



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**Determinación de la fuerza mínima de sujeción de la chapa metálica
para el proceso de punzonado de multiniveles.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA ESPECIALIDAD DE
DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECÁNICOS.**

PRESENTA

Ing. José Ruiz Luna.

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. AGOSTO 2017

Agradecimientos:

Primeramente agradezco a Dios por permitirme vivir este momento, agradezco a mis hijas Melanie y Camila por ser el motivo para seguir adelante, agradezco a mi familia por el apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, agradezco a mis asesores de tesis por la paciencia y finalmente agradezco a todas esas personas que participaron de algún modo en el desarrollo de este proyecto.

Resumen:

El presente trabajo presenta un estudio para determinar las condiciones dinámicas de un proceso de punzonado aplicando la técnica de multiniveles, este estudio se realiza a través del diseño, fabricación, instrumentación y pruebas de laboratorio de un herramental de corte. La experimentación se llevó a cabo con diferentes velocidades de corte en un rango de 3 m/min a 12 m/min. Se ha definido valores teóricos de fuerza en un rango de 2 Tf a 12 Tf, claro de corte de 0.07 mm, diámetro de punzón de 10 mm, 8 punzones de corte, 3 número de niveles en los punzones, espesor de la chapa metálica de 1 mm. Asimismo se lleva a cabo un exhaustivo análisis de las micro – deformaciones recopiladas para determinar el esfuerzo y posteriormente la fuerza de corte en cada punzón y la fuerza mínima aplicada en el pisador. Se observó que la fuerza de corte en cada punzón fue muy cercana a la fuerza calculada de manera teórica; es decir, la fuerza teórica es de 0.95 Tf para cada punzón; mientras que, la fuerza detectada por las galgas resultó de 1.1 Tf. Sin embargo, la fuerza mínima del pisador aplicando la técnica de multiniveles es diferente a la fuerza del pisador calculada de manera teórica; se determinó que la fuerza de pisador aplicando la técnica de multiniveles es un porcentaje de la fuerza del pisador para un proceso de punzonado convencional que oscila del 34% al 51%. La fuerza teórica del pisador calculada fue de 2.28 Tf y la fuerza del pisador detectada por las galgas es de 1.11 Tf. Adicionalmente, se elaboraron gráficas de fuerza de punzonado contra carrera de la prensa y velocidad de la prensa para facilitar la interpretación y aplicación de los resultados. Para corroborar los valores, se realizó un análisis del proceso de punzonado utilizando el método de elemento finito, se observó coincidencia contra los resultados experimentales.

Summary:

The present work presents a study to determine the dynamic conditions of a punching process applying the multilevel technique; this study is realized through the design, manufacture, instrumentation and laboratory tests of a cutting tool. The experimentation was carried out with different cutting speeds in a range of 3 m / min to 12 m / min. Theoretical values of force have been defined in a range of 2 Tf to 12 Tf, cut clearance of 0.07 mm, punch diameter of 10 mm, 8 cutting punches, 3 number of levels in the punches, thickness of the metal sheet of 1 mm. Likewise, an exhaustive analysis of the micro - deformations collected is carried out to determine the force and then the cutting force in each punch and the minimum force applied in the strip holder. It was observed that the shear force in each punch was very close to the theoretically calculated force; That is, the theoretical force is 0.95 Tf for each punch; while the force detected by the gauges resulted from 1.1 Tf. However, the minimum force of the strip holder applying the multi-level technique is different from the theoretically calculated for strip holder force; It was determined that the strip holder force applying the multilevel technique is a percentage of the strip holder force for a conventional punching process ranging from 34% to 51%. The theoretical force of the calculated for strip holder was 2.28 Tf and the force of the strip holder detected by the gauges is 1.11 Tf. Additionally, punch force graphics were developed against press stroke and press speed to facilitate the interpretation and application of the results. In order to corroborate the values, an analysis of the punching process was performed using the finite element method, coincidence was observed against the experimental results.

Índice

Capítulo I

1.1	Introducción	1
1.2	Planteamiento del problema:	2
1.2.1	Fuerza de punzonado (P).....	3
1.2.2	Fuerza de separación (Ps).....	4
1.2.3	Energía de punzonado (E).....	4
1.3	Justificación:	5
1.4	Objetivo General:	6
1.4.1	Objetivos específicos:	6
1.5	Antecedentes:.....	7
1.6	Hipótesis:.....	9

Capítulo II

2.1	Marco Teórico	11
2.1.1	Cortante directo	11
2.1.2	Esfuerzo de apoyo	13
2.1.3	Desgarro	14
2.2	El proceso de Punzonado	15
2.3	Análisis del proceso de punzonado.	16
2.3.1.	Mecánica del corte	16
2.3.2.	Fuerzas en el punzonado.....	21
2.3.3.	Desgaste de la herramienta	26
2.3.4.	Precisión de las piezas punzonadas	29
2.4	Cálculo de la fuerzas de transformación del proceso de troquelado.	33
2.4.1	Corte y troquelado.	33
2.5	Punzonado de múltiples niveles	36
2.5.1	Calculo de capacidades	37

Capítulo III

3.1	Determinación de las variables principales que impactan en el proceso de punzonado de multiniveles y establecer condiciones de frontera de acuerdo a los recursos disponibles para la investigación.	41
------------	---	-----------

3.2	<i>La prensa</i>	41
3.2.1	<i>Velocidad de la prensa</i>	43
3.2.2	<i>Capacidad de la prensa</i>	46
3.2.3	<i>Energía de la prensa</i>	49
3.3	<i>El herramental</i>	54
3.3.1	<i>Configuración de la cara de corte</i>	58
3.3.2	<i>Claro de corte</i>	59
3.3.3	<i>Ángulo de corte</i>	65
3.4	<i>El material o materia prima</i>	67
3.4.1	Valor “r”.....	68
3.4.2	Valor “n”.....	71
3.5	<i>El producto final</i>	71

Capítulo IV

4.1.	Diseño, fabricación, instrumentación, experimentación del herramental y obtención de micro – deformaciones en cada galga extenso – métrica.	80
4.2	Diseño del herramental de prueba.....	80
4.3	Fabricación del Herramental de prueba.....	89
4.4	Instrumentación de herramental de punzonado.....	90
4.5	Pruebas de herramental en prensa Servo Komatsu.....	93
4.6	Análisis y presentación de los resultados obtenidos con galgas extenso – métricas.....	94
4.7	Resultados del análisis utilizando la técnica de elemento finito.....	97
4.8	Análisis de resultados obtenidos con galgas extenso – métricas.....	98

Capítulo V

5.1	Conclusiones	105
5.2	Bibliografía	106

Índice de figuras:

Índice de tablas

Índice de gráficas.

Capítulo I

Introducción

1.1 Introducción

El estampado metálico es una de las disciplinas más importantes dentro de los procesos de manufactura en áreas como la automotriz, electrodomésticos y electrónica; los procesos básicos de estampado y troquelado metálico son: corte, doblado y embutido. Sin embargo, respondiendo a las necesidades de la industria se desarrollaron procesos adicionales tales como: acuñado, grabado y enrollado. Y en muchos casos una combinación de ellos.

La optimización de los procesos ya existentes fue inevitable y teniendo como objetivo primordial maximizar la producción y reducir los costos operativos, surgieron procesos como: punzonado de multiniveles, doblado por leva y embutido rectangular.

La investigación que se describe en este trabajo ha tomado como base teórica principal el proceso punzonado de multiniveles, este proceso es una variación del proceso básico de punzonado; por lo que, también tomamos las bases teóricas de este proceso para comprender y desarrollar la investigación. Se tiene un amplio conocimiento acerca de las variables y su modo de comportamiento en el proceso básico de punzonado; sin embargo, para el proceso de punzonado de multiniveles no se cuenta con una base sólida. Y aunque se trata de las mismas variables, su modo de comportamiento es diferente.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación (experimentales y de simulación por elemento finito) son producto de un análisis de las variables que afectan el proceso de punzonado de multiniveles, se establecieron condiciones de frontera.

Estos resultados se plasmaron considerando una futura utilidad que puede ir desde el área de diseño de herramientas hasta el área de producción de piezas metálicas dentro del área automotriz.

1.2 Planteamiento del problema:

En un proceso de punzonado se tienen tres factores principales que determinan la capacidad del proceso y sus condiciones dinámicas. Tal como se observa en la figura 1.1.

- 1.2.1 Fuerza de punzonado (P)
- 1.2.2 Fuerza de separación (P_s)
- 1.2.3 Energía de punzonado (E)

La aplicación correcta de estos factores se ve reflejada directamente en la eficiencia del proceso.

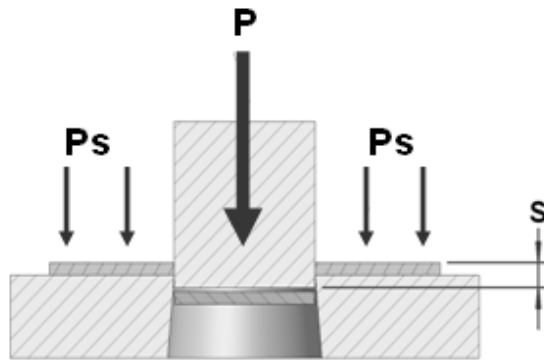


Figura 1.1 Fuerzas en proceso de punzonado. Manual de Proyecto de

Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

La pérdida de eficiencia en este proceso, debido a la fuerza de separación, es un problema muy común y representa un gran problema para las empresas que trabajan estos procesos. El problema más representativo es cuando la tira de material punzonado se adhiere al punzón y se dobla por no haber una fuerza eficiente de separación.

Este problema se ve maximizado cuando se necesita realizar muchos barrenos en el producto en una misma operación; es decir, en una sola carrera de la prensa. Bajo condiciones normales las fuerzas de punzonado y separación adquieren valores muy altos, por lo que es necesario reducirlos. Para lograr esto se utiliza la técnica llamada Punzonado de Multiniveles. La figura 1.2 ilustra la comparación de

Punzonado de Multiniveles

utilizar el proceso convencional de punzonado contra el proceso de punzonado de multiniveles.

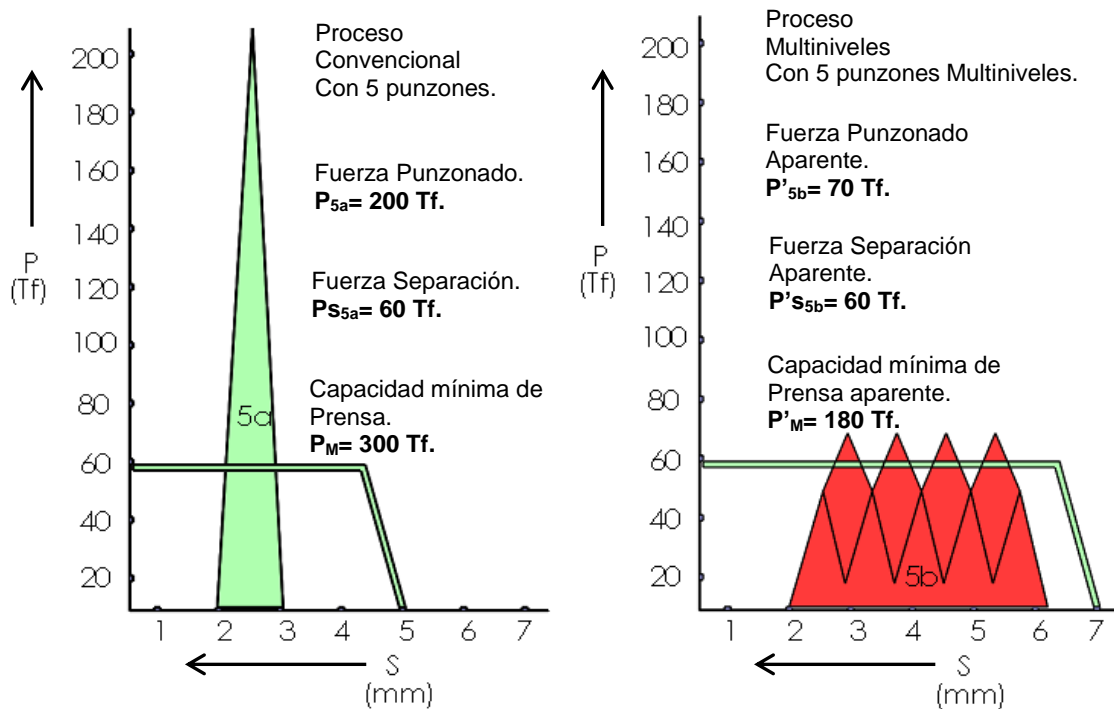


Figura 1.2 Proceso convencional v/s proceso multiniveles. Elaboración propia, 2014.

El comportamiento observado de los tres factores del proceso de punzonado aplicando esta técnica es como se describe a continuación;

1.2.1 Fuerza de punzonado (P)

La fuerza de punzonado convencional se calcula de acuerdo al espesor de la lámina, tipo de material, dimensión y cantidad de los barrenos. Al calcular esta fuerza, obtenemos un parámetro para determinar la capacidad de la prensa. Sin embargo, no es fácil poder cumplir con esta capacidad de prensa. Observe que para la figura 1.2, la fuerza de punzonado es 200 Tf.

Para disminuir la fuerza total del proceso se colocan los punzones a diferente altura, de esta manera, la fuerza de punzonado actúa en diferente tiempo y se

Punzonado de Multiniveles

obtiene una reducción de fuerza. Observe que ahora para la Figura 1.2, la fuerza aparente es 70 Tf.

1.2.2 Fuerza de separación (Ps)

La fuerza de separación cumple dos objetivos, el primero es pisar o sujetar la lámina justo antes de que los punzones inicien el corte y el segundo es separar la lámina del cuerpo del punzón después de realizado el proceso.

La fuerza de separación se calcula de acuerdo a las condiciones del proceso; por lo general, se determina como un porcentaje de la fuerza de punzonado calculada previamente; por lo que a mayor cantidad de fuerza de punzonado, la fuerza de separación aumenta. Para la Figura 1.2 la fuerza de separación es 60 Tf.

La fuerza de separación representa el problema principal del proceso de punzonado al aplicar la técnica de Multiniveles. Esto se debe a que esta fuerza no es posible reducirla o dividirla para que se aplique a diferente tiempo para la Figura 1.2 la fuerza de separación aparente es 60 Tf, la misma que para un proceso convencional.

Cuando la prensa se encuentra en su punto muerto inferior, todos los punzones se encuentran insertados en la lámina, por lo tanto no es posible reducir la fuerza de separación, puesto que cada punzón necesita ser separado de la lámina en el mismo tiempo. Por lo que, la fuerza requerida debería ser la misma que para el proceso convencional.

1.2.3 Energía de punzonado (E)

La energía de punzonado es la energía mínima que debe de suministrar la prensa mecánica para poder realizar el proceso. Este valor se calcula tomando como referencia la fuerza de punzonado sin realizar la reducción de fuerza por medio de la técnica de multiniveles multiplicada. No obstante es importante mencionar que la energía requerida por el proceso no cambia al aplicar la técnica de punzonado de multiniveles.

1.3 Justificación:

La presente investigación es importante debido a que el proceso de punzonado de multiniveles actualmente es muy deficiente, se utilizan prensas que exceden la capacidad requerida solo para garantizar la calidad de los productos. Esto impacta directamente en la capacidad tecnológica de las empresas y los costos de producción.

La investigación está enfocada en conocer el grado de afectación de la fuerza de separación en el proceso, con el fin de minimizar la pérdida de fuerza y energía por este factor, lo que llevará a estudiar y analizar el comportamiento de las fuerzas involucradas en este proceso y poder estimar la fuerza de adherencia del material contra el punzón de corte.

1.4 Objetivo General:

Determinar la fuerza mínima de sujeción de la chapa metálica para el proceso de punzonado de multiniveles mediante un herramental de prueba instrumentado con galgas extenso – métricas.

1.4.1 Objetivos específicos:

1. Determinar las variables principales que impactan directamente en el proceso de punzonado de multiniveles y establecer condiciones de frontera de acuerdo a los recursos disponibles para la investigación.
2. Diseñar y fabricar un herramental de acero para realizar las pruebas de corte del acero SAE 1018.
3. Instrumentar y realizar experimentación para obtener los valores de micro deformaciones en cada galga extenso-métrica colocada en el herramental.
4. Analizar los valores obtenidos con las galgas extenso-métricas y transformar estos valores en unidades de fuerza.
5. Corroborar los resultados obtenidos con un análisis utilizando la técnica de elemento finito.
6. Presentar los resultados de investigación en una ponencia técnica.
7. Escribir y defender el trabajo de Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencia y Tecnología con especialidad en Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos.

1.5 Antecedentes:

[Marín Villar, C. (2009)]. La transformación de la lámina se realiza mediante herramientas especiales denominados troqueles o matrices, anclados con fuerza sobre prensas de gran presión y velocidad. El objetivo de este proceso es poner en marcha una estrategia de fabricación para producir más y mejor, en la que influyen factores relacionados con la máquina, los troqueles, el material, la producción y características geométricas de la pieza.

[Mateos, S., Rico, J., Cuesta, E., & Valiño, G. (2002)]. El punzonado es una operación de corte de chapas o láminas, generalmente en frío, mediante un dispositivo mecánico formado por dos herramientas: el punzón y la matriz. La aplicación de una fuerza de compresión sobre el punzón obliga a éste a penetrar en la chapa, creando una deformación inicial en régimen elastoplástico seguida de un cizallamiento y rotura del material por propagación rápida de fisuras entre las aristas de corte del punzón y matriz. El proceso termina con la expulsión de la pieza cortada.

En general, la mayoría de los estudios efectuados sobre la mecánica del proceso de deformación plástica y corte, tienen como finalidad analizar los defectos que se presentan en el borde de las piezas punzonadas. Los primeros resultados de los estudios sobre los mecanismos de corte en punzonado se producen a comienzos de la década de los cincuenta, en Alemania (Keller) y en Japón (Fukui y Maeda) simultáneamente. Hoy en día, los estudios se centran en la obtención de modelos matemáticos que junto con el método de los elementos finitos permitan el cálculo de las fuerzas, determinar calidad del borde de la pieza y la simulación del proceso.

[Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009]. El proceso de punzonado convencional es una operación que ofrece ventajas importantes sobre algún otro proceso de perforado de chapa metálica, las cuales son un bajo costo de producción, reducido mantenimiento bajo condiciones óptimas de operación y altos volúmenes de producción. Se tiene

Punzonado de Multiniveles

conocimiento acerca de las condiciones dinámicas que se presentan cuando se utiliza este proceso y las limitaciones que indudablemente se presentan, podemos mencionar que los factores importantes para determinar la capacidad del proceso van relacionados a la prensa, el herramental de corte, la materia prima a utilizar y la geometría del producto.

[ASCAMM. (2008)]. El sector de moldes y matrices, tras superar la larga crisis que redujo el número de empresas del sector, se ha ido recuperando progresivamente en los últimos 5 años, y ya acumula un crecimiento sostenido del 43% desde el mínimo histórico del 2010 . Este crecimiento ha ido acompañado de un crecimiento de las exportaciones de moldes y matrices, que también han crecido más de un 40% respecto a sus mínimos.

Cabe destacar que las exportaciones de moldes y matrices superan a las importaciones de los países de bajo coste. La alta calidad de los moldes y matrices diseñados y fabricados en Cataluña es reconocida en los principales países clientes Europeos y otros países en crecimiento como es el caso de México.

[SIGNORELLI, J.W., BOLMARO, R.E, 2005]. El coeficiente R es definido como el cociente entre el incremento de la deformación plástica transversal respecto el incremento en espesor durante un ensayo de tracción. Este ensayo es realizado a diferentes ángulos respecto de la dirección de laminado de la chapa y su variación angular es utilizada comúnmente como una medida de su grado de anisotropía. Un parámetro muy importante en el cálculo de R es la textura cristalográfica que presenta el material al cabo del proceso de laminación. La evolución del coeficiente de Lankford R calculado a partir de la textura obtenida al cabo del proceso de laminado. Una comparación de las predicciones obtenidas en función del modelo utilizado y su confrontación con la experiencia. En general, el modelo de Taylor sobreestima los datos experimentales en la mayor parte de las direcciones de carga, mientras los valores predichos utilizando la modelización auto consistente predice valores muy próximos a los obtenidos a través de la experiencia.

1.6 Hipótesis:

De acuerdo a la teoría de los procesos punzonado de multiniveles no existe una relación entre la fuerza teórica de sujeción (P_s), proceso convencional, y la fuerza aparente de sujeción (P'_s), proceso multiniveles, por lo tanto, se espera demostrar que la fuerza aparente de sujeción es equivalente al 30% del valor de la fuerza teórica de sujeción.

Capítulo II

Análisis

de

Fundamentos

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Cortante directo

Cuando se somete un elemento a un par de fuerzas que actúan paralelamente al plano que las resiste y tratan de cortarlo tangencialmente en la dirección de las fuerzas, se está solicitando dicho elemento a cortante directo. La figura 2.1 muestra algunas configuraciones en las cuales aparece cortante directo; las líneas punteadas indican los planos sometidos a esfuerzo cortante.

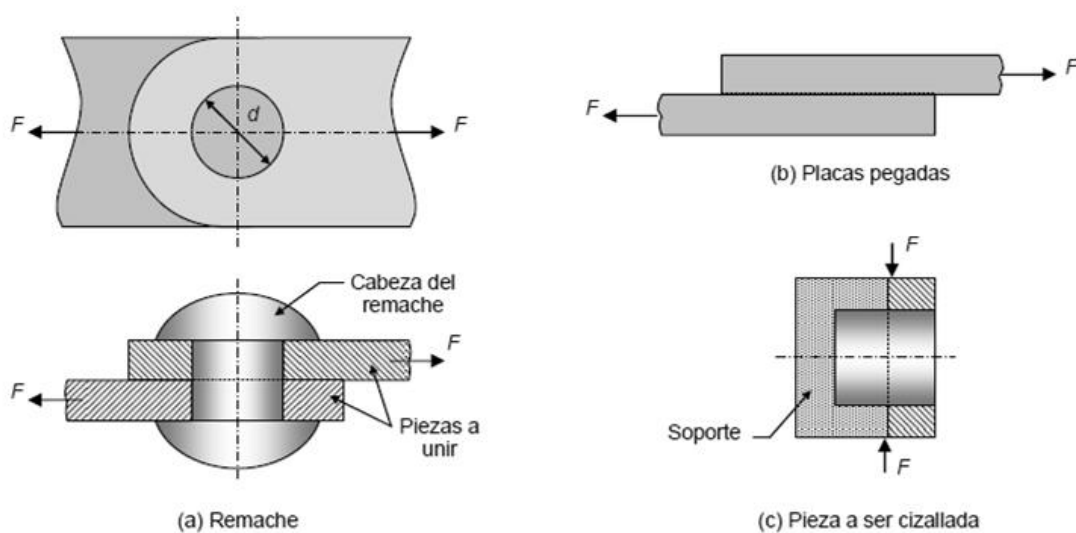


Figura 2.1 Elementos sometidos a cortante directo, (a) Remache, (b) Placas pegadas y (c) Pieza a ser cizallada. *BEER, Ferdinand y JOHNSTON E. R...*

Mecánica de Materiales. Colombia: McGRAW-HILL, 1993. 2ª edición.

Los remaches son generalmente elementos cilíndricos de corta longitud con cabezas en ambos extremos, que soportan cargas cortantes; sin embargo, obsérvese en la figura 2.1.a que a menos que las fuerzas actúen en el plano donde se tocan los elementos que se están uniendo, el par de fuerzas F no actúa

Punzonado de Multiniveles

sobre la misma línea y; por lo tanto, se genera algo de flexión (en algunas configuraciones de remaches se pueden generar esfuerzos normales significativos debidos a la flexión).

La figura 2.1.b muestra el caso en que las placas son unidas mediante un adhesivo, en este caso la fuerza de cortante directo es soportada directamente por el adhesivo.

La figura 2.1.c muestra un elemento que va a ser cizallado mediante un par de fuerzas F . Nuevamente, debido a la falta de total rigidez en los soportes, cada fuerza se desplaza hacia cada lado de los soportes generando un momento flector. Aunque el cortante directo va acompañado generalmente de flexión, en muchos casos se desprecia este efecto cuando los esfuerzos normales producidos son muy pequeños comparados con los cortantes. El esfuerzo cortante promedio en una sección de una pieza sometida a cortante directo está dado por:

$$S_s = \frac{V}{A} \quad (2.1.)$$

donde V es la fuerza cortante y A es el área de la sección transversal analizada. Para el caso mostrado en la figura 2.1.a, por ejemplo, la fuerza cortante es F y el área es $\pi d^2/4$, donde d es el diámetro del remache. (*Beer, Ferdinand y Johnston E. R., 1993*).

La ecuación 2.1 sugiere que el esfuerzo cortante se distribuye uniformemente en toda el área; sin embargo, la distribución real del esfuerzo no es uniforme. Como se dijo, el esfuerzo calculado con la ecuación 2.1 es el promedio.

En la práctica se suele diseñar con el esfuerzo promedio, cuando el efecto de flexión es nulo o es despreciable. Esto es debido a la ausencia de un conocimiento

Punzonado de Multiniveles

exacto sobre la distribución de esfuerzos; además, si los valores límite para el esfuerzo cortante están basados en el valor medio del esfuerzo, este procedimiento es bastante aceptable. Cuando además de cortante ocurre un efecto importante de flexión, (como en vigas y en juntas de pasadores con grandes holguras que permiten la flexión de éstos), es necesario tener en cuenta que los esfuerzos cortantes se distribuyen y que deben considerarse los esfuerzos normales.

2.1.2 Esfuerzo de apoyo

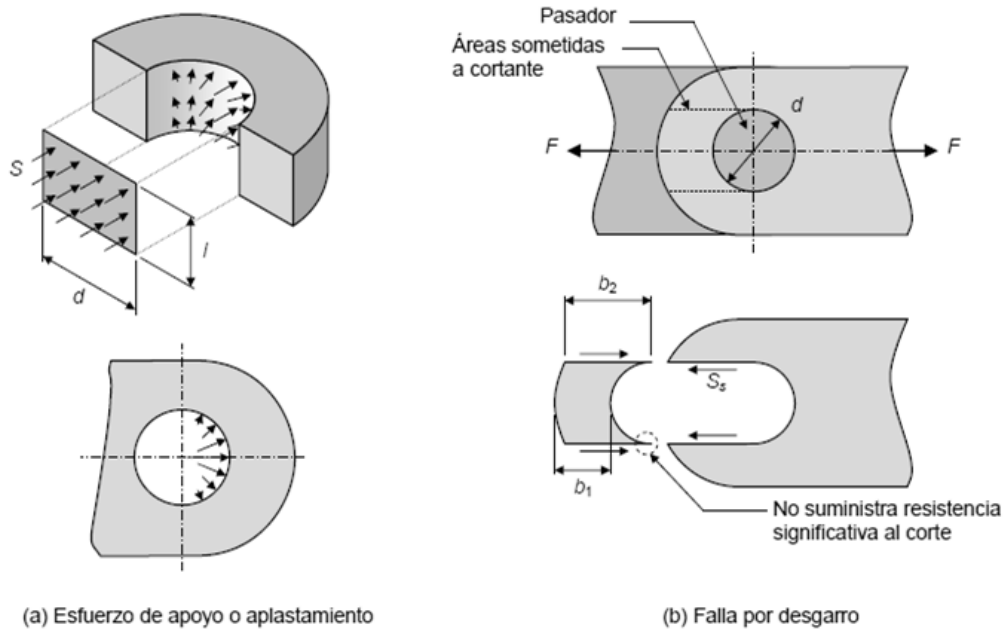


Figura 2.2 Representación de los esfuerzos de apoyo y desgarro en uniones con pasadores. *BEER, Ferdinand y JOHNSTON E. R... Mecánica de Materiales.*

Colombia: McGRAW-HILL, 1993. 2ª edición.

En ciertas aplicaciones, como en las uniones con pasadores y remaches y entre un eje y un cojinete, ocurren esfuerzos de compresión en las superficies de contacto. Estos esfuerzos se denominan esfuerzos de apoyo o aplastamiento. En

Punzonado de Multiniveles

el caso mostrado en la figura 2.2, el pasador se apoya sobre las paredes cilíndricas de los agujeros de las placas, generándose esfuerzos de compresión. Si el esfuerzo es excesivo puede ocurrir deformación permanente en las placas, en el pasador o en ambos, perdiéndose la exactitud del ajuste y probablemente una correcta operación de los elementos. La presión entre el pasador y las paredes de los orificios no es constante, variando desde cero en los sitios donde comienza el contacto hasta su valor máximo en el centro de la superficie de apoyo; tal como se aprecia en la figura 2.2.a. Para facilitar el diseño de estos elementos, se suele asumir que el esfuerzo se distribuye uniformemente en el área proyectada de la superficie, la que es más pequeña que el área real, (ver la figura 2.2.a). El esfuerzo está dado por:

$$S = \frac{F}{ld} \quad (2.2)$$

donde F es la fuerza que soporta la superficie de apoyo, l es la longitud de la superficie de apoyo y d es el diámetro del agujero.

2.1.3 Desgarro

Otro modo de falla posible en uniones con pasadores es el desgarro, que consiste en el desprendimiento de material, cuando el agujero del elemento está muy cercano al borde. Las áreas que resisten la carga se indican con las líneas punteadas (ver la figura 2.2.b), están sometidas a esfuerzo cortante. (*Beer, Ferdinand y Johnston E. R., 1993.*)

El esfuerzo cortante podría calcularse como la relación entre la fuerza F y el área total que la soporta, $2b \cdot 2l$. Nótese que la fuerza se reparte en las dos áreas

indicadas en la figura 2.2.b. Esta forma de calcular el esfuerzo no es adecuada, ya que como se observa en la figura 2.2.b, las partes delgadas en forma de cuña del material que se desprendería en caso de falla, no aportan una resistencia significativa al corte. Normalmente se asume la hipótesis conservativa que el área que resiste la fuerza está dada por la distancia b_1 , no la b_2 . El esfuerzo estaría dado por la ecuación 2.3, (Ferdinan P., Johnston E., Dewolf T y Mazurek D., 2008).

$$S_s = \frac{F}{2b_1l} \quad (2.3)$$

2.2 El proceso de Punzonado

El punzonado es una operación de corte de chapas o láminas, generalmente en frío, mediante un dispositivo mecánico formado por dos herramientas: el punzón y la matriz. La aplicación de una fuerza de compresión sobre el punzón obliga a éste a penetrar en la chapa creando una deformación inicial, en régimen elastoplástico, seguida de un cizallamiento y rotura del material por propagación rápida de fisuras entre las aristas de corte del punzón y matriz. El proceso termina con la expulsión de la pieza cortada (ver figura 2.3).

Punzonado de Multiniveles

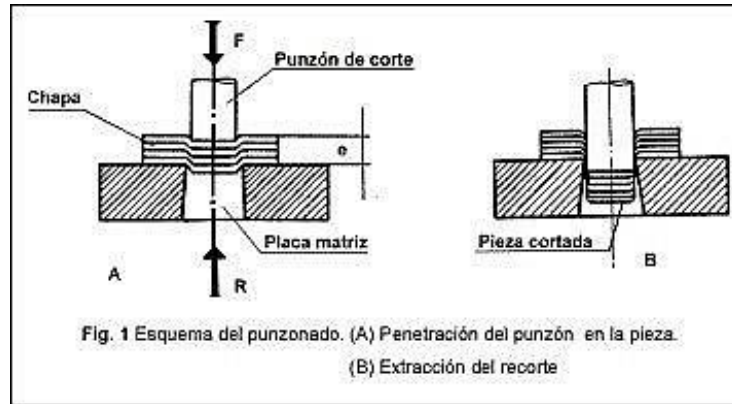


Figura 2.3 Esquema del punzonado (A) Penetración del punzón en la pieza, (B) Extracción del recorte. FAIRES, V. M... Diseño de Elementos de Máquinas.

México: Editorial Limusa, 1995. 4ª Reimpresión.

En general, la mayoría de los estudios efectuados sobre la mecánica del proceso de deformación plástica y corte, tienen como finalidad analizar los defectos que se presentan en el borde de las piezas punzonadas. Hoy en día, los estudios se centran en la obtención de modelos matemáticos, que junto con el método de los elementos finitos, permitan el cálculo de las fuerzas de punzonado y de pisado, determinar calidad del borde de la pieza y la simulación del proceso.

2.3 Análisis del proceso de punzonado.

2.3.1. Mecánica del corte

En el proceso de punzonado se pueden considerar tres etapas que se describen a continuación y están esquematizados en la Figura 2.4.

Punzonado de Multiniveles

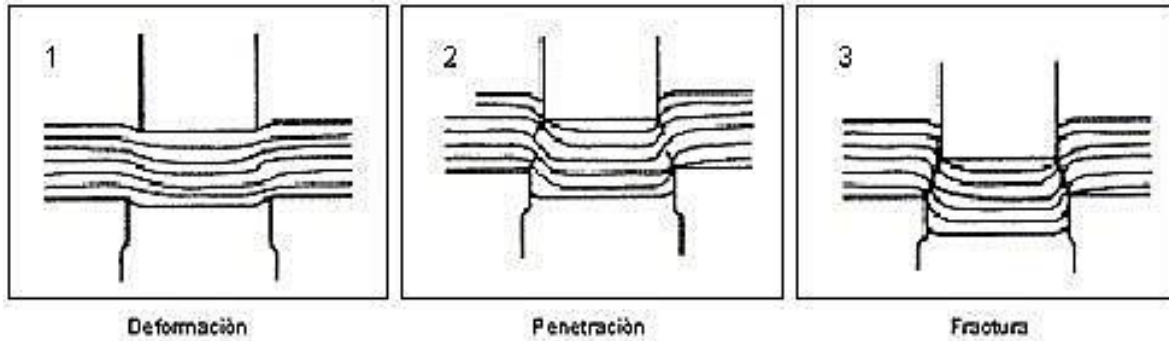


Figura 2.4 Etapas del proceso de punzonado, (1) Deformación, (2) Penetración y (3) Fractura. FAIRES, V. M... Diseño de Elementos de Máquinas. México: Editorial Limusa, 1995. 4ª Reimpresión.

1. Deformación: Los esfuerzos del punzón sobre la chapa metálica, originan en ésta una deformación, inicialmente elástica y después plástica, alrededor de los bordes del punzón y la matriz.
2. Penetración: Los filos de corte del punzón y la matriz penetran dentro del material, produciéndose grietas en él debido a la concentración de tensiones a lo largo de los filos de corte.
3. Fractura: las grietas originadas a uno y otro lado de la chapa se encuentran, originando la separación del material. Asimismo, el punzón continúa su descenso para expulsar el recorte.

El claro de corte (C) tiene un efecto importante en el proceso de corte y se define como la distancia lateral entre el filo del punzón y el filo de la matriz. En general, el valor de (C) suele expresarse de dos maneras; como porcentaje respecto al espesor de la chapa (t) (juego de corte relativo) o como el valor de la distancia

Punzonado de Multiniveles

entre los filos. En el caso de punzones de sección circular, el juego de corte será la mitad de la diferencia de diámetros de la matriz y el punzón.

El corte por punzonado produce varias características en los bordes de la chapa y del material cortado. Estas características se ilustran en la Figura 2.5.

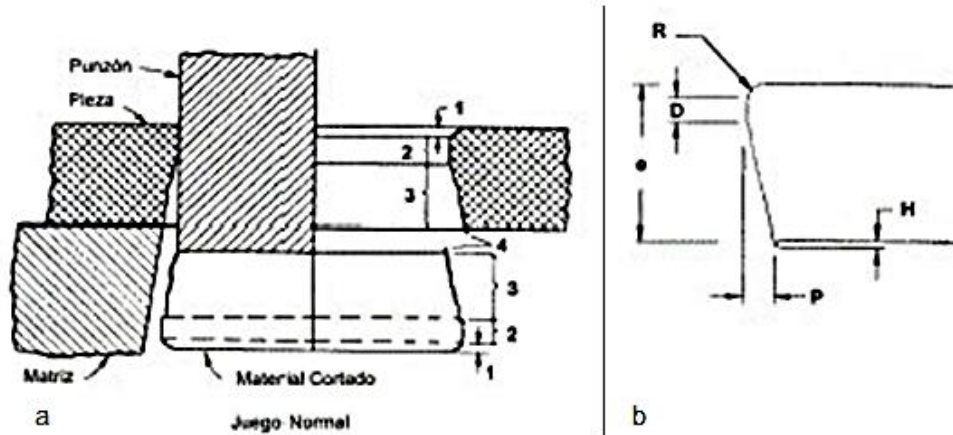


Figura 2.5 Características del borde de corte con claro de corte C normal, (a) Corte de material, (b) zonas generadas en cara de corte de la chapa. FAIRES, V.

M... Diseño de Elementos de Máquinas. México: Editorial Limusa, 1995. 4^a

Reimpresión.

Deformación plástica caracterizada por un pequeño radio R , zona bruñida de aspecto brillante caracterizada por el ancho D , fractura angular, con aspecto mate, definida por la penetración P , rebaba caracterizada por su altura H .

Todas estas características dependen del tipo, dureza y espesor del material, claro entre punzón y matriz, estado de los filos de corte, sujeción del material y tamaño

Punzonado de Multiniveles

del punzón en relación al espesor de la chapa. Las dimensiones de la zona D (ver Figura 2.5) la determina el punzón.

La extensión de la zona R deformada plásticamente junto con la zona D bruñida, se representan como porcentaje del espesor del material y juntos definen la distancia recorrida por el punzón antes de la fractura del material. El porcentaje de la penetración del punzón varía con el tipo y dureza del material. Así, a medida que aumenta la dureza del material, el porcentaje de penetración del punzón decrece. Por otro lado, la penetración del punzón aumenta cuando el tamaño del punzón es menor que 1,5 veces el espesor de la chapa; esto es debido al alto esfuerzo de compresión a que está sometido el material en la zona de corte.

La fractura angular y la calidad del corte dependen del claro que existe entre matriz y punzón. Con un claro pequeño entre punzón y matriz, se produce un corte secundario. Las grietas iniciales correspondientes al punzón y matriz no están alineadas; y por lo tanto, no llegan a encontrarse (ver figura 2.6).

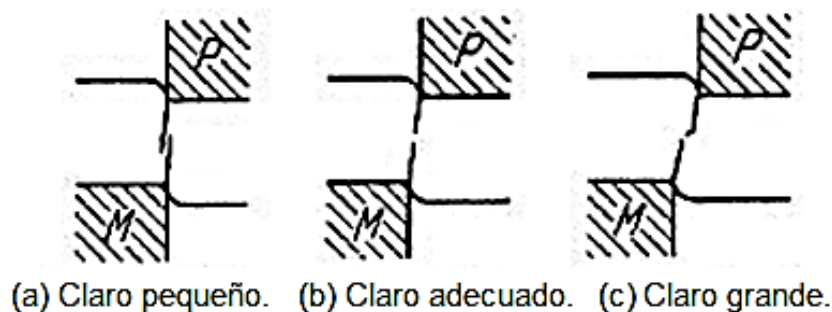


Figura 2.6 Posición relativa de las grietas según el claro entre punzón y matriz. (a) Claro pequeño, (b) Claro adecuado y (c) Claro grande. FAIRES, V. M... Diseño de Elementos de Máquinas. México: Editorial Limusa, 1995. 4ª Reimpresión.

Punzonado de Multiniveles

El continuar bajando el punzón se produce la prolongación de las grietas y la superficie no cortada entre ellas se romperá en una fractura secundaria. En la parte inferior de la carrera del punzón se produce un corte secundario y una segunda zona bruñida (ver Figura 2.7.b). La disminución del claro, por debajo de los valores normales, provoca la disminución de todos los defectos de forma, mejorando por lo tanto, la precisión de los bordes obtenidos.

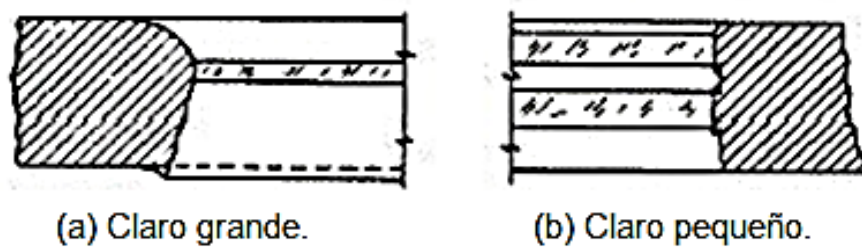


Figura 2.7 Características del borde con juego excesivo e insuficiente. (a) Claro grande y (b) Claro pequeño. FAIRES, V. M... Diseño de Elementos de Máquinas.

México: Editorial Limusa, 1995. 4ª Reimpresión.

Cuando el claro entre punzón y matriz es demasiado pequeño comienzan a aparecer cortes secundarios que perjudican la calidad de los bordes. Hay que destacar, que al disminuir el juego de corte se produce una mejora en la precisión de la pieza; sin embargo, otros factores como el desgaste de las herramientas o la energía consumida para realizar el corte de la chapa metálica se ven afectados negativamente. En caso de tener un claro entre punzón y matriz demasiado grande (ver figura 2.7.a) aparece una deformación plástica excesiva, una parte bruñida menor y una altura de rebaba mayor. Por otro lado, hay que resaltar que, al aumentar el juego de corte por encima de los valores normales, (8 a 10% del

Punzonado de Multiniveles

espesor de la chapa metálica), se consigue aumentar la vida de la herramienta. Así, el claro de corte apropiado será aquel que no cause un corte secundario y tenga una deformación plástica y altura de rebaba pequeñas.

Desde el punto de vista de la mecánica de la fractura del material, puede considerarse que el funcionamiento del proceso es óptimo cuando las grietas iniciadas desde el punzón y matriz se encuentran alineadas. Esto se debe a que el claro de corte es el parámetro que afecta más directamente a la mecánica de la fractura del material; por lo que el claro de corte óptimo deberá ser capaz de proporcionar esta alineación.

2.3.2. Fuerzas en el punzonado

La fuerza de corte varía en función del claro de corte entre punzón y matriz. En figura 2.8, se representa la fuerza ejercida por un punzón de 10 mm de diámetro y su desplazamiento al cortar una chapa de acero de 2,8 mm de espesor con diferentes claros de corte. En general, las curvas pueden ser descompuestas en dos partes claramente diferenciadas: primera, en la que la fuerza aumenta desde cero hasta su valor máximo, éste punto corresponde al inicio de la fractura, y segunda, en la que las grietas crecen y se completa el corte del material. La primera zona presenta un aspecto muy similar en todas las curvas; sin embargo, desde el momento en que se inicia la fractura, se desarrollan fluctuaciones importantes para los diferentes claros de corte.

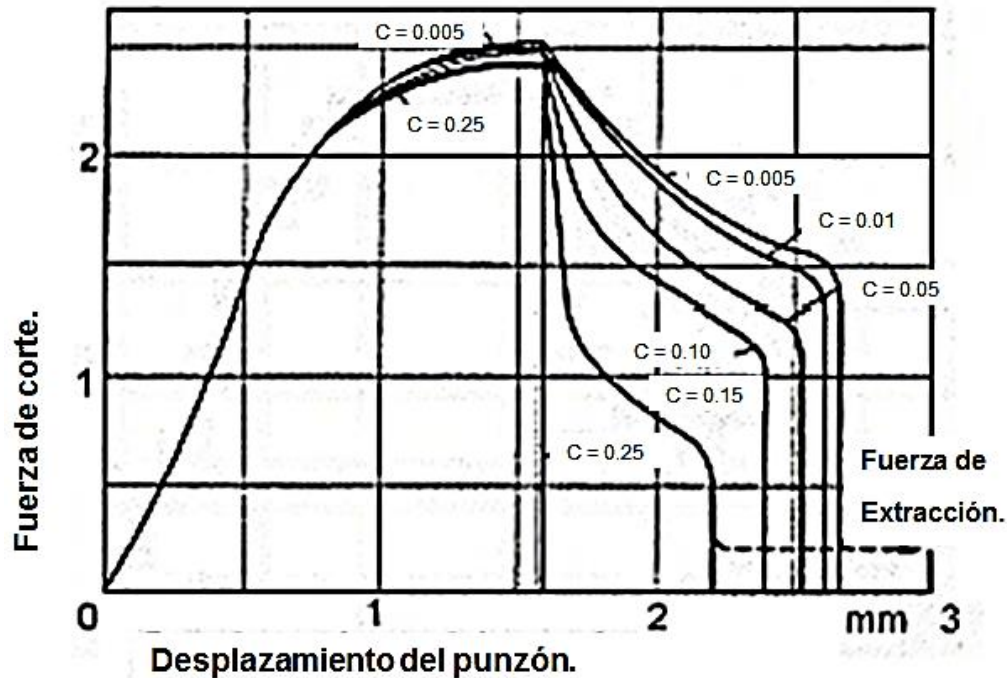


Figura 2.8 Influencia del juego de corte C sobre la fuerza de corte P. FAIRES, V.

M... Diseño de Elementos de Máquinas. México: Editorial Limusa, 1995. 4ª

Reimpresión.

La formación de la grieta puede asociarse a los descensos repentinos que se aprecian en los diagramas. Cuando las grietas originadas no se encuentran alineadas, las fuertes pendientes de descenso tienden a suavizarse llegando en algunas ocasiones a la horizontalidad. En estos casos, suele producirse nuevamente disminuciones importantes de la fuerza debido a la formación de cortes secundarios. Como consecuencia de las fluctuaciones producidas en la disminución de la fuerza se produce un aumento del área encerrada por el diagrama; y por lo tanto, de la energía consumida en el proceso. Por esta razón, cuando en el corte de la chapa las grietas presentan la misma alineación la energía consumida por el proceso resulta mínima. La resistencia de corte por punzonado k_s será, a partir de la máxima fuerza de corte F_s máx:

Punzonado de Multiniveles

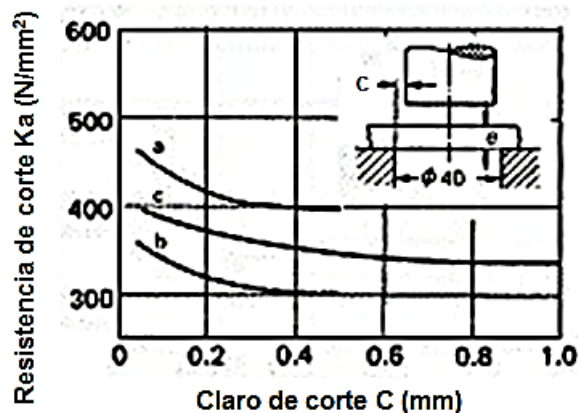
$$K_s = \frac{F_{smax}}{A_s} \quad (2.4)$$

Donde A_s es el área calculada a partir del espesor de la chapa t y el perímetro l_p de corte:

$$A_s = t * l_p \quad (2.5)$$

La resistencia al corte k_s incluye los efectos del claro de corte, desgaste de la herramienta y la influencia de otros parámetros, como las propiedades del material, espesor y forma del contorno del punzón.

La resistencia al corte por punzonado k_s decrece con el aumento del claro de corte, siendo su variación de aproximadamente un 14% en el rango de $C = (0.01 - 0.1) t$. En la figura 2.9 se puede observar este efecto utilizando tres materiales distintos y punzones perfectamente afilados. Conforme se realizan punzonados, el punzón sufre un desgaste que tiene como consecuencia un incremento de la resistencia al corte k_s de hasta 1,6 veces.



Punzonado de Multiniveles

Figura 2.9. Resistencia de corte por punzonado según el claro de corte. (a) $K_s=630$ N/mm^2 , $t=5$ mm. (b) $K_s=450$ N/mm^2 , $t=5$ mm. (c) $K_s=460$ N/mm^2 , $t=5$ mm.

Estampado en Frio de la Chapa, Mario Rossi, 1ra Edición.

Por otro lado, la resistencia de corte se ve afectada por el diámetro del agujero punzonado; así el valor de la resistencia de corte decrece con el aumento del diámetro del punzón si se mantienen las demás condiciones constantes (ver Figura 2.10).

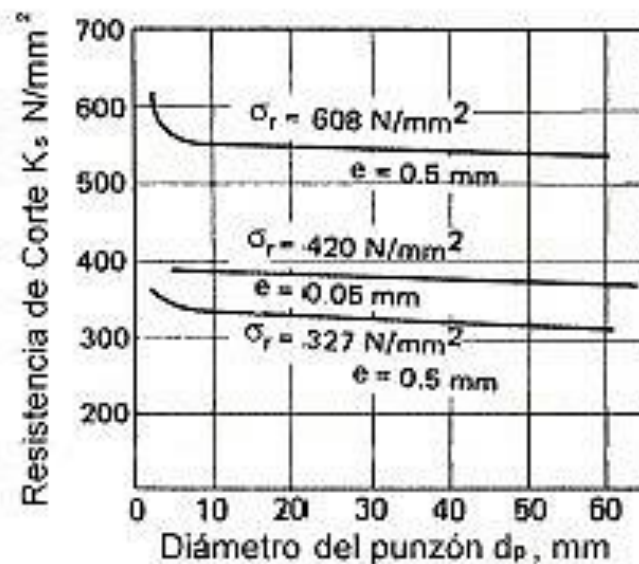


Figura 2.10 Efecto del diámetro del punzón en la resistencia al punzonado.

Estampado en Frio de la Chapa, Mario Rossi, 1ra Edición.

Otro factor de influencia, es la forma de la sección del punzón. En las zonas de gran curvatura existe una concentración de tensiones, por tal motivo es más frecuente la rotura del punzón en las esquinas angulosas.

En la práctica, en la industria se estima el valor de k_s mediante la tensión máxima de cizallamiento σ_B , y la fuerza máxima de corte mediante:

Punzonado de Multiniveles

$$F_{smax} = l_p * t * \tau_B \quad (2.6)$$

El valor de δ_B (resistencia a la tensión del material) se obtiene de tablas o a partir de la resistencia a la rotura σ_r . Por lo general, se toma como resistencia de cizallamiento δ_B un valor igual al 80% de la resistencia de ruptura, sin embargo, esta proporción varía con el tipo y espesor del material.

Una vez cortado el material debe ser expulsado a través de la matriz, que en general tiene forma cónica para facilitar la extracción y dificultar el regreso del material cortado con el retroceso del punzón. La fuerza del pisador debe vencer el rozamiento y compresión radial entre el punzón y la chapa y entre la pieza cortada y la matriz. Parte de estas fuerzas también están presentes durante el retroceso del punzón debido al rozamiento de la chapa con el punzón. Esta fuerza de extracción suele expresarse como porcentaje de la fuerza necesaria para el punzonado y depende del material y del juego de corte.

Otro factor a tener en cuenta para calcular la fuerza del pisador es el estado físico del punzón. Por ejemplo, el progresivo desgaste sufrido por éste, origina un aumento de la fuerza de corte, y al mismo tiempo una disminución de la fuerza de retroceso.

También, la velocidad de corte tiene influencia sobre la fuerza de corte. Así, al aumentar dicha velocidad disminuye la fuerza de corte, debido fundamentalmente a la elevación de la temperatura del material que se origina con el aumento de la velocidad de deformación.

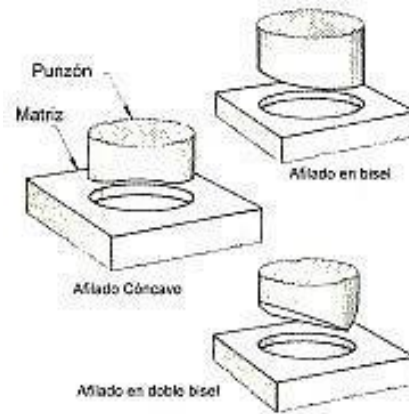


Fig. 2.11.- Afilados especiales del punzón. Procesos de Manufactura, Phillip F Ostwald, Myron L. Begeman, 3a edición en español, Compañía Editorial Continental, 1981.

Cuando las fuerzas de corte son demasiado elevadas, estas pueden ser reducidas considerablemente mediante un punzonado por corte progresivo; esto es, inclinando el corte del punzón (ver Figura 2.11). Sin embargo, la variación de la fuerza no supone una variación de la potencia consumida en el proceso.

2.3.3. Desgaste de la herramienta

La herramienta, durante su trabajo, está sujeta a una serie de acciones mecánicas, térmicas y químicas que ejercen un efecto de desgaste; y por lo tanto, es de gran interés conocer los factores que afectan el desgaste de la herramienta. Entre estos factores se pueden citar el material de trabajo, el número de punzonados, el material de la herramienta, el diámetro del punzón, el claro de corte y la lubricación.

Punzonado de Multiniveles

Todos los mecanismos de desgaste (adhesión, abrasión, etc.) pueden presentarse cuando se realizan operaciones de punzonado, tanto en los punzones como en la matriz sustentadora de la chapa a punzonar. El desgaste se produce en tres zonas: caras, flancos y bordes del punzón y matriz (ver Figura 2.12).

Los flancos y bordes del punzón y matriz están expuestos a la acción de las superficies generadas en el proceso de corte, y el deslizamiento relativo provoca fenómenos de adhesión en los flancos y bordes.

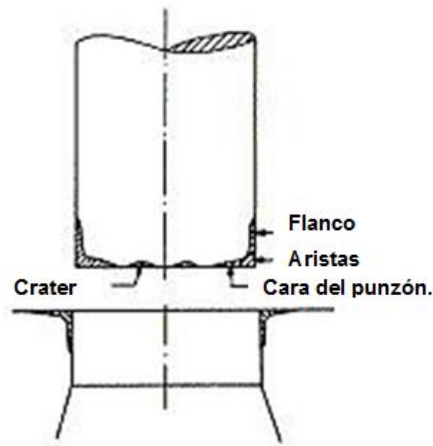


Figura 2.12.- Zonas de desgaste del punzón y matriz. Procesos de Manufactura, Phillip F Ostwald, Myron L. Begeman, 3a edición en español, Compañía Editorial Continental, 1981.

La pieza punzonada sufre un endurecimiento al deformarse plásticamente produciendo un crecimiento de las presiones locales y provocando la aparición de partículas más abrasivas. También la alta velocidad de producción da como consecuencia un alto número de impactos, favoreciendo la adhesión de partículas y fatiga de los filos de corte. Simultáneamente, aumenta la temperatura de la

Punzonado de Multiniveles

matriz, del punzón y de la pieza, por lo que se incrementa la adhesión y se favorece la oxidación.

La deformación elástica de la pieza produce un movimiento relativo a lo largo de la cara del punzón, inicialmente hacia el exterior y posteriormente, una vez iniciada la fractura, hacia el interior. Este hecho produce un desgaste abrasivo en la cara frontal del punzón. El pisador limita esta deformación elástica del material, con lo que se reduce el desgaste del punzón. Por otro lado, la recuperación elástica de la chapa produce un desgaste del flanco del punzón en el movimiento de retracción.

En la superficie lateral del punzón y de la matriz, el desgaste es debido fundamentalmente al mecanismo de adhesión. Otra zona que sufre desgaste, es el borde de corte, que presenta ambos mecanismos de desgaste, no siendo reseñable la influencia del tipo de material de la herramienta sobre el mismo. Los criterios de inutilidad de la herramienta comúnmente utilizados, son los siguientes:

- Consumo energético y fuerza máxima necesaria en el proceso.
- Altura máxima tolerable de la rebaba generada en el corte.
 - Medición del desgaste de las caras, flancos y bordes en el punzón y matriz.
 - Medida del aumento del juego de corte como consecuencia del desgaste.

Punzonado de Multiniveles

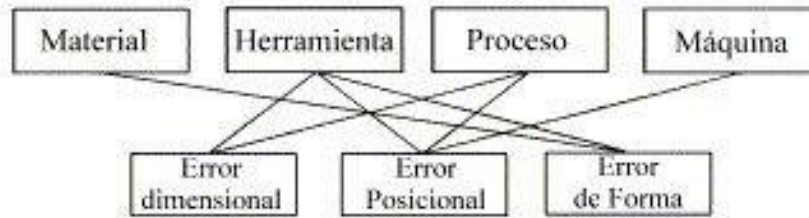


Figura 2.13 Factores que afectan a los defectos geométricos de las piezas punzonadas. Conformado de Metales, Protocolo, Curso de Materiales, Edición 2008-1, Facultad de Ingeniería Industrial.

Parece lógico establecer modelos de ecuaciones de vida de herramientas, al igual que en las operaciones de mecanizado por arranque de viruta, que permitan saber con antelación el número de punzonados que es capaz de realizar un conjunto punzón-matriz, antes de ser rechazado. Estos modelos permiten establecer la duración de la herramienta antes de llegar a un valor de desgaste determinado, el cual será función del criterio de optimización elegido (mínimo coste, máxima producción, máxima calidad, etc.). Los estudios realizados sobre este tema son relativamente escasos, sobre todo por la complejidad del mecanismo de desgaste, íntimamente ligado con la vida de la herramienta. Por tanto, resulta difícil establecer modelos sobre una gran base de datos experimentales.

2.3.4. Precisión de las piezas punzonadas

En el punzonado, como en cualquier otro proceso de fabricación, es necesario establecer las especificaciones de precisión necesarias para satisfacer las necesidades del usuario. Por tanto, resulta interesante hacer un estudio de la precisión, con el fin de poder definir dichas especificaciones, de la forma más acertada posible.

Punzonado de Multiniveles

La precisión de las piezas punzonadas puede ser caracterizada por los siguientes defectos: dimensionales, posicionales y de forma. Los factores que afectan a estos defectos son principalmente el material, las herramientas, las variaciones del proceso y la máquina.

Los diámetros del recorte y del agujero, medidos sobre la superficie pulida, deben coincidir en teoría con los del punzón y matriz, respectivamente. Estas dimensiones teóricas pueden sufrir alteraciones. Debido a la influencia de algunos factores; tales como, la inexactitud en las dimensiones de las herramientas, las deformaciones elásticas de éstas o las tensiones elástico-plásticas producidas en el material.

En lo que respecta a los defectos posicionales, estos comprenden dos tipos de imprecisiones geométricas: irregularidades en el contorno del recorte e inexactitudes de los agujeros de las piezas perforadas. Las primeras son debidas normalmente a la falta de coaxialidad entre punzón y matriz, a defectos en las guías o a la inexactitud de forma de las herramientas. En cuanto a la inexactitud de posición de los agujeros, depende de la precisión del sistema de movimiento de la chapa (tabla 2.1).

Los defectos de forma son aquellos que se presentan en los bordes de la pieza y dependen de las herramientas y del material. Los factores de las herramientas que más afectan a estas imprecisiones geométricas, son el juego de corte, la forma del punzón y el estado de desgaste del filo, mientras que los del material, son la calidad, resistencia y espesor de la chapa.

Punzonado de Multiniveles

Tabla 2.1 Datos de la precisión de diversos modelos de punzonadoras CN según catálogo. Conformado de Metales, Protocolo, Curso de Materiales, Edición 2008-1, Facultad de Ingeniería Industrial.

Marca	Modelo	Incremento mínimo programable.	Desviación de la posición (mm)	Desviación media de posición (mm)
Trumpf	Trumatic 2000 rotation	0.01	+/- 0.1	+/- 0.03
LVD	Modelos Delta	0.01	+/- 0.1	+/- 0.05
Amada	Vipros – 255	0.01	+/- 0.05	-
Amada	Vipros – 358 – 358	0.01	+/- 0.1	-
Goiti	Modelos PGA	0.01	+/- 0.12	-
Omes	Omatis 130.	0.01	+/- 0.1	+/- 0.05

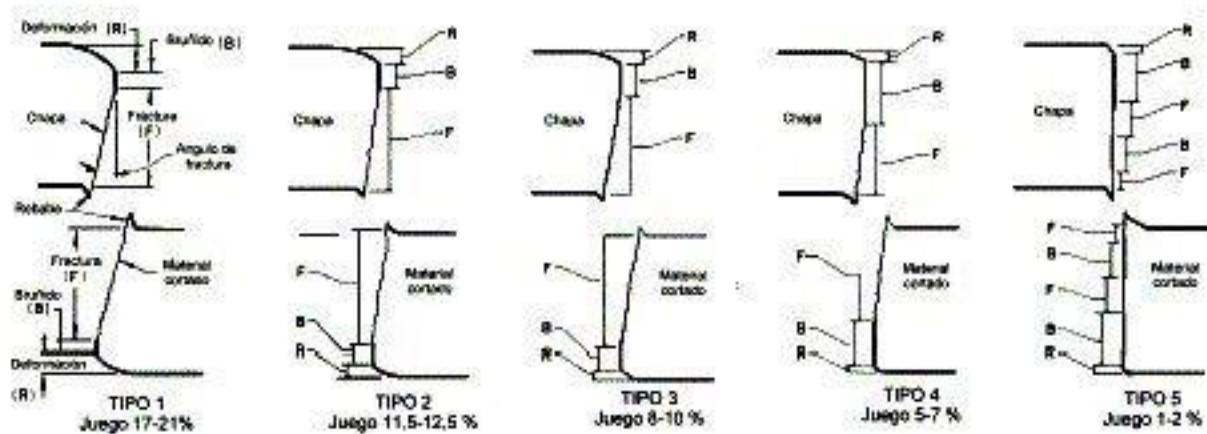


Figura 2.14 Distintos tipos de borde según el juego. Material acero de bajo contenido en carbono. Estampado en Frio de la Chapa, Mario Rossi, 1ra Edición.

Punzonado de Multiniveles

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Ángulo fractura	14° / 16°	8° / 11°	7° / 11°	6° / 11°	-
Deformación	10 / 20 %	8 / 20 %	6 / 8 %	4 / 7 %	2 / 5 %
Bruñido	10 / 20 %	15 / 25 %	25 / 40 %	35 / 45 %	50 / 70 %
Fractura	70 / 80 %	60 / 75 %	50 / 60 %	35 / 50 %	25 / 45 %
Rebaba	Larga	Normal	Normal	Media	Larga

Los defectos de forma pueden ser controlados mediante el ajuste del juego de corte. Así, según el juego de corte, se pueden obtener cinco tipos de bordes en la chapa punzonada. En la figura 2.14 se observan las características de la cara de corte para el punzonado de acero de bajo contenido en carbono. Las características de cada uno de estos tipos de bordes pueden verse en la Tabla 2.2.

En lo que respecta a las dimensiones del agujero, se ven afectadas por el cambio del juego de corte. Cuando se utilizan juegos de corte que producen bordes como el tipo 4 (tabla 2.4), el diámetro del agujero es alrededor de 0,01 mm menor que el diámetro del punzón. Sin embargo, si se obtiene un borde del tipo 2, el diámetro del agujero es 0,01 mm mayor que el diámetro del punzón.

El valor de la altura de rebaba (H) viene condicionado, en el caso del recorte, por el estado de desgaste del punzón, mientras que en el agujero, éste depende del grado de desgaste de la matriz. Por lo tanto, la altura de la rebaba depende de los

Punzonado de Multiniveles

mismos factores que el desgaste de las herramientas. La figura 2.15 muestra la altura de la rebaba en función del número de punzonados efectuados.

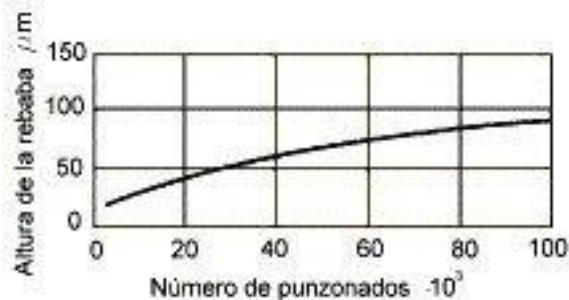


Figura 2.15 Variación de la altura de la rebaba con el número de golpes.

Conformado de Metales, Protocolo, Curso de Materiales, Edición 2008-1, Facultad de Ingeniería Industrial

2.4 Cálculo de la fuerzas de transformación del proceso de troquelado.

Se presentan las fórmulas para realizar el cálculo de las fuerzas requeridas en las operaciones de corte y troquelado del estampado de hoja metálica.

2.4.1 Corte y troquelado.

(1) Fuerza requerida para la transformación

$$P = l * t * k_s * \frac{1}{1000} \quad (2.7)$$

Dónde:

P : Fuerza para corte o troquelado [tf o kN]

l : Longitud de corte [mm]

t : Espesor de la lámina [mm]

k_s : Resistencia del corte [kgf/mm² o Mpa]

$$k_s = 0.8 \sigma_B \text{ (Tensión)}$$

(2) Fuerza de separación (*stripping*)

$$P_s = \alpha_1 * l * t * \frac{1}{1000} \quad (2.8)$$

Dónde:

P_s : Fuerza de separación [tf ó kN]

l : Longitud de corte [mm]

t : Espesor de la lámina [mm]

α_1 : coeficiente [kgf/mm² ó MPa]

operación de un recorrido, $\alpha_1 = 2 - 3$.

operación continua, $\alpha_1 = 4 - 5$.

(3) Fuerza del pisador (sujetador de la silueta)

$$P_{sB} = \alpha_2 * P_s \quad (2.9)$$

Dónde:

P_{sB} : fuerza de pisador [tf ó kN]

α_2 : coeficiente [—]

operación de un recorrido 0.1 - 0.2

operación continua 0.2 - 0.3

(4) Energía requerida para la transformación [kgf·m ó J]

$$E_{st} = (P_s \cdot f_p + P_{sp} + P_{sB}) \cdot t \quad (2.10)$$

Dónde:

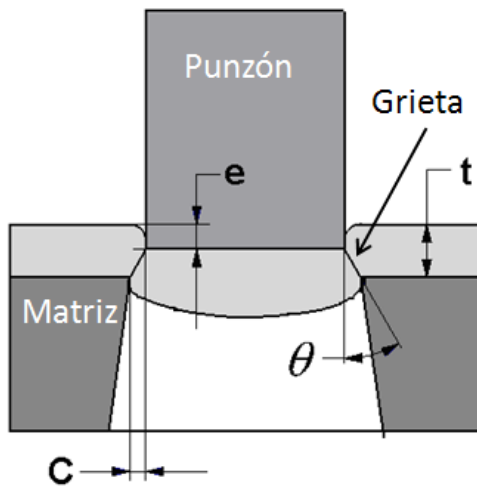
E_{st} : Energía consumida de un recorrido [kgf·m ó J]

f_p : tasa del espesor de material después de la penetración [tf ó kN].

Punzonado de Multiniveles

(5) Características de la transformación

a) Claro



$$C = \left[1 - \frac{e}{t} \right] t \cdot \tan \theta$$

$$f_p = \left[1 - \frac{e}{t} \right]$$

Donde:

C: Claro

e/t: Tasa de penetración

θ: Angulo de grieta

$$\theta = 6^\circ - 7^\circ$$

$$\tan \theta = 0.11$$

Figura 2.16 Dibujo conceptual de la transformación. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

Tabla 2.3 Tasa de penetración (e/t). Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.					
Espesor de lámina t (mm)	0.2	0.5	1	2	3
e/t	0.55	0.5	0.4	0.3	0.2

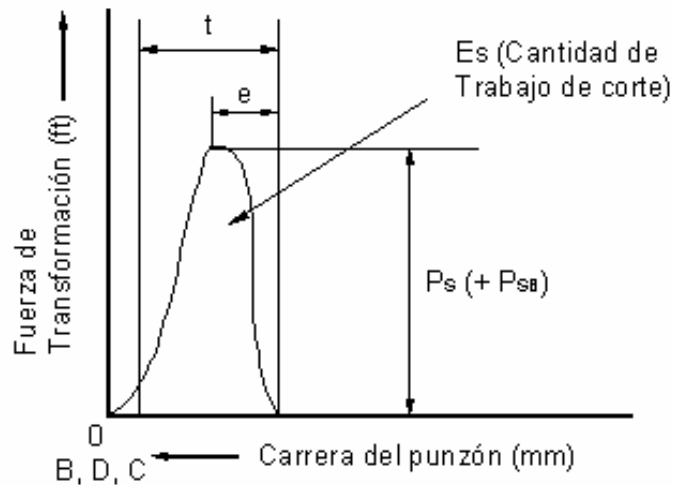


Figura 2.17 Gráfica de Fuerza de transformación vs. carrera del punzón. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

2.5 Punzonado de múltiples niveles

En general se le llama “perforación” a la transformación en que se hacen muchos barrenos de la misma dimensión con distancia cercana entre uno y otro orificio. Cuando se hace la perforación y el punzonado de muchos orificios de una sola vez, la fuerza de presión aumenta. Por lo tanto, se hace dispersar la fuerza entre cada uno de los punzones con el fin de reducirla haciendo diferentes niveles de los punzones como se señala en la figura 2.18. A este método de transformación se le llama “Punzonado de múltiples niveles” (Multi-offset punching work).

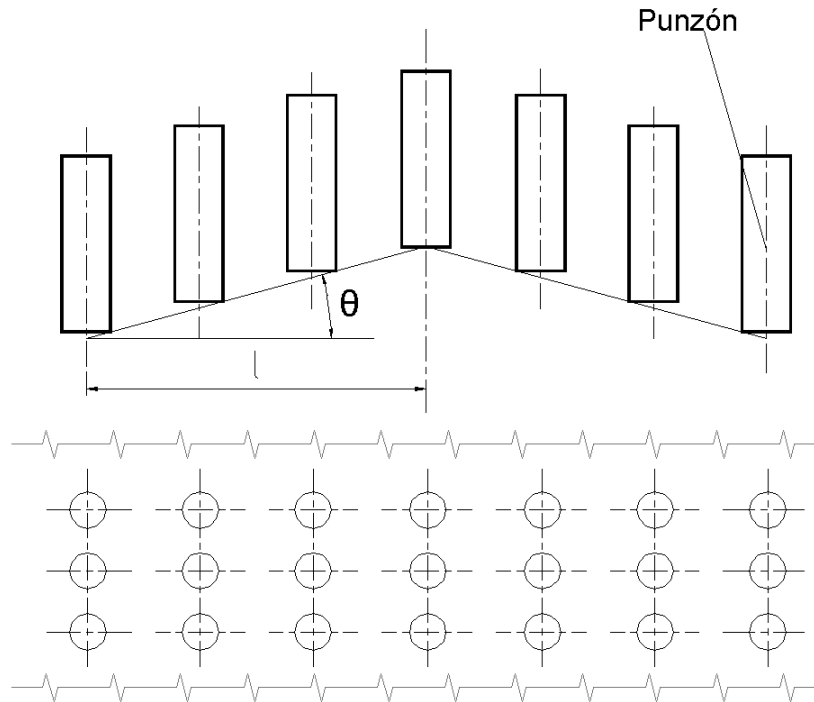


Figura 2.18 Punzonado con punzones de múltiples niveles. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

2.5.1 Cálculo de capacidades

En general el ángulo θ de la diferencia de nivel señalado en la figura 2.18, se emplea en el rango que se indica a continuación.

$$3^\circ \leq \theta \leq 8^\circ \rightarrow \theta = 5.5^\circ \quad (2.11)$$

Es decir, si es menor a 3° , la disminución de la fuerza es poco efectiva y si es mayor que 8° , la cantidad de penetración del punzón a la matriz es grande provocando desgaste, incluso un posible daño del herramienta.

$$P_{SI} = \frac{L \cdot t \cdot \tau}{1000} \quad [tf^{\wedge}] \quad (2.12)$$

Punzonado de Multiniveles

Donde; L : longitud total de corte de todos los orificios (mm), t : espesor del material a procesar (mm), τ (tau): resistencia del corte (kgf/mm^2).

P_{S2} es la fuerza de transformación aparente cuando los punzones están desnivelados como se señalan en la figura 2.18.

$$P_{S2} = \alpha_1 \cdot P_{S1} \quad [tf] \quad (2.13)$$

En la fórmula arriba, se despeja considerando lo siguiente:

$$\alpha_1 : \tan \theta = \tan 5.5^\circ = 0.1 \quad (2.14)$$

Se señala la fuerza aparente en la figura 2.20.

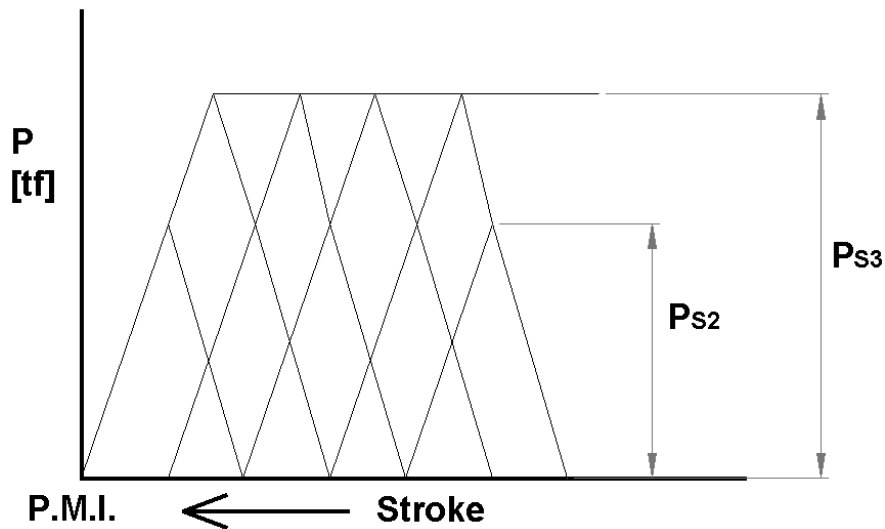


Figura 2.19 Diagrama Fuerza – Golpes. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

Expresando la energía de transformación como E_S , a partir de la figura 2.19, se da la siguiente fórmula.

$$E_S = P_{S2} ((l \times \tan \theta) + t) \times C_S \quad [kgf - m] \quad (2.15)$$

Donde C_S es coeficiente siendo (0.6 -0.8). A partir de la fórmula arriba indicada, se calcula la capacidad de la prensa.

$$P_{S3} = \frac{E_S}{H} \quad [tf] \quad (2.16)$$

Donde; H : la posición (mm) en que se genera la capacidad necesaria para el trabajo de prensa. Aquí se establece el valor estimado.

A continuación, se obtiene la fuerza de pisado P_{SB} con la siguiente fórmula.

$$P_{SB} = \alpha_2 \times P_{S3} \quad [tf] \quad (2.17)$$

Donde α_2 es coeficiente; 0.1 ~ 0.2 en el modo de operación de un recorrido

0.2 ~ 0.3 en el modo de operación continua

Por lo tanto, la fuerza total P_T es;

$$P_T = P_{S3} + P_{SB} \quad [tf] \quad (2.18)$$

La energía total E_T es;

$$E_T = P_T((l \times \tan \theta) + t) \times C_M \quad [kgf - m] \quad (2.19)$$

Donde C_M es coeficiente de corrección.

Por lo tanto, la capacidad de prensa debe ser;

$$E_T = P_T \times H \quad [kgf - m] \quad (2.20)$$

Capítulo III

Desarrollo experimental

3.1 Determinación de las variables principales que impactan en el proceso de punzonado de multiniveles y establecer condiciones de frontera de acuerdo a los recursos disponibles para la investigación.

Las variables principales que se identificaron en el proceso de punzonado son:

- La prensa.
- El Herramental.
- El material o materia prima.
- El producto final.

Cada una de estas cuatro variables principales se estudiara a detalle con el objetivo de definir las variables que se ven involucradas en cada una de ellas, de tal manera que sean muy específicas, fácil de identificar y sobre todo que su variación sea un parámetro significativo para el proceso.

3.2 La prensa

La prensa se define como la máquina que realiza una transformación a través del empleo de dos o más pares de herramientas (el herramental consiste en un juego superior e inferior), aplicando una fuerza de elevada intensidad para procesar el material, el cual está colocado entre dichas herramientas. Como se señala en la figura 3.1 la prensa está diseñada de tal manera que la fuerza aplicada al material sea soportada por la estructura. (Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, 2009).

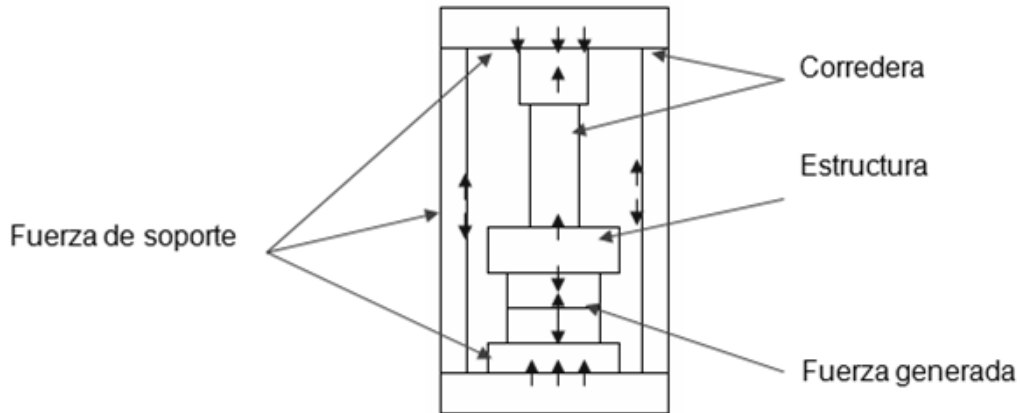


Figura 3.1. Estructura de la prensa. Elaboración propia.

Las llamadas troqueladoras son prensas accionadas tanto mecánica como hidráulicamente, de construcción horizontales y verticales, que ejecutan el movimiento y transmiten la fuerza a la base superior del troquel para que este, con ayuda de la presión, penetre la matriz, sujeta a la mesa de la máquina, y transforme la lámina. Las prensas hidráulicas usan grandes cilindros y pistones para mover el ariete. Este sistema suministra carreras más largas que las de impulsión mecánica y pueden desarrollar mayor fuerza de tonelaje. Sin embargo, son más lentas. En las prensas mecánicas se usan varios tipos de mecanismos de transmisión, los cuales convierten el movimiento giratorio del motor en movimiento lineal del ariete.

Las prensas mecánicas son preferidas para cortar, ya que las hidráulicas como consecuencia de un efecto de descuelgue en el movimiento del troquel, tienden a aumentar el desgaste de los punzones, mientras la prensa mecánica impacta la lámina y retrocede inmediatamente, limitación que es corregida en las máquinas modernas.

Punzonado de Multiniveles

La máquina apropiada para cada proceso debe elegirse de acuerdo a la necesidad de impacto (fuerza en toneladas), a las dimensiones del material y el número de piezas a producir. Las troqueladoras hoy día tienen capacidades de presión superior a las 2.000 Toneladas (Tn). (“Estudio de prospectiva tecnológica para la manufactura de troqueles y su aplicación en el contexto nacional 2014”.)

3.2.1 Velocidad de la prensa

La velocidad de la prensa, es la velocidad de transformación que posee la prensa; es decir, es la velocidad de formado del producto a trabajar. (Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett, 2008).

En algunas prensas este valor se puede modificar, en realidad, no es simple hacer esto, se necesita que desde el momento que se esté conceptualizando y diseñando la prensa, se incluya el modo de ajuste de la velocidad sin perder la capacidad.

La velocidad de la prensa es medible y se puede expresar matemáticamente con la fórmula 1.

$$v = \frac{\pi n}{30} S_d \sqrt{\frac{2r}{S_d} - 1} \quad (1)$$

Dónde:

v = Velocidad de descenso de la corredera (mm/s)

n = Número de recorridos de la corredera por minuto (spm)

Punzonado de Multiniveles

S_d = Posición de la corredera (mm)

r = Radio cigüeñal de la prensa (mm)

Con la ayuda de esta fórmula podemos observar cuales son los factores que modifican significativamente la velocidad de la prensa, este es el objetivo de mencionar dicha fórmula, sin embargo, en la práctica las empresas utilizan comúnmente la fórmula 2.

$$V = \frac{6v}{100} \quad (2)$$

Dónde:

V = Velocidad de descenso de la corredera (m/min)

v = Velocidad de descenso de la corredera (mm/s)

Como se puede observar la única diferencia que existe entre la fórmula 1 y la fórmula 2 son las unidades de salida, la primera nos arroja la velocidad de la prensa en milímetros por segundo, que son generalmente las unidades utilizadas para el diseño de las prensas; mientras que la segunda nos proporciona la velocidad de la prensa en metros por minuto; que son las unidades utilizadas en la industria, el motivo lo explicamos a continuación.

Debido a que ya existe mucha investigación previa con relación al trabajo de los materiales por medio del estampado y troquelado, se han determinado por medios experimentales la velocidad límite de formación de los materiales más utilizados

Punzonado de Multiniveles

en la industria. La figura 3.2 muestra la velocidad límite de transformación para diferentes tipos de metales.

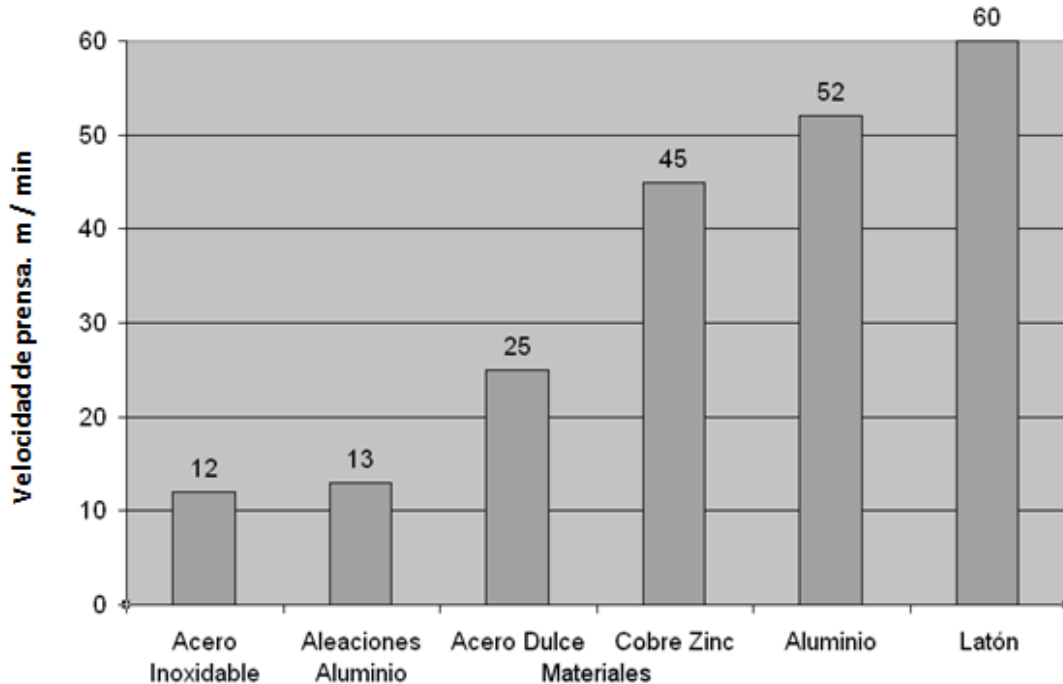
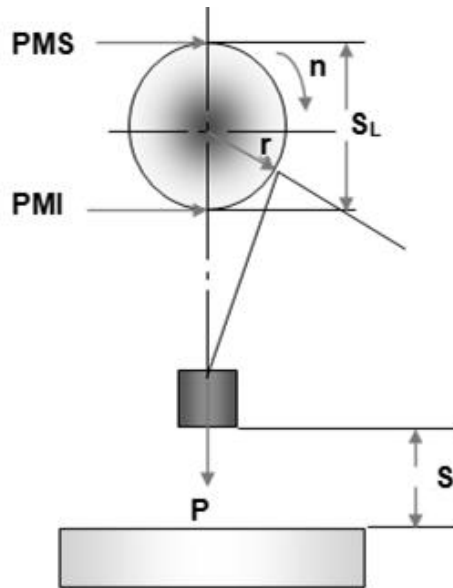


Figura 3.2. Velocidad límite de transformación para diferentes tipos de metales.

Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

Por este tipo de información que podemos encontrar en algunos libros dedicados al estampado y troquelado de metales, cabe señalar que la velocidad límite de formación es un factor muy importante que no debe omitirse al trabajar con formación de metales, en caso de exceder estos valores se provocarían defectos en los productos, tal como, fisuras o adelgazamientos locales.

Los variables que determinan la velocidad de la prensa se pueden apreciar gráficamente y de manera muy sencilla en la figura 3.3, la cual ilustra el mecanismo de la prensa mecánica.



Dónde:

PMS: Punto muerto superior.

PMI: Punto muerto inferior.

n : Revoluciones por minuto de cigüeñal.

r : Radio de cigüeñal.

SL : Carrera de la prensa.

S : Posición de capacidad máxima, expresada también con la letra H .

Figura 3.3. Mecanismo manivela – biela – corredera. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

3.2.2 Capacidad de la prensa

La capacidad de la prensa, es la máxima fuerza que puede generar la prensa para realizar el proceso de transformación. Por lo general es expresada en Kilo Newton (KN) o en Toneladas fuerza (Tf). (Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett, 2008).

En el mecanismo de la prensa mecánica o de cigüeñal, como se señala en la figura 3.4, el volante que recibe la fuerza motriz del motor eléctrico, almacena cierta cantidad de la fuerza de inercia y la transmite al mecanismo motriz de la corredera (en este caso al eje cigüeñal) y hace generar la fuerza de presión en la corredera que baja. El estado de esta fuerza de presión se señala en la figura 3.5. De acuerdo a esta figura, la fuerza mínima está localizada en el centro de la carrera, posteriormente se adquiere gradualmente mayor fuerza conforme se

Punzonado de Multiniveles

traslada hacia el punto muerto inferior, alcanzando teóricamente fuerza infinita en la posición cercana al punto muerto inferior. Como se observa en la figura 3.5, el gráfico se llama “curva de relación entre capacidad y carrera”.

En la figura 3.3 y 3.5 se observa la posición en que se permite generar la capacidad máxima utilizable para el proceso, ya que la fuerza de presión generada crece infinitamente conforme se acerca al punto muerto inferior. A esta posición se le llama posición de capacidad máxima, y se denomina con la letra S o H, físicamente se expresa como la altura medida, desde el punto muerto inferior hasta la altura donde se genera la capacidad máxima, este valor es expresado en mm. Un punto muy importante es que el valor, grande o pequeño de esta altura definen el cantidad de energía que la prensa puede generar, este punto lo trataremos un poco más adelante.

En otras palabras, la capacidad de la prensa es la fuerza de presión máxima que es permisible de acuerdo con la estructura de la prensa. A esta fuerza le denominan también “capacidad nominal” o “capacidad máxima permisible”. Se indica que la prensa se debe usar bajo la capacidad denominada.

Punzonado de Multiniveles

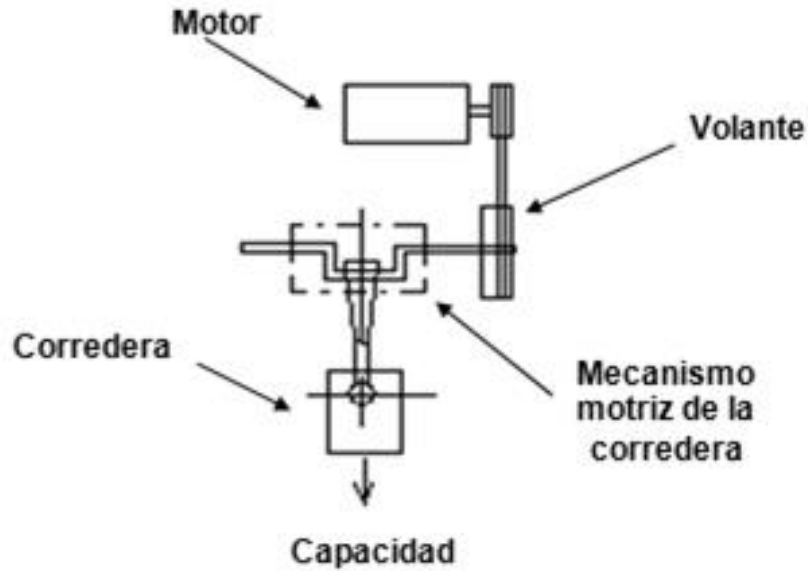


Figura 3.4. Mecanismo de la prensa cigüeñal. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

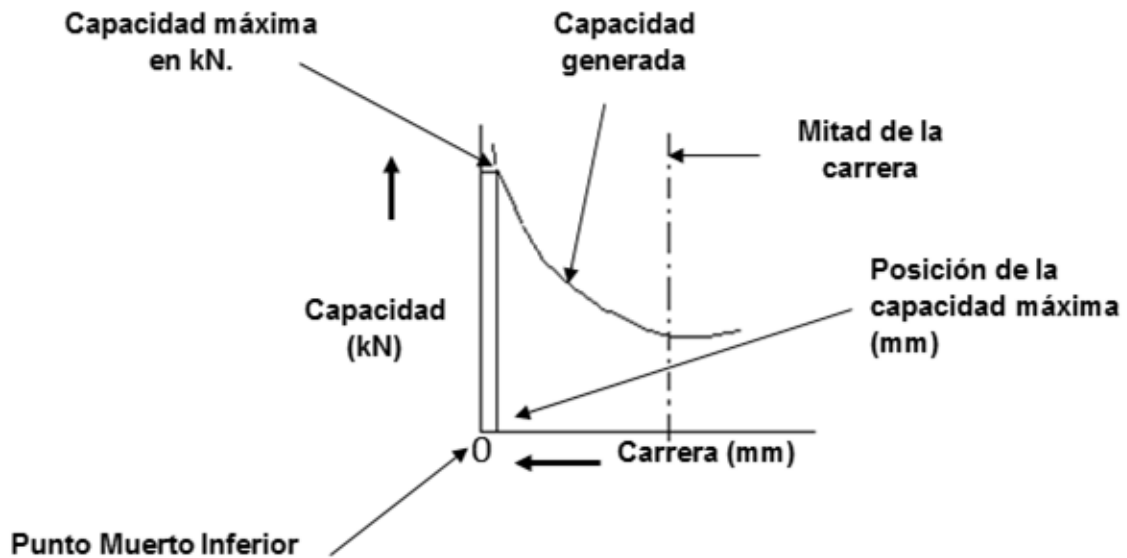


Figura 3.5. Curva de relación entre capacidad y carrera. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

Punzonado de Multiniveles

Matemáticamente se puede expresar la capacidad de la prensa de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P_v = \frac{T_c}{S_d \sqrt{\frac{2r}{S_d} - 1}} \quad (3)$$

Dónde:

P_v = Capacidad (tf ó KN)

T_c = Torque del eje cigüeñal (kgf·m ó N·m)

S_d = Posición de la corredera (mm)

r = Radio cigüeñal de la prensa (mm)

3.2.3 Energía de la prensa.

La energía de la prensa es la máxima energía que la prensa puede generar para realizar el proceso de transformación sus unidades son Kgf – m, con lo que confirmamos que la energía de la prensa se apega a la definición de trabajo mecánico, que es igual a una fuerza multiplicada por una distancia. En realidad este término es poco utilizado en la industria, pero no por eso deja de ser un factor muy importante al realizar procesos de estampado. (Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, 2009).

Punzonado de Multiniveles

La energía que puede desarrollar la prensa mecánica se obtiene de la cantidad de inercia que puede almacenar el volante y de la eficiencia que presente al momento de transferir la energía del volante hacia la corredera, matemáticamente podemos expresar esto de la siguiente manera:

La energía que puede acumular el volante en forma de inercia se representa con la fórmula 4.

$$E_m = \frac{GD^2 n^2}{7160} \quad [\text{kgf} \cdot \text{m}] \quad (4)$$

Dónde:

E_m = Energía del volante (Kgf – m ó J)

G = Masa del volante de inercia (Kgf)

$$G = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \times b \times \gamma \quad [\text{kgf}] \quad \text{--- (5)}$$

D = Área del volante de inercia (m^2)

$$D^2 = \frac{(d_1^2 + d_2^2)}{2} \quad [\text{m}^2] \quad \text{--- (6)}$$

n = Revoluciones por minuto del volante (rpm)

d_1 = Diámetro externo del volante de inercia (m)

d_2 = Diámetro interno del volante de inercia (m)

b = Ancho del volante de inercia (m)

Punzonado de Multiniveles

γ = Peso específico del volante de inercia (Kg /cm^3)

Para el acero este valor es de 0.0072 Kg /cm^3 .

Las dimensiones que tome el volante de acuerdo a la figura 3.6 son las variables significativas que afectan la cantidad de inercia que se puede acumular en el volante y por lo tanto la energía de la prensa.

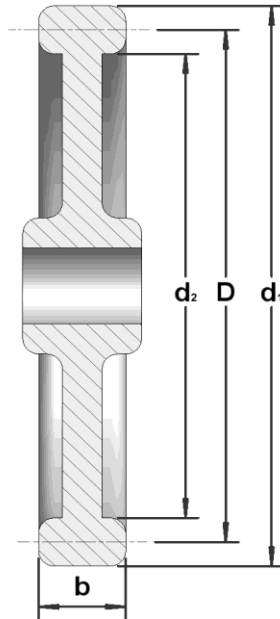


Figura 3.6. Dimensiones para el cálculo de la energía del volante. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

La fórmula anterior se vuelve un poco complicada de aplicar debido a que se necesitan valores prácticos que solo se pueden obtener con la medición física de la prensa. Por lo que se debe de invertir tiempo para poder recolectar dichos

Punzonado de Multiniveles

valores. Ahora presentaremos la fórmula que nos arroja la cantidad de energía de se transmite hacia la corredera, en realidad este es el valor que nos importa, ya que el proceso de transformación se realiza utilizando solo esta energía, lo anterior lo podemos representar matemáticamente mediante la siguiente fórmula 7.

La energía de la prensa denominada también energía significativa o energía real es:

$$E = E_m \left(1 - (1 - \rho)^2\right) \quad [\text{kgf} \cdot \text{m}] \quad (7)$$

Dónde:

E = Energía de la prensa (Kgf - m ó J)

E_m = Energía del volante (Kgf - m ó J)

ρ = Tasa de reducción de la velocidad de volante (-)

Este valor es aproximadamente 20 – 25 %.

La siguiente fórmula es considerada la ecuación fundamental para conocer la capacidad de la prensa mecánica, es muy utilizada en la industria para el cálculo de los procesos y toma de decisiones al momento de seleccionar y adquirir una prensa.

$$E = P \times H \quad [\text{kgf} \cdot \text{m}] \quad (8)$$

Dónde:

Punzonado de Multiniveles

E = Energía de la prensa (Kgf - m ó J)

P = Capacidad de la prensa (Tf o KN)

H = Posición de la capacidad máxima (mm)

La figura 3.7 representa la relación entre la capacidad y la carrera de la prensa, sobre el eje horizontal se muestra el recorrido de la prensa, es decir, la carrera de la prensa. Y en el eje vertical se muestra el aumento de capacidad de la prensa.

Se aprecia que la energía que una prensa mecánica es directamente proporcional a la capacidad de la misma y a la posición donde aplique su máxima fuerza.

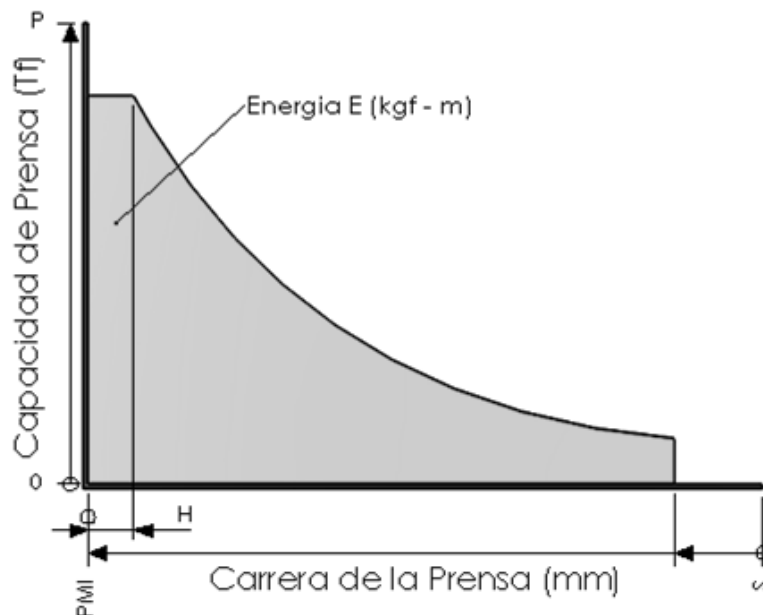


Figura 3.7. Relación entre capacidad y energía de la prensa. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

Punzonado de Multiniveles

3.3 El herramental

La estructura que se utiliza para la fabricación de los herramientas de estampado tiene la siguiente configuración. (Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, 2009).

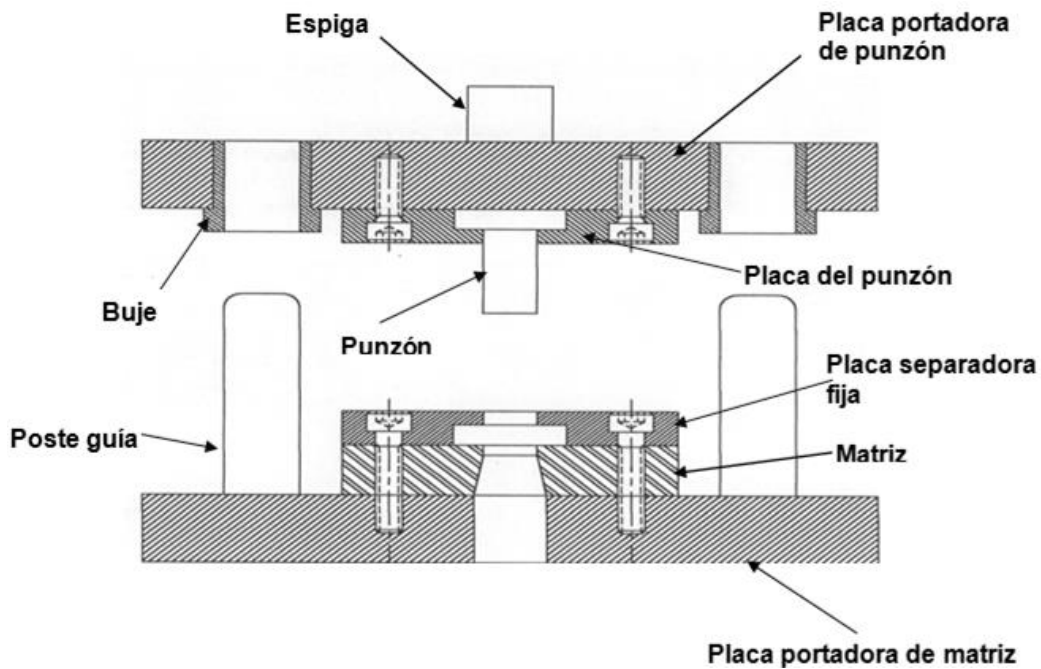


Figura 3.8. Partes de un herramental de corte. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

Placa separadora.- puede ser fija o móvil, hace desprender el material que se pega al punzón al momento de hacer el trabajo.

Punzón.- componente que tiene la misma forma y dimensión del producto

Matriz.- componente crítico que funciona como receptor del material para procesar.

Punzonado de Multiniveles

Portador del punzón.- sostiene todo el cuerpo del herramental superior. Al tratarse de un herramental grande, esta parte hace sujetar el herramental superior a la prensa.

Espiga.- componente que hace sujetar el herramental superior a la prensa.

Placa del punzón.- sostiene el punzón y lo fija.

Portador de la matriz.- sostiene el cuerpo completo del herramental inferior. Esta parte hace sujetar el herramental inferior a la prensa.

Para la presente investigación se utilizará la siguiente configuración del herramental, la diferencia con la anterior es solo que la placa separadora de material es móvil. Figura 3.9.

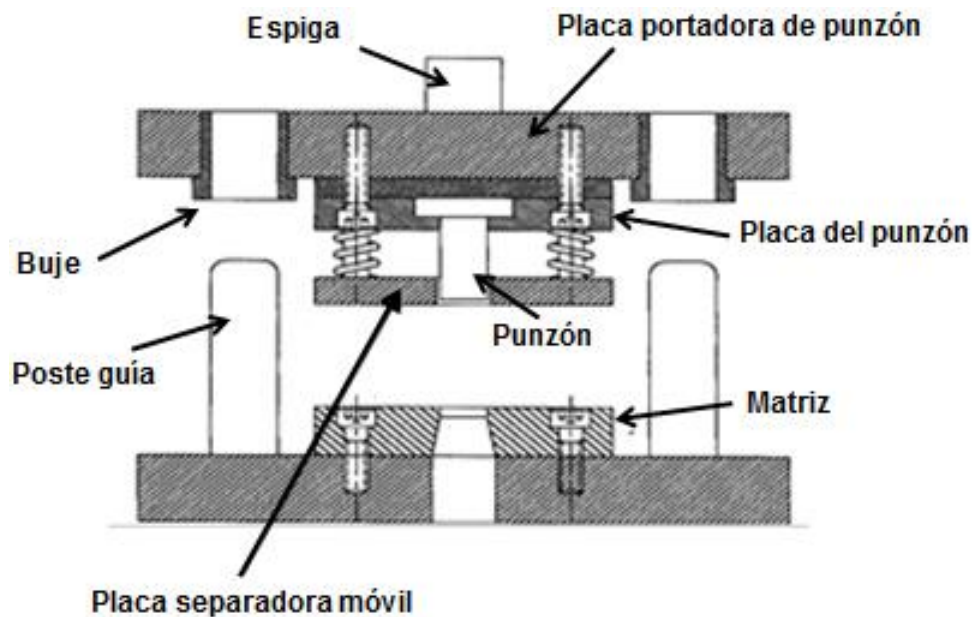


Figura 3.9. Herramental con separador móvil. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

Punzonado de Multiniveles

El punzonado es una operación donde el punzón y la matriz realizan el corte del material, se puede dividir en los siguientes pasos:

1. El punzón baja y toca el material, un instante después de tocar el material y seguir bajando el punzón se genera una parte colgada en la superficie del material. Figura 3.10.

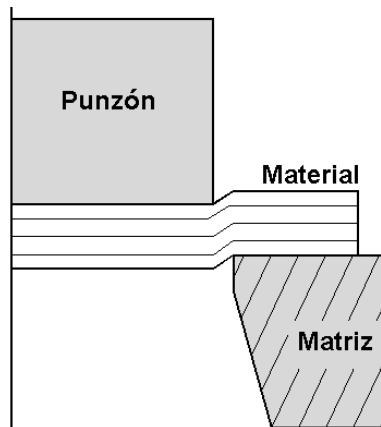


Figura 3.10. Paso inicial en proceso de corte. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

2. Al seguir su carrera descendente el punzón, se genera una grieta en el material que tiene contacto con las puntas filosas del punzón y la matriz. La superficie del material que hace contacto con el punzón y la matriz se conoce como "cara de corte" y la parte agrietada se conoce como "cara de ruptura". Figura 3.11.

Punzonado de Multiniveles

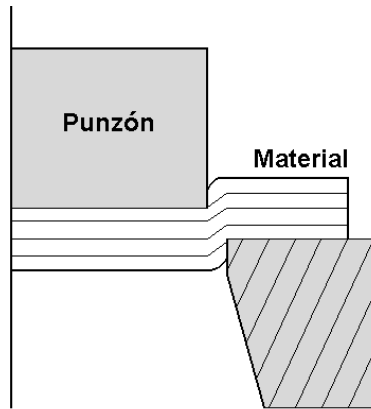


Figura 3.11. Inician grietas en el material. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

3. El punzón continúa con su carrera descendente y aproximadamente cuando penetra a una distancia de dos tercios del material la grieta del lado del punzón y la de la matriz se unen. Ocasionando la separación del material. Figura 3.12.

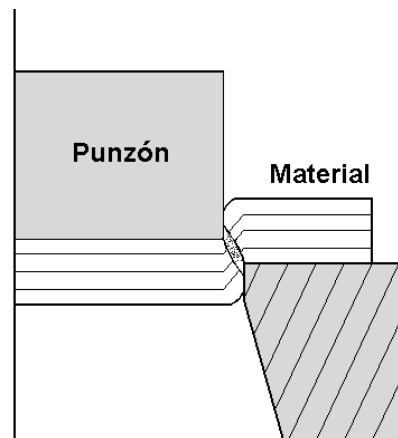


Figura 3.12. Separación de material. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

Punzonado de Multiniveles

4. Una vez que ya se ha realizado la separación del material, al punzón está muy cerca de llegar a su final de carrera, es decir al punto muerto inferior de la prensa, con esta pequeña carrera posterior a la separación del material se garantiza que la separación sea total, además ayuda mucho a la expulsión del scrap en el caso del punzonado. Generalmente, se considera que el punzón penetre en la matriz aproximadamente 1 – 1.5 veces el espesor del material que se está cortando. No se debe considerar una cantidad mayor debido a que se incrementa mucho el rozamiento entre punzón y matriz, ocasionando que el desgaste entre ellos sea muy grande.

3.3.1 Configuración de la cara de corte

Todas las operaciones de corte, punzonado y troquelado realizadas con la ayuda de un herramental de estampado, presentan la configuración de la figura 3.13.

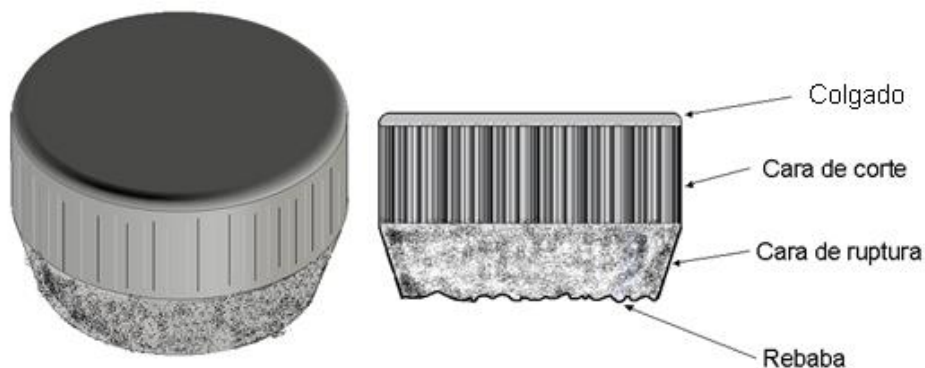


Figura 3.13. Configuración de corte. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

La cara de corte del material presenta cuatro zonas, definidas como:

Punzonado de Multiniveles

1. *Colgado (Shear Drop)*: Es la parte redonda, originada por el contacto inicial de punzón.
2. *Cara de corte (Shearing Surface)*: Es la parte brillante donde quedan marcadas líneas verticales. Esta parte es la zona crítica para nuestra investigación.
3. *Cara de ruptura (Fracture Surface)*: Es la superficie está rugosa, es originada por el desgarro del material.
4. *Rebaba (Burr)*: Es la parte que tiene esquinas filosas. Es peligroso tocarla.

3.3.2 Claro de corte

El claro de corte se define como el espacio existente entre el punzón y la matriz, se define desde la etapa de diseño y existe una estrecha relación entre el claro de corte y la configuración de la cara de corte, también está relacionada directamente con la fuerza y energía necesaria para el proceso. (Feldmann Heinz D. coaut, José Pinos Calvet, 1979).

Claro adecuado:

Al aplicar un claro adecuado la cara de corte aparece uniforme y generalmente ocupando una proporción de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{3}$ del espesor del material. Se puede juzgar hasta cierto punto el estado del claro según la cantidad, (longitud) de la cara de

Punzonado de Multiniveles

corte. Cuando la cara de corte no es uniforme, se puede sospechar que el claro no se mantiene constante. Figura 3.15.

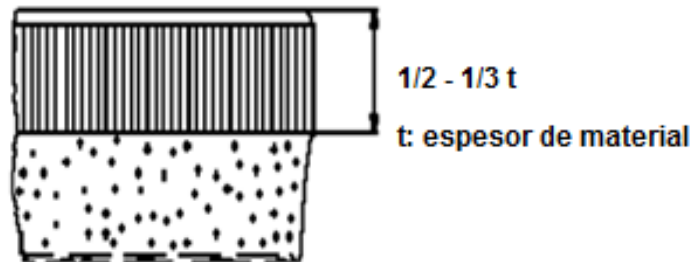


Figura 3.15. Claro de corte adecuado. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

Claro pequeño:

Si el claro de corte es pequeño las grietas que se generan por el punzón y la matriz no se encuentra acorde y se provoca la segunda cara de corte. Al trabajar con esta condición se puede provocar una quebradura o pérdida de filo en las puntas de la matriz y del punzón lo cual se convierte en una causa para que se fracture el herramental. Además, la capacidad de troquelado aumenta y el pandeo del producto se reduce, se genera mucha rebaba en forma de bigote, cabe mencionar que en esta condición es donde la altura de la rebaba es mínima, e incluso al trabajar con claro cerca de cero, se pueden obtener productos libres de rebaba. Figura 3.16.

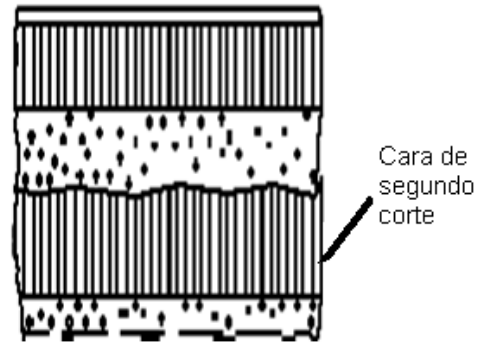


Figura 3.16. Claro de corte pequeño. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

Claro grande:

Si el claro de corte es grande el colgado y la rebaba aumentan, por lo cual la precisión del producto es inestable. Cuando las puntas del punzón y de la matriz se deterioran; suele suceder este fenómeno. La capacidad de troquelado disminuye y el pandeo del producto aumenta. La cara de ruptura aumenta considerablemente. Figura 3.17.

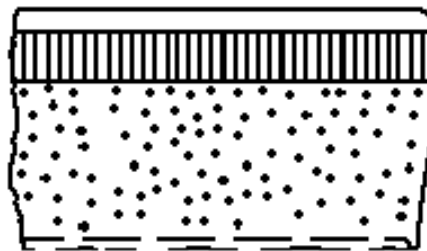


Figura 3.17. Claro de corte grande. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

Punzonado de Multiniveles

La tabla 3.1 muestra algunos de los factores que se ven afectados al considerar un claro no adecuado:

Tabla 3.1. Factores afectados por el claro de corte. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.				
Claro	Rebaba	Colgado	Fuerza para troquelar	Pandeo del material
Pequeño	<i>Pequeña</i>	<i>Pequeño</i>	<i>Grande</i>	<i>Pequeño</i>
Grande	<i>Grande</i>	<i>Grande</i>	<i>Pequeña</i>	<i>Grande</i>

La cantidad de claro de corte afecta directamente la configuración que aparecerá en la zona de corte, en la figura 3.18 se puede apreciar cómo es su comportamiento.

Punzonado de Multiniveles

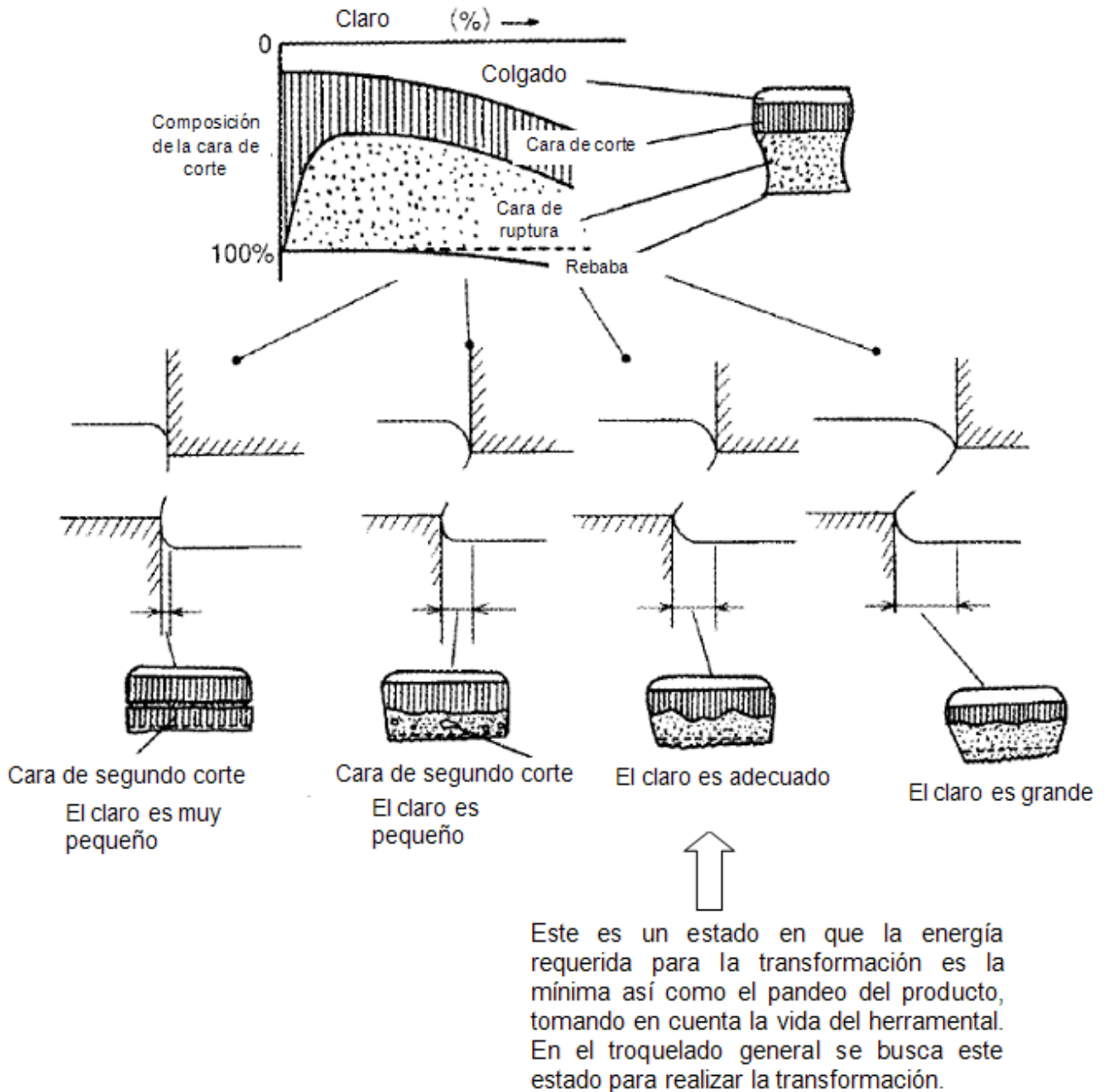


Figura 3.18. Cambio en la configuración de la cara de corte de acuerdo al claro de corte aplicado. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.

Punzonado de Multiniveles

Matemáticamente el claro de corte se define como:

$$C = \left[1 - \frac{e}{t} \right] t \times \tan \theta \quad [-] \quad (9)$$

Dónde:

C = Claro de corte (mm)

e/t = Tasa de penetración (-)

$$f_p = \left[1 - \frac{e}{t} \right] \quad [-] \quad (10)$$

θ = Angulo de grieta; $6^\circ - 7^\circ$ ($^\circ$)

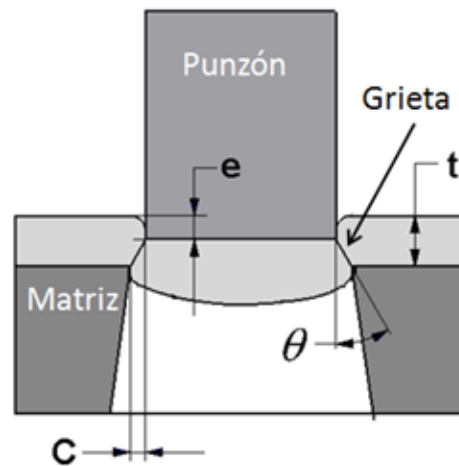


Figura 3.19. Claro de corte. Elaboración propia (2009).

La figura 3.19 ilustra las variables en el corte, la primera es el valor “e” que es la penetración del punzón antes de generar la grieta, el segundo es el valor “C” que es la holgura entre el punzón y la matriz, lo hemos nombrado como claro de corte,

Punzonado de Multiniveles

el tercero es el valor “t” que corresponde al espesor del material y el cuarto es el valor “ θ ” que es el ángulo en el cual se genera la grieta.

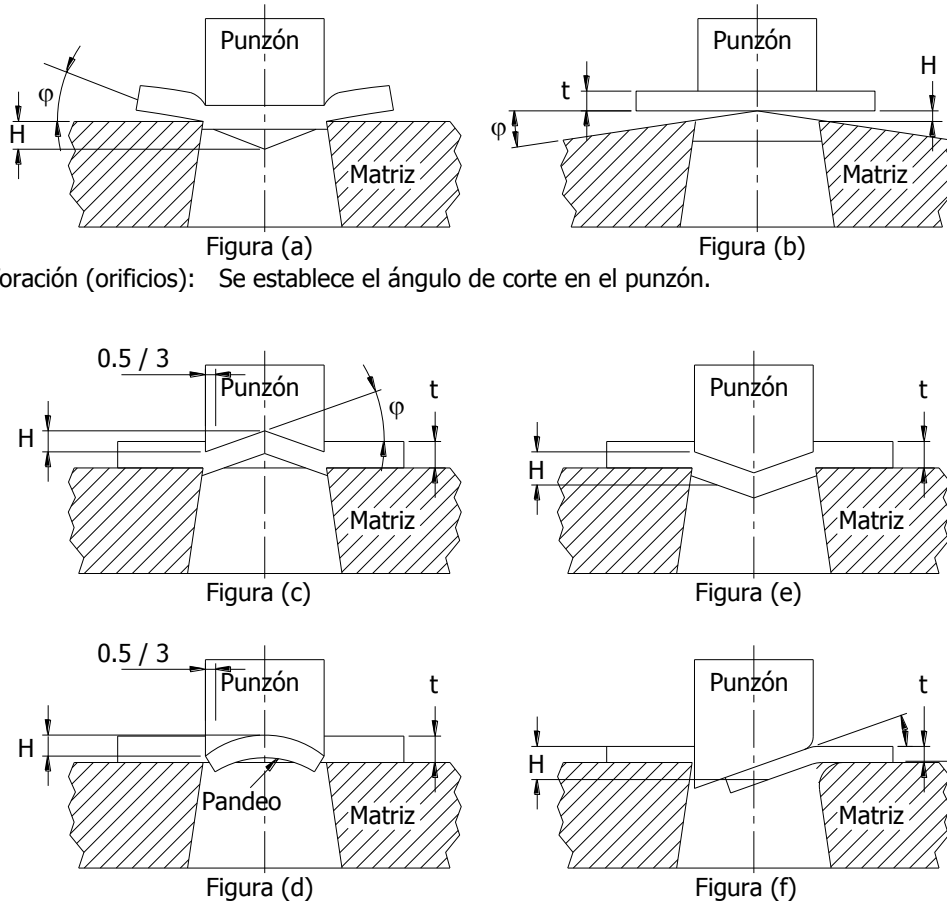
El valor que toma la tasa de penetración está determinado por la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Tasa de penetración del material. Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.					
Espesor de lámina t (mm)	0.2	0.5	1	2	3
e/t	0.55	0.5	0.4	0.3	0.2

3.3.3 *Ángulo de corte*

Se aplica el ángulo de corte cuando se troquelan láminas gruesas en una prensa de menor capacidad, lo cual permite bajar la aparente fuerza de troquelado. En la figura 3.20 se muestran diferentes configuraciones acerca de la aplicación de un ángulo de corte en punzones y matrices. Cabe señalar que es una técnica que implica un mayor tiempo de ajuste debido a la complejidad para lograr los ángulos deseados. (Feldmann Heinz D. coaut, José Pinos Calvet, 1979).

Punzonado de Multiniveles



Perforación (orificios): Se establece el ángulo de corte en el punzón.

Figura. 3.20 Ángulo de corte. Estampado en Frio de la Chapa, Mario Rossi, 1ra Edición.

La altura del corte varía dependiendo de la forma, dimensión y material del producto. Por lo general, se aplican los siguientes valores:

$H=t$ (En caso de láminas relativamente gruesas)

$H=2t$ (En caso de láminas delgadas)

Punzonado de Multiniveles

Por lo general, el ángulo de corte ϕ tiene 12 grados o menos y se establece de manera simétrica para evitar el deslizamiento del material.

En las siguientes gráficas se observa que se presenta una disminución de fuerza (tonelaje) pero con lo que respecta a la energía el cambio es muy poco.

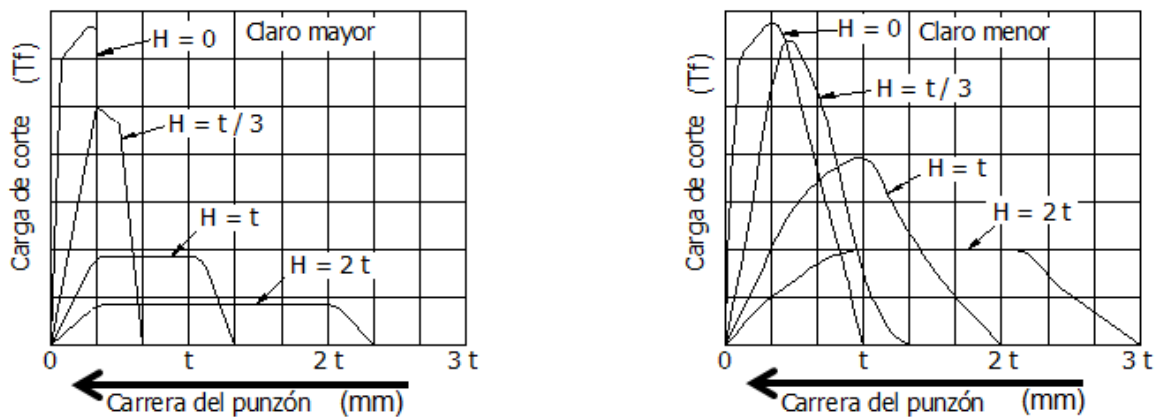


Figura. 3.21 Gráficas carrera del punzón – carga de corte. Estampado en Frio de la Chapa, Mario Rossi, 1ra Edición.

3.4 El material o materia prima

Es muy frecuente que se analice al herramental cuando se presentan defectos en los productos estampados. Se revisan los claros, el desgaste de punzón y matriz, la fuerza de los resortes, la alineación de los componentes, etc. Puesto que tanto la prensa como el material influyen de manera importante en la generación de defectos.

Punzonado de Multiniveles

Las propiedades de la materia prima que más nos importan son: el esfuerzo de cedencia, la elongación al punto de fluencia, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad, la elongación a la ruptura, el valor n , el valor r .

A continuación se explicarán a detalle las últimas dos propiedades por tratarse de factores especiales para el área de formabilidad del acero. Las propiedades anteriores son de uso muy común aunque no dejan de ser importantes para el formado de partes metálicas.

3.4.1 Valor “r”

El valor “r”, o valor de Lankford, expresa la capacidad de extensión del material que influye en el embutido. En general, se analizan el cambio de sección que sufre la probeta al aplicar una fuerza que logra una deformación “e” del 20% en la zona de la muestra y posteriormente medir la elongación correspondiente en el ancho “w” y en el espesor “t” del material de la probeta. La figura 3.22 ilustra una probeta para realizar la prueba y determinar el valor “r”. La figura 3.23 ilustra la manera adecuada para cortar las probetas, es decir se deben cortar a 0° , 45° y 90° respecto de la dirección de rolado de la tira de material. (Signorelli, J.W., Bolmaro, R.E., 2005).

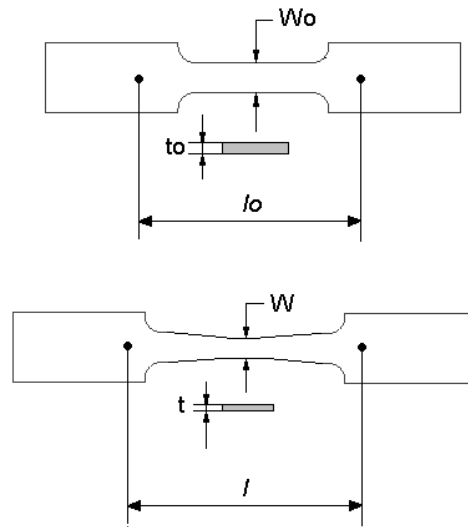


Figura. 3.22 Probetas para determinar valor "r". Die Desing Fundamentals, J. R. Paquin, R. E. Crowley, Second Edition, Industrial Press Inc. 1987.

Matemáticamente el valor "r" se expresa:

$$e = \frac{(l - l_0)}{l_0} = 0.2 = 20\% \quad (11)$$

$$r_{0^{\circ}} = \frac{\ln\left(\frac{W_0}{W}\right)}{\left(\frac{t_0}{t}\right)} \quad (12)$$

$$r = \frac{r_{0^{\circ}} + r_{45^{\circ}} + r_{90^{\circ}}}{4} \quad (13)$$

Dónde:

l = Longitud antes de prueba (mm)

l_0 = Longitud después de prueba (mm)

Punzonado de Multiniveles

e = Deformación (mm/mm)

w = Ancho antes de prueba (mm)

w_0 = Ancho después de prueba (mm)

r_{0° = Valor de r a 0 grados.

r_{45° = Valor de r a 45 grados.

r_{90° = Valor de r a 90 grados.

t = Espesor material antes de prueba (mm)

t_0 = Espesor material después de prueba (mm)

r = Valor r promedio en las 3 direcciones.

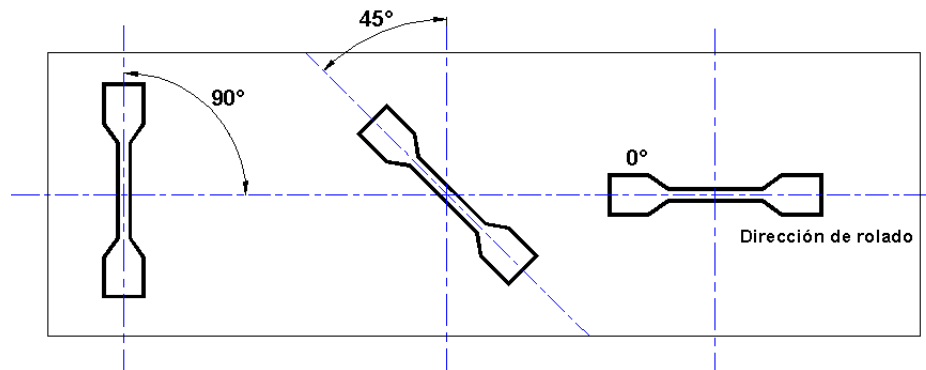


Figura. 3.23 Dirección de probetas. Die Desing Fundamentals, J. R. Paquin, R. E. Crowley, Second Edition, Industrial Press Inc. 1987.

Punzonado de Multiniveles

El valor “r” tiene una estrecha relación con el embutido profundo. Entre más alto sea el valor “r” se presenta la mejor capacidad de embutido profundo. Por otro lado tiene correlación con el estiramiento de pestaña y entre más grande sea mejora el límite de conformado, este valor favorece el frenado de las arrugas.

3.4.2 Valor “n”

El valor “n” expresa el grado de endurecimiento del material por deformación. En el estampado y troquelado este valor determina el límite de formación. Al conocer el valor “n” de los materiales podemos predecir si dicho material se puede romper. (S. Holmberg, B. Enquist y P. Thilderkvist, J. Mater., 2004).

3.5 El producto final

El producto final marca una pauta importante para saber las limitaciones y prevenciones del proceso; en este caso, los puntos críticos son la forma geométrica del punzonado y la zona donde se realizara el proceso.

Es posible hacer diámetros de punzonado de hasta 0.5 t dependiendo del tipo de material del punzón y material a punzonar; sin embargo, lo recomendado se muestra en la siguiente tabla 3.3.

Punzonado de Multiniveles

Tabla 3.3. Diámetro mínimo de punzonado. Procesos de Manufactura, Phillip F Ostwald, Myron L. Begeman, 3a edición en español, Compañía Editorial Continental, 1981.

Material	Punzonado general con separador fijo.		Punzonado de precisión con separador móvil.	
	Orificio redondo	Orificio rectangular	Orificio redondo	Orificio rectangular
Acero duro	1.3 t	1.0 t	0.5 t	0.4 t
Acero dulce	1.0 t	0.7 t	0.35 t	0.3 t
Latón	1.0 t	0.7 t	0.35 t	0.4 t

Dónde t es el espesor del material a punzonar.

Para evitar la deformación de los orificios que están muy cerca entre sí, es necesario dejar un espacio como mínimo de $2t$ entre uno y otro, y si queremos ser un poco más estrictos podemos tomar de referencia la siguiente tabla 3.4.

Punzonado de Multiniveles

Tabla 3.4. Distancia mínima para punzonado. Procesos de Manufactura,
Phillip F Ostwald, Myron L. Begeman, 3a edición en español, Compañía
Editorial Continental, 1981.

Caso de orificio redondo.		Caso de orificio rectangular.	
Espesor del material t (mm)	Espacio mínimo b (mm)	Espesor del material t (mm)	Espacio mínimo b (mm)
Menor de 1.55	3.1	Menor de 2.3	4.6
Igual o más de 1.55	$2 t$	Igual o más de 2.3	$2 t$

Donde b se representa de la siguiente manera.

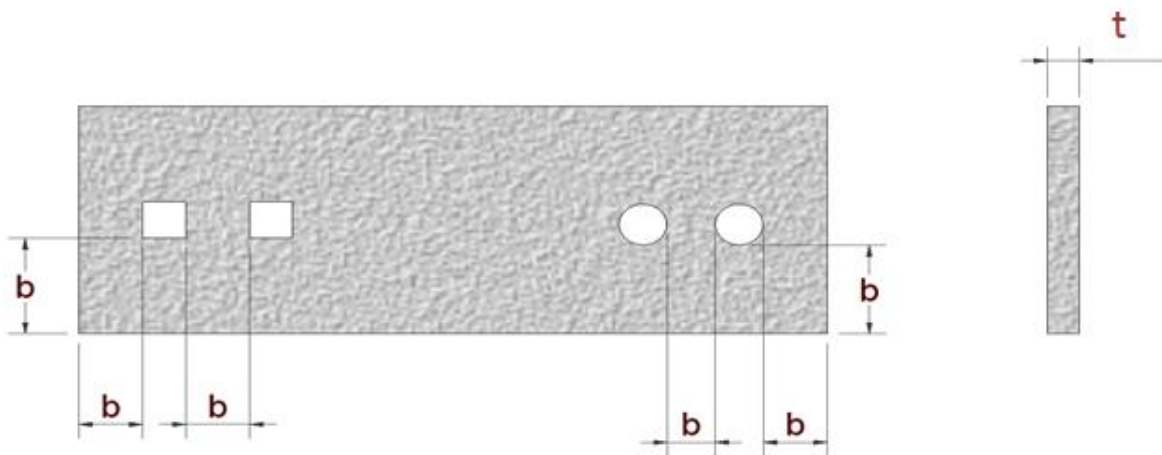

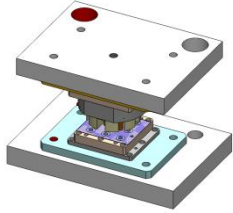
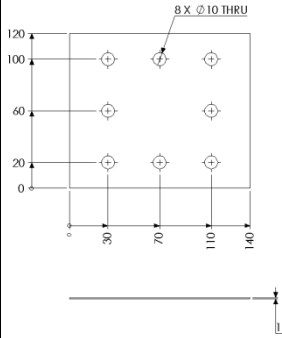
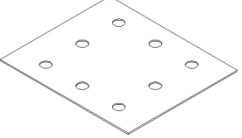


Figura 3.24. Distancia mínima para punzonado. Elaboración propia (2009).

Tomando como base lo analizado en el punto anterior, procederemos a colocar condiciones de fronteras, de acuerdo a los recursos disponibles para la investigación se elabora la tabla 3.5, la cual muestra las variables del proceso de punzonado.

Punzonado de Multiniveles

Tabla 3.5. Factores principales para el proceso de punzonado. Elaboración propia, 2014.

Variables principales para el proceso de Punzonado.	1. Prensa	<i>Velocidad</i> V [m / min]	Variable	
		<i>Capacidad</i> P [Tf]	Fija	
		<i>Energía</i> E [Kgf – m]	Fija	
	2. Herramental	<i>Claro de corte</i> C [mm]	Fija	
		<i>Afilado o ángulo corte</i> [-]	Fija	
	3. Materia Prima	<i>Resistencia al corte</i> δ [Kgf /mm2]	Fija	 
		<i>Valor "n"</i> n [-]	Fija	
		<i>Valor "r"</i> r [-]	Fija	
	4. Producto Final	<i>Forma Geométrica</i>	Fija	
		<i>Cantidad y posición de barrenos.</i>	Fija	

Punzonado de Multiniveles

Los recursos materiales disponibles para la investigación nos da la oportunidad de utilizar una prensa Servo, la que tiene las siguientes características:

Modelo:	H1F45 – 011
Capacidad Máxima:	450 KN (45 Tf)
Número de Ciclos de la Corredera:	100 ciclos / min.
Desplazamiento de la Corredera:	100 mm.
Ajuste de la Corredera:	60 mm.
Velocidad:	20 m / min.



Figura 3.25. Prensa para experimentación. Komatsu Press Machine.

Punzonado de Multiniveles

Herramental

Se propuso el diseño y fabricación de un herramental para el siguiente producto:

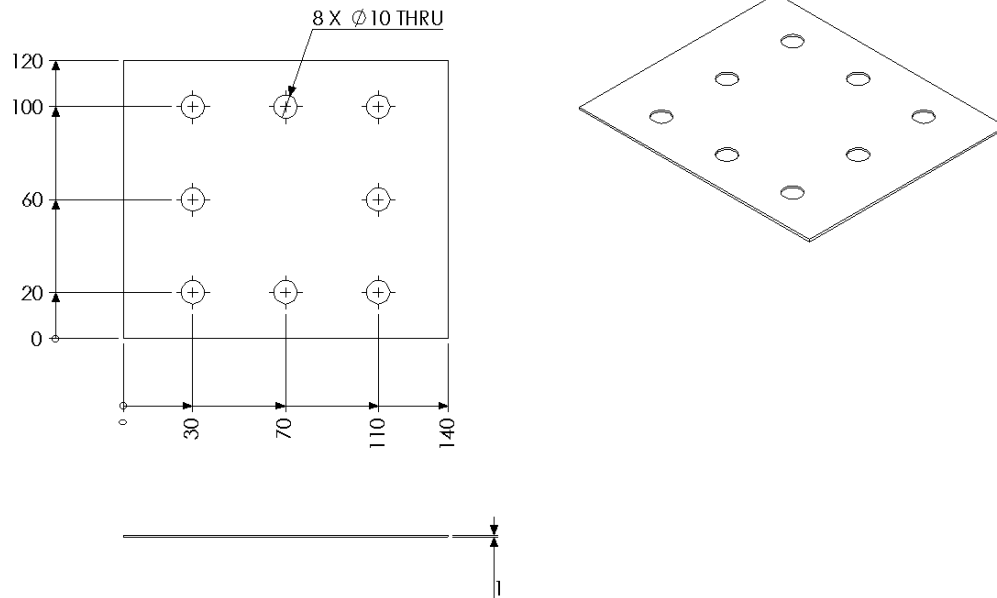


Figura 3.26. Producto para experimentación. Elaboración propia, 2014.

El material es Acero SAE 1018, uno de los aceros más comunes que se utilizan en la industria para realizar proceso de estampado metálico. Como se puede observar, con el simple hecho de proponer el producto a experimentar, se han definido las variables que surgen por el herramental.

El herramental tiene la siguiente configuración:

Tipo de herramental: Mono – proceso.

Claro de corte: 0.06 mm.

Afilado de punzón: 0° (punzón plano)

Punzonado de Multiniveles

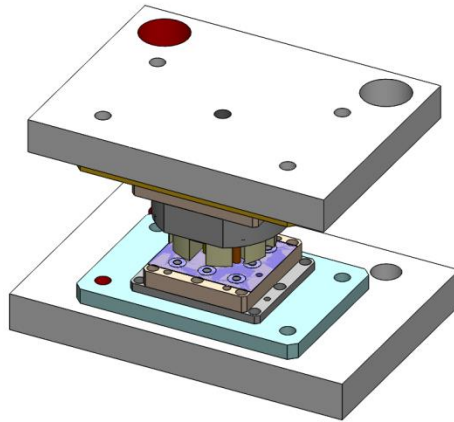


Figura 3.27. Diseño de herramental para experimentación. Elaboración propia, 2014.

Materia Prima

Las características del acero SAE 1018 son:

Tipo de acero:	Acero al carbono AISI – SAE 1018.
Espesor	1 mm.
Resistencia a la tensión.	$\delta = 370 \text{ MPa. (37.76 Kgf/mm}^2\text{)}$.
Valor “n”	1.5
Valor “r “	0.15

Producto final

La forma del producto final lo definimos en el punto relacionado con el herramental, el cual tiene las siguientes características:

Forma geométrica:	Circular.
Diámetro de barreno:	10 mm.

Punzonado de Multiniveles

Cantidad total de barrenos:

8 barrenos.

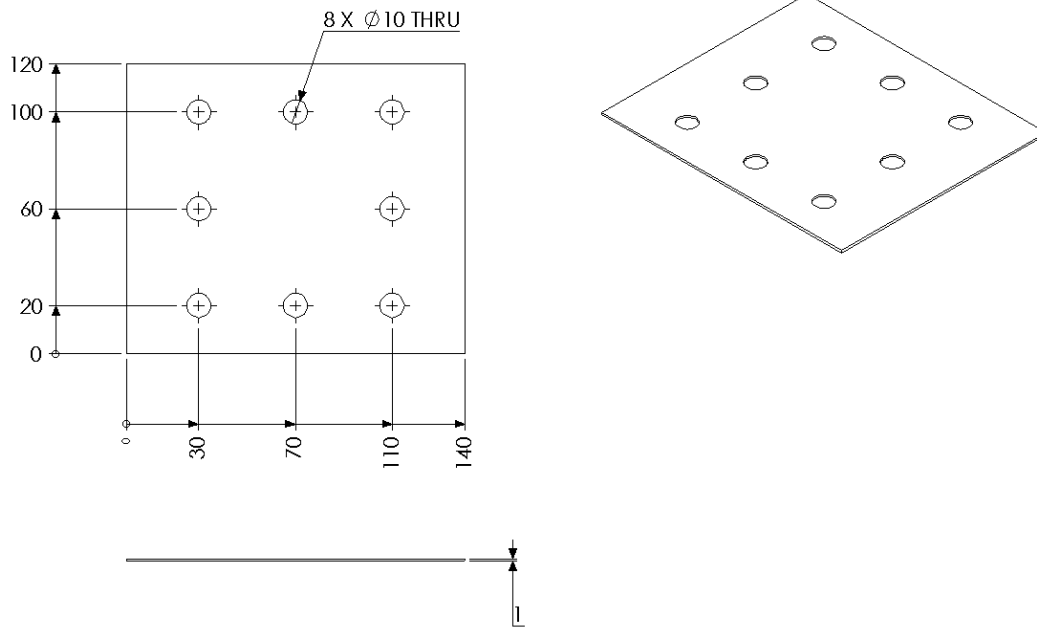


Figura 3.28. Esquema del producto final. Elaboración propia, 2014.

Parámetros para la validación por elemento finito.

Para aumentar el grado de confiabilidad de los valores que obtuvimos con las galgas extenso – métricas se realizó un análisis de elemento finito, a continuación se describe lo realizado.

- Tipo de Simulación: Explicit Dynamics.
- Número de punzones: 1 Punzón.
- Material de punzón: Acero AISI – SAE D2.
- Velocidad de punzón: 20 metros / minuto.
- Lamina punzonada: Acero al carbono AISI – SAE 1018.
- Geometría de producto: Circular.
- Diámetro de punzonado: 10 mm.

Capítulo IV

Resultados.

4.1. Diseño, fabricación, instrumentación, experimentación del herramental y obtención de micro – deformaciones en cada galga extenso – métrica.

4.2 Diseño del herramental de prueba

El diseño del herramental de prueba se realizó contemplando dos necesidades básicas, la primera es la funcionalidad del herramental de corte y la segunda la necesidad de instrumentar el herramental, lo cual implicó algunos cambios significantes con respecto al diseño básico de un herramental de corte.

El diseño del herramental se ha dividido en dos partes y se procedió a realizar el diseño de detalle de cada una de ellas, las cuales son: herramental Superior y herramental Inferior.

En el herramental superior que se muestra en la figura 4.1, se colocaron los punzones de corte y el pisador móvil del material. El herramental superior está integrado por los siguientes componentes:

- Placa superior fixture QFBB 200 x 200
- Placa base superior QFBB 200 x 200.
- Respaldo de punzón.
- Porta punzón.
- Guía de pisador.
- Pisador.
- Punzón.
- Punzón sin corte.

Punzonado de Multiniveles

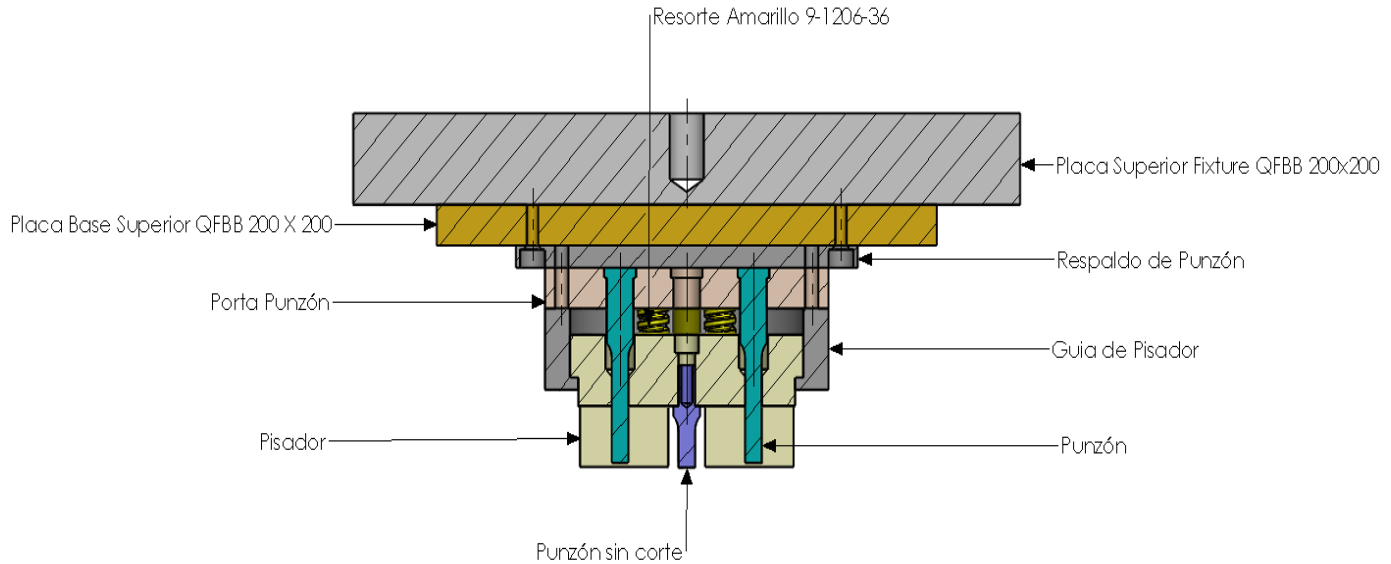


Figura 4.1. Esquema del herramental superior. Elaboración propia, 2014.

En el herramental superior que se muestra en la figura 4.2, se colocaron las matrices de corte, las cuales son insertos para facilitar al reemplazo de las mismas. El herramental superior está integrado por los siguientes componentes:

- Placa inferior fixture QFBB 200 x 200
- Placa base inferior QFBB 200 x 200.
- Respaldo de matriz.
- Porta matriz.
- Matriz.

Punzonado de Multiniveles

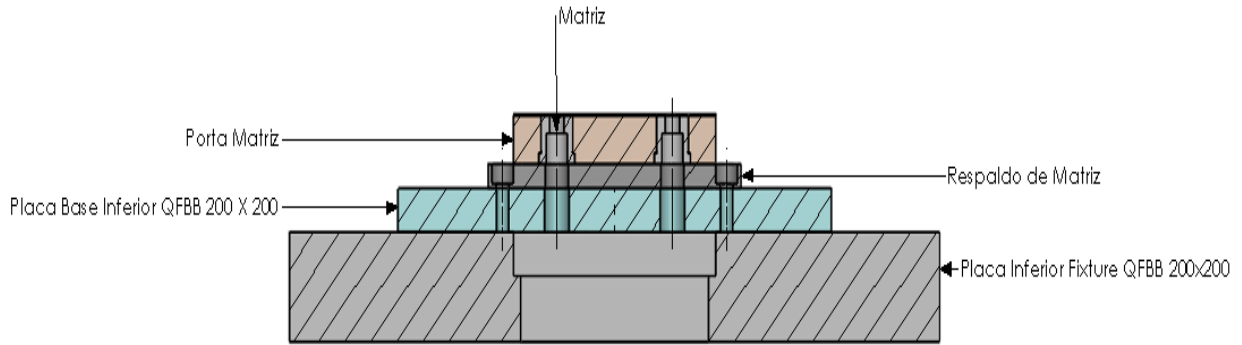


Figura 4.2. Esquema del herramental inferior. Elaboración propia, 2014.

La función primordial del herramental superior es el alojamiento adecuado y preciso de los punzones y el pisador del material a procesar. En el caso del herramental inferior, se trata de lograr el alojamiento adecuado y preciso de las matrices de corte y guía del material a procesar.

Tomando en consideración que el herramental deberá ser instrumentado se realizaron principalmente las modificaciones en el herramental superior, se muestra el espacio habilitado para poder colocar las galgas extenso – métricas.

Figura 4.3.

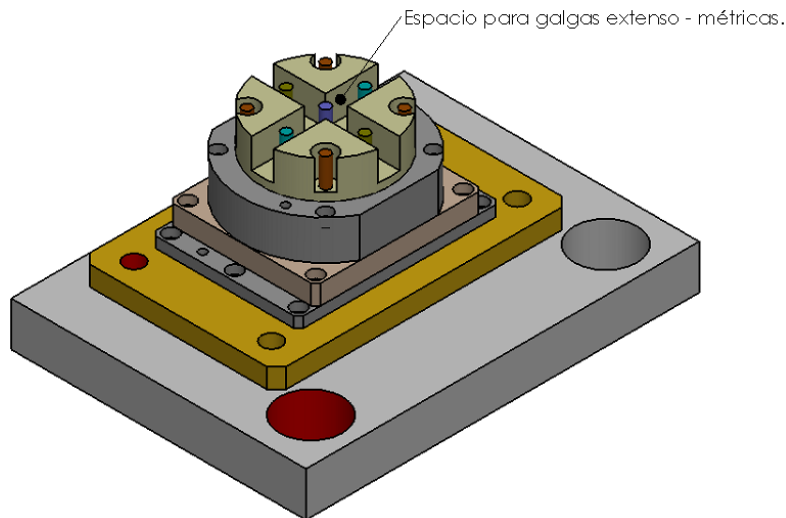


Figura 4.3. Esquema del herramental superior con diseño para alojar galgas extenso – métricas. Elaboración propia, 2014.

Punzonado de Multiniveles

Al concluirse el modelo en 3D, para lo que se usó la plataforma de diseño SolidWorks, se elaboraron los planos de manufactura 2D de cada una de las piezas que integran el herramental de prueba, los cuales se utilizaron para la fabricación del herramental. Las figuras 4.4 y 4.5 son planos de manufactura realizados para el herramental.

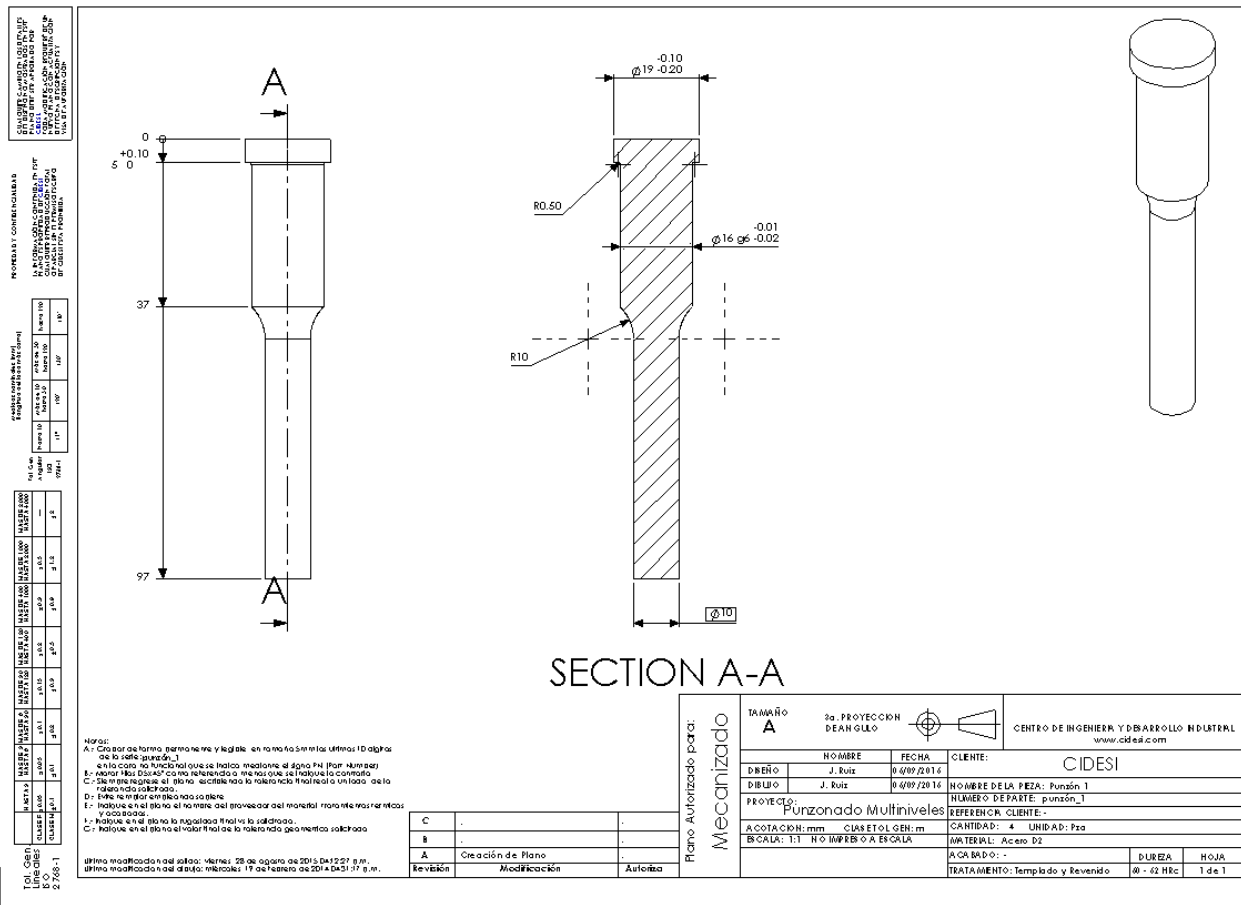


Figura 4.4. Plano de manufactura de punzón. Elaboración propia, 2014.

Punzonado de Multiniveles

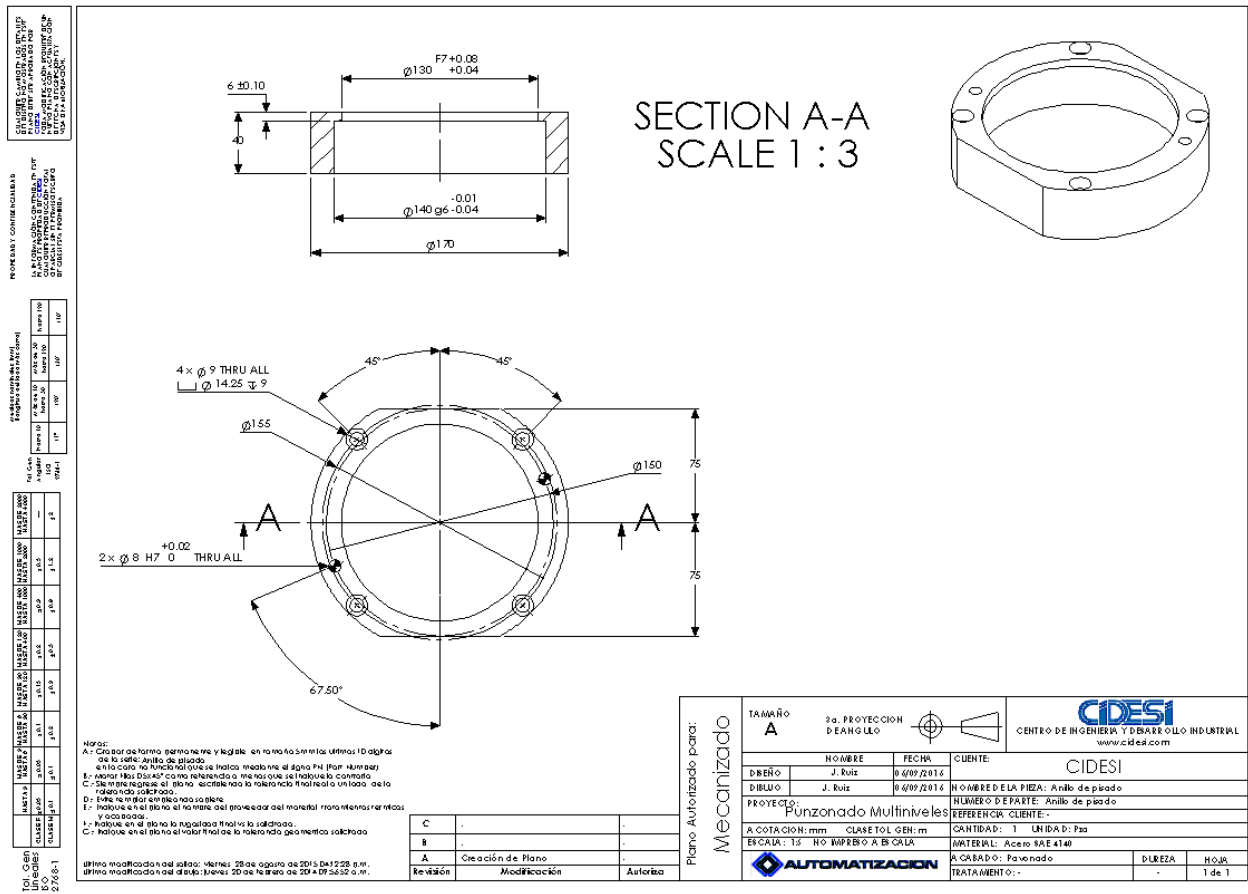


Figura 4.5. Plano de manufactura de pisador. Elaboración propia, 2014.

Los planos en 2D son de vital importancia para la manufactura de cada componente, sin embargo, además de estos planos de cada componente se necesitan planos de ensamble, estos, nos proporcionan una ayuda visual para conocer como debe ser ensamblado el herramental, la figura 4.6 muestra el plano de ensamble del herramental inferior.

Punzonado de Multiniveles

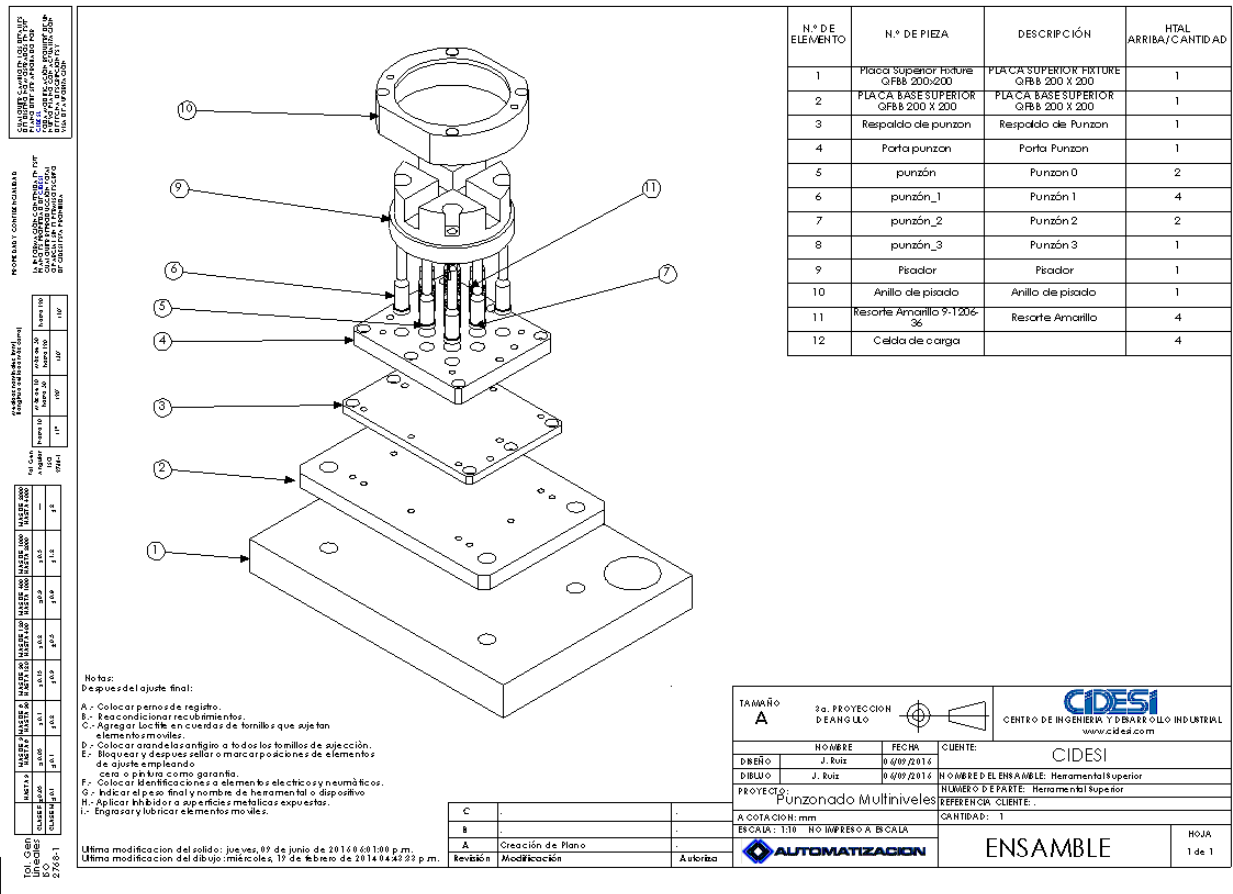


Figura 4.6. Plano de ensamble del herramental inferior. Elaboración propia, 2014.

Las condiciones dinámicas del proceso se calcularon con las siguientes formulas, (Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, 2009)

$$P = l * t * k_s * \frac{1}{1000} \quad (4.1)$$

Punzonado de Multiniveles

Dónde P es la fuerza para corte o troquelado [tf o kN], l es la longitud de corte [mm], t es el espesor de la lámina [mm], k_s es la resistencia al corte de la lámina [kgf/mm² o Mpa].

$$P_s = \alpha_1 * l * t * \frac{1}{1000} \quad (4.2)$$

Dónde P_s es la fuerza de separación [tf ó kN], l es la longitud de corte [mm], t es el espesor de la lámina [mm], α_1 es un coeficiente [kgf/mm² ó MPa] que puede ser 2 – 3 si es operación de un recorrido y 4 – 5 si es operación continua.

$$P_{sB} = \alpha_2 * P_s \quad (4.3)$$

Dónde P_{sB} es la fuerza de pisador [tf ó kN], α_2 es un coeficiente [–] que puede ser 0.1 -0.2 si es operación de un recorrido y 0.2 – 0.3 si es operación continua.

$$E_{st} = (P_s \cdot f_p + P_{sp} + P_{sB}) \cdot t \quad (4.4)$$

Dónde E_{st} es la energía consumida de un recorrido [kgf·m ó J], f_p es la tasa del espesor de material después de la penetración.

La longitud de corte es el perímetro del diámetro de 10 mm, el espesor de la lámina es 1 mm, la resistencia al corte de la lámina es 24 Kgf/mm², (ASCAMM, 2008). El modo de operación es de un solo recorrido. La tabla 4.1 muestra el resumen de las condiciones dinámicas para el caso de punzonar 2, 4, 6 y 8 barrenos.

Punzonado de Multiniveles

Tabla 4.1. Resumen de condiciones dinámicas del proceso de corte.

Configuración	Espesor Material	Diámetro Orificio	Fuerza Punzonado	Fuerza Separación	Fuerza Pisador	Fuerza Total	Energía de punzonado	Claro de corte
	mm	mm	Tf	Tf	Tf	Tf	Kgf * m	mm
2 punzones	1.00	10.00	1.90	0.31	0.57	2.78	2.02	0.07
4 Punzones	1.00	10.00	3.80	0.63	1.14	5.56	4.04	0.07
6 Punzones	1.00	10.00	5.69	0.94	1.71	8.34	6.07	0.07
8 Punzones	1.00	10.00	7.59	1.26	2.28	11.13	8.09	0.07

La tabla 4.2 muestra los cálculos para determinar la fuerza máxima y mínima para el pisador, el color verde expresa que el valor de fuerza aplicado es adecuado y el valor rojo expresa que el valor de fuerza en el pisador es inadecuado.

Para realizar el cálculo utilizamos la siguiente fórmula:

$$P_{resorte} = k_{resorte} * T_{resorte} \quad [N] \quad (4.5)$$

Dónde $P_{resorte}$ es la fuerza generada al comprimir el resorte [N], $k_{resorte}$ es la constante de proporcionalidad del resorte [N/mm] y $T_{resorte}$ es la longitud que se comprime el resorte [mm]. Ver figura 4.7.

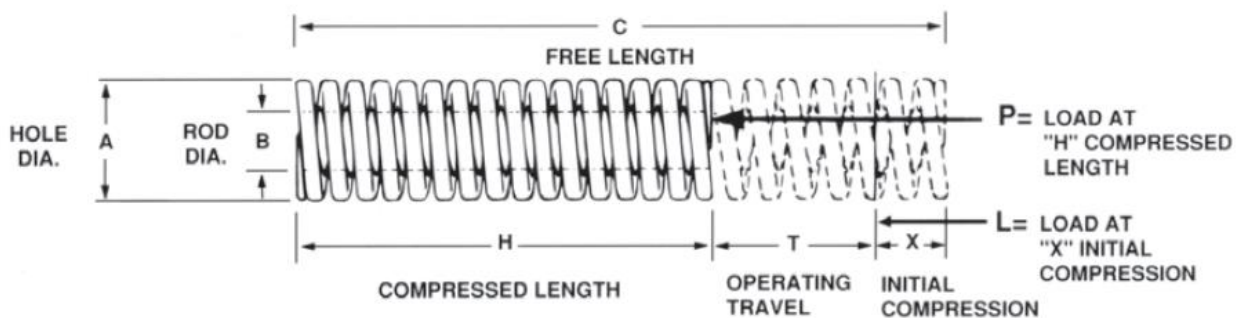


Figura 4.7. Calculo de fuerza en resorte de compresión. Danly IEM, 2006.

Punzonado de Multiniveles

Tabla 4.2. Cálculo de modelo de resorte con base en la fuerza del pisador.

Configuración	Fuerza Pisador	Núm. Resortes	Carga cada resorte	Long. Total Resorte	Modelo Resorte	Constante Resorte	Fuerza Precarga (5 mm)	Fuerza total de trabajo (15 mm)	Cumple
	N		N	mm	Amarillo	N/mm	N	N	
2 punzones	5585.7	4.0	1396.4	38.0	9-1206-36	194.4	972.0	2916.0	OK
4 Punzones	11171.4	4.0	2792.9	38.0	9-1206-36	194.4	972.0	2916.0	OK
6 Punzones	16757.2	4.0	4189.3	38.0	9-1206-36	194.4	972.0	2916.0	NOK
8 Punzones	22342.9	4.0	5585.7	38.0	9-1206-36	194.4	972.0	2916.0	NOK
					Rojo				
2 punzones	5585.7	4.0	1396.4	38.0	9-1206-26	144.0	720.0	2160.0	Ok
4 Punzones	11171.4	4.0	2792.9	38.0	9-1206-26	144.0	720.0	2160.0	NOK
6 Punzones	16757.2	4.0	4189.3	38.0	9-1206-26	144.0	720.0	2160.0	NOK
8 Punzones	22342.9	4.0	5585.7	38.0	9-1206-26	144.0	720.0	2160.0	NOK
	N		N	mm	Azul	N/mm	N	N	
2 punzones	5585.7	4.0	1396.4	38.0	9-1206-21	54.8	274.0	822.0	NOK
4 Punzones	11171.4	4.0	2792.9	38.0	9-1206-21	54.8	274.0	822.0	NOK
6 Punzones	16757.2	4.0	4189.3	38.0	9-1206-21	54.8	274.0	822.0	NOK
8 Punzones	22342.9	4.0	5585.7	38.0	9-1206-21	54.8	274.0	822.0	NOK
	N		N	mm	Verde	N/mm	N	N	
2 punzones	5585.7	4.0	1396.4	38.0	9-1206-11	33.8	169.0	507.0	NOK
4 Punzones	11171.4	4.0	2792.9	38.0	9-1206-11	33.8	169.0	507.0	NOK
6 Punzones	16757.2	4.0	4189.3	38.0	9-1206-11	33.8	169.0	507.0	NOK
8 Punzones	22342.9	4.0	5585.7	38.0	9-1206-11	33.8	169.0	507.0	NOK

4.3 Fabricación del Herramental de prueba.

La fabricación de cada uno de los componentes se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) en el laboratorio de manufactura. Para tal propósito se utilizaron los planos de manufactura realizados en la etapa de diseño mostrados en las figuras 4.4 y 4.5.

Es necesario señalar que las tolerancias de cada uno de los planos de manufactura son muy importantes para el correcto funcionamiento del herramental.



Figura 4.8. Componentes manufacturados.

Una tarea muy importante al concluir con la manufactura de los componentes es el proceso de ajuste y puesta a punto del herramental, este proceso consiste en ensamblar todas las piezas, ajustar y verificar que el herramental realice su trabajo de la manera esperada, este proceso se realiza previo a su instrumentación.

4.4 Instrumentación de herramental de punzonado

Se realiza la instrumentación en puntos específicos del herramental, en la figura 4.9 se muestran las galgas colocadas en el herramental superior y en la figura 4.10 se observa más a detalle el acomodo de éstas en los punzones.

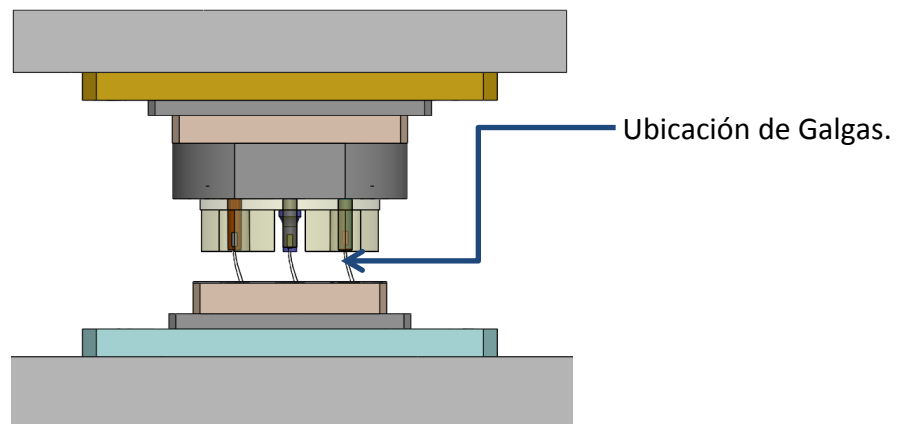


Figura 4.9. Las galgas extenso – métricas se colocaron en el herramental superior. Elaboración propia, 2014.

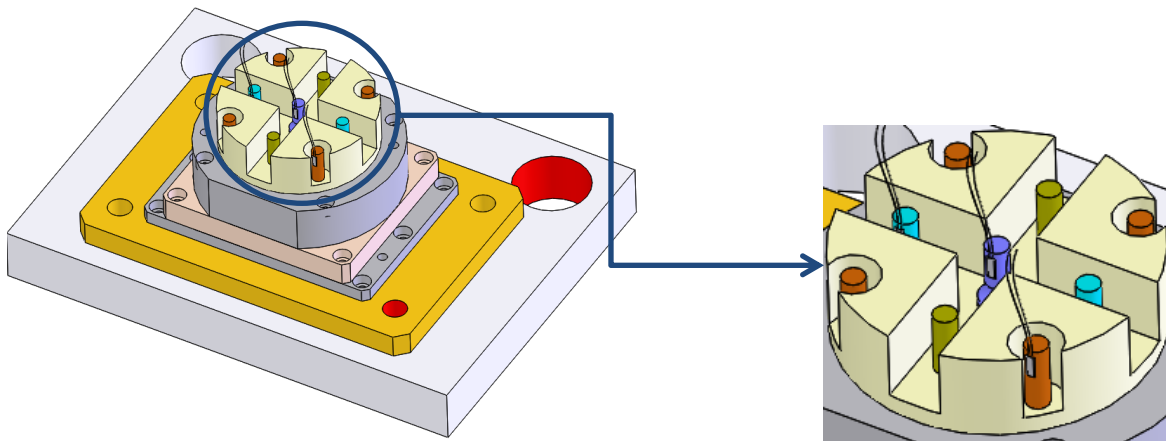


Figura 4.10. Ubicación específica de las galgas extenso - métricas en el herramental superior. Elaboración propia, 2014.

Punzonado de Multiniveles

Las características de las galgas extenso – métricas utilizadas para la instrumentación son:

MEM [®] MICRO-MEASUREMENTS			
FOR COMPLETE TECHNICAL DATA, VISIT WWW.VISHAYPG.COM			
GRID RESISTANCE IN OHMS		TC OF GAGE FACTOR, %/100°C	
120.0±0.3%		(+1.2±0.2)	
GRID	GAGE FACTOR @ 24°C	TRANSVERSE SENSITIVITY	
1	2.155±0.5%	(+1.4±0.2)%	
2			
3			
NOM			
THERMAL OUTPUT COEFFICIENTS FOR 1018 STEEL @ G.F. OF 2.00			
ORDER	FAHRENHEIT	CELSIUS	
0	-1.75E+2	-7.14E+1	
1	+4.04E+0	+4.46E+0	
2	-2.69E-2	-7.10E-2	
3	+5.40E-5	+2.96E-4	
4	-2.48E-8	-2.60E-7	
5			
FOIL LOT NUMBER			
A86AD869			
WORK ORDER NUMBER			
07080040			
30289996			
ITEM CODE	QTY 1 PK	CODE	RoHS COMPLIANT
MMF003165	(5 pcs)	201444US	
COUNTRY OF ORIGIN USA			

Figura 4.11. Características de galgas extenso – métricas. Vishaypg, 2014.

Punzonado de Multiniveles

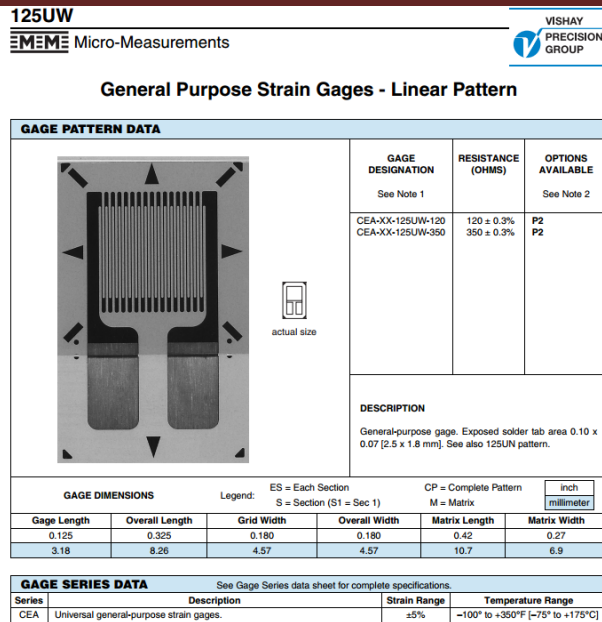


Figura 4.12. Hoja técnica de galgas extenso – métricas. Micro – Measurements, 2014.

Se colocaron 4 galgas extenso – métricas en el herramental superior, la figura 4.13 muestra la ubicación de cada galga en los punzones y la asignación de cada canal para poder realizar la adquisición de los datos.

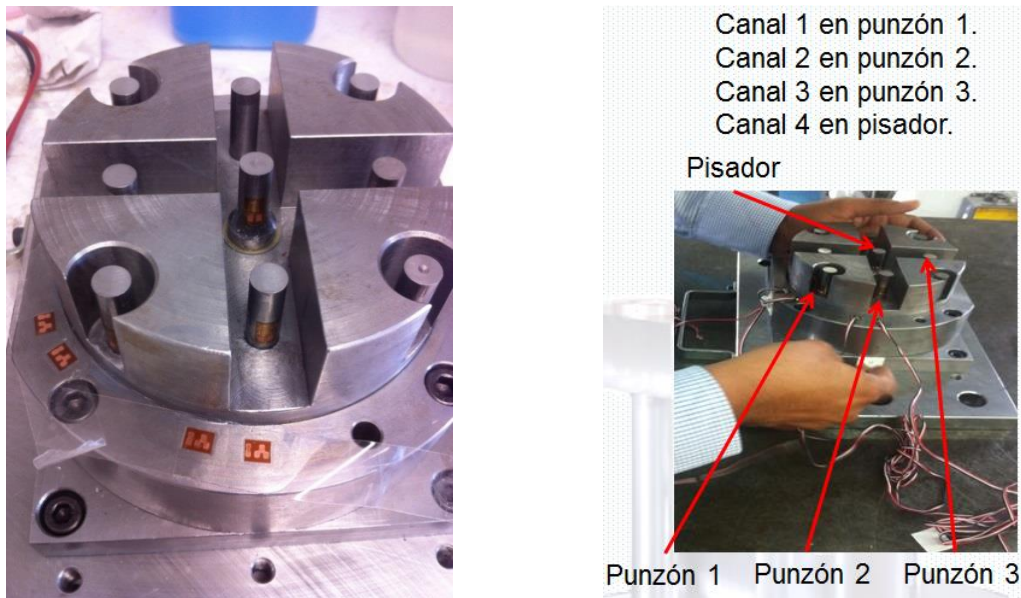


Figura 4.13. Ubicación de galgas extenso – métricas en el herramental superior.

4.5 Pruebas de herramental en prensa Servo Komatsu

Las pruebas de validación del herramental de corte se realizaron en la prensa servo Komatsu de 45 toneladas, la figura 4.14 muestra el herramental de corte montado sobre la prensa.

Se realizaron pruebas con el herramental antes de realizar la instrumentación para garantizar los ajustes mecánicos realizados, los puntos críticos en las pruebas fueron el corte completo de cada barreno y la correcta sujeción del material, ajuste que se realizó a partir de la fuerza calculada para los resortes, tabla 3.2.

Finalmente se realizaron las pruebas definitivas con el herramental instrumentado y cada galga extenso – métrica conectada para poder recolectar la información, el parámetro que se modificó en las pruebas fue la velocidad de la prensa.



Figura 4.14. Pruebas del herramental de corte en la prensa servo Komatsu.

4.6 Análisis y presentación de los resultados obtenidos con galgas extenso – métricas.

La instrumentación de las cuatro galgas extenso – métricas nos permitió obtener valores reales de las condiciones de operación del herramental de prueba. La ubicación de las galgas extenso – métricas permitió la recopilación de las micro – deformaciones que sufrieron cada uno de los punzones.

Las unidades de los datos recibidos por el Strain Indicator and Recorder son milímetro entre milímetro [mm / mm]; este valor se ingresó en la fórmula 4.6 para poder encontrar el esfuerzo recibido en cada uno de los punzones.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad [Pa] \quad (4.6)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo (Pa)

E = Modulo Elasticidad acero D2 (Pa)

ε = Deformación unitaria (mm/mm).

Finalmente el esfuerzo calculado se usó en la fórmula 4.7 para obtener la fuerza recibida en cada uno de los punzones.

$$F = \sigma * A \quad [N] \quad (4.7)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo (Pa)

F = Fuerza aplicada (N)

A = Área (m²).

Punzonado de Multiniveles

Los resultados de las diferentes pruebas son los siguientes:

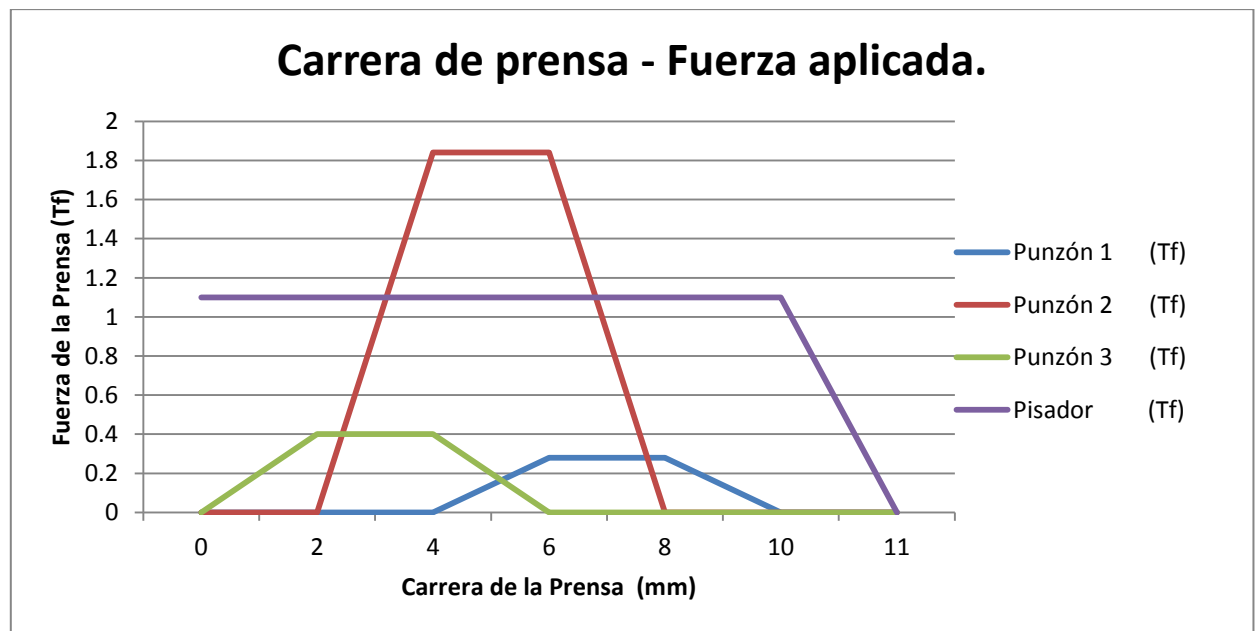
Tabla 4.3. Valores de fuerza obtenidos en los punzones.					
Elemento	Canal	Deformación medida	Toneladas fuerza	Fuerza Calculada	Reducción
Vel. de prensa 3 m/min. (15% Vel. Nominal)		$\epsilon \times 10^{-6}$ (mm/mm)	Tf	Tf	Tf
Punzón 1	1	4.30E-05	0.07	0.80	-91%
Punzón 2	2	5.72E-04	0.92	0.80	14%
Punzón 3	3	1.27E-04	0.20	0.80	-75%
Pisador	4	6.91E-04	1.11	2.28	-51%

Tabla 4.4. Valores de fuerza en los punzones vs carrera de prensa.				
Carrera de prensa (mm)	Punzón 1 (Tf)	Punzón 2 (Tf)	Punzón 3 (Tf)	Pisador (Tf)
0	0	0	0	1.1
2	0	0	0.4	1.1
4	0	1.84	0.4	1.1
6	0.28	1.84	0	1.1
8	0.28	0	0	1.1
10	0	0	0	1.1
11	0	0	0	0

La tabla 4.4 la utilizamos para generar la gráfica 4.1, la cual muestra el comportamiento de las fuerzas a lo largo de la carrera de la prensa, la longitud de trabajo es de 11 mm, momento en el cual inician a trabajar los resortes en el pisador de material y se genera la fuerza de sujeción. Cuando la longitud de trabajo es de 10 mm el punzón 1 hace contacto con la lámina y comienza el

Punzonado de Multiniveles

proceso de corte, al continuar el proceso y cuando la longitud de trabajo es de 8 mm el punzón 2 hace contacto con la lámina, para este momento ya se generó la máxima fuerza en el punzón 1 y comienza de proceso de corte del punzón 2, cuando la longitud de trabajo es de 6 mm hace contacto el punzón 3, en este punto ya se generó la máxima fuerza en el punzón 2 y comienza el proceso de corte en el punzón 3, finalmente cuando la prensa llega a su punto muerto inferior, a una longitud de trabajo de 0 mm, comienza la carrera accedente de la prensa y es en este punto donde la fuerza del pisador se convierte factor de suma importancia para que la lámina no se quede adherido a los punzones. La fuerza del pisador es capaz de separar los punzones 1, 2 y 3 de la lámina.



Grafica 4.1. Carrera de prensa vs fuerza real medida en cada punzón. Elaboración propia, 2014.

4.7 Resultados del análisis utilizando la técnica de elemento finito.

Se realizó un análisis con soporte de un software de simulación llamado ANSYS, el análisis utiliza la técnica de elemento finito, dicho análisis arroja los resultados que se muestran en la figura 4.15.

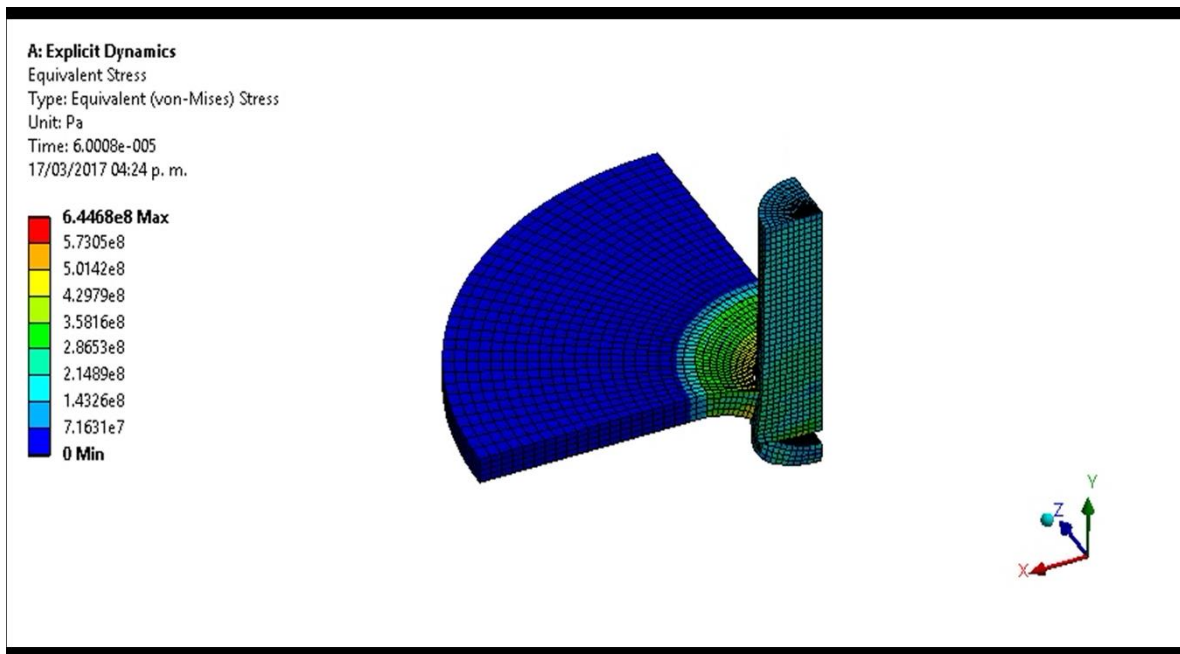


Figura 4.15. Simulación de elemento finito de un punzonado. Elaboración propia, 2017.

Los valores de esfuerzo que se representan en la figura 4.15 nos demuestran que los valores medidos físicamente con las galgas extenso – métricas, y los valores que resultan del análisis de elemento finito tienen un grado de aproximación menor al 20 %.

Esta grado de aproximación se representa en la siguiente figura 4.16:

Punzonado de Multiniveles

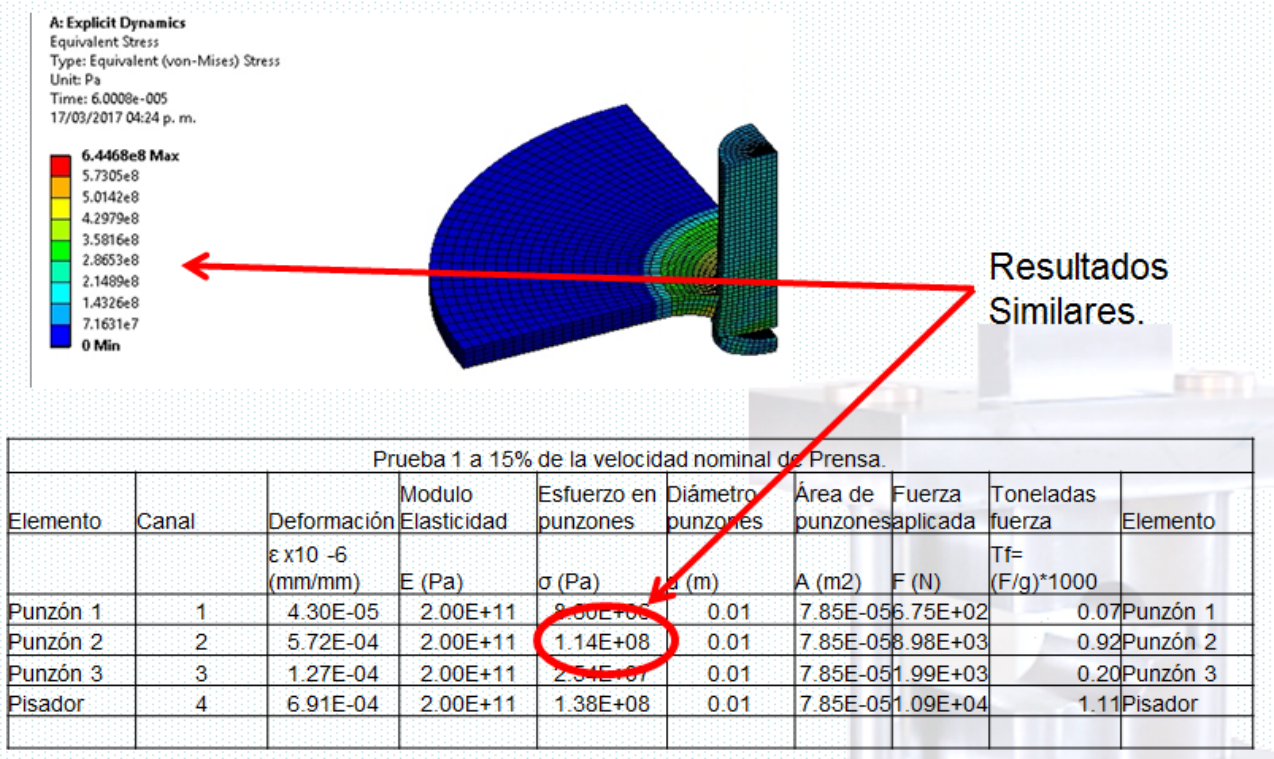


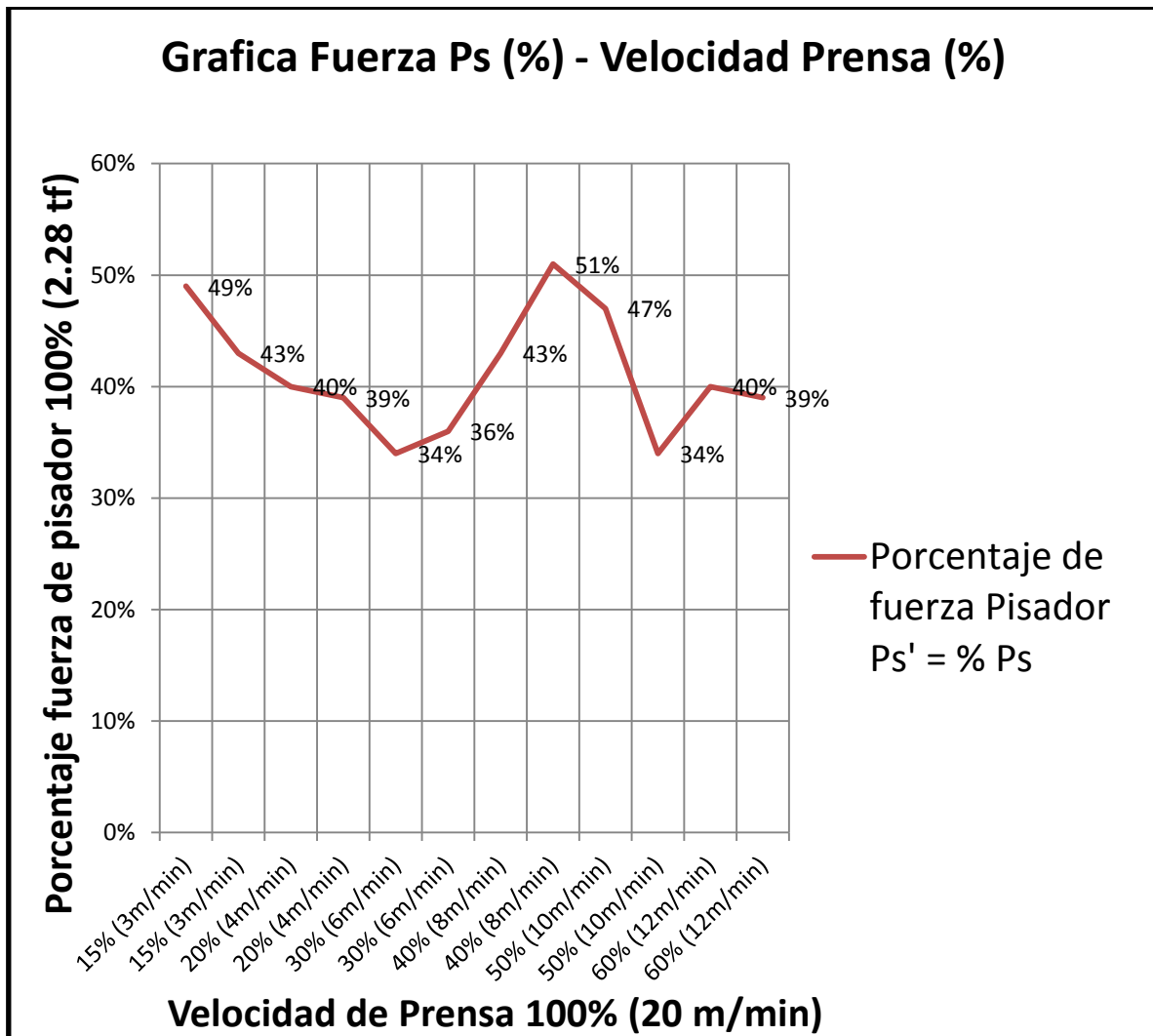
Figura 4.16. Comparación de valor de esfuerzo obtenido en el análisis de elemento finito y los valores obtenidos por las galgas extenso – métricas.

Elaboración propia, 2017.

4.8 Análisis de resultados obtenidos con galgas extenso – métricas.

Los resultados que se obtuvieron con las galgas extenso – métricas nos arrojan valores muy interesantes; no solo en la variable que se está investigando, podemos observar que los canales 1 a 3, que corresponden a los punzones 1 al 3, reflejan la fuerza medida para realizar el punzonado y este valor obtenido es similar a la fuerza teórica calculada para lograr el corte.

La grafica 4.2 muestra el comportamiento de la fuerza del pisador como un porcentaje de la fuerza calculada P_s de un proceso normal y la velocidad de la prensa.

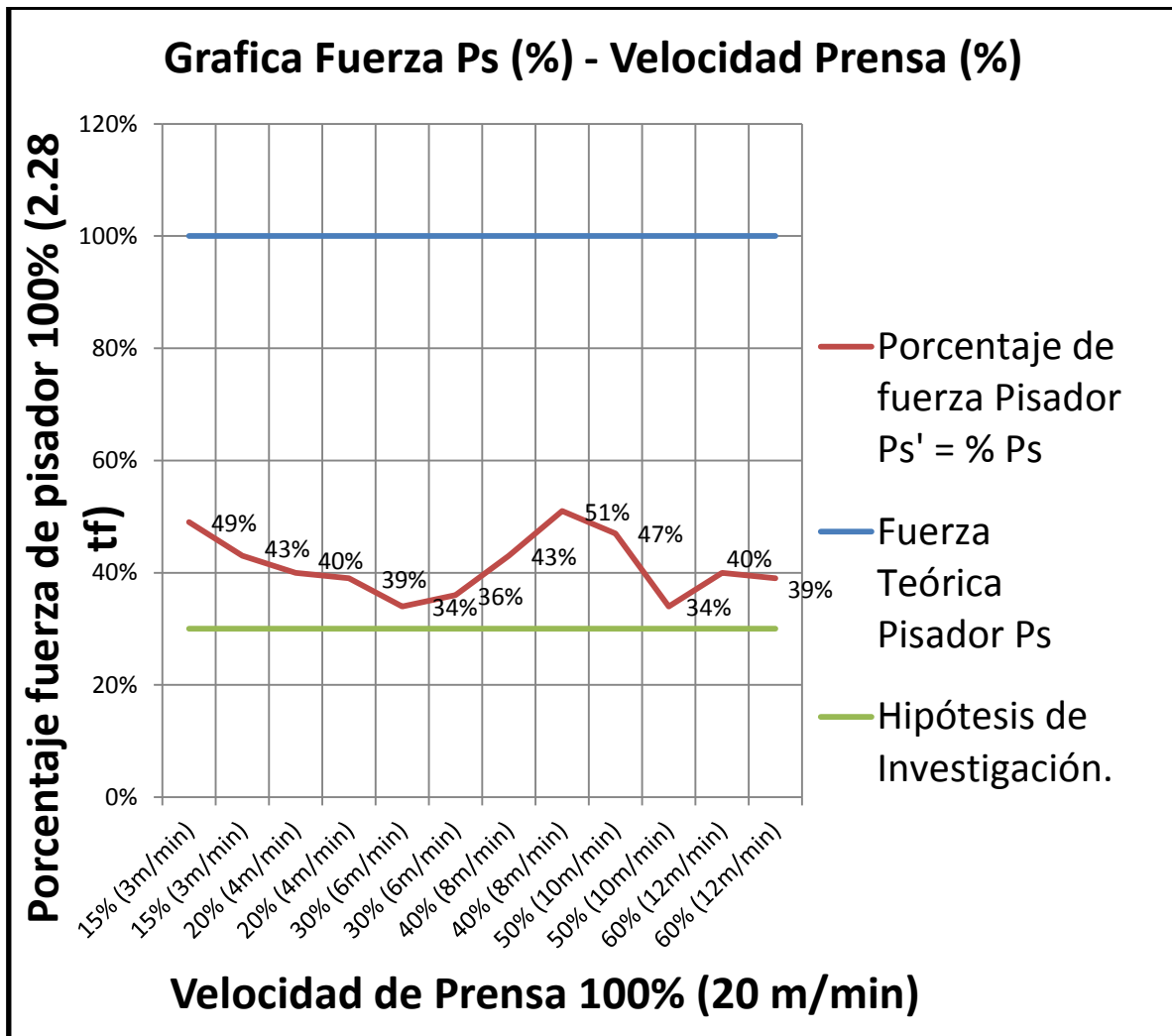


Grafica 4.2. Porcentaje fuerza P_s vs Velocidad de prensa. Elaboración propia, 2017.

La grafica 4.3 muestra el comportamiento de la fuerza del pisador como un porcentaje de la fuerza calculada P_s de un proceso normal y la velocidad de la

Punzonado de Multiniveles

prensa, lo compara directamente con la fuerza teórica de proceso de punzonado, línea horizontal superior, (P_s) y contra el porcentaje planteado en la hipótesis de la investigación, línea horizontal inferior, (30 % de P_s).



Grafica 4.3. Fuerza P_s vs Velocidad de prensa. Elaboración propia, 2017.

La grafica 4.3 muestra los siguientes puntos:

Punzonado de Multiniveles

1. Fuerza teórica del pisador P_s (100%) utilizada por las empresas para los procesos de punzonado convencional y para los procesos de punzonado de multiniveles.
2. Fuerza aparente teórica P'_s planteada en la hipótesis de la investigación (30% de P_s) para un proceso de punzonado de multiniveles.
3. Resultados obtenidos con las galgas extenso - métricas de la fuerza aparente P'_s . Los valores obtenidos tienen un rango del 34 % al 51% de P_s .

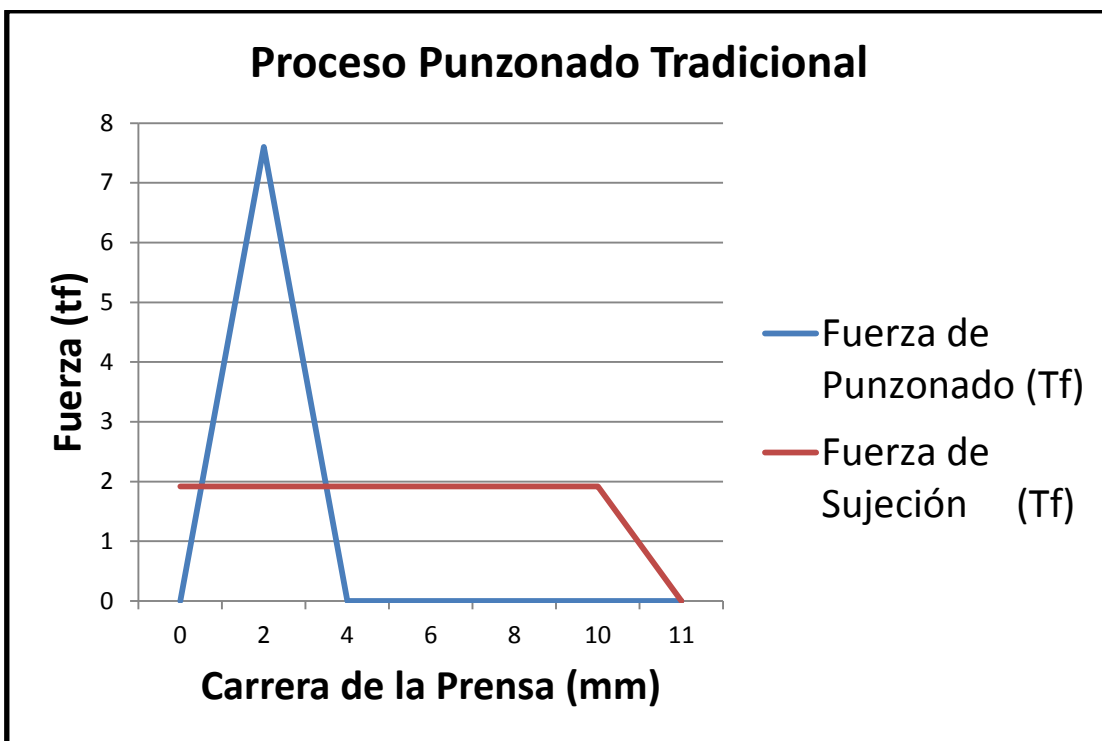
Debemos comentar que estos valores son de gran utilidad para los diseñadores de herramientas, ya que ofrecen un valor estimado para la reducción de la fuerza de pisado aparente P'_s al utilizar la técnica de punzando de multiniveles, algunos de los beneficios son:

- Diseño:
 - a. Estimación de condiciones dinámicas del proceso.
 - b. Optimización del espacio en el modelaje 3D del herramental.
 - c. Selección adecuada en los cilindros de nitrógeno o resortes que proporcionan la fuerza de pisado.
 - d. Selección adecuada de prensa para realizar producción.
- Manufactura:
 - a. Reducción de costos de manufactura.
 - b. Reducción de costos en componentes comerciales.
- Producción:
 - a. Reducción de costos al seleccionar la prensa más adecuada para el proceso.

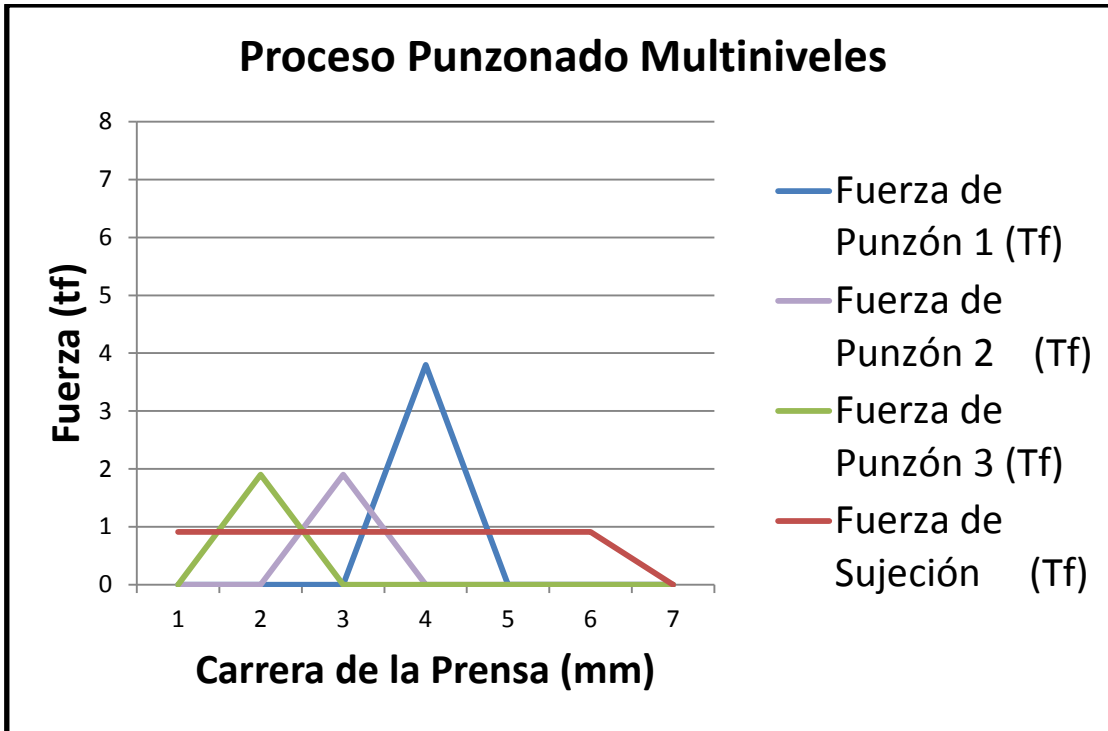
Punzonado de Multiniveles

- b. Conservar la misma calidad del producto utilizando una prensa de menos capacidad.

Los datos que arroja la experimentación son capaces de demostrar que las condiciones dinámicas de un proceso de punzonado convencional son diferentes a las condiciones de un proceso de punzonado de multiniveles, en las gráficas 4.4 y 4.5 se observa esto.



Grafica 4.4. Grafica de fuerza vs carrera de la prensa de un proceso convencional.
Elaboración propia, 2017.



Grafica 4.5. Grafica de fuerza vs carrera de la prensa de un proceso con la técnica punzonado de multiniveles. Elaboración propia, 2017.

Los valores mostrados en las gráficas anteriores son contundentes. La capacidad del proceso convencional de punzonado es de aproximadamente 9.5 Tf, mientras que al utilizar el proceso de punzonado de multiniveles la capacidad se reduce a 5 Tf. Esto representa una reducción del 47 %, que representa 4 Tf, las cuales se podrán ocupar en algún otro proceso o simplemente seleccionar una prensa de menor capacidad, en ambos casos se logra reducir el costo de producción.

Capítulo V

Conclusiones y bibliografía.

5.1 Conclusiones

Al finalizar el trabajo de investigación, podemos mencionar que no se han obtenido los resultados esperados. No obstante, se ha logrado un panorama más claro del comportamiento del proceso de punzonado de multiniveles.

Los resultados obtenidos sugieren que el proceso de punzonado de multiniveles ofrece ventajas importantes, su correcta aplicación permite reducir la capacidad del proceso, lo cual se refleja en el costo de producción.

Las variables que están involucradas en el proceso del punzonado de multiniveles son muchas, sin embargo la variable que dio pie a la presente investigación, fuerza de sujeción, es una de las más importantes y de la cual no se tiene un conocimiento adecuado.

Las gráficas demuestran que si es posible reducir la fuerza aparente en el proceso de punzonado, la que se ve afectada por los valores de altura establecidos entre los diferentes punzones, es decir, establecer la secuencia de corte de cada punzón.

En la etapa de diseño de herramental, las gráficas ofrecen valores muy valiosos para la fuerza de sujeción, los cuales permitirán una correcta selección de resorte o cilindros de nitrógeno, optimización de espacios en el modelado 3D y selección adecuada de la prensa para cada proceso.

La presente investigación da como resultado la caracterización de la fuerza de pisador aparente considerando un proceso de multiniveles de 8 punzones, diámetro de cada punzón de 10 mm, lamina de acero SAE 1018 espesor de 1 mm y la utilización de una prensa servo. Por lo que está abierta la posibilidad de realizar una siguiente investigación y caracterizar otros materiales.

Los resultados obtenidos para la fuerza de pisado aparente demuestran que las condiciones dinámicas de un proceso de multiniveles son equivalentes a un 34% - 51% de la fuerza de pisado convencional.

5.2 Bibliografía.

[1] Beer, Ferdinand y JOHNSTON E. R... Mecánica de Materiales. Colombia: McGRAW-HILL, 1993. 2ª edición.

[2] Faires, V. M... Diseño de Elementos de Máquinas. México: Editorial Limusa, 1995. 4ª Reimpresión.

[3] Rossi, M. (1979). Estampado en frío de la chapa. Madrid: Dossat.

[4] Marín Villar, C. (2009). Troqueles y troquelado, Para la Producción de Grandes Series de Piezas. Metal Actual No.12, 16-23.

[5] Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 1, 2009.

[6] López Navarro, T. (1976). Troquelado y Estampación con aplicaciones al punzonado, doblado, embutido y extrusión. Barcelona: Gustavo Gili.

[7] Conformado de Metales, Protocolo, Curso de Materiales, Edición 2008-1, Facultad de Ingeniería Industrial.

[8] Mateos, S., Rico, J., Cuesta, E., & Valiño, G. (2002). Aspectos analíticos y tecnológicos del proceso de punzonado de chapa (1a Parte). MetalUnivers, 1-9.

[9] Standard Handbook of Machine Design, Third Edition, Joseph Shigley, Charles Mischke, Thomas H. Brown.

[10] Camarero de la Torre, J., & Martínez Peña, A. (2003). Matrices, Moldes y Utillajes. Madrid: CIE Dossat.

[11] ASCAMM. (2008). Proceso de corte con Troqueles., (págs. 1-34). México.

[12] Phillip F Ostwald, Myron L. Begeman, Procesos de Manufactura, 3a edición en español, Compañía Editorial Continental, 1981.

[13] Scribd [Web en línea] < <http://es.scribd.com/doc/56244887/3-teoria-de-la-embuticion>> [Consulta: 27-09-2012].

- [14] J. R. Paquin, R. E. Crowley, Die Desing Fundamentals, Second Edition, Industrial Press Inc. 1987.
- [15] Beddoes, J., & Bibby, M. (2003). Principles of Metal Manufacturing Process. Eastbourne, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [16] Vokota Boljanovic, J. R. Paquin, Die Desing Fundamentals, 3rd Edition, Industrial Press Inc. 2012.
- [17] Castro Patiño, L. F. (2010). Condiciones Técnicas Para un Correcto Doblado. Metal Actual No. 15, 30-35.
- [18] Ferdinan P., Johnston E., Dewolf T y Mazurek D. Mecánica de Materiales. McGRAW-HILL, 2008. 5ª edición.
- [19] Suchy, I. (2006). Handbook of Die Design. Barcelona: McGraw Hill.
- [20] Boljanovic, V., Paquin, J., & Crowley, R. E. (2006). Die Design Fundamentals. New York: Industrial Press.
- [21] Boljanovic, V., Paquin, J., & Crowley, R. E. (2004). Die Design Fundamentals. New York: Industrial Press.
- [22] Mateos, S.; Rico, J.C.; Cuesta, E.; Valiño, G. Departamento de Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo.
- [23] Manual de Proyecto de Transferencia de Tecnología de Estampado y Troquelado, tomo 2, 2009.
- [24] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, Metodología de la Investigación, tercera edición, Mc. Graw Hill, 2003.
- [25] Feldmann Heinz D. coaut, José Pinós Calvet. Estampado y Prensado a Maquina: Manual Sobre Conformado en Frío y en Caliente de Aceros. Translated by José Pinós Calvet. Edición: Publicado por Reverté, 1979.

Punzonado de Multiniveles

[26] J. Ruiz, Diplomado de estampado y troquelado Modulo III, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, 2016.

[27] Signorelli, J.W., Bolmaro, R.E., Revista Materia, v. 10, n. 1, pp. 178 – 184, Marzo de 2005.

[28] S. Holmberg, B. Enquist y P. Thilderkvist, J. Mater. Process Tech. 147 (2004) 72-83.

[29] Estudio de prospectiva tecnológica para la manufactura de troqueles y su aplicación en el contexto nacional 2014.

[30] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Octava edición, 2008.

Índice de figuras

Figura 1.1 Fuerzas en proceso de punzonado.....	2
Figura 1.2 Proceso convencional v/s proceso multiniveles.....	3
Figura 2.1 Elementos sometidos a cortante directo, (a) Remache, (b) Placas pegadas y (c) Pieza a ser cizallada.....	11
Figura 2.2 Representación de los esfuerzos de apoyo y desgarro en uniones con pasadores.....	13
Figura 2.3 Esquema del punzonado (A) Penetración del punzón en la pieza, (B) Extracción del recorte.....	16
Figura 2.4 Etapas del proceso de punzonado, (1) Deformación, (2) Penetración y (3) Fractura.....	17
Figura 2.5 Características del borde de corte con claro de corte C normal, (a) Corte de material, (b) zonas generadas en cara de corte de la chapa....	18
Figura 2.6 Posición relativa de las grietas según el claro entre punzón y matriz. (a) Claro pequeño, (b) Claro adecuado y (c) Claro grande.....	19
Figura 2.7 Características del borde con juego excesivo e insuficiente. (a) Claro grande y (b) Claro pequeño.....	20
Figura 2.8 Influencia del juego de corte C sobre la fuerza de corte P.....	22
Figura 2.9. Resistencia de corte por punzonado según el claro de corte. (a) $K_s=630 \text{ N/mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$. (b) $K_s=450 \text{ N/mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$. (c) $K_s=460 \text{ N/mm}^2$, $t=5 \text{ mm}$	23
Figura 2.10 Efecto del diámetro del punzón en la resistencia al punzonado.	24
Fig. 2.11.- Afilados especiales del punzón. Procesos de Manufactura.....	26
Figura 2.12.- Zonas de desgaste del punzón y matriz.....	27
Figura 2.13 Factores que afectan a los defectos geométricos de las piezas punzonadas.....	29
Figura 2.14 Distintos tipos de borde según el juego. Material acero de bajo contenido en carbono.....	31

Punzonado de Multiniveles

Figura 2.15 Variación de la altura de la rebaba con el número de golpes...	33
Figura 2.16 Dibujo conceptual de la transformación.....	35
Figura 2.17 Gráfica de Fuerza de transformación vs carrera del punzón...	36
Figura 2.18 Punzonado con punzones de múltiples niveles.....	37
Figura 2.19 Diagrama Fuerza – Golpes.....	38
Figura 3.1. Estructura de la prensa.....	42
Figura 3.2. Velocidad límite de transformación para diferentes tipos de metales.....	45
Figura 3.3. Mecanismo manivela – biela – corredera.....	46
Figura 3.4. Mecanismo de la prensa cigüeñal.....	48
Figura 3.5. Curva de relación entre capacidad y carrera.....	48
Figura 3.6. Dimensiones para el cálculo de la energía del volante.....	51
Figura 3.7. Relación entre capacidad y energía de la prensa.....	53
Figura 3.8. Partes de un herramental de corte.....	54
Figura 3.9. Herramental con separador móvil.....	55
Figura 3.10. Paso inicial en proceso de corte.....	56
Figura 3.11. Inician grietas en el material.....	57
Figura 3.12. Separación de material.....	57
Figura 3.13. Configuración de corte.....	58
Figura 3.15. Claro de corte adecuado.....	60
Figura 3.16. Claro de corte pequeño.....	61
Figura 3.17. Claro de corte grande.....	61
Figura 3.18. Cambio en la configuración de la cara de corte de acuerdo al claro de corte aplicado.....	63
Figura 3.19. Claro de corte.....	64
Figura. 3.20 Ángulo de corte.....	66
Figura. 3.21 Graficas carrera del punzón – carga de corte.....	67
Figura. 3.22 Probetas para determinar valor “r”.....	69
Figura. 3.23 Dirección de probetas.....	70
Figura 3.24. Distancia mínima para punzonado.....	73
Figura 3.25. Prensa para experimentación.....	75

Punzonado de Multiniveles

Figura 3.26. Producto para experimentación.....	76
Figura 3.27. Diseño de herramental para experimentación.....	77
Figura 3.28. Esquema del producto final.....	78
Figura 4.1. Esquema del herramental superior.....	81
Figura 4.2. Esquema del herramental inferior.....	82
Figura 4.3. Esquema del herramental superior con diseño para alojar galgas extenso – métricas.....	82
Figura 4.4. Plano de manufactura de punzón.....	83
Figura 4.5. Plano de manufactura de pisador.....	84
Figura 4.6. Plano de ensamble del herramental inferior.....	85
Figura 4.7. Calculo de fuerza en resorte de compresión.....	87
Figura 4.8. Componentes manufacturados.....	89
Figura 4.9. Las galgas extenso – métricas se colocaron en el herramental superior.....	90
Figura 4.10. Ubicación específica de las galgas extenso - métricas en el herramental superior.....	90
Figura 4.11. Características de galgas extenso – métricas.....	91
Figura 4.12. Hoja técnica de galgas extenso – métricas.....	92
Figura 4.13. Ubicación de galgas extenso – métricas en el herramental superior.....	92
Figura 4.14. Pruebas del herramental de corte en la prensa servo Komatsu..	93
Figura 4.15. Simulación de elemento finito de un punzonado.....	97
Figura 4.16. Comparación de valor de esfuerzo obtenido en el análisis de elemento finito y los valores obtenidos por las galgas extenso – métricas...	98

Índice de tablas

Tabla 2.1 Datos de la precisión de diversos modelos de punzonadoras CN según catálogo.....	31
Tabla 2.2 Rango aproximado de los valores de los distintos bordes de la figura 2.15.....	32
Tabla 2.3 Tasa de penetración (e/t).....	35
Tabla 3.1. Factores afectados por el claro de corte.....	62
Tabla 3.2. Tasa de penetración del material.....	65
Tabla 3.3. Diámetro mínimo de punzonado.....	72
Tabla 3.4. Distancia mínima para punzonado.....	73
Tabla 3.5. Factores principales para el proceso de punzonado.....	74
Tabla 4.1. Resumen de condiciones dinámicas del proceso de corte.....	87
Tabla 4.2. Cálculo de modelo de resorte con base en la fuerza del pisador...	88
Tabla 4.3. Valores de fuerza obtenidos en los punzones.....	95
Tabla 4.4. Valores de fuerza en los punzones vs carrera de prensa.....	95

Índice de graficas

Grafica 4.1. Carrera de prensa vs fuerza real medida en cada punzón.....	96
Grafica 4.2. Porcentaje fuerza P_s vs Velocidad de prensa.....	99
Grafica 4.3. Fuerza P_s vs Velocidad de prensa.....	100
Grafica 4.4. Grafica de fuerza vs carrera de la prensa de un proceso convencional.....	102
Grafica 4.5. Grafica de fuerza vs carrera de la prensa de un proceso con la técnica punzonado de multiniveles.....	103