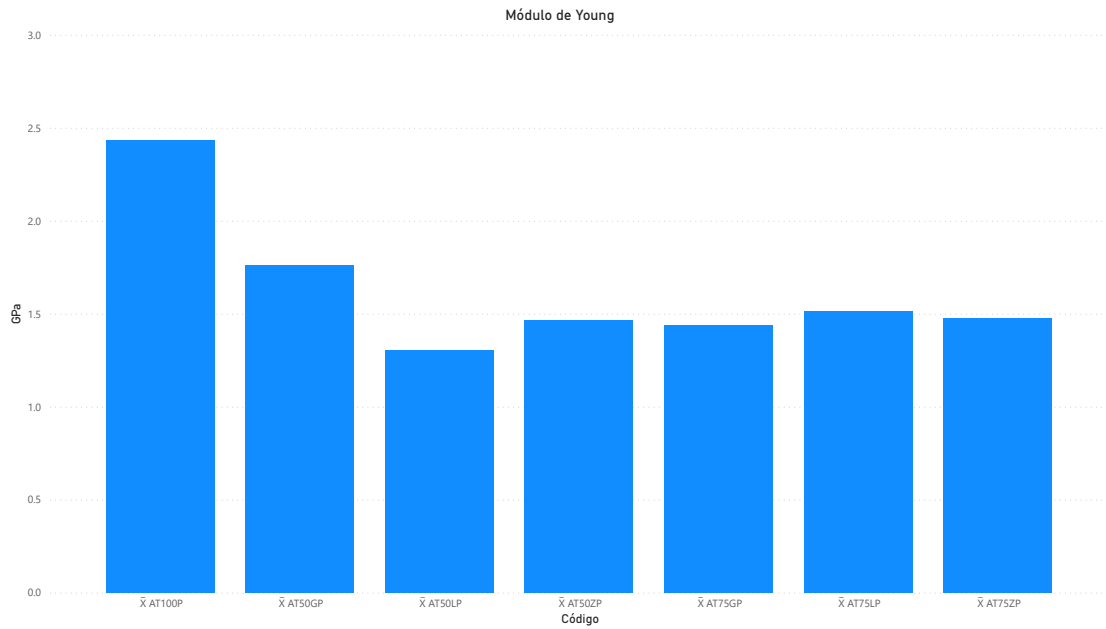
## 8.1. Comparación ABS

Figura 95: Comparación de resistencias de ABS



En la Figura 95 se puede notar que AT75ZP es la combinación que mayor resistencia a la fluencia y resistencia última a la tensión tiene, pero la variante AT100P tiene mayor resistencia a la rotura. El análisis importante en las resistencias tiene que ver con cual material escoger, el cual depende mucho del uso que se le quiere dar, es por esto que es importante conocer la funcionalidad de lo que se esta diseñando.

Figura 96: Comparación de módulo de Young de ABS



En la Figura [96](#) se puede observar el módulo de Young, en donde la variante AT100P es la que mayor módulo tiene, lo cual se traduce a que es mucho más rígido que las demás variantes. Esta también es una característica importante a la hora de decidir que variante usar para poder diseñar algo.

Figura 97: Comparación de % de reducción de área y deformación total de ABS

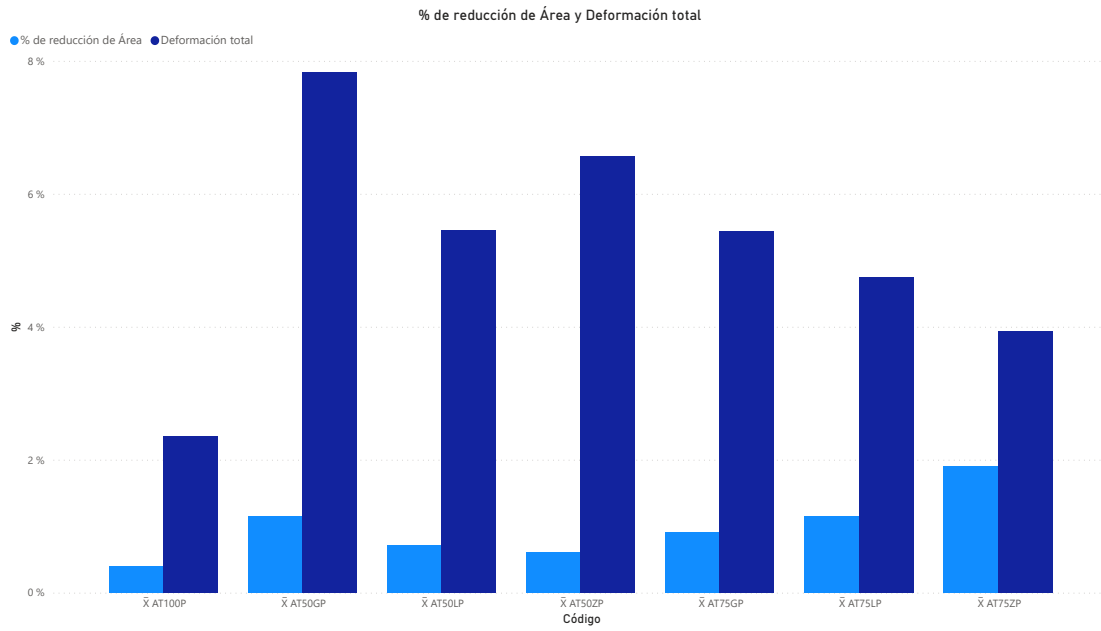
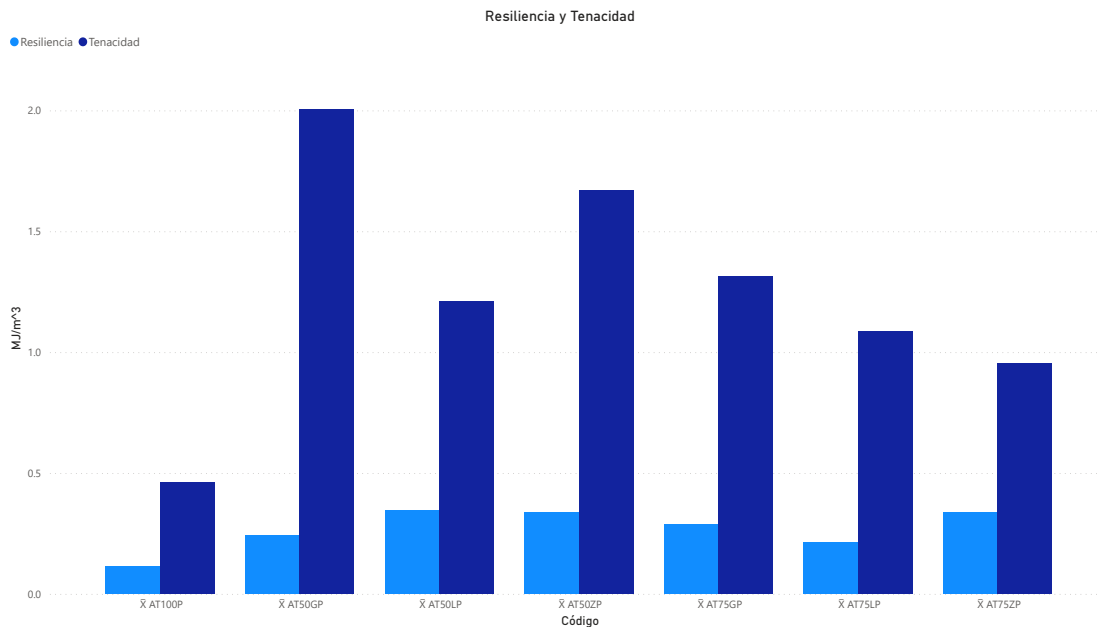


Figura 98: Comparación de resiliencia y tenacidad de ABS

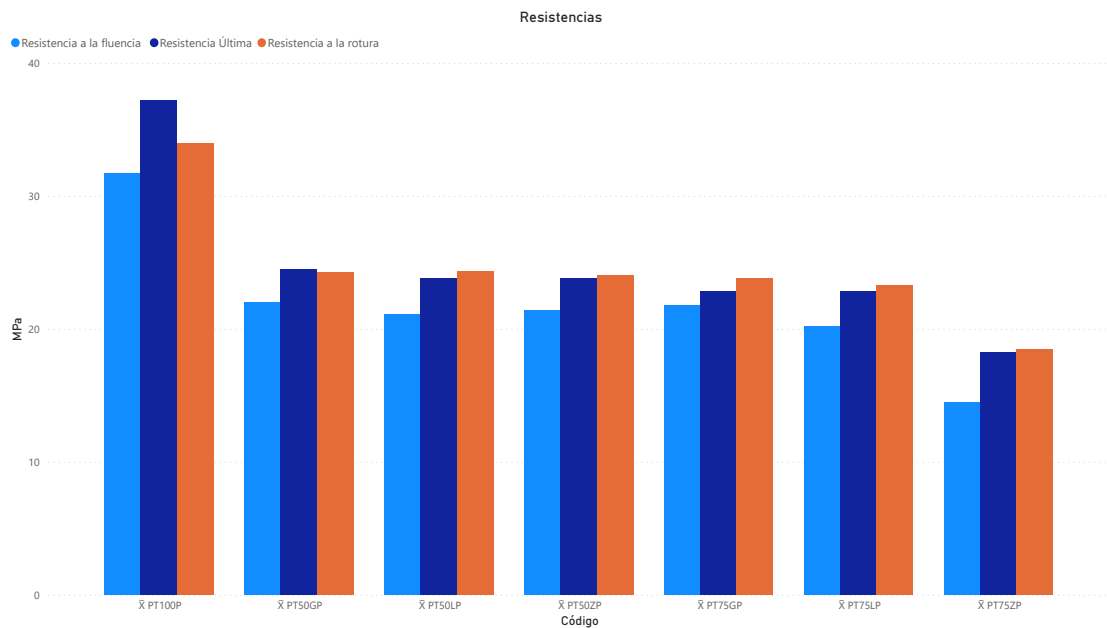


La tenacidad es la energía que puede absorber un material antes de la rotura, y la resiliencia es la energía que puede recuperar el material para recuperar su forma original.

Por esto la figura 97 y 98 están relacionadas ya que se espera que la variante que mayor deformación total tenga mayor tenacidad, este es el caso de la variante AT50GP, y la que mayor reducción de área obtenga mayor sea la resiliencia, y este es el caso de la variante AT75ZP.

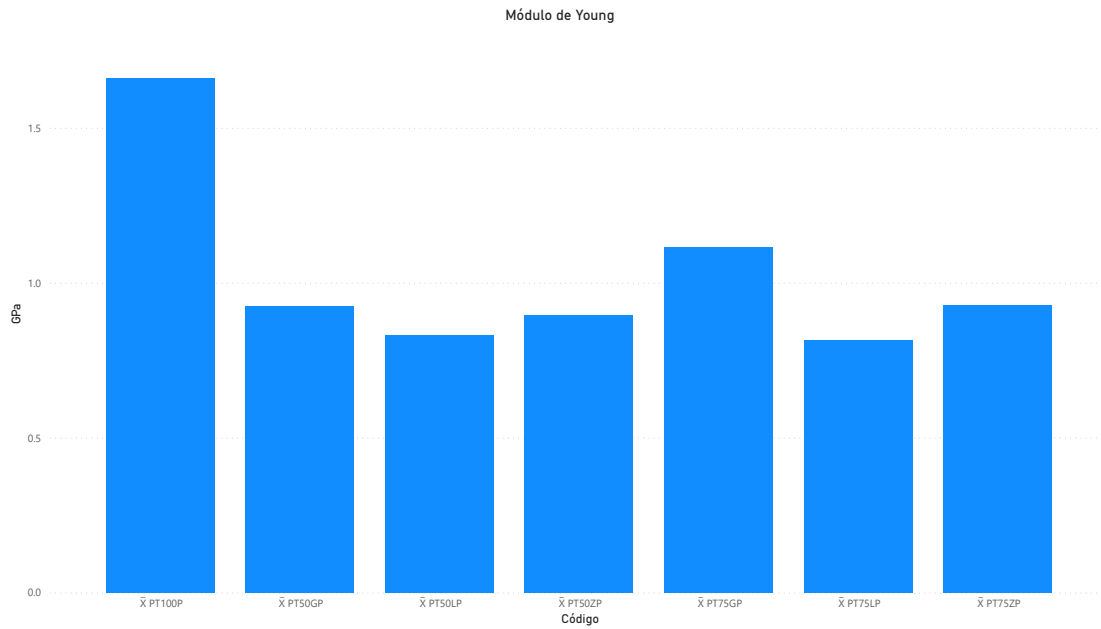
## 8.2. Comparación PETG

Figura 99: Comparación de resistencias de PETG



En la Figura 99 se puede observar que al usar 100% de relleno se tiene mayor resistencia.

Figura 100: Comparación de módulo de Young de PETG



En PETG se puede notar en la Figura 100 al usar una probeta sólida se tiene mucho mayor rigidez, ya que el este tiene el mayor módulo de Young.

Figura 101: Comparación de % de reducción de área y deformación total de PETG

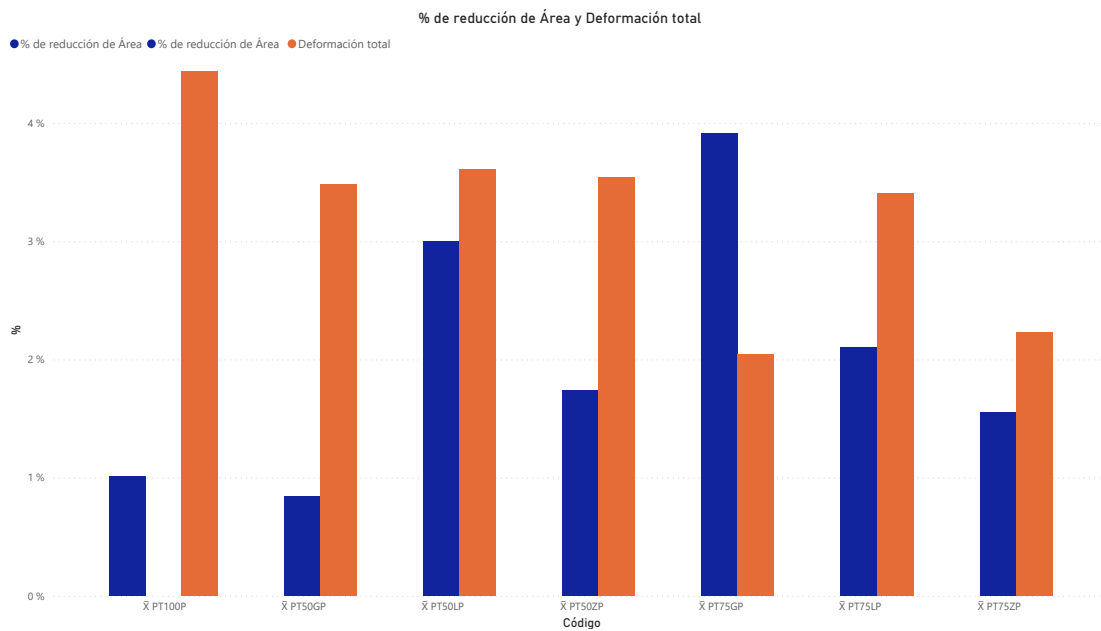
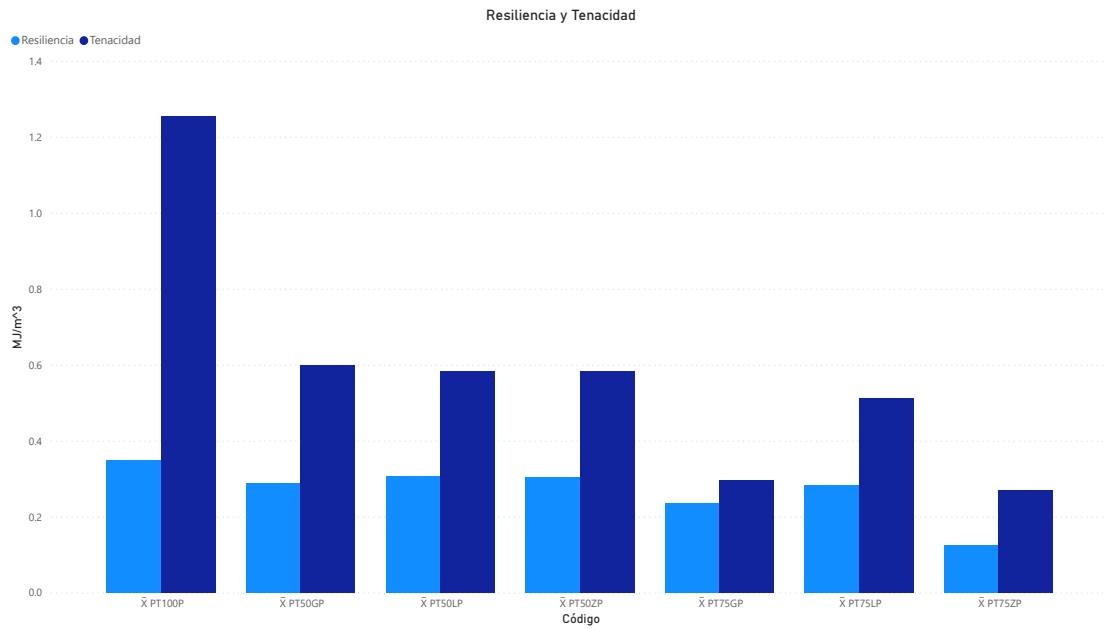


Figura 102: Comparación de resiliencia y tenacidad de PETG



Las figuras [101](#) y [101](#) están relacionadas ya que se espera que la variante que mayor deformación total tenga mayor tenacidad, este es el caso de la variante PT100P, y la que mayor reducción de área obtenga mayor sea la resiliencia, en este caso PT75GP es la que mayor reducción tuvo pero no mayor resiliencia.

### 8.3. Comparación ABS y PETG

Figura 103: Comparación de resistencias de ABS y PETG

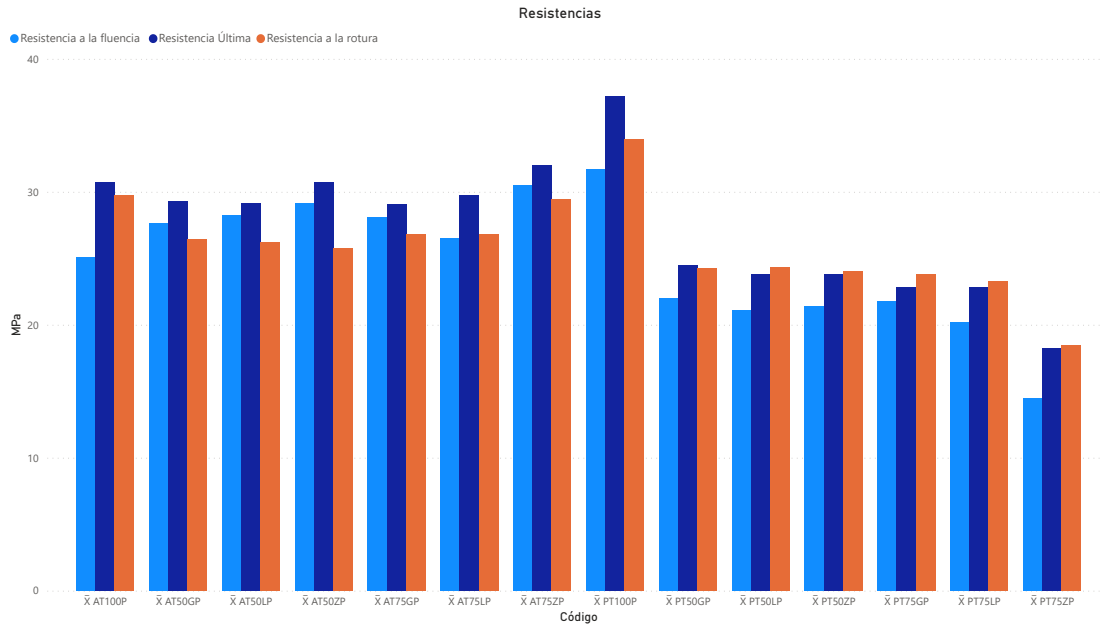


Figura 104: Comparación de módulo de Young de ABS y PETG

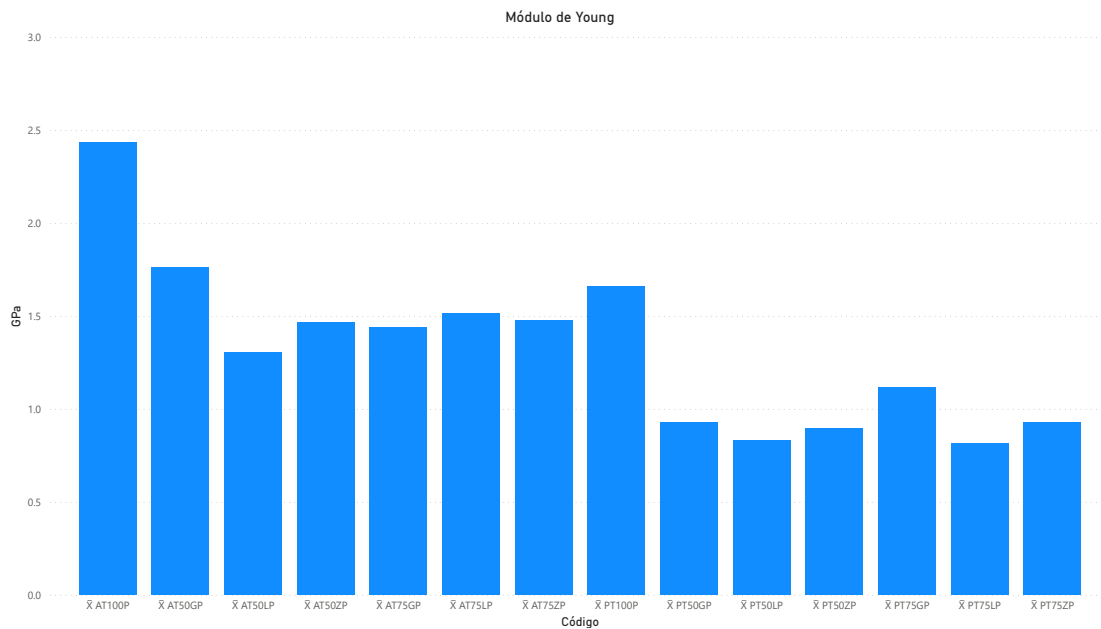




Figura 105: Comparación de % de reducción de área y deformación total de ABS y PETG

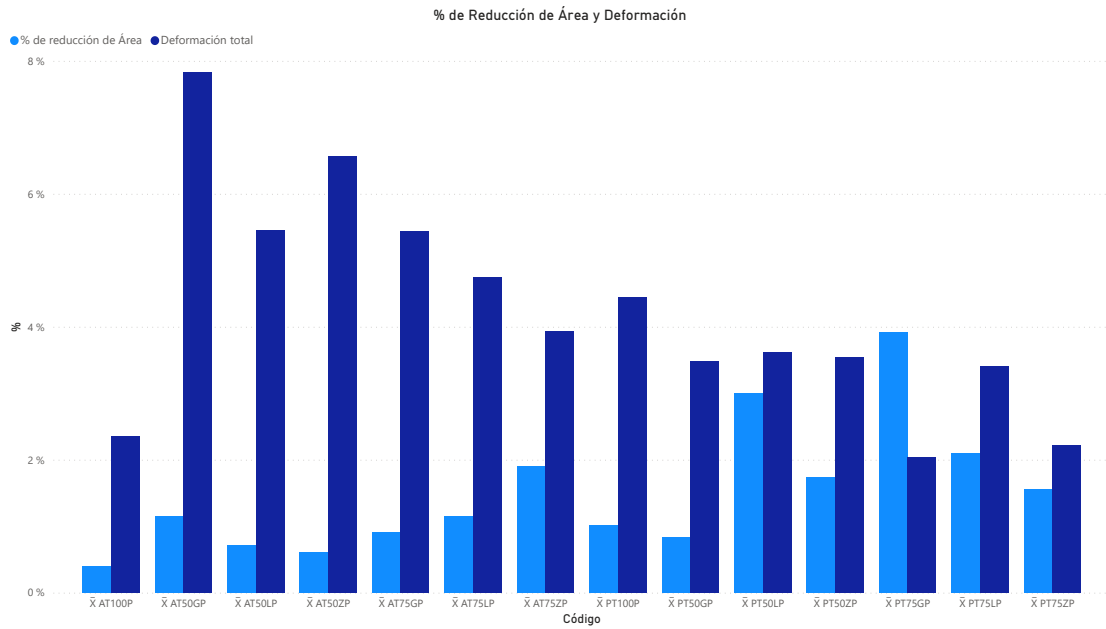
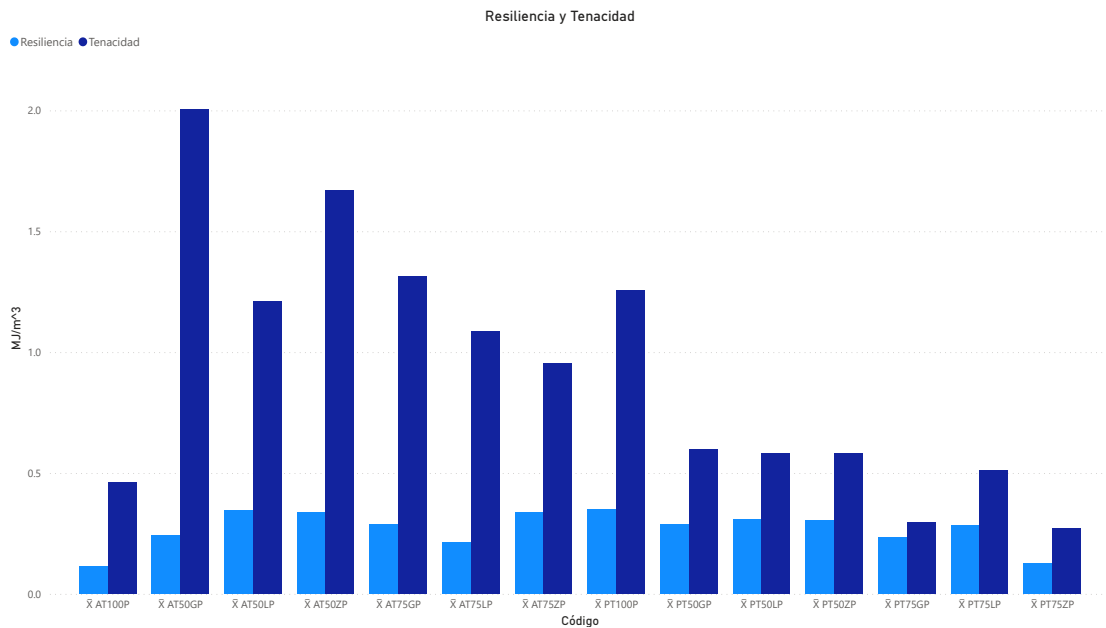


Figura 106: Comparación de resiliencia y tenacidad de ABS y PETG



Las figuras 103, 104, 105, 106 son de utilidad para poder ver entre los dos materiales las diferencias que pueden tener. Pero el análisis tiene relación con las gráficas de esfuerzo

vs deformación en el apartado de resultados, ya que si se observa el ABS tiene una gráfica con forma de material dúctil y el PETG tiene gráficas con forma de un material frágil. Esto puede explicar que el ABS al utilizar patrones y menor relleno es mucho más resistente que el PETG, pero a la hora de utilizar probetas sólidas el PETG es el más resistente.

Los ensayos a tensión de ABS fueron mucho más largos en tiempo que los de PETG usando la misma velocidad en la máquina de ensayos, esto se puede ver reflejado en la reducción de área, deformación total, resiliencia y tenacidad; ya que el ABS en estas cuatro características tiene mayor valor que el PETG.

1. Se definieron que los materiales a analizar fueron ABS y PETG debido a que son los más utilizados para prototipado de ingeniería en el D-Hive de la UVG.
2. Se diseñó una probeta de acuerdo con las medidas de los cuadros [9](#) y [10](#) debido a que pasaron las pruebas de ensayos.
3. Se definieron los parámetros de impresión los cuales se pueden observar en el Cuadro [5](#).
4. Se realizó un protocolo de ensayos a tensión el cual se puede observar en la sección [6.8.5](#).
5. Se obtuvieron las propiedades mecánicas de todas las variantes propuestas utilizando Tracker y una hoja de cálculo.
6. Se utilizó el promedio y la varianza para poder obtener y validar las propiedades mecánicas de cada variante.



### 10.1. Impresión 3D

Las recomendaciones a la hora de realizar las impresiones 3D son las siguientes:

1. Al imprimir el material de ABS se recomienda diseñar una tapadera para la parte superior de las impresoras disponibles en el D-Hive para regular la temperatura interna y reducir la cantidad de impresiones con problemas de capas.
2. Se recomienda hacer pruebas de impresiones variando la temperatura permitida para cada material, para poder definir la temperatura que mayor precisión y menor tasa de rechazo.
3. Se recomienda usar una sola impresora para todos los lotes para no tener variación de tiempo de impresión y que debido a esto haya más probabilidad de fallo en la impresión. Para esto se debe de hacer una revisión técnica de la impresora que se utilizará para estar seguros de su buen funcionamiento.

### 10.2. Ensayos a tensión

Las recomendaciones a la hora de realizar los ensayos a tensión son las siguientes:

1. Utilizar siempre la misma velocidad de ensayo para todo el lote de probetas para no generar ruido en los resultados.
2. Utilizar mordazas de mejor precisión para poder colocar de mejor manera las probetas a la distancia indicada, esto mejorará la distribución de fuerza en el área reducida.
3. Revisar que la máquina esté en buena condición para que durante cualquier ensayo no pare sin previo aviso y arruine un ensayo completo.

### **10.3. Grabación de vídeos**

Las recomendaciones a la hora de grabar los ensayos a tensión son las siguientes:

1. Hacer al menos una grabación previa a los ensayos y analizar la calidad del vídeo en la computadora para estar seguro de que no hayan desenfoques en el mismo.
2. Utilizar trípode para grabar los ensayos, esto para no tener movimientos involuntarios y facilitar el análisis del vídeo.
3. Colocar la cámara lo más lejos posible de la probeta y acercarse utilizando el zoom para no tener problemas de enfoque en la probeta.
4. Siempre utilizar iluminación directa artificial en la probeta aunque parezca que se tiene buena iluminación ambiental.

### **10.4. Análisis de vídeo en Tracker**

Las recomendaciones a la hora de analizar vídeos en Tracker son las siguientes:

1. Aunque Tracker haga análisis automático se debe estar pendiente del análisis ya que muchas veces no sigue el punto original indicado al inicio del análisis.
2. Si se desea utilizar Tracker siempre seguir todos las recomendaciones de la grabación de vídeos.

- Ahart, M. (2019). Types of 3D printing Technology. <https://www.protolabs.com/resources/blog/types-of-3d-printing/>
- Amit, B., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129, 1-16.
- Ayrilmis, N., Kariz, M., Kwon, J. H., & Kuzman, M. K. (2019). Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials.
- Bayarsaikhan, E., Lim, J.-H., Shin, S.-H., Park, K.-H., Park, Y.-B., Lee, J.-H., & Kim, J.-E. (2021). Effects of Postcuring Temperature on the Mechanical Properties and Biocompatibility of Three-Dimensional Printed Dental Resin Material. *13*, 1180, 17. <https://doi.org/https://www.researchgate.net/deref/https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.3390%2Fpolym13081180>
- Bayraktar, Ö., Uzun, G., Çakiroğlu, R., & Guldaz, A. (2017). Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties.
- Beatti, N., Bock, N., Timothy, A., Trevor, E., Kloss, T., & Swason, J. (2021). Effects of Build Orientation on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-7.
- Chander, G., Jayaraman, V., & Sriram, V. (2019). Comparison of ISO and ASTM standards in determining the flexural strength of denture base resin. *53*, 3, 137-140. <https://doi.org/10.26650/eor.20190072>
- Contreras, L. (2019a). El filamento de ABS en la impresión 3D [publisher: 3D Natives]. <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/#!>
- Contreras, L. (2019b). El plástico PETG en la impresión 3D [publisher: 3D Natives]. <https://www.3dnatives.com/es/el-plastico-petg-en-la-impresion-3d-18122019/#:~:text=El%20pl%C3%A1stico%20PETG%2C%20o%20poli%C3%A9ster,como%20la%20resistencia%20del%20ABS.>
- Cura Ultimaker. (2022). Materiales [publisher: Cura Ultimaker]. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/categories/360002336619-Materials>
- de Barcelona, U. (2020). Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS). <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs>

- Denis, T. (2001). Analysis of ASTM D790-92 and its application to reinforced plastic structural members. <https://www.proquest.com/openview/785f20dbe6d0fa115ba1896b261c7ff6/I?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Forbes. (2019). 12 revolutionary ways 3D printing is changing the world. <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2019/09/18/12-revolutionary-ways-3d-printing-is-changing-the-world/?sh=30bfc0f95cfc>
- Griffey, J. (2014). The types of 3-D printing. *Library Technology Reports*. 5, 50, 8-12.
- Hajiha, R., Reichelderfer, K., Baid, H., Godines, C., & Abdi, F. (2019). Part performance of FDM printed Nylon 12CF Bracket for Cost-Effective Ground Support Equipment, 14.
- Hartmann, B., & Sudduth, D. (2020). CRC Press. En *Tensile Yield in Polymers Elastomer Technology Handbook* (pp. 259-284).
- Ixcoy, F. (2014). *Desarrollo e innovación tecnológica en el proceso de manufactura, con el uso de impresora 3D* (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Jaime, M. (2016). *Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes* (Tesis de Magister). Escuela politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Juan, L. (2016). Impresión 3D busca abrirse camino en Guatemala. <https://revistaitnow.com/impresion-3d-busca-abrirse-camino-en-guatemala/>
- Kasmi, S., Cayuela, J., Backer, B. D., Labbé, E., & Alix, S. (2021). Modified Polylactic Acid with Improved Impact Resistance in the Presence of a Thermoplastic Elastomer and the Influence of Fused Filament Fabrication on Its Physical Properties. *Journal of Composites Science*, 5(9), 232.
- Kozior, T., & Kundera, C. (2018). Surface texture of models manufactured by FDM technology. *Paper presented at the AIP Conference Proceedings*.
- Lederle, F., Frederick, M., Gabriella-Paula, B., Christian, K., & Eike, H. (2016). Improved mechanical properties of 3D-printed parts by fused deposition modeling processed under the exclusion of oxygen. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40964-016-0010-y.pdf>
- Levinson. (2020). Ensayo de tensión. <https://www.aceroslevinson.com/2020/07/ensayo-de-tension/>
- Lima, N. (2020). *Protocolo para el desarrollo de ensayos a tensión a probetas de policarbonatos impresas en 3D* (Trabajo de Graduación). Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala.
- Markforged. (2021). Material Datasheet. <http://static.markforged.com/downloads/composites-data-sheet.pdf>
- Maz Vargas, H. (2018). *Estudio de la resistencia a la tracción ya la flexión de materiales compuestos de matriz polimérica fabricados mediante impresión 3D* (Tesis de Graduación). Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú.
- Mimeo. (s.f.). 5 ways 3D printing is changing the World. <https://www.mimeo.com/blog/3d-printing-changing-the-world/>
- Nahal, A., Rajaserkhar, T., Amir, A., & Siva, N. (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. En *Polymer Testing* (pp. 94-101).
- Novak, E., Brannon, M., Librea-Carden, M. R., & Haas, A. (2021). A systematic review of empirical research on learning with 3D printing technology. 5, 37, 1455-1478.
- Ortiz, J. (2020). *Sistema de software para el control y monitoreo de un prototipo de impresora 3D de material cementante para la Dirección General de Investigación de*



- la Universidad de San Carlos de Guatemala (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Prieto, A. (2020). *Estudio comparativo entre la obtención de piezas mediante impresión 3D y su obtención mediante moldes u otros procesos de fabricación* (Licenciatura). Universitat Politècnica de Valencia. Valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/153236/Blanco%20-%20Estudio%20comparativo%20entre%20la%20obtenci%C3%B3n%20de%20piezas%20mediante%20impresoras%203D%20y%20su%20obtenci%C3%B3n%20m...pdf?sequence=4>
- Prusa, J. (2020). Ficha Técnica Prusament PETG de Prusa Polymers. [https://prusament.com/media/2020/01/PETG\\_TechSheet\\_SPA.pdf](https://prusament.com/media/2020/01/PETG_TechSheet_SPA.pdf)
- Stoklasek, P., Navratil, M., Bednařík, M., Hudeč, I., & Petrželka, D. (2018). Flexural behaviour of ABS 3D printed parts on professional printer Stratasys Fortus 900mc. *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*.
- Stratasys, C. (2018). FDM Thermoplastics: Find Your FDM Thermoplastic.
- Tanikella, N., Wittbrodt, B., & Pearce, J. (2017). Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Additive Manufacturing*, 15, 40-47.
- Ushiña, C. (2020). *Caracterización de la resistencia de los materiales de impresión 3D sometidos a químicos abrasivos* (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador.
- Walter, R., Friedrich, K., & Gurka, M. (2018). Characterization of mechanical properties of additively manufactured polymers and composites. *Paper presented at the AIP Conference Proceedings*.
- Wittbrodt, B., & Pearce, J. M. (2015). The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing*, 8, 110-116.



**12.1. Planos de construcción**

Figura 107: Plano probetas AT100P

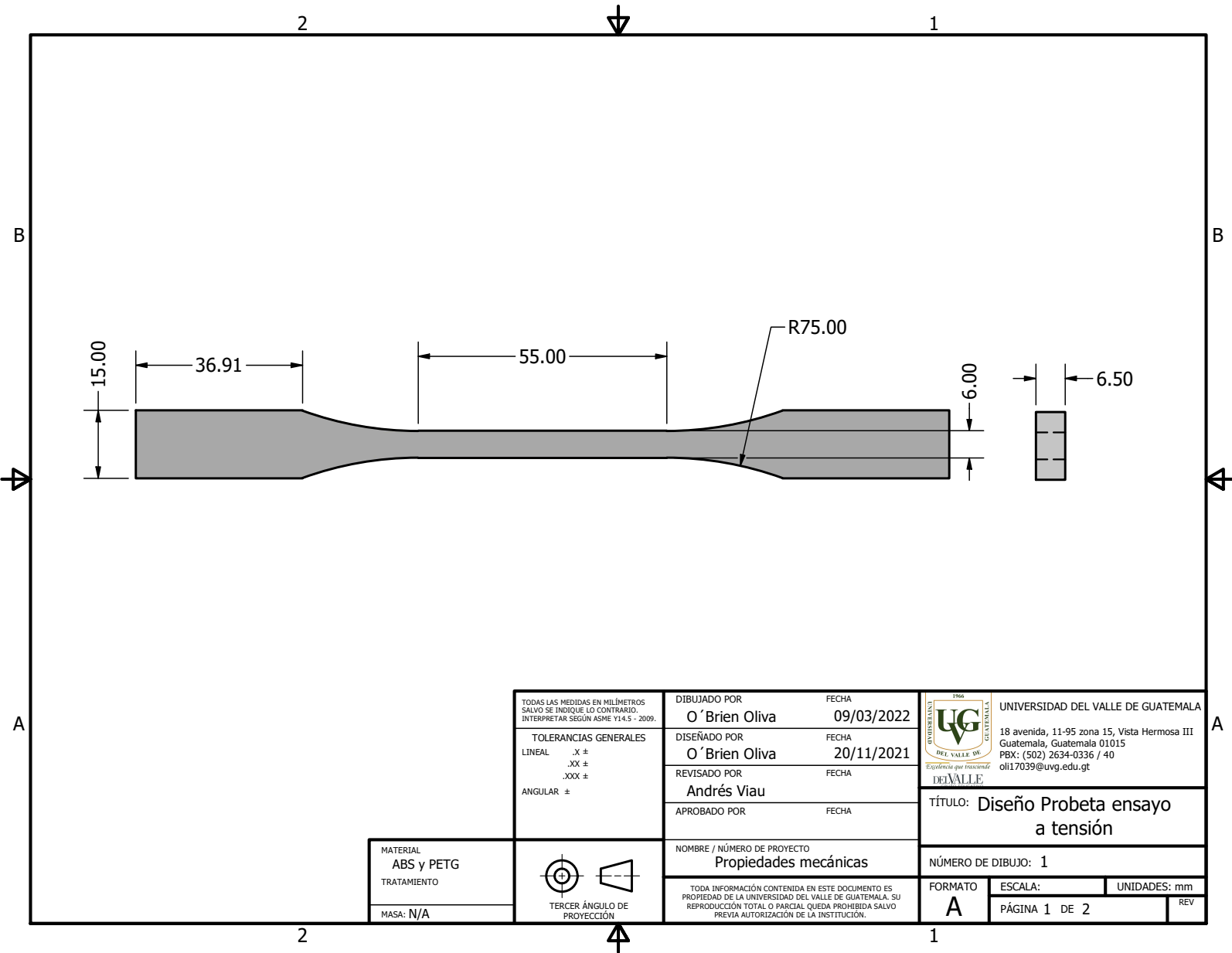
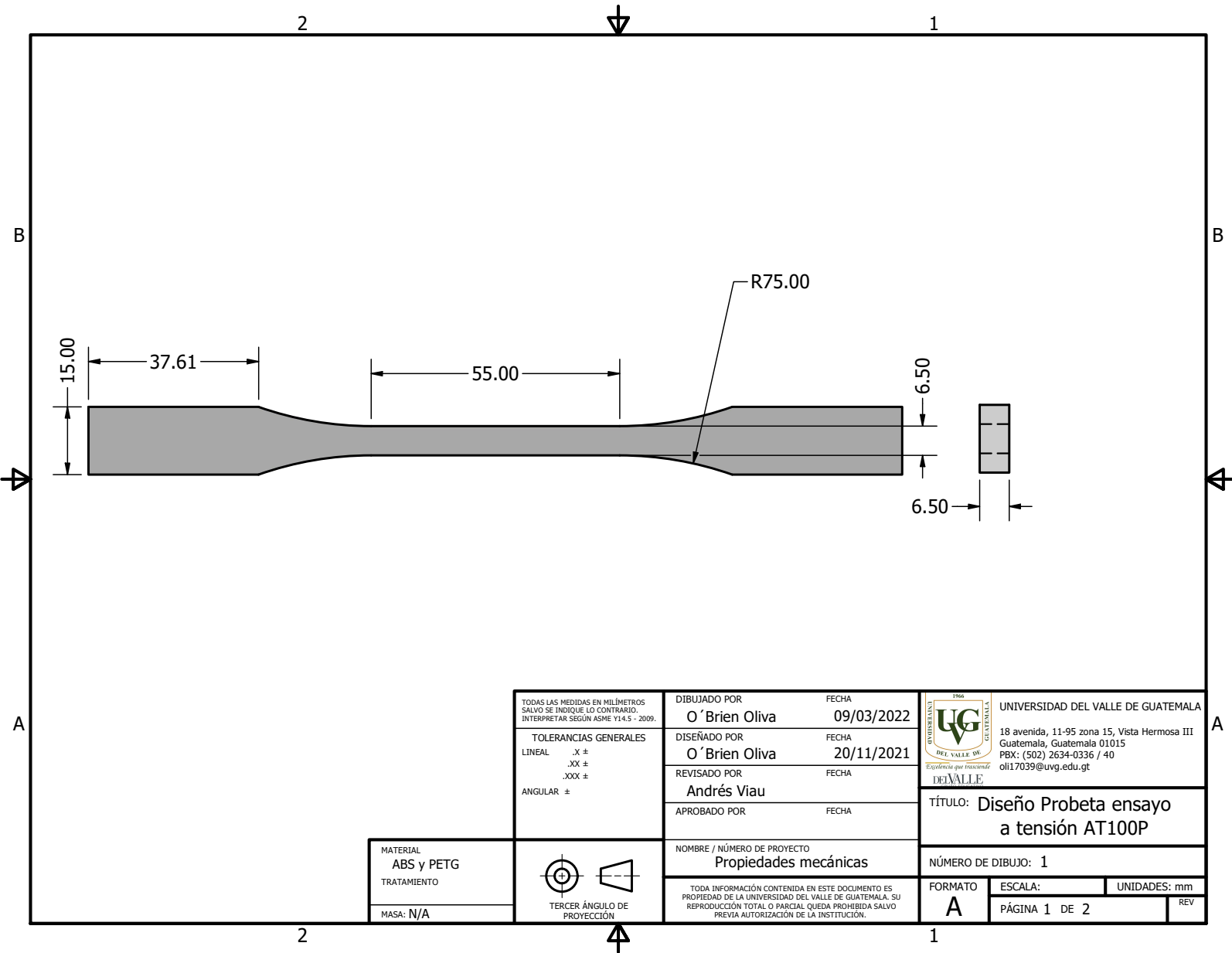


Figura 108: Plano probetas



## 12.2. Tracker

Figura 109: Elementos software Tracker

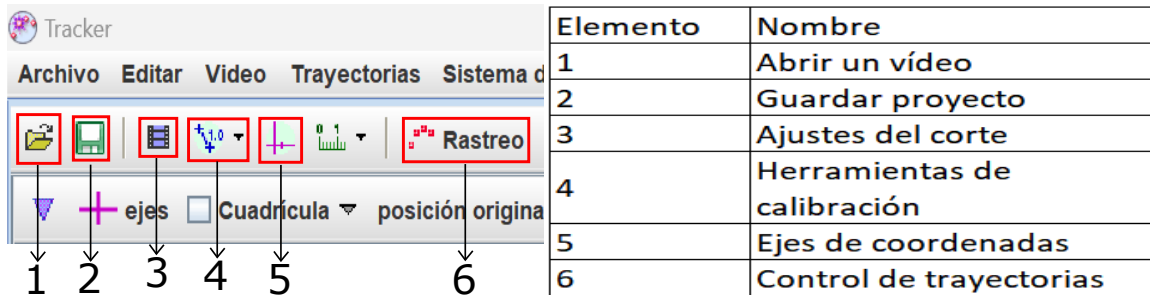


Figura 110: Ajuste de corte

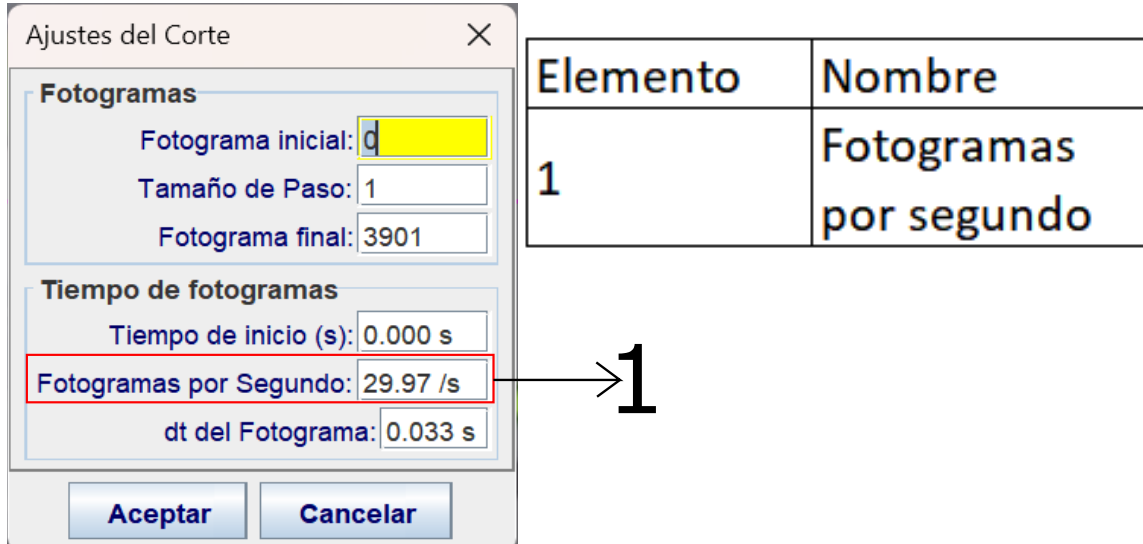


Figura 111: Exportar datos

