

## Proyecto Fin de Carrera

COMPARACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE  
LAS FUERZAS DE SEPARACIÓN DE PARTE  
PLÁSTICA E INSERTO METÁLICO EN PIEZAS  
SOBREMOLDEADAS POR INYECCIÓN

MEMORIA 1/3

Autor

Jesús López Oliván

Director

Jesús Fuentelsaz Gallego

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2015



## RESUMEN

Mediante el proceso de inyección, existe la posibilidad de inyectar o sobreinyectar materiales plásticos sobre insertos metálicos situados dentro del molde, para obtener piezas, tipo aguja para jeringuillas donde es importante que exista una fuerza de adhesión suficiente entre material plástico e inserto metálico que haga funcional el conjunto e impida que las dos partes se separen.

El objetivo de este proyecto es determinar teóricamente cuáles son esas fuerzas de adhesión para geometrías sencillas y comparar dichas fuerzas con las determinadas experimentalmente en piezas obtenidas en un molde prototípico. Las fuerzas de separación se calculan teóricamente de acuerdo con unos factores supuestos en función de las condiciones de proceso y de los materiales plásticos utilizados.

Con dicho molde, se obtendrán las piezas sobremoldeadas y se irá cambiando la superficie de sobremoldeo y las condiciones de inyección.

Para llevar a cabo este proyecto se ha llevado el siguiente esquema.

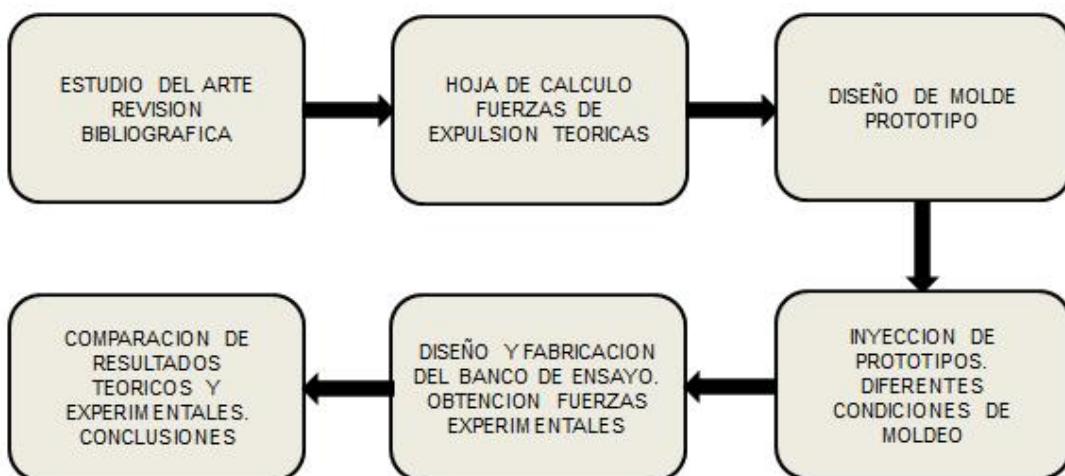


Imagen 1. Esquema de las fases del proyecto



## INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>INDICE .....</b>	<b>2</b>
<b>LISTA DE IMÁGENES.....</b>	<b>6</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>13</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>14</b>
<b>3. OBJETIVO .....</b>	<b>16</b>
<b>4. ALCANCE.....</b>	<b>17</b>
4.1. Geometrías.....	17
4.2. Material.....	18
4.2.1. Polipropileno (PP).....	18
4.2.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) .....	18



**5. METODOLOGÍA ..... 20**

**6. FORMULACIÓN TEÓRICA Y PARAMETROS EN LA  
INYECCION..... 22**

- 6.1. Sistemas de expulsión..... 22
- 6.2. Diseño de los sistemas de expulsión. Expulsión y fuerzas de apertura. 24

**7. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS DE EXPULSIÓN  
MEDIANTE EL MODELO ESTIMADO ..... 28**

- 7.1. Métodos para calcular las fuerzas de expulsión..... 30
- 7.2. El método de la estimación. ..... 31

**8. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS DE EXPULSIÓN  
MEDIANTE EL METODO TEÓRICO ..... 37**

- 8.1. Deformaciones antes de la expulsión..... 37
- 8.2. Fuerzas de expulsión ..... 44

**9. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL MOLDE Y EL INSERTO  
METÁLICO. ..... 47**

- 9.1. Diseño del molde ..... 47
  - 9.1.1. Placas de fijación (Placas C y G)..... 48
  - 9.1.2. Placa expulsión M..... 50
  - 9.1.3. Placa de expulsión L ..... 51



9.1.4. Las regletas F .....	52
9.1.5. Placa D .....	52
9.1.6. Placa E.....	53
9.2. Mecanizado del molde y los insertos metálicos .....	55
9.2.1. Fabricación del molde .....	55
9.2.2. Mecanizado por arranque de viruta.....	56
9.2.3. Montaje y ajuste del molde.....	57
9.2.4. Mecanizado de las piezas a inyectar. ....	57
<b>10. Protocolo de ensayos .....</b>	<b>60</b>
10.1. Parámetros de inyección .....	60
10.1.1. Temperatura de inyección .....	64
10.1.2. Selección de dosis. ....	66
10.2. Banco de ensayos.....	72
10.2.1. Construcción del banco de ensayo.....	72
10.2.2. Ensayo de tracción maquina instron.....	75
<b>11. RESULTADOS.....</b>	<b>78</b>
11.1. ABS .....	78
11.1.1. Piezas Ø 3,5 mm .....	79
11.1.2. Piezas Ø 4 mm .....	83
11.1.3. Piezas Ø 4,2 mm .....	87
11.1.4. Piezas Ø 5,2 mm .....	91
11.2. Polipropileno (PP) .....	95
11.2.1. Pieza Ø 3,5 .....	95



11.2.2.	Pieza Ø 4 .....	106
11.2.3.	Pieza Ø 4,2 .....	117
11.2.4.	Pieza Ø5,2 .....	128

**12. CONCLUSIONES ..... 139**

12.1.	Conclusiones personales.....	141
-------	------------------------------	-----

**13. LINEAS DE TRABAJO FUTURAS ..... 143**

**14. BIBLIOGRAFIA ..... 144**

**ANEXOS.....LIBRO 2/3**

**PLANOS.....LIBRO 3/3**



## LISTA DE IMÁGENES

<i>Imagen 1. Esquema de las fases del proyecto.....</i>	1
<i>Imagen 2. Gotero de uso hospitalario .....</i>	16
<i>Imagen 3. Geometría de la pieza.....</i>	17
<i>Imagen 4. Sistema estándar de expulsión para piezas pequeñas .....</i>	23
<i>Imagen 5. Parametros que influyen en la fuerza de expulsión.....</i>	25
<i>Imagen 6. Efecto del uso de agentes desmoldeantes en la expulsión.....</i>	26
<i>Imagen 7. Angulo de desmoldeo en función de la longitud .....</i>	28
<i>Imagen 8. Tensión y contracción de la pieza en la expulsión .....</i>	32
<i>Imagen 9. Fuerzas de expulsión en piezas tipo manguito .....</i>	33
<i>Imagen 10. Contracción de la pieza en función del tiempo.....</i>	34
<i>Imagen 11. Diagrama de flujo para el calculo de fuerzas de expulsión por el metodo estimado.....</i>	36
<i>Imagen 12. Sección trasversal en la solidificación de la pieza .....</i>	37
<i>Imagen 13. Sección trasversal de la pieza en el interior del molde.....</i>	41
<i>Imagen 14. Diagrama de fuerzas antes de la expulsión.....</i>	44
<i>Imagen 15.Fuerzas en la expulsión.....</i>	45
<i>Imagen 16. Fotografias del molde que se ha utilizado.....</i>	47
<i>Imagen 17. Placa G y detalles de los expulsores .....</i>	48
<i>Imagen 19. Sección trasversal del bebedero .....</i>	49
<i>Imagen 18. Placa G (fijación, disco y boquilla).....</i>	49
<i>Imagen 19. Placa de expulsión M.....</i>	50
<i>Imagen 20. Actuador.....</i>	50
<i>Imagen 21. Placa de expulsión L.....</i>	51
<i>Imagen 22. Conjunto de placas expulsoras y expulsores de colada .....</i>	51
<i>Imagen 23. Regletas del molde .....</i>	52
<i>Imagen 24. Placa del molde D .....</i>	52
<i>Imagen 25. Placa fija .....</i>	53
<i>Imagen 26. Canales, llave de colada, expulsores y cavidad de pieza.....</i>	54
<i>Imagen 27. Sección de entrada de material a la cavidad.....</i>	54
<i>Imagen 28. Inserto metálico.....</i>	59
<i>Imagen 29. Colocación del molde en la inyectora.....</i>	60
<i>Imagen 30. Tolva de secado .....</i>	61



<i>Imagen 31. Conducto de salida para vaciar la máquina de material.</i> .....	62
<i>Imagen 32. Placa fija con el canal tapado para inyección .....</i> .....	63
<i>Imagen 33. Parametros de temperatura.....</i> .....	64
<i>Imagen 34. Selección de dosis .....</i> .....	66
<i>Imagen 35. Inyección en vacío de la pieza .....</i> .....	67
<i>Imagen 36. Grafica de presión en la inyección en vacío.....</i> .....	67
<i>Imagen 37. Fotografia de una pieza inyectada.....</i> .....	70
<i>Imagen 39. Conjunto de piezas inyectadas antes de realizar los ensayos de tracción ..</i> ..	71
<i>Imagen 40. Diseño 3D del banco de ensayo.....</i> .....	73
<i>Imagen 41. Fotografia cancamo y tuerca hexagonal para piezas roscadas M3.....</i> ..	73
<i>Imagen 42. Montaje del banco de ensayo .....</i> .....	74
<i>Imagen 43. Banco de ensayo.....</i> .....	74
<i>Imagen 44. Ensayo de tracción.....</i> .....	75
<i>Imagen 45. Imagen del ordenador durante el ensayo de tracción .....</i> ..	76
<i>Imagen 46. Grafica de la fuerza de expulsión obtenida en la maquina instron.....</i> ..	77
<i>Imagen 47. Fractura con el material ABS.....</i> .....	77
<i>Imagen 52. Resultados estimación-teorico pieza 2. ABS 220ºC.....</i> .....	83
<i>Imagen 53. Resultados estimación-teorico pieza 2. ABS 260ºC.....</i> .....	84
<i>Imagen 54. Resultados estimación pieza 2. ABS .....</i> .....	85
<i>Imagen 55. Resultados teorico pieza 2. ABS.....</i> .....	86
<i>Imagen 56. Resultados estimación-teorico pieza 3. ABS 220ºC.....</i> .....	87
<i>Imagen 57. Resultados estimación-teorico pieza 3. ABS 260ºC.....</i> .....	88
<i>Imagen 58. Resultados estimación pieza 3. ABS .....</i> .....	89
<i>Imagen 59. Resultados teorico pieza 3. ABS.....</i> .....	90
<i>Imagen 60. Resultados estimación-teorico pieza 4. ABS 220ºC.....</i> .....	91
<i>Imagen 61. Resultados estimación-teorico pieza 4. ABS 260ºC.....</i> .....	92
<i>Imagen 62. Resultados estimación pieza 4. ABS .....</i> .....	93
<i>Imagen 63. Resultados teorico pieza 4. ABS 260ºC.....</i> .....	94
<i>Imagen 64. Resultados estimación-teorico-real pieza 1. PP. 220ºC.....</i> .....	95
<i>Imagen 65. Resultados estimación -real pieza 1. PP. 220ºC .....</i> .....	96
<i>Imagen 66. Resultados teorico-real pieza 1. PP. 220ºC.....</i> .....	97
<i>Imagen 67. Resultados estimación-teorico pieza 1. PP. 220ºC .....</i> .....	98
<i>Imagen 69. Resultados estimación -real pieza 1. PP. 260ºC .....</i> .....	100
<i>Imagen 71. Resultados estimación-teorico pieza 1. PP. 260ºC .....</i> .....	102



<i>Imagen 72. Resultados estimación pieza 1. PP.</i> .....	103
<i>Imagen 73. Resultados teórico pieza 1. PP.</i> .....	104
<i>Imagen 74. Resultados real pieza 1. PP.</i> .....	105
<i>Imagen 75. Resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 220°C.</i> .....	106
<i>Imagen 76. Resultados estimación-real pieza 2. PP. 220°C.</i> .....	107
<i>Imagen 77. Resultados teórico-real pieza 2. PP. 220°C.</i> .....	108
<i>Imagen 78. Resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 220°C.</i> .....	109
<i>Imagen 79. Resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 260°C.</i> .....	110
<i>Imagen 80. Resultados estimación-real pieza 2. PP. 260°C.</i> .....	111
<i>Imagen 81. Resultados teórico-real pieza 2. PP. 260°C.</i> .....	112
<i>Imagen 82. Resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 260°C.</i> .....	113
<i>Imagen 83. Resultados estimación pieza 2. PP.</i> .....	114
<i>Imagen 84. Resultados teórico pieza 2. PP.</i> .....	115
<i>Imagen 85. Resultados real pieza 2. PP.</i> .....	116
<i>Imagen 86. Resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 220°C.</i> .....	117
<i>Imagen 87. Resultados estimación -real pieza 3. PP. 220°C.</i> .....	118
<i>Imagen 88. Resultados teórico-real pieza 3. PP. 220°C.</i> .....	119
<i>Imagen 89. Resultados estimación-teórico pieza 3. PP. 220°C.</i> .....	120
<i>Imagen 90. Resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 260°C.</i> .....	121
<i>Imagen 91. Resultados estimación -real pieza 3. PP. 260°C.</i> .....	122
<i>Imagen 92. Resultados teórico-real pieza 3. PP. 260°C.</i> .....	123
<i>Imagen 93. Resultados estimación-teórico pieza 3. PP. 260°C.</i> .....	124
<i>Imagen 94. Resultados estimación pieza 3. PP.</i> .....	125
<i>Imagen 95. Resultados teórico pieza 3. PP.</i> .....	126
<i>Imagen 96. Resultados real pieza 3. PP.</i> .....	127
<i>Imagen 97. Resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 220°C.</i> .....	128
<i>Imagen 98. Resultados estimación -real pieza 4. PP. 220°C.</i> .....	129
<i>Imagen 99. Resultados teórico-real pieza 4. PP. 220°C.</i> .....	130
<i>Imagen 100. Resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 220°C.</i> .....	131
<i>Imagen 101. Resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 260°C.</i> .....	132
<i>Imagen 102. Resultados estimación -real pieza 4. PP. 260°C.</i> .....	133
<i>Imagen 103. Resultados teórico-real pieza 4. PP. 260°C.</i> .....	134
<i>Imagen 104. Resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 260°C.</i> .....	135
<i>Imagen 105. Resultados estimación pieza 4. PP.</i> .....	136



*Imagen 106. Resultados teórico pieza 4. PP. 260°C..... 137\_Toc421733659*

*Imagen 107. Resultados real pieza 4. PP. 260°C..... 138*



## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Dimensiones de la geometría utilizada .....</i>	17
<i>Tabla 2. Parámetros que disminuyen las fuerzas de expulsión .....</i>	27
<i>Tabla 3. Coeficientes de fricción plástico-metal.....</i>	30
<i>Tabla 4. Temperaturas de la zona de husillo para inyectar a 220ºC.....</i>	65
<i>Tabla 5. Temperaturas de la zona de husillo para inyectar a 220ºC.....</i>	65
<i>Tabla 6. Temperaturas de la zona de husillo para inyectar a 220ºC.....</i>	65
<i>Tabla 7. Presiones a inyectar en la pieza 1 con PP .....</i>	68
<i>Tabla 8. Presiones a inyectar en la pieza 2 con PP .....</i>	68
<i>Tabla 9. Presiones a inyectar en la pieza 3 con PP .....</i>	68
<i>Tabla 10. Presiones a inyectar en la pieza 4 con PP .....</i>	68
<i>Tabla 11. Presiones a inyectar en la pieza 1 con ABS .....</i>	68
<i>Tabla 12. Presiones a inyectar en la pieza 2 con ABS .....</i>	69
<i>Tabla 13. Presiones a inyectar en la pieza 3 con ABS .....</i>	69
<i>Tabla 14. Presiones a inyectar en la pieza 4 con ABS .....</i>	69
<i>Tabla 15. Presiones a inyectar en la pieza 1 con PP. 2º ensayo .....</i>	69
<i>Tabla 16. Presiones a inyectar en la pieza 2 con PP. 2º ensayo .....</i>	69
<i>Tabla 17. Presiones a inyectar en la pieza 3 con PP. 2º ensayo .....</i>	70
<i>Tabla 18. Presiones a inyectar en la pieza 4 con PP. 2º ensayo .....</i>	70
<i>Tabla 19. Listado de materiales del banco de ensayo.....</i>	72
<i>Tabla 20. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 220ºC.....</i>	79
<i>Tabla 21. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 260ºC.....</i>	80
<i>Tabla 22. Comparación resultados estimación pieza 1. ABS .....</i>	81
<i>Tabla 23. Comparación resultados teórico pieza 1. ABS .....</i>	82
<i>Tabla 24. Comparación resultados estimación-teórico pieza 2. ABS 220ºC.....</i>	83
<i>Tabla 25. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 260ºC.....</i>	84
<i>Tabla 26. Comparación resultados estimación pieza 2. ABS .....</i>	85
<i>Tabla 27. Comparación resultados teórico pieza 2. ABS .....</i>	86
<i>Tabla 28. Comparación resultados estimación-teórico pieza 3. ABS 220ºC.....</i>	87
<i>Tabla 29. Comparación resultados estimación-teórico pieza 3. ABS 260ºC.....</i>	88
<i>Tabla 30. Comparación resultados estimación pieza 3. ABS .....</i>	89
<i>Tabla 31. Comparación resultados teórico pieza 3. ABS .....</i>	90
<i>Tabla 32. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. ABS 220ºC.....</i>	91



Tabla 33. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. ABS 220°C.....	92
Tabla 34. Comparación resultados estimación pieza 4. ABS .....	93
Tabla 35. Comparación resultados teórico pieza 4. ABS .....	94
Tabla 36. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 1. PP. 220°C .....	95
Tabla 37. Comparación resultados estimación-real pieza 1. PP. 220°C.....	96
Tabla 38. Comparación resultados teórico-real pieza 1. PP. 220°C .....	97
Tabla 39. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. PP. 220°C.....	98
Tabla 40. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 1. PP. 260°C .....	99
Tabla 41. Comparación resultados estimación-real pieza 1. PP. 260°C.....	100
Tabla 42. Comparación resultados teórico-real pieza 1. PP. 260°C .....	101
Tabla 43. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. PP. 260°C.....	102
Tabla 44. Comparación resultados estimación pieza 1. PP.....	103
Tabla 45. Comparación resultados teórico pieza 1. PP. ....	104
Tabla 46. Comparación resultados real pieza 1. PP. ....	105
Tabla 47. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 220°C .....	106
Tabla 48. Comparación resultados estimación-real pieza 2. PP. 220°C.....	107
Tabla 49. Comparación resultados teórico-real pieza 2. PP. 220°C .....	108
Tabla 50. Comparación resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 220°C.....	109
Tabla 51. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 260°C .....	110
Tabla 52. Comparación resultados estimación -real pieza 2. PP. 260°C.....	111
Tabla 53. Comparación resultados teórico-real pieza 2. PP. 260°C .....	112
Tabla 54. Comparación resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 260°C.....	113
Tabla 55. Comparación resultados estimación pieza 2. PP. ....	114
Tabla 56. Comparación resultados teórico pieza 2. PP. ....	115
Tabla 57. Comparación resultados real pieza 2. PP. ....	116
Tabla 58. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 220°C .....	117
Tabla 59. Comparación resultados estimación -real pieza 3. PP. 220°C.....	118
Tabla 60. Comparación resultados teórico-real pieza 3. PP. 220°C .....	119
Tabla 58. Comparación resultados estimación-teórico pieza 3. PP. 220°C.....	120
Tabla 59. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 260°C .....	121
Tabla 60. Comparación resultados estimación -real pieza 3. PP. 260°C.....	122
Tabla 61. Comparación resultados teórico-real pieza 3. PP. 260°C .....	123
Tabla 62. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 260°C .....	124
Tabla 63. Comparación resultados estimación pieza 3. PP. ....	125



<i>Tabla 64. Comparación resultados teórico-real pieza 3. PP.....</i>	126
<i>Tabla 65. Comparación resultados real pieza 3. PP. ....</i>	127
<i>Tabla 66. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 220°C .....</i>	128
<i>Tabla 67. Comparación resultados estimación -real pieza 4. PP. 220°C.....</i>	129
<i>Tabla 68. Comparación resultados teórico-real pieza 4. PP. 220°C.....</i>	130
<i>Tabla 69. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 220°C.....</i>	131
<i>Tabla 70. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 260°C .....</i>	132
<i>Tabla 71. Comparación resultados estimación -real pieza 4. PP. 260°C.....</i>	133
<i>Tabla 72. Comparación resultados teórico-real pieza 4. PP. 260°C .....</i>	134
<i>Tabla 73. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 260°C.....</i>	135
<i>Tabla 74. Comparación resultados estimación pieza 4. PP. 260°C .....</i>	136
<i>Tabla 75. Comparación resultados teórico pieza 4. PP. 260°C.....</i>	137
<i>Tabla 76. Comparación resultados real pieza 4. PP. 260°C.....</i>	138



## **1. INTRODUCCION**

El proyecto que se desarrolla a continuación se titula “COMPARACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE SEPARACIÓN DE PARTE PLÁSTICA E INSERTO METÁLICO EN PIEZAS SOBREMOLDEADAS POR INYECCIÓN” y ha sido dirigido por Jesús Fuentelsaz Gallego profesor del Área de Ingeniería Mecánica.

Para llevar a cabo este proyecto se ha contado con el equipamiento del T.I.I.P. en el taller de mecanizado de prototipos situado en el edificio Torres Quevedo del campus Rio Ebro.

El equipamiento utilizado a lo largo de todo desarrollo del PFC ha sido: torno convencional, fresadora de cinco ejes para mecanizado, Muela rectificadora, arco de sierra, tolva secadora, Maquina de inyección.

Además para la realización de los ensayos de tracción se ha utilizado una máquina de ensayos Instron perteneciente al departamento de Ingeniería mecánica de la Universidad de Zaragoza y que se encuentra situado en el edificio Betancourt del Campus Rio Ebro



## 2. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, se ha incrementado la demanda de productos cuya materia prima es el plástico. Muchos productos que eran fabricados en otras materias se están desarrollando en la actualidad con materiales plásticos, debido en gran medida a su comportamiento y coste.

Uno de los sistemas más representativos de los procesos de fabricación de estos materiales es la inyección. Por este motivo en este proyecto se va a tratar de desarrollar un producto que vamos a intentar modificar su proceso de fabricación haciendo que se realice mediante la sobre inyección.

Concretamente se va a inyectar sobre expulsores de pequeño diámetro, para comprobar mediante cálculos teóricos y experimentales, las fuerzas que vamos a tener que aplicar para separar dichos materiales.

Para diseñar una pieza de plástico, se deben de tener numerosas variables a considerar pues su influencia es muy importante en el desarrollo del producto. El diseñador debe tener especial cuidado a la hora de tomar en cuenta los parámetros cuya influencia puede ser importante en el desarrollo del proyecto. Estas variables son las involucradas en cada uno de los pasos intermedios existentes entre la aparición del concepto inicial del producto y su fabricación. Por lo tanto, el diseñador debe conocer las particularidades de los materiales con los que trabaja, las condiciones operativas de la pieza, las que impone el método de fabricación y la viabilidad económica del proyecto.

La tarea es a menudo compleja y, en muchas ocasiones, los resultados no siempre concuerdan con la idea original o bien esta idea debe ser replanteada ante la imposibilidad de su puesta en práctica. La forma tradicional de abordar el diseño de una pieza de plástico inyectada parte de una propuesta básica junto con la elección de un determinado material. A continuación, y siguiendo etapas secuenciales, el modelo se depura a fin de conseguir las características de rigidez y consistencia deseadas. Sin embargo, cuestiones como la influencia de las condiciones de transformación sobre el comportamiento posterior de la pieza o la consideración de las acciones externas que la misma pudiera soportar a lo largo de su vida útil, extremadamente difíciles de evaluar a priori, obligan a trabajar con un elevado nivel de



incertidumbre y a emplear factores de seguridad elevados. Esto lleva a fabricar artículos sobredimensionados o con grandes espesores de pared.

Por otra parte, el máximo espesor de los artículos inyectados está limitado por el proceso de inyección y las contracciones que sufre el material en el interior del molde. Así pues, para obtener idénticas prestaciones mecánicas con espesores reducidos, la pieza debe nervarse de forma abundante con los procesos tradicionales.

La propia naturaleza iterativa del diseño en ingeniería ha hecho que la consecución de un diseño óptimo requiera de la realización de numerosas pruebas, pues cada cambio efectuado en una etapa puede eventualmente afectar al resto.

Asimismo, la presencia de un equipo experto ha sido condición imprescindible para acometer con garantías de éxito la construcción del molde de inyección, asegurar la fiabilidad de la pieza y pasar a su fabricación en serie.



### 3. OBJETIVO

La necesidad de este proyecto fin de carrera surge de la idea de cambiar el proceso de fabricación en las agujas para jeringuillas y el ejemplo más claro se trataría de un gotero sanitario. Actualmente estos están formados por una bolsa donde se encuentra el líquido que queremos suministrar y mediante una aguja y una sonda pinchamos sobre un tapón en la bolsa y se regula el caudal según las necesidades.



Imagen 2. Gotero de uso hospitalario

La principal idea a desarrollar es calcular y conocer las fuerzas de adhesión que se producen en la unión metal-plástico en geometrías sencillas para poder desarrollar un nuevo diseño de estos productos.

Para ello lo primero que se ha hecho es determinar los parámetros que tienen influencia en el proceso de sobreinyección sobre piezas tubulares de pequeño diámetro y diseñar una hoja de cálculo en Excel que mediante estos parámetros nos permite calcular de manera teórica las fuerzas de expulsión.

En el taller se ha diseñado un molde que mediante expulsores tubulares que serán sobreinyectados nos permitirá obtener los valores experimentales de dichas fuerzas y así poder comprobar los resultados obtenidos y validar la hoja de cálculo que se ha creado.



## 4. ALCANCE.

### 4.1. Geometrías.

Para la realización de este proyecto las geometrías que se van a usar van a ser manguitos cilíndricos. En concreto se van a utilizar dos manguitos de diámetro exterior 8 milímetros y dos manguitos de diámetro exterior 6 milímetros. Con estos diámetros y mediante el catálogo de VAP hemos seleccionado los de mayor y menor radio interior posible para poder comparar la influencia de la geometría en los valores de la fuerza expulsión.

Diámetro interior (R <sub>i</sub> ) mm	Grosor (S <sub>f</sub> ) mm	Diámetro exterior (D <sub>e</sub> ) mm	Longitud (L) mm
2,6	1,4	8	7
2,1	1,9	8	7
2	1	6	7
1,75	1,25	6	7

Tabla 1. Dimensiones de la geometría utilizada

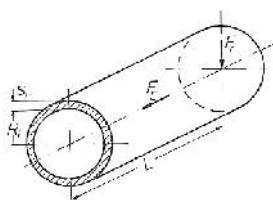


Imagen 3. Geometría de la pieza



## 4.2. Material.

Para el desarrollo de este proyecto se van a utilizar dos materiales plásticos diferentes. El polipropileno (PP) un material semicristalino y el acrilonitrilo butadieno estireno más conocido como ABS que se trata de un material amorfo

### 4.2.1. Polipropileno (PP).

El polipropileno (PP) es el polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). Pertenece al grupo de las poliolefinas y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes. Tiene gran resistencia contra diversos solventes químicos, así como contra álcalis y ácidos.

Sus principales propiedades son:

- Menor densidad: el PP tiene un peso específico entre 0,9 g/cm<sup>3</sup> y 0,91 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el peso específico del PEBD (polietileno de baja densidad) oscila entre 0,915 y 0,935, y el del PEAD (polietileno de alta densidad) entre 0,9 y 0,97 (en g/cm<sup>3</sup>)
- Temperatura de reblandecimiento más alta
- Gran resistencia al stress cracking
- Mayor tendencia a ser oxidado (problema normalmente resuelto mediante la adición de antioxidantes)
- El PP tiene un grado de cristalinidad intermedio entre el polietileno de alta y el de baja densidad.

### 4.2.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) es un plástico resistente al impacto muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Termoplástico Amorfo.

Los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado.



La resistencia al impacto de los plásticos ABS se ve incrementada al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno pero disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y disminuye la temperatura de deformación por calor.

El amplio rango de propiedades que exhibe el ABS es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes.

El acrilonitrilo proporciona:

- Resistencia térmica
- Resistencia química
- Resistencia a la fatiga
- Dureza y rigidez

El butadieno proporciona:

- Ductilidad a baja temperatura
- Resistencia al impacto
- Resistencia a la fusión

El estireno proporciona:

- Facilidad de procesado (fluidez)
- Brillo
- Dureza y rigidez

En los anexos se encuentra más información sobre estos dos materiales plásticos



## 5. METODOLOGÍA

Una de las primeras cosas que se ha de realizar en este y la mayoría de proyecto es realizar un estudio de la documentación. Se requiere conocer el estado del arte para saber cuál es el punto inicial de partida y los objetivos que se deben cumplir para la correcta elaboración de este PFC. Particularmente para este trabajo se ha buscado toda la información tanto en libros de consulta, como en tesis doctorales y artículos de investigación. Siendo de gran ayuda durante todo el trabajo realizado el libro “how to make injection molds” de Menges.

El principal objetivo como el título indica es la comparación de las fuerzas de adhesión entre parte plástica y parte metálica entre las ecuaciones teóricas y los valores experimentales. Por ello se ha partido de dos ecuaciones principales. Una teórica y otra de estimación con las que se ha realizado una hoja de cálculo donde en función de algunos parámetros de inyección como la temperatura de inyección, la presión de compactación, material, geometría... etc., se obtienen unos valores de fuerza de adhesión

Esta es una de las partes más importantes y difíciles en la ingeniería. La verificación y validación tanto de ecuaciones experimentales como modelos de análisis. Los resultados obtenidos en ecuaciones luego se utilizan para aplicaciones en un sistema real son por ello por lo que resulta de gran importancia que hayan sido verificadas anteriormente.

Una vez que obtuve unos valores de referencia y que las ecuaciones mostraban unos valores coherentes se decide sobre que geometría se va a ensayar y que se va a necesitar para el correcto funcionamiento de los ensayos, diseño de un molde, banco de ensayos.

Para comenzar con los ensayos se elige un molde tipo con expulsores para que en estos se sobreinyecte el material. Mediante el catálogo Vap se seleccionan cuatro expulsores diferentes de pequeño tamaño y sobre ellos se comienza a diseñar el molde. Al tratarse de tamaños muy pequeños de pieza se elige un tamaño de molde pequeño con este catálogo también y se selecciona el tamaño de placa apropiada, el alojamiento de las piezas etc...

Para este diseño se utiliza la herramienta de diseño en 3D ProEngineer, en la actualidad PTC Creo Elements. Con ella se dibujan todas las placas y piezas que formaran el



molde de inyección, el ensamblaje del conjunto y los planos de fabricación para mecanizar el molde.

Con la fresadora del taller de prototipado del TIIP, se mecanizan las placas en función de los planos que se diseñan y se realiza el montaje del molde para posteriormente comprobar que funciona correctamente.

La idea inicial era inyectar el material sobre los expulsores y seleccionando el valor de la fuerza de expulsión de la maquina inyectora obtener el resultado de las fuerzas de adhesión, pero al tratarse de piezas de un tamaño tan pequeño los valores que se obtenían no eran válidos.

Por este motivo se debió de realizar un rediseño del molde y se necesitó buscar nuevas soluciones. Finalmente se consideró que la mejor opción era introducir unos insertos metálicos dentro del molde donde se inyectaría el material y con la pieza resultante realizar el ensayo de tracción con la máquina “Instron” del departamento de ingeniería mecánica.

Es por ello por lo que hubo que diseñar paralelamente a los insertos metálicos un banco de ensayo que se pudiera utilizar en la máquina anteriormente mencionada. Este banco de ensayo requería que se pudiera colocar la pieza a ensayar y que se pudiera instalar en la máquina de ensayo de tracción.

Una de las condiciones que se puso para el diseño de este banco de ensayo fue la utilización del material disponible en el taller para ahorrar en costes, así que se buscó lo que pudiera interesar, varillas roscadas, placas metálicas, etc. y en base a ello se realizó el diseño y la posterior fabricación utilizando la fresadora, el torno, la muela y el arco de sierra.

Con los diseños ya realizados y todo el material ya fabricado. Se colocó el molde de inyección maquina Mateu Sole que se encuentra en el taller y se realizaron las piezas con los distintos parámetros de inyección. Temperatura de inyección 220°C, 240°C y 260°C, Presión en vacío, presión de compactación que se tomó la presión en vacío al 60%, 100%, 130% 150% inicialmente pero que posteriormente debido a los problemas surgidos con el ABS se tuvieron que redefinir y utilizar el 75%, 100%, 150% y 200% respectivamente así como solo tomar las temperaturas de los extremos para apreciar con mayor claridad como afectaba este parámetro.



Con estas piezas se ha procedido a realizar un ensayo de tracción utilizando la maquina instron a una velocidad de 5 mm/s y finalmente se han extraído los datos y creado los resultados para su posterior comparación.

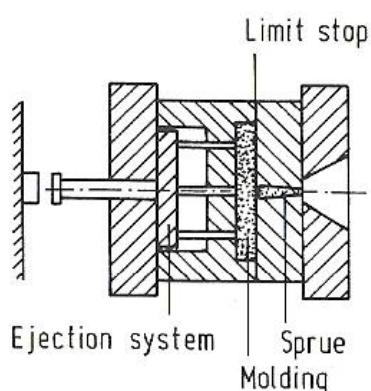
## 6. FORMULACIÓN TEÓRICA Y PARAMETROS EN LA INYECCION.

### 6.1. Sistemas de expulsión

Después de la inyección, la pieza tiene que solidificar y enfriarse para retirarla del molde.

Sería perfecto si la gravedad pudiera separar la pieza directamente del molde cuando este se abre. Sin embargo esto no es así y la pieza moldeada se mantiene pegada a la cavidad por las tensiones internas, la contracción y las fuerzas que en el moldeo se producen. Por tanto tiene que ser separada del molde mediante unos sistemas especiales de expulsión.

Los sistemas de expulsión generalmente funcionan mediante sistemas mecánicos que se activan con la carrera de apertura del molde. Pero si esta simple disposición no es suficiente, La expulsión puede realizarse mediante sistemas neumáticos o hidráulicos. Los sistemas de expulsión manuales solo se utilizan para pequeños prototipos de molde y series pequeñas donde las fuerzas que se producen son suficientes para activar la expulsión.





*Imagen 4. Sistema estándar de expulsión para piezas pequeñas*

El sistema de expulsión está situado en la parte móvil del molde. Al abrir el molde se activan los actuadores mecánicos de expulsión que se mueven hacia la línea de partición para separar el molde. Las condiciones iniciales para este procedimiento es que la pieza inyectada se encuentre en la parte móvil del molde. Esto se logra mediante fuerzas o permitiendo la contracción de la pieza dentro de la cavidad que ha sido inyectada. Sin embargo se utilizan siempre superficies cónicas para evitar la adhesión de la pieza al molde.

Mantener la pieza en la parte móvil del molde puede ser un problema si la cavidad está en la otra parte del molde. Si esto ocurre se debe evitar mediante sistemas más complejos de desmoldeo.



## 6.2. Diseño de los sistemas de expulsión. Expulsión y fuerzas de apertura.

Una vez elegidas la geometría y el material de la pieza se pueden calcular las fuerzas de expulsión y determinar la posición de la pieza dentro del molde.

Para un diseño detallado de los sistemas de expulsión (número, localización, tipo de expulsores) es importante conocer sus fuerzas de expulsión. La magnitud de estas fuerzas pueden indicarnos también la necesidad de cambiar la posición de la pieza dentro del molde decantarnos por un modelo de expulsión u otro. Además conociendo dichas fuerzas y los parámetros que le afectan es posible reducir dichas fuerzas con pequeños cambios en la configuración.

Si no tenemos un conocimiento muy extenso del comportamiento del plástico que utilicemos en la expulsión se puede incluso provocar una avería en el molde, especialmente en los nuevos. Esto supondría un aumento amplio en los costes del molde.

Básicamente existen dos fuerzas.

**1. Fuerzas de apertura.** Son generadas por el molde si se atasca con una pequeña contracción o por demasiada deformación.

**2. Fuerzas de expulsión** que se dividen en.

- Fuerzas de relajación: Están presentes en todas las piezas con núcleo y se forman debido a la contracción producida por el moldeo dentro del núcleo. Se pueden observar también unos finos nervios con una pequeña inclinación. Esto se debe a la fractura de laminillas que forman los nervios.
- Fuerzas de empuje: Surgen por una inclinación insuficiente del núcleo como resultado de la fricción entre la pieza y el núcleo



Por tanto las fuerzas de apertura producen muchas menos dificultades que las de expulsión que requieren de un diseño competente previo.

Los parámetros que afectan a las fuerzas de expulsión se pueden observar en la siguiente figura

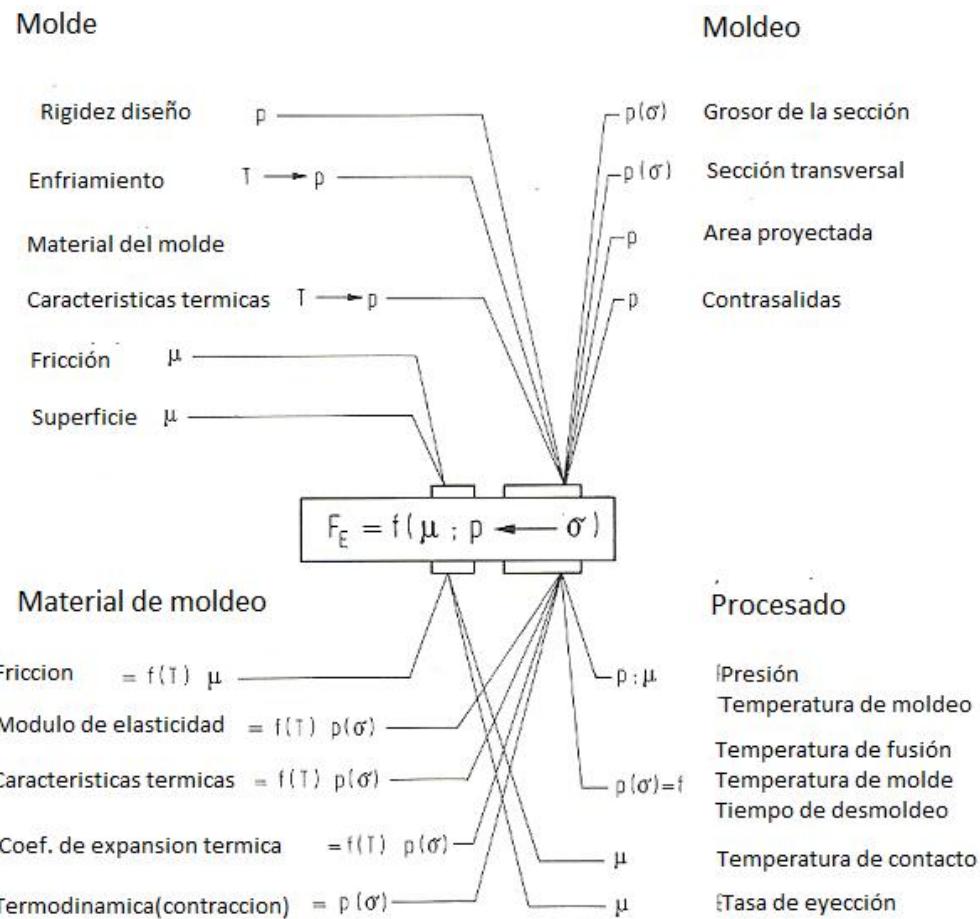


Imagen 5. Parámetros que influyen en la fuerza de expulsión

Donde podemos dividir los parámetros en cuatro grupos generales como:

- Molde
- Moldeo
- Material de moldeo
- Procesado



En la elaboración de este proyecto se ha trabajado con piezas de tipo manguito, por tanto todos los experimentos que se van a realizar y los datos obtenidos son para este tipo de piezas.

Por ejemplo en la figura inferior se puede observar como por ejemplo para una misma pieza y parámetros de inyección varían las fuerzas de expulsión según si se utiliza un agente desmoldeante o no.

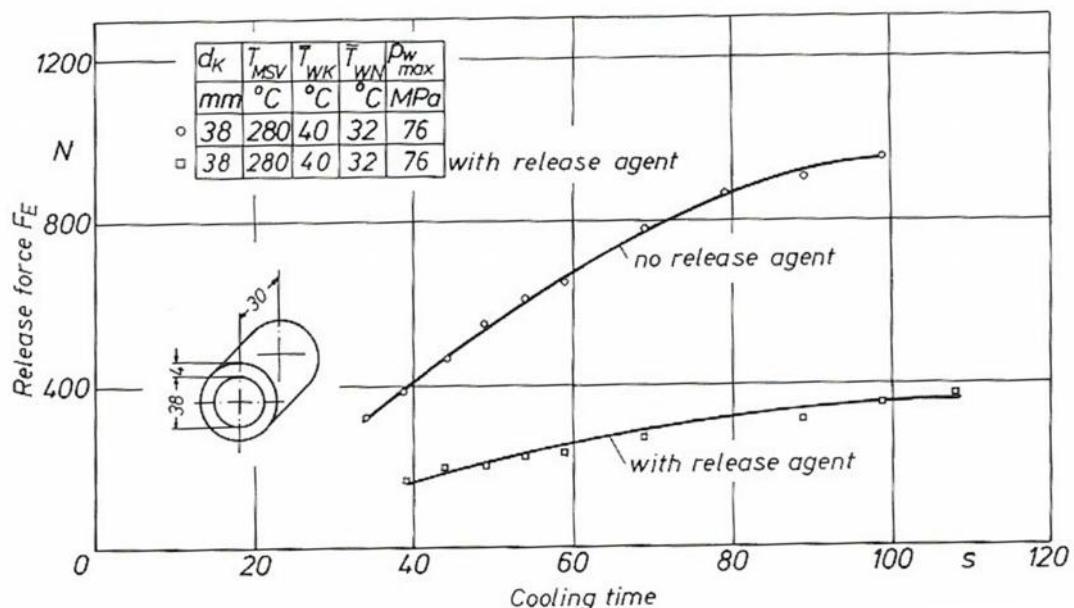


Imagen 6. Efecto del uso de agentes desmoldeantes en la expulsión



Parametro	Magnitud del efecto	Dirección de cambio	Observaciones
Tiempo de enfriamiento $t_E$	3	↓	-
Temperatura media de la expulsión $T_E$	3	↑	-
Temperatura del nucleo $T_{wk}$	3	↓	$T_E = \text{cte.}$
	3	↑	$t_k = \text{cte.}$
Temperatura de la cavidad $t_{wn}$	3	↓	$T_E = \text{cte.}$
	3	↑	$t_k = \text{cte.}$
Temperatura de fusión $t_M$	0-1	↑ ↓	-
Presión en la inyección $p_E$	1	↑ ↓	-
Velocidad de inyección $V_E$	1-2	↑	$t_k = \text{cte.}$
Presión de mantenimiento $p_E$	1-2	↑	$t_k = \text{cte. or } T_E = \text{cte.}$
Tiempo ejerciendo presión $t_E$	0-1	↑	$t_k = \text{cte.}$
Velocidad de expulsión $v_{out}$	1-2	↑	$t_k = \text{cte. or } T_E = \text{cte.}$
Uso de lubricante	3		Aumenta el efecto si aumenta el tiempo enfriamiento

Tabla 2. Parámetros que disminuyen las fuerzas de expulsión

Esta tabla resume el resultado de los experimentos realizados para la publicación del libro How to make injection molds de Menges, que ha servido en gran medida para guiar la parte teórica de este proyecto. Los diferentes efectos se discuten respecto de su eficacia reduciendo dichas fuerzas y valorándolas de 0 a 3. Siendo 0 que no produce ningún efecto y 3 que tiene un gran efecto. Las flechas indican si los respectivos parámetros tienen que aumentar o reducir para disminuir las fuerzas de expulsión



## 7. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS DE EXPULSIÓN MEDIANTE EL MODELO ESTIMADO

El diseño en ingeniería se basa en la propia experiencia. Esto lleva a la elección de piezas con la mayor inclinación posible especialmente si los materiales a procesar tienen un alto grado de contracción.

La figura inferior muestra la adecuada inclinación (ángulo de desmoldeo) dependiendo de la magnitud contracción lineal. El ángulo de desmoldeo tiene que incrementarse para evitar un aumento en las fuerzas de desmoldeo debido a la rugosidad de la superficie. Los expertos opinan que es necesario aumentar de un 0,5% A 2% por un valor de 2/100 mm de rugosidad dependiendo de la viscosidad y la contracción y de la masa fundida. Los valores más altos se utilizan para materiales cristalinos.

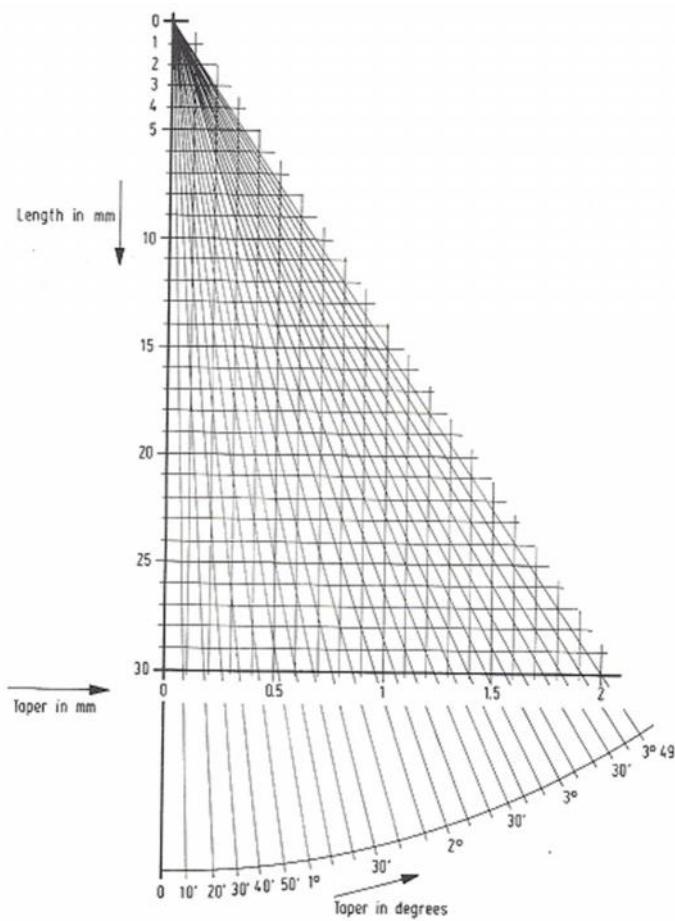


Imagen 7. Ángulo de desmoldeo en función de la longitud





## 7.1. Métodos para calcular las fuerzas de expulsión.

Como hemos comentado en este proyecto solo se van a tener en cuenta las piezas en forma de manguitos donde la contracción se produce en el núcleo. Las fuerzas de expulsión se calculan mediante la tensión normal en el momento de la expulsión y el coeficiente de fricción (7.1)

$$F_R = f p_A A_c$$

Dónde:

f= coeficiente de fricción

$p_A$  = Presión de contacto entre el moldeo y el área.

$A_c$ =Área de la superficie del núcleo

La magnitud del coeficiente de fricción f depende, en esencia, del emparejamiento plástico-acero que seleccionemos pero también de algunos parámetros del proceso de inyección. Este coeficiente afecta al contacto entre la capa superficial solidificada y la superficie del molde en el momento del desmoldeo.

Para obtener mediciones válidas y realistas en el uso de esta ecuación solo se debe considerar únicamente las medidas que se obtienen durante el proceso en el propio molde y sin separar la pieza inyectada de la superficie del molde.

Para las cavidades del molde que se han obtenido mediante el proceso de mecanizado de electroerosión y pulido, el coeficiente de fricción viene determinado por la dependencia de la rugosidad en la superficie del molde.

Material	Coeficiente de fricción para la rugosidad		
	1 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
PE	0,38	0,52	0,7
PP	0,47	0,5	0,84
PS	0,37	0,52	1,82
ABS	0,35	0,46	1,33
PC	0,47	0,68	1,6

Tabla 3. Coeficientes de fricción plástico-metal

Además. La presión de contacto entre el moldeo y el núcleo tiene que ser calculada mediante un método empírico sencillo.



## 7.2. El método de la estimación.

Sin embargo para propósitos prácticos se ha desarrollado un método que permite estimar rápidamente las fuerzas de expulsión. Este determina con suficiente precisión las fuerzas de expulsión en piezas tipo manguitos, las cuales requieren de grandes fuerzas de expulsión debido a su naturaleza.

Se presupone que el diseñador está capacitado para establecer un diámetro de núcleo apropiado, que corresponde al diámetro interno de la pieza final. A partir de la diferencia de diámetros con un límite superior, las fuerzas de expulsión se calculan mediante un equilibrio de fuerzas. Esto lo explicamos con un ejemplo de un manguito de espesor delgado.

La contracción del moldeo está restringida por el inserto metálico. Esto causa una acumulación de tensiones transversales en la pieza, que dan lugar a fuerzas normales en la superficie que impiden la contracción. Las fuerzas elásticas de energía almacenadas se recuperan espontáneamente en el desmoldeo. La contracción resultante de la circunferencia o el diámetro crean una disminución en la medida del diámetro interior del manguito. Esta disminución del diámetro interior de la pieza es (7.2):

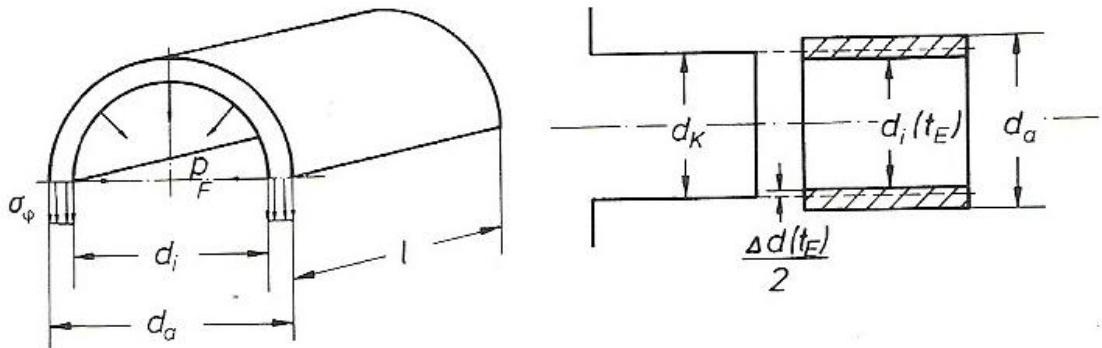
$$\Delta d_r = \Delta C_r = \frac{(d_c - d_i t_E)}{d_c}$$

Dónde:

$\Delta C_r$  Cambios relativos en la circunferencia

$D_c$  diámetro del núcleo

$D_i(t_E)$  ID del manguito inmediatamente después del desmoldeo



*Imagen 8. Tensión y contracción de la pieza en la expulsión*

La reducción de la circunferencia, medida inmediatamente después del desmoldeo está directamente relacionada con el tensor de tensiones en la sección transversal de la pieza a lo largo de todo el moldeo. Este cálculo es sencillo ya que no requiere el coeficiente de Posisson. (7.3)

$$\sigma = E * \varepsilon \text{ Ley de Hooke}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \text{ o en este caso}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_c} = \Delta d_r = \Delta C_r$$

$$\sigma_\phi = \Delta C_r E \quad T \quad \text{por lo tanto}$$

$$p_A = \sigma_\phi \frac{d_o - d_i}{d_c} = \sigma_\phi \frac{s_M}{r_c} = \frac{E \ T \ \Delta C_r \ s_M}{r_c}$$

Donde.

$s_m$  Grosor de pared de la pieza

$r_c$  Radio del núcleo

$F_E$  es siempre la fuerza que es necesaria para iniciar el movimiento de expulsión y está relacionado con las fuerzas estáticas de fricción. Estas fuerzas de expulsión toman solo la



fuerza para el desmoldeo de la pieza a pesar de la existencia de las fuerzas de fricción en los sistemas de expulsión.

Dependiendo del molde, del tamaño y del tipo de expulsores, Las fuerzas de fricción en el sistema  $\Sigma F_s$ , que varían en magnitud, deberán ser añadidas a las fuerzas de expulsión si queremos calcular la fuerza total para el desmoldeo.

La fuerza necesaria para la expulsión de n cavidades viene dada por (7.4)

$$F_{\frac{\text{mach}}{\text{expulsión}}} = n F_E + \Sigma F_s$$

Utilizando este método en un manguito de material ABS y cuyas medidas son  $d_c=38$  mm  $d_o=46$  mm L=30 mm) y comparando con la medida de las fuerzas de expulsión. El resultado es muy satisfactorio como se demuestra en la siguiente figura.

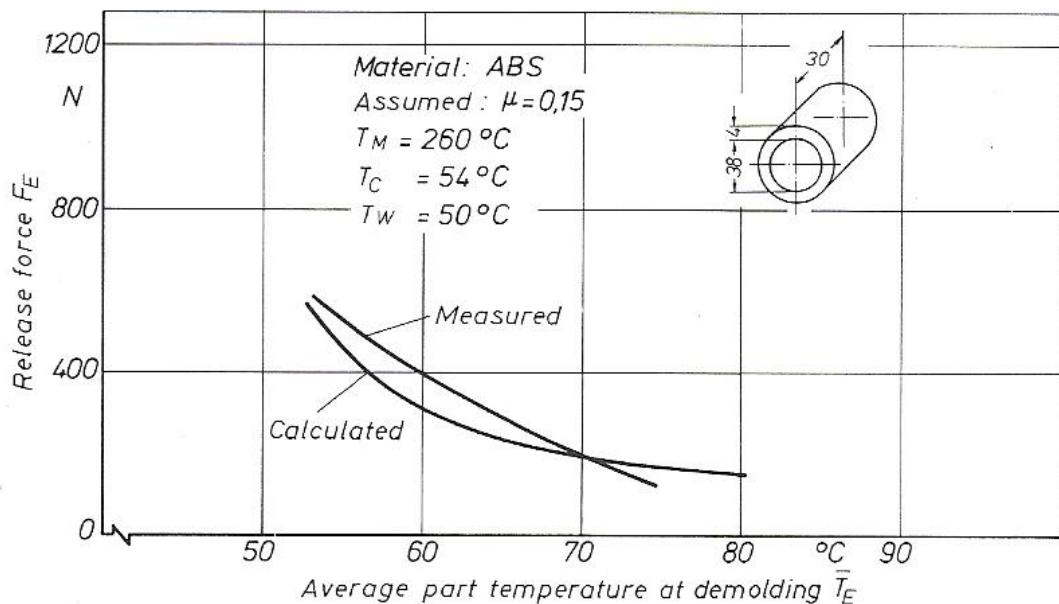


Imagen 9. Fuerzas de expulsión en piezas tipo manguito

El diseñador generalmente no conoce en profundidad los cambios que se van a producir en el diámetro debido a la contracción, por tanto se pueden utilizar este dato proveniente de la información proporcionada por el proveedor sobre su material donde aparecerá el dato de contracción lineal y se usa como punto de partida para estos cálculos como se demuestra.



El punto A muestra el molde abierto con la pieza aun en el interior del molde y produciéndose el enfriamiento de esta debido al contacto con la superficie del molde que se encuentra a una temperatura mucho más baja. B representa el momento inmediato antes de la expulsión y C sería 24 horas después de la expulsión cuando ya no va a haber más variaciones en la medida del diámetro interior de la pieza debido a este fenómeno físico.

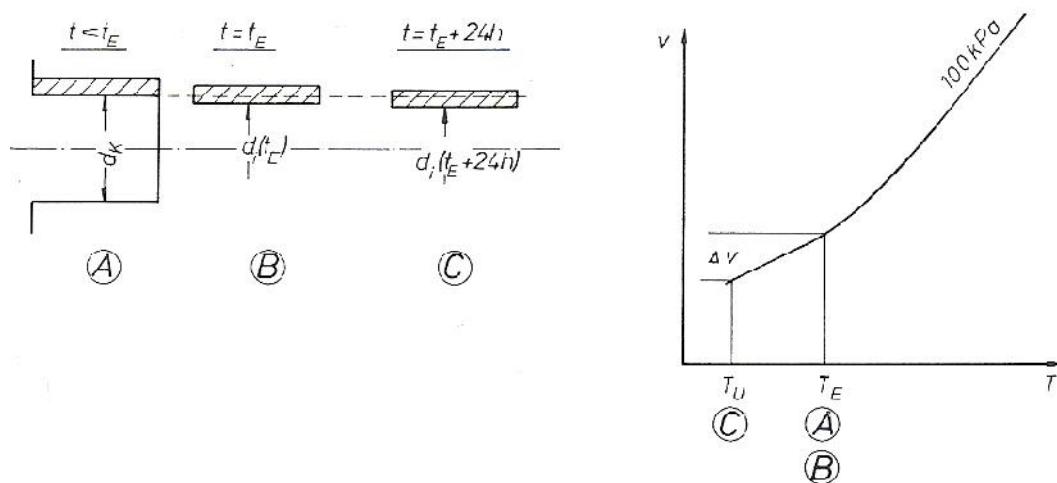


Imagen 10. Contracción de la pieza en función del tiempo

El decrecimiento en el resultado del diámetro desde la deformación producida por la energía elástica (7.5)

$$\Delta d_r = \frac{(d_c - d_i(t_E))}{d_c}$$

Las fases A y B corresponde al mismo punto para  $T_E$  en la línea de los 100 Kpa en un diagrama P-V-T porque ambos puntos no difieren termodinámicamente uno del otro.

Bajando la temperatura llegamos a la fase C, la cual corresponde a una contracción de volumen  $\Delta V$  que podemos coger del diagrama. El estado B se puede obtener desde el estado C usando el siguiente procedimiento.

Para piezas que son desmoldeados a una temperatura media conocida, el volumen relativo de la contracción se obtiene por los diagramas PVT (7.6)



$$\Delta S_v = \frac{V(\bar{T}_E - \bar{T}_A)}{V(\bar{T}_E)}$$

Experimentos con diferentes materiales y manguitos de espesor 4 mm demuestran que el cociente entre la variación en el diámetro y la variación en el volumen nos da la constante K de los materiales termoplásticos. (7.7)

$$\frac{\Delta d_r}{\Delta S_v} \cdot \frac{t_E + 24\bar{t}}{t_E} = K$$

Para el ABS K ≈ 0,43 y Para el PP K≈0,6

Con estos resultados el procedimiento para calcular las fuerzas de expulsión sería el siguiente

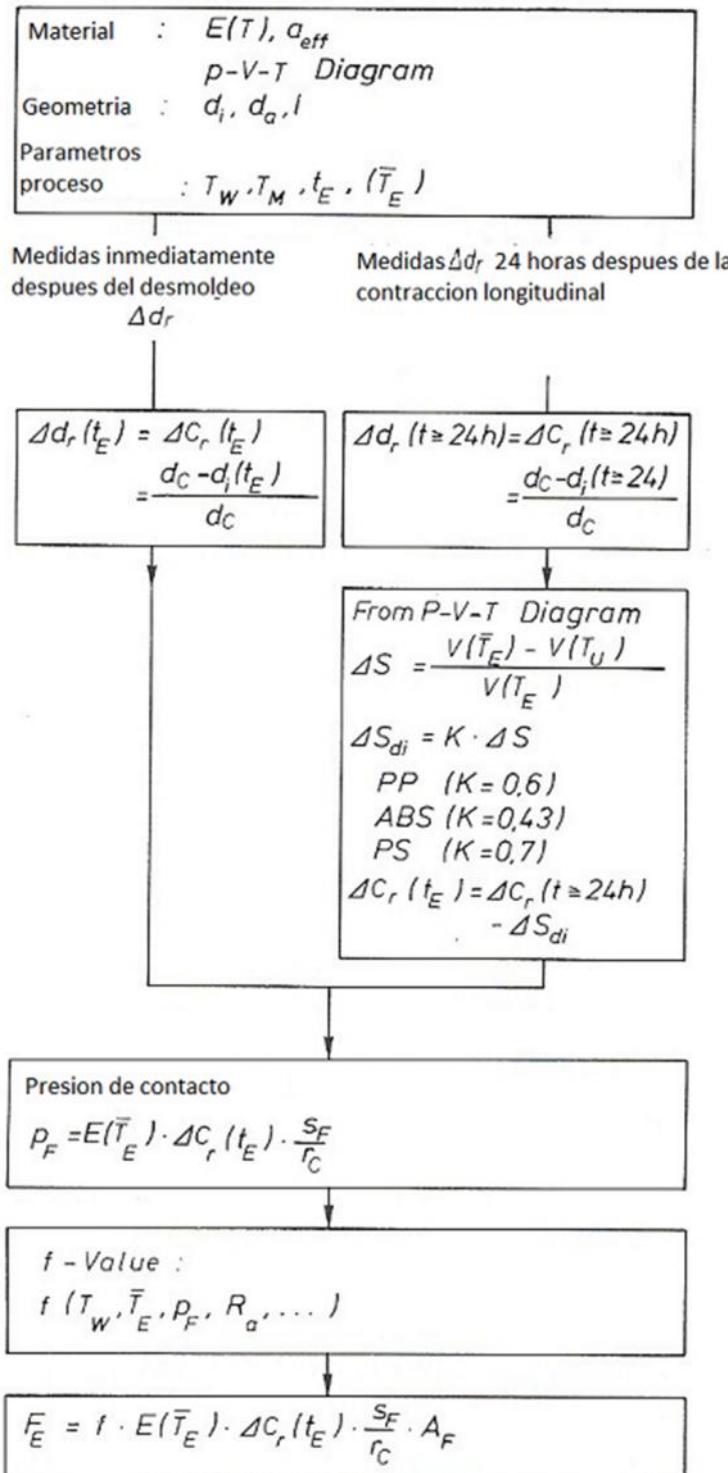


Imagen 11. Diagrama de flujo para el calculo de fuerzas de expulsión por el metodo estimado



## 8. DETERMINACIÓN DE LAS FUERZAS DE EXPULSIÓN MEDIANTE EL METODO TEÓRICO

### 8.1. Deformaciones antes de la expulsión

Partiendo un tubo de grosor  $H$  que se enfriá con las superficies frías de contacto interiores y exteriores. Utilizando la coordenada radial  $r$ ,  $R_0$  la superficie interna y  $R_1$  la superficie externa,  $\Theta$  la coordenada angular y  $x$  la coordenada longitudinal del tubo.

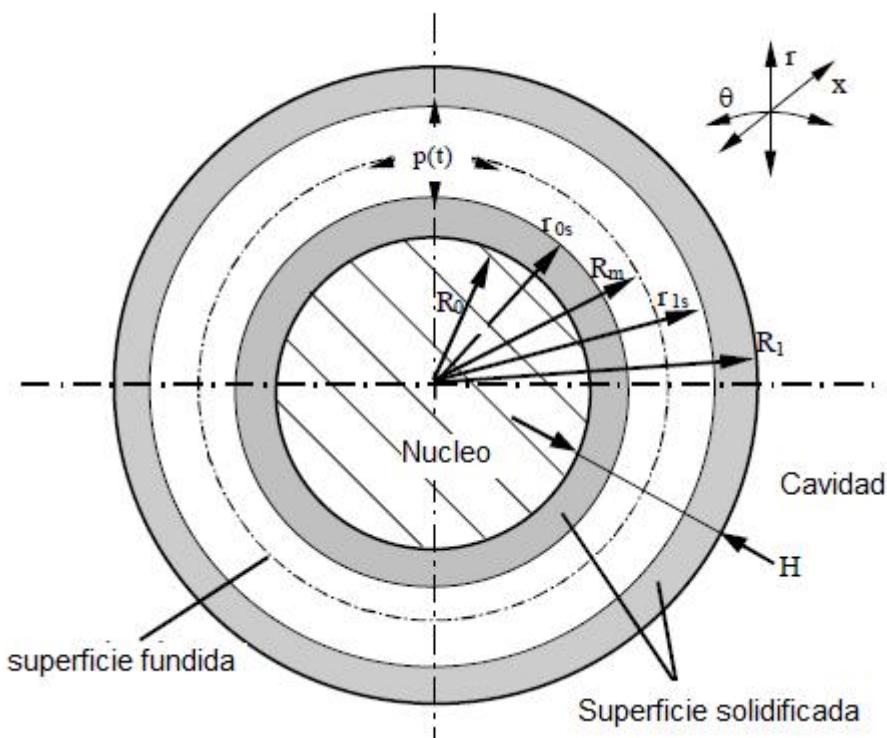


Imagen 12. Sección trasversal en la solidificación de la pieza

La solidificación del manguito consiste en dos superficies con una superficie fundida en el interior. Existe una simetría en la relación del  $R_m$  (radio medio) y un perfil de temperatura constante en la dirección tangencial. La posición donde se unen la parte sólida y líquida se indica a cada instante como  $r_{0s}(r,t)$  y  $r_{1s}(r,t)$  hasta que no esté completa la solidificación.

Se consideran las siguientes suposiciones:



1. Continuidad de la tensión-deformación en el punto de contacto de la superficie sólida y líquida.
2. La tensión tangencial  $\sigma_{\theta\theta}$  es constante en cualquier posición radial como resultado de la simetría.
3. La tensión radial  $\sigma_{rr}$  es independiente de la coordenada radial,  $r$ .
4. Los esfuerzos cortantes pueden ser despreciados en las superficies sólidas ( $\tau_{\theta x} = \tau_{xr} = \tau_{\theta r} = 0$  y  $\gamma_{\theta x} = \gamma_{xr} = \gamma_{\theta r} = 0$ )
5. La deformación de la superficie sólida es uniforme (la deformación en las direcciones  $\theta$  y  $x$  no dependen de  $r$ )
6. No existen deformaciones fuera de plano durante la solidificación
7. El material sólido es elástico y la mezcla fundida no soporta esfuerzos cortantes relevantes
8. La dirección de flujo de enfriamiento es depreciable
9. Temperatura, presión, posición de la unión sólido-líquido y estado de cristalización son conocidos en cada instante

La tensión  $\sigma_{ii}$  y la deformación  $\varepsilon_{ii}$  ( $i=x, \theta, r$ ) se obtiene en coordenadas cilíndricas del siguiente modo. (8.1)

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{xx} + \nu \varepsilon_{\theta\theta} - \frac{\nu}{1 - \nu} p(x, t)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{\theta\theta} + \nu \varepsilon_{xx} - \frac{\nu}{1 - \nu} p(x, t)$$

$$\sigma_{rr} = -p(x, t)$$

O más brevemente (8.2)

$$\sigma_{xx} = S_{xx}(x, r, t) - p(x, t)$$



$$\sigma_{\theta\theta} = S_{\theta\theta}(x, r, t) - p(x, t)$$

$$\sigma_{rr} = -p(x, t)$$

Donde (8.3)

$$S_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{xx}^{obs} + \nu \varepsilon_{\theta\theta}^{obs} - \frac{E}{1-\nu} \varepsilon_{xx}^T + \varepsilon^p$$

$$S_{\theta\theta} = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{\theta\theta}^{obs} + \nu \varepsilon_{xx}^{obs} - \frac{E}{1-\nu} \varepsilon_{\theta\theta}^T + \varepsilon^p$$

$$S_{rr} = 0$$

La deformación se describe como (8.4)

$$\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{ii}^{obs} - \varepsilon_{ii}^P - \varepsilon^p$$

Todos los términos de la deformación son dependientes de la coordenada x en el tiempo t.

La deformación está relacionada con el desplazamiento en la dirección radial, u, y en la longitudinal, w, de la siguiente manera

$$\varepsilon_{rr}^{obs}(x, r, t) = \frac{du}{dr}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta}^{obs}(x, r, t) = \frac{u}{r}$$

$$\varepsilon_{xx}^{obs}(x, r, t) = \frac{dw}{dr}$$

La deformación térmica viene dada por

$$\varepsilon_{ii}^T(x, r, t) = \alpha \frac{dT}{T_s} \cong \alpha(T - T_s)$$

Con

$$\alpha = \frac{1}{3\nu(x, z, t)} \frac{\partial \nu}{\partial T} \quad (\text{expansión térmica lineal})$$



El volumen específico es función de la presión, temperatura y cristalización (si esta está presente). Finalmente la deformación hidroestática que es dependiente de la presión es

$$\varepsilon^P(x, t) = -\beta \frac{dP}{dt} \cong -\beta P$$

Donde la compresibilidad lineal del material es

$$\beta = -\frac{1}{3\nu} \frac{\partial v}{\partial p} \cong \frac{1-2\nu}{E}$$

La distribución de deformaciones se evalúa después de cada periodo de tiempo  $dt$ .  
(8.5)

$$S_{\theta\theta} = \frac{E}{1-\nu^2} \dot{\varepsilon}_{\theta\theta}^{obs} + \nu \dot{\varepsilon}_{xx}^{obs} - \frac{E}{1-\nu} \frac{1}{3\nu} \dot{v}$$

El punto denota derivación respecto del tiempo y

$$\dot{\varepsilon}_{xx}^T + \dot{\varepsilon}^P = \dot{\varepsilon}_{\theta\theta}^T + \dot{\varepsilon}^p = \alpha T - \beta \dot{p} = \frac{1}{3\nu} \dot{v}$$

Durante el proceso de solidificación en el interior del molde, el moldeo se considerará restringido en la dirección de flujo (contracción cero en el molde). Sin embargo estará permitida la contracción en la dirección de grosor cuando la presión ejercida en la cavidad se desvanezca

La tensión en la dirección radial viene dada por la ley de Hooke y considerando (8.6)

$$\sigma_{rr} = -p(x, t)$$

$$\dot{\varepsilon}_{rr}^{obs} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial v}{3\nu} - \frac{\nu}{1-\nu} (\dot{\varepsilon}_{\theta\theta}^{obs} + \dot{\varepsilon}_{xx}^{obs})$$

El espesor medio de la contracción debe ser evaluado en cuanto aparezca en  $t=t_r$

$t_r$  viene determinado por la condición  $p(t_r)=0$

La contracción en el espesor hasta la expulsión se determina considerando las dos partes sólidas y la capa fundida



(solido)

$$\varepsilon_{rr,solido}^{obs} = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{1}{t_r} \int_0^{t_e} \frac{1}{3} \dot{v} dt - \frac{\nu}{1 - \nu} \varepsilon_{\theta\theta}^{obs} + \varepsilon_{xx}^{obs} \frac{t_e}{t_r}$$

(fundido)

$$\varepsilon_{rr,fundido}^{obs} = \frac{1}{t_r} \int_0^{t_e} \frac{1}{3} \dot{v} dt$$

Al inicio de la contracción del espesor,  $t_r$ , las dimensiones de referencia coinciden con las propias dimensiones del mundo. Considerando simetría en relación al radio medio ( $R_m$ ), la contracción del espesor  $Sh_r(x,t)$  se obtiene integrando  $\varepsilon_{rr}^{obs}(x, r, t)$  desde la superficie interior  $R_o$  del manguito hasta el radio medio,  $R_m$  (8.7)

$$Sh_r(x, t)_{t_r}^{t_e} = - \frac{1}{R_m - R_o} \int_{R_o}^{r_{os}} \varepsilon_{rr,solido}^{obs} dr + \int_{r_{os}}^{R_m} \varepsilon_{rr,fundido}^{obs} dr$$

La contracción en la dirección del espesor causa cambios en la tensión tangencial.

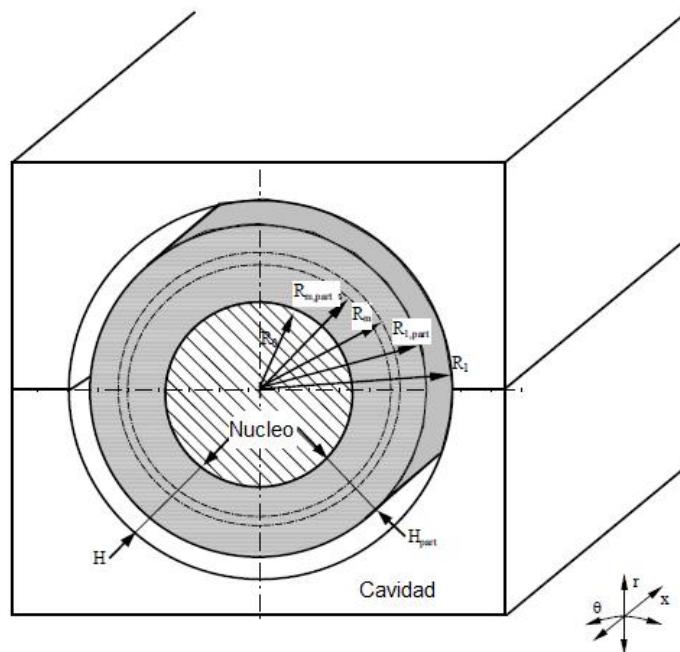


Imagen 13. Sección trasversal de la pieza en el interior del molde



Después de  $t_r$  las dimensiones de la contracción en la sección transversal serán dependientes del tiempo como sigue:

$$\text{Radio exterior } R_{1,part} \ t < R_1$$

$$\text{Radio medio } R_{m,pieza} \ t = \frac{R_{1,pieza} \ t + R_0}{2} < R_m$$

$$\text{Radio interno } R_0 = \text{constante}$$

$$\text{Grosor de pieza } H_{pieza} \ t = R_{1,pieza} \ t - R_0 < R_1 - R_0 = H$$

Donde H es el espesor del molde.

La deformación tangencial en cada momento es (8.8)

$$\varepsilon_{\theta\theta}^{obs} = \frac{\pi R_m - \pi R_{m,pieza}}{\pi R_m} = \frac{R_1 + R_0 - R_{1,pieza} - R_0}{R_1 + R_0} = \frac{R_1 - R_{1,pieza}}{2 R_m}$$

Y la deformación en la dirección radial (8.9)

$$\varepsilon_{rr}^{obs} = -S_{\theta r} = \frac{H - H_{pieza}}{H} = -\frac{R_1 - R_0 - R_{1,pieza} + R_0}{H} = \frac{R_1 - R_{1,pieza}}{H}$$

Sustituyendo la ecuación de la deformación radial en la tangencial, la relación entre la contracción en la dirección radial y los cambios en la deformación en la dirección tangencial en cada momento está relacionado por:

$$\varepsilon_{\theta\theta}^{obs}(x, t) = \frac{H}{2R_m} \varepsilon_{rr}^{obs}(x, t)$$

Consecuentemente, la contracción desde  $t_r$  hasta la expulsión (8.10)

$$\varepsilon_{\theta\theta}^{obs}(x, t) \Big|_{t_r}^{t_e} = -S_{\theta r}(x, t) \Big|_{t_r}^{t_e} \frac{H}{2R_m}$$

Considerando que hasta la expulsión  $\varepsilon_{\theta\theta}^{obs} = 0$  hasta la integración de la ecuación de distribución de deformaciones desde el momento que solidifica la primera capa. Resulta la distribución de deformaciones antes de la expulsión. (8.11<sup>a</sup>)



$$S_{\theta\theta}(x, r, t) = - \int_{t_{s0}}^t \frac{E}{1-\nu} \frac{1}{3\nu} \dot{\nu} dt + \int_{t_r}^t \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{\theta\theta}^{obs} dt$$

Debemos saber que  $\varepsilon_{\theta\theta}^{obs} = 0$  desde el momento que solidifica la prima capa,  $t_{s0}$ , hasta el comienzo de la contracción radial,  $t_r$ .

Se puede escribir una ecuación similar a la anterior para la dirección intercambiando  $\theta$  por  $r$ , y multiplicando la tensión  $\varepsilon_{\theta\theta}^{obs}$  por el coeficiente de Poisson. (8.11b)

$$S_{rr}(x, r, t) = - \int_{t_{s0}}^t \frac{E}{1-\nu} \frac{1}{3\nu} \dot{\nu} dt + \int_{t_r}^t \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{\theta\theta}^{obs} dt$$

## 8.2. Fuerzas de expulsión

Considerando un elemento de tipo manguito como se representa en la siguiente figura. Hay que remarcar que hay una pequeña variación en el diámetro como resultado del Ángulo  $\alpha$  que es obligatorio en el moldeado de las piezas.

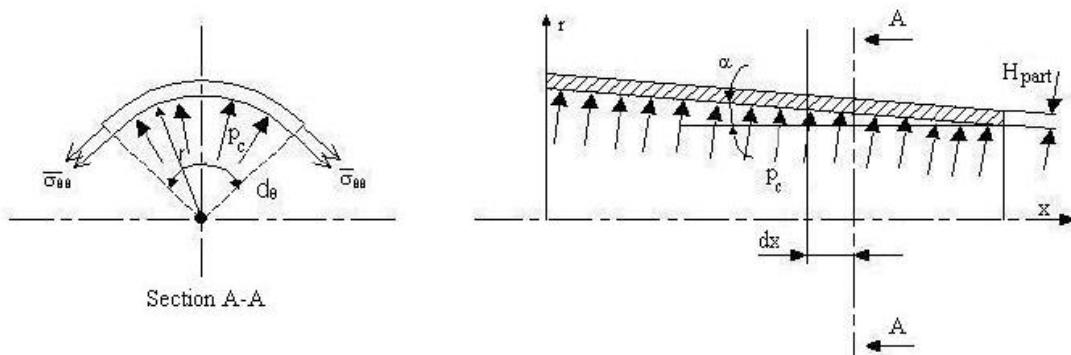


Imagen 14. Diagrama de fuerzas antes de la expulsión

En el instante de la expulsión hay un campo de presiones,  $p_c$ , que actúa en la superficie interna del manguito. Haciendo el balance de fuerzas en la dirección radial, como resultado para un elemento radial de amplitud  $d\theta$  y longitud  $dx$ , en las coordenadas  $x$ . (8.12)

$$\frac{p_c(x)}{\cos(\alpha)} d\theta r x dx - 2\bar{\sigma}_{\theta\theta} x, t_e H_{pieza} dx \operatorname{seno} \frac{d\theta}{2} = 0$$

Como  $\operatorname{seno} \frac{d\theta}{2} \approx \frac{d\theta}{2}$  resulta

$$p_c x = \frac{\bar{\sigma}_{\theta\theta} x, t_e H_{pieza} \cos(\alpha)}{r(x)}$$

Cuando el manguito de plástico es expulsado como se muestra en la siguiente figura, la fuerza de expulsión debe superar la fuerza de fricción  $\mu N$  (donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción que consideraremos constante), generada por la presión de contacto con la parte interna del tubo

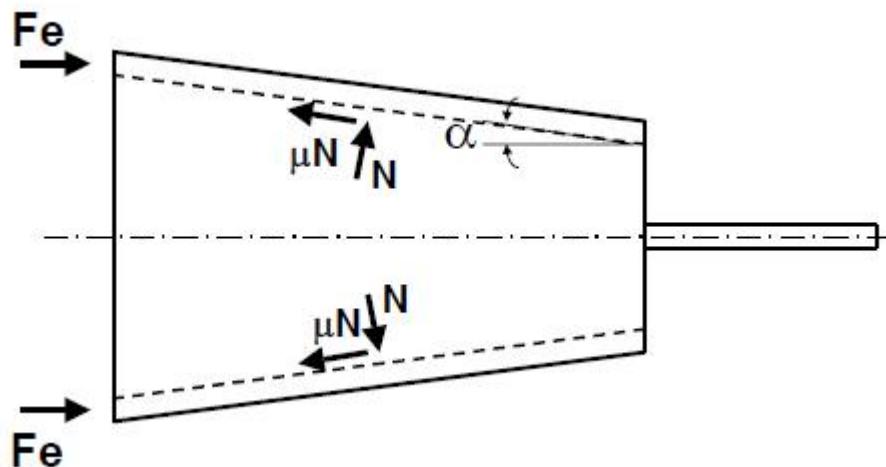


Imagen 15. Fuerzas en la expulsión

La fuerza normal,  $N$ , se obtiene integrando la presión de contacto sobre el contacto total entre el manguito de plástico y la pieza. Considerando que el Ángulo es muy pequeño la fuerza de expulsión se obtiene como. (8.13)

$$F_e = \mu p_c dA$$

Donde  $dA$  es el área elemental de integración (9.14)

$$dA = \frac{2\pi r x dx}{\cos(\alpha)}$$

Sustituyendo esta ecuación en la anterior (8.14) y la presión de contacto por la expuesta (8.12) anteriormente obtenemos que. (8.15)

$$F_e = 2\pi \mu H_{pieza} \int_0^L \bar{\sigma}_{\theta\theta}(x, t_e) dx$$

La tensión tangencial después de la expulsión  $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ , se obtiene sustituyendo en la ecuación (9.11a) la ecuación (9.10) y promediando por encima del espesor. En este análisis se considera que el modulo del material es constante y es igual al módulo de la temperatura de inyección  $E(T_e)$  y la presión de fusión en la expulsión,  $p(x, t_e)$  es cero. De manera que (8.16)

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta}(x, t_e) = -\frac{E \bar{T}_e}{1-\nu} \left[ \frac{1}{3\nu} v dt - \frac{E \bar{T}_e}{1-\nu^2} \frac{H}{2 R_m} S_r(t) \right]_{t_s}^{t_e}$$



Después de integrar (8.17)

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta}(x, t_e) = - \frac{E \bar{T}_e}{1 - \nu} \frac{1}{3} \ln \frac{\bar{v}(\bar{x}, \bar{r}, \bar{t}_e)}{v_s(x, r)} - \frac{E \bar{T}_e}{1 - \nu^2} \frac{H}{2 R_m} S_r(t)_{t_r}^{t_e}$$

La función  $v_s(x, r)$  es el volumen específico en el momento de la solidificación.

Sustituyendo en la ecuación (8.15) la ecuación (8.17) tenemos que (8.18)

$$F_e = \mu \frac{2 \pi H_{pieza}}{1 - \nu} E \bar{T}_e \int_0^L - \frac{1}{3} \ln \frac{\bar{v}(\bar{x}, \bar{r}, \bar{t}_e)}{v_s(x, r)} - \frac{H}{(1 - \nu) 2 R_m} S_r(t)_{t_r}^{t_e} dx$$

La expresión (9.18) indica que la fuerza de expulsión depende directamente del módulo a la temperatura de inyección, el coeficiente de fricción (aquí considerado constante), el grosor de la pieza y la variación del volumen debido a la contracción entre la solidificación y el tiempo de expulsión.

El último término dentro de la integral se incluye si el manguito contrae en la dirección de espesor. Esto puede ocurrir para bajas presiones de mantenimiento o cuando se reduce el tiempo de expulsión en el momento de expulsar la pieza.



## 9. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL MOLDE Y EL INSERTO METÁLICO.

### 9.1. Diseño del molde

Para la realización del diseño molde se ha utilizado el catálogo de la marca VAP. Pero lo primero de todo era comprender correctamente el funcionamiento de un molde y sus partes. Por tanto lo primero que he realizado ha sido desmontar dos prototipos, un molde normal del taller y otro de expulsores tubulares ya que se asemeja bastante al molde que he realizado, y posteriormente volverlos a montar. Así he podido apreciar correctamente las diferentes partes de un molde



Imagen 16. Fotografías del molde que se ha utilizado



Una vez comprendido el sistema de funcionamiento de un molde con expulsores se ha pasado al diseño en 3D mediante la herramienta ProEngineer y el catálogo.

### 9.1.1. Placas de fijación (Placas C y G)

Placa C (fijación y cierre de placa)

Estas placas son los extremos del bloque. Placa "C" es al ras con la placa hembra. Se ha colocado dos cierre de placas que es donde se colocan los expulsores tubulares para poder cambiarlos si queremos utilizar otros de diferente diámetro

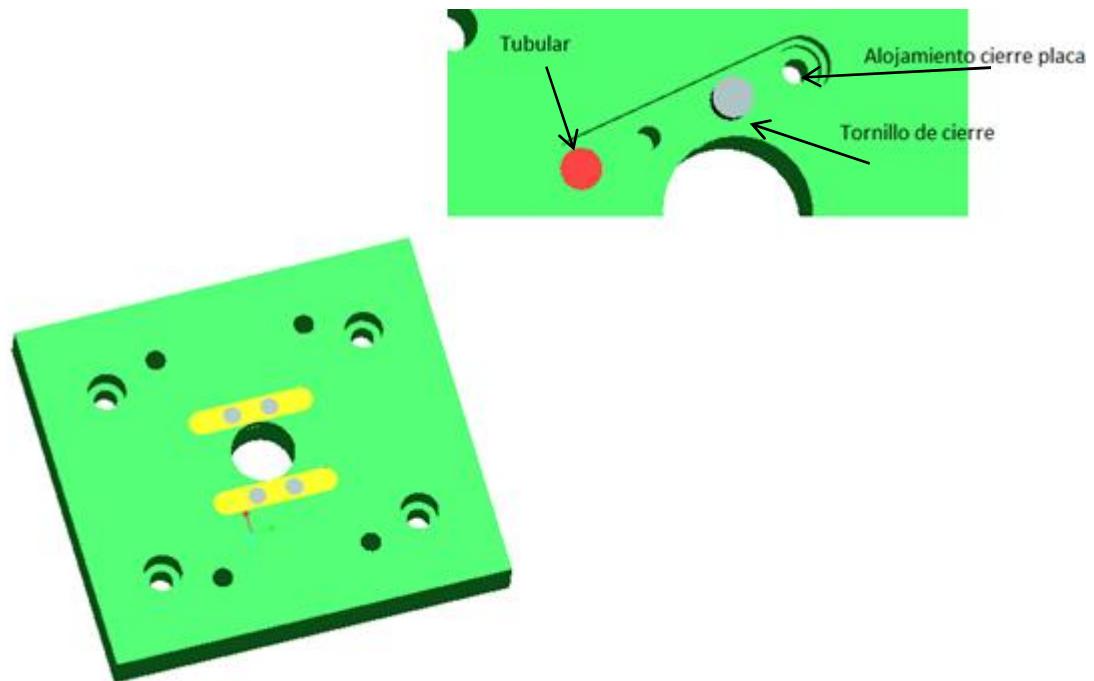


Imagen 17. Placa G y detalles de los expulsores

Esta es la placa donde se coloca el bebedero.

El bebedero incide a través de las dos placas y estas deben ser mecanizadas para recibir la boquilla.

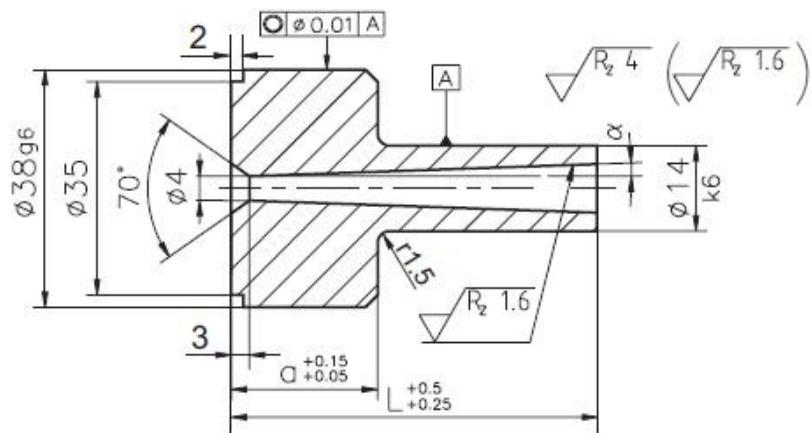


Imagen 19. Sección trasversal del bebedero

Cabeza cónica. Esto asegura una buena transición del plástico fundido de la máquina al canal de inyección para el suministro de material a la pieza de trabajo. La forma de cono permite una fácil extracción.

Dependiendo del tipo de inyección de plástico, la forma de punta de la boquilla puede cambiar, por ejemplo, con PVC es de forma cónica, con PP esférica.

La placa G está en contacto con la parte móvil para asegurar una alineación adecuada de la totalidad de esta parte. En esta placa se coloca el disco centrador y el bebedero como se puede ver en la imagen.

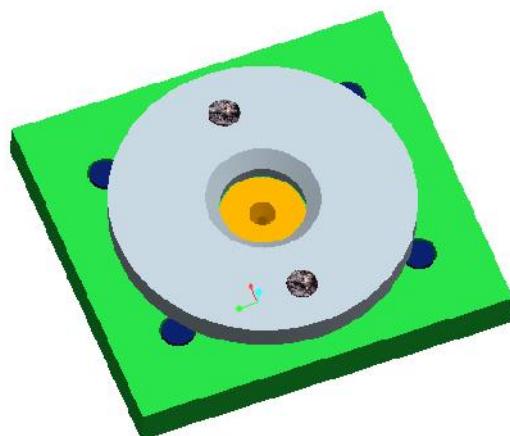
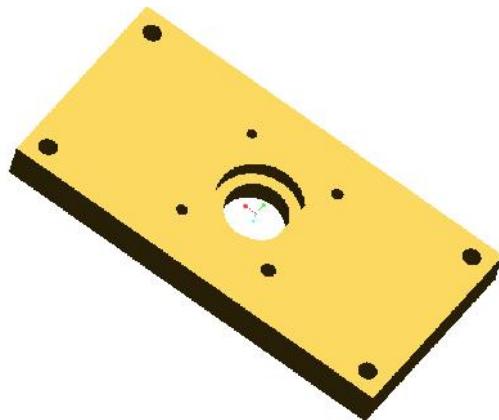


Imagen 18. Placa G (fijación, disco y boquilla)



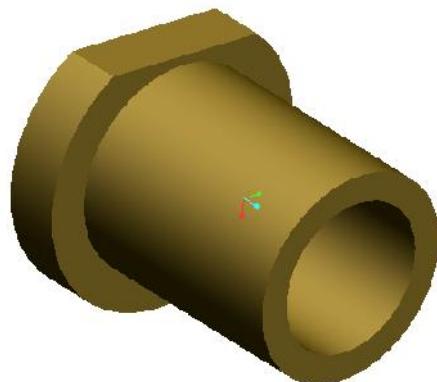
### 9.1.2. Placa expulsión M

Permite hacer el cierre con la placa de expulsión L. Se colocan con una unión atornillada y así se asegura el correcto posicionamiento de los eyectores.



*Imagen 19. Placa de expulsión M*

En el agujero central se coloca un actuador con una parte mecanizada en la cabeza que nos permite realizar el movimiento del molde



*Imagen 20. Actuador*



### 9.1.3. Placa de expulsión L

Sirve para asegurar la instalación de los eyectores y su alineación correcta. Se insertan con un ajuste fino. En los orificios más grandes colocaremos los expulsores que separan la parte móvil y fija del móvil. En los pequeños irán colocados los expulsores de colada y los otros 4 orificios es donde colocaremos los cilindros tubulares utilizados para la realización de este proyecto.

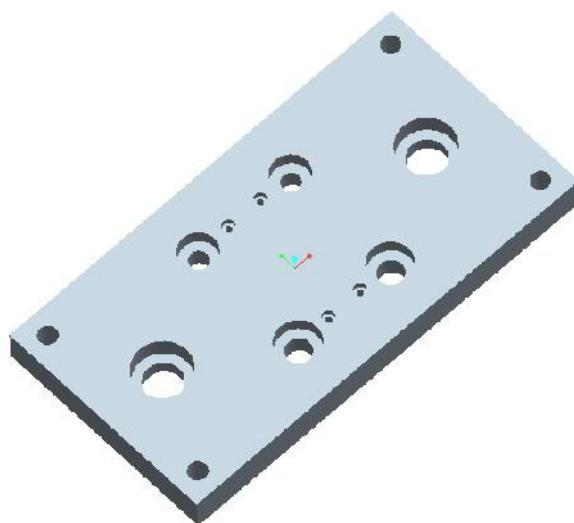


Imagen 21. Placa de expulsión L

El conjunto de las placas expulsoras L y M y los expulsores de colada y tubulares del molde quedara como muestra la siguiente figura

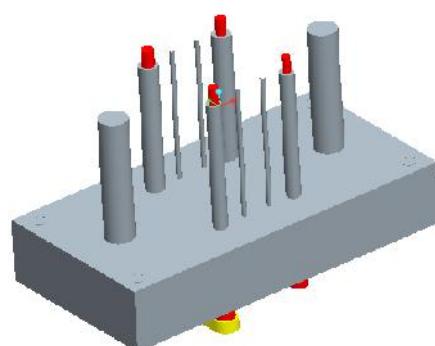
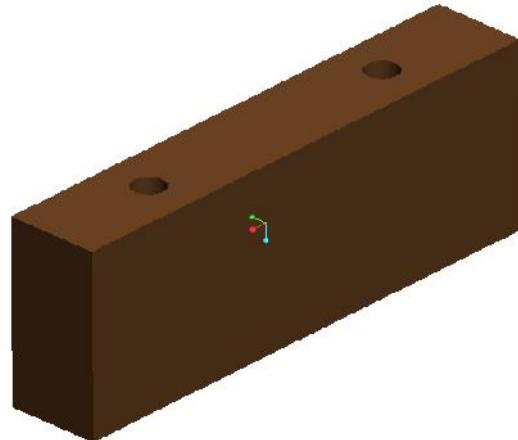


Imagen 22. Conjunto de placas expulsoras y expulsores de colada



#### 9.1.4. Las regletas F

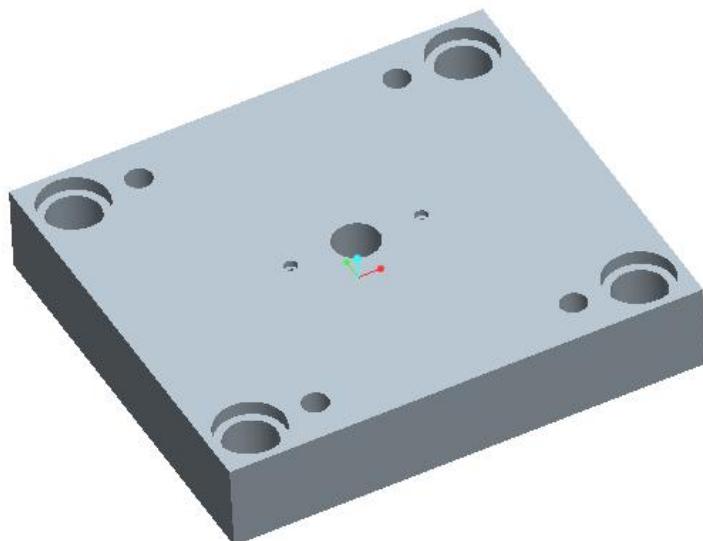
Las regletas van posicionadas perpendicularmente y permiten el cierre lateral del molde. Llevan unos orificios por los que van las guías del molde.



*Imagen 23. Regletas del molde*

#### 9.1.5. Placa D

Esta placa garantiza el aprovisionamiento de suministro de material, A ella va fijada mediante tornillos la placa de fijación G, además está colocado el canal del bebedero por el que circula el material.



*Imagen 24. Placa del molde D*



### 9.1.6. Placa E

Es la placa más importante del molde pues es donde va la cavidad de la pieza a moldear. Es la más complicada en términos de mecanizado ya que aparte de la cavidad van colocados los expulsores y se debe permitir el paso de material entre las cavidades

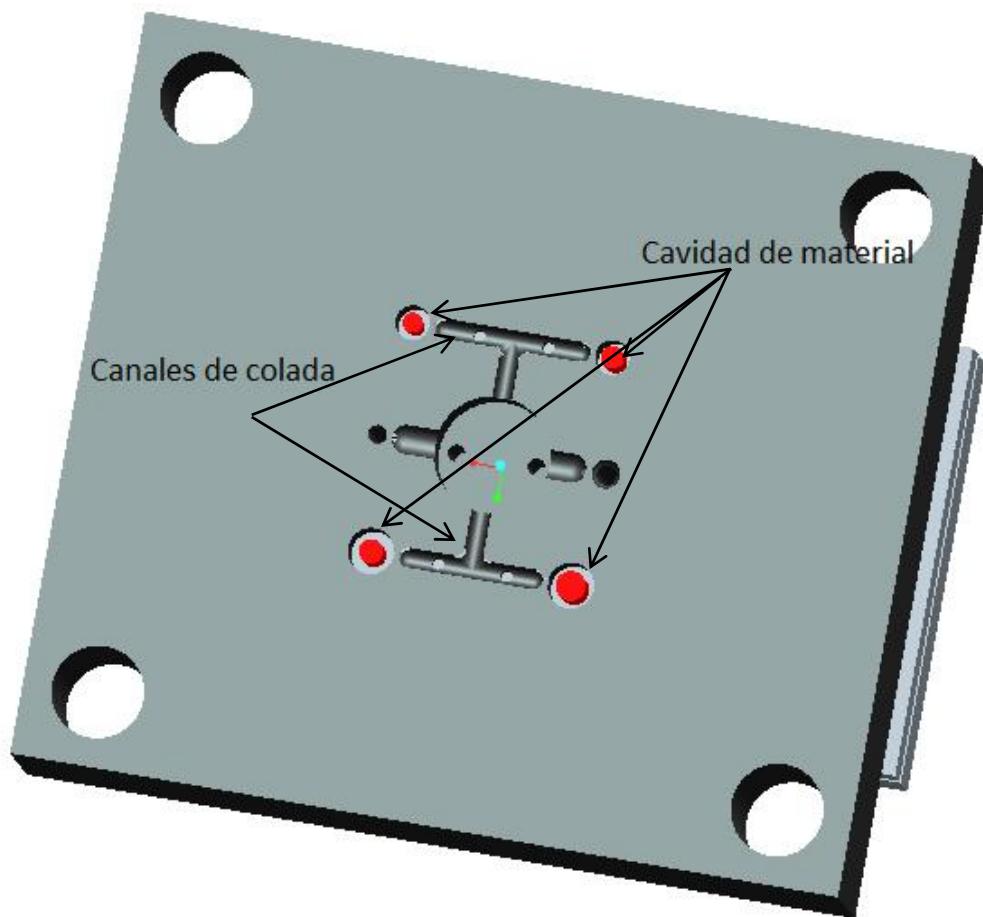


Imagen 25. Placa fija

En ella hemos colocado una llave que nos permite dirigir el flujo de colada hacia las cavidades que deseemos las de 8 mm o 6 mm en este caso

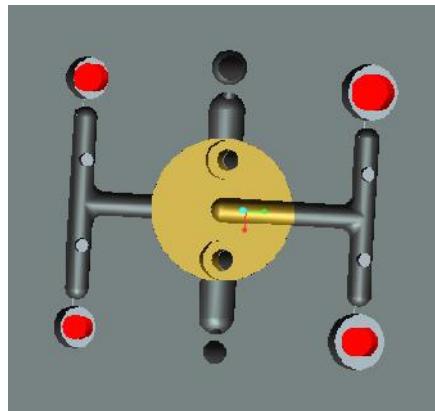


Imagen 26. Canales, llave de colada, expulsores y cavidad de pieza

Además la entrada de material a la cavidad se hace mediante una sección rectangular de 1 mm como muestra la siguiente figura

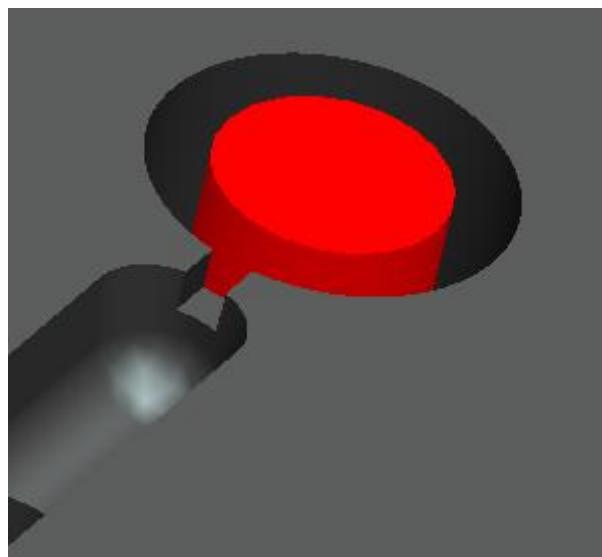


Imagen 27. Sección de entrada de material a la cavidad



## **9.2. Mecanizado del molde y los insertos metálicos**

Para las pruebas de inyección que requieren la elaboración de este proyecto fin de carrera se hace uso del taller de inyección de plásticos que dispone el TIIP en la “Escuela de ingeniería y Arquitectura de Zaragoza.

Las piezas del molde se han pedido mediante el catálogo de la empresa VAP. Véase Anexos. Posteriormente se ha procedido a realizar el mecanizado con las herramientas del taller para las diferentes cavidades según los planos desarrollados.

Finalmente se ha colocado el molde en la máquina de inyección de la marca Mateu Sole modelo Meteor 55H que se encuentra en las instalaciones anteriormente mencionadas y se han inyectado los materiales ABS y PP para la obtención de las piezas que posteriormente serán utilizadas en los ensayos para medir las fuerzas de adherencia

### **9.2.1. Fabricación del molde**

Los procesos que intervienen en la fabricación de moldes son mediante arranque de viruta. Fresado, torneado, rectificado... etc.

Durante las dos últimas dos décadas procesos como el rapid tooling y fabricación mediante la sinterización con láser polvo de acero han hecho posible que la fabricación de molde haya avanzado mucho.

Con el uso de estas nuevas tecnologías, el ahorro de tiempo es considerable, ya que permite obtener piezas totalmente acabadas sin necesidad de realizar operaciones posteriores en tiempo record.

Sin embargo debido a su elevado coste y los medios con los que se cuenta no se ha utilizado esta tecnología para la fabricación del molde de este proyecto.



### **9.2.2. Mecanizado por arranque de viruta**

El mecanizado por arranque de viruta es un proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión.

Esta eliminación de material se produce por la acción de las herramientas, las cuales tienen dos movimientos bien diferenciados; uno es la rotación y el otro es el avance.

Se realiza a partir de productos semielaborados como lingotes, tochos u otras piezas previamente conformadas por otros procesos como el moldeo o la forja. Los productos obtenidos pueden ser finales o semielaborados que requieran operaciones posteriores.

En el mecanizado, el material es arrancado o cortado con una herramienta dando lugar a un desperdicio o viruta. La herramienta consta, generalmente, de uno o varios filos o cuchillas que separan la viruta de pieza en cada pasada. En el mecanizado por arranque de viruta se dan operaciones de desbaste (eliminación de gruesos relativamente grandes con un acabado superficial pobre) y de acabado (últimas pasadas para conseguir la medida deseada con un grado de acabado óptimo).

En el mecanizado por abrasión se eliminan pequeñas cantidades de material de las superficies de las piezas a mecanizar mediante una muela abrasiva. Esta muela es un disco formado por pequeñas partículas de material cerámico abrasivo unidas mediante un aglutinante. Este proceso, generalmente el último que se realiza sobre la pieza, es utilizado para conseguir una gran precisión dimensional y acabado superficial.

Para la fabricación de moldes, las máquinas de mecanizado por arranque de viruta que normalmente intervienen en el proceso son:

- Centro de mecanizado.
- Fresadora convencional.
- Torno convencional.
- Taladro vertical.
- Rectificador.



### **9.2.3. Montaje y ajuste del molde.**

Para el montaje del molde, aparte de tener todos los componentes que lo constituyen se necesitan las herramientas adecuadas para su montaje, un bando de trabajo lo suficientemente amplio y resistentes para soportar el peso del molde y un polipasto para poder manipular las piezas de gran tamaño.

Para el montaje vamos a precisar de los planos de conjunto del mismo, pues es en este plano donde se especifica todo el material necesario y su disposición de conjunto.

Las herramientas más importantes necesarias para el montaje del molde se enumeran a continuación:

- Juego de llaves Allen
- Juego de llaves fijas
- Maza de Nylon o similar para no dañar las piezas
- Punzones para la introducción/extracción de pasadores, tapones, etc.
- Banco de trabajo

El ajuste del molde suele ser una operación manual, en la que nos aseguraremos que el molde cierra completamente. Este cierre del molde implica la verificación que no existe ningún espacio por donde el plástico pueda escaparse de dentro de la cavidad del molde.

### **9.2.4. Mecanizado de las piezas a inyectar.**

Al realizar los primeros ensayos de inyección para obtener las fuerzas de expulsión, se observa que el tamaño de la piezas (demasiado pequeño), y las escalas en la fuerza de expulsión del molde son demasiado grandes para realizar directamente las pruebas con la maquina inyectora.

Por tanto se debe replantear el proyecto inicialmente llegando a la solución que considero más óptima, mecanizar unos insertos tubulares donde se inyectara el plástico, una



vez que tengamos la pieza la someteremos a un ensayo de tracción mediante una maquina instron que se encuentra en el departamento de ingeniería mecánica y obtendremos los valores que buscamos.

Estas pequeñas piezas se introducirán en las cavidades del molde insertadas en los expulsores tubulares, deberá hacerse de manera manual una a una.

El mecanizado de estas piezas, cuenta con las máquinas presentes en el taller del TIIP, un centro de mecanizado de control numérico, un torno, una sierra de arco y una muela rectificadora.

Lo primero selecciono del taller 2 perfiles macizos de sección circular, permiten el ahorro de costes al utilizar el material allí presente y no realizar un nuevo pedido de material. Los perfiles seleccionados son de diámetro 4 y de 6 mm. El primero lo utilizo para realizar las piezas de 3,5mm y 4 mm y el segundo perfil corresponde a las piezas de grosor 4,2 y 5,2 mm.

Estas piezas deberán llevar una parte roscada de métrica 3 y 4 respectivamente para poder colocarlas en el banco de ensayo y otra parte donde inyectaremos el plástico.

La primera con el arco de sierra corto los perfiles circulares en piezas de longitud de 20 mm y las coloco dentro de una placa de amarre que va dentro del centro de mecanizado de control numérico. Allí se realiza el desbaste del perfil para dejarlo a las medidas de pieza que he seleccionado y la realización de la rosca.

En el segundo paso, suelto las piezas obtenidas de la placa de amarre y corto con el arco de sierra la parte donde ha ido amarrada la pieza durante el fresado, posteriormente en una muela rectificadora ajusto el tamaño de pieza lo máximo posible y finalmente en el torno realizo un refrentado y un cilindrado de acabado a la pieza para dejarla a la medida deseada.

El resultado final que se obtiene es esta pieza.



*Imagen 28. Inserto metálico*

En total se mecanizan 160 piezas como esta, 40 para cada tamaño. En ella se puede apreciar la parte roscada a la izquierda y la que irá inyectada con un acabado más fino debido a la pasada que realizo en el torno y que reduce la rugosidad de la pieza para obtener unos resultados más próximos a los valores teóricos.



## 10. Protocolo de ensayos

El proceso de fabricación por inyección consiste en la fundición de plástico en una antecámara para posteriormente introducirlo en un molde frío donde solidificara y se enfriara el tiempo necesario para ser extraído del molde. Este proceso se lleva a cabo por máquinas de inyección con las que se puede controlar tiempos de lleno y avance de carros, así como velocidades o presiones de inyección o expulsión.

### 10.1. Parámetros de inyección

Para comenzar las pruebas de inyección una vez que el molde ha sido montado es colocarlo en la maquina inyectora.

Para ello primero debemos encender la máquina y la bomba y abrir la inyectora para con ayuda de un puente grúa posicionar hasta que el disco centrador encaja en la maquina correctamente, sin soltar todavía del puente grúa se realiza la carrera de cierre de la inyectora y se sujeta mediante unas guías atornilladas con una distribución 2-1



Imagen 29. Colocación del molde en la inyectora



Cuando el molde ya está colocado correctamente y asegurado se suelta el anclaje del puente grúa y se realiza la carrera de apertura del molde.

Es entonces cuando se configuran los parámetros de inyección del molde y se prepara el material.

En mi caso he utilizado PP y ABS, el PP no requiere una preparación previa pero el ABS hay que realizar un secado del material para eliminar la humedad del material. El tiempo estimado para ello ha sido de unas 2 horas más o menos antes de realizar la inyección



Imagen 30. Tolva de secado



Con el material ya secado debemos extraer el material previo que hubiera en la tolva, para ello se mueve la tolva retirando los tornillos que impiden su movimiento y moviéndola hasta el final de la guía que muestra la figura, el material sale por la tubería de abajo. Lo metemos en el saco adecuado y se sella para evitar que se estropee.



Imagen 31. Conducto de salida para vaciar la máquina de material



Con la tolva ya vacía podemos introducir el nuevo material e iniciar el funcionamiento de la máquina y la bomba. Al cambiar de material se debe purgar el material, esto se consigue aumentando la dosis al máximo y realizando varias inyecciones contra la pared del molde para retirar todo el material anterior que hubiera en el husillo. Cuando se para la maquina durante un tiempo y volvemos a reiniciar el proceso es recomendable realizar este paso también.

Si finalizamos el proceso de inyección pero no queremos retirar el molde para posteriores usos se debe dejar el molde abierto con una pequeña apertura.

Con la maquina preparada y todo a disposición comienza la selección de parámetros para realizar el proceso de inyección de material.

Indicar que este molde tiene 4 cavidades diferentes y una llave en el centro que nos distribuye el material según la pieza que se desee inyectar. El camino que no queremos que inyecte aprovecharemos el canal de alguna pieza inyectada para taponarlo como muestra la fotografía inferior



Imagen 32. Placa fija con el canal tapado para inyección



### 10.1.1. Temperatura de inyección

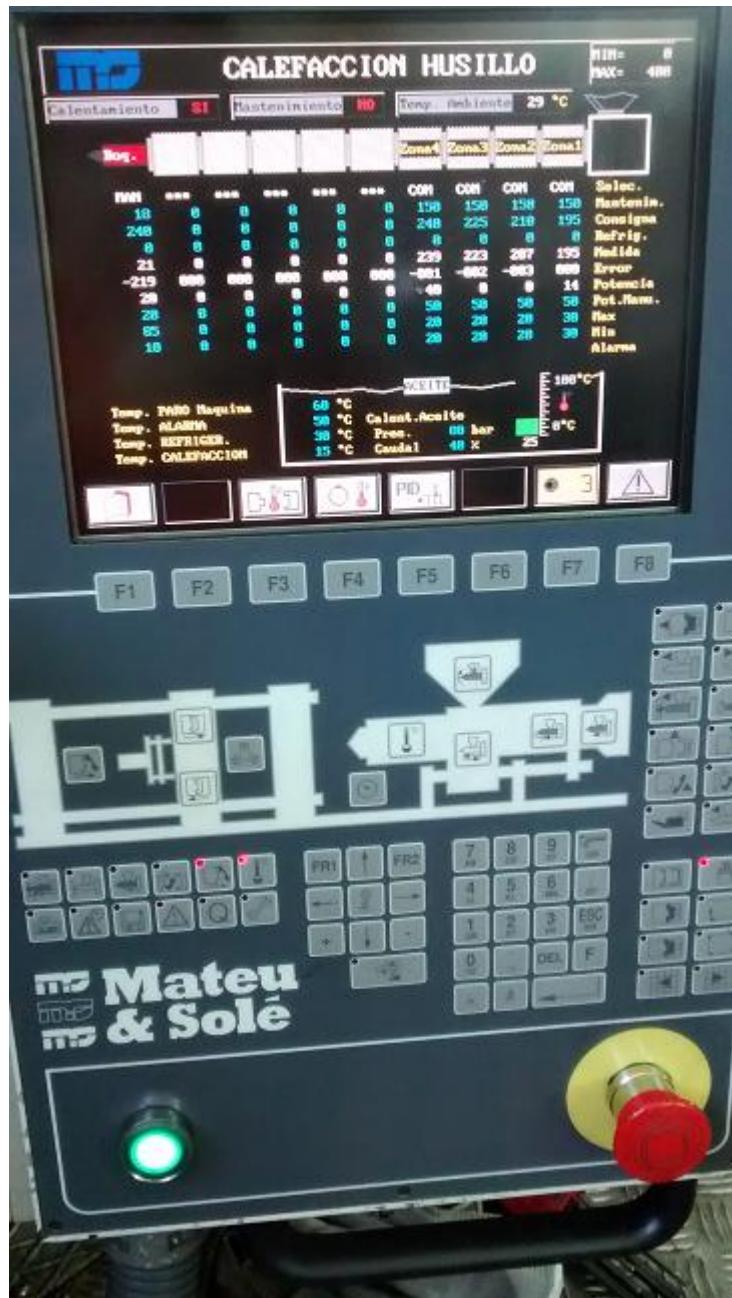


Imagen 33. Parámetros de temperatura

En este proyecto se han utilizado las temperaturas de inyección de 220 °C, 240°C y 260°C. Como se observa en la imagen utilizo 5 zonas diferenciadas de temperatura boquilla, zona 1, zona 2, zona 3, zona 4, que corresponden a las zonas que se divide el husillo para calentar el material.



La temperatura de la boquilla y la zona 4 deberá ser la temperatura que queremos inyectar, en el ejemplo 240°C, en el resto de zonas se disminuye la temperatura 10°C, 15°C y 20°C respectivamente.

Temperatura °C	
Boquilla	220
Zona 4	220
Zona 3	210
Zona 2	195
Zona 1	175

Tabla 4. Temperaturas de la zona de husillo para inyectar a 220°C

Temperatura °C	
Boquilla	240
Zona 4	240
Zona 3	230
Zona 2	215
Zona 1	195

Tabla 5. Temperaturas de la zona de husillo para inyectar a 220°C

Temperatura °C	
Boquilla	260
Zona 4	260
Zona 3	250
Zona 2	235
Zona 1	215

Tabla 6. Temperaturas de la zona de husillo para inyectar a 220°C



### 10.1.2. Selección de dosis.

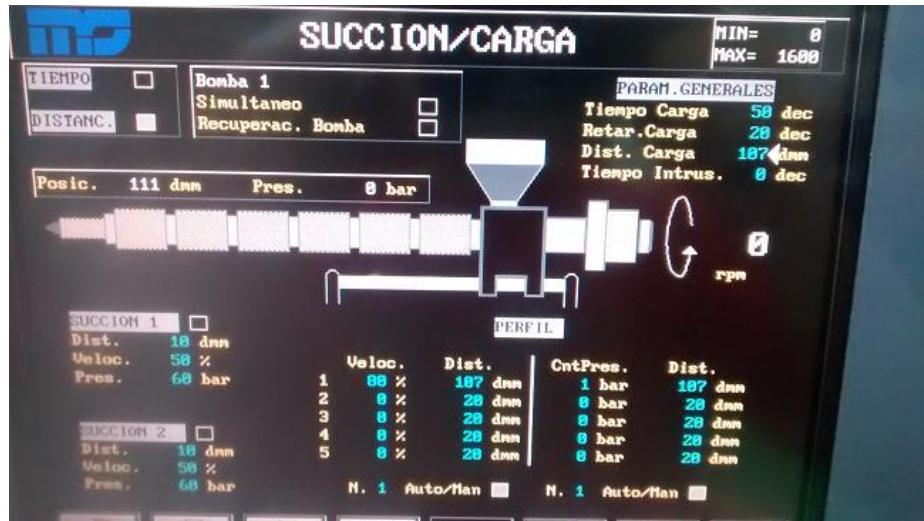


Imagen 34. Selección de dosis

La selección de dosis es un proceso bastante delicado debido al tamaño de las piezas y la colada por tanto lo que se hace es inyectar sin remanencia desde un parámetro de dosis seleccionado en este caso fue 99 e inyectar. Si la pieza obtenida no está completa se va subiendo la dosis poco a poco hasta que se obtiene una pieza completa y se fija el parámetro de llenado.

#### 3º Presión y tiempo de compactación

Para cada diámetro de pieza y temperatura de inyección selecciono unos valores diferentes.

Con la dosis ya calculada y la temperatura seleccionada. Se inyecta en vacío.

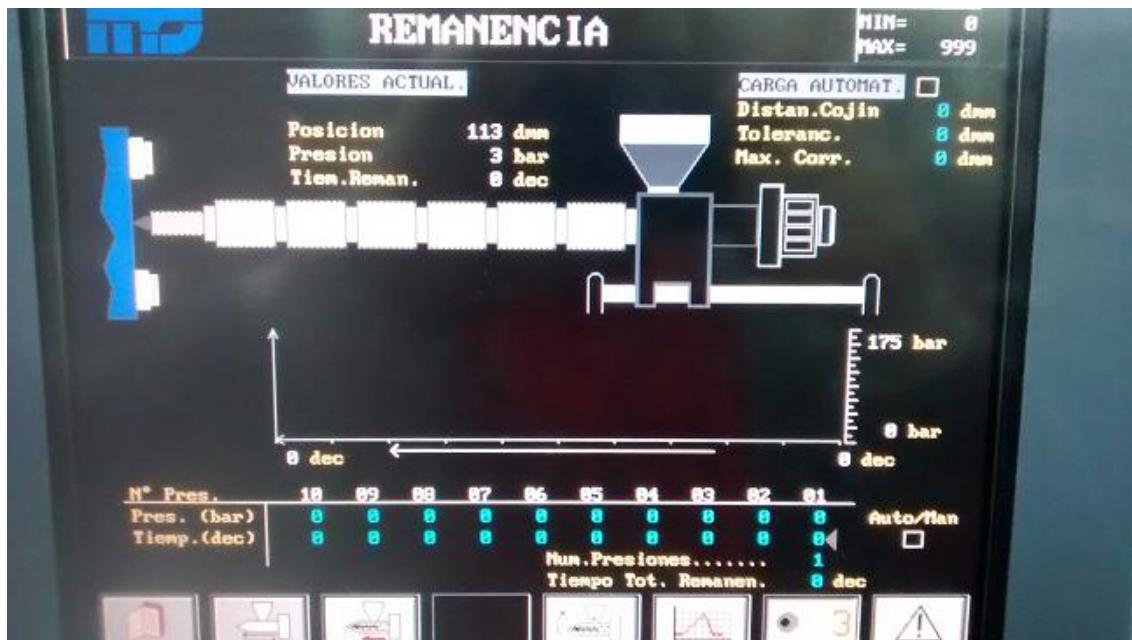


Imagen 35. Inyección en vacío de la pieza

Cuando la pieza se ha injectado se muestra la gráfica de presión que nos da la máquina y en función de ella obtendremos la presión de compactación que aplicaremos.

Para los primeros ensayos que se realizan donde utilizamos PP y ABS y solo obtenemos una muestra de cada parámetro que hemos configurado se decide utilizar valores de compactación del 40%, 65%, 100%, 135% y 150% respectivamente de la Presión de vacío.

El tiempo de compactamiento siempre utilizamos 20 decs



Imagen 36. Gráfica de presión en la inyección en vacío



Material PP		P0	40%	65%	100%	135%	160%
Presión en vacío pieza 3,5mm (bar)	220°C	<b>27</b>	<b>10,8</b>	<b>17,55</b>	<b>27</b>	<b>36,45</b>	<b>43,2</b>
	240°C	<b>26</b>	<b>10,4</b>	<b>16,9</b>	<b>26</b>	<b>35,1</b>	<b>41,6</b>
	260°C	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>16,25</b>	<b>25</b>	<b>33,75</b>	<b>40</b>

Tabla 7. Presiones a inyectar en la pieza 1 con PP

Material PP		P0	40%	65%	100%	135%	160%
Presión en vacío pieza 4 mm (bar)	220°C	<b>27</b>	<b>10,8</b>	<b>17,55</b>	<b>27</b>	<b>36,45</b>	<b>43,2</b>
	240°C	<b>26</b>	<b>10,4</b>	<b>15,6</b>	<b>26</b>	<b>35,1</b>	<b>41,6</b>
	260°C	<b>24</b>	<b>9,6</b>	<b>15,6</b>	<b>24</b>	<b>32,4</b>	<b>38,4</b>

Tabla 8. Presiones a inyectar en la pieza 2 con PP

Material PP		P0	40%	65%	100%	135%	160%
Presión en vacío pieza 4,2 mm (bar)	220°C	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>16,25</b>	<b>25</b>	<b>33,75</b>	<b>40</b>
	240°C	<b>24</b>	<b>9,6</b>	<b>15,6</b>	<b>24</b>	<b>32,4</b>	<b>38,4</b>
	260°C	<b>24</b>	<b>9,6</b>	<b>15,6</b>	<b>24</b>	<b>32,4</b>	<b>38,4</b>

Tabla 9. Presiones a inyectar en la pieza 3 con PP

Material PP		P0	40%	65%	100%	135%	160%
Presión en vacío pieza 5,2mm (bar)	220°C	<b>30</b>	<b>12</b>	<b>19,5</b>	<b>30</b>	<b>40,5</b>	<b>48</b>
	240°C	<b>26</b>	<b>10,4</b>	<b>16,9</b>	<b>26</b>	<b>35,1</b>	<b>41,6</b>
	260°C	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>16,25</b>	<b>25</b>	<b>33,75</b>	<b>40</b>

Tabla 10. Presiones a inyectar en la pieza 4 con PP

Material ABS		P0	40%	65%	100%	135%	160%
Presión en vacío pieza 3,5 mm (bar)	220°C	<b>45</b>	<b>18</b>	<b>29,25</b>	<b>45</b>	<b>60,75</b>	<b>72</b>
	240°C	<b>36</b>	<b>14,4</b>	<b>23,4</b>	<b>36</b>	<b>48,6</b>	<b>57,6</b>
	260°C	<b>35</b>	<b>14</b>	<b>22,75</b>	<b>35</b>	<b>47,25</b>	<b>56</b>

Tabla 11. Presiones a inyectar en la pieza 1 con ABS

Material ABS	P0	40%	65%	100%	135%	160%



Presión en vacío pieza 4 mm (bar)	220°C	50	20	32,5	50	67,5	80
	240°C	42	16,8	27,3	42	56,7	67,2
	260°C	35	14	22,75	35	47,25	56

Tabla 12. Presiones a inyectar en la pieza 2 con ABS

Material ABS	P0	40%	65%	100%	135%	160%
Presión en vacío pieza 4,2 mm (bar)	220°C	50	20	32,5	50	67,5
	240°C	42	16,8	27,3	42	56,7
	260°C	36	14,4	23,4	36	48,6

Tabla 13. Presiones a inyectar en la pieza 3 con ABS

Material ABS	P0	40%	65%	100%	135%	160%
Presión en vacío pieza 5,2 mm (bar)	220°C	50	20	32,5	50	67,5
	240°C	42	16,8	27,3	42	56,7
	260°C	36	14,4	23,4	36	48,6

Tabla 14. Presiones a inyectar en la pieza 4 con ABS

En los segundos ensayos que se realizan solo con PP y se obtienen varias piezas con los mismos parámetros para tener repetibilidad en las piezas. El proceso ha sido el mismo, pero en este caso se toman valores de 75%, 100%, 150% y 200% de la presión de vacío

Material PP	P0	75%	100%	150%	200%
Presión en vacío pieza 3,5 mm (bar)	220°C	25	18,75	25	37,5
	260°C	24	18	24	36

Tabla 15. Presiones a inyectar en la pieza 1 con PP. 2º ensayo

Material PP	P0	75%	100%	150%	200%
Presión en vacío pieza 4 mm (bar)	220°C	27	20,25	27	40,5
	260°C	24	18	24	36

Tabla 16. Presiones a inyectar en la pieza 2 con PP. 2º ensayo

Material PP	P0	75%	100%	150%	200%
Presión en vacío pieza 4,2mm	220°C	25	18,75	25	37,5



(bar)	240°C	24	18	24	36	48
-------	-------	----	----	----	----	----

Tabla 17. Presiones a inyectar en la pieza 3 con PP. 2º ensayo

Material PP	P0	75%	100%	150%	200%
Presión en vacío pieza 5,2 mm (bar)	220°C	30	22,5	30	45
	240°C	25	18,75	25	37,5

Tabla 18. Presiones a inyectar en la pieza 4 con PP. 2º ensayo

El resto de parámetros en la elaboración de este proyecto como tiempo de enfriamiento, velocidad de expulsión... no son relevantes para este estudio.

Las piezas que obtenemos con este móvil después de haber insertado los expulsores mecanizados. La numeración que se observa está realizada para distinguir los parámetros de inyección que se han utilizado en esa pieza y poder diferenciarlas del resto.



Imagen 37. Fotografía de una pieza inyectada



*Imagen 39. Conjunto de piezas inyectadas antes de realizar los ensayos de tracción*



## 10.2. Banco de ensayos

Una vez que la pieza ha sido inyectada se tiene que calcular la fuerza de adhesión entre la parte plástica y la parte metálica. En un primer momento se barajan varias posibilidades mediante diseños en papel sobre cómo realizar un banco de ensayo pero quedan descartados ya que la propia máquina de inyección posee un mecanismo cilindro pistón que muestra las fuerzas de expulsión.

Tras la realización de las primeras piezas de inyección se comprueba que este sistema no es válido ya que los valores mínimos de fuerzas que da la propia máquina son mucho mayores que los que deberíamos obtener y por tanto queda descartado este método.

Volviendo entonces a la primera opción se barajan posibilidades y se solicita utilizar la maquina “Instron” para ensayos de tracción que se encuentra en el departamento de materiales.

### 10.2.1. Construcción del banco de ensayo

Para un ahorro en costes, una de las imposiciones del diseño es utilizar el material existente en el taller del TIIP. Así pues con una idea inicial basado en dos cáncamos que se colocarán en la máquina a los que colocaremos dos chapas para sujetar la pieza inyectada y de las cuales tiraremos para expulsar el material plástico, se revisa el contenido y finalmente se opta por utilizar la siguiente lista.

Marca	Nº Piezas	Designación
1	2	Cáncamos
2	4	Placa acero e=1,5
3	1	Varilla roscada M6
4	1	Placa acero e=6
5	2	Tuerca hexagonal M6
6	1	Tuerca hexagonal M10
7	1	Varilla roscada M10

Tabla 19. Listado de materiales del banco de ensayo



Con el material seleccionado y la idea inicial, se realiza un modelo en 3D con el software ProEngineer para posteriormente realizar los planos y fabricar en el taller.

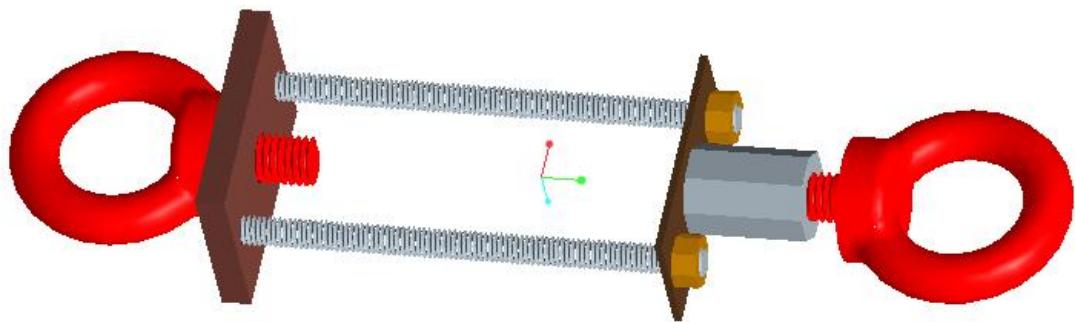


Imagen 40. Diseño 3D del banco de ensayo

En el cáncamo superior se rosca sobre una tuerca de M10 en cuyo interior se pega una varilla de M10 y longitud 10 a la que previamente se le ha realizado un roscado interior de M3, para poder introducir la pieza inyectada y que no se deslice en su interior.

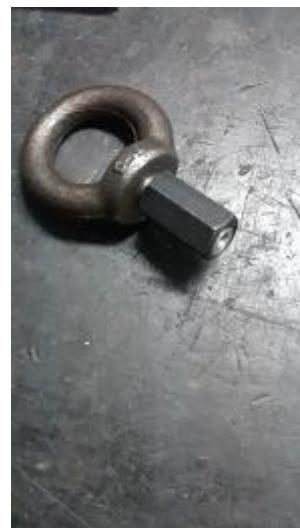


Imagen 41. Fotografía cáncamo y tuerca hexagonal para piezas roscadas M3

La otra parte del prototipo consta de otro cáncamo que roscamos en el centro una chapa de mayor espesor y en la cual se realizan 2 agujeros de M6 donde se colocan las varillas de este tamaño.



Imagen 42. Montaje del banco de ensayo

Al otro lado se coloca otra chapa que intercambiaremos según la pieza que queramos medir ya que se han utilizado 4 piezas de distinto diámetro para la realización de este PFC.

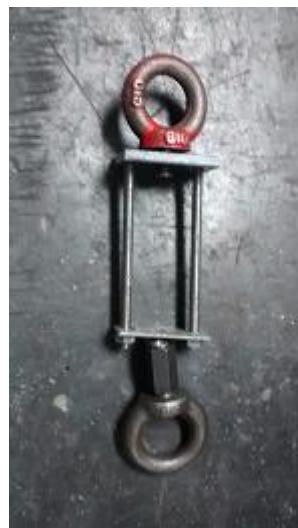


Imagen 43. Banco de ensayo

Para realizar el proceso de inyección y obtener una pieza que podamos introducir en este banco de ensayo ha habido que mecanizar 40 cilindros de manera que se introducen en el hueco del molde y se inyecta sobre ellos y cuando son expulsadas se pueden colocar la pieza sobreinyectada en el banco de ensayo.

En el molde ha habido que realizar unas modificaciones acortando los expulsores tubulares 10 mm para introducir las piezas que sobre las que se va a realizar la inyección.



### 10.2.2. Ensayo de tracción maquina instron

La universidad de Zaragoza cuenta con una máquina de ensayos instron en el departamento de ingeniería mecánica en las naves pertenecientes al edificio Betancourt del campus Rio Ebro. Esta máquina se ha utilizado para realizar las pruebas que se requerían para la realización de este proyecto.

El funcionamiento es bastante sencillo. Mediante los cáncamos M10 que hemos colocado en nuestro prototipo de ensayo podemos fijarlo a la máquina y colocar a la pieza como muestra la siguiente fotografía.



Imagen 44. Ensayo de tracción



Como se observa la pieza cada pieza que se ensaya va roscada al banco de ensayo y mediante la placa se estira para conseguir vencer las fuerzas de adhesión y obtener las fuerzas de expulsión. La velocidad usada para este ensayo ha sido de 5 mm/min. Y se han realizado en torno a 350 ensayos.

La máquina va conectada a un ordenador que va grabando los datos en cada instante y nos proporciona unas graficas sobre las que luego se puede trabajar y analizar datos.

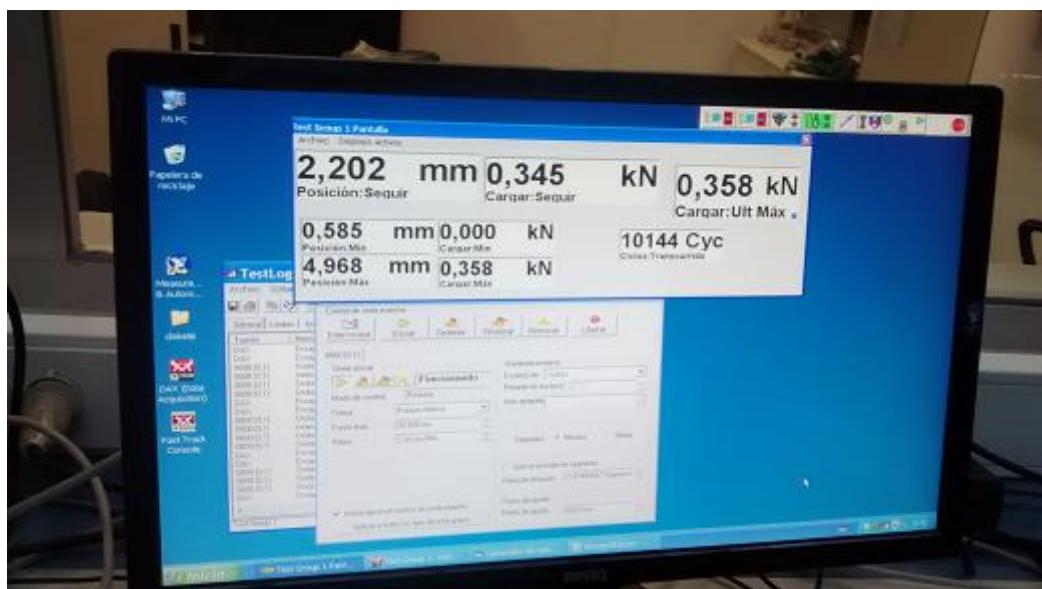


Imagen 45. Imagen del ordenador durante el ensayo de tracción

Los gráficos obtenidos presentan la forma de un gráfico tensión deformación en él se observa una función lineal hasta que alcanza la deformación plástica. En ese punto se produce un gran desplazamiento pero apenas aumenta el valor de la carga hasta que se produce la rotura y disminuye drásticamente. El pico que observamos que vuelve a subir se asocia con la rugosidad de la pieza sobre la que hemos inyectado. Como queríamos conocer el punto donde se producía la separación de la pieza no ha hecho falta retirar todo el material plástico



Imagen 46. Grafica de la fuerza de expulsión obtenida en la maquina instron

Estos ensayos se realizaron dos veces. Ya que los primeros no fueron válidos.

En el caso del ABS este fracturaba antes en vez de separar la parte plástica de la metálica y tuvimos que desechar la idea de realizar con este plástico, porque aunque contáramos con más piezas con las mismas condiciones íbamos a tener el mismo problema.



Imagen 47. Fractura con el material ABS



## **11. RESULTADOS**

En este apartado se muestra el conjunto de todos los resultados obtenidos durante la realización de este proyecto. Teóricos, estimados y ensayo de tracción.

Estos resultados han sido ya mostrados a lo largo de todo el proyecto pero quiero recopilarlos todos para que se permita una rápida consulta para su comparación entre todos los factores que han intervenido ya que era uno de los principales objetivos.

### **11.1. ABS**

Como ya se ha comentado anteriormente los ensayos realizados en este material no han resultado satisfactorios. Por este motivo para este material solo voy a mostrar los resultados obtenidos en las ecuaciones.



### 11.1.1. Piezas Ø 3,5 mm

#### A) Comparación Método teórico y estimación

220°C		Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Diferencia	Variación %
18,75	<b>265,07</b>	<b>304,85</b>	39,78	13,05
25	<b>243,73</b>	<b>278,6</b>	34,87	12,52
37,5	<b>241,05</b>	<b>275,33</b>	34,28	12,45
50	<b>242,92</b>	<b>271,86</b>	28,94	10,65

Tabla 20. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 220°C

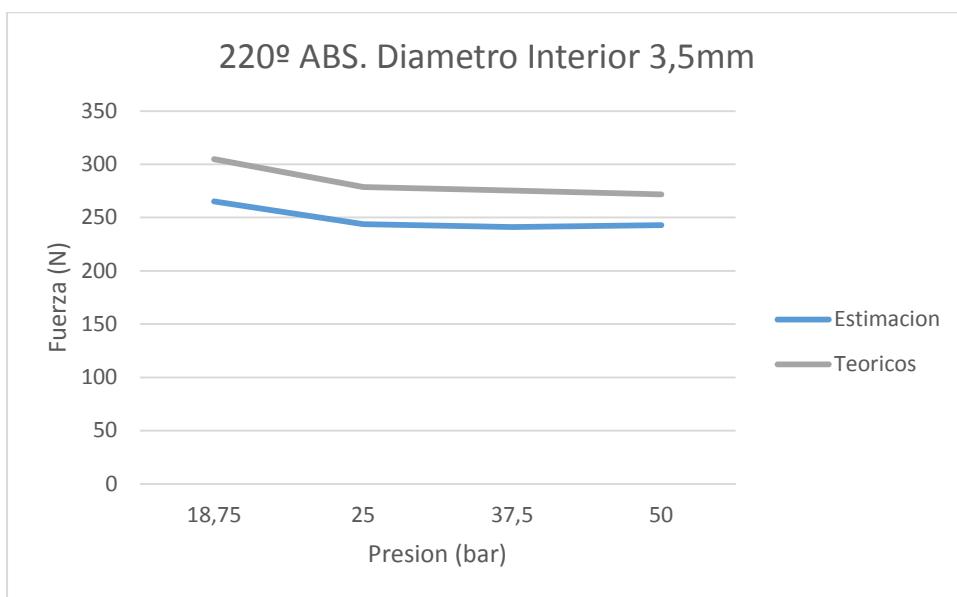


Imagen 48. Resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 220°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
18,75	<b>231,04</b>	<b>251,92</b>	20,88	8,29
25	<b>218,24</b>	<b>231,85</b>	13,61	5,87
37,5	<b>216,18</b>	<b>229,22</b>	13,04	5,69
50	<b>217,83</b>	<b>226,44</b>	8,61	3,80

Tabla 21. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 260°C

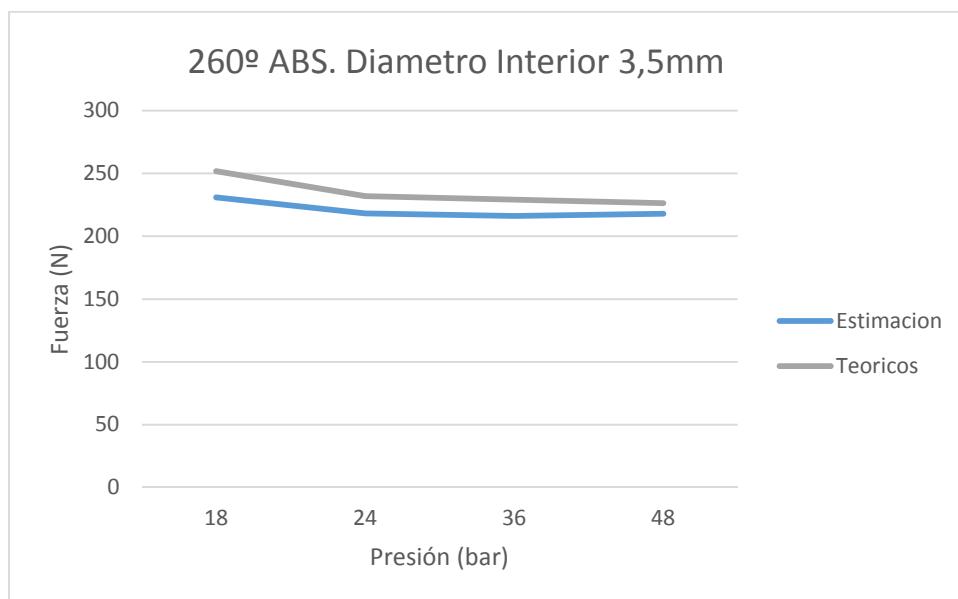


Imagen 49. Resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 260°C



b) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18	<b>265,07</b>	<b>231,04</b>	34,03	12,84
24	<b>243,73</b>	<b>218,24</b>	25,49	10,46
36	<b>241,05</b>	<b>216,18</b>	24,87	10,32
48	<b>242,92</b>	<b>217,83</b>	25,09	10,33

Tabla 22. Comparación resultados estimación pieza 1. ABS

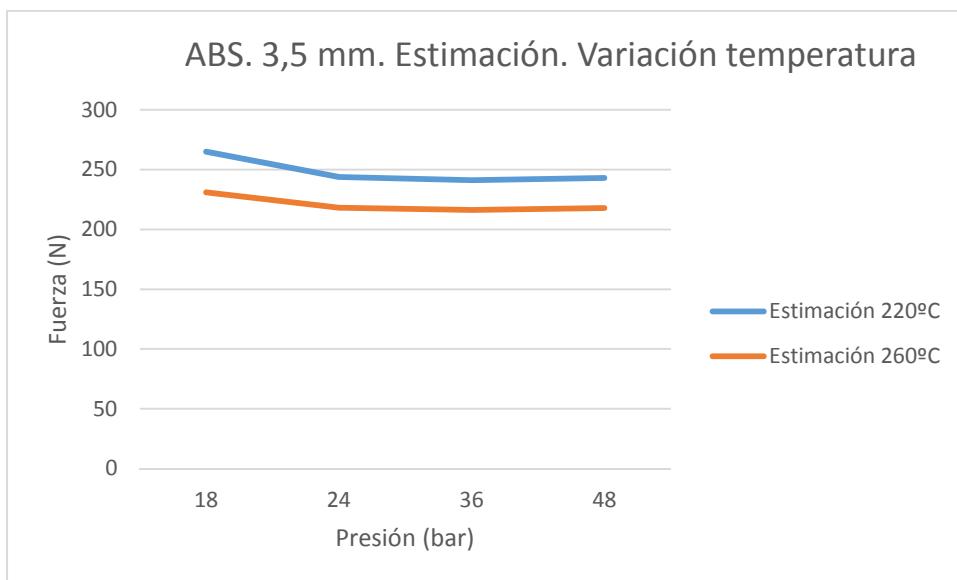


Imagen 50. Resultados estimación pieza 1. ABS



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18	<b>304,85</b>	<b>251,92</b>	52,93	17,36
24	<b>278,6</b>	<b>231,85</b>	46,75	16,78
36	<b>275,33</b>	<b>229,22</b>	46,11	16,75
48	<b>271,86</b>	<b>226,44</b>	45,42	16,71

Tabla 23. Comparación resultados teórico pieza 1. ABS

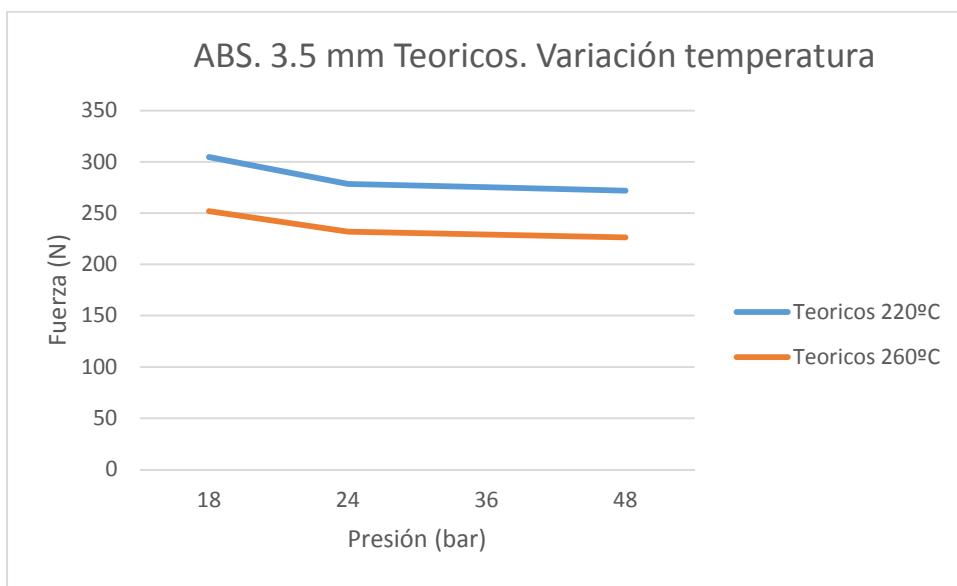


Imagen 51. Resultados teórico pieza 1. ABS



### 11.1.2. Piezas Ø 4 mm

#### A) Comparación Método teórico y estimación

Presión (bar)	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
	M. Estimación	Teórico		
37,5	<b>298,2</b>	<b>308,32</b>	10,12	3,28
50	<b>274,21</b>	<b>281,73</b>	7,52	2,67
67,5	<b>271,19</b>	<b>278,42</b>	7,23	2,60
80	<b>273,29</b>	<b>274,69</b>	1,40	0,51

Tabla 24. Comparación resultados estimación-teórico pieza 2. ABS 220ºC

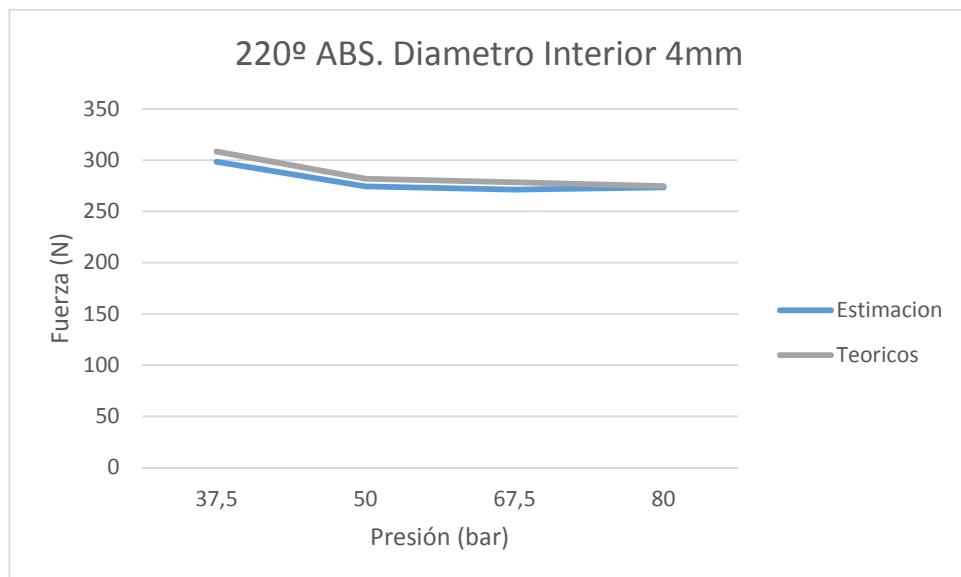


Imagen 52. Resultados estimación-teórico pieza 2. ABS 220ºC



260°C	Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Diferencia
37,5	<b>266,58</b>	<b>260,80</b>	5,78
50	<b>251,81</b>	<b>239,77</b>	12,04
67,5	<b>249,44</b>	<b>237,03</b>	12,41
80	<b>251,34</b>	<b>233,96</b>	17,38

Tabla 25. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. ABS 260°C

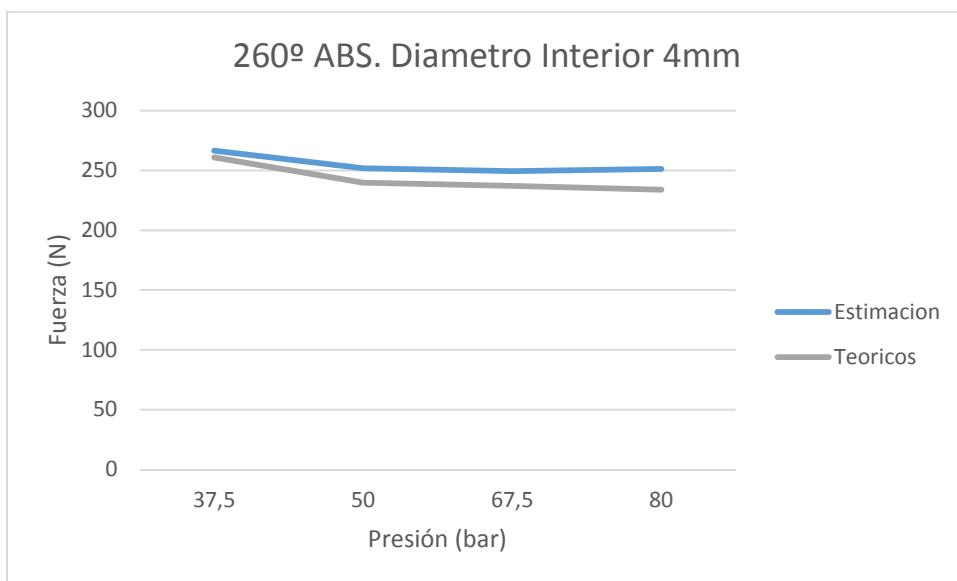


Imagen 53. Resultados estimación-teórico pieza 2. ABS 260°C



B) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
37,5	<b>298,2</b>	<b>266,58</b>	31,62	10,60
50	<b>274,21</b>	<b>251,81</b>	22,40	8,17
67,5	<b>271,19</b>	<b>249,44</b>	21,75	8,02
80	<b>273,29</b>	<b>251,34</b>	21,95	8,03

Tabla 26. Comparación resultados estimación pieza 2. ABS

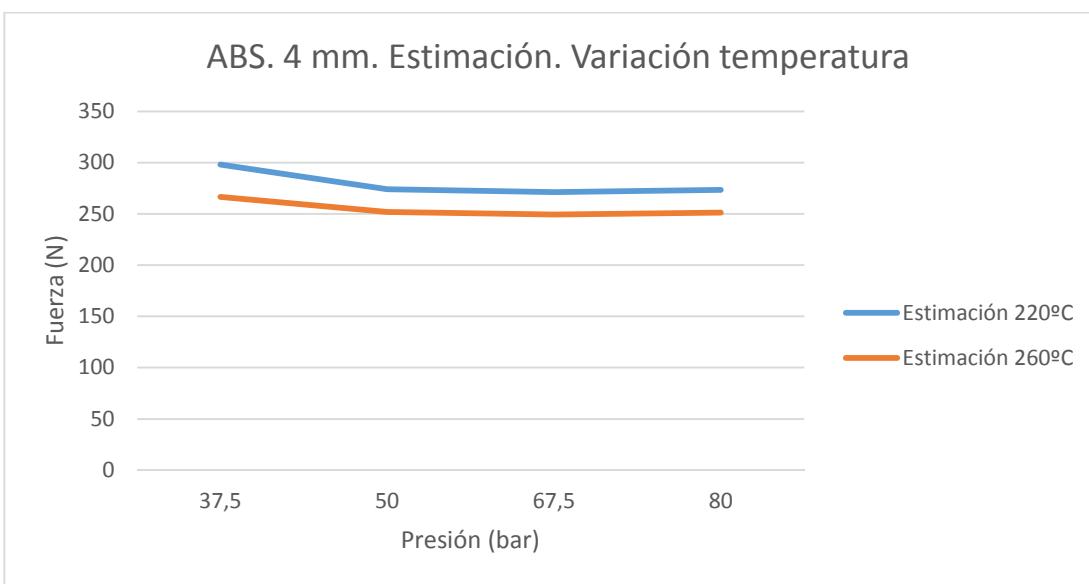


Imagen 54. Resultados estimación pieza 2. ABS



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
37,5	<b>308,32</b>	<b>260,80</b>	47,52	15,41
50	<b>281,73</b>	<b>239,77</b>	41,97	14,90
67,5	<b>278,42</b>	<b>237,03</b>	41,39	14,87
80	<b>274,69</b>	<b>233,96</b>	40,74	14,83

Tabla 27. Comparación resultados teórico pieza 2. ABS

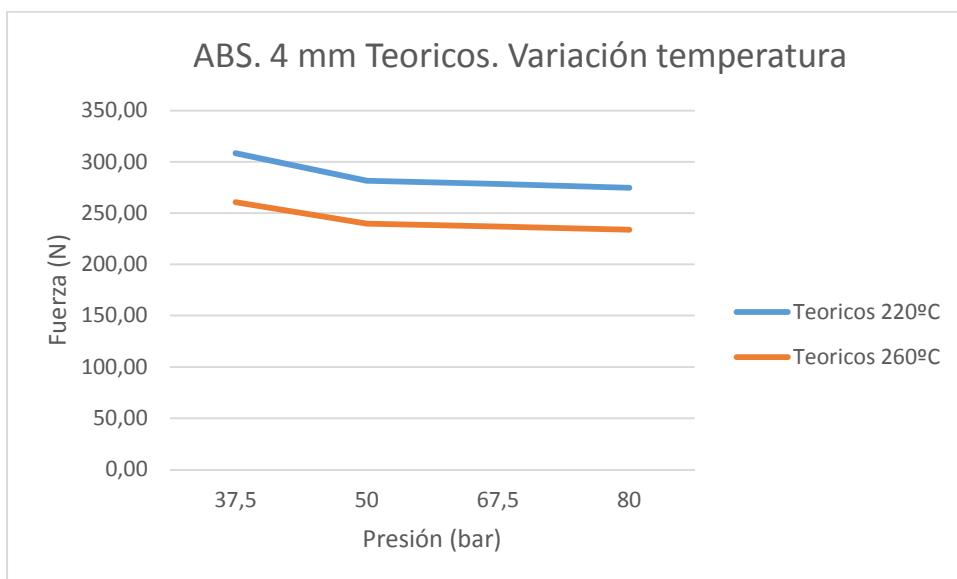


Imagen 55. Resultados teórico pieza 2. ABS



### 11.1.3. Piezas Ø 4,2 mm

#### A) Comparación Método teórico y estimación

220°C		Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Diferencia	Variación %
25	<b>252,79</b>	<b>241,7</b>	11,09	4,39
42	<b>232,44</b>	<b>220,97</b>	11,47	4,93
63	<b>229,89</b>	<b>218,38</b>	11,51	5,01
84	<b>231,67</b>	<b>215,82</b>	15,85	6,84

Tabla 28. Comparación resultados estimación-teórico pieza 3. ABS 220°C

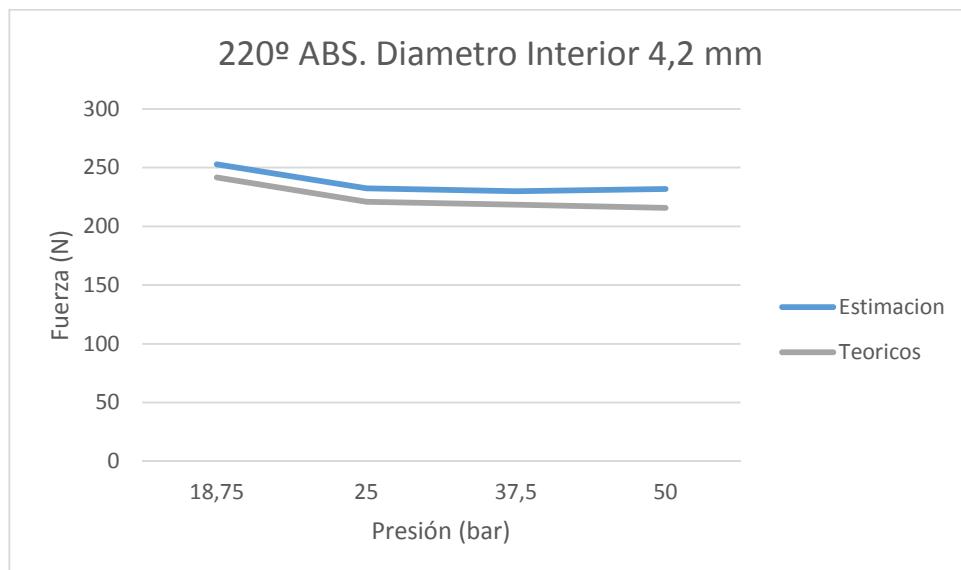


Imagen 56. Resultados estimación-teórico pieza 3. ABS 220°C



260°C		Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Diferencia	Variación %
25	<b>230,51</b>	<b>224,85</b>	5,66	2,45
42	<b>217,74</b>	<b>207,17</b>	10,57	4,85
63	<b>215,68</b>	<b>204,85</b>	10,83	5,02
84	<b>217,33</b>	<b>202,54</b>	14,79	6,81

Tabla 29. Comparación resultados estimación-teórico pieza 3. ABS 260°C

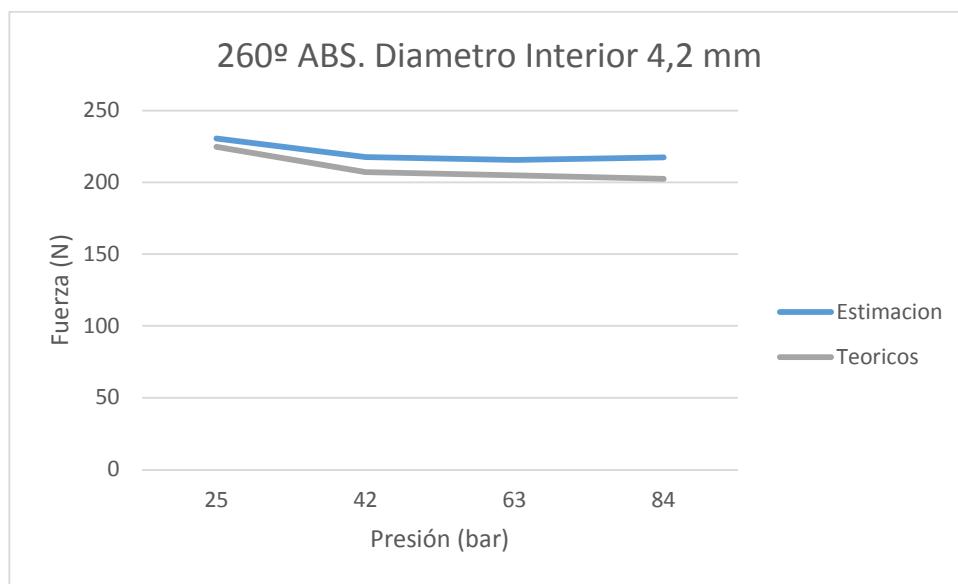


Imagen 57. Resultados estimación-teórico pieza 3. ABS 260°C



B) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
25	<b>252,79</b>	<b>230,51</b>	22,28	8,81
42	<b>232,44</b>	<b>217,74</b>	14,70	6,32
63	<b>229,89</b>	<b>215,68</b>	14,21	6,18
84	<b>231,67</b>	<b>217,33</b>	14,34	6,19

Tabla 30. Comparación resultados estimación pieza 3. ABS

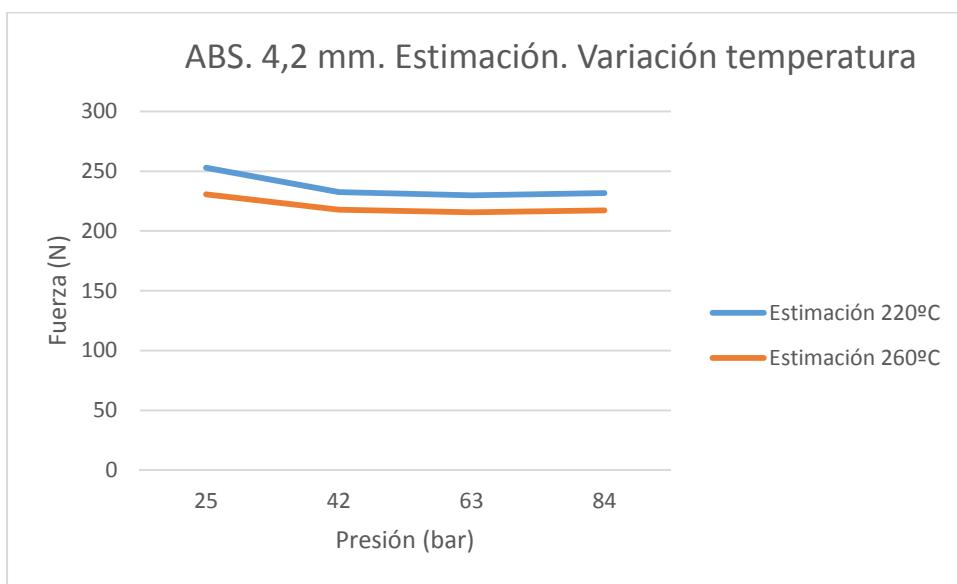


Imagen 58. Resultados estimación pieza 3. ABS



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
25	<b>241,7</b>	<b>224,85</b>	16,85	6,97
42	<b>220,97</b>	<b>207,17</b>	13,80	6,24
63	<b>218,38</b>	<b>204,85</b>	13,53	6,20
84	<b>215,82</b>	<b>202,54</b>	13,28	6,15

Tabla 31. Comparación resultados teórico pieza 3. ABS

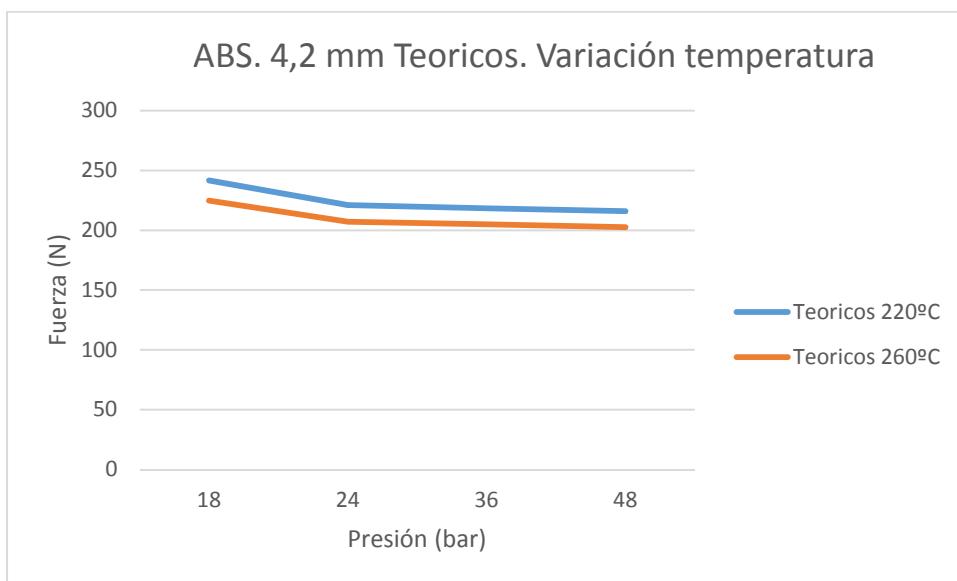


Imagen 59. Resultados teórico pieza 3. ABS



#### 11.1.4. Piezas Ø 5,2 mm

##### A) Comparación Método teórico y estimación

220°C		Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Diferencia	Variación %
25	<b>292,36</b>	<b>320,69</b>	28,33	8,83
42	<b>268,83</b>	<b>293,02</b>	24,19	8,26
63	<b>265,87</b>	<b>289,57</b>	23,7	8,18
84	<b>267,93</b>	<b>285,64</b>	17,71	6,20

Tabla 32. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. ABS 220°C

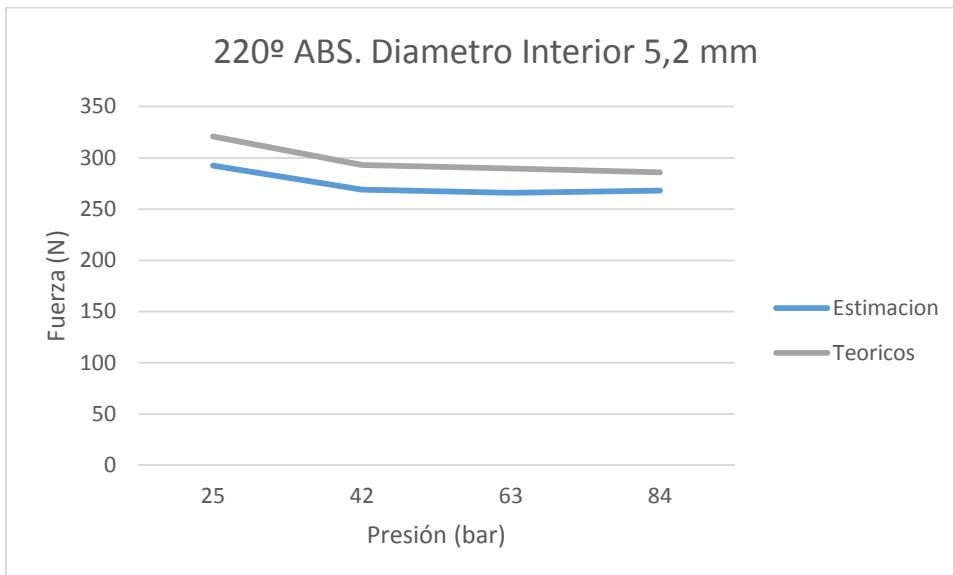


Imagen 60. Resultados estimación-teórico pieza 4. ABS 220°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Diferencia
25	<b>255,55</b>	<b>265,09</b>	9,54
42	<b>241,39</b>	<b>234,64</b>	6,75
63	<b>239,12</b>	<b>240,86</b>	1,74
84	<b>240,94</b>	<b>237,69</b>	3,25

Tabla 33. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. ABS 220°C

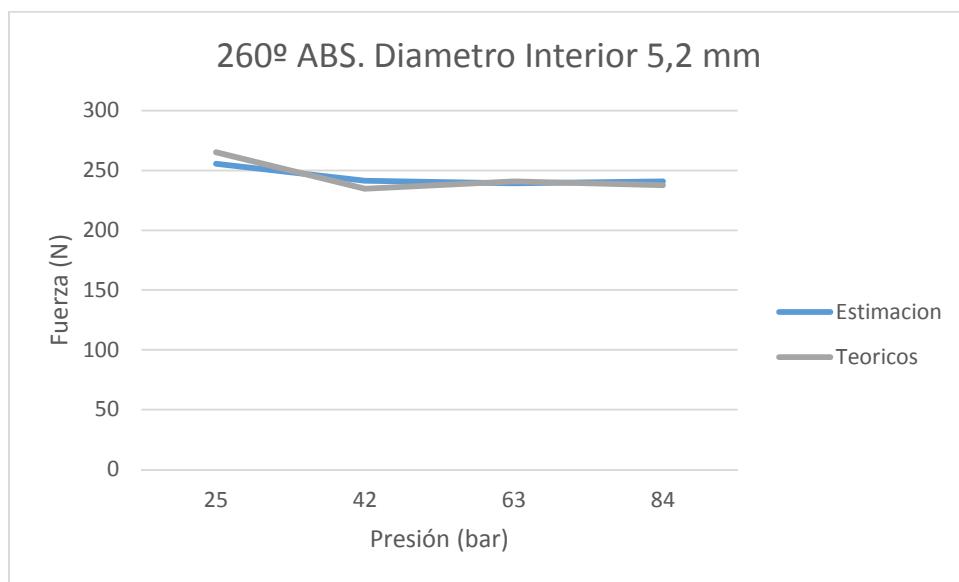


Imagen 61. Resultados estimación-teórico pieza 4. ABS 260°C



B) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
	220°C	260°C		
25	<b>292,36</b>	<b>255,55</b>	36,81	12,59
42	<b>268,83</b>	<b>241,39</b>	27,44	10,21
63	<b>265,87</b>	<b>239,12</b>	26,75	10,06
84	<b>267,93</b>	<b>240,94</b>	26,99	10,07

Tabla 34. Comparación resultados estimación pieza 4. ABS

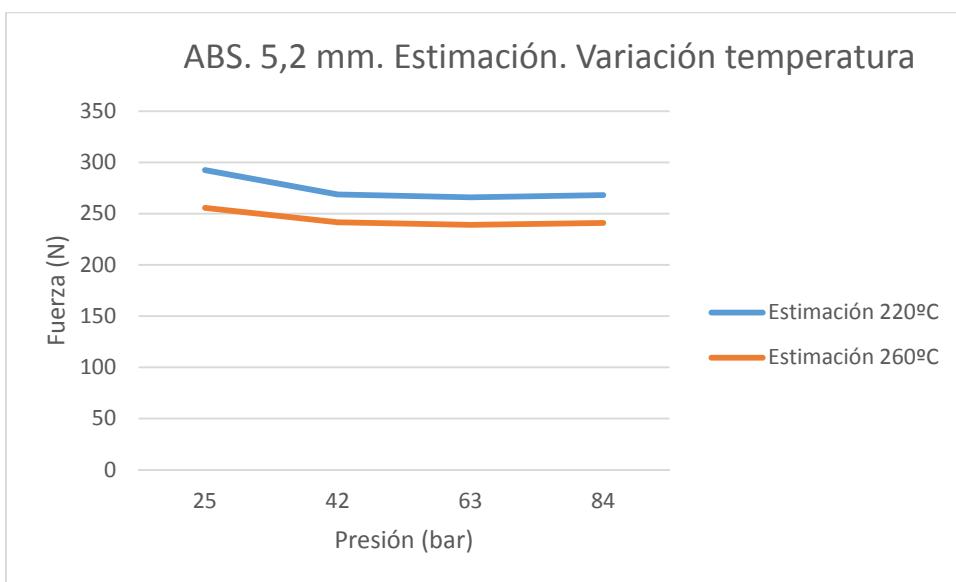


Imagen 62. Resultados estimación pieza 4. ABS



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
25	<b>320,69</b>	<b>265,09</b>	55,6	17,34
42	<b>293,02</b>	<b>234,64</b>	58,38	19,92
63	<b>289,57</b>	<b>240,86</b>	48,71	16,82
84	<b>285,64</b>	<b>237,69</b>	47,95	16,79

Tabla 35. Comparación resultados teórico pieza 4. ABS

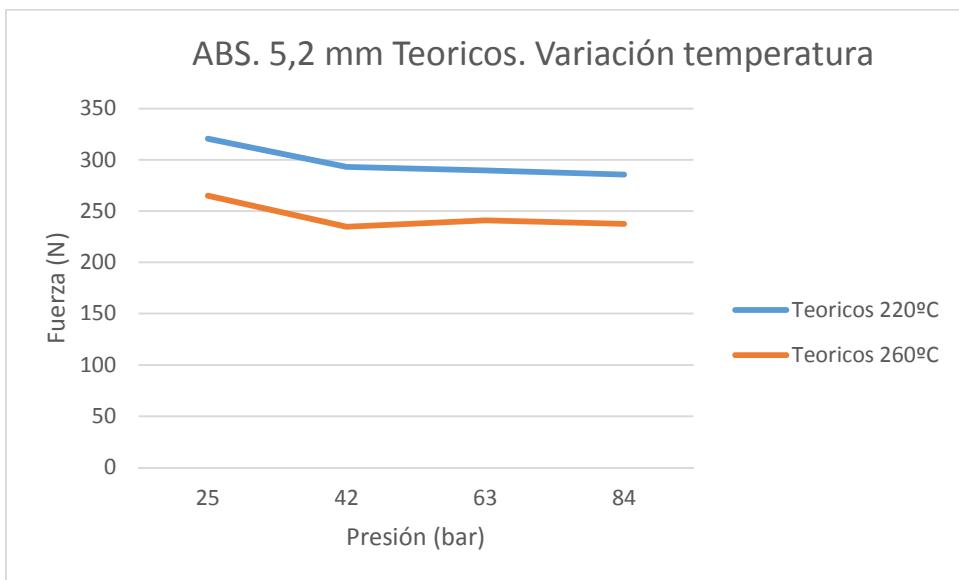


Imagen 63. Resultados teórico pieza 4. ABS 260°C



## 11.2. Polipropileno (PP)

Con el material polipropileno los resultados han sido satisfactorios, por esta razón, existe un mayor número de datos y tablas comparativas que ofrecen la comparativa con todas las variables más importantes que se te han tratado

### 11.2.1. Pieza Ø 3,5

- A) Comparación método teórico, estimación y ensayos de tracción

220°C	Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Real
18,75	<b>254,18</b>	<b>292,30</b>	<b>294,04</b>
25	<b>233,72</b>	<b>267,16</b>	<b>245,76</b>
37,5	<b>231,15</b>	<b>264,02</b>	<b>229,94</b>
50	<b>232,94</b>	<b>260,69</b>	<b>239,43</b>

Tabla 36. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 1. PP. 220°C

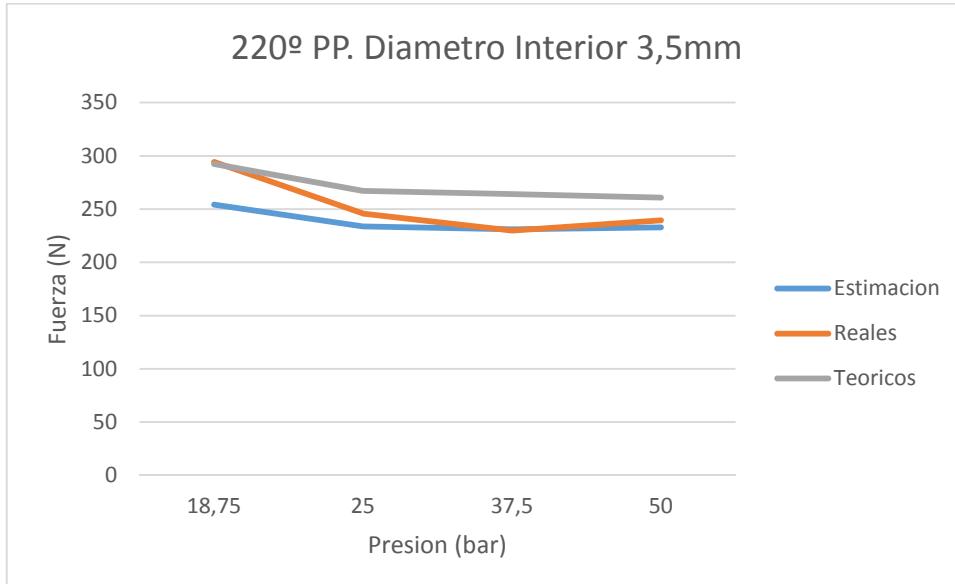


Imagen 64. Resultados estimación-teórico-real pieza 1. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Real		
18,75	<b>254,18</b>	<b>294,04</b>	39,86	13,56
25,00	<b>233,72</b>	<b>245,76</b>	12,04	4,90
37,50	<b>231,15</b>	<b>229,94</b>	1,21	0,52
50,00	<b>232,94</b>	<b>239,43</b>	6,49	2,71

Tabla 37. Comparación resultados estimación-real pieza 1. PP. 220°C

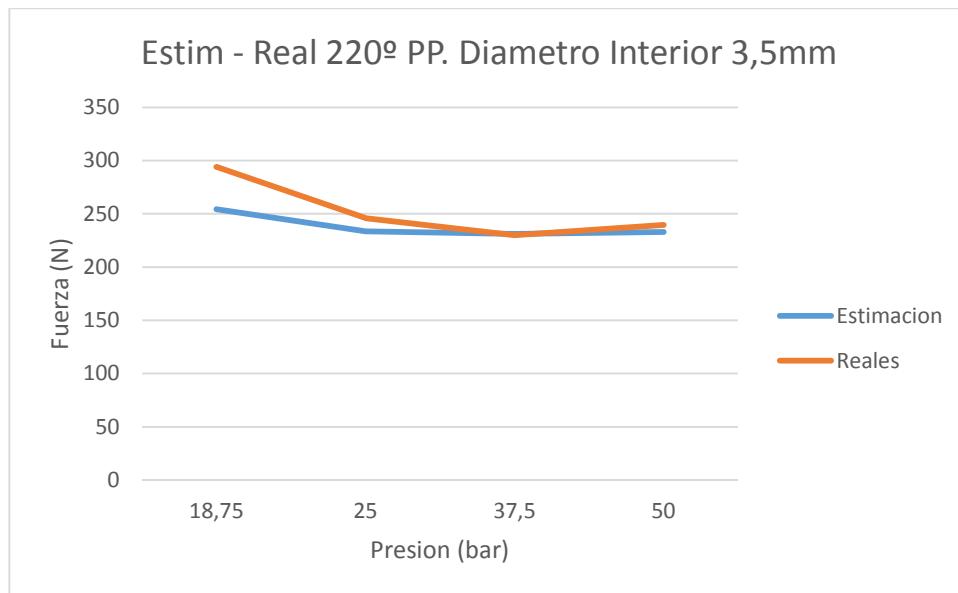


Imagen 65. Resultados estimación -real pieza 1. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	Teórico	Real		
18,75	<b>292,30</b>	<b>294,04</b>	1,74	0,59
25,00	<b>267,16</b>	<b>245,76</b>	21,40	8,01
37,50	<b>264,02</b>	<b>229,94</b>	34,08	12,91
50,00	<b>260,69</b>	<b>239,43</b>	21,26	8,16

Tabla 38. Comparación resultados teórico-real pieza 1. PP. 220°C

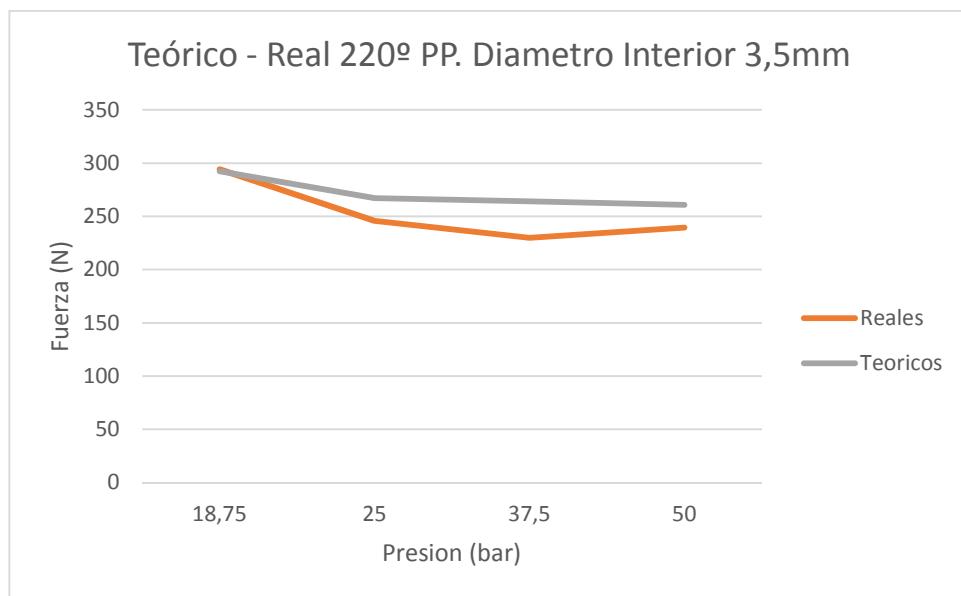


Imagen 66. Resultados teórico-real pieza 1. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
18,75	<b>254,18</b>	<b>292,30</b>	38,12	13,04
25	<b>233,72</b>	<b>267,16</b>	33,44	12,52
37,5	<b>231,15</b>	<b>264,02</b>	32,87	12,45
50	<b>232,94</b>	<b>260,69</b>	27,75	10,65

Tabla 39. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. PP. 220°C

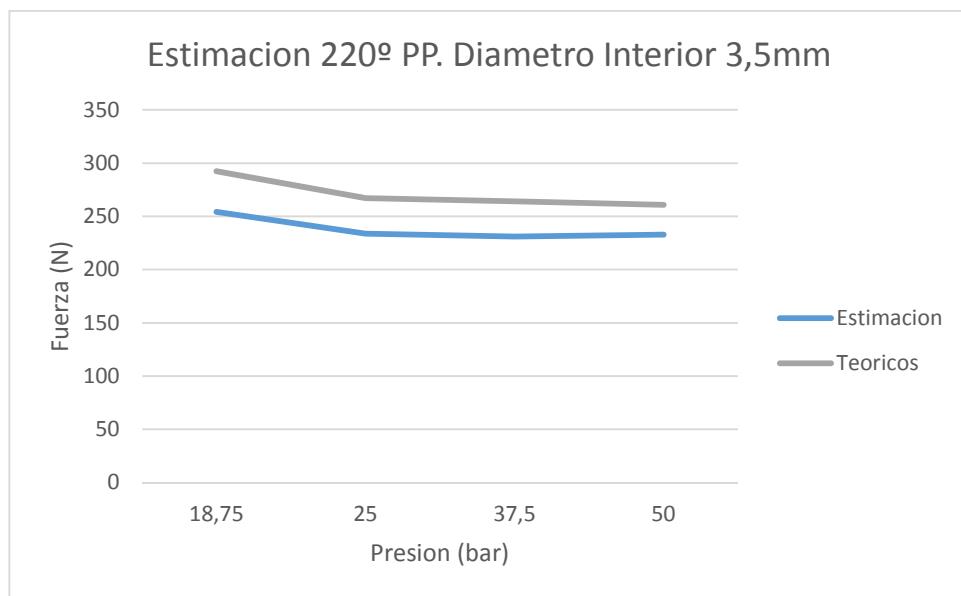


Imagen 67. Resultados estimación-teórico pieza 1. PP. 220°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Real
18,75	<b>244,37</b>	<b>266,46</b>	<b>267,51</b>
25	<b>230,83</b>	<b>245,23</b>	<b>245,76</b>
37,5	<b>228,66</b>	<b>242,45</b>	<b>233,01</b>
50	<b>230,39</b>	<b>239,50</b>	<b>231,32</b>

Tabla 40. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 1. PP. 260°C

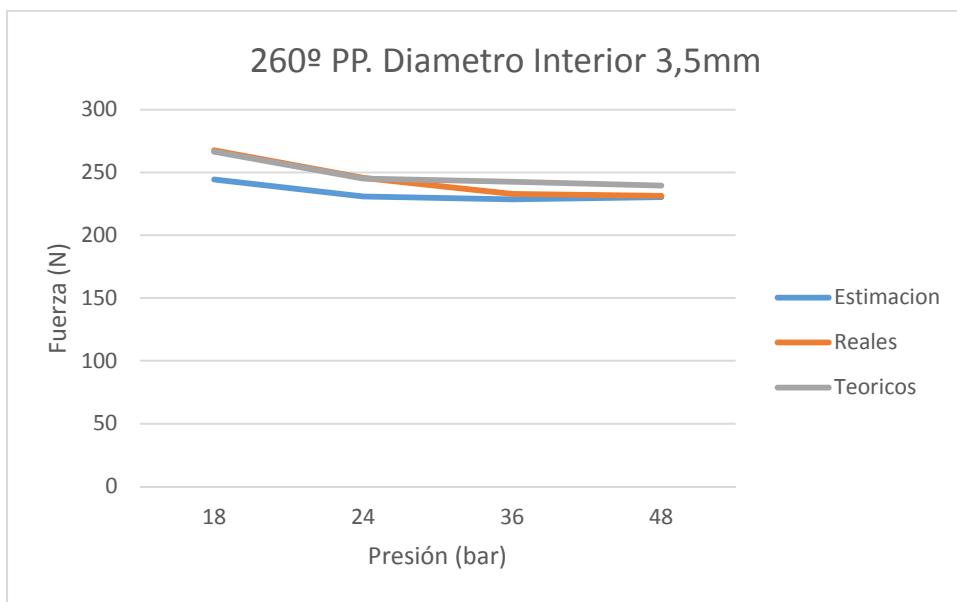


Imagen 68. Resultados estimación-teórico-real pieza 1. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Real	Diferencia
18,75	<b>244,37</b>	<b>267,51</b>	23,14
25,00	<b>230,83</b>	<b>245,76</b>	14,92
37,50	<b>228,66</b>	<b>233,01</b>	4,36
50,00	<b>230,39</b>	<b>231,32</b>	0,92

Tabla 41. Comparación resultados estimación-real pieza 1. PP. 260°C

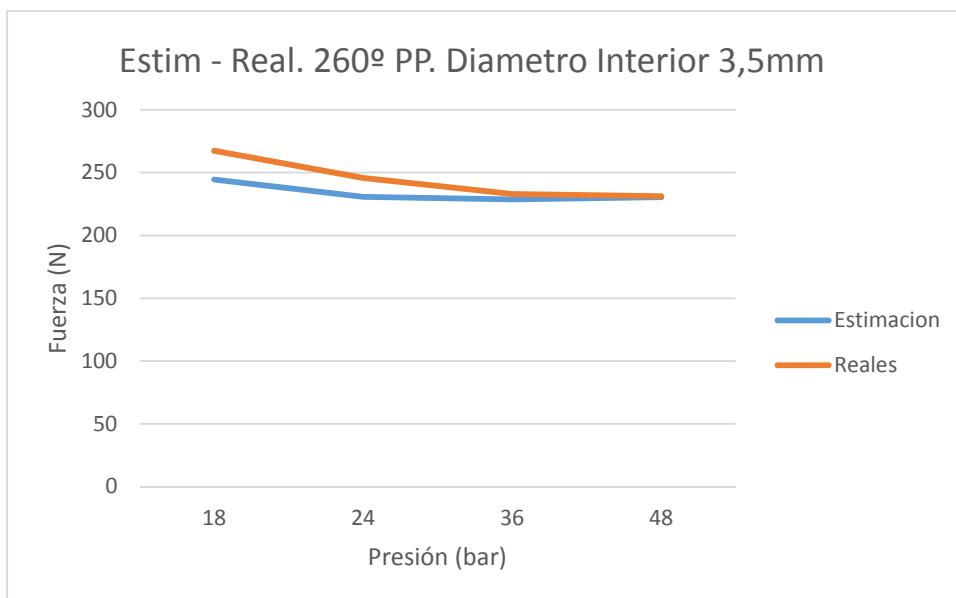
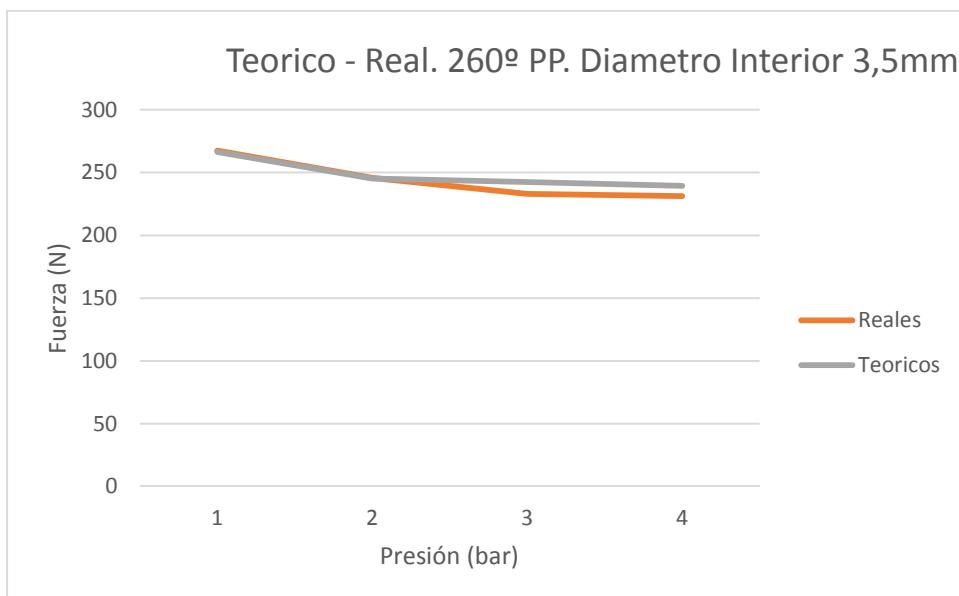


Imagen 69. Resultados estimación -real pieza 1. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)			
Presión (bar)	Teórico	Real	Diferencia	Variación %
18,75	<b>266,46</b>	<b>267,51</b>	1,06	0,40
25,00	<b>245,23</b>	<b>245,76</b>	0,53	0,22
37,50	<b>242,45</b>	<b>233,01</b>	9,44	3,89
50,00	<b>239,50</b>	<b>231,32</b>	8,19	3,42

Tabla 42. Comparación resultados teórico-real pieza 1. PP. 260°C





260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
18,75	<b>244,37</b>	<b>266,46</b>	22,09	8,29
25	<b>230,83</b>	<b>245,23</b>	14,39	5,87
37,5	<b>228,66</b>	<b>242,45</b>	13,80	5,69
50	<b>230,39</b>	<b>239,50</b>	9,11	3,80

Tabla 43. Comparación resultados estimación-teórico pieza 1. PP. 260°C

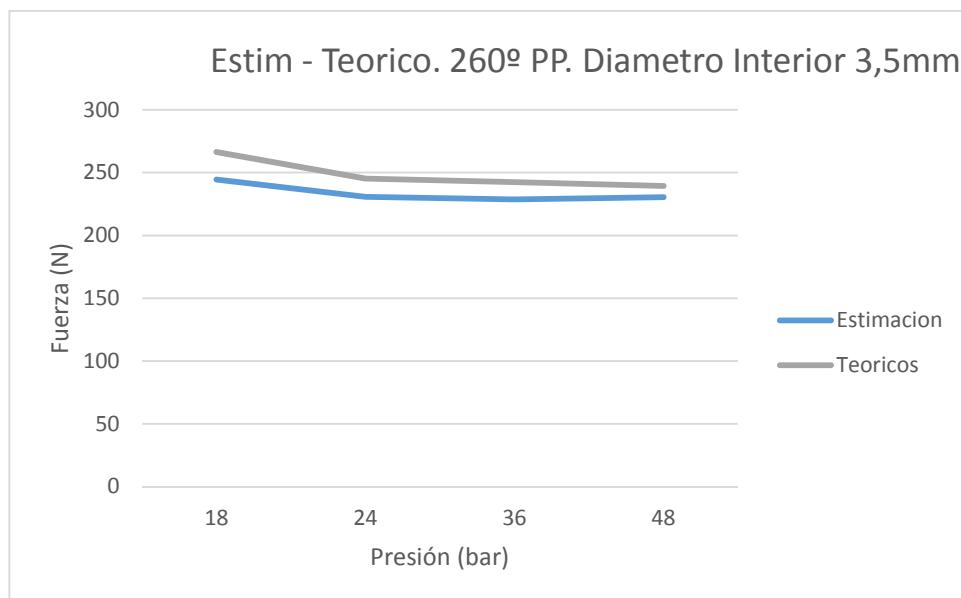


Imagen 71. Resultados estimación-teórico pieza 1. PP. 260°C



B) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>254,18</b>	<b>244,37</b>	9,81	3,86
25	<b>233,72</b>	<b>230,83</b>	2,89	1,23
37,5	<b>231,15</b>	<b>228,66</b>	2,50	1,08
50	<b>232,94</b>	<b>230,39</b>	2,55	1,09

Tabla 44. Comparación resultados estimación pieza 1. PP.

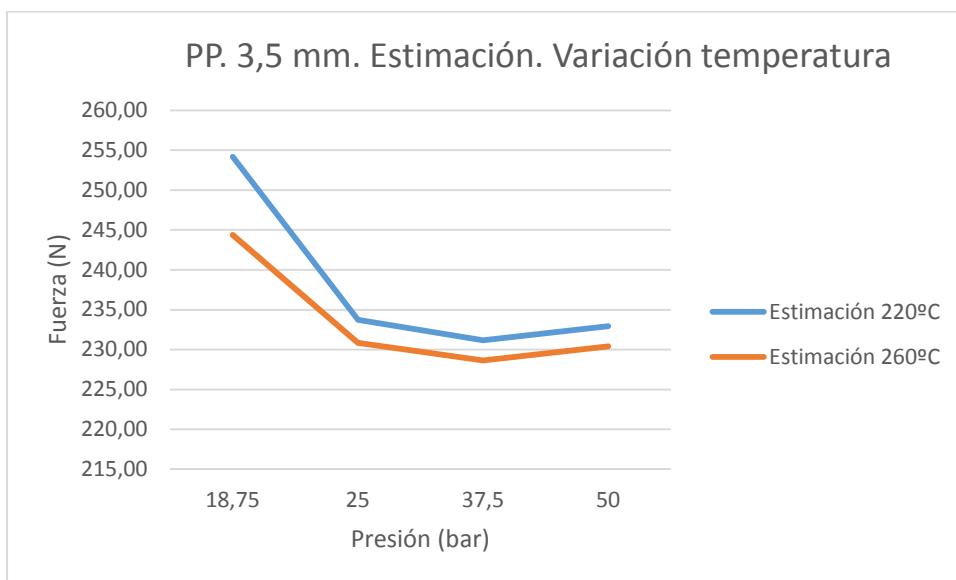


Imagen 72. Resultados estimación pieza 1. PP.



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>292,30</b>	<b>266,46</b>	25,84	8,84
25	<b>267,16</b>	<b>245,23</b>	21,93	8,21
37,5	<b>264,02</b>	<b>242,45</b>	21,57	8,17
50	<b>260,69</b>	<b>239,50</b>	21,19	8,13

Tabla 45. Comparación resultados teórico pieza 1. PP.

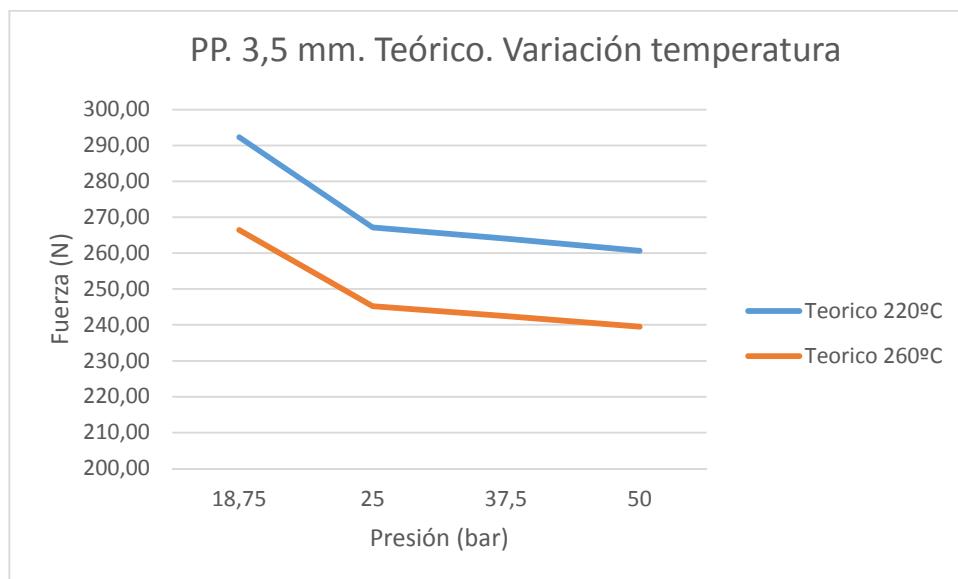


Imagen 73. Resultados teórico pieza 1. PP.



Real	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>294,04</b>	<b>267,51</b>	26,52	9,02
25	<b>245,76</b>	<b>245,76</b>	0,00	0,00
37,5	<b>229,94</b>	<b>233,01</b>	3,07	1,32
50	<b>239,43</b>	<b>231,32</b>	8,12	3,39

Tabla 46. Comparación resultados real pieza 1. PP.

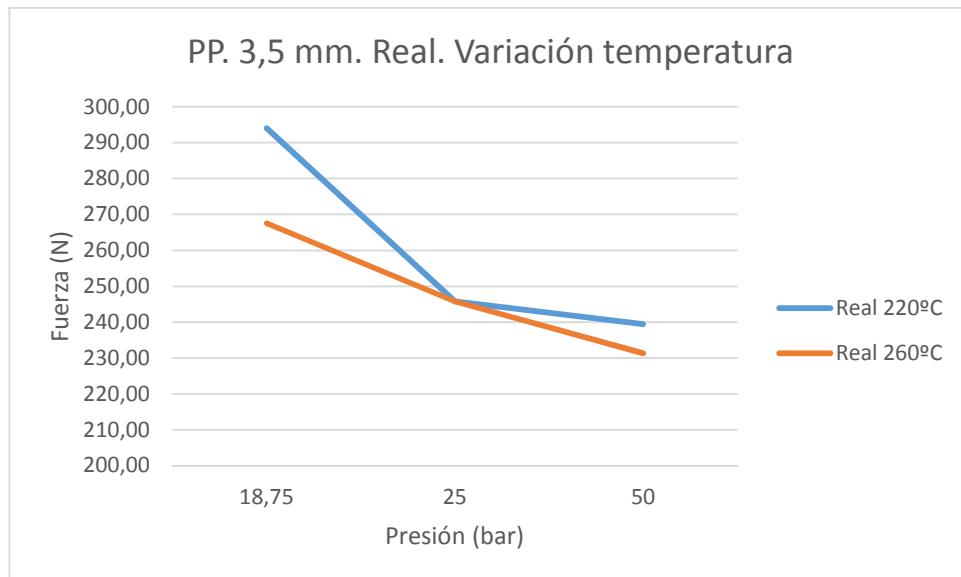


Imagen 74. Resultados real pieza 1. PP.



### 11.2.2. Pieza Ø 4

A) Comparación método teórico, estimación y ensayos de tracción

220°C		Fuerza expulsión (N)		
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Real	
18,75	<b>289,92</b>	<b>299,75</b>	<b>330,21</b>	
25	<b>266,59</b>	<b>273,91</b>	<b>315,75</b>	
37,5	<b>263,66</b>	<b>270,69</b>	<b>305,18</b>	
50	<b>265,70</b>	<b>267,06</b>	<b>294,76</b>	

Tabla 47. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 220°C

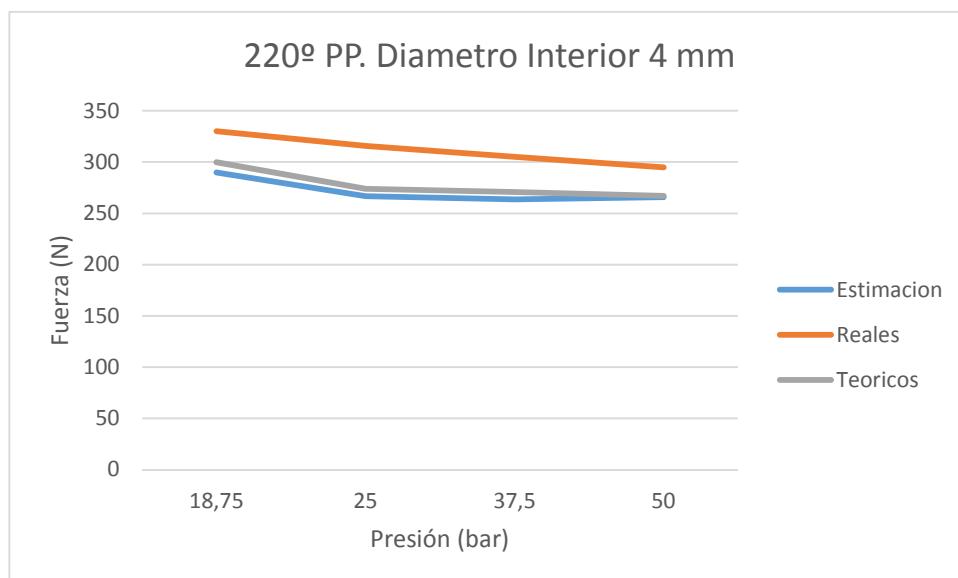


Imagen 75. Resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Real		
18,75	<b>289,92</b>	<b>330,21</b>	40,29	12,20
25,00	<b>266,59</b>	<b>315,75</b>	49,16	15,57
37,50	<b>263,66</b>	<b>305,18</b>	41,52	13,61
50,00	<b>265,70</b>	<b>294,76</b>	29,06	9,86

Tabla 48. Comparación resultados estimación-real pieza 2. PP. 220°C

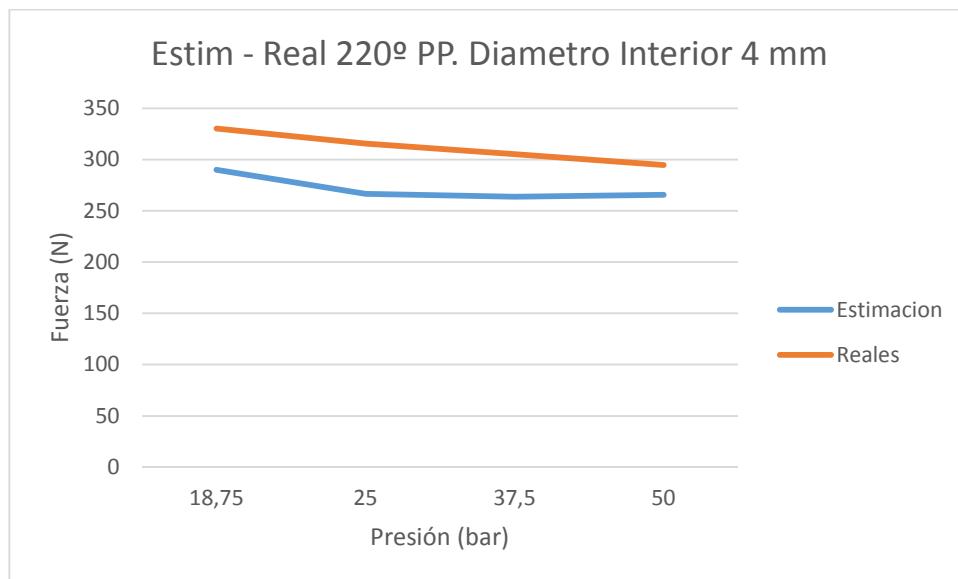


Imagen 76. Resultados estimación-real pieza 2. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	Teórico	Real		
18,75	<b>299,75</b>	<b>330,21</b>	30,46	9,22
25,00	<b>273,91</b>	<b>315,75</b>	41,84	13,25
37,50	<b>270,69</b>	<b>305,18</b>	34,49	11,30
50,00	<b>267,06</b>	<b>294,76</b>	27,70	9,40

Tabla 49. Comparación resultados teórico-real pieza 2. PP. 220°C

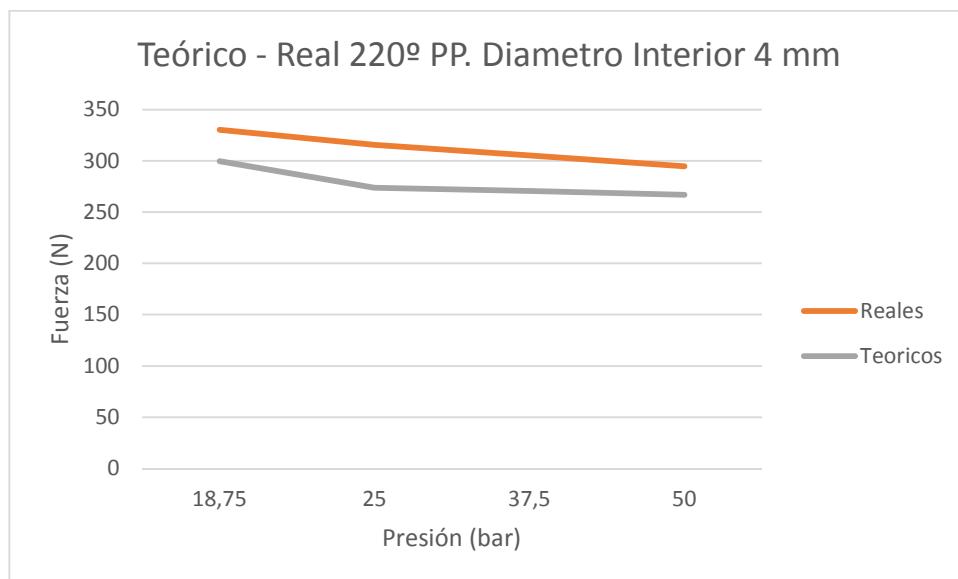


Imagen 77. Resultados teórico-real pieza 2. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
18,75	<b>289,92</b>	<b>299,75</b>	9,83	3,28
25	<b>266,59</b>	<b>273,91</b>	7,32	2,67
37,5	<b>263,66</b>	<b>270,69</b>	7,03	2,60
50	<b>265,70</b>	<b>267,06</b>	1,36	0,51

Tabla 50. Comparación resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 220°C

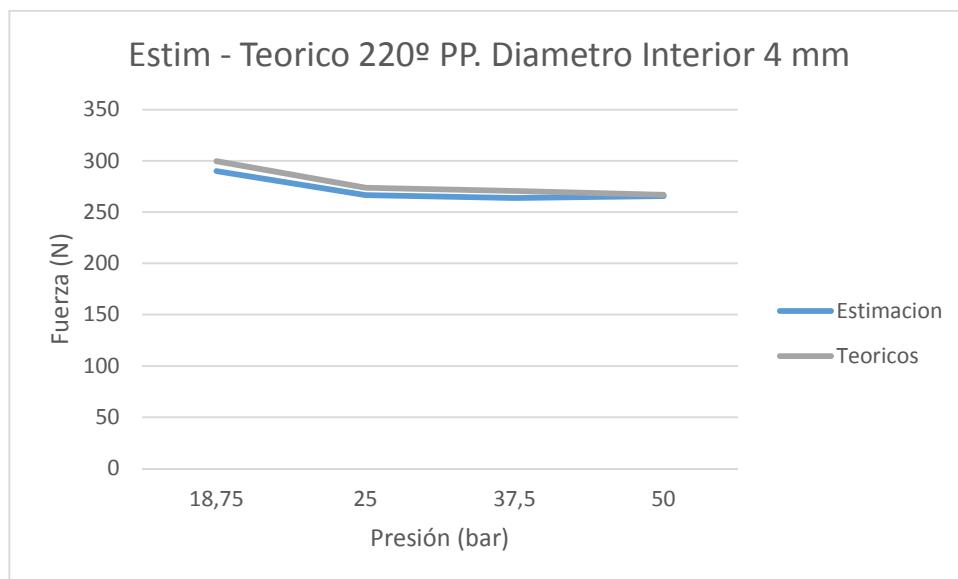


Imagen 78. Resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 220°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		
	M. Estimación	Teórico	Real
18,75	<b>271,03</b>	<b>265,15</b>	<b>282,97</b>
25	<b>256,02</b>	<b>243,76</b>	<b>269,59</b>
37,5	<b>253,60</b>	<b>240,98</b>	<b>268,86</b>
50	<b>255,53</b>	<b>237,86</b>	<b>268,77</b>

Tabla 51. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 260°C

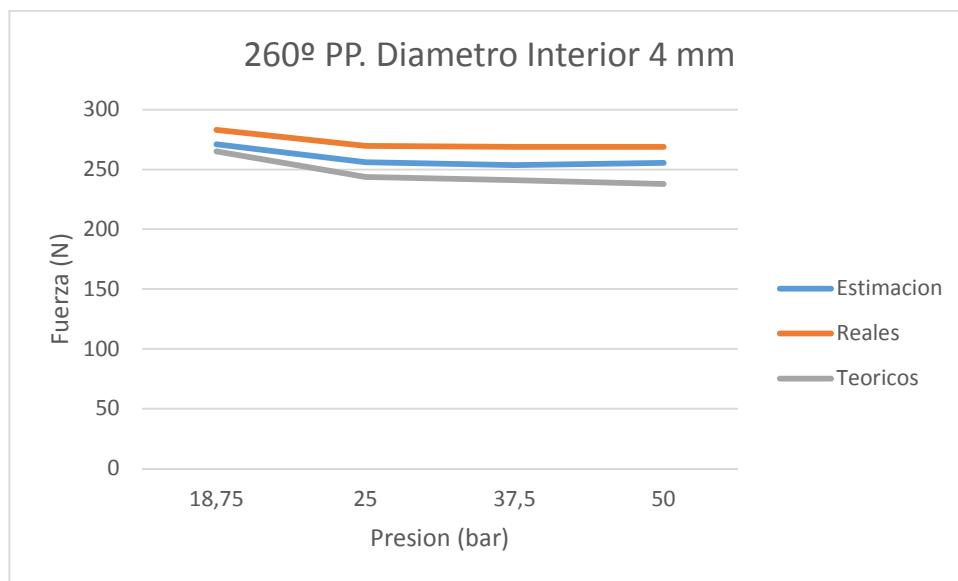


Imagen 79. Resultados estimación-teórico-real pieza 2. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Real		
18,75	<b>244,37</b>	<b>267,51</b>	23,14	8,65
25,00	<b>230,83</b>	<b>245,76</b>	14,92	6,07
37,50	<b>228,66</b>	<b>233,01</b>	4,36	1,87
50,00	<b>230,39</b>	<b>231,32</b>	0,92	0,40

Tabla 52. Comparación resultados estimación -real pieza 2. PP. 260°C

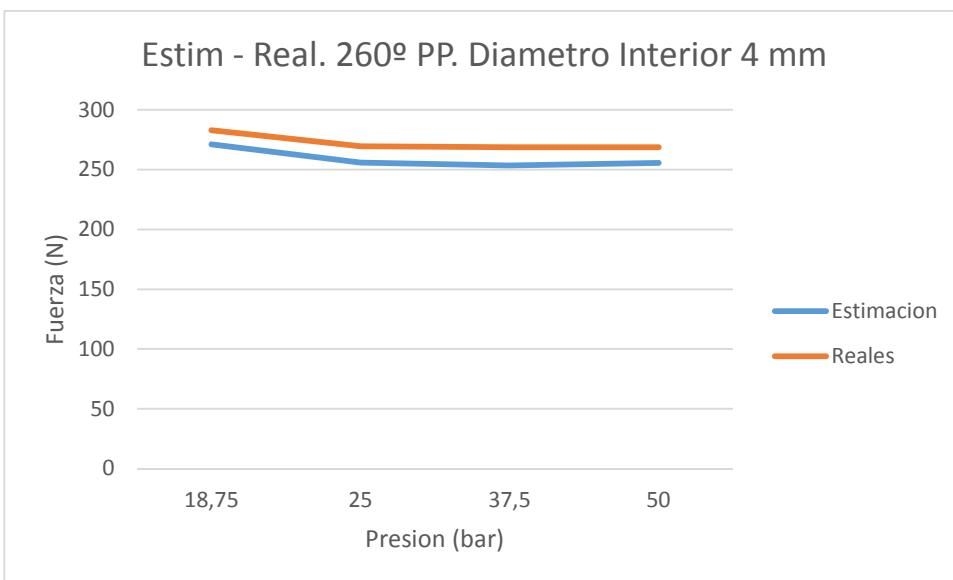


Imagen 80. Resultados estimación-real pieza 2. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	Teórico	Real		
18,75	<b>265,15</b>	<b>282,97</b>	17,83	6,30
25,00	<b>243,76</b>	<b>269,59</b>	25,83	9,58
37,50	<b>240,98</b>	<b>268,86</b>	27,88	10,37
50,00	<b>237,86</b>	<b>268,77</b>	30,92	11,50

Tabla 53. Comparación resultados teórico-real pieza 2. PP. 260°C

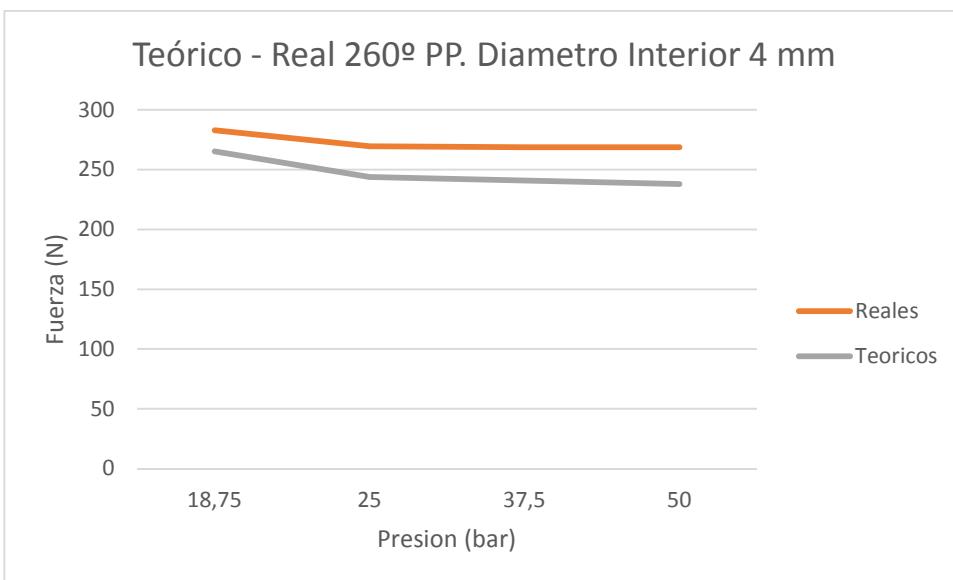


Imagen 81. Resultados teórico-real pieza 2. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
18,75	<b>271,03</b>	<b>265,15</b>	5,88	2,17
25	<b>256,02</b>	<b>243,76</b>	12,25	4,79
37,5	<b>253,60</b>	<b>240,98</b>	12,62	4,97
50	<b>255,53</b>	<b>237,86</b>	17,67	6,92

Tabla 54. Comparación resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 260°C

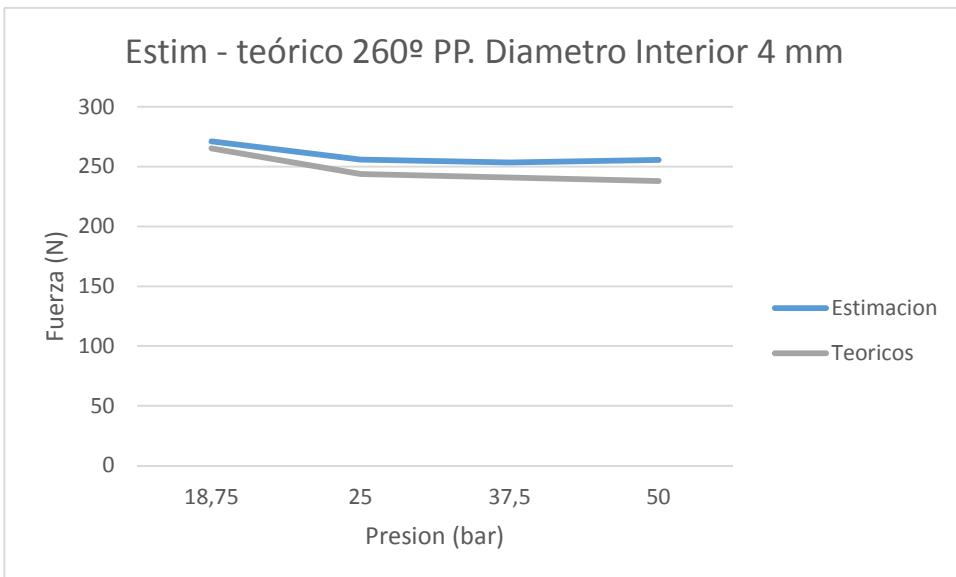


Imagen 82. Resultados estimación-teórico pieza 2. PP. 260°C



B) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>289,92</b>	<b>271,03</b>	18,89	6,52
25	<b>266,59</b>	<b>256,02</b>	10,57	3,97
37,5	<b>263,66</b>	<b>253,60</b>	10,06	3,81
50	<b>265,70</b>	<b>255,53</b>	10,17	3,83

Tabla 55. Comparación resultados estimación pieza 2. PP.

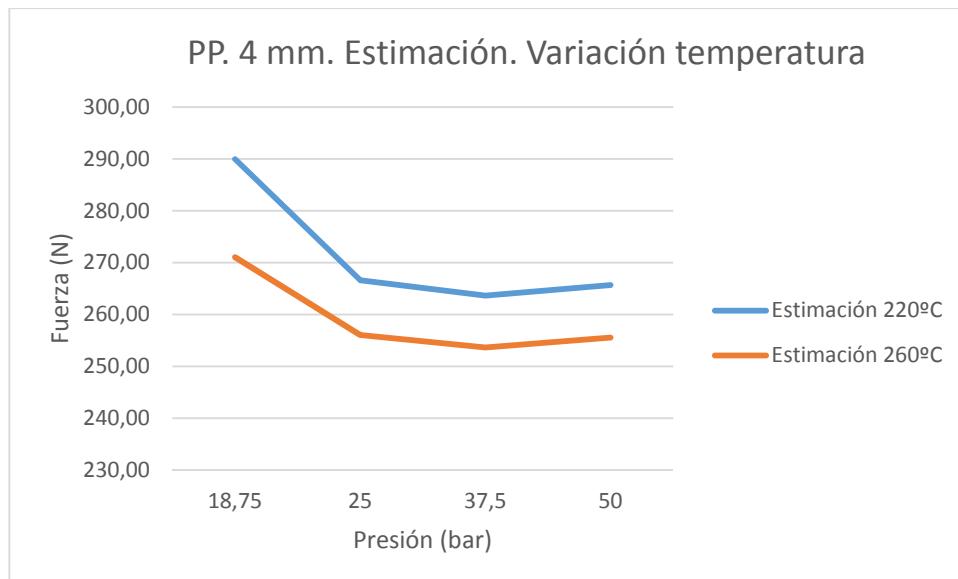


Imagen 83. Resultados estimación pieza 2. PP.



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>299,75</b>	<b>265,15</b>	34,61	11,55
25	<b>273,91</b>	<b>243,76</b>	30,15	11,01
37,5	<b>270,69</b>	<b>240,98</b>	29,70	10,97
50	<b>267,06</b>	<b>237,86</b>	29,21	10,94

Tabla 56. Comparación resultados teórico pieza 2. PP.

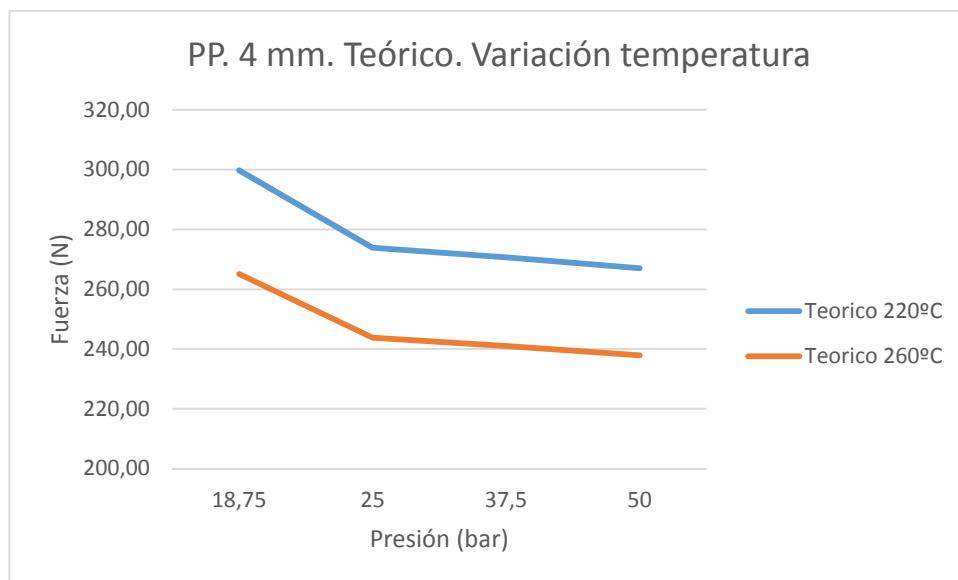


Imagen 84. Resultados teórico pieza 2. PP.



Real	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>330,21</b>	<b>282,97</b>	47,24	14,31
25	<b>315,75</b>	<b>269,59</b>	46,16	14,62
37,5	<b>305,18</b>	<b>268,86</b>	36,32	11,90
50	<b>294,76</b>	<b>268,77</b>	25,99	8,82

Tabla 57. Comparación resultados real pieza 2. PP.

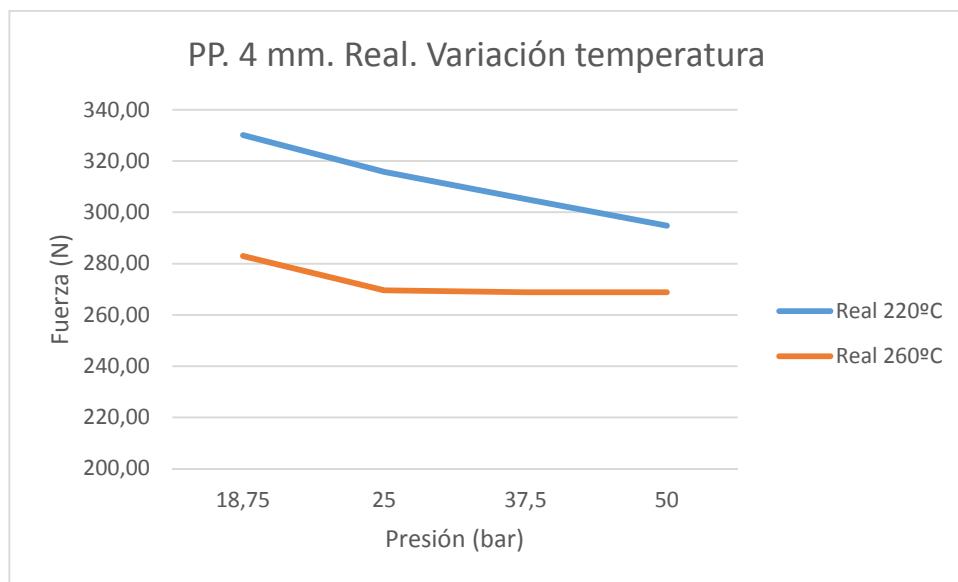


Imagen 85. Resultados real pieza 2. PP.



### 11.2.3. Pieza Ø 4,2

#### A) Comparación método teórico, estimación y ensayos de tracción

220°C	Fuerza expulsión (N)		
	Presión (bar)	M. Estimación	Teórico
18,75	<b>276,50</b>	<b>264,36</b>	<b>262,36</b>
25	<b>254,24</b>	<b>241,69</b>	<b>249,93</b>
37,5	<b>251,45</b>	<b>238,86</b>	<b>226,50</b>
50	<b>253,40</b>	<b>236,05</b>	<b>225,08</b>

Tabla 58. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 220°C

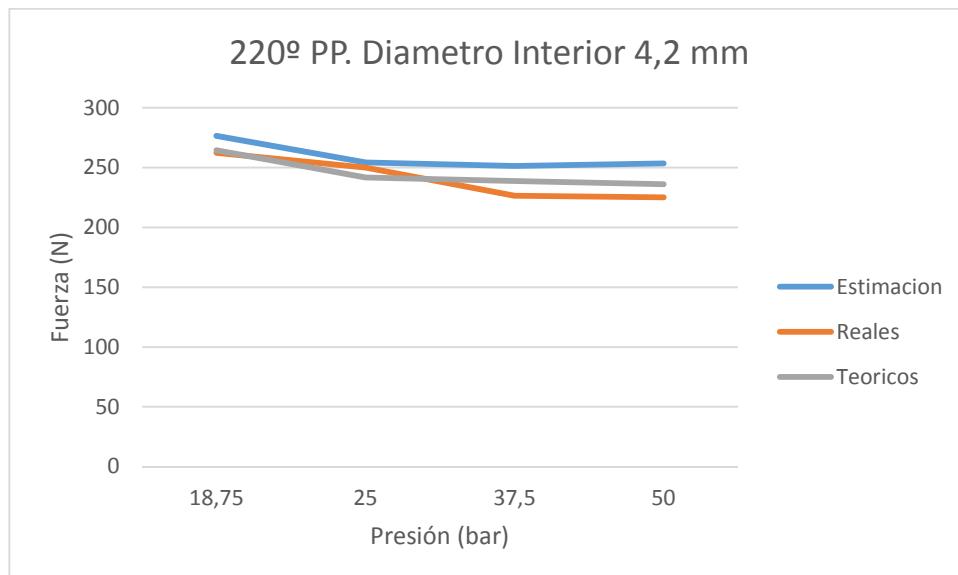


Imagen 86. Resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Real		
18,75	<b>276,50</b>	<b>262,36</b>	14,14	5,11
25,00	<b>254,24</b>	<b>249,93</b>	4,31	1,70
37,50	<b>251,45</b>	<b>226,50</b>	24,95	9,92
50,00	<b>253,40</b>	<b>225,08</b>	28,32	11,18

Tabla 59. Comparación resultados estimación -real pieza 3. PP. 220°C

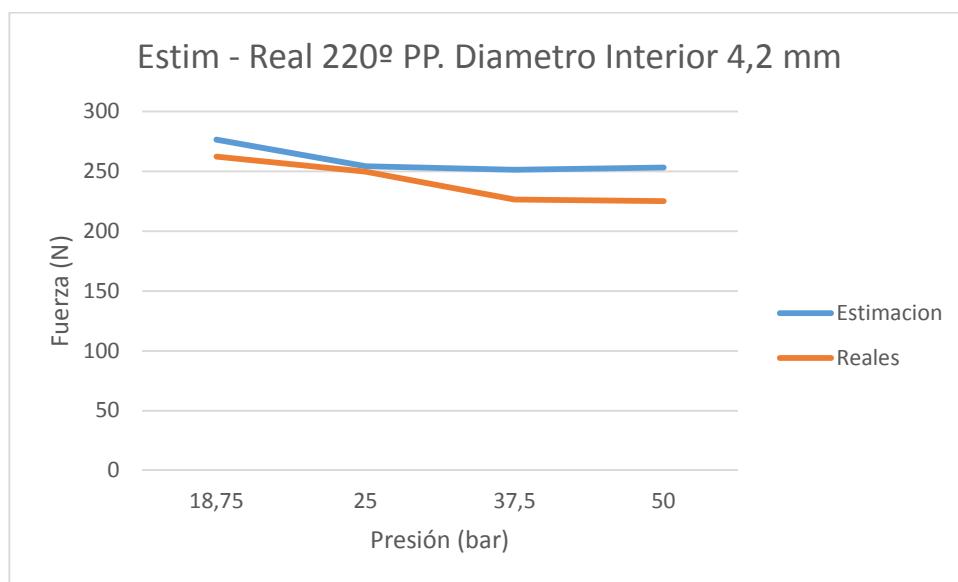


Imagen 87. Resultados estimación -real pieza 3. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	Teórico	Real		
18,75	<b>264,36</b>	<b>262,36</b>	2,00	0,76
25,00	<b>241,69</b>	<b>249,93</b>	8,24	3,30
37,50	<b>238,86</b>	<b>226,50</b>	12,36	5,17
50,00	<b>236,05</b>	<b>225,08</b>	10,97	4,65

Tabla 60. Comparación resultados teórico-real pieza 3. PP. 220°C

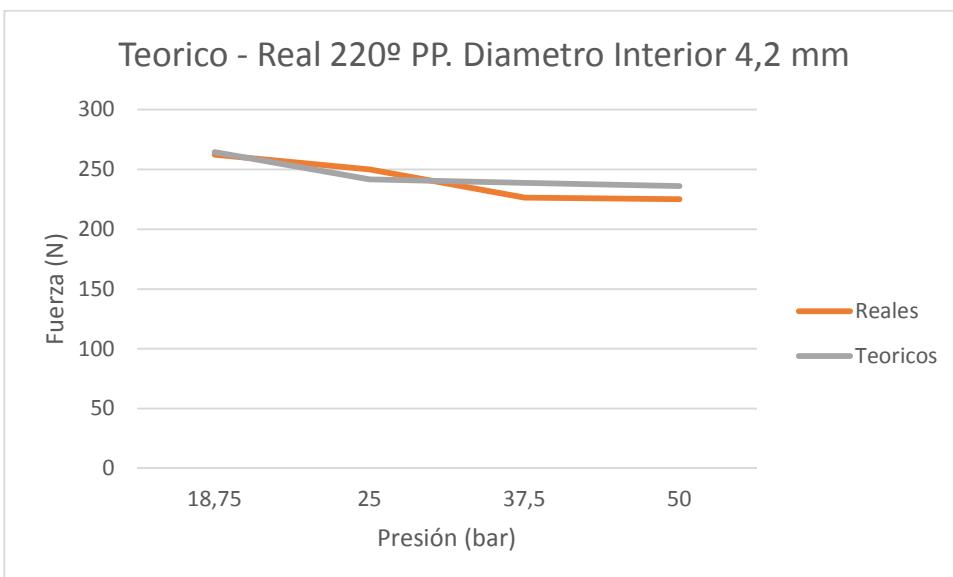


Imagen 88. Resultados teórico-real pieza 3. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
18,75	<b>276,50</b>	<b>264,36</b>	12,13	4,39
25	<b>254,24</b>	<b>241,69</b>	12,55	4,94
37,5	<b>251,45</b>	<b>238,86</b>	12,59	5,01
50	<b>253,40</b>	<b>236,05</b>	17,35	6,85

Tabla 58. Comparación resultados estimación-teórico pieza 3. PP. 220°C

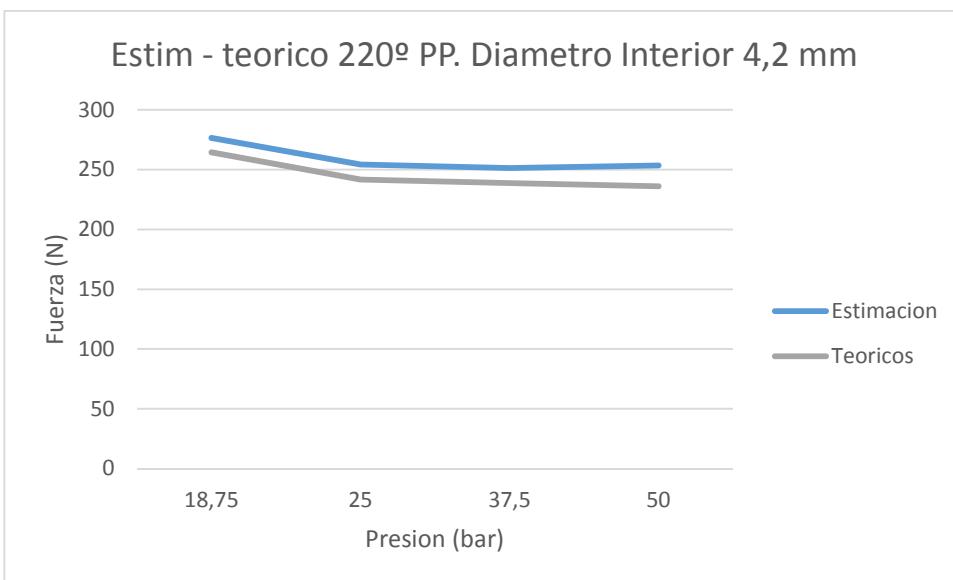


Imagen 89. Resultados estimación-teórico pieza 3. PP. 220°C



Presión (bar)	Fuerza expulsión (N)		
	M. Estimación	Teórico	Real
18,75	<b>254,24</b>	<b>231,01</b>	<b>265,60</b>
25	<b>240,16</b>	<b>212,85</b>	<b>213,18</b>
37,5	<b>237,89</b>	<b>210,46</b>	<b>218,47</b>
50	<b>239,70</b>	<b>208,09</b>	<b>222,02</b>

Tabla 59. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 260°C

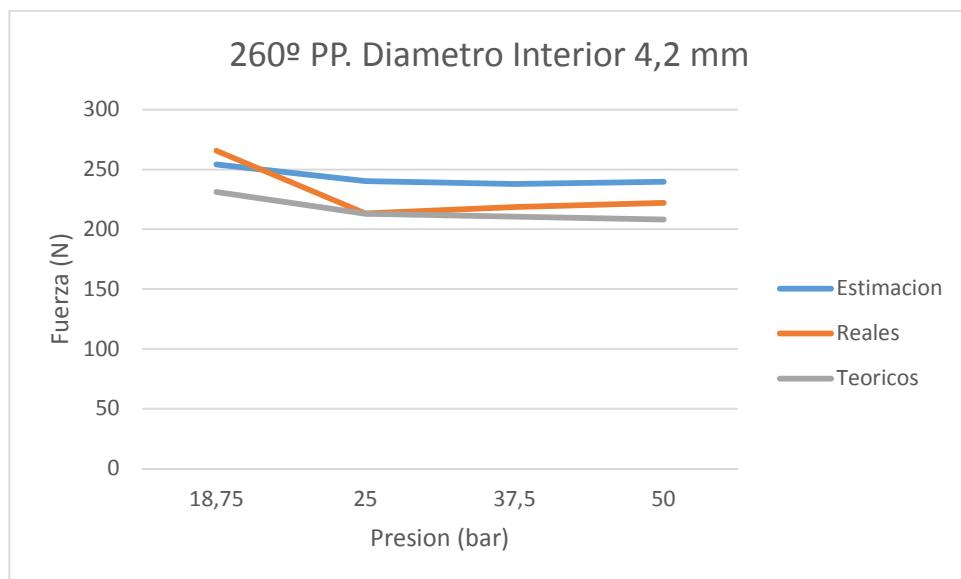


Imagen 90. Resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Real		
18,75	<b>254,24</b>	<b>265,60</b>	11,36	4,28
25,00	<b>240,16</b>	<b>213,18</b>	26,98	11,23
37,50	<b>237,89</b>	<b>218,47</b>	19,42	8,16
50,00	<b>239,70</b>	<b>222,02</b>	17,68	7,38

Tabla 60. Comparación resultados estimación -real pieza 3. PP. 260°C

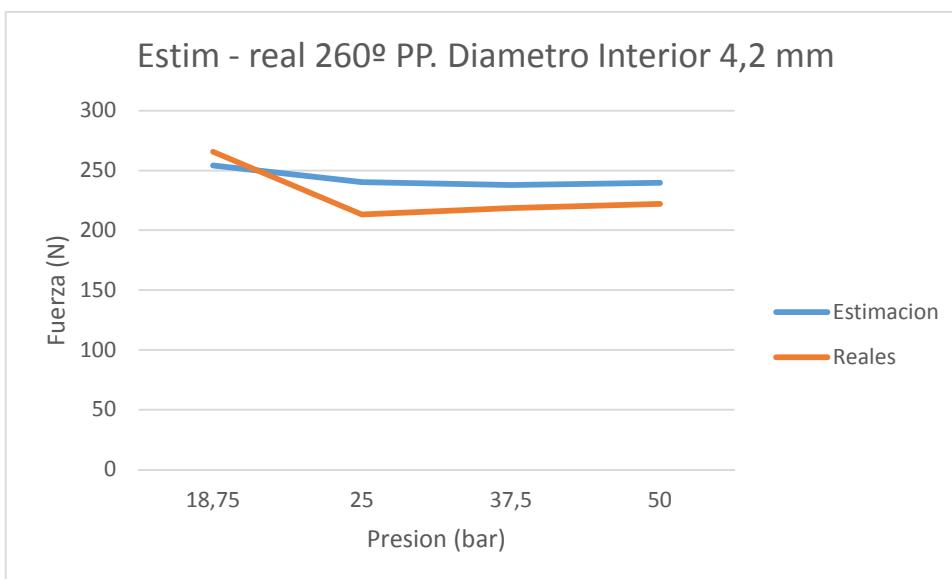


Imagen 91. Resultados estimación -real pieza 3. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	Teórico	Real		
18,75	<b>231,01</b>	<b>265,60</b>	34,59	13,02
25,00	<b>212,85</b>	<b>213,18</b>	0,33	0,15
37,50	<b>210,46</b>	<b>218,47</b>	8,01	3,67
50,00	<b>208,09</b>	<b>222,02</b>	13,93	6,27

Tabla 61. Comparación resultados teórico-real pieza 3. PP. 260°C

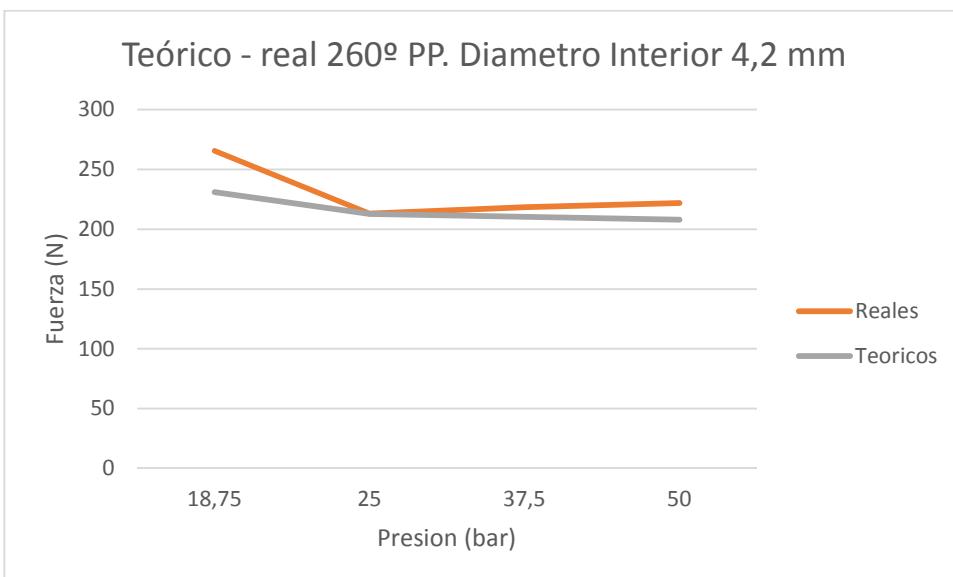


Imagen 92. Resultados teórico-real pieza 3. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
18,75	<b>254,24</b>	<b>231,01</b>	23,23	9,14
25	<b>240,16</b>	<b>212,85</b>	27,31	11,37
37,5	<b>237,89</b>	<b>210,46</b>	27,43	11,53
50	<b>239,70</b>	<b>208,09</b>	31,61	13,19

Tabla 62. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 3. PP. 260°C

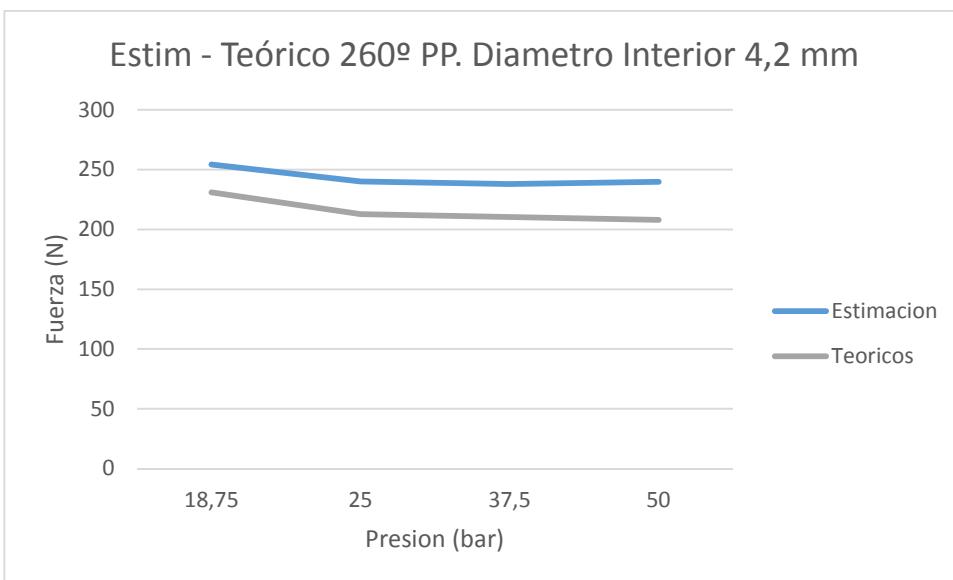


Imagen 93. Resultados estimación-teórico pieza 3. PP. 260°C



B) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>276,50</b>	<b>254,24</b>	22,26	8,05
25	<b>254,24</b>	<b>240,16</b>	14,08	5,54
37,5	<b>251,45</b>	<b>237,89</b>	13,56	5,39
50	<b>253,40</b>	<b>239,70</b>	13,70	5,40

Tabla 63. Comparación resultados estimación pieza 3. PP.

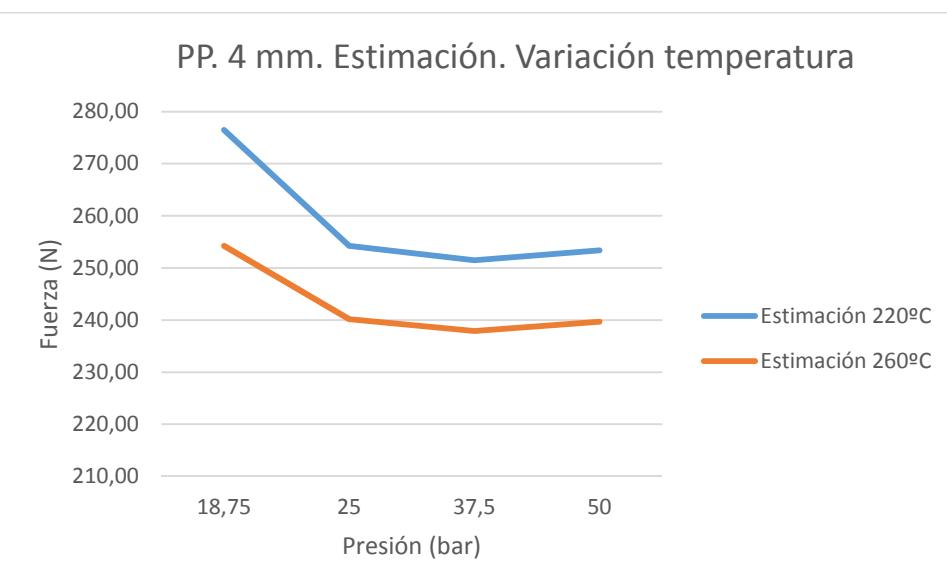


Imagen 94. Resultados estimación pieza 3. PP.



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>264,36</b>	<b>231,01</b>	33,35	12,62
25	<b>241,69</b>	<b>212,85</b>	28,84	11,93
37,5	<b>238,86</b>	<b>210,46</b>	28,40	11,89
50	<b>236,05</b>	<b>208,09</b>	27,96	11,85

Tabla 64. Comparación resultados teórico-real pieza 3. PP.

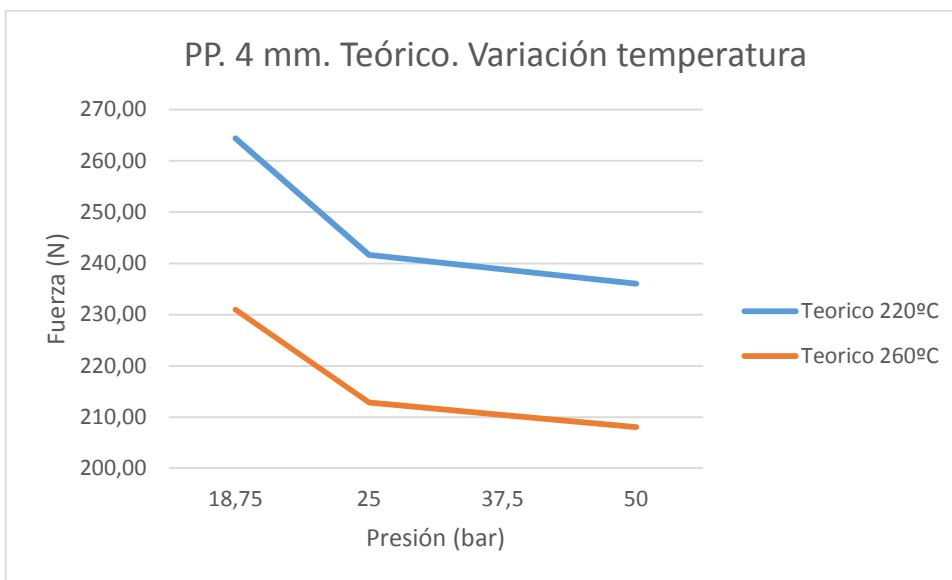


Imagen 95. Resultados teórico pieza 3. PP.



Real	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
18,75	<b>262,36</b>	<b>265,60</b>	3,24	1,22
25	<b>249,93</b>	<b>213,18</b>	36,75	14,71
37,5	<b>226,50</b>	<b>218,47</b>	8,03	3,54
50	<b>225,08</b>	<b>222,02</b>	3,06	1,36

Tabla 65. Comparación resultados real pieza 3. PP.

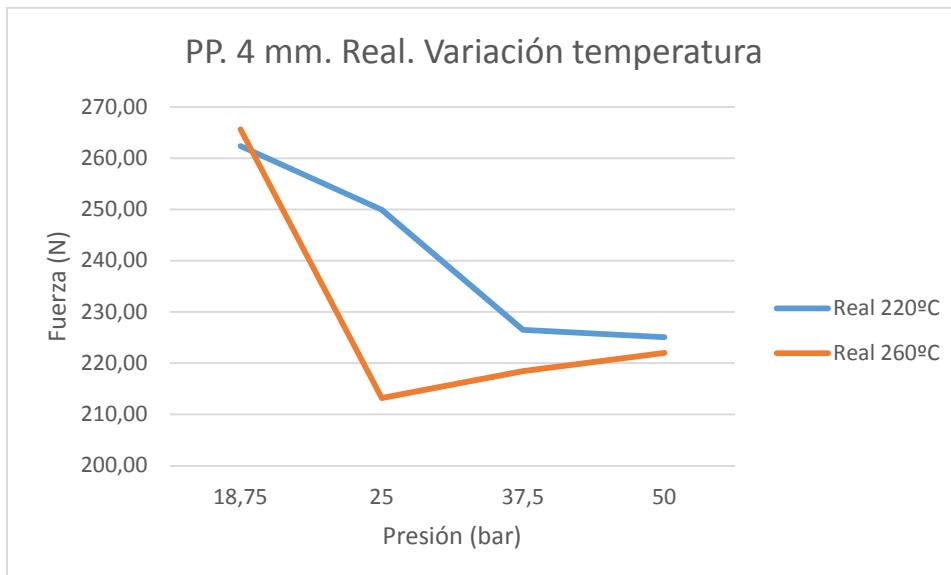


Imagen 96. Resultados real pieza 3. PP.



#### 11.2.4. Pieza Ø5,2

- A) Comparación método teórico, estimación y ensayos de tracción

220°C		Fuerza expulsión (N)	
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Real
22,5	<b>314,02</b>	<b>344,45</b>	<b>276,53</b>
30	<b>288,74</b>	<b>314,73</b>	<b>271,33</b>
45	<b>285,57</b>	<b>311,02</b>	<b>254,64</b>
60	<b>287,79</b>	<b>306,80</b>	<b>218,02</b>

Tabla 66. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 220°C

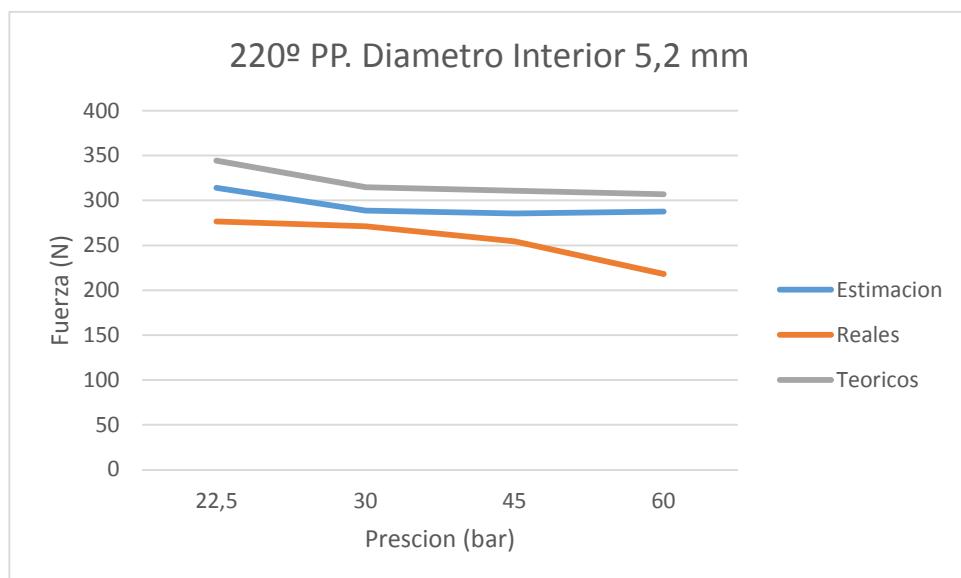


Imagen 97. Resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Real		
22,50	<b>314,02</b>	<b>276,53</b>	37,49	11,94
30,00	<b>288,74</b>	<b>271,33</b>	17,41	6,03
45,00	<b>285,57</b>	<b>254,64</b>	30,93	10,83
60,00	<b>287,79</b>	<b>218,02</b>	69,76	24,24

Tabla 67. Comparación resultados estimación -real pieza 4. PP. 220°C

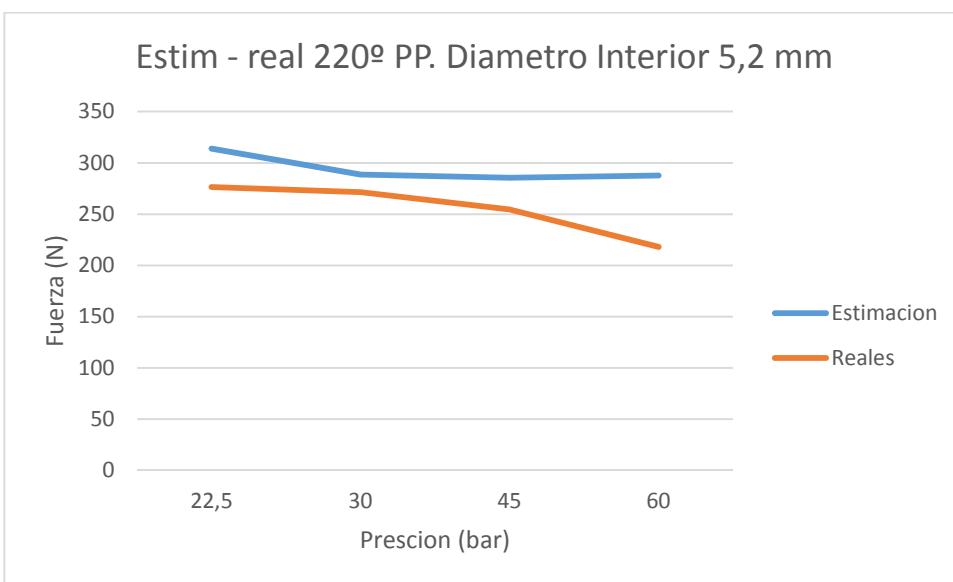


Imagen 98. Resultados estimación -real pieza 4. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	Teórico	Real		
22,50	<b>344,45</b>	<b>276,53</b>	67,92	19,72
30,00	<b>314,73</b>	<b>271,33</b>	43,39	13,79
45,00	<b>311,02</b>	<b>254,64</b>	56,38	18,13
60,00	<b>306,80</b>	<b>218,02</b>	88,77	28,94

Tabla 68. Comparación resultados teórico-real pieza 4. PP. 220°C

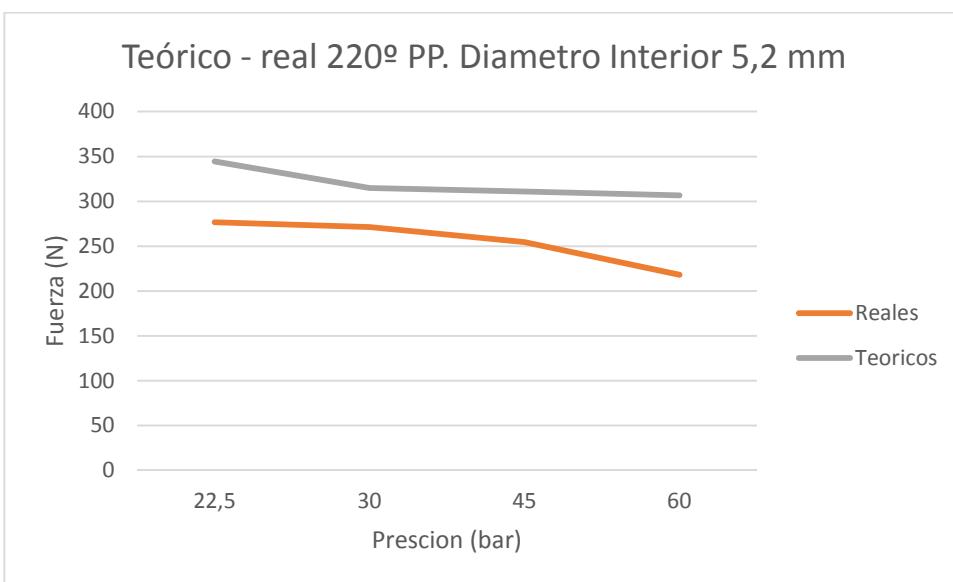


Imagen 99. Resultados teórico-real pieza 4. PP. 220°C



220°C	Fuerza expulsión (N)			
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico	Diferencia	Variación %
22,50	<b>314,02</b>	<b>344,45</b>	30,42	8,83
30,00	<b>288,74</b>	<b>314,73</b>	25,98	8,26
45,00	<b>285,57</b>	<b>311,02</b>	25,45	8,18
60,00	<b>287,79</b>	<b>306,80</b>	19,01	6,20

Tabla 69. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 220°C

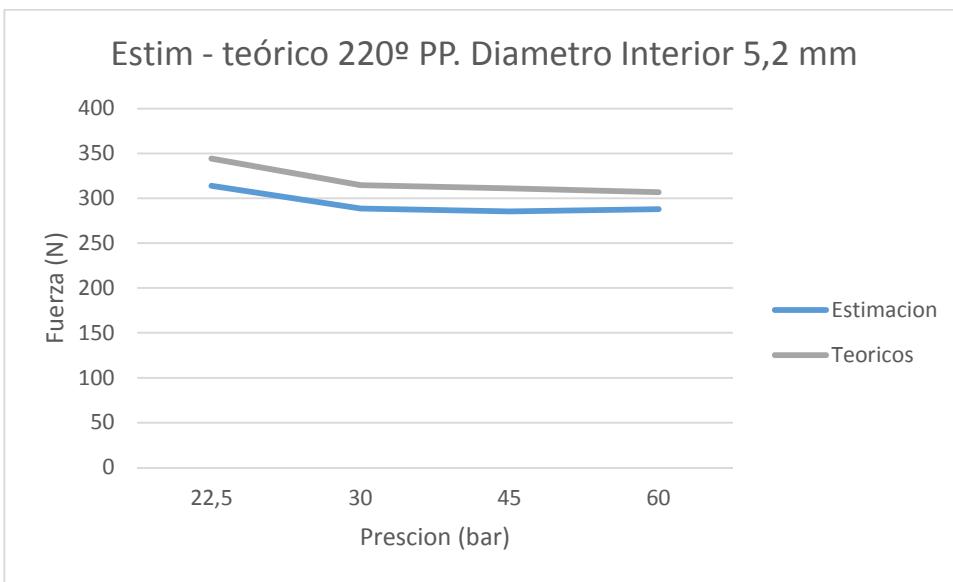


Imagen 100. Resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 220°C



Presión (bar)	Fuerza expulsión (N)		
	M. Estimación	Teórico	Real
22,5	<b>278,79</b>	<b>289,19</b>	<b>275,53</b>
30	<b>263,34</b>	<b>265,80</b>	<b>269,52</b>
45	<b>260,86</b>	<b>262,76</b>	<b>268,28</b>
60	<b>262,84</b>	<b>259,30</b>	<b>247,77</b>

Tabla 70. Comparación resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 260°C

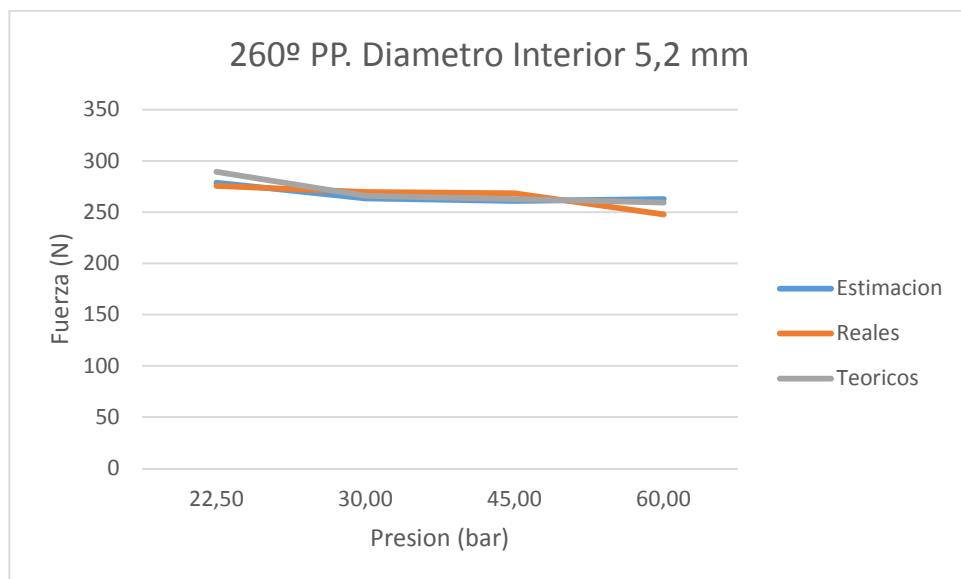


Imagen 101. Resultados estimación-teórico-real pieza 4. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)			
Presión (bar)	M. Estimación	Real	Diferencia	Variación %
22,50	<b>278,79</b>	<b>275,53</b>	3,25	1,17
30,00	<b>263,34</b>	<b>269,52</b>	6,18	2,29
45,00	<b>260,86</b>	<b>268,28</b>	7,42	2,76
60,00	<b>262,84</b>	<b>247,77</b>	15,08	5,74

Tabla 71. Comparación resultados estimación -real pieza 4. PP. 260°C

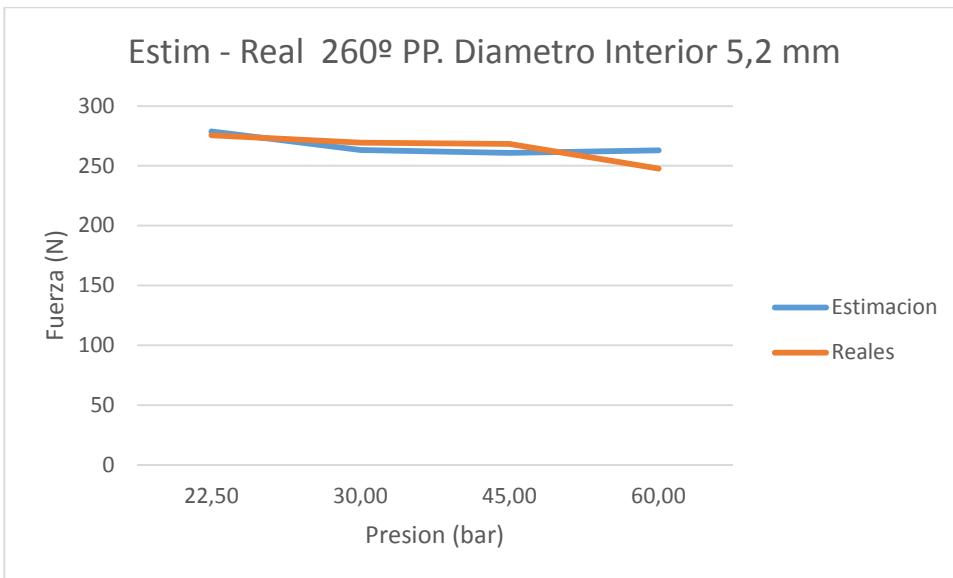


Imagen 102. Resultados estimación -real pieza 4. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	Teórico	Real		
22,50	<b>289,19</b>	<b>275,53</b>	13,66	4,72
30,00	<b>265,80</b>	<b>269,52</b>	3,72	1,38
45,00	<b>262,76</b>	<b>268,28</b>	5,51	2,06
60,00	<b>259,30</b>	<b>247,77</b>	11,53	4,45

Tabla 72. Comparación resultados teórico-real pieza 4. PP. 260°C

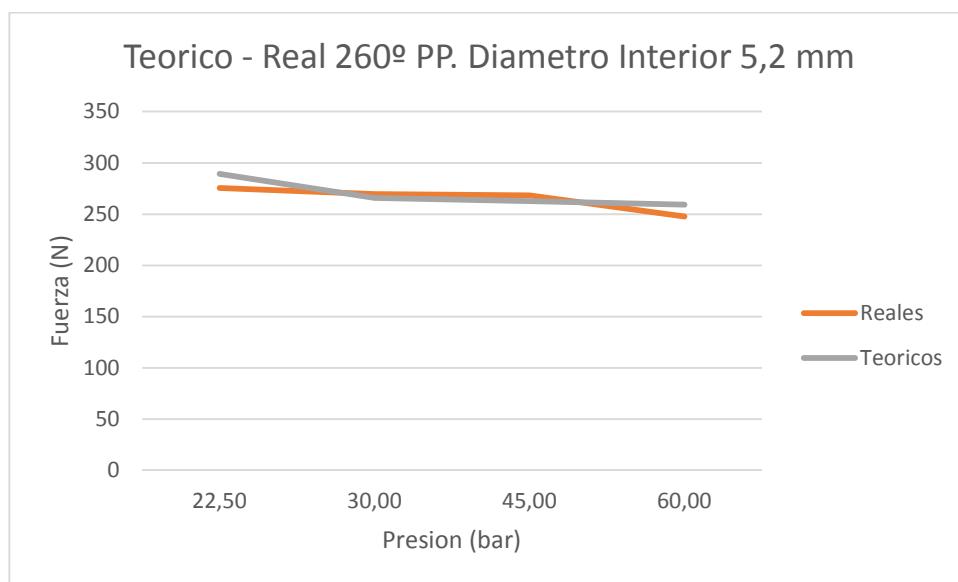


Imagen 103. Resultados teórico-real pieza 4. PP. 260°C



260°C	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	M. Estimación	Teórico		
22,50	<b>278,79</b>	<b>289,19</b>	10,40	3,60
30,00	<b>263,34</b>	<b>265,80</b>	2,45	0,92
45,00	<b>260,86</b>	<b>262,76</b>	1,90	0,72
60,00	<b>262,84</b>	<b>259,30</b>	3,55	1,35

Tabla 73. Comparación resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 260°C

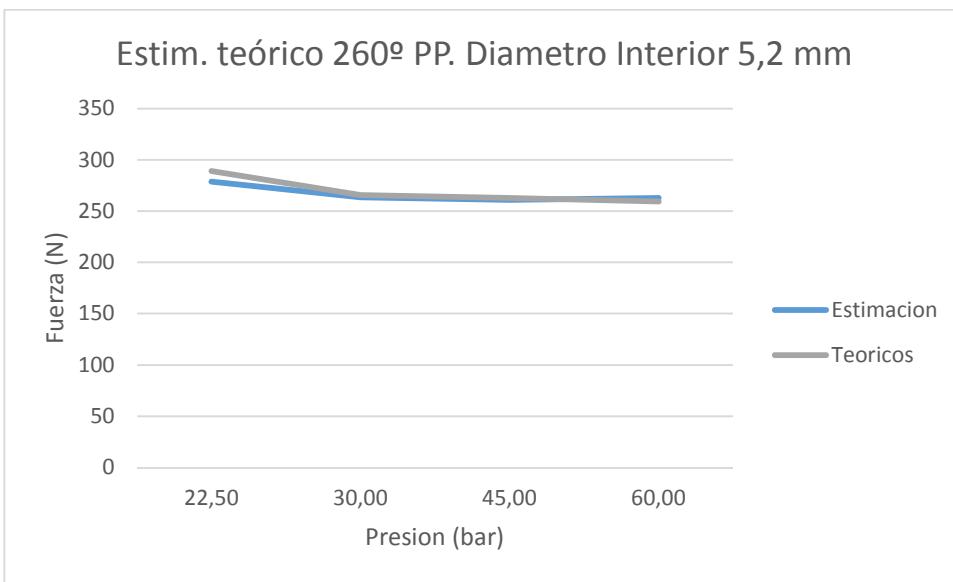


Imagen 104. Resultados estimación-teórico pieza 4. PP. 260°C



B) Comparación de fuerzas de expulsión variando la temperatura

Estimación	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
22,50	<b>314,02</b>	<b>278,79</b>	35,23	11,22
30,00	<b>288,74</b>	<b>263,34</b>	25,40	8,80
45,00	<b>285,57</b>	<b>260,86</b>	24,71	8,65
60,00	<b>287,79</b>	<b>262,84</b>	24,94	8,67

Tabla 74. Comparación resultados estimación pieza 4. PP. 260°C

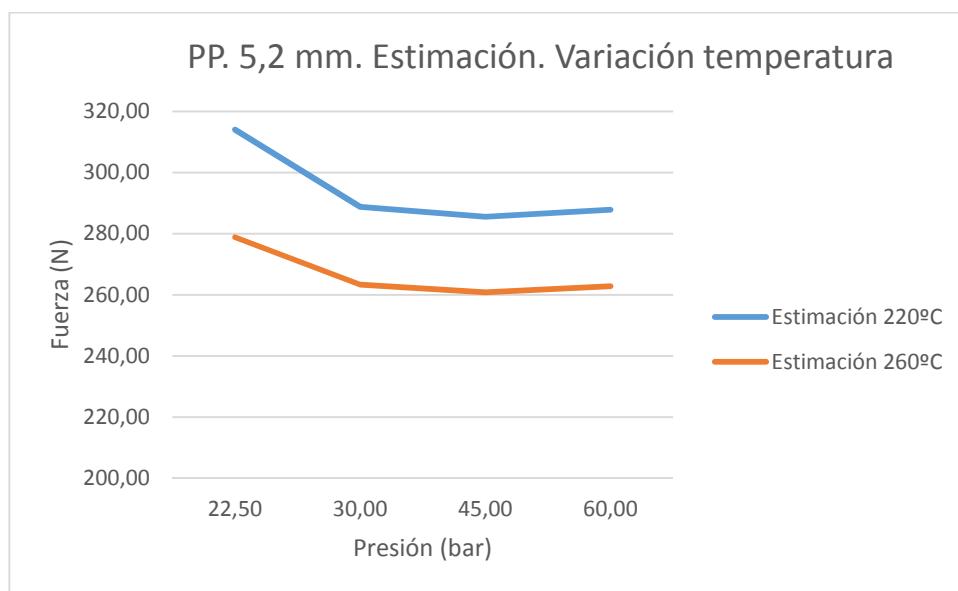


Imagen 105. Resultados estimación pieza 4. PP.



Teóricos	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
22,50	<b>344,45</b>	<b>289,19</b>	55,25	16,04
30,00	<b>314,73</b>	<b>265,80</b>	48,93	15,55
45,00	<b>311,02</b>	<b>262,76</b>	48,26	15,52
60,00	<b>306,80</b>	<b>259,30</b>	47,50	15,48

Tabla 75. Comparación resultados teórico pieza 4. PP. 260°C

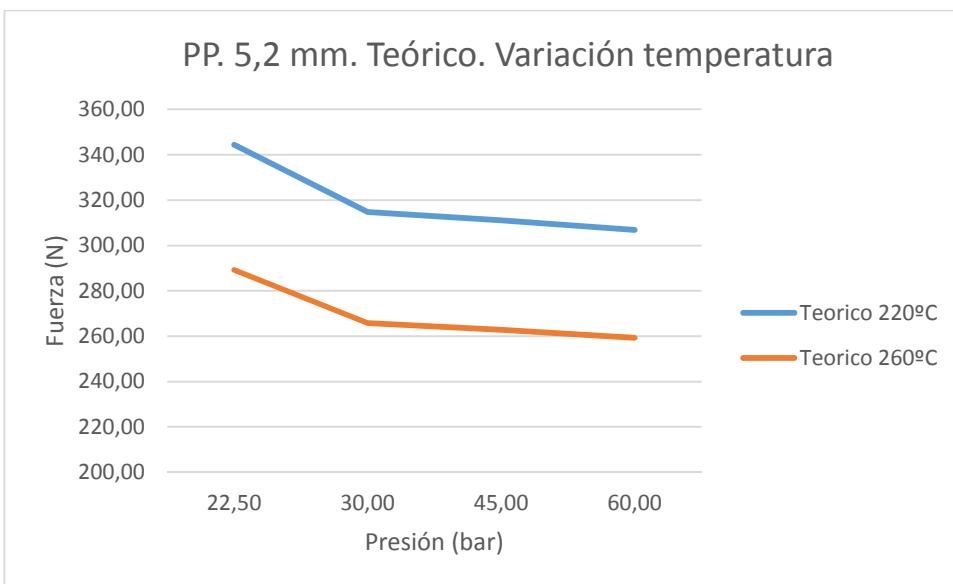


Imagen 106. Resultados teórico pieza 4. PP. 260°C



Real	Fuerza expulsión (N)		Diferencia	Variación %
Presión (bar)	220°C	260°C		
22,50	<b>276,53</b>	<b>275,53</b>	1,00	0,36
30,00	<b>271,33</b>	<b>269,52</b>	1,81	0,67
45,00	<b>254,64</b>	<b>268,28</b>	13,64	5,35
60,00	<b>218,02</b>	<b>247,77</b>	29,74	13,64

Tabla 76. Comparación resultados real pieza 4. PP. 260°C

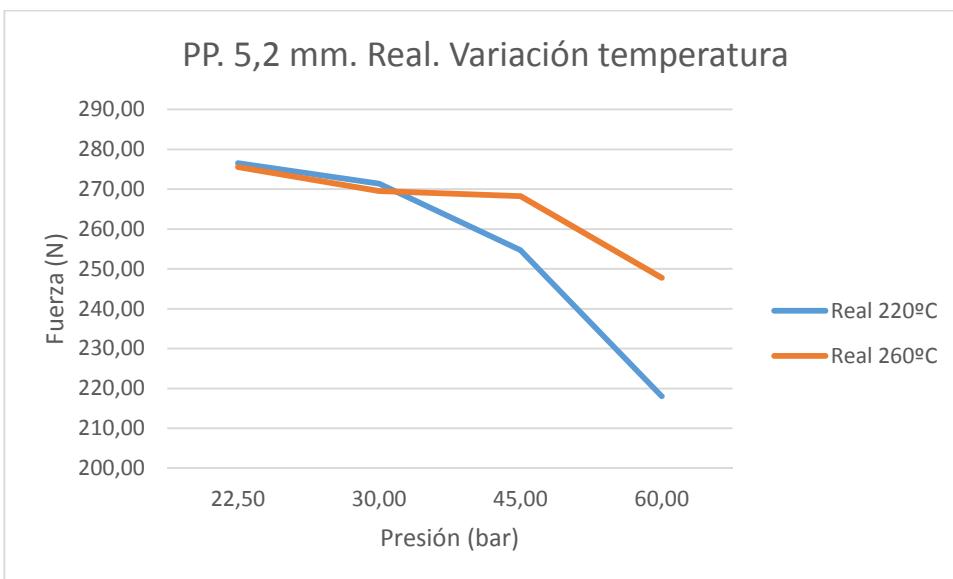


Imagen 107. Resultados real pieza 4. PP. 260°C



## 12. CONCLUSIONES.

El principal objetivo de este proyecto ha sido la comparación de cálculos teóricos y experimentales en piezas sobreinyectadas. Para ello se ha elaborado una hoja de cálculo donde se obtienen los resultado teóricos y se han realizado unos ensayos que permiten obtener el valor de la fuerza de adhesión de manera experimental.

En cuanto a los resultados obtenidos. Se pensó en la idea de utilizar dos materiales como son el ABS y el PP para poder comparar su comportamiento y las diferencias entre el uso de un material y otro. Pero el fallo por rotura que se produce en el ABS ha impedido esta comparación por ello se dedica mayor parte al estudio del Polipropileno quedando el estudio del primero en algo simplemente teórico.

En la parte teórica como ya se ha dicho se han utilizado dos caminos diferentes para obtener resultados. Un método estimado y un método teórico mucho más largo y complejo. Así pues se ha demostrado que el método de estimado es válido ya que las diferencias con los cálculos teóricos, mucho más complejos, apenas se diferenciaban en un 5% en algunos casos las diferencias incluso menores. Si bien es cierto que en el caso concreto de la pieza de diámetro interior 4,2 mm las diferencias rondan el 10%, pero sin embargo esto es aceptado en ingeniería.

Sin embargo a pesar de que los resultados teóricos son muy similares para las dos ecuaciones utilizadas y muestran la misma tendencia, estos resultados no serían válidos si no tenemos en cuenta los resultados experimentales. En este caso los resultados obtenidos en los ensayos instron.

Los ensayos instron han constado de dos fases. Una primera donde simplemente se tenía una muestra para combinación de parámetros pero los resultados obtenidos no fueron válidos ya que hay que tener en cuenta que el material plástico es muy sensible a cualquier variación o cambio por mínimo que parezca y por ello es muy importante que exista una repitibilidad en las piezas para conseguir resultados válidos.

Por ello se decidió repetir los ensayos una segunda vez. En este caso se decidió utilizar solo la temperatura mayor y menor para que se apreciara la variación de la fuerza y contar para cada combinación de parámetros con 4 muestras. Con esta metodología de trabajo se



consiguieron unos resultados mucho más coherentes ya que se ve claramente una línea de tendencia. El resultado de estos ensayos fueron los que se mostraron en el apartado anterior.

Con el uso de estos valores y comparándolos con los que se obtuvieron de manera teórica se ha podido finalmente demostrar también que los métodos teóricos de cálculo utilizados son válidos ya que las variaciones con los obtenidos en la parte práctica son en torno al 5-10%, algo que como se ha dicho es válido a la hora de utilizar expresiones teóricas en ingeniería.

Ampliando de una manera mayor la comparativa se puede comprobar como en la tabla que se expone sacada del libro “how to make injection molds” de MENGES/MOHREN que los parámetros de temperatura de inyección y presión de compactación influyen en la misma dirección en el valor de las fuerzas de expulsión y con unas variaciones pequeñas como este indicada.

Otra de las cosas a señalar es como se observa que al aumentar la temperatura de inyección reducimos las fuerzas de expulsión pero la diferencia es casi constante para todas las presiones de mantenimiento. Sin embargo si dejamos una temperatura constante y se modifica la presión de compactación, el valor de la fuerza de adhesión disminuye igualmente pero en este caso se demuestra que a presiones más bajas las diferencias son mayores no habiendo apenas cambio en el valor de la fuerza para presiones mayores.

Finalmente indicar que cualquiera de los resultado que se han obtenido en los ensayos de tracción y que no se han incluido en esta memoria se muestran en los anexos pero se ha considerado oportuno no mostrarlo aquí ya que la información no ha sido valido para la obtención de resultados y conclusiones que se han llevado a lo largo de este proyecto.



## **12.1. Conclusiones personales**

Este proyecto se ha realizado dentro del área de ingeniería mecánica de la Universidad de Zaragoza y más concretamente en el taller de inyección de la industria de los plásticos (TIIP). El realizarlo en este departamento me ha permitido ampliar conocimientos en el campo de la ingeniería mecánica y de una manera más profunda en los plásticos. Una parte que se ve durante la licenciatura pero de una manera muy aproximada y siempre teórica.

El trabajo tiene dos líneas que se realizan paralelamente y que posteriormente hay que unir y analizar. Una es la parte teórica donde se encuentra toda la búsqueda de información, como navegar por páginas webs, buscar proyectos de investigación, estudiar la bibliografía publicada sobre las fuerzas de expulsión etc. La otra parte es la práctica, donde se encuentra el diseño del molde, la fabricación, los ensayos de inyección y tracción.

Desde el punto práctico he tenido la oportunidad de trabajar en el taller de inyección, donde he tenido acceso a todas las herramientas que se tienen allí. He desmontado diferentes moldes de inyección con lo que he obtenido una mayor visión de sus partes y su funcionamiento.

Además se me ha permitido mecanizar las piezas que se inyectaban en los ensayos. Por ejemplo he podido mecanizar yo mismo las piezas que he utilizado en los ensayos lo que me ha permitido usar el torno convencional, que de otro modo es bastante difícil el tener acceso a él y poder utilizarlo, o aprender algo sobre mecanizado CNC.

Siempre se me han respondido todas las preguntas que me han ido surgiendo tanto sobre la elaboración de este proyecto como de otros temas de ingeniería mecánica por parte de mi tutor Jesús Fuentelsaz y del personal del taller Víctor y Encarna que han estado conmigo y me han dejado participar en otros proyectos que allí se han realizado pudiendo conocer por ejemplo con profundidad los procesos de mecanizado así como el proceso de inyección de plásticos y los problemas que pueden surgir a la hora de establecer los parámetros y automatizar el proceso que para alguien de su experiencia resulta bastante sencillo, pero yo personalmente desconocía toda la problemática que existe, como afectan ciertos valores, valores de calidad de las piezas etc.

En cuanto al uso de herramientas de diseño 3D tuve la suerte que durante mis años de formación pude conocer la herramienta ProEngineer en este mismo departamento lo que me



ha hecho más sencillo a la hora de realizar el modelo 3D y ensamblar todas las piezas. Sin embargo es una herramienta muy potente y todavía me queda mucho por aprender para poder sacar rendimiento a todo el potencial que tiene.

Por otro lado existe una base de datos de materiales plásticos llamada “CAMPUS” donde encuentras los datos más relevantes de los materiales, características mecánicas, gráficas PVT... etc. Pero conforme se han ido actualizando las versiones se ha ido perdiendo información ya que las compañías tienden más a ocultar el mayor número de información posible. Esto en muchas ocasiones dificulta la investigación, tanto de este como de otros proyectos que pueden tener un gran interés para el desarrollo de la sociedad en general.



## 13. LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

En este proyecto se ha trabajado con dos materiales PP y ABS por considerarse cristalinos y semicristalinos y poder realizar una comparativa con ambos plásticos. Sin embargo los resultados obtenidos para el ABS no han sido satisfactorios ya que las piezas fracturaban antes de tiempo.

Una de las posibles líneas de investigación consistiría en la mejora y realización de estos ensayos variando ciertos parámetros como por ejemplo la dimensión de las piezas para evitar este problema y obtener unos resultados apropiados en los que se puedan obtener resultados y conclusiones para el ABS.

Además en el mercado existen numerosos tipos de plásticos diferentes sería de gran ayuda expandir la visión de este proyecto con el estudio de estos materiales para poder optimizar y comprobar cuál sería el más adecuado.

En los parámetros de expulsión existen muchas variables que modifican su valor. En el desarrollo de este proyecto se ha trabajado con la geometría, la temperatura de inyección, el material y la presión de mantenimiento. Por tanto realizar unos estudios comparando según la velocidad de inyección, el tiempo de enfriamiento, etc. daría un mayor conocimiento sobre cómo afectan estos parámetros en la fuerza de inyección.

En mi estudio realizado de la bibliografía me ha sido difícil encontrar en muchas ocasiones trabajos que estén relacionados con la fuerza de expulsión lo que me ha creado la sensación de que se trata de un campo en el que aún queda mucho por estudiar e investigar.



## 14. BIBLIOGRAFIA

- [1] Menges, Georg; Mohren Paul. *How to make injection molds*. 3º ed. Aachen: Hanser. 1991
- [2] Castany Valeri, Javier; Fernández Cuello, Ángel; Serraller Sánchez, Francisco. *Análisis de la funcionalidad de los elementos de máquinas*. 2º ed. Zaragoza. Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008.
- [3] Javierre Lardiés, Carlos; Fernández Cuello, Ángel. *Criterios de diseño mecánico en tecnologías industriales*. 1º ed. Zaragoza. Prensas Universitarias de Zaragoza, 2012.
- [4] Avery, Jack. *Injection molding alternatives. A guide for designers and product Engineers*. Aachen. Hanser 1998
- [5] Lokengard, Richardson. *Industrial del plástico*. Barcelona. Ediciones paraninfo. 1999
- [6] Lorenzo Yustos, Héctor; Lafont Morgado, Pilar. *Aplicación de nuevas tecnologías en la realización de herramientas para moldes de inyección de termoplásticos*. Madrid. Tesis doctoral. Escuela técnica superior de ingenieros industriales. 2008
- [7] Gómez González, Miguel Ángel; Travieso Rodríguez, José Antonio. "Producción de la pieza". En. Miguel Ángel Gómez González. *Diseño, validación y fabricación de un aro protector para envases metálicos mediante el empleo de las tecnologías CAD/CAM/CAE y Rapid Prototyping*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya BARCELONATECH, 2010, p. 109 – 136
- [8] Ponz Estaún, Lorena. *Metodología para la caracterización reológica de materiales termoplásticos en condiciones no convencionales para su aplicación a herramientas de simulación: Aplicación a un PEHD reciclado*. Zaragoza. Tesis doctoral. Centro Politécnico superior Universidad de Zaragoza. 2008
- [9] Vileta Pontes, António José. "Prediction of shrinkage and ejection force". *Shrinkage and ejection forces in injection moulded products*. Minho, Universidade do Minho 2002 p. 29 – 52. Consulta: Noviembre 2014. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1822/173>
- [10] Gutiérrez García, Daniel; Oñate Longoni, Cristian Alberto. "La máquina de inyección", "Los materiales plásticos". En Daniel Gutiérrez García. *Sistemas de inyección con colada caliente aplicado en la industria del plástico como herramienta de competitividad*. Pachuca de Soto. Universidad autónoma del estado de Hidalgo, 2006, p 3 – 44



- [11] **Páez Pavón, Alicia.** "Moldeo por inyección". En José Manuel Torralba Castello *Materiales no metálicos*. Madrid. Sintesis. 1999 p. 523 - 589
- [12] **Kowalska, Beata.** "Processing aspects of p-v-T relationship". *Polymer Engineering & Science*. 2006, 51, p 862-865. Consulta: Febrero 2015. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291548-2634/issues>
- [13] *A material Information system for the plastic industry* [en linea]. Frankfurt. Consulta: febrero 2014. Disponible en: <http://www.campusplastics.com/>
- [14] *Wikipedia: the free encyclopedia* [Wiki en Internet]. St. Petersburg (FL): Wikimedia Foundation, Inc. 2001. [Consulta febrero 2014]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/>