

GRADO EN INGENIERIA MECANICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE TROQUEL PROGRESIVO
PARA SOPORTE DE ELEMENTOS DE
PARED***

DOCUMENTO 3- CALCULOS

Alumno: Churruca Maguregui, Ekaitz

Director: Lobato Gonzalez, Roberto

Curso: 2020-2021

Fecha: 14/05/2021

ÍNDICE

3.1 INTRODUCCIÓN.....	3
3.2 DISEÑO DE LA BANDA.....	3
3.2.1 COLOCACIÓN DE LA PIEZA EN LA BANDA	3
3.2.1.1 Normal	3
3.2.1.2 Oblicua.....	4
3.2.1.3 Invertida	4
3.2.1.4 Múltiple.....	4
3.2.2 PARAMETROS FUNDAMENTALES	5
3.2.2.1 Distancia optima de separación	5
3.2.2.2 Determinar el paso	6
3.2.2.3 Rendimiento de la banda.....	6
3.2.3 SECUENCIA DEL PROCEDIMIENTO	8
3.3 CORTE.....	9
3.3.1 FUNDAMENTOS DE CORTE.....	9
3.3.2 PRAMETROS FUNDAMENTALES	11
3.3.2.1 Tolerancia de corte.....	11
3.3.2.2 Diámetro mínimo de corte	12
3.3.2.3 Holgura	12
3.3.2 FUERZAS.....	14
3.3.3 FUERZAS DE EXTRACCIÓN	18
3.3.4 FUERZAS DE EXPULSIÓN	19
3.3.5 RESUMEN DE FUERZAS POR ESTACIONES	20
3.3.6 DISTANCIA MINIMA DE PUNZONADO	20
3.4 DOBLADO.....	22
3.4.1 PARAMETROS FUNDAMENTALES	22
3.4.1.1 Radio mínimo de doblado	22

3.4.1.2 Desarrollo de la chapa.....	22
3.4.1.3 Holgura entre punzón y matriz	24
3.4.1.4 Springback	25
3.4.2 FUERZAS.....	26
3.4.2.1 Fuerzas del doblado	26
3.4.2.2 Fuerzas del pisador	27
3.5 FUERZA DE LA PRENSA Y POSICIÓN DEL VÁSTAGO	27
3.5.1 FUERZA DE LA PRENSA.....	27
3.5.2 POSICIÓN DEL VASTAGO	28
3.6 DIMENSIONADO DE LOS ELEMENTOS	30
3.6.1 MATRIZ.....	30
3.6.2 PUNZONES	32
3.6.3 MUELLES.....	36

3.1 INTRODUCCIÓN

En este documento se detallarán los cálculos especificados utilizados para el diseño del troquel progresivo. Para ello se tiene en cuenta la pieza que se quiere fabricar, teniendo en cuenta el material del producto, sus características y finalmente los requisitos exigidos por el cliente.

Todo esto se hará para conseguir la mejor calidad y el mayor rendimiento posible junto con la mayor durabilidad del troquel, ya que es una maquina compleja, única y muy cara de construir.

3.2 DISEÑO DE LA BANDA

3.2.1 COLOCACIÓN DE LA PIEZA EN LA BANDA

A la hora de colocar la pieza en la banda debe tenerse en cuenta el material posible aprovechable, dentro de la correcta ejecución y las normas del proceso a realizar. Con dicho aprovechamiento se conseguirá un ahorro significativo del material que se necesita para obtener el producto final.

Por regla general, los posicionamientos más utilizados son las siguientes:

3.2.1.1 Normal

Se refiere cuando los ejes principales de la pieza de la matriz están orientados de la misma manera, tanto transversalmente como longitudinalmente. Cuando se habla del sentido transversal, se refiere al sentido en el que avanzara la chapa por el troquel. Mayoritariamente se utilizan cuando la forma de la pieza que se quiere conformar se puede incorporar en un cuadrado o rectángulo.

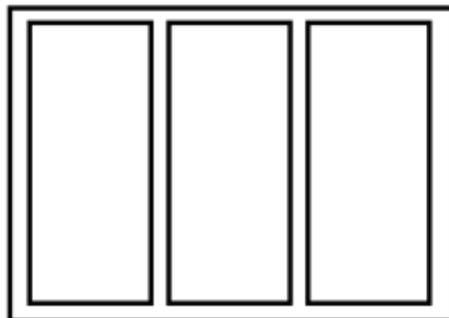


Imagen 1: Disposición transversal

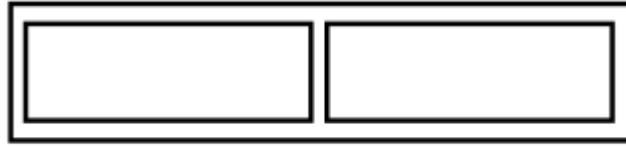


Imagen 2: Disposición longitudinal

3.2.1.2 Oblicua

La colocación de la pieza se hace con ángulo respecto los ejes principales de la matriz. Este tipo de disposición se utiliza cuando la pieza que se va a fabricar permite apilarse una al lado de la otra, con la intención de ahorrar el material al máximo posible, consiguiendo así la mayor rentabilidad de la chapa.

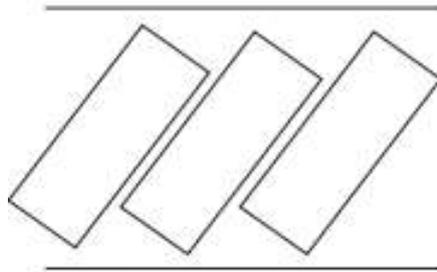


Imagen 3: Disposición oblicua

3.2.1.3 Invertida

Como en el caso del posicionamiento oblicuo, la disposición invertida es especialmente utilizada cuando la pieza que se va a fabricar permite alternar de manera invertida o confrontada, con la intención de sacarle mayor rendimiento a la chapa.

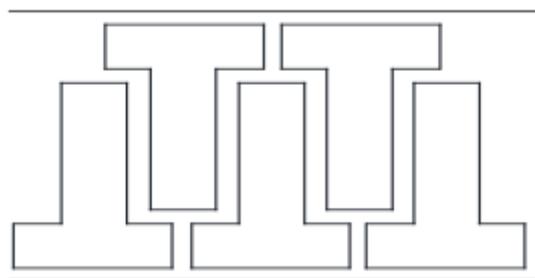


Imagen 4: Disposición invertida

3.2.1.4 Múltiple

Se disponen las piezas en más de una fila, de una forma en la que se logran varios de ellos en un solo golpe. Habitualmente se utilizan cuando las series que se van a fabricar son muy grandes y es necesario obtener varias piezas al mismo tiempo.

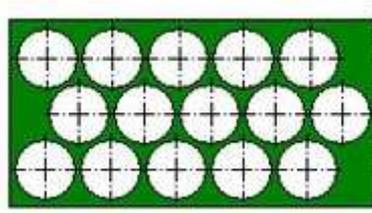


Imagen 5: Disposición múltiple

Teniendo en cuenta la geometría de la pieza y los pasos que se necesitan hacer durante el proceso de realización, se decide colocar sin ningún tipo de ángulo, es decir, las esquinas de la pieza y las esquinas de la banda estarán dispuestas en paralelo.

Otro punto a tener en cuenta para el rendimiento dicha banda y optimizar el ritmo de producción, es la de poner de tal manera que mediante un solo golpe se puedan conseguir varias piezas a la vez. Es decir se posicionaran de manera simétrica dos piezas, colocadas en dirección perpendicular al eje de la matriz, así en un mismo golpe se obtendrán dos piezas.

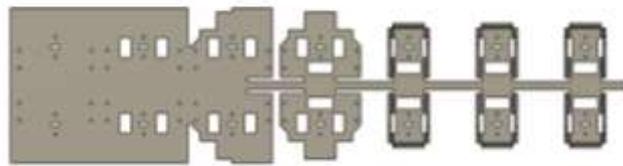


Imagen 6: Colocación de pieza en la banda

3.2.2 PARAMETROS FUNDAMENTALES

3.2.2.1 Distancia óptima de separación

Con intención de maximizar la rigidez de la banda y reducir la probabilidad de desgarros del material, entre dos piezas tiene que haber una distancia mínima de separación, junto con la separación con el perímetro y las esquinas del fleje. Para conseguir dicho valor, se aplica la siguiente fórmula:

$$S_{min} = 1,5 \cdot e \text{ [mm]}$$

Donde:

$e \rightarrow$ Espesor de la chapa [mm]

Sabiendo la chapa con la que se va a trabajar, en este caso 3 mm, el valor que obtendremos es de 4,5mm. Al trabajar con chapa como suministro de nuestro troquel, el valor mencionado anteriormente se redondeara hacia arriba. En este caso la distancia mínima con la que se trabajara será de 6mm entre el borde de la pieza y el borde de la banda. En el caso de la distancia entre las piezas será de 10mm, para que en la estación 5 el doblado se lleve a cabo correctamente, sin que haya ningún tipo de interacción entre la estación anterior y posterior.

3.2.2.2 Determinar el paso

Una vez determinada la distancia mínima que habrá entre las piezas, se calculará el paso; éste, es la suma de la anchura de la pieza desarrollada y la separación entre piezas consecutivas.

$$P = S + a \text{ [mm]}$$

Donde:

$$S \rightarrow \text{Separación entre piezas [mm]}$$

$$a \rightarrow \text{anchura de la pieza desarrollada [mm]}$$

En nuestro caso, la separación que hay entre piezas consecutivas es de 10mm y la anchura de la pieza desarrollada es de 100,4mm.

Por lo que:

$$P = 100,4\text{mm}$$

3.2.2.3 Rendimiento de la banda

El rendimiento es la relación que hay entre la superficie total de las piezas desarrolladas en la banda y la superficie total de la banda.

$$\text{Rendimiento}[\%] = \frac{A_{\text{pieza}} \cdot N}{A_{\text{chapa}}} \cdot 100$$

Donde:

$$A_{\text{pieza}} \rightarrow \text{Área de la pieza (sin tener en cuenta ningún punzonado) [mm}^2\text{]}$$

$$N \rightarrow \text{Número de piezas en la banda}$$

$$A_{\text{chapa}} \rightarrow \text{Área de la banda (distancia desde la entrada a la salida) [mm}^2\text{]}$$

$$A_{chapa} = 151005,12 \text{ mm}^2$$

Finalmente sabiendo que en la banda entran 14 piezas, el resultado del rendimiento es:

$$Rendimiento = \frac{6608,012 \cdot 14}{151005,12} \cdot 100 = 61,26\%$$

Una vez obtenido el valor del rendimiento, se puede garantizar un buen aprovechamiento de la materia prima.

3.2.3 SECUENCIA DEL PROCEDIMIENTO

Para transformar el fleje suministrado en el troquel, en la pieza final, se hace mediante varias operaciones a lo largo del proceso. Cada uno de ellos se realiza en una estación diferente, en la que mediante un golpe de prensa se consigue lo requerido. En este caso, se dividirá en 7 estaciones. Cada vez que se produzca dicho golpe, se adelantará el anteriormente mencionado paso.

Como se puede apreciar en la imagen 8 se consigue un patrón de lo que ocurre en el proceso, a lo que denominaremos como banda.



Imagen 8: Banda

Ahora se definirán las operaciones que se realizarán en cada estación:

- **Estación 1**
Se harán 12 agujeros circulares y otros dos orificios.
- **Estación 2**
En este se realizarán dos orificios cuadrados.

- **Estación 3**
En esta estación se empezara a hacer unos cortes con los que se empezara a dar forma a la pieza
- **Estación 4**
Como en el paso anterior se ejecutarán unos cortes, justamente en el otro lado de la pieza para que así finalmente se consiga la forma final de la pieza.
- **Estación 5**
Una vez que tenemos la geometría exterior deseada se hará los tres doblados precisos.
- **Estación 6**
Cuando llegamos a esta estación la forma final ya estará formada, por lo que se realizara un corte de forma cuadrada, dicho corte se realiza en este momento ya que no cumple la distancia mínima que se necesitaba hasta la zona de doblado. Esta distancia mínima se define con la intención de que el corte realizado no se deforme y preserve su forma.
- **Estación 7**
Finalmente se llevara a cabo el último corte, con lo que conseguiremos las dos piezas finales que queríamos.

3.3 CORTE

3.3.1 FUNDAMENTOS DE CORTE

El proceso de corte se podría diferenciar en tres partes. Para llevar a cabo el cizallado del material, el punzón debe de ejercer una presión sobre la chapa hasta conseguir el límite elástico de dicho material. Cuando la fuerza ejercida supera la fuerza necesaria para el corte, el material se puede decir que empieza a fluir o desplazarse. A continuación, el punzón entra en el material, generando grietas, que serán por donde la chapa se romperá.

Etapas del corte:

- **Deformación**
Comienza con la deformación del material alrededor del perímetro del punzón. En un primer momento la deformación se puede definir como elástica, pero al superar el límite elástico del material, comenzara la deformación plástica.

- **Penetración**

Cuando empieza a llegar al límite de la deformación plástica del material, el punzón empezara a penetrar en la chapa. Es decir, comenzara a aparecer unas grietas por el hecho de la concentración de tensiones.

- **Fractura**

Las grietas generadas anteriormente se irán agrandando hasta que se junten entre ellas, finalmente se separara las dos partes, es decir, la banda y la chatarra.

En este proyecto se llevaran a cabo dos de los tres tipos de corte que se utilizan comúnmente.

El más sencillo de ellos se podría decir que es el cizallado. Este se emplea cuando se deben de hacer dos cortes rectos, uno a lo largo de la banda y otro a lo ancho de la banda.

El segundo es el punzonado, que se refiere a los cortes que siguen un patrón curvo y cerrado que tienen los punzones. En esta operación la chatarra y la banda se separan y llevan caminos diferentes.

En el tercer y último tipo de corte está el troquelado, que lleva a cabo el mismo proceso que el punzonado, pero a diferencia de este, el material que recorta es la pieza final no la el sobrante.

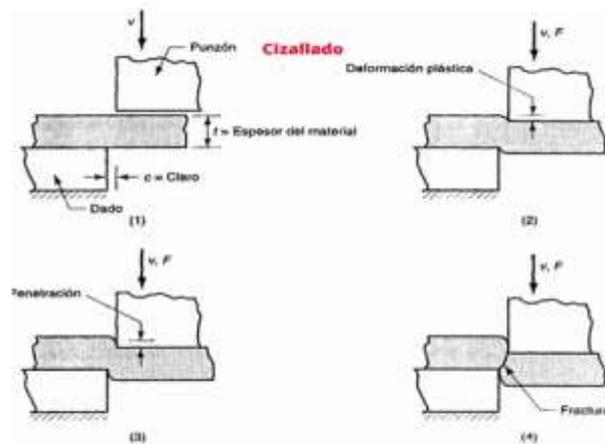


Imagen 9: Proceso de cizallado

3.3.2 PRAMETROS FUNDAMENTALES

3.3.2.1 Tolerancia de corte

La tolerancia de corte se puede definir como la precisión u holgura que existe entre el punzón y la matriz. La tolerancia óptima es la que consigue que coincidan los cortes generados en el material por la interacción del punzón y la matriz.

Cuando se realiza un corte y para que el mismo sea lo más preciso posible dentro de sus posibilidades, se requiere una correcta elección de la tolerancia de corte. Para ello se han tenido en cuenta las propiedades mecánicas del material de la chapa que se iba a utilizar para el conformado, ya que están directamente relacionadas.

Estas propiedades varían dependiendo del fabricante, pero las del material seleccionado son las que se pueden ver en la imagen 10.

Rp_{0,2}	> 230 N/mm ²
Rm	540 - 750 N/mm ²
Alargamiento	> 45%
Dureza	< 200 HB

Imagen 10: Características mecánicas del material seleccionado

Como se puede apreciar no hay un dato específico en lo relacionado con la resistencia de corte del material, es decir, dependiendo del momento de compra de la chapa y de su composición, puede ser diferente.

Una vez decidido con qué material se va a trabajar y sabiendo la tensión de rotura que tiene, utilizando la tabla que relaciona la resistencia de corte del material y el espesor del mismo, obtendremos el valor de la tolerancia que deben de tener los cortes.

Resistencia al Corte (kg7mm ²)	Factor de Tolerancia
<10	0,01·e
11-25	0,03·e
26-39	0,05·e
40-59	0,07·e
60-99	0,09·e
>100	0,10·e

Tabla 1: Elección de tolerancia

En el caso de este proyecto, la resistencia al corte del material con el que trabajaremos es de 588N/mm^2 . Para la correcta utilización de la tabla se hará una conversión a las unidades de esta.

$$R_m = 588 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot \frac{1\text{kg}}{9,81\text{N}} = 60 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$$

Una vez calculado el valor en las unidades adecuadas y con el espesor de la chapa, que en este caso es de 3mm, la tolerancia correcta para las operaciones de corte es de:

$$T = 0,09 \cdot 3 = 0,27\text{mm}$$

3.3.2.2 Diámetro mínimo de corte

A la hora de hacer un orificio, uno de los factores a tener en cuenta es el correcto funcionamiento de los punzones, por ello, se calcula el diámetro del orificio más pequeño que se pueda hacer. Para obtener dicho valor se tiene en cuenta el espesor de la chapa utilizada, ya que está directamente relacionada.

En esta ocasión la pieza al ser de una geometría reducida, por lo que utilizará la relación convencional:

$$\phi_{min} = e \text{ [mm]}$$

Donde:

$$e \rightarrow \text{espesor de la chapa (mm)}$$

Por lo tanto:

$$\phi_{min} = 3\text{mm}$$

En el caso de este proyecto el agujero más pequeño a realizar es de 3mm, por lo que se puede decir que no habrá ningún problema para la realización de los orificios.

3.3.2.3 Holgura

En caso de utilizar una holgura excesivamente grande, se origina una curvatura alrededor del perímetro de corte y al mismo tiempo unas rebabas que nos perjudican en la pieza final. En el caso opuesto, es decir, cuando la holgura es demasiado pequeño, se impide la expansión del material, por lo que la fuerza que se deberá de ejercer es mucho mayor al actual. Con lo que conlleva un mayor desgaste y deterioro de los punzones y la matriz.

Por regla general, cuanto mayor sea el espesor de la chapa y el esfuerzo de corte, más grande deberá de ser la holgura que se deberá de dejar.

Para obtener el mejor resultado y el más exacto entre el punzón y la matriz debe de haber una cierta holgura. Esta misma se debe a la progresión de la tensión a la hora de la cizalladura.

A la hora del cálculo hay dos parámetros a tener en cuenta, la primera de ellas es el cociente que hay que tener en cuenta dependiendo de la dureza del material; el segundo es el espesor de la chapa.

$$c = A_c \cdot e$$

Donde:

$A_c \rightarrow$ Cociente a tener en cuenta dependiendo de la dureza

$e \rightarrow$ espesor de la chapa (mm)

Mediante una tabla se decide el cociente a elegir.

Ac	
0,045	Material blando (aluminio, acero bajo C recocido, etc)
0,060	Material medio (acero bajo C, acero inox. recocido, etc)
0,075	Material duro (acero alto C, acero inox., etc)

Imagen 11: Cociente del material

El acero seleccionado es un acero inoxidable medio, por lo que el A_c seleccionado es 0,06. Por tanto el valor de la holgura:

$$c = 0,06 \cdot 3 = 0,18mm$$

Dicho resultado se debe de aplicar a cada lado de la matriz. Es decir, en el caso del punzón circular de 3mm de diámetro que se utiliza en la primera estación, el diámetro del agujero de la matriz debe de ser de 3,36mm. Ninguno de los punzones se considera como un corte de contorno, por lo que la holgura se debe de aplicar a los orificios de la matriz.



Imagen 12: Holgura entre punzón y matriz

3.3.2 FUERZAS

Para transformar el fleje en piezas finales durante el proceso se hacen varias operaciones de corte y doblado. En cada acción, los esfuerzos que hacen falta son diferentes puesto que dependen del perímetro de cada orificio.

Por ello, se realizara el cálculo de los esfuerzos que hacen falta en cada estación y para cada corte. Dejando de lado el perímetro, hay que tener en cuenta otros dos valores que en todo momento son constantes. Estos están relacionados con las propiedades del material, que son la resistencia a la cizalladura del material y del espesor de la chapa.

$$\sigma_c = 588 \frac{N}{mm^2}$$

$$e = 3mm$$

La fuerza de corte en chapa se consigue a partir de la siguiente ecuación matemática.

$$F_{corte} = \sigma_c \cdot P \cdot e [N]$$

Por tanto se mostrarán las fuerzas necesarias en cada estación:

- **Estación 1**

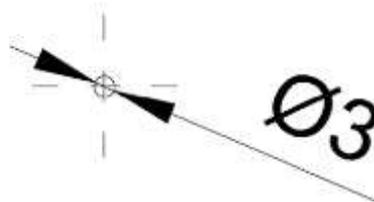


Imagen 13: Corte circular de la primera estación

$$P = 9,425mm$$

$$F_{c1} = 16.625,7N \approx 16,63kN (x12)$$

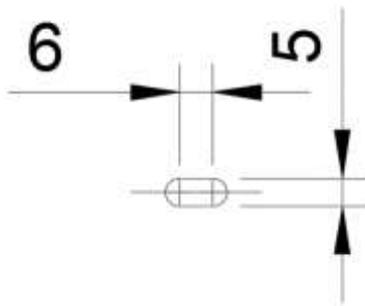


Imagen 14: Corte de la primera estación

$$P = 27,708mm$$

$$F_{c2} = 48.876,912N \approx 48,88kN (x2)$$

- **Estación 2**

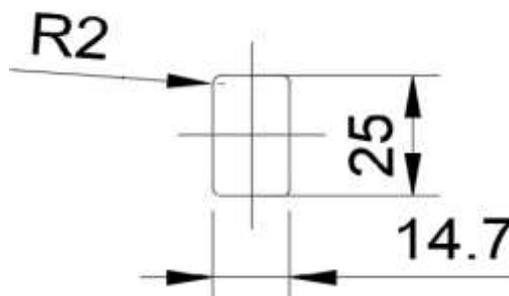


Imagen 15: Corte de la segunda estación

$$P = 75,966mm$$

$$F_{c3} = 134.004,024N \approx 134kN (x4)$$

- **Estación 3**

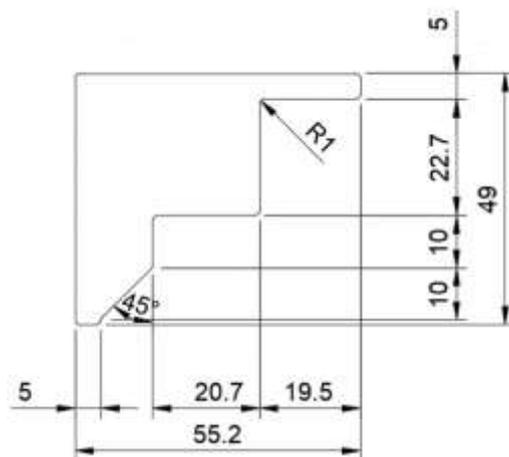


Imagen 16: Corte de la tercera estación

$$P = 199,026mm$$

$$F_{c4} = 351.081,864N \approx 351,86kN (x2)$$

- **Estación 3-4**

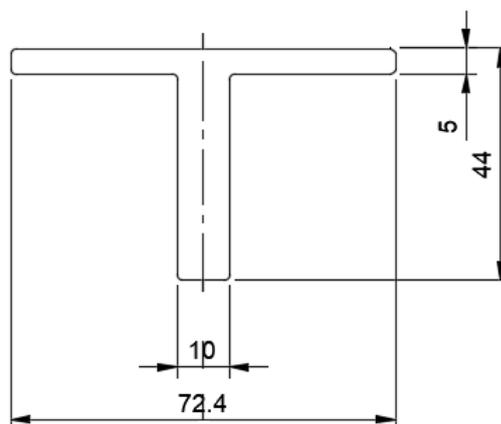


Imagen 17: Corte de la estación 3-4

$$P = 229,366mm$$

$$F_{c5} = 404.601,624N \approx 404,6kN (x2)$$

- **Estación 4**

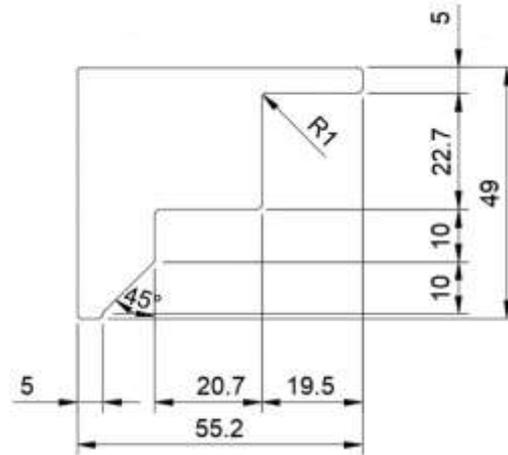


Imagen 18: Corte de la cuarta estación

$$P = 199,026mm$$

$$F_{c6} = 351.081,864N \approx 351,08kN (x2)$$

- **Estación 6**

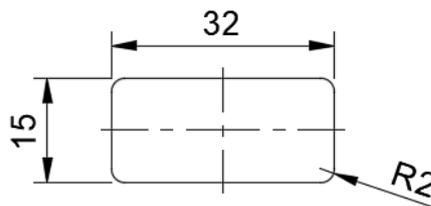


Imagen 19: Corte de la sexta estación

$$P = 90,566mm$$

$$F_{c7} = 159.758,424N \approx 159,76kN (x2)$$

- **Estación 7**

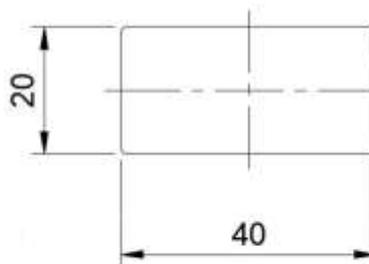


Imagen 20: Corte de la séptima estación

$$P = 118,283mm$$

$$F_{c8} = 208.651,212N \approx 208,65kN (x1)$$

3.3.3 FUERZAS DE EXTRACCIÓN

Para el cálculo de la fuerza de extracción se coge como referencia la fuerza de corte, ya que se aproxima al 10% de este. Debido a esto en cada estación el valor será diferente.

Cada esfuerzo se definirá por estaciones y por cada punzón. Por tanto:

- **Estación 1**

$$F_{ext1} = 1.662,57N \approx 1,67kN (x12)$$

$$F_{ext2} = 4.887,691N \approx 4,89kN (x2)$$

- **Estación 2**

$$F_{ext3} = 13.400,402N \approx 13,4kN (x4)$$

- **Estación 3**

$$F_{ext4} = 35.108,186N \approx 35,11kN (x2)$$

- **Estación 3-4**

$$F_{ext5} = 40.460,162N \approx 40,46kN (x2)$$

- **Estación 4**

$$F_{ext6} = 35.108,186N \approx 35,11kN (x2)$$

- **Estación 6**

$$F_{ext7} = 15.975,842N \approx 15,98kN (x2)$$

- **Estación 7**

$$F_{ext8} = 20.865,121N \approx 20,87kN (x1)$$

Una vez calculados las fuerzas de extracción de cada punzón, se hará el sumatorio, para saber cuál es el total del esfuerzo.

$$F_{ext}(TOTAL) = \sum F_{ext} = 354.172,568N \approx 354,17kN$$

3.3.4 FUERZAS DE EXPULSIÓN

La fuerza de expulsión hace referencia a la fuerza que se debe ejercer para la extracción el recorte que se ha hecho en cada operación de corte. Este valor se aproxima al 1,5% del esfuerzo que se ha tenido que hacer en el punzonado.

Como en los anteriores casos se calculara la fuerza que hay que hacer en cada estación y por punzón.

- **Estación 1**

$$F_{exp1} = 249,386 \approx 0,249kN (x12)$$

$$F_{exp2} = 733,154N \approx 0,733kN (x2)$$

- **Estación 2**

$$F_{exp3} = 2010,06N \approx 2,01kN (x4)$$

- **Estación 3**

$$F_{exp4} = 5.266,228N \approx 5,266kN (x2)$$

- **Estación 3-4**

$$F_{exp5} = 6.069,024N \approx 6,069kN (x2)$$

- **Estación 4**

$$F_{exp6} = 5.266,228N \approx 5,266kN (x2)$$

- **Estación 6**

$$F_{ext7} = 2.396,376N \approx 2,396kN (x2)$$

- **Estación 7**

$$F_{ext8} = 3129,768N \approx 3,13kN (x1)$$

3.3.5 RESUMEN DE FUERZAS POR ESTACIONES

ESTACIONES	Numero de punzones	Fc [N]	Fext [N]	Fexp [N]
1	12	16625,7	1662,57	249.154
	2	48876,91	4,887,691	733.154
2	4	134004,02	13,400,402	2010.06
3	2	351081,86	35,108,186	5266.228
3 4	2	404601,62	40,460,162	6069.024
4	2	351081,86	35,108,186	5266.228
5	0	0	0	0
6	2	159758,42	15,975,842	2396.376
7	1	208651,21	20,865,121	3129.768

Tabla 3: Resumen de fuerzas de corte

3.3.6 DISTANCIA MINIMA DE PUNZONADO

Con la intención de preservar la forma requerida de cada orificio, debe siempre de tenerse en cuenta la distancia que hay entre el extremo más próximo del agujero y la cara interior del doblado. Para la obtención de la distancia mínima se utiliza una ecuación, la cual relaciona el radio mínimo del doblado y el espesor de la chapa.

$$d = r + 2 \cdot e$$

Donde:

$r \rightarrow$ radio de la cara interior del doblado (mm)

$e \rightarrow$ espesor de la chapra (mm)

Teniendo en cuenta que en nuestro caso el valor del radio es de 3mm y el espesor es de 3mm, se concluye que el valor de dicha distancia es 9mm.

Se tiene que comprobar también que cada corte no esté a menos de 9 milímetros, por lo que se analiza la pieza. En el caso de la pieza de este proyecto hay dos orificios en los que se puede incumplir la norma.



Imagen 21: Distancia del primer corte hasta cara interior del doblado

$$d = 9,5\text{mm} > 9\text{mm} \rightarrow \text{Cumple el requisito}$$

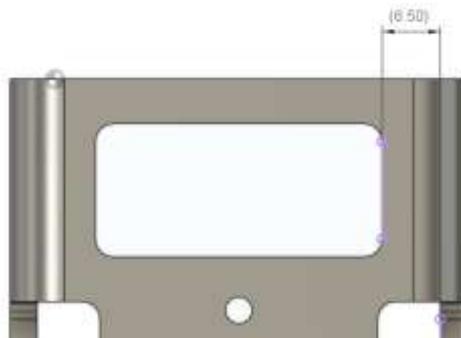


Imagen 22: Distancia del séptimo corte hasta cara interior del doblado

$$d = 6,5\text{mm} < 9\text{mm} \rightarrow \text{No cumple el requisito}$$

Como se puede observar en el primer caso cumple la distancia mínima por lo que el corte se puede ejecutar antes del doblado sin sufrir ningún tipo de deformación. En el segundo caso sin embargo no cumple el requisito; en este caso la operación tiene que realizarse después del doblado de esa ala, ya que como se ha explicado anteriormente podría sufrir deformaciones y se consideraría como un error.

3.4 DOBLADO

3.4.1 PARAMETROS FUNDAMENTALES

3.4.1.1 Radio mínimo de doblado

La obtención del radio mínimo en un proceso de doblado está directamente relacionado con las propiedades del material.

Mediante la siguiente ecuación se consigue una aproximación adecuada, con la cual se lograría el radio de doblado necesario.

$$r_{min} = e \cdot \left(0,085 \cdot \frac{\sigma_u}{\varepsilon_r} + 0,5 \right)$$

Donde:

$e \rightarrow$ espesor de la chapa (mm)

$\sigma_u \rightarrow$ tensión de rotura (MPa)

$\varepsilon_r \rightarrow$ alargamiento a la rotura (%)

Se decide utilizar un radio mínimo que equivale al grosor del material, ya que simplifica el cálculo de dicho parámetro y en su ejecución no va a dar ningún problema.

Teniendo esto en cuenta y sabiendo que el espesor de la chapa es de 3mm.

Entonces:

$$r_{min} = 3mm$$

3.4.1.2 Desarrollo de la chapa

El cálculo del desarrollo de la chapa doblada depende de la posición de la línea neutra. Dicha línea es la distancia que hay desde el interior de la curva de doblado hasta el punto que la chapa no sufrirá ningún tipo de tensión.

Con la ayuda de la siguiente tabla se obtendrá la distancia a tener en cuenta para la línea neutra. Para ello se utiliza una relación del radio de doblado de la cara interior y el espesor de la chapa.

$$\frac{r}{e} = \frac{3}{3} = 1$$

r/e	K
0,2	0,347
0,5	0,387
1	0,421
2	0,451
3	0,465
4	0,47
5	0,478
10	0,487

Tabla 4: Obtención del cociente para la línea neutra

Sabiendo que la relación es igual a 1, mediante la tabla se obtiene que el cociente es de 0,421. Por lo que el valor de la línea neutra es la siguiente:

$$x = e \cdot K$$

$$x = 3 \cdot 0,421 = 1,263mm$$

Teniendo en cuenta el valor obtenido, se continúa para saber cuál es la longitud de la línea neutra; con lo que se conseguirá la dimensión inicial de la chapa necesaria para la realización de la pieza final. El cálculo de este se logra mediante la siguiente ecuación:

$$L_{ab} = \alpha \cdot (r_i + x)$$

Donde:

$\alpha \rightarrow$ ángulo del doblado (rad)

$r_i \rightarrow$ radio de doblado de la cara interior (mm)

$x \rightarrow$ Distancia de la línea neutra (mm)

Por lo tanto, si:

$$\alpha = 90^\circ \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$r_i = 3mm$$

$$x = 1,263mm$$

Se consigue:

$$L_{ab} = 90^\circ \cdot \frac{\pi}{180} \cdot 3 \cdot 1,263 = 6,696mm$$

Entonces el desarrollo de la pieza a construir:

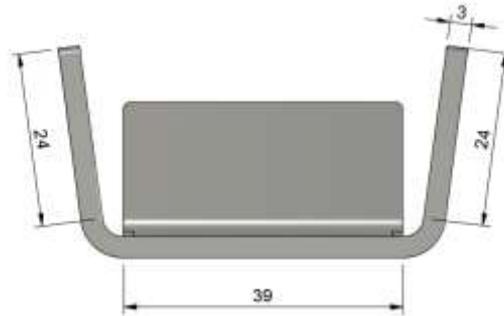


Imagen 23: Vista de la pieza por detrás

$$L_{ancho} = 2 \cdot 24 + 39 + 2 \cdot 6,696 = 100,4mm$$

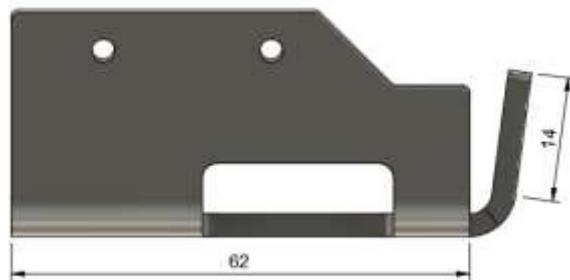


Imagen 24: Vista de la pieza de perfil

$$L_{longitud} = 62 + 6,696 + 14 = 82,7mm$$

3.4.1.3 Holgura entre punzón y matriz

Se necesita una cierta holgura entre el punzón y la matriz para facilitar la fluencia del material. Un valor correcto se puede considerar el 10% del espesor de la chapa. A partir de la ecuación:

$$H = 1,1 \cdot e$$

Sabiendo que el espesor es de 3mm. Entonces:

$$H = 3,3mm$$

3.4.1.4 Springback

Debido a las características mecánicas del material, al doblarlo, se crea un fenómeno de recuperación elástica; por lo que si se quiere conseguir un ángulo específico se deberá de doblar con un ángulo superior.

Para el cálculo de dicho ángulo se utiliza una ecuación en la cual se utiliza la relación de la zona elástica del material y el valor obtenido con la división del radio interior de doblado y el espesor de la chapa.

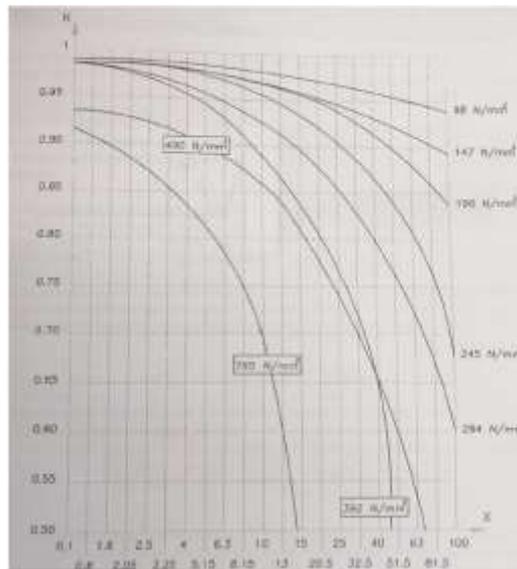


Gráfico 1: Cociente para el cálculo del ángulo

Sabiendo que el material tiene un límite de 588N/mm^2 y la división del radio y el espesor es de 1, ya que los dos valores son de 3mm. El cociente que se obtendrá es de 0,916.

Entonces, en la ecuación siguiente:

$$\varphi^\circ = \frac{180^\circ - \alpha^\circ}{K}$$

Siendo:

$\alpha^\circ \rightarrow$ ángulo a conseguir

$K \rightarrow$ cociente obtenido por la relación

El resultado es:

$$\varphi^\circ = \frac{180^\circ - 97,5^\circ}{0,916} = 90^\circ$$

Por lo que para lograr un ángulo de 97,5° se tendrá que doblar 90°.

3.4.2 FUERZAS

3.4.2.1 Fuerzas del doblado

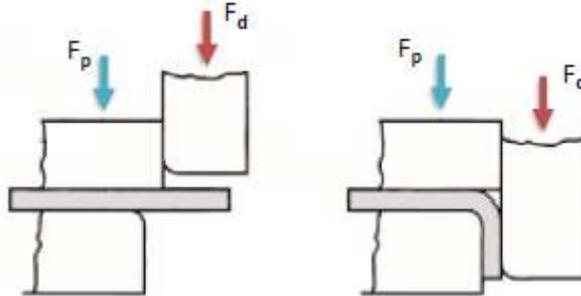


Imagen 25: Doblado en L

El cálculo para la fuerza del doblado depende de la forma que vá a tener éste. En el caso que nos concierne es de tipo L, por lo que la ecuación aplicada para la obtención es la siguiente:

$$F_d = \frac{\sigma_{dp} \cdot b \cdot e}{6}$$

Donde:

$\sigma_{dp} \rightarrow$ Tension para la deformación permanente $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$

$b \rightarrow$ longitud de pliegue (mm)

$e \rightarrow$ espesor de la chapa (mm)

La tensión para lograr la deformación permanente se puede considerar el doble de la resistencia que tiene el material hacia un esfuerzo a tracción. Teniendo en cuenta que para este caso el material utilizado tiene un límite a tracción de 588 N/mm².

En el caso de las alas laterales de la pieza, con una longitud de pliegue de 60mm.

$$F_d = \frac{2 \cdot 588 \cdot 60 \cdot 3}{6}$$

$$F_{d \text{ lateral}} = 35.280N$$

La longitud del doblado frontal es de 39mm, por lo que:

$$F_d = \frac{2 \cdot 588 \cdot 39 \cdot 3}{6}$$

$$F_{d \text{ frontal}} = 22.932N$$

Las fuerzas obtenidas son las fuerzas verticales que se necesitan para lograr un doblado de cada tipo explicado anteriormente, es decir, el doblado lateral y el frontal. Pero en la estación diseñada para llevar a cabo esta operación, se deben ejercer simultáneamente 4 doblados laterales y dos frontales. Entonces la fuerza total que se necesita aplicar es la siguiente:

$$F_d(TOTAL) = 4 \cdot 35280 + 2 \cdot 22932 = 186.984N \approx 187kN$$

3.4.2.2 Fuerzas del pisador

Para la obtención de la fuerza optima que necesita ejercer el pisador, se estima entre un 10% y un 40% de la fuerza total del doblado. Con la intención de asegurar la operación, se opta por el máximo. Por lo que:

$$F_p = 0,4 \cdot 187 = 74,8kN$$

3.5 FUERZA DE LA PRENSA Y POSICIÓN DEL VÁSTAGO

3.5.1 FUERZA DE LA PRENSA

La prensa es una de las partes importantes del proceso, ya que es fundamental para que el conformado de chapa se ejecute correctamente. Una de las cosas que se debe de tener en cuenta, es que las operaciones no se llevan a cabo en un mismo instante, por el hecho de tener punzones de diferentes longitudes, con la intención de disminuir tensiones y reducir la potencia necesaria de la prensa misma.

La fuerza de la prensa se consigue mediante la suma de la fuerza máxima ejercida y la fuerza que realizan los muelles en el punto de máxima contracción.

Con la intención de rebajar la potencia y hacer un proceso donde el troquel no sufra tanto, se han diseñado punzones de diferentes longitudes, con lo que se conseguirá que las operaciones se produzcan en diferentes momentos.

Tras los cálculos de las fuerzas que se necesitan para cada operación, como se puede observar en el apartado 3.3.2 FUERZAS, se determina que la mayor fuerza se aplica entre la tercera y cuarta estación; en los punzones con forma de T, que realizan el corte parcial del perímetro. Como en este proceso hay dos punzones de ese tipo, que realizan

la acción simultáneamente, el valor de la fuerza hay que multiplicarlo por dos. Dicho valor es de 404.601,624N; junto con ello se tiene en cuenta la fuerza ejercida por los expulsores. La fuerza realizada por los muelles extractores, también son datos a tener en cuenta, ya que gracias a estos, los punzones son elevados a la posición inicial.

$$F_{\max\text{proceso}} = F_{\max} + F_{\text{ext}}(TOTAL)$$

$$F_{\max\text{proceso}} = 2 \cdot (404.601,624 + 6.069,024) + 354.172,568$$

$$F_{\max\text{proceso}} = 1.175.519,864N \approx 1.175,52kN$$

Por fiabilidad del troquel diseñado, se aplica un factor de seguridad del 70%, por tanto:

$$F_{\text{prensa}} = 1,3 \cdot 1.175,52 = 1.528,17kN$$

Para la elección de la prensa la fuerza se tiene que convertir en toneladas, por lo que, si 1kg =9,81N:

$$F_{\text{prensa}} = 1.528,17kN \cdot \frac{1000N}{1kN} \cdot \frac{1kg}{9,81N} \cdot \frac{1t}{1000kg}$$

$$F_{\text{prensa}} = 155,77t$$

La prensa escogida para llevar a cabo el trabajo debe de ser mayor que 160 toneladas, para ser capaz de transmitir la fuerza suficiente o necesaria.

3.5.2 POSICIÓN DEL VASTAGO

A la hora de situar el vástago del troquel, es necesario saber la posición de los punzones, ya que la función de este es resistir las fuerzas que ejercen los punzones cuando cortan la chapa. Al mismo tiempo se consigue que no se produzcan momentos, con los que el troquel se inclinaría.

El vástago se colocara en el centro de presiones; para ello se tiene en cuenta el centro de gravedad de cada punzón y la fuerza del mismo.

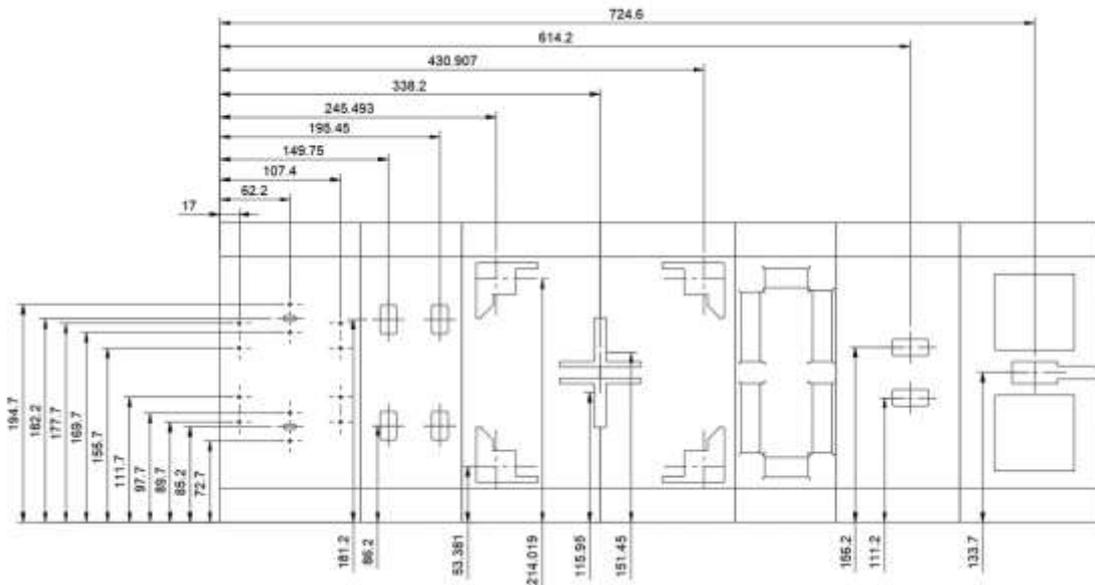


Imagen 26: Posicionamiento del centro de gravedad de las fuerzas desde sistema de referencia

Mediante las siguientes formulas se calculara el centro de presión de todas las operaciones de corte.

$$x_G = \frac{x_1 \cdot F_1 + x_2 \cdot F_2 + x_3 \cdot F_3 + \dots + x_n \cdot F_n}{F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n}$$

$$y_G = \frac{y_1 \cdot F_1 + y_2 \cdot F_2 + y_3 \cdot F_3 + \dots + y_n \cdot F_n}{F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n}$$

Para facilitar el cálculo de dicho centro se utiliza el Excel, ya que se aplican muchas fuerzas en diferentes coordenadas.

N	F[N]	x[mm]	y[mm]	F_x	F_y
F1	16,625.70	17.00	89.70	282,636.90	1,491,325.29
F2	16,625.70	17.00	111.70	282,636.90	1,857,090.69
F3	16,625.70	17.00	155.70	282,636.90	2,588,621.49
F4	16,625.70	17.00	177.70	282,636.90	2,954,386.89
F5	16,625.70	62.20	72.70	1,034,118.54	1,208,688.39
F6	16,625.70	62.20	97.70	1,034,118.54	1,624,330.89
F7	16,625.70	62.20	169.70	1,034,118.54	2,821,381.29
F8	16,625.70	62.20	194.70	1,034,118.54	3,237,023.79
F9	16,625.70	107.40	89.70	1,785,600.18	1,491,325.29
F10	16,625.70	107.40	111.70	1,785,600.18	1,857,090.69
F11	16,625.70	107.40	155.70	1,785,600.18	2,588,621.49
F12	16,625.70	107.40	177.70	1,785,600.18	2,954,386.89
F13	48,876.91	62.20	85.20	3,040,143.93	4,164,312.90
F14	48,876.91	62.20	182.20	3,040,143.93	8,905,373.37
F15	134,004.02	149.75	86.20	20,067,102.59	11,551,146.87
F16	134,004.02	149.75	181.56	20,067,102.59	24,329,100.58
F17	134,004.02	195.45	86.20	26,191,086.49	11,551,146.87
F18	134,004.02	195.45	181.56	26,191,086.49	24,329,100.58
F19	351,081.86	245.49	53.38	86,188,140.04	18,741,100.98
F20	351,081.86	245.49	214.02	86,188,140.04	75,138,189.45
F21	404,601.62	338.20	114.80	136,836,269.24	46,448,266.44
F22	404,601.62	338.20	152.60	136,836,269.24	61,742,207.82
F23	351,081.86	430.91	53.38	151,283,632.77	18,741,100.98
F24	351,081.86	430.91	214.02	151,283,632.77	75,138,189.45
F25	159,758.42	614.20	111.20	98,123,624.02	17,765,136.75
F26	159,758.42	614.20	156.20	98,123,624.02	24,954,265.83
F27	208,651.21	724.60	133.70	151,188,668.22	27,896,667.04
F(TOTAL)=	3,574,977.08				
CP				337.64	133.73

Imagen 27: Calculo dl centro de presiones (CP)

Una vez realizado los cálculos pertinentes, el vástago se colocará desde la esquina inferior izquierda de la primera estación a 337.64mm en el eje X y a 133,73mm en el eje Y. Aunque se ha utilizado el Excel, en el caso del eje Y al ser simétrico, se puede saber desde el inicio que el centro estará en la mitad.

3.6 DIMENSIONADO DE LOS ELEMENTOS

3.6.1 MATRIZ

La matriz es uno de los elementos más importantes, ya que este es el que soporta los esfuerzos realizados por los punzones. Por lo tanto, para poder aguantar las cargas sin sufrir un desgaste acelerado y ser económicamente razonable, se aplica una ecuación

con la que se obtendrá el espesor mínimo necesario para que esto suceda. Este valor está relacionado con el total de la fuerza de corte.

Cogiendo dicho valor del apartado anterior, que en este caso es de 3.574,98kN, y aplicando la fórmula:

$$e_{min} = 0,6 \cdot \sqrt[3]{F_c}$$

Donde:

e_{min} → *Minimo espesor de la matriz (mm)*

F_c → *Fuerza de corte total (daN)*

Se logra un valor de:

$$e_{min} = 0,6 \cdot \sqrt[3]{3.574,98 \cdot 100}$$

$$e_{min} = 42,58mm$$

Con la intención de ir sobre seguro y alargar la vida útil de la matriz el espesor de la matriz se redondeará a 45mm.

Otro parámetro a tener en cuenta es la distancia mínima desde la arista de corte a otro elemento o borde, ya que al aplicar una fuerza elevada, la matriz podría sufrir una deformación. Con ese fin se aplica la siguiente ecuación matemática, que está relacionada con el espesor de la matriz seleccionada:

$$a_{min} = 1,5 \cdot e_{matriz}$$

Por tanto:

$$a_{min} = 1,5 \cdot 45 = 67,5mm$$

Finalmente, para lograr la optimización de la matriz, se le da el valor a la zona donde se realizará la cizalladura, considerado la vida de la matriz, ya que es la zona donde más desgaste va a haber. Dicho valor oscila entre los cuatro y ocho milímetros, y se suele escoger dependiendo de la producción que tiene el troquel diseñado. En este caso se considera que va a tener una producción de nivel medio, por lo que el valor escogido para la vida de la matriz será de 6mm.

En la matriz después de dicha vida se le debe de dar un ángulo de escape para la chatarra, ya que la expulsión de la chatarra es tan importante como el corte. Si la comentada chatarra no se extrae adecuadamente se puede atascar la matriz y como consecuencia puede acarrear la parada de la producción. Por eso el ángulo que se empleara en este proyecto será de 2°.

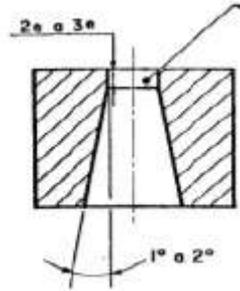


Imagen 28: Vida de la matriz y ángulo de escape

3.6.2 PUNZONES

A la hora de dimensionar los punzones, primero de todo se calcula la fuerza que necesitará ejercer el mismo. Como las fuerzas aplicadas son a compresión, corren el riesgo de sufrir deformaciones, o en el peor de los casos la rotura completa por el fenómeno de pandeo, o flexión lateral. Por lo que se calculará la longitud máxima que debe de tener cada uno de los punzones.

La ecuación que se utilizará para el cálculo, como se ha mencionado anteriormente será la que estudia el pandeo. Para esto, hay que tener en cuenta qué tipo de pandeo va a sufrir, es decir, cómo se comportará el punzón a la hora de empezar con el esfuerzo.

Para conseguir la formula directa de la longitud máxima, se utilizara la fórmula de Euler:

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 \cdot E \cdot I$$

$$L_k = 2 \cdot L$$

Donde:

$L \rightarrow$ Longitud real del punzón (mm)

$L_k \rightarrow$ Longitud de pandeo (mm)

$E \rightarrow$ Modulo de elasticidad utilizado en el punzón (GPa)

$I \rightarrow$ Momento de inercia (mm^4)

Por lo que se consigue la siguiente:

$$L_{max} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{N_{cr}}}$$

Primero se tiene que analizar cuál es el punzón más crítico. En este troquel progresivo es el que realiza el orificio circular de la primera estación, ya que los otros punzones por la geometría que tienen no sufrirán ningún tipo de riesgo para el fenómeno que se va a estudiar. El diámetro de este es de 3mm, por lo que a partir de este valor se empezara el cálculo:

$$I = \frac{\pi \cdot 3^4}{64} = 3,976mm^4$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

La fuerza que ejerce este tipo de punzón, se ha calculado en el apartado 3.3.2 **FUERZAS**, donde:

$$N_{cr} = F_{c1} = 16625,7N$$

Finalmente:

$$L_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 210 \times 10^3 \cdot 3,976}{16625,7}} = 44,52mm$$

La longitud que se necesitaría para adaptarse a las dimensiones del troquel seria mayor, por lo que se decide ampliar la sección del punzón en un tramo. Así se conseguiría el agujero requerido, pero sin el riesgo de sufrir ningún tipo de deformación permanente o rotura. La longitud total para el punzón estudiado de la primera estación será de 100mm.

Teniendo este valor como referencia, los siguientes punzones tendrán una mayor longitud, donde la longitud de cada punzón ira en aumento; logrando una progresión en los cortes, para que ni la chapa, ni la matriz sufran.

Finalmente se especificara por estaciones para que se utiliza cada punzón, la longitud de la misma y la fuerza que ejerce.

- Estación 1

En el primer paso del conformado de chapa se utilizaran dos tipos de punzones, con los que se lograrán los agujeros más pequeños de la pieza.

Uno de ellos será el que realiza el orificio circular. Se realizaran 12 orificios simultáneamente, ejerciendo una fuerza de 16.625,7N. La longitud de la misma es de 100mm.

El segundo tipo de punzón hará dos orificios centrales, necesitando ejercer una fuerza de 48.876,912N y con una longitud de 102mm.

Por lo que la fuerza total que hará este tipo de punzón en la primera estación es de:

$$F_{estacion1} = 16.625,7 \cdot 12 + 48.876,912 \cdot 2$$

$$F_{estacion1} = 297.262,224N \approx 297,3kN$$

- Estación 2

En este paso se realizan los cortes que interactuarán con el doblado de las alas laterales, que sirven para reducir el peso de la pieza final. Simultáneamente se realizan cuatro cortes con una fuerza de 134.004,024N, con una longitud del punzón de 104mm.

$$F_{estacion2} = 134.004,024 \cdot 4$$

$$F_{estacion2} = 536.016,096N \approx 536,02kN$$

- Estación 3

En esta estación se empezará a dar forma a la pieza, logrando la geometría exterior de la pieza. En estos cortes hay que tener en cuenta las tolerancias, para lograr las dimensiones más exactas posibles.

Para lograr esto, se utilizan dos punzones con la misma geometría pero con diferentes longitudes. Uno tendrá una longitud de 106mm mientras que el otro tendrá 110mm, pero en ambos casos realizan una fuerza de 351.081,864N.

Con una fuerza total:

$$F_{estacion3} = 351.081,864 \cdot 2$$

$$F_{estacion3} = 702.163,728N \approx 702,2kN$$

- Estación 3-4

Se continúa con la geometría exterior, mediante unos punzones en forma de T. Estos son los que ejercen la mayor fuerza en todo el proceso, por lo que muchos es una fuerza a tener en cuenta.

La fuerza de este es de 404.601,624N, y se realizan dos cortes. Por lo que la fuerza total ejercida en esta estación es de:

$$F_{estacion3/4} = 404.601,624 \cdot 2$$

$$F_{estacion3/4} = 809.203,248N \approx 809,2kN$$

Y la longitud de este punzón es de 108mm.

- Estación 4

En este caso se repetirían los mismos punzones de la tercera estación, por lo que las fuerzas y las longitudes de las mismas son iguales.

$$F_{estacion4} = 702.163,728N \approx 702,2kN$$

- Estación 5

En este paso, se sigue con el doblado de las alas laterales y el ala frontal. Para ello se utiliza un punzón que en la parte inferior tiene unos redondeos, que son los mismos que debe de tener la pieza en la parte interior del doblado. Tiene una longitud de 95mm, la más corta de todas, ya que tiene que realizar el doblado, mientras que los otros punzones hacen los cortes necesarios.

Para lograr el óptimo doblado debe de realizar una fuerza total de 186.984N ≈ 187kN.

$$F_{estacion5} = 186.984N \approx 187kN$$

- Estación 6

Para lograr la pieza tal y como queremos, se harán los últimos dos cortes. Estos cortes se realizan tras el doblado ya que podría haber deformaciones, y con la intención de evitar se realizan en este paso.

Para cada corte hará falta una fuerza 159.758,424N, es decir un total de:

$$F_{estacion6} = 159.758,424 \cdot 2$$

$$F_{estacion6} = 319.516,848 \approx 319,5kN$$

La longitud del punzón será de 114mm.

- Estación 7

Finalmente, mediante un único corte, se conseguirán las piezas, que caerán por una rendija. Con un punzón de 116mm se aplicara una fuerza de 208.651,121N, consiguiendo el corte necesario.

$$F_{estacion7} = 208.651,121 \approx 208,7\text{kN}$$

3.6.3 MUELLES

Los muelles se utilizan para lograr la extracción de los punzones tras realizar el corte en la chapa.

Para la correcta selección de los muelles, se hace mediante la fuerza de extracción calculado en el apartado 3.3.3 *FUERZAS DE EXTRACCIÓN*. Dicha fuerza en este troquel es de 357,5kN. Con el catálogo de muelles normalizados y sus respectivas capacidades de esfuerzo, se decide cual es el más adecuado o el más conveniente.

Una vez seleccionado el muelle y teniendo en cuenta los parámetros mencionados anteriormente, se aplica la siguiente ecuación para saber cuántos de esos muelles hace falta para cumplir su función.

$$N = \frac{F_{ext}(TOTAL)}{F_{muelle}}$$

Donde:

$N \rightarrow$ Numero de muelles

$F_{ext}(TOTAL) \rightarrow$ Fuerza de extraccion total (N)

$F_{muelle} \rightarrow$ Fuerza que ejerce el muelle en su maxima compresión (N)

Por tanto:

$$N = \frac{357.497,708}{9474} = 37,73 \approx 38$$

Las dimensiones del muelle seleccionado son de 32mm de diámetro y 127mm de longitud, como bien se ve en el catálogo. Dichos elementos se colocan entre la placa guía y la placa superior, ya que entre esos dos se colocan los punzones.