

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y manufactura de un troquel de corte para realizar  
una perforación rectangular en lámina de acero galvanizada  
de 0.63mm de espesor**

Trabajo de graduación presentado por Andrés Kiehnle Longo para optar  
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala  
2023







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y manufactura de un troquel de corte para realizar  
una perforación rectangular en lámina de acero galvanizada  
de 0.63mm de espesor**

Trabajo de graduación presentado por Andrés Kiehnle Longo para optar  
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala  
2023

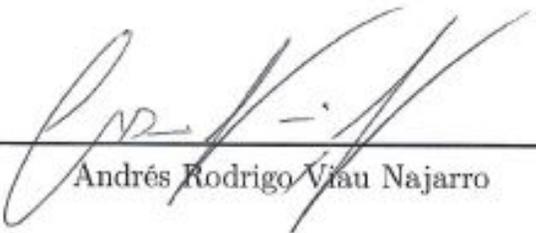


Vo.Bo.:

(f)   
José Rodrigo Aragón Cabrera

Tribunal Examinador:

(f)   
José Rodrigo Aragón Cabrera

(f)   
Andrés Rodrigo Vianu Najarro

(f)   
César Alberto Rosales Gómez

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de enero de 2023.



Quiero agradecer, en primer lugar, a Dios y a la Virgen María por todas las bendiciones que han sido derramadas sobre mí a lo largo de mi vida, y por permitirme nacer en un hogar en donde se me inculcó ese espíritu de educación y trabajo.

Agradezco también:

A mi padre, Guillermo, por despertar en mí ese interés por la ingeniería y motivarme a la decisión de mi carrera. A mi madre, Mónica, por su constante apoyo a lo largo de toda mi vida académica.

A mis amigos: Luis Alberto, Luis Guillermo, Ricardo, Natalia, Elisa, Isabel y Adrián, por sus palabras de aliento y su apoyo incondicional en los tiempos de estrés y desesperación.

A mis amigos y compañeros de carrera: Guillermo y Juan Luis, por el apoyo brindado cuando más lo requería y por ser partícipes de mi desarrollo profesional.

A los docentes de la Universidad del Valle de Guatemala: Ing. Rodrigo Aragón, Ing. Gustavo Pineda y Darwin Prada, por su magnífica dirección y asesoría en este trabajo de graduación.

Dedico este trabajo a mis abuelos Isaac y María Asunción, y agradezco su apoyo durante toda mi carrera.



<b>Prefacio</b>	v
<b>Lista de figuras</b>	XII
<b>Resumen</b>	XIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	5
3.2. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>4. Marco teórico</b>	<b>7</b>
4.1. Troqueles . . . . .	7
4.2. Prensas troqueladoras . . . . .	8
4.2.1. Prensa mecánica . . . . .	8
4.2.2. Prensa hidráulica . . . . .	9
4.3. Componentes de un troquel . . . . .	10
4.3.1. Placa porta-punzón . . . . .	10
4.3.2. Placa porta-matriz . . . . .	11
4.3.3. Punzón . . . . .	11
4.3.4. Matriz . . . . .	11
4.3.5. Pisador . . . . .	11
4.3.6. Elementos de guía . . . . .	11
4.4. Tipos de troqueles . . . . .	12
4.4.1. Troquel simple . . . . .	12
4.4.2. Troquel combinado . . . . .	12
4.4.3. Troquel progresivo . . . . .	13
4.5. Fundamentos de la operación de corte . . . . .	13
4.5.1. Comportamiento del material en el proceso de corte . . . . .	14
4.5.2. Posibles defectos en el proceso de corte . . . . .	14

4.6. Manufactura del troquel	15
4.6.1. Maquinaria para manufactura de troqueles	15
4.6.2. Herramientas de corte	16
4.6.3. Parámetros de corte	17
4.6.4. Procedimiento para definición de parámetros de corte	19
4.6.5. Tolerancias en el maquinado	22
<b>5. Metodología</b>	<b>23</b>
5.1. FASE 1: Requisitos y recursos	23
5.1.1. Definición de requisitos	23
5.1.2. Definición de recursos	24
5.2. FASE 2: Diseño de componentes	26
5.2.1. Punzón	27
5.2.2. Matriz	28
5.2.3. Placa porta-punzón	30
5.2.4. Placa porta-matriz	30
5.2.5. Pisador	31
5.3. FASE 3: Prototipo impreso en 3D	32
5.4. FASE 4: Manufactura de componentes	33
5.4.1. Punzón (maquinado de parte inferior)	33
5.4.2. Punzón (maquinado de parte superior)	36
5.4.3. Sujetador de punzones (cara inferior)	37
5.4.4. Pisador (Cara superior)	41
5.4.5. Matriz	44
5.4.6. Placas porta-troquel	46
<b>6. Resultados</b>	<b>47</b>
6.1. Resultados de manufactura	47
6.1.1. Punzones	47
6.1.2. Sujetador de punzones (holder)	49
6.1.3. Pisador	51
6.1.4. Matriz	53
6.2. Ensamblaje y pruebas de troquel	54
6.3. Costeo de troquel	56
6.3.1. Costos de manufactura	56
6.3.2. Inversión	57
<b>7. Discusión de resultados</b>	<b>59</b>
7.1. Diseño	59
7.1.1. Punzón y holder	59
7.1.2. Matriz y pisador	60
7.2. Problemas en manufactura de componentes	60
7.2.1. Punzones (maquinado de cara inferior)	60
7.2.2. Sujetador de punzones (holder)	61
7.3. Análisis de costos	62
<b>8. Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>65</b>

<b>10. Bibliografía</b>	<b>67</b>
<b>11. Anexos</b>	<b>69</b>
<b>11.1. Planos de construcción</b> . . . . .	69



---

## Lista de figuras

---

1. Ejemplo de troquel de corte . . . . .	7
2. Prensa troqueladora mecánica . . . . .	8
3. Prensa troqueladora mecánica . . . . .	9
4. Prensa troqueladora hidráulica . . . . .	9
5. Componentes de un troquel . . . . .	10
6. Guías de alineación vertical del troquel . . . . .	12
7. Ejemplo de troquel progresivo . . . . .	13
8. Fases de la operación de corte . . . . .	14
9. Defectos en la operación de corte: holgura insuficiente (izquierda), excedente de holgura (derecha) . . . . .	15
10. Fresadora CNC . . . . .	16
11. Características de las herramientas de corte . . . . .	17
12. Parámetros de corte en software CAM . . . . .	19
13. Clasificación de materiales según dureza en catálogo WIDIA . . . . .	20
14. Búsqueda de herramienta en página web de WIDIA . . . . .	20
15. Búsqueda de parámetro de velocidad de corte para herramienta WIDIA . . . . .	21
16. Búsqueda de parámetro de avance por diente para herramienta WIDIA . . . . .	21
17. Cuadro de requisitos de funcionamiento . . . . .	23
18. Cuadro de requisitos de seguridad . . . . .	24
19. Cuadro de requisitos de dimensiones . . . . .	24
20. Autodesk Inventor Professional 2022 . . . . .	25
21. Prensa Kurt D688 . . . . .	26
22. Ensamble completo del troquel . . . . .	26
23. Inserto de Punzón . . . . .	27
24. Sujetador de punzones . . . . .	28
25. Representación de ensamble de punzón en sujetador . . . . .	28
26. Matriz del troquel . . . . .	29
27. Detalle de ranura que rodea a la cavidad rectangular . . . . .	29
28. Cara inferior de matriz . . . . .	29
29. Placa porta-punzón . . . . .	30
30. Placa porta-matriz . . . . .	31
31. Diseño de pisador . . . . .	32

32. Representación de función del pisador . . . . .	32
33. Impresión 3D de componentes del troquel . . . . .	33
34. Montaje de stock para primer maquinado de punzon . . . . .	34
35. Detalle de separación de herramienta y superficie trabajada . . . . .	34
36. Estrategia Face en primer maquinado de punzón . . . . .	35
37. Estrategia 2D Adaptive en primer maquinado de punzón . . . . .	35
38. Árbol de operaciones para maquinado de cara inferior de inserto . . . . .	36
39. Montaje de stock resultante para segundo maquinado de punzón . . . . .	36
40. Estrategia Face en segundo maquinado para punzón . . . . .	37
41. Árbol de operaciones para maquinado de cara superior de inserto . . . . .	37
42. Montaje de stock para maquinado de holder . . . . .	38
43. Maquinado de cavidades en holder de punzones . . . . .	39
44. Estrategia Drill en holder de punzones . . . . .	39
45. Maquinado final de holder . . . . .	40
46. Árbol de operaciones para maquinado de holder . . . . .	40
47. Montaje de stock para pisador . . . . .	41
48. Estrategia 2D Contour en pisador . . . . .	42
49. Detalle de afinado de pendientes en pisador . . . . .	42
50. Toolpath en maquinado de ranuras. (I: Cavidad de geometría que rodea la ranura, D: Cavidad de ranura) . . . . .	43
51. Árbol de operaciones para maquinado de pisador . . . . .	43
52. Montaje de stock de matriz . . . . .	44
53. Estrategia 2D Adaptive para ranuras de matriz . . . . .	45
54. Maquinado de segunda ranura en matriz . . . . .	46
55. Árbol de operaciones para maquinado de matriz . . . . .	46
56. Cuadro de resumen de maquinado de cara inferior de punzones . . . . .	47
57. Cuadro de resumen de maquinado de cara superior de punzones . . . . .	48
58. Proceso de maquinado de punzones . . . . .	48
59. Resultado de maquinado de insertos . . . . .	49
60. Cuadro de resumen de maquinado de sujetador de punzones . . . . .	50
61. Maquinado de holder . . . . .	51
62. Cuadro de resumen de maquinado de pisador . . . . .	52
63. Resultado maquinado de pisador . . . . .	53
64. Cuadro de resumen de maquinado de matriz . . . . .	53
65. Maquinado de matriz . . . . .	54
66. Resultados de maquinado de matriz . . . . .	54
67. Troquel montado en prensa de Electropuertas . . . . .	55
68. Muestra de perforación de troquel . . . . .	55
69. Tabla de costos de materiales del troquel . . . . .	56
70. Tabla de costo por sueldo de operario . . . . .	57
71. Tabla de costos de manufactura del troquel . . . . .	57
72. Tabla de costos de herramientas requeridas para manufactura de troquel . . . . .	58
73. Diseño inicial de punzón/holder . . . . .	59
74. Ruptura de herramienta de 3/8" de diámetro en maquinado de punzón . . . . .	61
75. Estrategia de manufactura en donde se dió ruptura de herramienta de 1/4" . . . . .	61

Se propone para la empresa Electropuertas S.A. llevar a cabo el diseño mecánico y la manufactura de un troquel capaz de realizar dos perforaciones rectangulares en lámina galvanizada de 0.63mm de espesor, asimismo definir el proceso de diseño en donde se describan todos los procesos y consideraciones para la fabricación del troquel. El troquel será instalado en una prensa troqueladora mecánica de 27 toneladas que posee la empresa. La necesidad de la elaboración del troquel parte del aumento de demanda de cortinas metálicas perforadas a nivel centroamericano. Además, la gran cantidad de productos elaborados en Electropuertas por medio de corte y embutido de chapa metálica ha llevado al director de la empresa a la considerar la inversión en maquinaria para manufactura de troqueles, por lo que la clara definición del proceso de diseño y fabricación de troqueles es necesario para la evaluación de la inversión. Para llevar a cabo este trabajo, se propone en primera instancia definir la geometría adecuada para el troquel, acoplándose a la prensa que se utilizará. Posteriormente se elabora el modelo en 3D utilizando el software Autodesk Inventor Professional, y asimismo la programación del maquinado CNC utilizando el add-on Autodesk HSM en el mismo software. Finalmente se generan planos del troquel diseñado en donde se incluye un listado de componentes y materiales.



En la industria es indispensable la fabricación de piezas metálicas, ya sea para la venta de estas piezas como tal, o porque las piezas forman parte del ensamble de algún producto. Dentro de los diferentes procesos de manufactura para piezas metálicas se encuentra el proceso de troquelado, en el cual una lámina metálica es presionada por un herramental para darle la forma de la pieza requerida a esta lámina. Asimismo, los troqueles también deben ser fabricados mediante otra rama de los procesos de manufactura del metal, a esta rama se le denomina maquinado.

El maquinado de un herramental de corte puede realizarse con máquinas herramienta convencionales o con tecnología CNC, la cual da más precisión y más flexibilidad en cuanto al diseño del herramental. Para llevar a cabo la manufactura de un troquel (o cualquier herramental, como lo es un molde de inyección o soplado) se lleva a cabo una serie de pasos clave, tales como: la identificación de necesidades de la pieza resultante del accionamiento del troquel, el diseño y modelado de los componentes del troquel, la fabricación de un prototipo del troquel para comprobar la funcionalidad del mismo, y finalmente la planificación de la manufactura de los componentes del troquel.

Electropuertas S.A. es una empresa dedicada a la fabricación e instalación de portones y motores eléctricos para portón, así como de automatizaciones de sistemas de acceso. Al ser una industria que trabaja una gran parte del tiempo con metales, la empresa se ha encontrado en varias ocasiones en la necesidad de fabricar troqueles para la producción de diferentes componentes de un portón, como por ejemplo las visagras de un portón seccional o troqueles para corte, como por ejemplo las cortinas metálicas enrollables microperforadas, comúnmente vistas en locales de centros comerciales.

Con este trabajo se pretende comparar los costos de producción de un troquel fabricado por una empresa externa con los costos de producción si se tiene un centro de mecanizado CNC. En esta comparación se deben de tomar en cuenta los tiempos de manufactura y la calidad de los componentes del troquel, esto con el fin de proporcionar a la empresa una guía para la toma de una decisión económica importante como lo es la compra de un centro de mecanizado CNC.



Electropuertas S.A. cuenta actualmente con un troquel para la perforación rectangular requerida. Sin embargo, el crecimiento de la empresa en el territorio centroamericano ha sido tal que un solo troquel no logra satisfacer la demanda de la duela perforada. Por esta razón, la empresa ha estado en búsqueda de una empresa capaz de producir un troquel de corte, pero solamente se han encontrado talleres de maquinado de piezas mediante máquinas herramienta convencionales. La empresa no confía el trabajo a estos talleres por diversas razones: largos tiempos de entrega, baja calidad en acabados del troquel y medidas inexactas debido a la complejidad geométrica del troquel.

El troquel que se producirá para Electropuertas S.A. servirá como demostración a los directivos de la empresa de la calidad de trabajo que una serie de máquinas con tecnología CNC puede obtener. Al definir el proceso y los criterios de diseño y manufactura para un troquel por medio de tecnología CNC se garantizará la aplicación de conceptos ingenieriles en próximos proyectos de manera que este pueda ser utilizado por otra persona para replicar el troquel existente o para tener una base en el diseño y manufactura de troqueles con otra función como embutido de metales.

Al utilizar este método de diseño y manufactura se pretende una reducción de costos de manufactura, tiempos de diseño y tiempos de manufactura, haciendo uso óptimo de los recursos y materiales disponibles, además de estandarizar el proceso de diseño para los futuros troqueles que la empresa podría necesitar como por ejemplo un troquel para microperforación de duela.



### 3.1. Objetivo general

Diseñar, fabricar y probar un troquel para realizar dos perforaciones rectangulares en lámina galvanizada de 0.63 mm de espesor.

### 3.2. Objetivos específicos

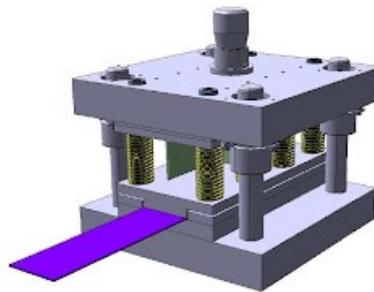
1. Establecer los materiales y métodos de manufactura para la fabricación del troquel.
2. Definir la geometría adecuada para poder perforar dos agujeros en la lámina con una acción de la prensa troqueladora.
3. Seleccionar los materiales adecuados del troquel que le permitan realizar por lo menos 100,000 perforaciones a la lámina.
4. Definir el proceso de manufactura para el troquel diseñado.
5. Especificar el costo de manufactura del troquel, tomando en cuenta materiales, depreciación de maquinaria y mano de obra.



## 4.1. Troqueles

Un troquel es un es un herramental cuya función es moldear, cortar o doblar una lámina metálica al hacer presión sobre esta. Se utilizan comúnmente en la industria para la fabricación de piezas metálicas como tapaderas, roldanas, y piezas metálicas en general. Para transformar la lámina el troquel debe de estar montado en una máquina llamada “prensa troqueladora” o “prensa estampadora”. Los componentes del troquel encargados de transformar la lámina son el punzón y la matriz (también llamados “macho” y “hembra”). El punzón se presiona sobre la matriz cuando la lámina está en medio de estos y esa operación es la que moldea a la lámina (Luz, 2018).

Figura 1: Ejemplo de troquel de corte

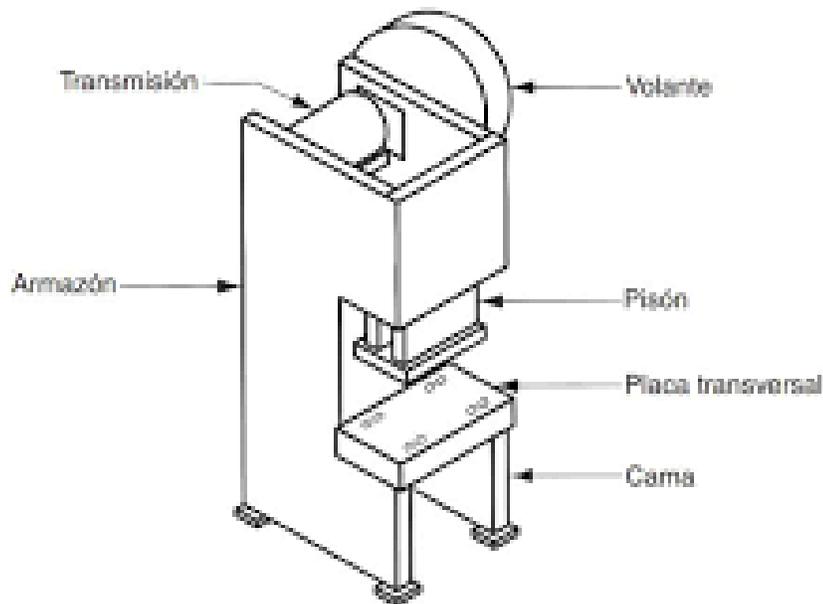


Fuente: (Abascal, 2009)

## 4.2. Prensas troqueladoras

Las prensas troqueladoras son las máquinas encargadas de ejercer la fuerza sobre el punzón del troquel para que este pueda realizar una operación. Estas se componen de tres piezas principales: armazón, cama y pistón. Se denomina armazón al cuerpo de la máquina, es decir, la estructura. La cama de la prensa es en donde se monta la matriz del troquel, esta pieza permanece estática durante la operación. El pistón es la parte móvil de la máquina, en él se monta el punzón para poder realizar la operación. Para dimensionar una prensa estampadora se debe tener el conocimiento de dos cálculos: capacidad (generalmente medida en toneladas) y consumo de energía eléctrica.

Figura 2: Prensa troqueladora mecánica



Fuente: (Álvarez, 2009)

Existen dos tipos de mecanismos de accionamiento para las prensas troqueladoras: mecánico e hidráulico

### 4.2.1. Prensa mecánica

Las prensas con un sistema mecánico utilizan un motor eléctrico que hace girar un volante de inercia en donde se almacena la energía. Cuando la prensa es accionada la energía del volante es transmitida hacia el pistón por medio de un cigüeñal causando que el pistón se desplace y presione el punzón contra la matriz (Cattel, 2006).

Figura 3: Prensa troqueladora mecánica



Fuente: (McLane, 2022)

#### 4.2.2. Prensa hidráulica

Las prensas de sistema hidráulico utilizan uno o varios cilindros hidráulicos impulsados por una unidad hidráulica para realizar la operación. Estas son utilizadas generalmente en operaciones de embutido profundo ya que estas mantienen la misma magnitud de presión en todo su recorrido, sin embargo, la operación en una prensa hidráulica es más lenta que en una prensa mecánica(Cattel, 2006).

Figura 4: Prensa troqueladora hidráulica

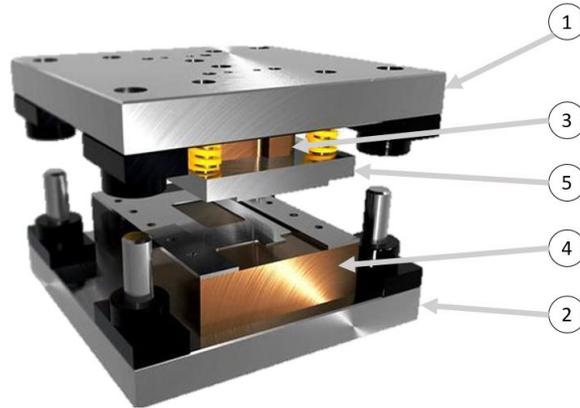


Fuente: (McLane, 2022)

### 4.3. Componentes de un troquel

La cantidad de elementos de un troquel dependerá de la operación que este realice y de la complejidad del diseño de la pieza que éste produce. Sin embargo, todos los troqueles poseen una estructura similar de componentes. Estos son: Placa porta-punzón, placa porta-matriz, pisador, punzón, matriz.

Figura 5: Componentes de un troquel



Fuente: (Fazatec, 2020)

1. Placa porta-punzón
2. Placa porta-matriz
3. Punzón
4. Matriz
5. Pisador

#### 4.3.1. Placa porta-punzón

Es el elemento del troquel que se monta en el cigüeñal o cabeza móvil de la prensa mediante el muñón de sujeción. Este soporta al punzón y los elementos que lo complementan. Normalmente fabricado en acero de bajo carbono como acero SAE 1045. Dado que no es una pieza que realiza la función de corte no es necesario aumentar su dureza por medio de un tratamiento térmico. El diseño de este componente debe de contemplar el ensamble de guías y bujes de alineación según se requiera. (Hedrick, 2006)

#### 4.3.2. Placa porta-matriz

Es el elemento que se monta en la parte fija de la prensa troqueladora (mesa) mediante bridas de sujeción, tornillos y tuercas. En esta placa se aloja la matriz del troquel. Su superficie debe de ser mayor a la de la matriz, asegurando que la fuerza que ejerce el pistón al accionar la prensa y cortar la lámina sea distribuida en una mayor área. Al igual que la placa porta-punzón, esta se fabrica en acero de bajo carbono y no requiere de ningún tratamiento térmico. También debe de contemplarse la posición y geometrías de los bujes y guías para el diseño de esta pieza. (Hedrick, 2006)

#### 4.3.3. Punzón

Es el elemento de corte o embutido que define el proceso. Su función principal es ejercer presión sobre la lámina que se encuentra sujeta en la matriz para realizar la operación. El diseño de este componente debe de contemplar los métodos de sujeción con la placa porta-punzón. El punzón es el elemento principal de corte por lo que para su fabricación se debe de utilizar un material con una dureza que se encuentre entre 62 y 64 HRC. Comúnmente se utiliza acero D2 con un tratamiento térmico de revenido. (Macareno, 2011)

#### 4.3.4. Matriz

Es el elemento complementario del punzón. En procesos de embutido este tiene la forma de la parte inferior de la pieza que se está transformando. En procesos de corte este tiene generalmente un agujero con la forma del punzón, pero con una holgura en sus dimensiones, a esta holgura se le denomina: claro. Al igual que los punzones, este elemento debe de tener una dureza alta ya que recibe el impacto del punzón y el pisador, y además es sometida a esfuerzos altos de compresión. Generalmente se utiliza acero D2 con tratamiento térmico de revenido para alcanzar la dureza deseada. (Hedrick, 2006)

#### 4.3.5. Pisador

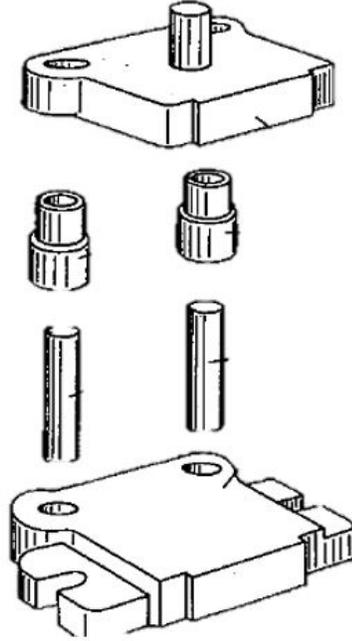
El pisador es el componente encargado de presionar el material para evitar el movimiento del mismo durante la operación. En este componente se alojan elementos de compresión como resortes, cuya función es ejercer la fuerza necesaria para que la lámina no se mueva. Al ser un elemento cuya función principal no es el corte de la lámina, este no requiere de una alta dureza, por lo que este elemento es generalmente construido con acero de bajo carbono como SAE 1045. (Hedrick, 2006)

#### 4.3.6. Elementos de guía

Dependiendo del diseño y complejidad del troquel, este llevará distintos elementos cuya función es alinear tanto el troquel como el material a troquelar para que la operación del troquel se lleve a cabo correctamente. Generalmente los elementos que alinean el troquel en

su vertical son un sistema macho-hembra y están ensamblados en las placas porta-troquel (placa porta-punzón y placa porta-matriz). La posición y geometría de los elementos que alinean al material de trabajo dependerán del tamaño y geometría de dicho material.

Figura 6: Guías de alineación vertical del troquel



Fuente: (Abascal, [2009](#))

## 4.4. Tipos de troqueles

### 4.4.1. Troquel simple

El troquel simple está diseñado para realizar una sola función cada vez que se acciona la prensa troqueladora. Normalmente es utilizado para la fabricación de piezas sencillas o componentes de productos más complejos, esto se debe a su limitación de productividad. Normalmente está complementado por más maquinaria y troqueles para poder terminar el producto. El mantenimiento de este tipo de troquel es relativamente sencillo que ya que solamente requiere de una leve lubricación eventual y ajustes de matricería necesarios por el desgaste de sus componentes. (A. Kumaresh et al., [2016](#))

### 4.4.2. Troquel combinado

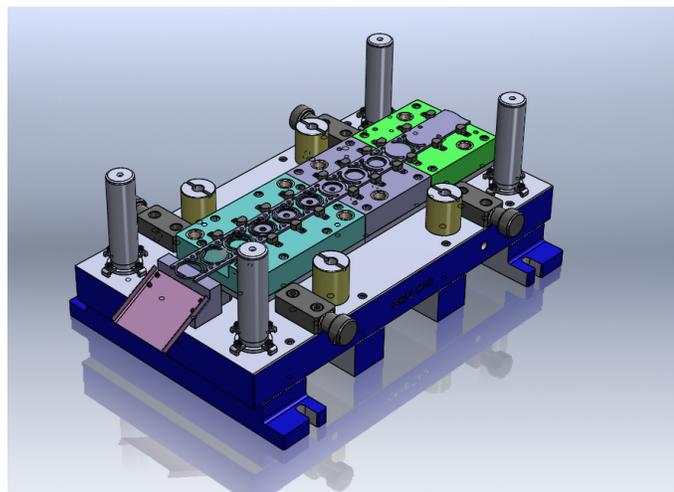
Un troquel combinado es aquel que realiza más de una operación por cada accionamiento de la prensa. La configuración más común de estos troqueles es embutido-cortado, en donde los punzones se encuentran unos dentro de otros, de forma que cuando se embute inicialmente

la lámina, esta ya se encuentra sujeta para poder realizar la perforación por medio de los punzones. Normalmente se emplean para la producción de piezas con agujeros internos que deben estar centrados con precisión. También existe la opción de instalar el troquel en una prensa de doble acción para realizar ambas operaciones individualmente con más precisión (A. Kumaresh et al., 2016).

#### 4.4.3. Troquel progresivo

El troquel progresivo es un troquel compuesto por varias estaciones que realizan diferentes operaciones. La pieza mecánica se desplaza de una estación a otra luego de que la prensa haya sido accionada, ya sea con una alimentadora o manualmente. Los punzones están dispuestos en línea recta y se accionan a medida que la lámina va avanzando a través del troquel. Normalmente las primeras estaciones del troquel progresivo son agujeros y formas interiores mientras que las últimas estaciones se encargan de realizar el corte del perímetro para obtener la pieza final. Estos troqueles generalmente son de diseño sencillo, pero ofrecen una menor precisión de corte con respecto a los troqueles simples. (A. Kumaresh et al., 2016).

Figura 7: Ejemplo de troquel progresivo



Fuente: (Ramirez, 2015)

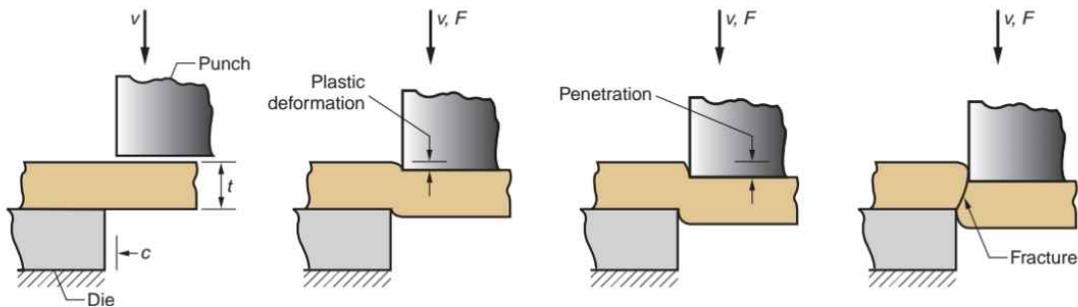
#### 4.5. Fundamentos de la operación de corte

El punzón al momento de tocar la lámina comienza su acción de compresión seguida de la de corte. El punzón presiona con fuerza una porción de la lámina separándola totalmente del resto, venciendo la lámina con un esfuerzo superior a sus posibilidades de resistencia molecular. El esfuerzo cortante necesario se puede determinar al multiplicar el perímetro de la figura (mm), el espesor de la chapa (mm) y la resistencia al corte del material en  $\text{kg}/\text{mm}^2$ . Esto da como resultado una fuerza necesaria cortante expresada en kgf. (Rossi, 1979)

#### 4.5.1. Comportamiento del material en el proceso de corte

Luego de que la lámina haya sido sometida a la fuerza de la prensa troqueladora, da como resultado una pieza con cierto acabado. Este acabado está compuesto por 4 zonas principales en el material. La primera zona se encuentra en la superficie de la lámina que tuvo contacto inicialmente con el punzón, denominada: zona de redondeo. En esta zona se puede notar la deformación que se da en la lámina al hacer contacto con el punzón del troquel. Debajo de la zona redondeada se encuentra la zona bruñida, resultado de la penetración del punzón en el material justo antes de la fractura del material. Debajo de la zona bruñida se encuentra la zona de fractura, en donde el movimiento continuo del punzón genera la fractura del material. Finalmente, la rebaba del material causada por la elongación del material durante la etapa final del corte (Luz, 2018)

Figura 8: Fases de la operación de corte



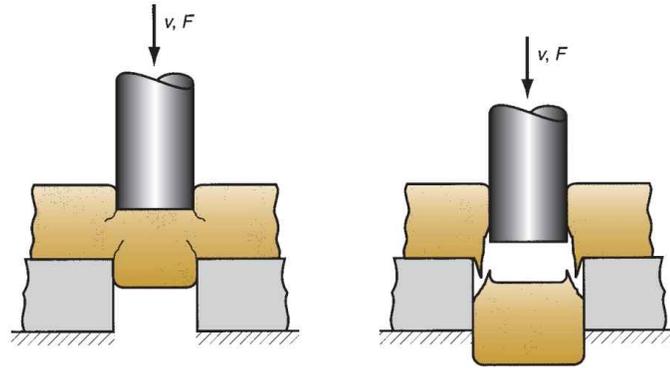
Fuente: (Groover, 2013)

#### 4.5.2. Posibles defectos en el proceso de corte

Se le conoce como claro a la holgura existente entre el punzón y la matriz de corte. La calidad del producto final está altamente relacionada con este parámetro. Mikell Groover comenta sobre la relación de esta holgura con el material que se está trabajando en su libro Fundamentals of Modern Manufacture. En él, menciona que una holgura demasiado grande entre el punzón y la matriz puede provocar que el punzón doble la lámina provocando un proceso similar al embutido. Por otro lado, si la holgura es muy pequeña para el material, se generan más fuerzas de fricción entre la lámina y la matriz provocando que la prensa troqueladora tenga que aplicar una mayor fuerza. (Groover, 2013)

Otro de los problemas que se presentan en la operación de corte por medio de troquel es la posibilidad de que la pieza cortada se quede atorada entre las paredes de la matriz o del punzón. Sin embargo, los troqueles en los que la porción de lámina cortada es un desecho y no el producto final no presentan este problema debido a que el próximo accionamiento de la prensa desplazará a el pedazo de lámina. (Groover, 2013)

Figura 9: Defectos en la operación de corte: holgura insuficiente (izquierda), excedente de holgura (derecha)



Fuente: (Groover, 2013)

## 4.6. Manufactura del troquel

El correcto mecanizado de un troquel depende de las máquinas y herramientas que se utilicen para llevar a cabo la manufactura. Para tener un maquinado de calidad se necesita tener en cuenta la máquina que se utilizará, las herramientas de corte involucradas en la manufactura de cada pieza, los parámetros de corte que se asignarán a cada una de estas herramientas y los intervalos de tolerancia que se tienen en el ensamblaje de los componentes. (Álvarez, 2009)

### 4.6.1. Maquinaria para manufactura de troqueles

#### Tecnología convencional

Una fresadora es una maquina herramienta cuya función principal es cortar y dar forma al material con el que se esté trabajando. A este proceso se le llama "mecanizado de piezas". Esta posee una mesa de trabajo en donde se monta el material que se desea mecanizar y un husillo en donde se monta la herramienta de corte que se encuentra justo encima de la mesa de trabajo. La operación de la fresadora se lleva a cabo mediante, manivelas utilizadas para mover la mesa de trabajo en cualquiera de los dos ejes que se encuentran sobre un plano y existe otra manivela para desplazar la herramienta de corte en línea vertical para que llegue a hacer contacto con el material de trabajo. (Gerling, 1960)

#### Tecnología CNC

A pesar de la fiabilidad de la tecnología convencional de mecanizado, muchas veces se hacía notar el error humano en la manufactura de piezas en serie o individuales. Como consecuencia de esto, nace la fresadora con tecnología CNC (Control Numérico Computarizado). En esta tecnología, los ejes de la máquina están controlados por una serie de motores que siguen instrucciones de un código que genera el usuario manualmente o con ayuda de un software CAM (Computer Aided Manufacture). Con esta tecnología se logra satisfacer de mejor manera los requerimientos del mercado

en cuanto a complejidad y precisión de las geometrías deseadas, además de la mejora en tiempos y en productividad que se llegan a tener al emplear esta tecnología en un taller de mecanizado.

Figura 10: Fresadora CNC



Fuente: (Haas Automation Inc.)

La manera más eficiente de utilizar una fresadora CNC es con el complemento de un diseño en algún software CAD (Computer Aided Design) en donde se modela la pieza que se desea manufacturar en el centro de mecanizado CNC. Con la ayuda de un software CAD y un software CAM se define el tamaño inicial del material que se trabajará, la geometría final de este material, las herramientas de corte y las operaciones que se deben realizar.

#### 4.6.2. Herramientas de corte

Las herramientas de corte que se montan en la fresadora (ya sea convencional o CNC) se les denominan "fresas". El material de las fresas depende principalmente del material que se debe trabajar, generalmente se emplea cobalto o tungsteno con distintos recubrimientos. La fresa consta de dos secciones: vástago y longitud de corte. El vástago es la sección de la herramienta que es sujeta por el husillo de la máquina. La longitud de corte es la sección de la herramienta en donde se encuentran los filos de la herramienta. A continuación se describe cada una de las especificaciones de las herramientas de corte:

**Tipo de fresa (Type):** El tipo de fresadora se refiere a la geometría de la fresa. Esta geometría esta directamente relacionada con el tipo de corte que se va a realizar. Las fresas mas utilizadas en maquinados son:

- Fresa plana (Desvastes, careados y contornos)
- Fresa de bola (Redondeos y acabados)
- Fresa de radios (Radios exteriores)
- Taladro o Broca (Agujeros)

**Diámetro de corte (Cutting Diameter):** Es el diámetro de corte de la herramienta. Depende directamente del diseño u operación que se desee realizar con la herramienta.

**Diámetro del vástago (Shaft diameter):** Se refiere al diámetro de la sección en la que no están los filos. Algunas fresas tienen el mismo diámetro de corte y diámetro de vástago.

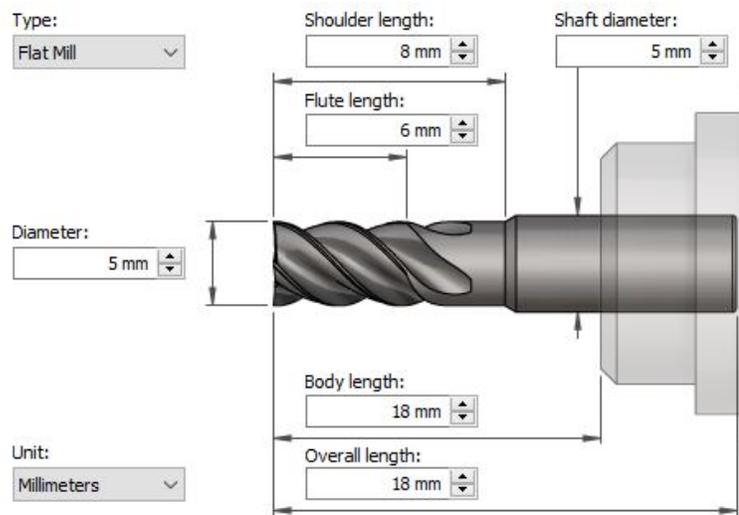
**Longitud del saliente (shoulder length):** La distancia que existe entre el extremo de la fresa y el diámetro del vástago (si tiene diámetro diferente al diámetro de corte)

**Longitud de los filos (flute length) :** Es la distancia que existe entre el extremo de la fresa y el final de los filos.

**Longitud de voladizo (Body length):** Es la distancia entre el extremo de la fresa y la sección en donde se sujeta al holder de la herramienta. Este valor puede ser ajustado por el operador de la máquina según la pieza que se vaya a trabajar. Conociendo esta medida se puede determinar si un maquinado con cierta profundidad se puede trabajar con la herramienta en cuestión. Si la profundidad a la que se debe de llegar en una operación es mayor a la longitud de voladizo de la herramienta, puede que el holder de la herramienta tenga una colisión con alguna parte de la pieza que se está trabajando.

**Longitud total (overall length):** La distancia entre los dos extremos de la fresa. Una mayor longitud total permite que la herramienta tenga una mayor área de sujeción y menos vibración en el momento de la operación.

Figura 11: Características de las herramientas de corte



Fuente: (Autodesk Inventor, HSM)

Estas especificaciones de herramienta deben de estar correctamente definidas para evitar algún problema o colisión a la hora de realizar una operación de corte.

#### 4.6.3. Parámetros de corte

Para realizar el mecanizado de piezas, ya sea en tecnología convencional o CNC, se deben ajustar los parámetros de corte de la fresa para garantizar la correcta formación de viruta por medio de los esfuerzos de corte que la herramienta genera sobre el material. Los factores que se deben de tomar en

cuenta para la definición de estos parámetros son: el diámetro de la herramienta de corte, el material de la herramienta de corte, el material de trabajo y el acabado superficial que se desea en la pieza.

Los principales parámetros de corte que se debe definir en el software CAM son los siguientes:

### Velocidad de corte (Surface speed)

Esta es la velocidad tangencial que tiene un punto en el diámetro de la fresa, por lo que está directamente relacionada con la velocidad angular de la herramienta (Spindle speed expresada en rpm) . En otras palabras, es la velocidad lineal a la que se encuentra girando la fresa cuando entra en contacto con el material de trabajo. La velocidad de corte varía en función de la clasificación o dureza del material tanto de la herramienta como del material que se va a cortar. Este parámetro no se calcula, esta definido por tablas que pueden ser generales o proporcionadas por el proveedor de la herramienta. Expresada en medida de desplazamiento sobre medida de tiempo, generalmente SFM (surface feet per minute). o m/min(Serrano, 2021). La relación que existe entre la velocidad de corte y la velocidad del husillo se puede observar en la ecuación para encontrar la velocidad de corte:

$$V_c = \frac{\pi * D * n}{1,000} \quad (1)$$

En donde:

- $V_c$  es la velocidad de corte (SFM o m/min)
- $D$  es el diámetro de corte de la herramienta (mm o in)
- $n$  es la velocidad del husillo (rpm)

### Avance o carga de viruta o por diente (Feed per tooth)

El avance por diente se refiere al espesor de material que cada uno de los dientes (o filos) de la herramienta arranca del material cuando esta está girando. La importancia de definir correctamente este parámetro radica en que la viruta, además de representar el resultado del mecanizado, cumple la función de llevar consigo una fracción del calor generado por la fricción entre los filos y el material de trabajo. Si el avance por diente se define como superior al adecuado, se estaría sobrecargando la fresa, esto a la vez impide la correcta evacuación de la viruta debido a su tamaño. Por otro lado, si es muy inferior al adecuado, se pueden dañar los filos de la fresa ya que solo está rozando el material(Serrano, 2021). Al igual que la velocidad de corte, este parámetro se encuentra en tablas generales o proporcionadas por el proveedor y está expresada en mm o in por diente. La velocidad de avance (feed) se refiere a la velocidad lineal con la que se mueve la herramienta con respecto al material de trabajo, y está directamente relacionado con el avance por diente, tal como se puede observar en la siguiente ecuación.

$$V_f = n * fz * Z \quad (2)$$

En donde:

- $V_f$  es la velocidad de avance (mm/min o in/min)
- $n$  es la velocidad del husillo (rpm)

- fz es el avance por diente (mm o in)
- Z es el número de filos o dientes que posee la herramienta

Figura 12: Parámetros de corte en software CAM

Speed		Cutter	
Spindle speed:	Surface speed:	Number of flutes:	Thread pitch:
5000 rpm	= 78.5398 m/min	3	0 mm
Ramp spindle speed:			
5000 rpm			
Feedrates		Vertical Feedrates	
Cutting feedrate:	Feed per tooth:	Plunge feedrate:	Feed per revolution:
1000 mm/min	= 0.0666667 mm	333.333 mm/min	= 0.0666667 mm
Lead-in feedrate:		Retract feedrate:	
1000 mm/min		333.333 mm/min	
Lead-out feedrate:			
1000 mm/min			
Ramp feedrate:			
333.333 mm/min			
<b>Spindle Rotation</b>			
<input checked="" type="radio"/> Clockwise <input type="radio"/> Counter-Clockwise			

Fuente: (Autodesk Inventor, HSM)

#### 4.6.4. Procedimiento para definición de parámetros de corte

A continuación se describe el proceso para la definición de parámetros de corte:

1. Determinar dureza del material que se va a cortar.
2. Determinar la clasificación del material que se va a cortar en catálogo del proveedor de la herramienta.
3. Buscar en el catálogo/página web del proveedor el tipo de herramienta que se tiene disponible.
4. En las tablas del catálogo/página web, buscar el parámetro (o rango) adecuado de velocidad de corte para la herramienta disponible según la clasificación del material que se va a cortar.
5. En las tablas del catálogo/página web, buscar el parámetro (o rango) adecuado de avance por diente para la herramienta disponible según la clasificación del material que se va a cortar.

A continuación se lleva a cabo un ejemplo de definición de parámetros de corte con una herramienta de 1/4" de diámetro marca WIDIA, modelo 5879146 la cuál será utilizada para cortar acero D2.

1. **Dureza de material:** Este dato se puede hallar mediante la ficha técnica del proveedor del material o una investigación en línea acerca del material. En algunos casos el catálogo del proveedor posee guías para determinar la dureza del material. El acero D2 crudo tiene una dureza de 255 grados en escala Brinell, lo que equivale a aproximadamente **25 grados de dureza en escala Rockwell.**

2. **Clasificación del material en catálogo de proveedor de herramienta:** El catálogo de WIDIA posee una tabla en donde muestra la clasificación del material según su dureza.

Figura 13: Clasificación de materiales según dureza en catálogo WIDIA

### Referencia cruzada de materiales • DIN

grupo de material	descripción	contenido	resistencia a la tensión RM (MPa)*	dureza (HB)	dureza (HRC)	número de material
P0	Aceros con bajo contenido de carbono, virutas largas	C < 0,25 %	< 530	< 125	–	–
P1	Aceros con bajo contenido de carbono, virutas cortas, mecanizado libre	C < 0,25 %	< 530	< 125	–	C15, Ck22, ST37-2, S235JR, 9SMnPh28, GS38
P2	Aceros al carbono medios y altos	C > 0,25 %	> 530	< 220	< 25	ST52, S355JR, C35, G560, C153
P3	Aceros aleados y aceros para herramientas	C > 0,25 %	600–850	< 330	< 35	16MnCr5, Ck45, 21CrMnV5-7, 38SMn28
P4	Aceros aleados y aceros para herramientas	C > 0,25 %	850–1400	340–450	35–48	100Cr6, 30CrNiMo8, 42CrMo4, C70W2, S6525, X120Mn12
P5	Aceros ferríticos, martensíticos e inoxidables PH	–	600–900	< 330	< 35	100Cr6, 30CrNiMo8, 42CrMo4, C70W2, S6525, X120Mn12
P6	Aceros ferríticos, martensíticos e inoxidables PH de alta resistencia	–	900–1350	350–450	35–48	X102CrMo17, G-X120Cr29

Fuente: (WIDIA)

Se observa en el catálogo del proveedor que los materiales con una dureza mayor a 25 HRC y menor a 35 HRC se encuentran bajo el código de clasificación **P3**.

3. **Buscar herramienta en catálogo/página web de proveedor:** Las herramientas se deben de buscar según su código de identificación único.

Figura 14: Búsqueda de herramienta en página web de WIDIA

GP End Mills • Series I4S • Sharp Edge ★ ALL-STAR  
 • 4 Flute • Inch

Series I4S • Inch

Write the first review

Material: High

SAP Material Number	5879146
ANSI Catalog Number	I450250T075R
Grade	TIALN
Adapter Style Machine Side	Straight-Cylindrical
[Z] Number of Flutes	4
[D1] Effective Cutting Diameter	2.500 in
[D] Adapter / Shank / Bore Diameter	.25 in
[AP1 MAX] 1st Maximum Cutting Depth	7.500 in
[L] Overall Length	2.500 in

Fuente: (WIDIA)

Aquí se muestran las características de la herramienta buscada, estas sirven para comprobar que el código que se ingresó concuerda con la herramienta que se tiene disponible.

4. **Buscar parámetro de velocidad de corte para la herramienta:** En la parte de abajo de la página se muestra una tabla en donde están tabulados los parámetros de corte. Se debe de buscar en la primera fila el código de clasificación del material que se va a cortar y en la columna de Cutting Speed se encuentra el rango al que debe trabajar la herramienta según la clasificación del material.

Figura 15: Búsqueda de parámetro de velocidad de corte para herramienta WIDIA

Side Milling (A) and Slotting (B)		Tools		Recommended feed per tooth (Ft = inch/rev) for side milling (A). For slotting (B), reduce Ff by 20%.																
Material Group	A	B	Cutting Speed		D1 Diameter															
			min	max	1/64	1/32	1/16	3/64	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4				
A1	0.140	0.510	490	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.018	0.023	0.027	0.034	0.039	0.044		
1	0.140	0.510	490	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.018	0.023	0.027	0.034	0.039	0.044		
2	0.140	0.510	490	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.018	0.023	0.027	0.034	0.039	0.044		
3	0.140	0.510	390	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.004	0.005	0.007	0.011	0.015	0.020	0.023	0.029	0.034	0.039		
4	0.140	0.510	300	490	PT	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.007	0.010	0.014	0.017	0.020	0.026	0.030	0.034		

Fuente: (WIDIA)

En la tabla se muestran el rango recomendable para el parámetro de velocidad de corte en ft/min. de **390 a 520 ft/min**

5. **Buscar parámetro de avance por diente para la herramienta:** En la misma tabla, se debe de buscar en la primera fila el diámetro de la herramienta disponible, y en la primera columna el código de clasificación del material que se va a cortar. En la intersección de estos dos datos se encuentra el valor recomendado para el avance por diente expresado en in.

Figura 16: Búsqueda de parámetro de avance por diente para herramienta WIDIA

Side Milling (A) and Slotting (B)		Tools		Recommended feed per tooth (Ft = inch/rev) for side milling (A). For slotting (B), reduce Ff by 20%.																
Material Group	A	B	Cutting Speed		D1 Diameter															
			min	max	1/64	1/32	1/16	3/64	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4				
A1	0.140	0.510	490	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.018	0.023	0.027	0.034	0.039	0.044		
1	0.140	0.510	490	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.018	0.023	0.027	0.034	0.039	0.044		
2	0.140	0.510	490	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.009	0.013	0.018	0.023	0.027	0.034	0.039	0.044		
3	0.140	0.510	390	520	PT	0.001	0.002	0.004	0.004	0.005	0.007	0.011	0.015	0.020	0.023	0.029	0.034	0.039		
4	0.140	0.510	300	490	PT	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.007	0.010	0.014	0.017	0.020	0.026	0.030	0.034		

Fuente: (WIDIA)

En la tabla se muestra el valor recomendado para el avance por diente de la herramienta: **0.0015 in.**

Además, en esta tabla también se encuentran valores recomendados para la profundidad axial y radial de corte que se puede trabajar con las herramientas. Estas profundidades están dadas en función del diámetro de corte de la herramienta.

Es probable que en los catálogos de ciertos proveedores no se encuentre la información necesaria completa, por lo que se recomienda trabajar con ayuda de otros catálogos con los que se pueda completar la información faltante.

#### 4.6.5. Tolerancias en el maquinado

Una dimensión no se puede dar de forma exacta en un maquinado, por lo que se aplican diferentes intervalos en los que la dimensión resultante se considera aceptable según la aplicación o uso de la pieza. A estos intervalos se los denomina tolerancias. Las tolerancias están representadas con una medida nominal (la medida real de la pieza) acompañados de una medida mínima y una medida máxima aceptable. A la diferencia entre la medida nominal y sus respectivos límites (inferiores/superiores) se les denomina desviaciones.

Las desviaciones de una pieza dependen principalmente de la magnitud de la medida nominal y el grado de precisión que se pueda obtener en la pieza según el método de manufactura que se tenga. Según la norma ISO 286 existen 20 índices de tolerancia (IT01, IT0, IT1, IT2... IT18) en donde se definen las desviaciones de las dimensiones, siendo IT01 el índice con menor desviación (mas precisión) y el IT18 el de mayor desviación (menos precisión).

La consideración de estos intervalos de tolerancia en el maquinado es de suma importancia en la fabricación de piezas que van ensambladas unas con otras, especialmente cuando tienen un ajuste definido.

## 5.1. FASE 1: Requisitos y recursos

### 5.1.1. Definición de requisitos

Para llevar a cabo la manufactura del troquel, se comenzó definiendo los requisitos que este debe cumplir en términos de funcionamiento general, seguridad y dimensiones del troquel.

Figura 17: Cuadro de requisitos de funcionamiento

Código	Tipo de requisito	Función general	Descripción
RF-01	Funcionamiento	Perforación de espesor de lámina	El troquel debe ser capaz de perforar lámina galvanizada de hasta 0.63 mm de espesor
RF-02		Cantidad de perforaciones	Funcionamiento & Cantidad de perforaciones & El troquel debe ser capaz de realizar dos perforaciones con un solo accionamiento de la prensa
RF-03		Tiempo de vida	Los materiales del troquel deben permitirle a este realizar como mínimo 100,000 perforaciones (50,000 accionamientos de prensa) sin tener que rectificar los filos del troquel.

Figura 18: Cuadro de requisitos de seguridad

Código	Tipo de requisito	Función general	Descripción
RS-01	Seguridad	Interferencia de los componentes	Al accionar la prensa, no debe haber interferencia ni contacto entre los componentes del troquel, excepto los elementos que, por ensamble y funcionamiento, deben estar en contacto.
RS-02		Seguridad del usuario	El accionamiento de la prensa y funcionamiento del troquel debe poder accionarse sin necesidad de que el usuario introduzca alguna parte del cuerpo entre las piezas del troquel
RS-03		Sistema de guías	El troquel debe tener un sistema de guías de alineación vertical para evitar colisiones entre los componentes del troquel por desalineación

Figura 19: Cuadro de requisitos de dimensiones

Código	Tipo de requisito	Función general	Descripción
RD-01	Dimensiones	Dimensiones del troquel	Las dimensiones del troquel ensamblado no deben de ser mayores a las dimensiones de la mesa de la prensa troqueladora a utilizar
RD-02		Dimensiones de las perforaciones	El punzón del troquel debe ser capaz de realizar dos perforaciones rectangulares de 75mm * 25mm.

### 5.1.2. Definición de recursos

Para la elaboración del troquel se identificaron los siguientes recursos necesarios:

#### Acero

En cuanto al acero que se utilizará para la fabricación del troquel, se requiere de:

- 2 placas de acero SAE 1045 con dimensiones de aproximadamente 265\*200\*25 mm. Estas serán utilizadas para la fabricación de placas porta-pinzón y porta-matriz.
- 1 placa de acero SAE 1045 con dimensiones de aproximadamente 245\*90\*35 mm. Esta será utilizada para la fabricación del pisador.
- 1 placa de acero D2 con dimensiones de aproximadamente 75\*255\*25. Esta será utilizada para la fabricación de la matriz del troquel.
- 2 placas de acero D2 con dimensiones de aproximadamente 75\*40\*90mm. Estas serán utilizadas para la fabricación de los punzones.

## Diseño

Para llevar a cabo el diseño de los componentes del troquel se requiere una computadora con capacidad de ejecutar algún software CAD para modelado 3D. Para el diseño de este troquel se utilizará el software Autodesk Inventor Professional 2022.

Figura 20: Autodesk Inventor Professional 2022



Fuente: (Autodesk,2022)

## Manufactura

La manufactura del troquel depende principalmente de dos recursos: el software CAM y la maquinaria que se utilizará.

El software CAM que se utilizará para generar el código es un add-on de Inventor Professional llamado Autodesk HSM.

La máquina encargada de ejecutar los códigos generados será el centro de maquinado vertical marca Haas modelo Vf-1 . Esta máquina posee una mesa de 508\*406mm y cuenta con un desplazamiento en el eje Z de 508mm. Las dimensiones máximas de las piezas que se fabricarán en esta máquina son de aproximadamente 75mm de altura (eje z), 75mm de espesor (eje y) y 260mm de largo (eje x). Esto indica que el centro de maquinado Haas VF-1 cuenta con las medidas de mesa y desplazamiento en z suficientes como para fabricar las piezas, tomando en cuenta el excedente de material que se debe de tener en el material bruto de la pieza. El método de sujeción de la pieza a la mesa del centro de maquinado será

mediante una prensa KURT modelo D688.

Figura 21: Prensa Kurt D688

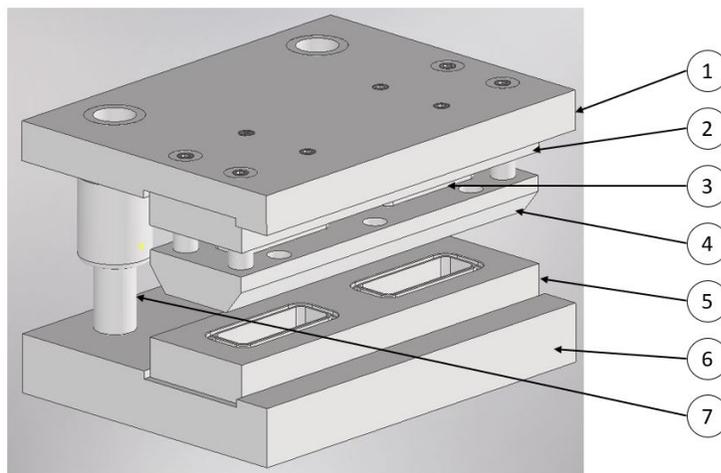


Fuente: (Amazon,2022)

## 5.2. FASE 2: Diseño de componentes

Los componentes del troquel fueron diseñados según su función lógica. En la siguiente imagen se muestra un ensamble de todos estos componentes y un listado de los mismos:

Figura 22: Ensamble completo del troquel



1. Placa porta punzón
2. Sujetador de punzones (holder)
3. Punzón (inserto de punzón)
4. Pisador
5. Matriz

6. Placa porta matriz
7. Guías de troquel

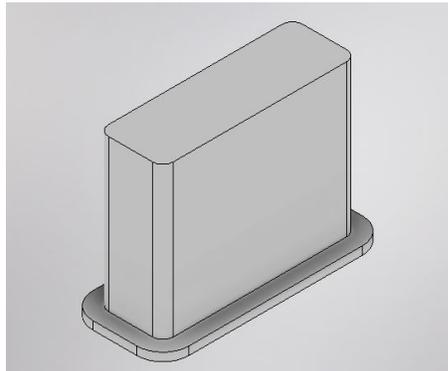
A continuación se describe la línea de pensamiento seguida para el diseño de los componentes:

### 5.2.1. Punzón

El punzón es el principal elemento de corte, por lo que su geometría estará definida por la geometría que se desea perforar. Esta perforación tiene forma de un rectángulo de 75mm de largo y 25mm de ancho con un redondeo de 4mm en las esquinas. Tal y como se mencionó en el marco teórico, una medida no puede ser exacta por lo que se le aplica una tolerancia h8 a las medidas de este elemento de corte, resultando en 74.977mm de largo y 24.984mm de ancho.

Este elemento será sostenido en un sujetador o "holder" que será capaz de sostener dos punzones. Por esta razón el punzón se diseñó con un hombro para evitar movimientos dentro de este holder. Este holder posee varios agujeros que cumplen con diferentes funciones. Posee 4 agujeros roscados, cuya función principal es la sujeción con la placa porta-punzón. Posee 4 agujeros pasados en las esquinas de la placa. La función de estos agujeros es permitir el libre movimiento de unos bujes que anclan el pisador a la placa porta-punzón. Finalmente, contiene 6 agujeros en su cara inferior. Estos agujeros son para alojar los elementos de compresión entre el sujetador de punzones y el pisador. (Ver Figura 17b)

Figura 23: Inserto de Punzón



Para la Figura 17b:

1. Representa los agujeros en donde se alojan los elementos de compresión entre el sujetador y el pisador
2. Representa los agujeros en donde se alojan los bujes mencionados

A continuación se muestra una visualización de el ensamble de los punzones insertados en el sujetador:

Figura 24: Sujetador de punzones

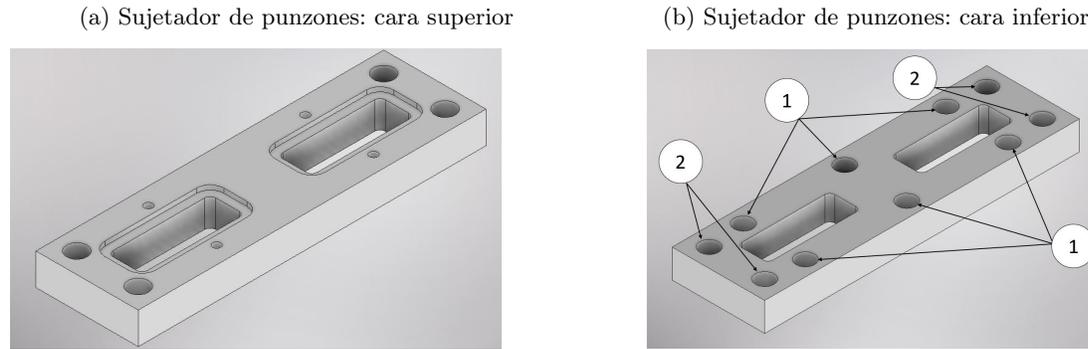
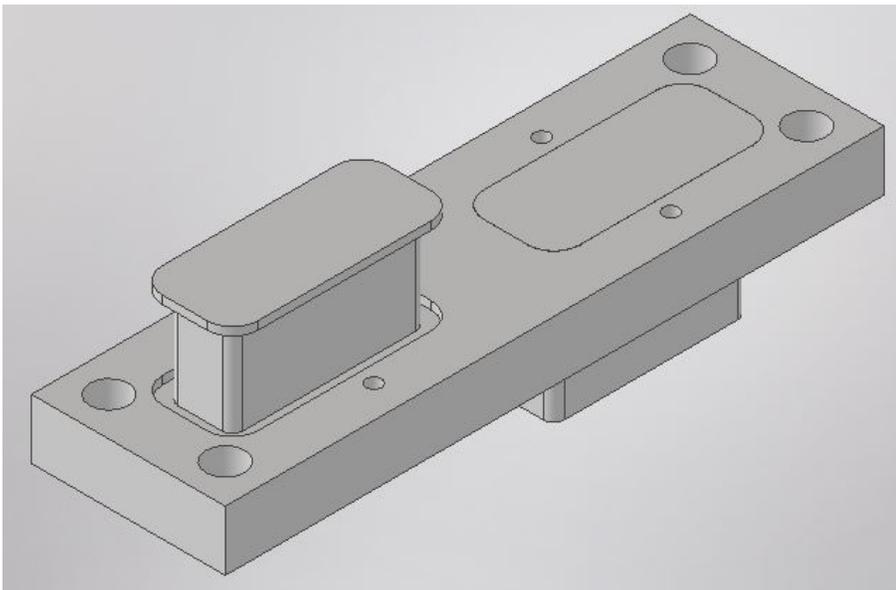


Figura 25: Representación de ensamble de punzón en sujetador



### 5.2.2. Matriz

El diseño de la matriz comienza tomando en cuenta la geometría de los punzones, ya que este componente es la hembra del troquel. Por esta razón, esta pieza es simplemente una placa con dos cavidades rectangulares cuyas dimensiones y geometrías están alineadas con el ensamble del punzón y su sujetador. Estas cavidades tienen una ranura en todo su perímetro exterior, cuya función es generar un doblado justo al lado de la sección de corte para eliminar el filo de la lámina cortada.

Cabe resaltar que la máquina que se utilizará para la manufactura de los componentes puede capturar bajos intervalos de tolerancia por lo que se escogió un intervalo de tolerancia de 8 y una designación de ajuste H/h para este y los demás ajustes del troquel (H para los componentes hembra, h para los componentes macho).

Figura 26: Matriz del troquel

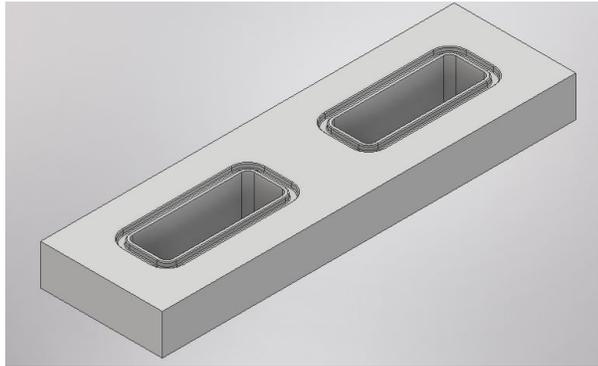
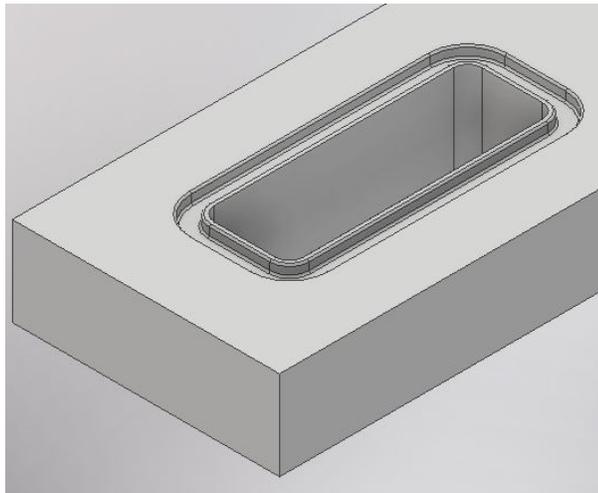
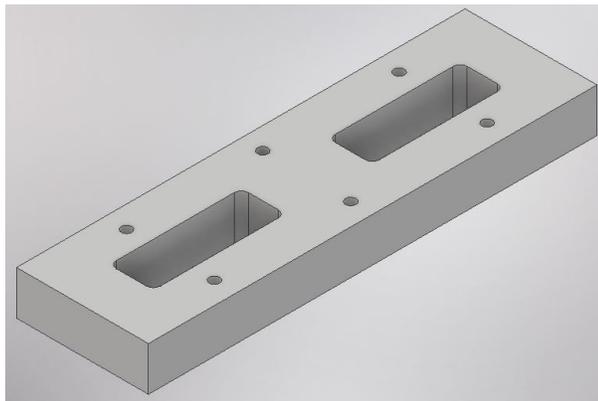


Figura 27: Detalle de ranura que rodea a la cavidad rectangular



En la cara inferior de la matriz se encuentran 6 agujeros roscados cuya función es alojar los tornillos que sujetan la matriz a la placa porta-matriz.

Figura 28: Cara inferior de matriz



Luego del diseño de los elementos de corte se procede a diseñar las placas que sujetarán a estos elementos: las placas porta-punzón y porta-matriz.

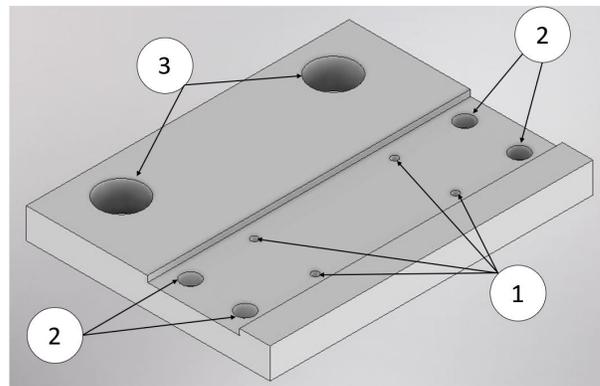
### 5.2.3. Placa porta-punzón

La función lógica de este elemento es solamente ser el medio de sujeción entre el punzón (o en este caso sujetador de punzones) y la prensa troqueladora, por lo que el diseño de este elemento es relativamente sencillo. Se trata de una placa con área significativamente mayor al sujetador de punzones. Esta placa contiene una ranura y agujeros alineados con los agujeros del sujetador de punzones. Estas dos características garantizan el correcto alineamiento del sujetador a la placa porta-punzón.

Esta placa también contiene 4 agujeros en las esquinas de la ranura, alineados con los 4 agujeros para los bujes del sujetador de punzones. En este elemento, dichos agujeros cumplen la misma función que en el sujetador: permitir el libre movimiento de los bujes que sujetan al pisador.

Esta placa también posee agujeros en donde se posicionan las guías de alineación vertical. Estos agujeros están ubicados en el lado opuesto a la ranura en donde se posiciona el sujetador, con la intención de evitar interferencia de las guías con los elementos de corte.

Figura 29: Placa porta-punzón



En donde:

1. Representa los agujeros roscados en donde se alojarán los tornillos que sujetarán al holder
2. Representa los agujeros en donde se alojarán los bujes para permitir que los punzones continúen su recorrido después de que el pisador toque la lámina
3. Representa los agujeros en donde se instalarán las guías de alineación vertical

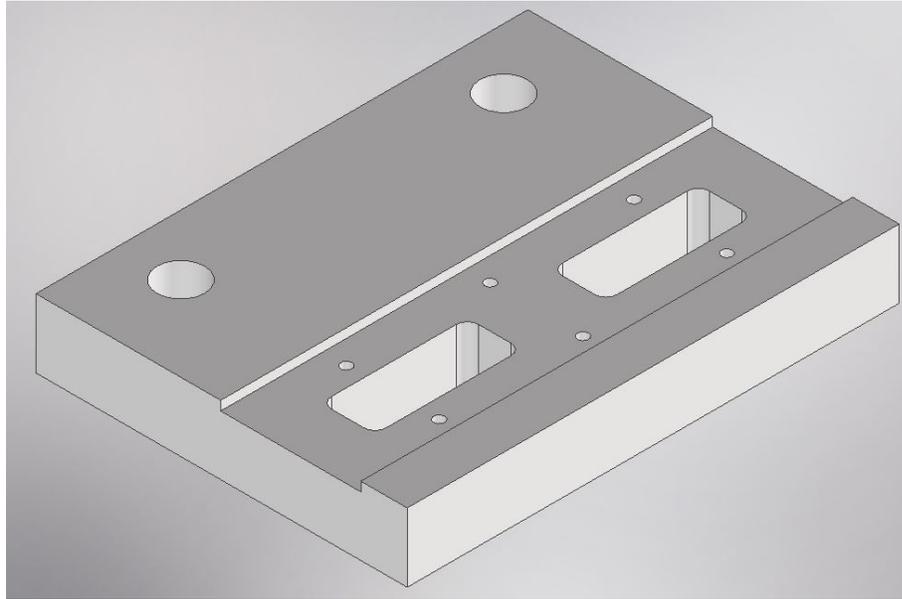
### 5.2.4. Placa porta-matriz

Este elemento es la contraparte de la placa porta-punzón, por lo que generalmente poseen las mismas dimensiones. Dicho esto, se sabe que la función de esta placa es sujetar la matriz y esto se garantiza (al igual que en la placa porta-punzón) generando una ranura con sus respectivos agujeros para los tornillos de sujeción debidamente alineados con los agujeros de la cara inferior de la matriz.

Este componente también posee los agujeros para la colocación de las guías de alineación vertical, ubicados en el lado opuesto a la ranura de fijación de la matriz. Cabe mencionar que dentro de las

ranuras se encuentran dos agujeros rectangulares con dimensiones mayores a las de la perforación original. La función de estos agujeros es permitir el desalajo de los pedazos de lámina que son removidos de la lámina con la que se esta trabajando.

Figura 30: Placa porta-matriz



### 5.2.5. Pisador

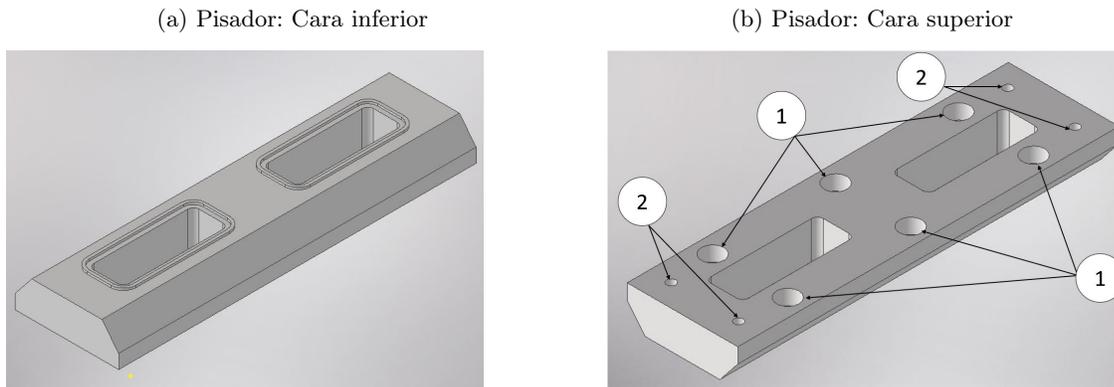
El pisador es el elemento encargado de sujetar la lámina mientras el punzón corta la lámina. Si no existiera un elemento como el pisador, la lámina sufriría deformaciones debido a la fuerza aplicada durante el corte. Este elemento debe de tener una geometría parecida o similar a la que se tiene en el material de trabajo, de lo contrario, el pisador también deformaría el material.

El material de trabajo es una duela para cortina metálica enrollable, esta tiene una sección plana en su centro y unos dobleces para el engrape o “tejido” de la cortina metálica, por lo que es de suma importancia conservar estos dobleces tal y como se encuentran.

Cabe resaltar que los punzones pasan a través del pisador, por lo que este debe de tener estos agujeros con la misma geometría y dimensiones. El pisador debe de tener el "macho" de la ranura que genera los dobleces en la matriz, esta sección debe de encontrarse alineada con la ranura.

Además, el pisador contiene 4 agujeros cuya función es alojar los tornillos que sujetan al pisador de la placa porta-punzón. Este elemento no está ensamblado con el sujetador de punzones ya que estos tienen movimiento uno con respecto del otro ( en el momento en el que el pisador toca la lámina, el sujetador de punzones sigue desplazandose hacia abajo para terminar la operación de corte, ver Figura 25) . Por esta razón los agujeros están alineados con los agujeros para los bujes de la placa porta-punzón. Posee agujeros en su cara superior cuya función es alojar los elementos de compresión y permitir que el sujetador de punzones continúe su recorrido aunque el pisador ya esté en contacto con la lámina. Estos agujeros están alineados con los agujeros del sujetador de punzones.

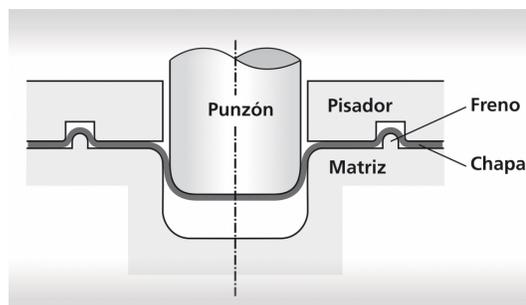
Figura 31: Diseño de pisador



Para la Figura 24b:

1. Representa los agujeros en los que se alojan los elementos de compresión entre el pisador y el sujetador
2. Representa los agujeros cuya función es alojar los tornillos que sujetan al pisador de la placa porta punzón

Figura 32: Representación de función del pisador

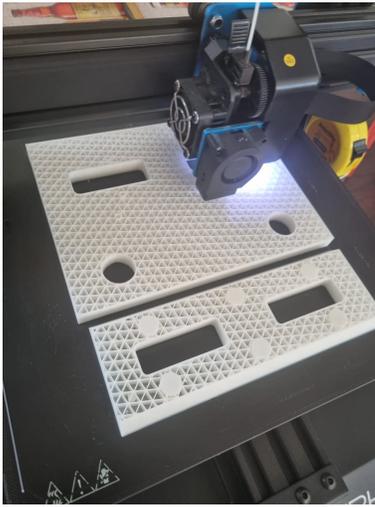


### 5.3. FASE 3: Prototipo impreso en 3D

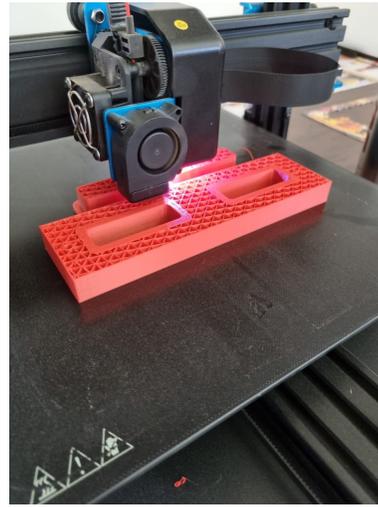
Trabajar el modelo del troquel únicamente en un software CAD da lugar a que se pasen por alto algunos detalles de ensamble, movimiento o dimensión. Por esta razón se decidió imprimir un modelo 3D a escala 0.75 de los elementos del troquel para validar el correcto funcionamiento del mismo. Este prototipo fue impreso en PLA utilizando una impresora Artillery Sidewinder X1. A continuación se muestran imágenes de la impresión.

Figura 33: Impresión 3D de componentes del troquel

(a) Placa porta-matriz y sujetador de punzones



(b) Matriz y punzones



## 5.4. FASE 4: Manufactura de componentes

Para la manufactura de los componentes del troquel se debe de tener en cuenta los siguientes factores:

- Material bruto de trabajo (stock): Para definir las dimensiones de este material se deben de tomar en cuenta las dimensiones máximas de la pieza y el método de sujeción de este material.
- Montaje de stock en prensa: Como se mencionó anteriormente, las piezas serán montadas en una prensa KURT modelo D688. El alza que se coloque en la prensa dependerá de la pieza y material bruto que se esté trabajando.
- Herramientas de trabajo: Este trabajo se realizará en la Universidad del Valle de Guatemala, por lo que el maquinado depende de las herramientas que estén disponibles para la institución.
- Estrategias de maquinado: Deberán ser ejecutadas con un orden lógico para evitar problemas con el maquinado, tales como colisiones de herramienta.
- Parámetros de corte: Deberán ser definidos según la dureza del material que se esté trabajando. El procedimiento para definir los parámetros de corte está descrito en el capítulo "Marco teórico", sección "Manufactura de troquel", sub-sección "Parámetros de corte"

Dicho esto se procede a trabajar el CAM de cada componente:

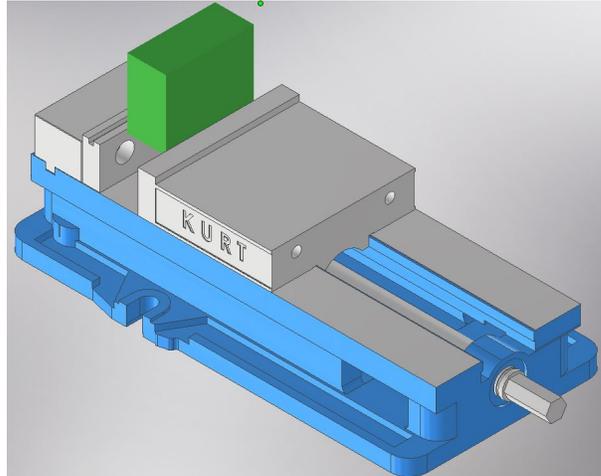
### 5.4.1. Punzón (maquinado de parte inferior)

#### Stock y montaje en prensa

Las dimensiones máximas de la pieza son de 61.7mm de altura, 37mm de espesor y 87mm de largo, por lo tanto las dimensiones del material en bruto deben de ser seleccionadas de manera que la

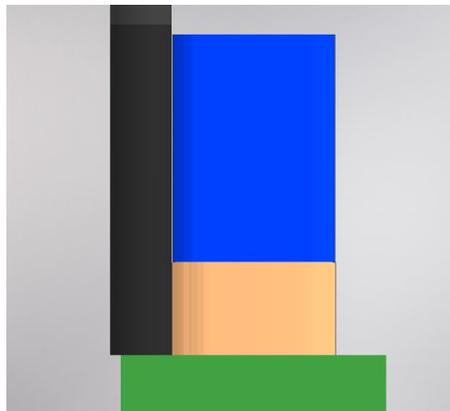
pieza pueda quedar envuelta dentro de este material. Para este maquinado se seleccionó un stock de 73.5mm de altura, 42.5mm de espesor y 90mm de largo. Estas dimensiones consideran un excedente de material que se utiliza para la correcta sujeción del material en la prensa. Este material debe de ser montado en la prensa utilizando alzas de 40 mm, de esta manera, en ninguna de las estrategias de maquinado existirán colisiones de la herramienta con la prensa.

Figura 34: Montaje de stock para primer maquinado de punzon



Cabe resaltar que esta pieza requiere de un maquinado relativamente profundo, en donde se utiliza una herramienta denominada XL (extra larga) lo que indica que fuera del husillo queda una sección del vástago, además de los filos. Por esta razón se decidió aumentar en 0.1mm las dimensiones inferiores del filo de la pieza. De esta manera, se garantiza que cuando se esté trabajando la sección más profunda del maquinado el vástago de la herramienta no esté en contacto con las superficies ya trabajadas de la pieza.

Figura 35: Detalle de separación de herramienta y superficie trabajada

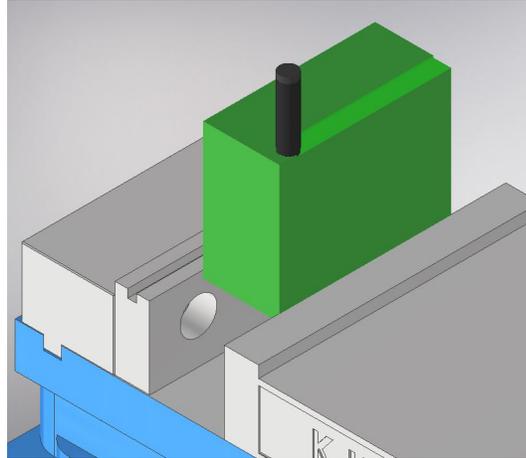


## Estrategias de maquinado, herramientas y parámetros de corte

La primera estrategia que se utilizó para comenzar con el maquinado de la pieza fue "Face". Esta estrategia desvasta el material que se encuentre entre las fronteras que el usuario proporciona al software. Para esta estrategia se utilizó una herramienta marca Toolmex con diámetro de corte

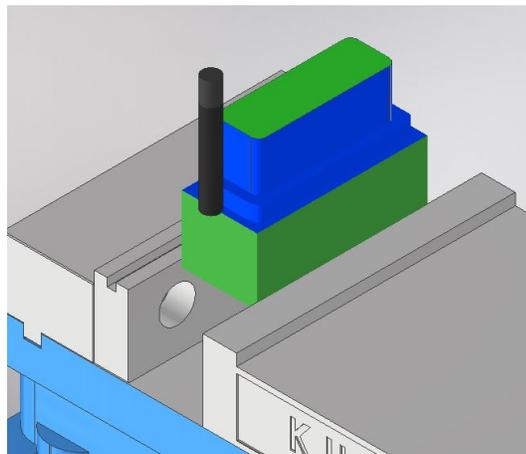
de  $3/8 \text{ z}$  longitud de  $1 \text{ 1/2}''$ . Utilizando el catálogo de herramientas de Toolmex y tomando en cuenta la dureza del material se definieron los parámetros de corte, siendo estos **53 m/min para la velocidad de corte** y **0.025 mm para la carga de viruta por diente**.

Figura 36: Estrategia Face en primer maquinado de punzón



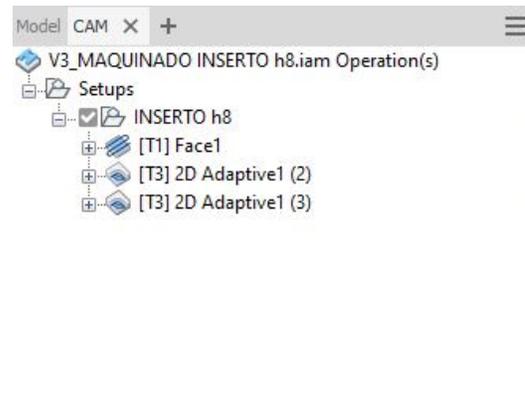
Luego de trabajar la superficie superior se trabaja el contorno de la pieza, utilizando la estrategia de 2D Adaptive, la cual le removerá el material exterior o interior que el usuario desee. Esta estrategia se llevó a cabo con una herramienta marca Toolmex con diámetro de corte de  $3/8\text{z}$  una longitud de  $2''$ . La longitud elevada de la herramienta se debe a la profundidad que tiene que alcanzar la herramienta para realizar esta operación. Se utilizó la misma herramienta tanto para la sección con dimensiones originales como para la sección que se modificó para evitar el contacto del vástago con la pieza. Tomando en cuenta la dureza del material que se está trabajando y las especificaciones del fabricante, los parámetros de corte para esta herramienta se definieron de la siguiente manera: **53 m/min para la velocidad de corte** y **0.023 mm para la carga de viruta por diente**.

Figura 37: Estrategia 2D Adaptive en primer maquinado de punzón



A continuación se muestra el árbol de operaciones de Inventor HSM para este diseño CAM:

Figura 38: Árbol de operaciones para maquinado de cara inferior de inserto

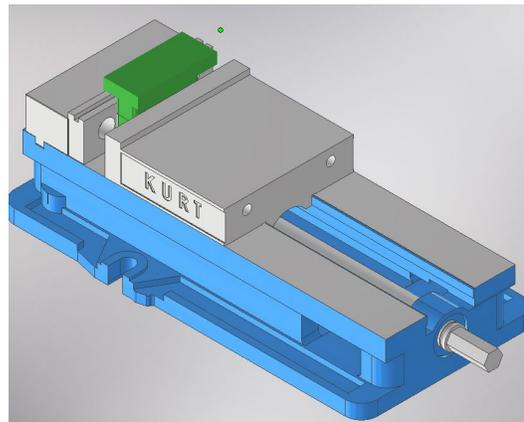


#### 5.4.2. Punzón (maquinado de parte superior)

##### Stock y montaje en prensa

El stock que se utiliza para este segundo maquinado es el material resultante del maquinado anterior, es decir que el maquinado de ahora será remover el material con el que se estaba sujetando el stock a la prensa. Para este maquinado no se utilizaron alzas ya que la pieza tiene la altura suficiente para mantener la sección de la pieza que se va a trabajar fuera de las mordazas de la prensa.

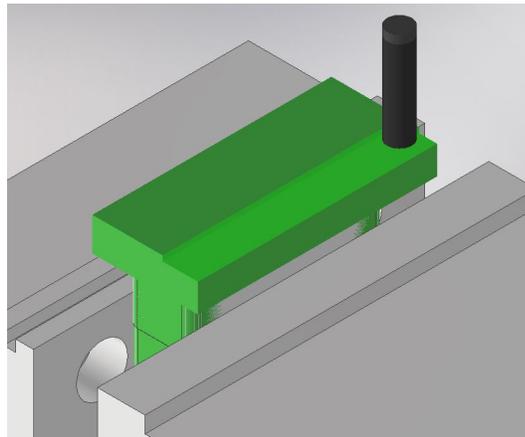
Figura 39: Montaje de stock resultante para segundo maquinado de punzón



##### Estrategias de maquinado, herramientas y parámetros de corte

Al igual que en el maquinado anterior, la primera estrategia que se utilizó fue "Face" para desbastar el excedente de material en el eje Z hasta llegar a la altura nominal de la pieza. Para este maquinado se utilizó la misma herramienta marca Toolmex de 3/8" de diámetro y 1 1/2" de longitud y los mismos parámetros de corte que se utilizaron en el maquinado anterior. (**53 m/min para la velocidad de corte y 0.025 mm para la carga de viruta por diente.**)

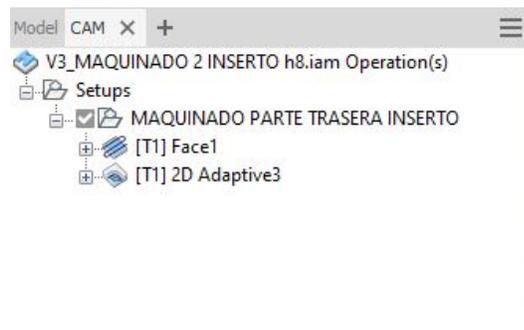
Figura 40: Estrategia Face en segundo maquinado para punzón



Seguido de esta operación se desvastó el excedente material para capturar la geometría de la pieza utilizando la estrategia 2D Adaptive. En esta estrategia se utilizó la misma herramienta y los mismos parámetros de corte que se utilizaron para la estrategia de "Face".

A continuación se muestra el árbol de operaciones de Inventor HSM para este diseño CAM:

Figura 41: Árbol de operaciones para maquinado de cara superior de inserto



Cabe mencionar que el troquel consta de dos punzones por lo que estos maquinados se deben realizar dos veces.

### 5.4.3. Sujetador de punzones (cara inferior)

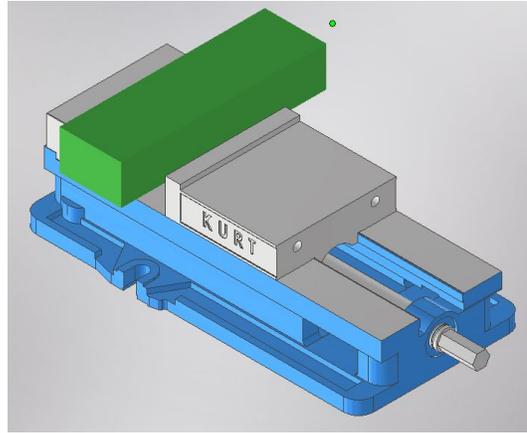
#### Stock y montaje en prensa

Las dimensiones máximas de la pieza son de 23.2 mm de altura, 75mm de espesor y 255 mm de largo, por lo tanto el stock que elegido para este maquinado es una barra de 50mm de altura, 78mm de espesor y 260mm de largo. La diferencia tan grande entre la medida de altura del stock y de la pieza se debe a que el proveedor brindaba un mejor precio a esta dimensión de barra ya que se tenía un retazo de trabajos anteriores y no era necesario cortar la barra a la medida.

El primer maquinado fue el de la cara superior del holder, ya que de esta manera se podían ejecutar varias operaciones aprovechando un solo montaje de pieza. Este montaje se trabajó con

alzas de 32 mm ya que el stock contaba con la altura suficiente para que el maquinado de la pieza quedara por encima de las mordazas de la prensa.

Figura 42: Montaje de stock para maquinado de holder



## Estrategias de maquinado, herramientas y parámetros de corte

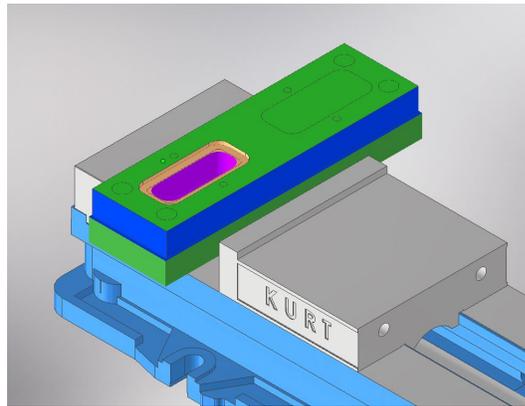
El maquinado de esta pieza inicia con una estrategia "Face" la cual removerá material de manera paralela a la superficie del stock hasta llegar a la altura del modelo. Para esta estrategia se utilizó una fresa plana de 5/8" de diámetro. De acuerdo con las especificaciones del fabricante y tomando en cuenta el material de trabajo se definieron los parámetros de corte para esta herramienta: **50 m/min para la velocidad de corte y 0.03175 mm para la carga de viruta por diente** y una profundidad de corte máxima de 1 mm. Estos parámetros de corte se mantienen en todas las estrategias en las que se utiliza esta herramienta.

Seguido del careado de la pieza, se debe definir el contorno de la pieza utilizando la estrategia 2D Adaptive. Para esta estrategia se utiliza la misma herramienta de la estrategia anterior y utilizando los mismos parámetros de corte. En esta estrategia se aprovecha el reducido empañe de la herramienta para aumentar la profundidad axial de corte a 7.5mm.

Al tener las dimensiones exteriores de las piezas ya maquinadas, se procede a generar las estrategias para el maquinado de las cavidades (2 cavidades). Se comienza con una estrategia 2D Adaptive para generar la cavidad en donde queda ajustado el hombro del punzón. Para esta estrategia se utiliza la misma herramienta de 5/8" de diámetro para aprovechar a remover una cantidad considerable de material. Cabe resaltar que la herramienta realiza una rampa helicoidal para poder maquinar esta cavidad, de esta manera se reduce el corte axial de la herramienta. Los redondeos de esta geometría son de 10mm, lo que indica que la fresa que se está utilizando puede capturar estos radios sin ningún problema.

Posteriormente, se termina de generar la cavidad utilizando otra estrategia 2D Adaptive, la cuál removerá el material desde la superficie de la cavidad generada anteriormente hasta la parte inferior de la pieza. Para esta estrategia se utiliza la misma herramienta y parámetros de corte que en la estrategia anterior. Cabe mencionar que los redondeos de la cavidad final son de 4mm, lo que indica que la fresa en uso no es capaz de capturar estos radios. Por esta razón se debe dejar un excedente de material en estos radios para que posteriormente se trabajen con una herramienta de menor diámetro.

Figura 43: Maquinado de cavidades en holder de punzones

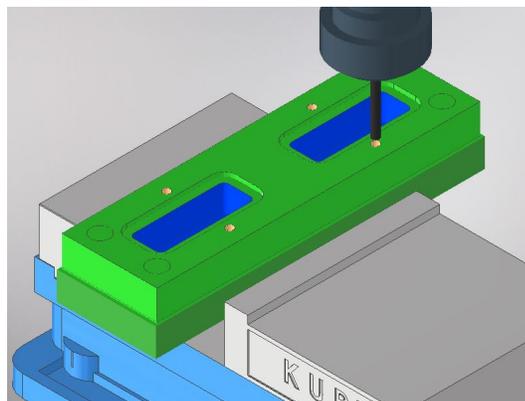


Como se mencionó anteriormente, se debe de eliminar el excedente de material en los redondeos de esta geometría. Para ello se lleva a cabo una estrategia 2D Contour utilizando una fresa plana de 1/4" de diámetro con **50 m/min para la velocidad de corte y 0.025 mm para la carga de viruta por diente.**

Las últimas tres estrategias descritas se repiten exactamente para generar la otra cavidad de la pieza.

Posteriormente se lleva a cabo la estrategia para generar los agujeros de la pieza en donde alojarán los tornillos de sujeción. Para ello se utilizó la estrategia Drill y se seleccionaron los 4 agujeros de la pieza. La herramienta para esta estrategia es una broca marca Toolmex de 6mm de diámetro. Según especificaciones del fabricante, se definieron los parámetros de corte para el material de trabajo, siendo estos **50 m/min para la velocidad de corte y 0.1016 mm para el avance por revolución.** Cabe resaltar que en esta estrategia se lleva a cabo por medio de un método de picoteo, en el que la broca retrocede cada milímetro de corte para evacuar la viruta.

Figura 44: Estrategia Drill en holder de punzones



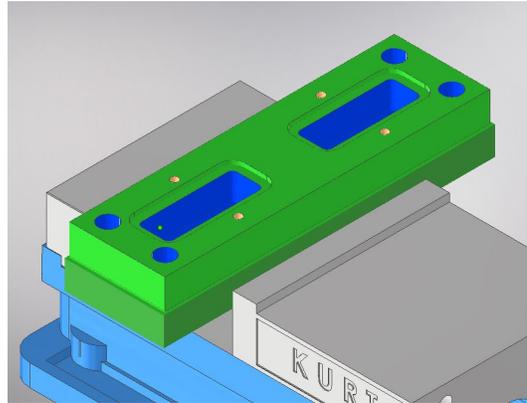
Finalmente, se realiza el maquinado de los agujeros de 10mm en donde se alojarán los bujes. Para trabajar estos agujeros se llevan a cabo 3 estrategias de maquinado:

**Drill:** Con la broca de 6 mm (y utilizando los mismos parámetros de corte que la estrategia anterior) se remueve el material del centro de cada agujero para reducir en la medida de lo posible el corte axial de la fresa que trabajará el agujero posteriormente.

**2D Contour:** Se utiliza esta estrategia para darle al agujero el diámetro de 10mm, utilizando la fresa plana de 1/4z los parámetros de corte descritos anteriormente.

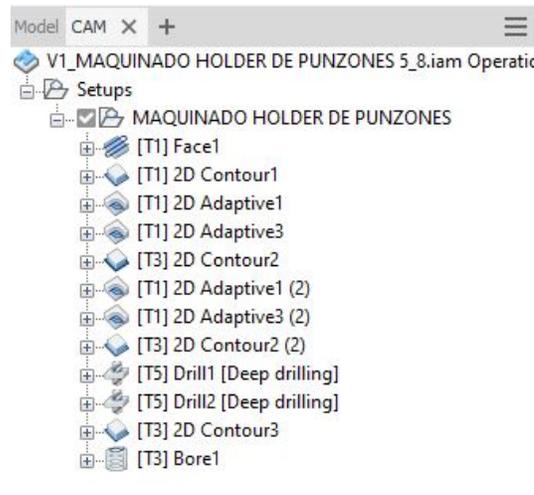
**Bore:** Se utiliza esta estrategia en superficies cilíndricas para definir una mejor calidad superficial. Para esta estrategia se utiliza la misma herramienta y parámetros de corte que en la estrategia anterior.

Figura 45: Maquinado final de holder



A continuación se muestra el árbol de operaciones de Inventor HSM para este diseño CAM:

Figura 46: Árbol de operaciones para maquinado de holder



## Maquinado de cara superior

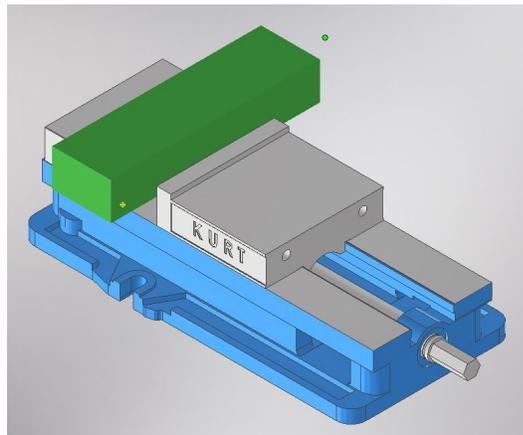
El maquinado de la cara inferior de esta pieza será realizado por medio de torno y fresadora convencionales. Esto debido a que en esta cara se deben maquinar solamente agujeros y no hay ninguna geometría con un nivel de complejidad que impida trabajar en estas máquinas.

#### 5.4.4. Pisador (Cara superior)

##### Stock y montaje en prensa

Se definió un stock de 48mm de altura, 75.8mm de espesor y 269mm de largo. Estas medidas son adecuadas ya que las medidas máximas de la pieza son de 25mm de altura, 74mm de espesor y 255mm de largo. Al igual que en el holder de punzones, la diferencia tan grande entre la medida real de altura de la pieza y la medida del stock se debe a que el proveedor brindaba un mejor precio porque era un retazo resultante de otra venta y no se tenía que hacer el corte a la medida. En el software se simularon alzas de 32mm para que la geometría completa de la pieza quedara por encima de las mordazas de la prensa. El montaje del stock en la prensa se definió de la siguiente manera:

Figura 47: Montaje de stock para pisador

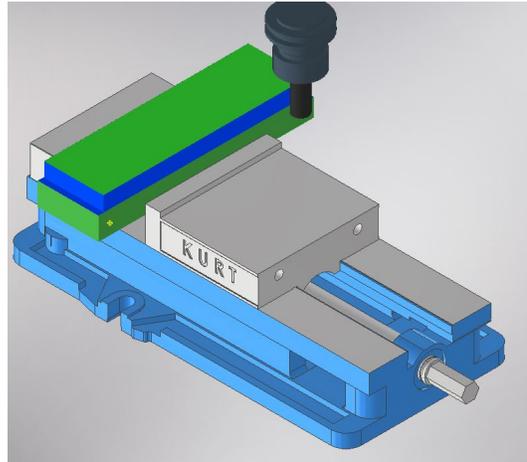


##### Estrategias de maquinado, herramientas y parámetros de corte

Se inicia el maquinado de esta pieza utilizando una estrategia "Face", la cuál desvastará el material que se encuentra entre la cara superior del stock y la cara superior de la pieza. En esta estrategia se seleccionó una herramienta de 3/4" de diámetro y 4 filos. La herramienta se operó con **75 m/min para la velocidad de corte y 0.1016 "para la carga de viruta por diente**. Estos parámetros fueron seleccionados según las especificaciones del fabricante. Se definió un avance axial máximo de 3mm en cada pasada, lo cual es adecuado ya que se tenía un empañe menor al 20 %.

Posteriormente se trabajó el contorno de la pieza utilizando una estrategia 2D Contour. En esta operación se definió la misma herramienta de 3/4" 4 filos con los mismos parámetros de corte. El avance axial que se definió en esta estrategia fue de 6mm ya que la profundidad axial del material que la herramienta está desvastando es de 0.9mm, representando un empañe radial menor al 10 %.

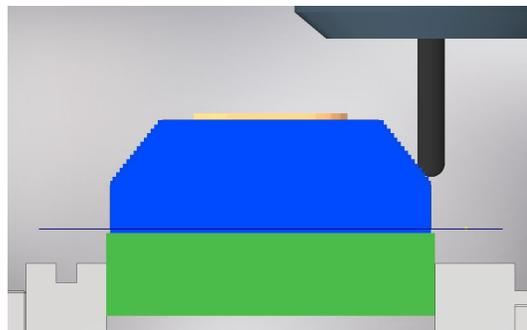
Figura 48: Estrategia 2D Contour en pisador



Luego, se definió una estrategia Pocket 3D para capturar 2 características importantes de la pieza: Las pendientes laterales y las geometrías que rodean la ranura en donde se inserta el punzón. La razón por la que se decidió utilizar Pocket y no una estrategia Adaptive es que la estrategia Adaptive por intentar mantener un tamaño de viruta constante generaba una alta cantidad de movimientos sin corte. Para esta estrategia se seleccionó la misma herramienta de 3/4z 4 filos, utilizando un avance radial de 1mm por cada pasada. La disminución en este parámetro se debe a que el empañe radial en el desvaste de la cara superior llega hasta el 100%. Cabe mencionar que se habilitó la opción de "stock to leave", la cuál dejará una pequeña sección de material excedente con respecto a la geometría real de la pieza, esto con la intención de trabajar posteriormente estos sobrantes con otra herramienta que permita un mejor acabado superficial.

La estrategia descrita anteriormente trabajó las pendientes laterales de la pieza. Sin embargo al haberse trabajado con una fresa plana, esta pendiente está compuesta por varias "gradas" de material que le dan forma a la misma. Para mejorar el acabado superficial y definir de manera más exacta estas pendientes se utiliza una estrategia Parallel, la cual afinará el la pendiente de la pieza. En esta estrategia se utilizó una fresa de bola de 1/4 de diámetro y 2 filos, utilizando **120 m/min para la velocidad de corte y 0.0381 mm para la carga de viruta por diente** según especificaciones de fabricante. Se definió un avance vertical de 1mm para un afinado suficiente para la pieza.

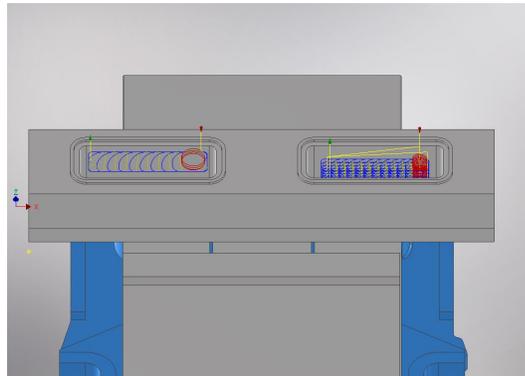
Figura 49: Detalle de afinado de pendientes en pisador



Luego de capturar todas las geometrías externas de la pieza, se trabajan las ranuras de la pieza las cuales son las geometrías fundamentales de la pieza. Para ellos se trabajan de primero la cavidad que genera la geometría que rodea a cada ranura. Para ello se utilizó una estrategia 2D Adaptive

con una herramienta de 5/8" de diámetro y 4 filos, utilizando **120 m/min para la velocidad de corte y 0.03175 mm para la carga de viruta por diente** y un avance axial de 2.5mm. Posteriormente se trabaja el resto de la ranura, utilizando de nuevo una estrategia 2D Adaptive y la misma herramienta, la diferencia se encuentra en que en la segunda estrategia 2D Adaptive se habilitó la opción "Stock to leave" que debido al tamaño de la herramienta, esta no puede capturar el radio de la ranura. Estas últimas dos estrategias se repiten para maquinarse la otra ranura.

Figura 50: Toolpath en maquinado de ranuras. (I: Cavidad de geometría que rodea la ranura, D: Cavidad de ranura)

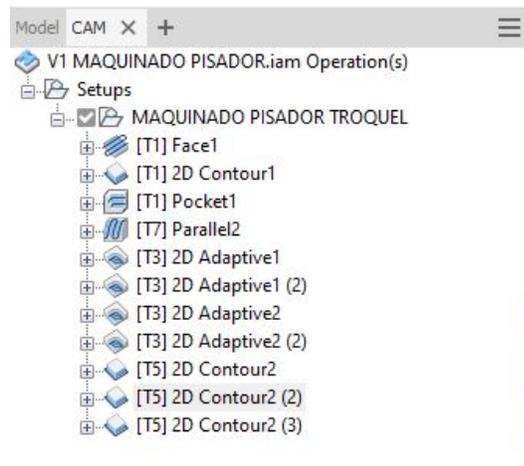


Al tener las cavidades generadas, el resto de estrategias están enfocadas en remover el excedente de material que quedó en las cavidades como resultado de habilitar la opción "stock to leave" en las estrategias anteriores. Se llevaron a cabo tres estrategias de 2D Contour con una herramienta de 1/4" 4 filos, con **50 m/min para la velocidad de corte y 0.025 mm para la carga de viruta por diente** y una profundidad de corte máxima de 2mm. Estas estrategias se llevaron a cabo para los siguientes trabajos:

1. Contorno interior de la geometría que rodea la ranura.
2. Contorno exterior de la geometría que rodea la ranura.
3. Contorno interior de las dos ranuras.

A continuación se muestra el árbol de operaciones de Inventor HSM para este diseño CAM:

Figura 51: Árbol de operaciones para maquinado de pisador



## Maquinado de cara superior

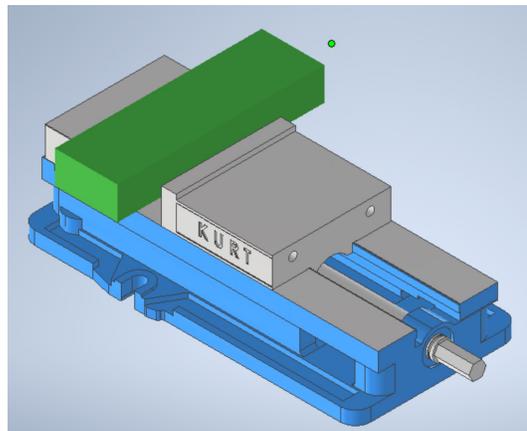
El maquinado de la cara inferior de esta pieza será realizado por medio de torno y fresadora convencionales. Esto debido a que en esta cara se deben maquinar solamente agujeros y no hay ninguna geometría con un nivel de complejidad que impida trabajar en estas máquinas.

### 5.4.5. Matriz

#### Stock y montaje en prensa

Las medidas máximas de esta pieza son de 25mm de altura, 75mm de espesor y 255mm de largo, por lo cuál se eligió un stock de 41.3mm de altura, 80mm de espesor y 263mm de largo. Al igual que en las piezas anteriores, la diferencia tan grande entre la medida de altura del stock y de la pieza se debe a que el stock obtenido es un retazo de una venta previa por parte del proveedor. El montaje del stock en la prensa se realizó de la siguiente manera.

Figura 52: Montaje de stock de matriz



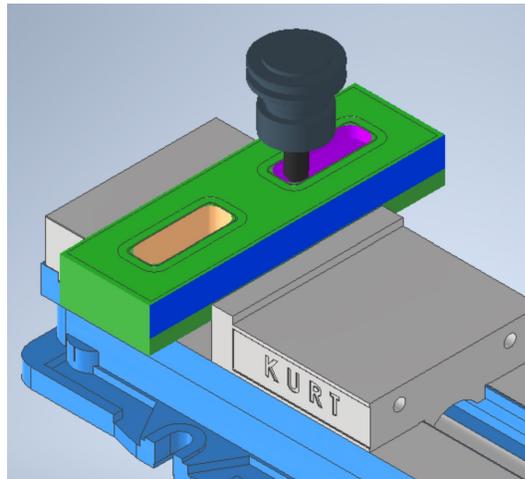
#### Estrategias de maquinado, herramientas y parámetros de corte

Al igual que en las piezas anteriores, la primera estrategia utilizada es la de Face, la cual desvastará el material existente entre la cara superior del stock y la cara superior de la pieza. Esta estrategia se definió con una herramienta de 3/4" de diámetro y 4 filos, utilizando **53 m/min para la velocidad de corte y 0.057 mm para la carga de viruta por diente** y un avance axial máximo de 2mm. Este es un avance axial bastante conservador tomando en cuenta que se está utilizando un 100% de empañe radial.

Luego se trabajó el contorno de la figura utilizando una estrategia 2D Contour, utilizando la misma herramienta de 3/4" de diámetro. Aprovechando el bajo empañe radial que se tiene en esta estrategia (2.5mm / 13%) se define una profundidad de corte de 4mm.

Para generar las dos cavidades dentro de la pieza se utilizan estrategias 2D Adaptive, llevadas a cabo con una herramienta de 5/8" de diámetro y 4 filos, trabajando con **53 m/min para la velocidad de corte y 0.0048 mm para la carga de viruta por diente** y un avance axial máximo de 2mm.

Figura 53: Estrategia 2D Adaptive para ranuras de matriz

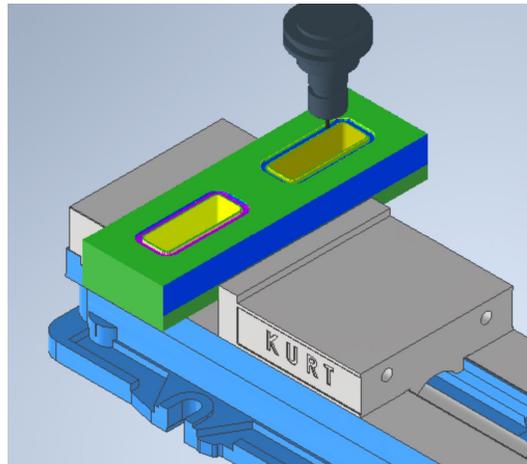


Al igual que en el caso de las piezas anteriores, la herramienta que se utilizó para generar las ranuras en la pieza tiene un radio más grande que el radio de las esquinas de la ranura, por lo que se habilita la opción de "stock to leave" se remueve el material restante con una fresa de 1/4" de diámetro operando con **53 m/min para la velocidad de corte y 0.0127 mm para la carga de viruta por diente** y aprovechando el bajo empañe radial se definen pasadas de 2mm de altura.

En esta pieza se encuentran unas ranuras que rodean todo el perímetro de las ranuras. Los siguientes maquinados están enfocados en trabajar dichas ranuras con sus respectivos redondeos de 0.5mm en sus bordes superiores e inferiores. Estas estrategias (aplicadas en ambas ranuras) son las siguientes.

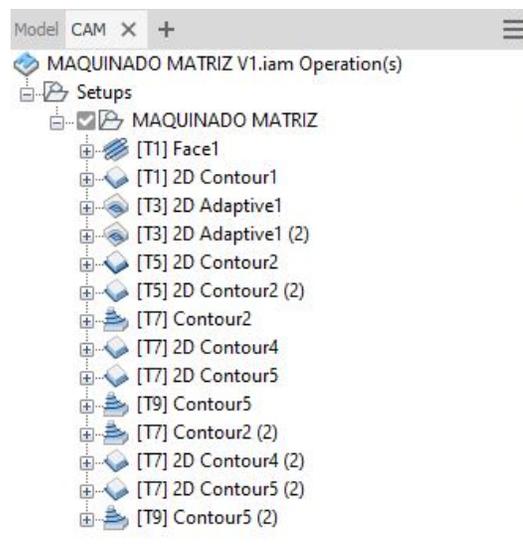
1. **3D Contour:** Utilizado para capturar el redondeo superior de la ranura. Este se lleva a cabo utilizando una herramienta de 4mm de diámetro y 4 filos, operando con **80 m/min para la velocidad de avance y 0.01mm para la carga de viruta por diente** y utilizando avances axiales de 0.1mm para definir la curva por medio de gradas
2. **2D Contour:** Utilizada para realizar la primera parte del contorno con sección constante de la ranura. Esta operación se lleva a cabo con la misma fresa de 4mm operando con los mismos parámetros de corte. Los avances axiales de esta operación son de 0.5mm ya que en ese momento se tiene un empañe radial del 100 %.
3. **2D Contour:** Utilizada para remover la parte del material que la estrategia pasada no removió. Se lleva a cabo con la misma herramienta y mismos parámetros de corte pero con un mayor avance axial debido al bajo empañe radial que se tiene.
4. **3D Contour:** Utilizada para capturar los redondeos interiores de la ranura. Esta se lleva a cabo con una herramienta de 1/8" de diámetro y 4 filos, operando a 53 m/min para la velocidad de avance y 0.00508 mm para la carga de viruta por diente. Esta operación tiene avances axiales de 0.1mm para definir la curva por medio de "gradas"

Figura 54: Maquinado de segunda ranura en matriz



A continuación se muestra el árbol de operaciones de Inventor HSM para este diseño CAM:

Figura 55: Árbol de operaciones para maquinado de matriz



### Maquinado de cara superior

El maquinado de la cara inferior de esta pieza será realizado por medio de torno y fresadora convencionales. Esto debido a que en esta cara se deben maquinar solamente agujeros y no hay ninguna geometría con un nivel de complejidad que impida trabajar en estas máquinas.

#### 5.4.6. Placas porta-troquel

Las placas porta-troquel no cuentan con ninguna geometría compleja, por lo que serán fabricadas a partir de placas de acero 1045 de la empresa y ajustadas a las piezas fabricadas por medio de máquinas herramienta convencionales.

## 6.1. Resultados de manufactura

A continuación se muestran cuadros de resumen de los maquinados de todos los componentes que fueron fabricados en la fresadora CNC:

### 6.1.1. Punzones

En la siguiente tabla se muestra un detalle de las operaciones de corte que se llevaron a cabo para realizar los maquinados de los punzones, indicando la descripción de la operación, la herramienta utilizada para la operación, los parámetros de corte, las profundidades radiales y axiales de corte y el tiempo que tomó cada operación.

Figura 56: Cuadro de resumen de maquinado de cara inferior de punzones

Operación	Descripción	Herramienta	Velocidad de avance	Avance por diente	Profundidad axial	Profundidad radial	Duración
Face	Desbastado de material en cara superior del stock	Toolmex 3/8" 2 ½" de largo 4 filos	53 m/min	0.025 mm	0.5 mm	9.525 mm	00:14:30
2D Adaptive	Contorno de primera sección del inserto	Toolmex 3/8" 6" de largo 4 filos	53 m/min	0.023 mm	14.2875 mm	0.9525 mm	01:05:51
2D Adaptive	Contorno de segunda sección del inserto	Toolmex 3/8" 6" de largo 4 filos	53 m/min	0.023 mm	14.2875 mm	0.9525 mm	00:42:34
TOTAL							2:02:47

Figura 57: Cuadro de resumen de maquinado de cara superior de punzones

Operación	Descripción	Herramienta	Velocidad de corte	Avance por diente	Profundidad axial	Profundidad radial	Duración
Face	Desbastado de material en cara superior del stock	Toolmex 3/8" 4 filos	53 m/min	0.025 mm	0.5 mm	9.525 mm	01:02:24
2D Adaptive	Contorno de hombro del inserto	Toolmex 3/8" 4 filos	53 m/min	0.023 mm	14.2875	0.9525 mm	00:09:27
TOTAL							1:11:51

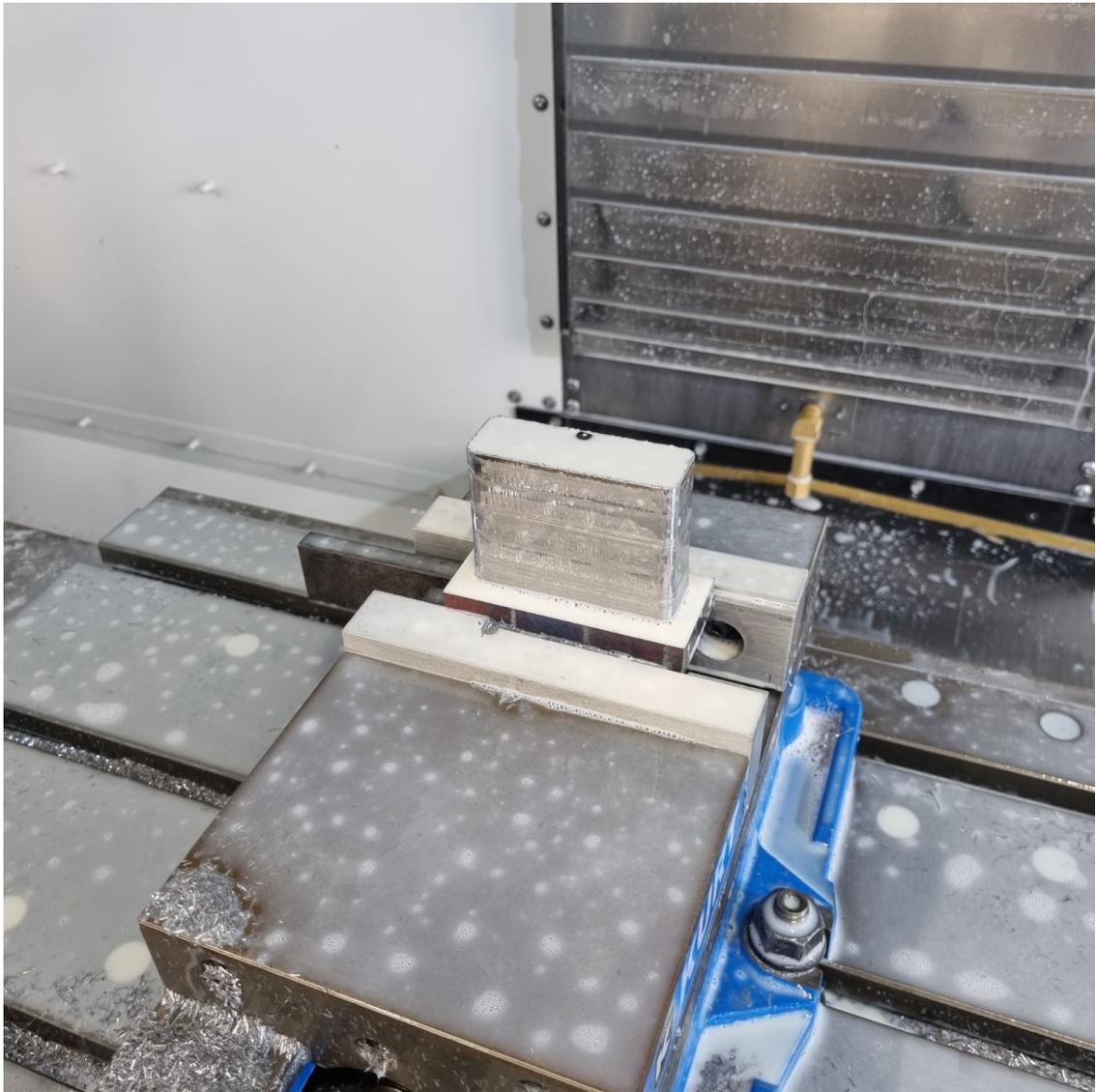
La siguiente figura muestra la operación 2D adaptive en la primera sección del primer maquinado de los punzones.

Figura 58: Proceso de maquinado de punzones



A continuación se muestra el resultado final del primer maquinado de los punzones, cabe mencionar que la baja calidad superficial en la parte inferior se debe a la vibración que tuvo la herramienta de corte debido a su longitud.

Figura 59: Resultado de maquinado de insertos



### 6.1.2. Sujetador de punzones (holder)

La siguiente tabla muestra un detalle de las operaciones de corte que se llevaron a cabo para realizar el maquinado del sujetador de punzones, indicando la descripción de la operación, la herramienta utilizada para la operación, los parámetros de corte, las profundidades radiales y axiales de corte y el tiempo que tomó cada operación.

Figura 60: Cuadro de resumen de maquinado de sujetador de punzones

Operación	Descripción	Herramienta	Velocidad de corte	Avance por diente	Profundidad axial	Profundidad radial	Duración
Face	Desbastado de material en cara superior del stock	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	00:30:43
2D Contour	Contorno general de la pieza	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	7.5 mm	2.915 mm	00:25:23
2D Adaptive	Geometría rectangular superior a ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	00:18:18
2D Adaptive	Geometría de ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	01:02:45
2D Contour	Redondeos de ranura	Toolmex 1/4 " 2 filos	50 m/min	0.025 mm	2 mm	0.5 mm	00:16:28
2D Adaptive	Geometría rectangular superior a ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	00:18:27
2D Adaptive	Geometría de ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	1:02:45
2D Contour	Redondeos de ranura	Toolmex 1/4 " 2 filos	50 m/min	0.025 mm	2 mm	0.5 mm	00:16:28
Drill	Agujeros para tornillos de sujeción con placa porta-punzón	Broca Toolmex 6mm 2 filos	50 m/min	0.1016 mm (por revolución)	1 mm	N/A	00:02:51
Drill	Agujeros para pasadores	Broca Toolmex 6mm 2 filos	50 m/min	0.1016 mm (por revolución)	1 mm	N/A	00:04:54
2D Contour	Acabado y aumento de diámetro en agujeros para pasadores	Toolmex 1/4 " 2 filos	50 m/min	0.025 mm	1 mm	6.35 mm	00:35:13
Bore	Definición de superficie cilíndrica en agujeros para pasadores	Toolmex 1/4 " 2 filos	50 m/min	0.025 mm	5 mm	0.2 mm	00:05:42
<b>TOTAL</b>							<b>05:00:04</b>

La Figura 61 muestra el proceso del maquinado de las geometrías superiores a las ranuras en

donde se alojarán los punzones.

Figura 61: Maquinado de holder



### 6.1.3. Pisador

La siguiente tabla muestra un detalle de las operaciones de corte que se llevaron a cabo para realizar el maquinado del pisador, indicando la descripción de la operación, la herramienta utilizada para la operación, los parámetros de corte, las profundidades radiales y axiales de corte y el tiempo que tomó cada operación.

Figura 62: Cuadro de resumen de maquinado de pisador

Operación	Descripción	Herramienta	Velocidad de corte	Avance por diente	Profundidad axial	Profundidad radial	Duración
Face	Desbastado de material en cara superior del stock	7Leaders 3/4" 4 filos	75 m/min	0.1016 mm	3 mm	19.05 mm	00:03:47
2D Contour	Contorno general de la pieza	7Leaders 3/4" 4 filos	75 m/min	0.1016 mm	6 mm	0.9 mm	00:10:01
Pocket	Geometrías en cara inferior y pendientes laterales	7Leaders 3/4" 4 filos	75 m/min	0.1016 mm	1 mm	19.05 mm	00:46:25
Parallel	Afinado de pendientes laterales	WIDIA 1/4" de bola 2 filos	120 m/min	0.0381 mm	1 mm	2.5 mm	00:03:48
2D Adaptive	Geometría superior a ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	00:07:57
2D Adaptive	Geometría superior a ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	00:07:57
2D Adaptive	Geometría de ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	01:18:41
2D Adaptive	Geometría de ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	50 m/min	0.03175 mm	2.5 mm	15.875 mm	01:17:47
2D Contour	Definición de paredes exteriores de geometría superior a ranura	WIDIA 1/4" 4 filos	50 m/min	0.025 mm	1.5 mm	0.25 mm	00:06:24
2D Contour	Definición de paredes interiores de geometría superior a ranura	WIDIA 1/4" 4 filos	50 m/min	0.025 mm	1.5 mm	0.25 mm	00:06:10
2D Contour	Redondeos de ranuras	WIDIA 1/4" 4 filos	50 m/min	0.025 mm	2 mm	0.1 mm	00:43:46
<b>TOTAL</b>							<b>04:52:42</b>

La Figura 63 muestra el resultado final del maquinado del pisador.

Figura 63: Resultado maquinado de pisador



#### 6.1.4. Matriz

Finalmente, la siguiente tabla muestra un detalle de las operaciones de corte que se llevaron a cabo para realizar el maquinado de la matriz, indicando la descripción de la operación, la herramienta utilizada para la operación, los parámetros de corte, las profundidades radiales y axiales de corte y el tiempo que tomó cada operación.

Figura 64: Cuadro de resumen de maquinado de matriz

Operación	Descripción	Herramienta	Velocidad de corte	Avance por diente	Profundidad axial	Profundidad radial	Duración
Face	Desbastado de material en cara superior del stock	7Leaders 3/4" 4 filos	53 m/min	0.057 mm	2 mm	19.05 mm	00:26:05
2D Contour	Contorno general de la pieza	7Leaders 3/4" 4 filos	53 m/min	0.057 mm	4 mm	2.5 mm	00:34:56
2D Adaptive	Geometría de ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	53 m/min	0.0048 mm	2 mm	15.875 mm	01:16:20
2D Adaptive	Geometría de ranura	Toolmex 5/8" 4 filos	53 m/min	0.0048 mm	2 mm	15.875 mm	01:16:14
2D Contour	Redondeos de ranura	WIDIA 1/4" 4 filos	53 m/min	0.0127 mm	2 mm	0.1 mm	00:18:23
2D Contour	Redondeos de ranura	WIDIA 1/4" 4 filos	53 m/min	0.0127 mm	2 mm	0.1 mm	00:18:15
3D Contour	Redondeos superiores en canal que rodea la ranura	WIDIA 4mm 3 filos	80 m/min	0.01mm	0.1 mm	4 mm	00:11:54
2D Contour	Pared de ranura	WIDIA 4mm 3 filos	80 m/min	0.01mm	0.5 mm	4 mm	00:09:24
2D Contour	Pared de ranura	WIDIA 4mm 3 filos	80 m/min	0.01mm	1 mm	1.025 mm	00:07:03
3D Contour	Redondeos en fondo de canal que rodea a la ranura	7Leaders 1/8" 4 filos	53 m/min	0.00508 mm	0.1 mm	3.175 mm	00:15:34
3D Contour	Redondeos superiores en canal que rodea la ranura	WIDIA 4mm 3 filos	80 m/min	0.01mm	0.1 mm	4 mm	00:11:54
2D Contour	Pared de ranura	WIDIA 4mm 3 filos	80 m/min	0.01mm	0.5 mm	4 mm	00:09:22
2D Contour	Pared de ranura	WIDIA 4mm 3 filos	80 m/min	0.01mm	1 mm	1.025 mm	00:07:04
3D Contour	Redondeos en fondo de canal que rodea a la ranura	7Leaders 1/8" 4 filos	53 m/min	0.00508 mm	0.1 mm	3.175 mm	00:15:34
TOTAL							05:38:10

Las figuras 65 y 66 muestran el proceso del maquinado de la matriz y el resultado final de este maquinado .

Figura 65: Maquinado de matriz



Figura 66: Resultados de maquinado de matriz



## 6.2. Ensamblaje y pruebas de troquel

El rectificado de las piezas, ensamblaje y las pruebas del troquel fueron realizados dentro del taller de la empresa. El troquel se instaló en una prensa troqueladora mecánica de 4 toneladas, esta prensa se utilizó solamente para las pruebas. Fue sujetado al pistón de la máquina por medio de un muñón de sujeción y fue sujetado a la mesa de la prensa por medio de bridas. Para garantizar el cumplimiento del requisito de seguridad RS-01, el cual indica que no debe de haber interferencia entre los componentes del troquel (además de las interferencias por ensamble) se colocó el troquel ensamblado en la mesa de trabajo y posteriormente se colocaron las bridas y el muñón de sujeción.

A continuación se muestran imágenes del troquel montado en la prensa y una muestra de lámina perforada por este troquel:

Figura 67: Troquel montado en prensa de Electropuertas



Figura 68: Muestra de perforación de troquel



En la Figura 68 se muestran los resultados de la perforación del troquel. Las dimensiones de los residuos de la perforación cumplían con el requisito RD-02 el cual indicaba que la perforación debía de tener dimensiones de 75\*25mm. Estas dimensiones tenían una incertidumbre de +/- 4mm, el cual no es relevante ya que la función de estos agujeros es solamente permitir la visibilidad a través de la lámina.

Cabe resaltar que aunque el troquel se colocó correctamente se debe de fabricar un sistema de

guías de alineación de la lámina para evitar problemas en la perforación de la lámina. Si no se tiene este sistema puede que la lámina se inserte en la prensa levemente torcida y la perforación se realice sobre el doblado, provocando que el residuo de la perforación no se desprenda totalmente de la pieza de trabajo.

A partir de estas afirmaciones y cumplimiento de requisitos se puede declarar el diseño y la manufactura de este troquel como exitosa.

### 6.3. Costeo de troquel

Los principales costos en la manufactura del troquel se presentan en la compra de los materiales, el diseño CAD, el diseño CAM y en el costo de operación de la máquina (sueldo del operario de la máquina). Además se debe de tomar en cuenta la inversión que se realiza en la compra de herramientas, el método de sujeción y en el centro de mecanizado.

#### 6.3.1. Costos de manufactura

##### Costo de materiales

A continuación se muestra una tabla de costos de los materiales comprados para la manufactura del troquel:

Figura 69: Tabla de costos de materiales del troquel

<b>Pieza</b>	<b>Dimensión del stock</b>	<b>Material</b>	<b>Costo</b>
Punzones (2)	63.5mm* 40mm*90mm	Acero D2	Q 324.00
Sujetador de punzones	75mm* 45mm* 260mm	Acero 1045	Q 562.00
Pisador	78mm* 50mm* 260mm	Acero 1045	Q 753.00
Matriz	79mm* 40mm* 259mm	Acero D2	Q 1,330.00
<b>TOTAL</b>			<b>Q 2,969.00</b>

##### Costo de operario

Además, se supone un sueldo de Q7,500 mensuales para el operario de la máquina. Asumiendo un mes laboral de 240 horas, el costo por cada hora de trabajo del operario es de Q 31.25. Con este dato se estima el costo que representa el trabajo del operario de la máquina en la manufactura del troquel, resultando en Q 686.44.

Figura 70: Tabla de costo por sueldo de operario

<b>Pieza</b>	<b>Duración de maquinado</b>	<b>Costo</b>
Punzones (cara inferior) (2)	04:05:34	Q 127.60
Punzones (cara superior) (2)	02:23:42	Q 74.47
Sujetador de punzones	05:00:04	Q 156.25
Pisador	04:52:42	Q 152.08
Matriz	05:38:10	Q 176.04
<b>TOTAL</b>		<b>Q686.44</b>

A este costo se debe de agregar el tiempo que tarda el operario en la configuración de la máquina y las herramientas para cada maquinado. Tomando en cuenta un tiempo de configuración promedio de 35 minutos por pieza, y tomando en cuenta que se deben realizar 7 maquinados, se deben agregar aproximadamente 4 horas de trabajo del operario, lo que se traduce en Q 125 adicionales. Por lo que se puede asumir que el costo de la mano de obra en la manufactura del troquel es de **Q 811.44**.

### Diseño CAD/CAM

El salario aproximado de un diseñador/dibujante se encuentra entre Q90.00 y Q130.00 por hora. Tomando en cuenta un valor promedio entre este rango, y asumiendo que el diseño CAD tomó un aproximado de 5 horas efectivas, tomando en consideración el tiempo de medición del troquel existente y sus modificaciones, el costo del diseño CAD resultaría en Q 550.00.

En cuanto al diseño CAM, este requiere de una preparación más especializada, por lo que el salario podría encontrarse entre Q 140.00 y Q170.00 por hora. Asumiendo que cada uno de los programas CAM se realizó en aproximadamente una hora, el costo del programa CAM del troquel resultaría en Q 775.00.

Luego de calcular estos costos se puede definir el costo total de la manufactura del troquel:

Figura 71: Tabla de costos de manufactura del troquel

<b>Concepto</b>	<b>Monto</b>
Materiales	Q 2,969.00
Sueldo de Operario	Q 686.44
Diseño CAD	Q 550.00
Diseño CAM	Q 775.00
<b>TOTAL</b>	<b>Q 4,980.44</b>

### 6.3.2. Inversión

En este rubro se toman en cuenta aquellos recursos que fueron necesarios para la fabricación de los componentes, pero que no necesariamente se utilizan solo para la fabricación de estos. En otras palabras, los recursos que se pueden reutilizar para la fabricación de alguna otra pieza.

## Centro de mecanizado

Para la fabricación de los componentes del troquel se utilizó un centro de mecanizado marca Haas modelo VF-1. Esta máquina es una de las más sencillas y completas que vende esta marca. Esta máquina tiene un precio inicial de USD 63,995.00. Sin embargo puede conseguirse una máquina usada o de otra marca con un menor precio. Con estas suposiciones se asume que la inversión será de un 60 % del valor de la máquina nueva, resultando en un aproximado de USD 39,000.00.

## Herramientas de corte

Para la manufactura de piezas en un taller de maquinado CNC es necesario tener una amplia variedad de medidas para las herramientas de corte. A continuación se muestra una tabla con las medidas y precios promedio de las herramientas requeridas para la manufactura de este troquel, cotizadas en la marca WIDIA.

Figura 72: Tabla de costos de herramientas requeridas para manufactura de troquel

<b>Código de herramienta</b>	<b>Diámetro de corte (in)</b>	<b>Precio</b>
5879198	1/16	Q 100.00
5879060	1/8	Q 105.00
5879160	1/4	Q 360.00
5879146	3/8	Q 225.00
2741487	5/8	Q 1,500.00
5879186	3/4	Q 1,300.00
	<b>TOTAL</b>	<b>Q 3,590.00</b>

Todas estas herramientas fueron cotizadas con el distribuidor local de la marca WIDIA en Guatemala: Mayprod S.A. ya que por experiencia en UVG se sabe que estas herramientas son de alta calidad, además cuentan con un catálogo muy completo que permite visibilidad de los parámetros de corte recomendados por la marca para garantizar la duración de las herramientas.

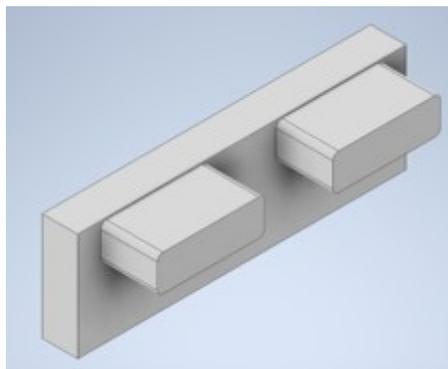
## 7.1. Diseño

Los modelos de los componentes del troquel mostrados en el capítulo de metodología son las versiones finales de diseño. En el capítulo no se muestran los cambios y modificaciones que se realizaron a partir del diseño inicial. A continuación se muestra el diseño inicial de los componentes y la explicación de los cambios que se realizaron en los elementos que tuvieron modificaciones con respecto a su diseño inicial:

### 7.1.1. Punzón y holder

Al iniciar el diseño se había definido el punzón como una sola pieza en la que estaban maquinados los dos punzones, es decir, no se tenía planeado diseñar los punzones por separados para que sean insertados en un sujetador (holder). A continuación se muestra el diseño inicial:

Figura 73: Diseño inicial de punzón/holder



Las principales razones por las que se cambió el diseño fueron **costos de material, costos de fabricación y costo de sustitución de la pieza**:

- **Costos de material:** Esta pieza es la encargada del corte de la lámina, por lo que debe de ser fabricada en acero D2, el cuál tiene un costo mayor al acero 1045 utilizado en los componentes que no se involucran en la operación de corte. El diseño inicial tiene dimensiones significativamente mayores a las dimensiones de los dos insertos que se deben maquinar, por lo que el costo del material en el diseño inicial es 348% mayor al costo de el material que se requiere para los dos insertos y el sujetador de punzones juntos. Los detalles se muestran en la sección de "análisis de costos".
- **Costo de manufactura:** En el diseño inicial, la pieza completa es de acero D2, indicando que se requieren parámetros de corte más conservadores que los utilizados en acero 1045, por lo tanto los tiempos de maquinado serían mayores.
- **Costos de sustitución de la pieza:** En el momento en el que el elemento de corte (punzón) requiera un cambio por desgaste o por modificación solamente se deberán de rectificar/sustituir los insertos que resultaron en el diseño final, a diferencia de sustituir la pieza completa que involucra en ella los costos de material y fabricación mencionados anteriormente.

### 7.1.2. Matriz y pisador

La matriz y el pisador son otros componentes que tuvieron una modificación con respecto a su diseño inicial. A diferencia de las modificaciones que se hicieron en el punzón, estas modificaciones no se llevaron a cabo por el tema de los costos sino por solicitud por parte la empresa.

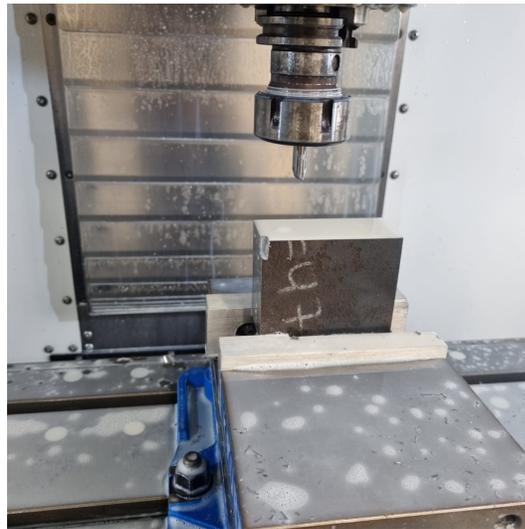
El troquel que la empresa posee actualmente está diseñado para perforar lámina de hasta 0.63mm de espesor, pero la empresa solicitó que el nuevo troquel sea capaz de perforar lámina de hasta 1mm, por lo que se modificó el ancho de la ranura en la matriz y la geometría del pisador que se inserta en la ranura de manera que la lámina de 1mm de espesor pueda alojarse en este espacio mientras se realiza la operación de corte.

## 7.2. Problemas en manufactura de componentes

### 7.2.1. Punzones (maquinado de cara inferior)

El maquinado del primer punzón se llevó a cabo correctamente. Sin embargo en el maquinado del segundo punzón se tuvo una ruptura de la herramienta de 3/8" de diámetro y 2 filos. Este problema fue resultado de una equivocación en la medición del stock utilizado. Las medidas del segundo stock maquinado eran mayores a las medidas que se definieron en el programa CAM, lo que significa que cuando trabajaba la herramienta, estaba teniendo un empañe mayor, es decir, cortando más material del recomendado por el fabricante, lo que provocó la ruptura de la herramienta.

Figura 74: Ruptura de herramienta de 3/8" de diámetro en maquinado de punzón

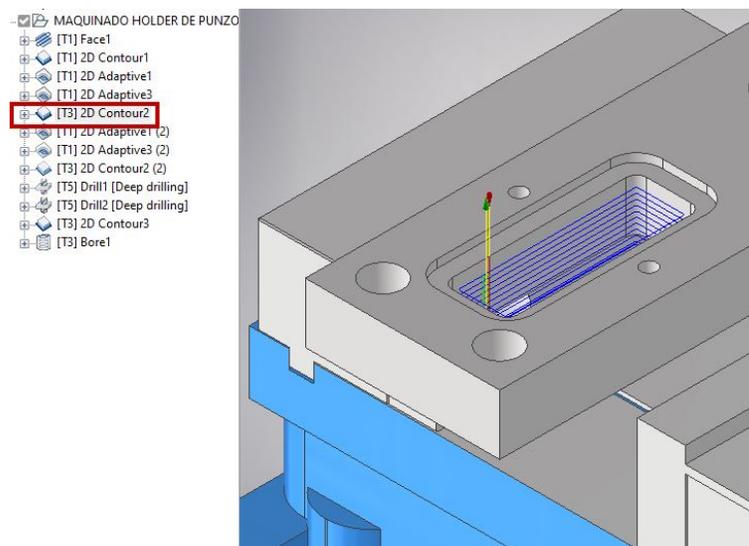


A partir de este problema se compró una herramienta con el mismo diámetro pero con 4 filos. Además, se midieron correctamente las dimensiones del stock para definirlos nuevamente en el programa CAM y poder completar el maquinado de la pieza.

### 7.2.2. Sujetador de punzones (holder)

Durante el maquinado del sujetador se tuvo otra ruptura de herramienta. Esta se dió en la herramienta de 1/4" de diámetro cuando esta estaba definiendo los redondeos de las ranuras en una de las operaciones 2D Contour. Por esta razón se terminaron de definir los contornos de las ranuras de manera manual en el taller de la empresa.

Figura 75: Estrategia de manufactura en donde se dió ruptura de herramienta de 1/4"



Sin embargo, esta ruptura no se debió a ningún error de programación en el CAM no errores

de medición del stock, sino por que la herramienta que se estaba utilizando estaba desgastada por su uso en maquinados anteriores. Como resultado de esta ruputura se procedió a la compra de una nueva herramienta de 1/4" de diámetro para poder completar los maquinados de las piezas restantes.

### 7.3. Análisis de costos

El trabajo estuvo enfocado en la reducción de costos, ya que la manufactura del troquel debe de salir en un menor valor económico que lo que la empresa esta pagando originalmente por la fabricación de sus troqueles. Una de las decisiones que disminuyó el costo en gran medida fue el cambio de diseño del punzón de una pieza a un sujetador de punzones con sus respectivos insertos. La cotización del stock para fabricar el punzón de una sola pieza resultó en **Q 3,975.00** resultando con un precio casi 4.5 veces mayor al material utilizado en los dos punzones y el sujetador de los mismos (**Q 886.00**) . Además, se debe tomar en cuenta que los tiempos de maquinado de la pieza hubieran sido también mucho mayores debido a que las velocidades de corte y el avance por diente son en promedio 20 % menores a tomando como referencia los parámetros de corte para el acero 1045.

Otra de las decisiones que permitió un ahorro significativo de tiempos fue la compra de herramientas de mayor diámetro para obtener un menor tiempo de maquinado en los careados de las piezas. Estos careados muchas veces representan aproximadamente un 30 % del tiempo de maquinado cuando se utilizan herramientas pequeñas. Las herramientas clave que se compraron por este motivo fueron: **Fresa plana de 3/4" de diámetro y 4 filos** y **Fresa plana de 5/8" de diámetro y 4 filos**. La disminución de tiempos utilizando una herramienta con mayor diámetro no necesariamente se da en el aumento de velocidades de avance o carga de viruta por diente, sino que en el empañe radial y axial que un mayor diámetro permite. En otras palabras, ambas herramientas pueden estar trabajando a velocidades similares pero una herramienta con mayor diámetro esta en contacto con un área mayor de material. Estas compras permitieron un ahorro de tiempo de aproximadamente 20 %, lo que se traduce en ahorro de costos de operación de la máquina.

Por medio de información que brindo la empresa, se sabe que el troquel de perforaciones rectangulares de duela galvanizada que se tenía previamente tuvo un costo aproximado de \$ 1,500.00 o Q 11,700.00 aproximadamente, cabe mencionar que este tuvo un tiempo de entrega de aproximadamente un mes y medio luego del pago y además fue fabricado con tecnología convencional. Estos datos indican que la manufactura de este troquel en específico significa Q 6,720 ahorrados y se puede asumir entonces que un el costo de un troquel fabricado con tecnología CNC es aproximadamente 55 % menor al de un troquel fabricado con tecnología convencional.

- Se logró generar un diseño de troquel el cual permite realizar dos perforaciones rectangulares en láminas de 0.63mm, utilizando un material con una mayor resistencia al desgaste en los elementos de corte.
- Se llevo a cabo un prototipo impreso en 3D el cual permitió verificar y corroborar la integridad y funcionamiento del diseño planteado, así como la validación de las dimensiones y ajustes del troquel.
- Se fabricó con tecnología CNC los componentes del troquel que contenían en su diseño geometrías que podrían ser complicadas de trabajar en máquinas herramienta convencionales.
- Todos los componentes del troquel quedaron completamente restringidos con la sujeción diseñada para cada uno. Con las pruebas se corroboró el correcto movimiento de los componentes y las holguras adecuadas para los ajustes que existe entre las piezas.
- Se documentaron los criterios utilizados para la toma de decisiones tanto en el diseño como en la manufactura de cada uno de los componentes del troquel. Estos criterios se encuentran en la sección 7.1.1 y 7.3.



---

### Recomendaciones

---

A lo largo de un trabajo en el que se propone un diseño que se debe de fabricar, se recomienda siempre tener en cuenta el enlace existente entre el diseño y la manufactura. Esto quiere decir en el momento de diseñar, se debe de tener meditado los métodos de manufactura que se tienen disponibles, así como lo son las máquinas, las herramientas y el tiempo que se tiene para esta manufactura.

Tomando en cuenta lo aprendido durante la etapa de manufactura de este troquel, se recomienda definir una buena configuración inicial de la programación CAM. Esto incluye el **Modelado de mesa de trabajo y prensa de trabajo en CAM** lo cual será útil para detectar colisiones de la herramienta con alguno de estos elementos (en caso las hayan) y la **Correcta medición de cada material de stock** para evitar que las herramientas tengan recorridos sin corte de material o, por otro lado, que tengan un mayor empañe al que se planificó en la programación del CAM.

También, en este tipo de proyectos, se recomienda tener disponibilidad de una amplia variedad de herramientas para poder tener flexibilidad en el diseño. De esta manera el diseño tendrá menos modificaciones provocadas por la falta de herramientas capaces de capturar determinadas geometrías. Recordar siempre que esta amplia variedad de herramientas deben estar registradas correctamente con sus respectivas dimensiones y parámetros de corte según el material que se esté trabajando.

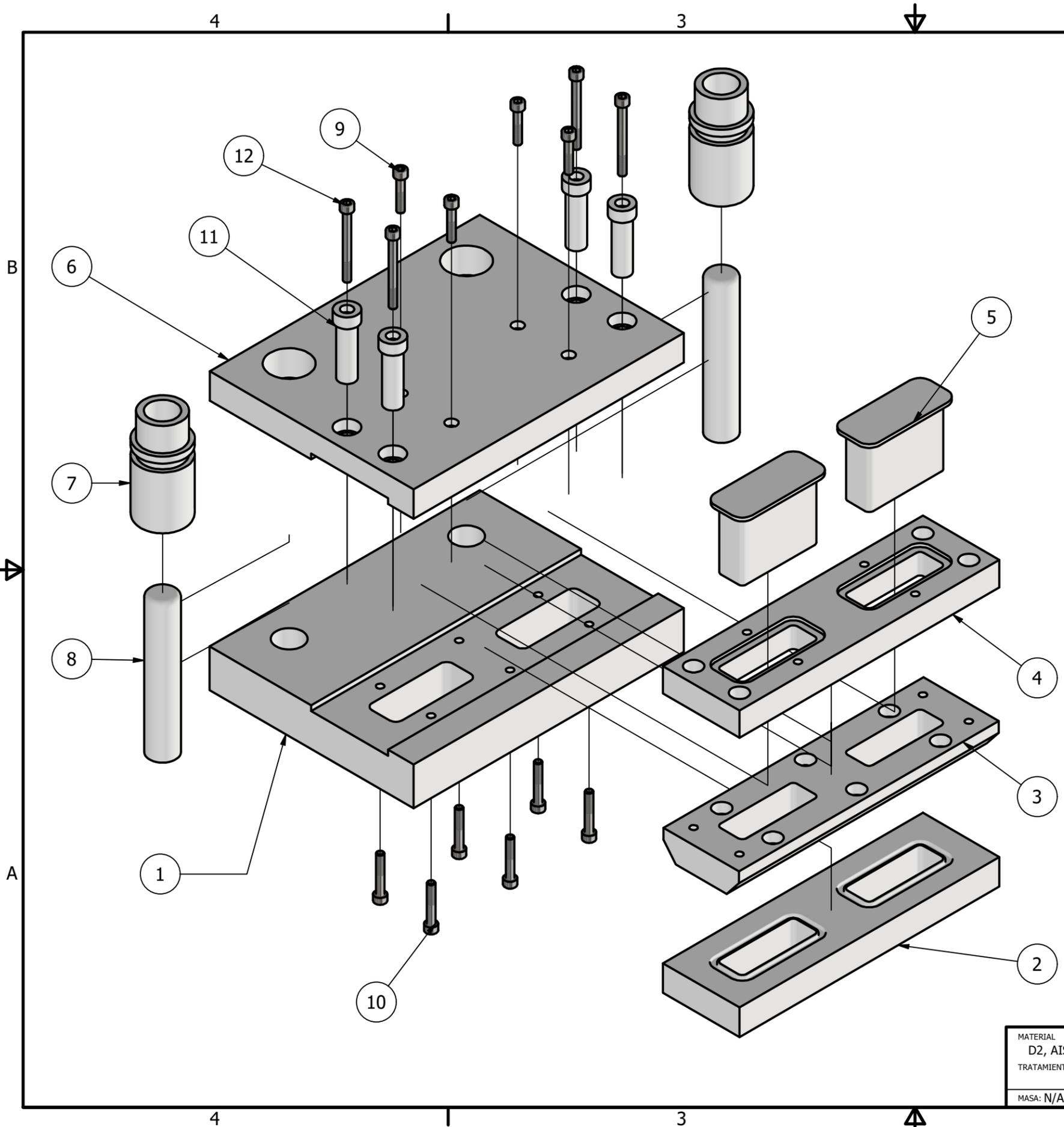
Finalmente, para el método de sujeción y la configuración del origen del maquinado se presentan las siguientes recomendaciones según el escenario que se presente. En el escenario en el que se desee realizar varios troqueles, es decir, piezas en serie; se recomienda diseñar y utilizar un sistema de sujeción para colocar el stock siempre en el mismo punto, y mantener el origen de los maquinados en un mismo punto. Para un escenario en el que la pieza tenga que voltearse luego de su primer maquinado para que se pueda llevar a cabo el maquinado de la cara opuesta, se recomienda definir el origen del maquinado en un punto externo al stock, como por ejemplo en la mesa o en la prensa, de esta manera se garantiza que las geometrías en ambos maquinados queden alineadas.



- A. Kumaresh, B. Balaji & M. Kumar. (2016). *Design and Analysis of Punching Die* (Tesis doctoral). International Journal of Research in Engineering y Technology. India.
- Abascal, E. (2009). Conformado de producto sin arranque de viruta. <http://de-duce-tu.blogspot.com/p/4corte-y-punzonado.html>
- Álvarez, L. (2009). *Metodología para el diseño de troqueles de corte de chapa metálica* (Tesis doctoral). Universidad Autonoma de Occidente. Santiago de Cali. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/1313/TME00449.pdf?sequence=1>
- Cattel, D. (2006). Stamping 101: Anatomy of a mechanical press. *The Fabricator*. <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/stamping-101-anatomy-of-a-mechanical-press>
- Gerling, H. (1960). *All about machine tooles* (2.<sup>a</sup> ed.). Reverté.
- Groover, M. (2013). *Fundamentals of Modern Manufacturing* (5.<sup>a</sup> ed.). Wiley.
- Hedrick, A. (2006). Die Basics 101 starts with eight basic components. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/stamping/die-basics-101-starts-with-eight-basic-components>
- Luz, E. (2018). *Diseño y manufactura de un troquel de corte e instrumentación para la medición de fuerzas* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México. México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15435/Tesis.pdf?sequence=5>
- Macareno. (2011). Aceros comunes para troqueles. <https://macareno.mx/2011/03/aceros-comunes-para-troqueles/>
- McLane. (2022). Prensa Troqueladora de 10 Toneladas. <https://mclane.mx/producto/metal-formado/prensas-hidraulicas/troqueladora-de-10-toneladas/>
- Ramirez, V. (2015). Troquel Progresivo. <https://grabcad.com/library/troquel-progresivo-1>
- Rossi, M. (1979). *Estampado en frío de la chapa* (9.<sup>a</sup> ed.). Dossat S.A. <https://macareno.mx/2011/08/descarga-estampado-en-frio-de-la-chapa-mario-rossi/>
- Serrano. (2021). Velocidad de corte y de avance en fresadora CNC. <https://tecnocorte.com/blog/fresadora-cnc-calculas-velocidad-de-corte-y-de-avance/>

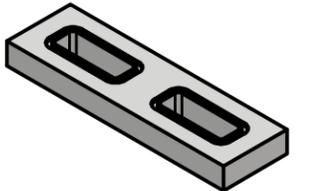
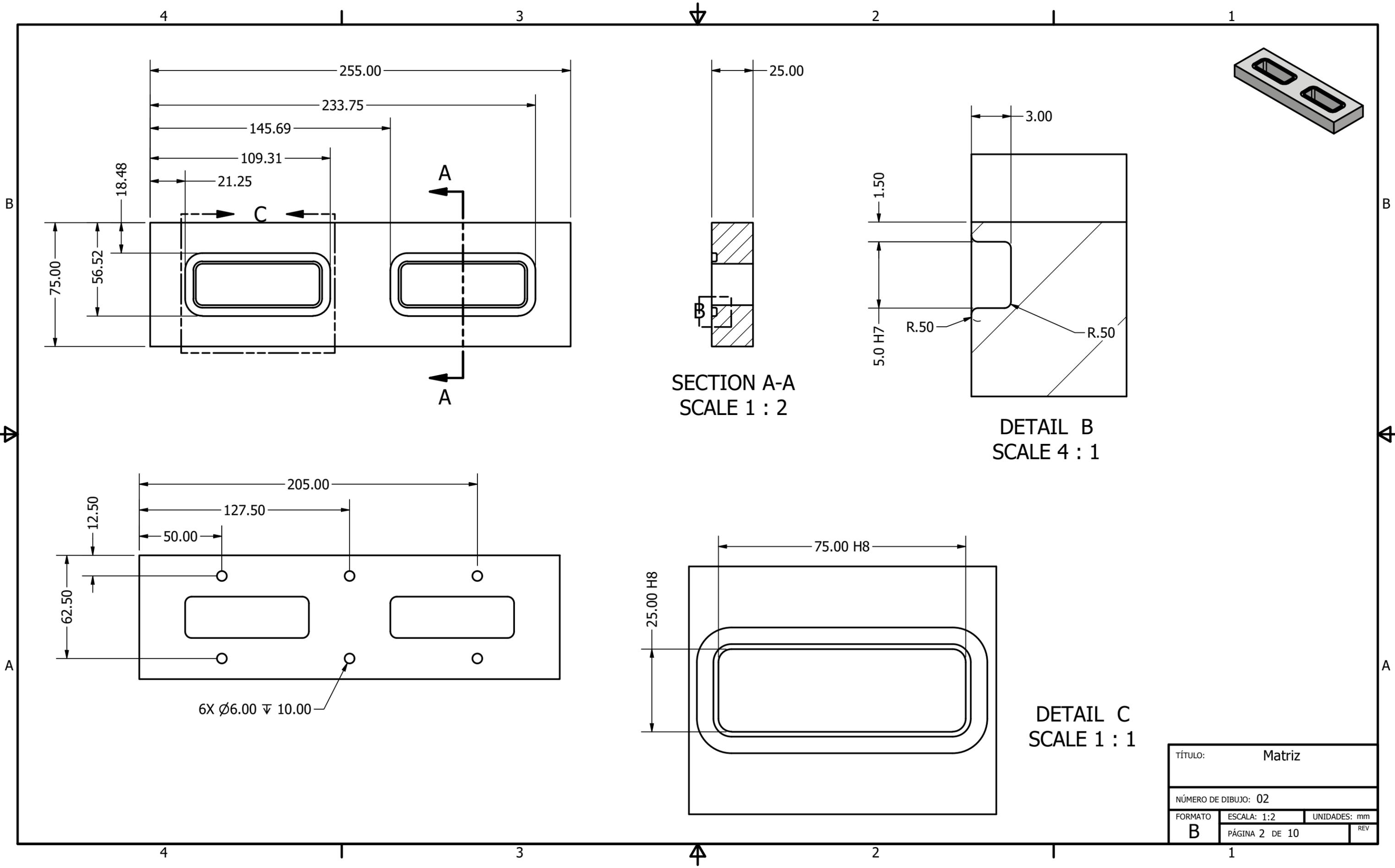


**11.1. Planos de construcción**



PARTS LIST				
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION	
1	1		Placa porta-matriz	
2	1		Matriz	
3	1		Pisador	
4	1		Sujetador de Punzones	
5	2		Filo	
6	1		Placa porta punzón	
7	2		Guia Hembra	
8	2		Guia Macho	
9	4		CNS 3932 - M 6 x 30	Cabeza Hexagonal Allen
10	6		CNS 3932 - M 6 x 35	Cabeza Hexagonal Allen
11	4		Buje	
12	4		CNS 3932 - M 6 x 60	Cabeza Hexagonal Allen

<p>TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.</p> <p><b>TOLERANCIAS GENERALES</b></p> <p>LINEAL .X ± .XX ± .XXX ±</p> <p>ANGULAR ±</p>	<p>DIBUJADO POR <b>Andrés Kiehle</b></p> <p>FECHA <b>22/11/2022</b></p>	<p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40</p>
	<p>DISEÑADO POR <b>Andrés Kiehle</b></p> <p>FECHA</p>	
	<p>REVISADO POR <b>Rodrigo Aragón</b></p> <p>FECHA</p>	
	<p>APROBADO POR</p> <p>FECHA</p>	
<p>MATERIAL <b>D2, AISI 1045</b></p> <p>TRATAMIENTO</p>	<p>NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO <b>Fabricación de Troquel</b></p>	<p>TÍTULO: <b>Explosión de Trooquel</b></p>
<p>MASA: <b>N/A</b></p>	<p>TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN</p>	<p>NÚMERO DE DIBUJO: <b>01</b></p>
	<p>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</p>	<p>FORMATO <b>B</b></p>
		<p>ESCALA: <b>1:3</b></p>
		<p>UNIDADES: mm</p>
		<p>PÁGINA 1 DE 10</p>
		<p>REV</p>



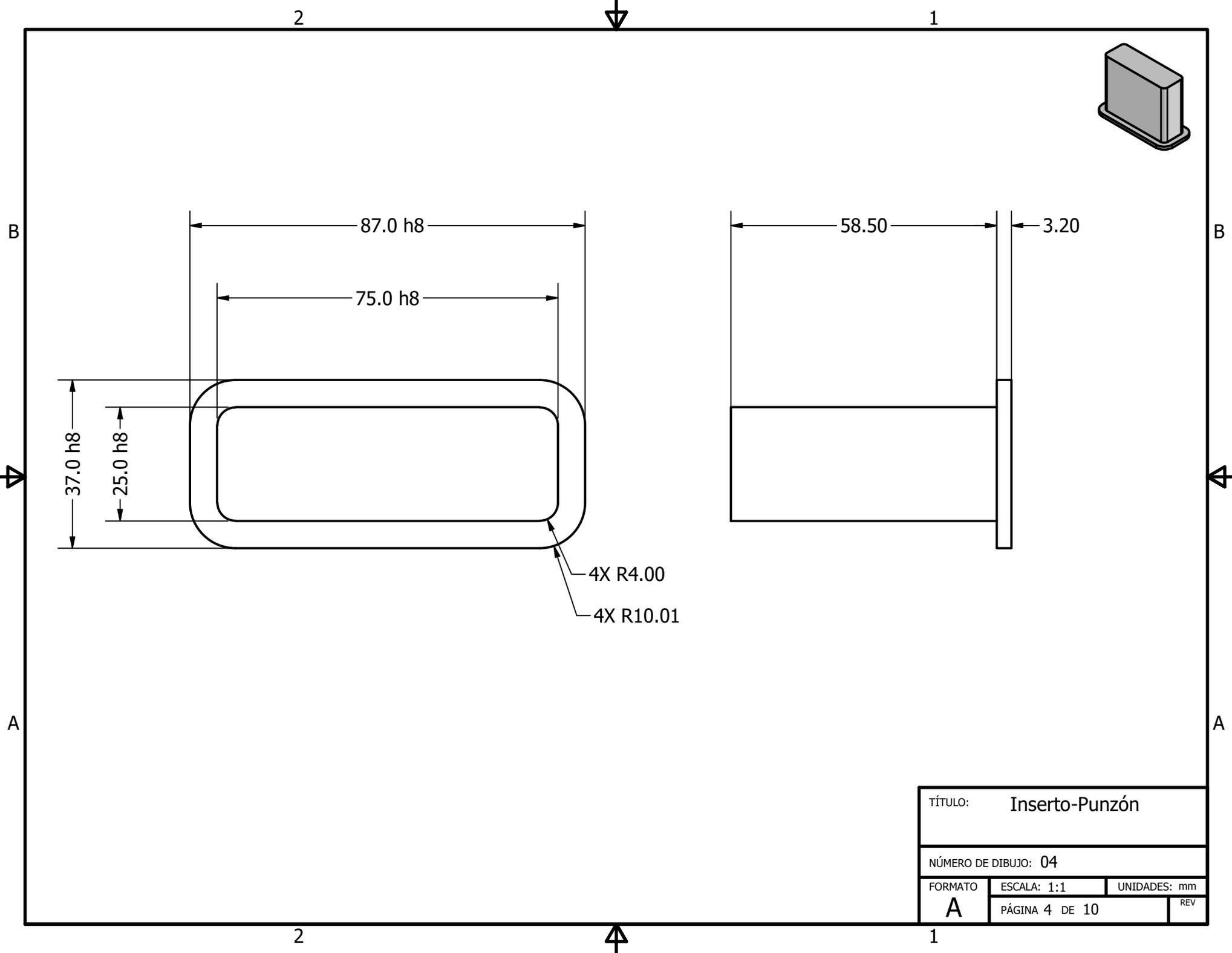
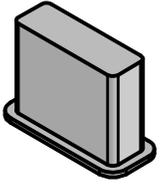
SECTION A-A  
SCALE 1 : 2

DETAIL B  
SCALE 4 : 1

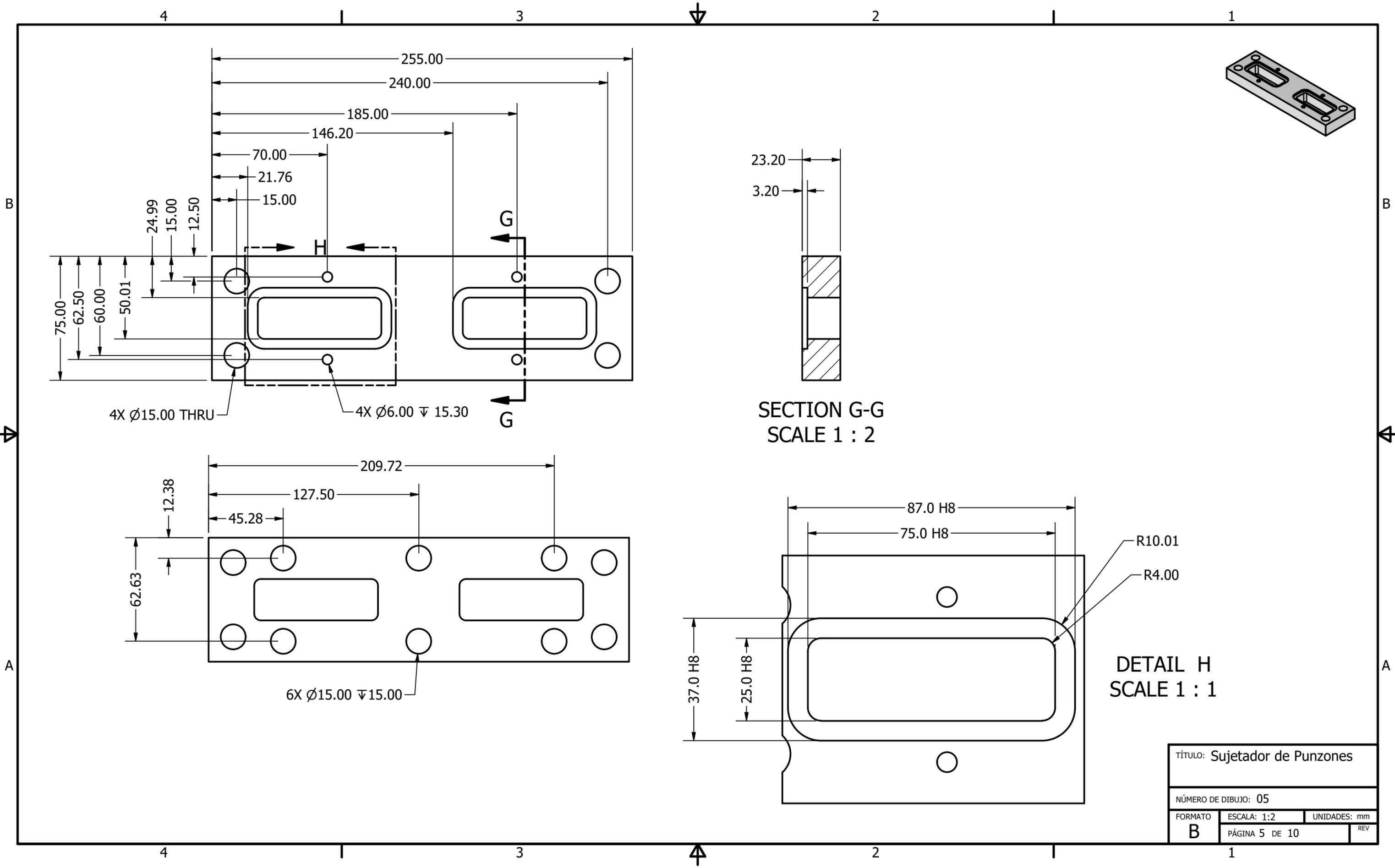
DETAIL C  
SCALE 1 : 1

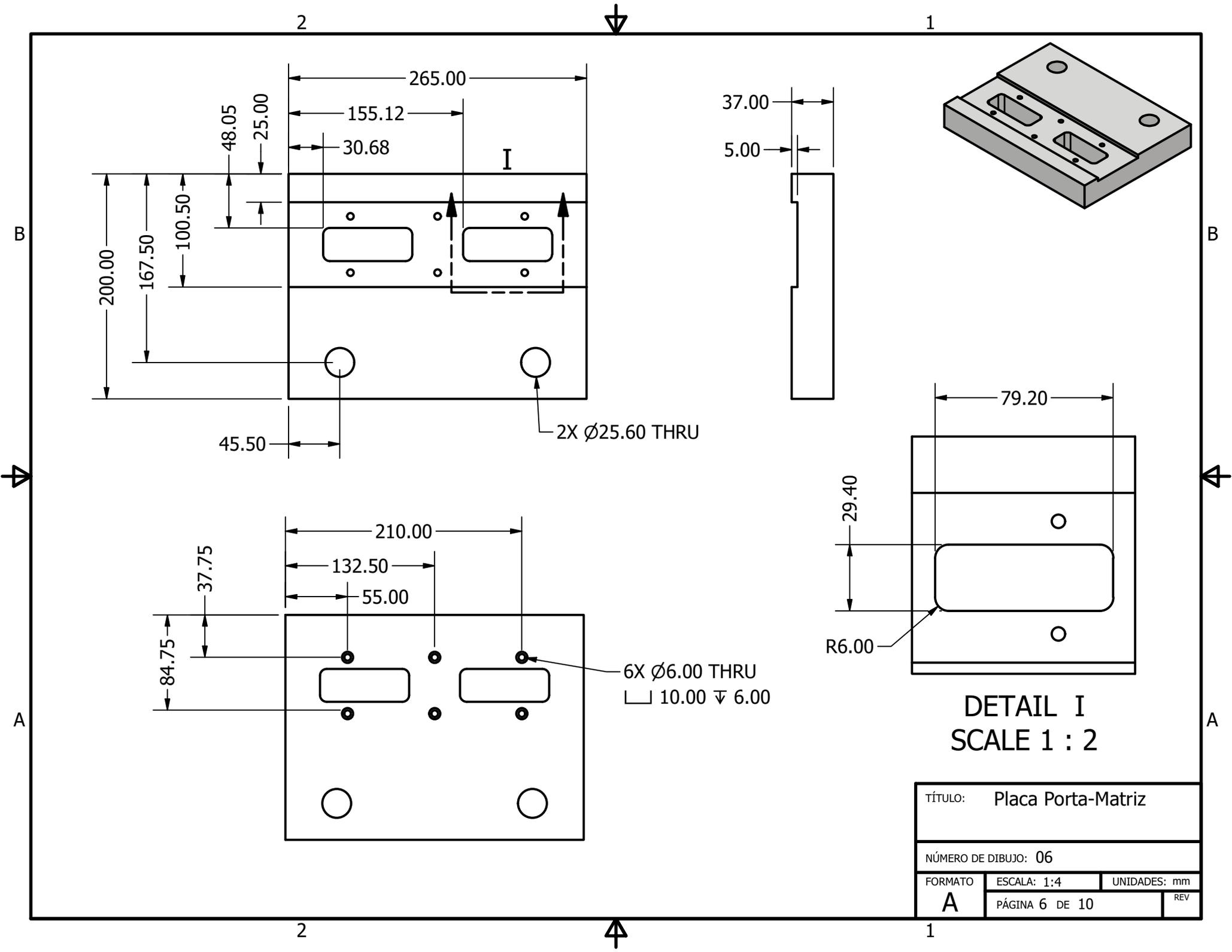
TÍTULO: Matriz		
NÚMERO DE DIBUJO: 02		
FORMATO <b>B</b>	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
	PÁGINA 2 DE 10	REV





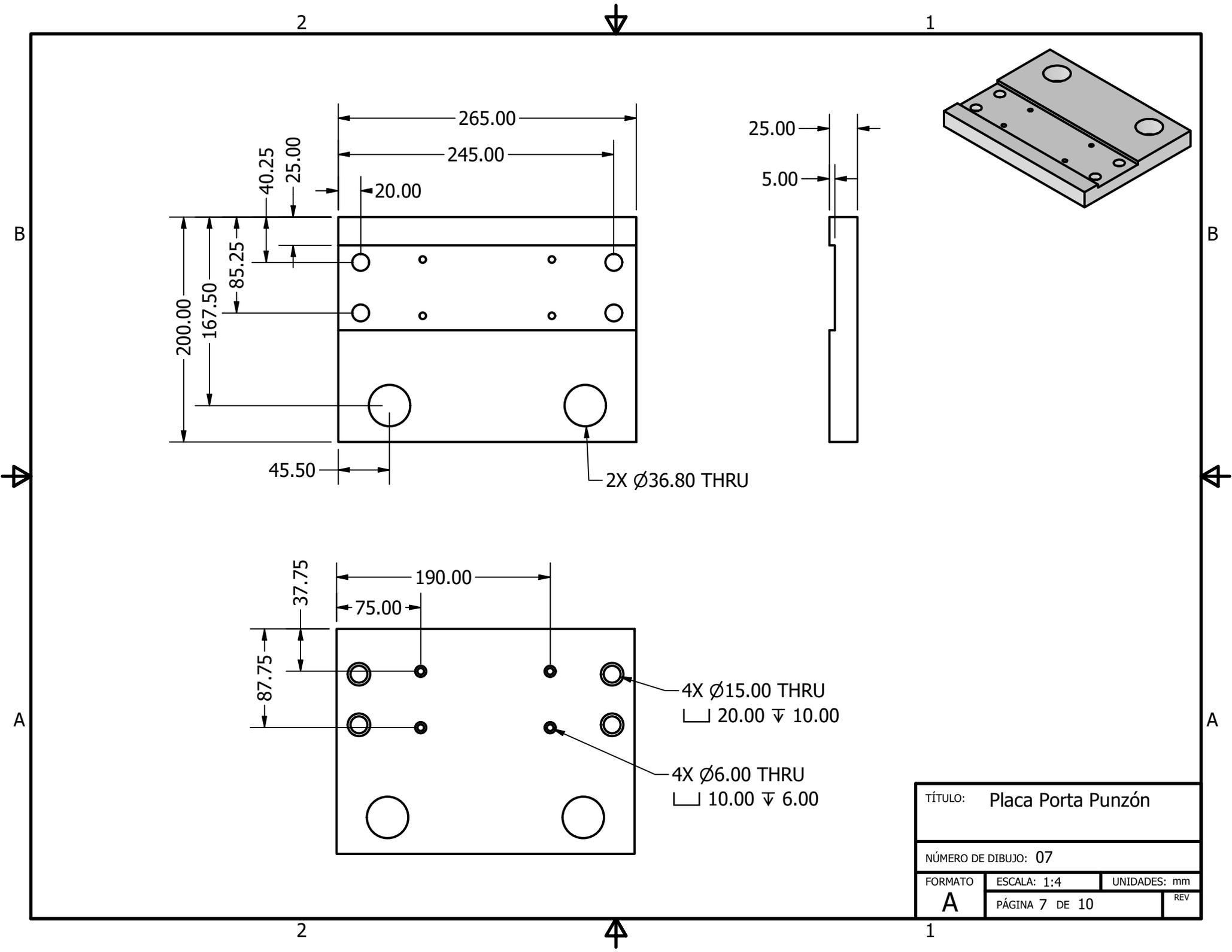
TÍTULO: <b>Inserto-Punzón</b>		
NÚMERO DE DIBUJO: <b>04</b>		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 4 DE 10	REV



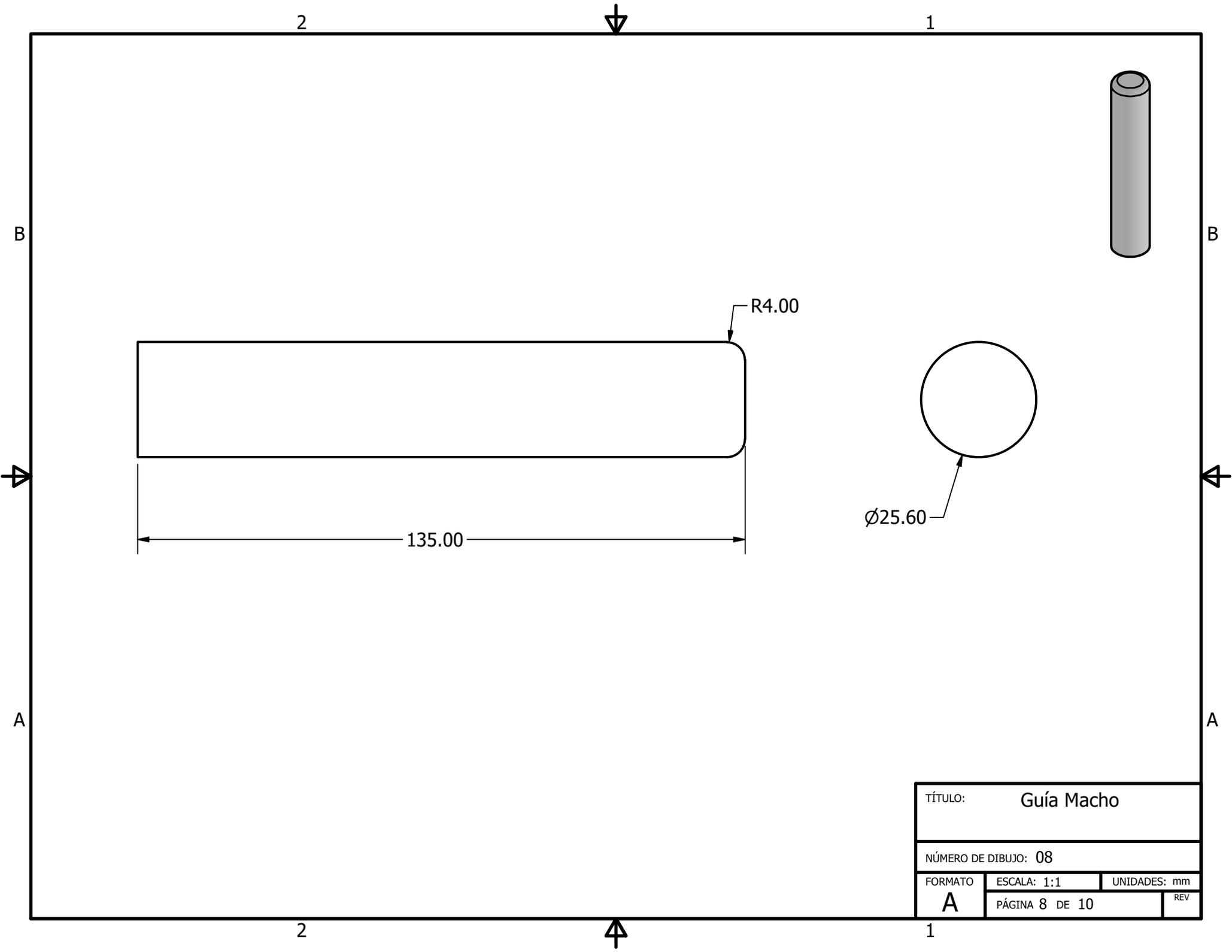


DETAIL I  
SCALE 1 : 2

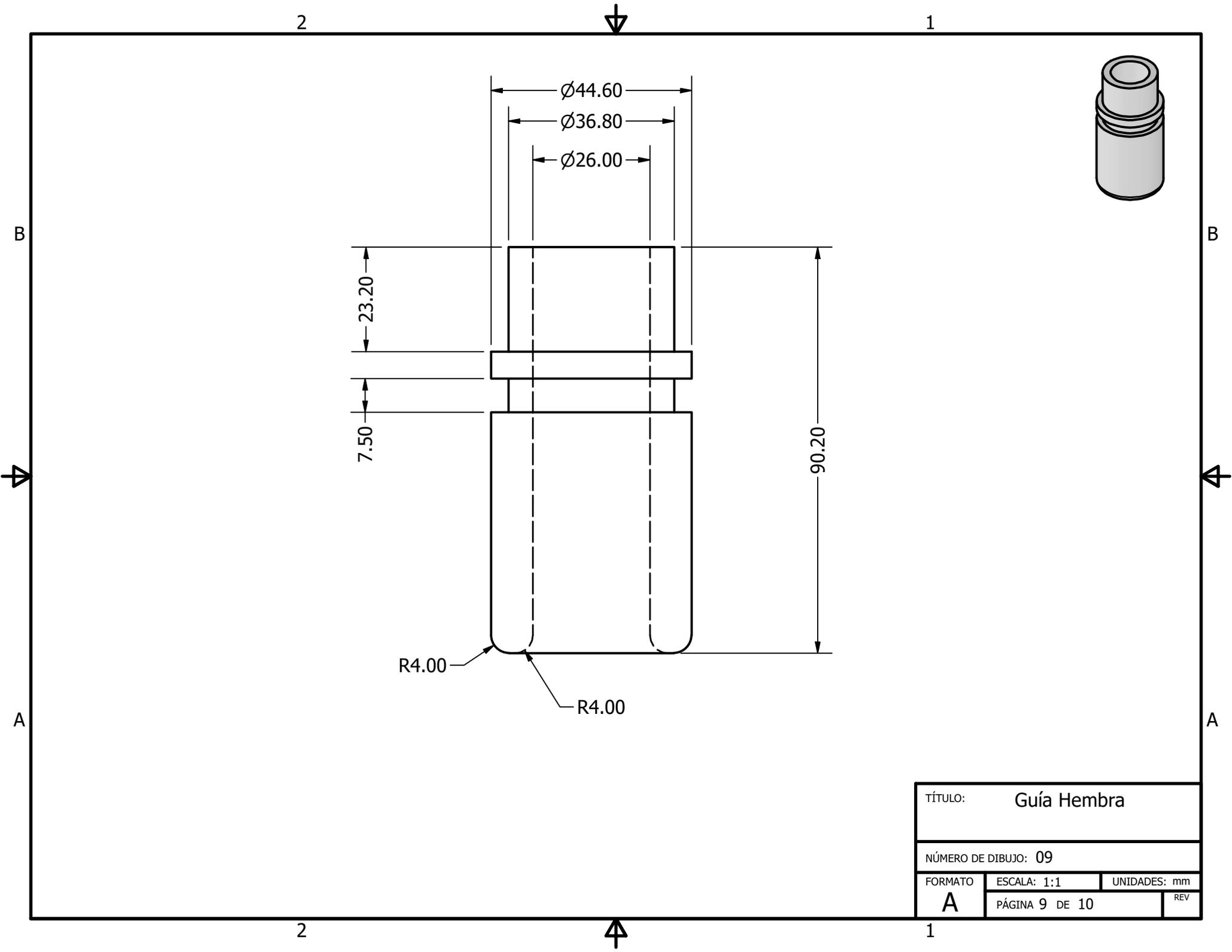
TÍTULO: Placa Porta-Matriz			
NÚMERO DE DIBUJO: 06			
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 6 DE 10		REV



TÍTULO: Placa Porta Punzón		
NÚMERO DE DIBUJO: 07		
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 7 DE 10	REV



TÍTULO: <b>Guía Macho</b>		
NÚMERO DE DIBUJO: <b>08</b>		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 8 DE 10	REV



2

1

B

B



A

A

2

1



Ø44.60

Ø36.80

Ø26.00

23.20

7.50

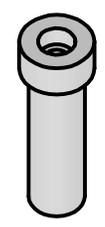
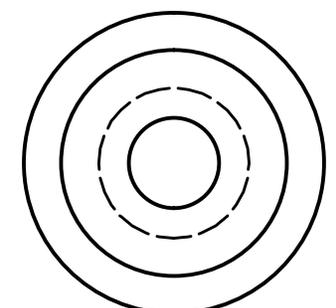
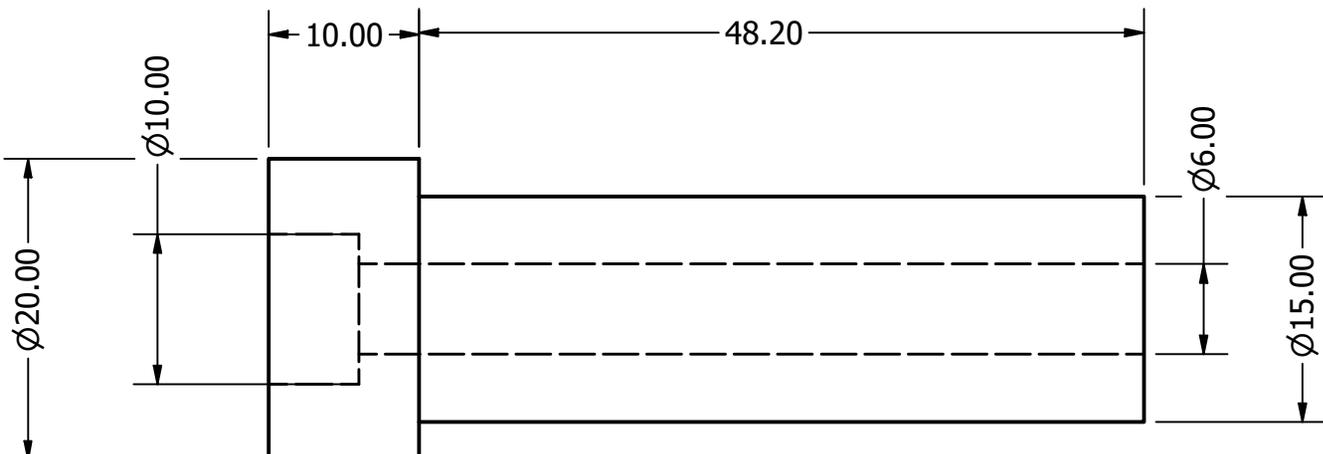
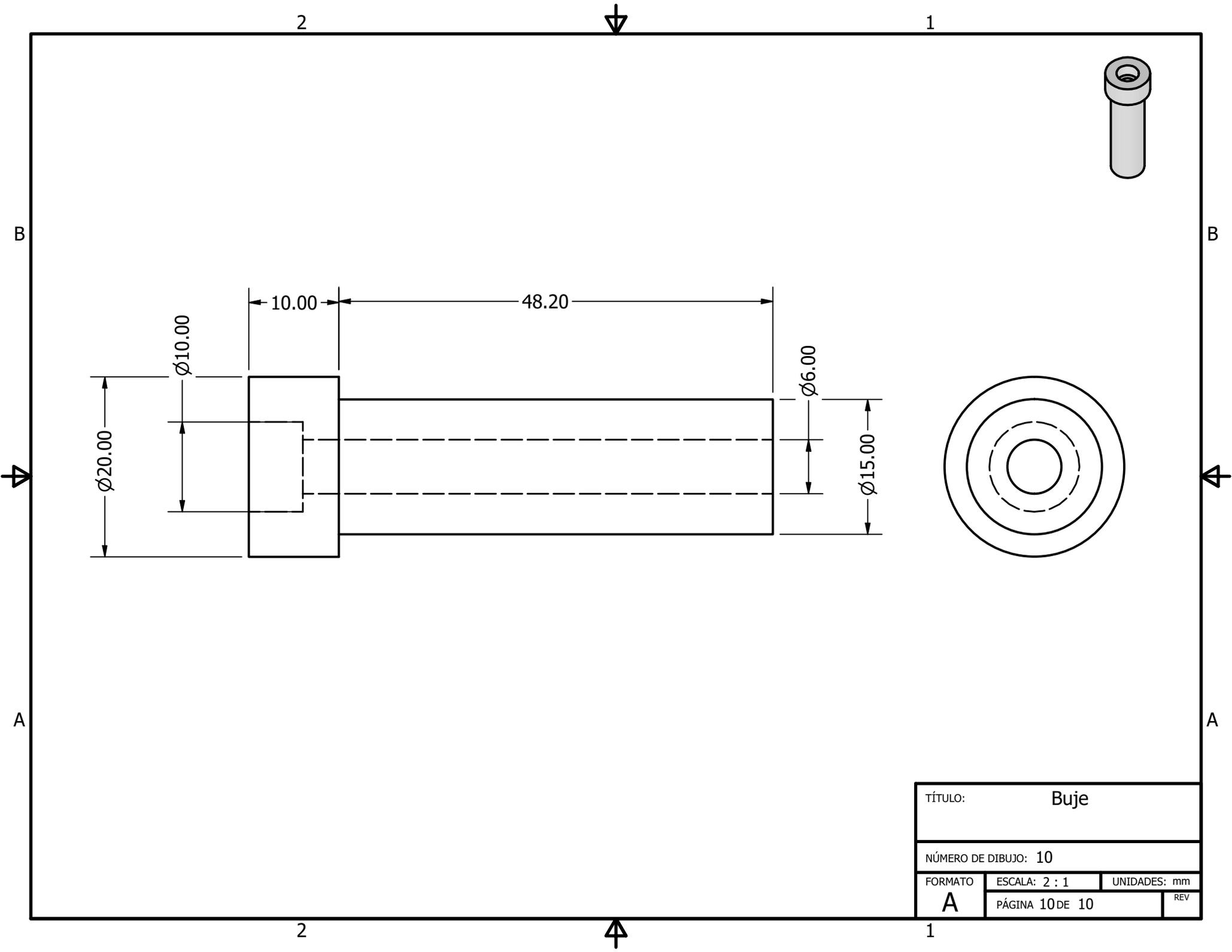
90.20

R4.00

R4.00



TÍTULO: <b>Guía Hembra</b>		
NÚMERO DE DIBUJO: <b>09</b>		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 9 DE 10	REV



TÍTULO: Buje		
NÚMERO DE DIBUJO: 10		
FORMATO	ESCALA: 2 : 1	UNIDADES: mm
<b>A</b>	PÁGINA 10 DE 10	REV