

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

Diseño de una perforadora rotatoria vertical para operaciones de punzonado

Tesis presentada en opción al título de Máster en Electromecánica

Autor: Ingeniero Bazó Rodolfo

Tutor: PT. Dr. C. Raúl Santana Milán

Caracas

Junio 2009

RESUMEN

El 70% de las piezas manufacturadas son obtenidas a través del conformado, y la mayoría de las piezas conformadas requieren sólo ser perforadas y perfiladas. Para aumentar la velocidad de producción en la industria metal mecánica y bajar el costo de los productos manufacturados se combinan los dos procesos en lo que se denomina una línea de perfilado compleja. Para el perforado en estos procesos se utiliza una punzonadora intermitente, que requiere el uso de múltiples utensilios que encarecen el sistema y requieren mucho espacio para su uso. Actualmente hay empresas que prefieren acoplar a la línea de perfilado compleja una punzonadora rotatoria, por requerir menos utensilios y ocupar menos espacio que las intermitentes, con el inconveniente de que en estos sistemas el punzón penetra de manera angular en la matriz, generando un ángulo de ataque que conlleva a limitaciones de vida en el punzón, dimensionales en el sistema, baja calidad en el perforado y aumento de peso, producido por la búsqueda de la minimización del claro o distancia requerida entre el punzón y la matriz al inicio del perforado.

Estos problemas condujeron a la aplicación, basándose en sistemas de punzonado rotatorio, de herramientas de creatividad con miras a encontrar la posibilidad de una solución alternativa. Lo que arrojo como resultado un dispositivo de punzonado vertical continuo que minimiza el ángulo de ataque del punzón y el claro en punzonadoras rotatorias, el cual funciona de manera similar al intermitente pero a una velocidad constante como el rotatorio, superando así las características tecnológicas y constructivas de las punzonadoras intermitentes y rotativas.

El proceso se inicio con el estudio de mercado y acopio de material relacionado con las punzonadoras intermitentes y rotativas, el cual permitió conocer los sistemas de funcionamiento de estos dispositivos y facilitó el diseño de la máquina seleccionada, basándose en mecanismos de características similares. Luego se hizo un estudio, científicamente argumentado, de las máquinas de perforado continuo, donde se demostró el inconveniente del perforado angular. Por último se estudiaron los esfuerzos y deformaciones a los que se encontrarán sometidos los órganos principales del mecanismo para determinar las dimensiones adecuadas del sistema.

ABSTRACT

70% of the parts manufactured are obtained through the set, and most of the pieces need only be punched up and profiled. To increase the speed of production in the metal mechanic industry and lowering the cost of manufacturing the two processes are combined in what is called a complex line profiling. For drilled in these processes using a Punching intermittent, requiring the use of multiple tools that make the system and require much space to use. Currently there are companies who prefer to attach the line profiling Punching a complex rotation, by requiring less equipment and occupying less space than the intermittent, with the disadvantage that these systems so the angular punch penetrates into the matrix, creating an angle of attack that leads to limitations of life in the punch, in the dimensional system, low quality and punched in the weight gain produced by the search for clear or minimize the distance between the punch and the matrix at the start of drilling.

These problems led to the application systems based on punching rotary tool of creativity to find a possible solution. What resulted in a continuous vertical punching device that minimizes the angle of the punch and punch clear rotating, which works similarly to the intermittent but at a constant speed as the rotating, thus overcoming the technological and constructive characteristics of intermittent and punching presses.

The process starts with market research and collection of material related to intermittent rotary punching, which led to the operating systems of these devices and facilitated the design of the selected machine, based on similar mechanisms. Then a study was conducted scientifically argued, the continuous drilling machines, which showed the disadvantage of perforated angle. Finally we studied the efforts and deformations to be found under the main organs of the mechanism for determining the appropriate size of the system.

INDICE

	Pag
RESUMEN	i
INDICE	iii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.1. Perfilado	6
1.2. Debanadora	11
1.3. Punzonado	12
1.3.1. Parámetros principales	13
1.3.2. Características de los bordes punzonados o cizallados	14
1.4. Descripción de una estampa o matriz de corte	15
1.5. Prensas	16
1.5.1. Prensas mecánicas	17
1.5.1.1. Clasificación según su mecanismo	17
1.5.1.2. Clasificación por su estructura y velocidad	19
1.5.2. Prensas hidráulicas	19
1.6. Punzonadoras volantes	21
1.7. Basquet	22
1.8. Blucle de chapa	23
1.9. Freno mecánico	23
1.10. Rodillos enderezadores	24
1.11. Punzonado continuo	25
1.11.1. Utillaje para punzonado	25
1.12. Empresas generadoras de utillaje	26
1.12.1. Utillaje rotatorio de la empresa SAMCO (USA)	26
1.12.2. Utillaje rotatorio de la empresa Baust (Alemania)	27
1.12.3. Utillaje rotatorio de la empresa Baust 2 (Alemania)	29
1.12.4. Prototipo de unidad rotatoria empresa Baust (Alemania)	30
1.12.5. Unidad rotatoria empresa Cut-smart (USA)	30
1.13. Patentes	32

CAPITULO II	ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE PERFORADO	
CONTINUO		40
2.1.	Sistema construido por empresas de Estados Unidos	40
2.1.1.	Determinación de “ α_1 ” cuando el punzón toca la chapa	42
2.1.2.	Determinación de “ α_2 ” cuando el punto “P” y el punto “L” coinciden en una línea horizontal	44
2.1.3.	Expresión de valores en matlab para G=6,1667, N=2,5 y R	46
2.1.4.	Expresión de valores en matlab para G=6,1667, N=5 y R	48
2.1.5.	Expresión de valores en matlab para G=4,1667, N=5 y R	49
2.1.6.	Análisis de datos en diagrama	50
2.1.7.	Dimensiones de sistemas que pueden punzonar sin daños a la chapa ni deterioro rápido de punzón y matriz	51
2.2.	Sistema construido por empresas alemanas	52
2.2.1.	Determinación de “ α_1 ” cuando el punzón toca la chapa	55
2.2.2.	Determinación de “ α_2 ” cuando el punto “P” y el punto “L” coinciden en una línea horizontal	56
2.3.	Conclusiones parciales	59
CAPITULO III	DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUNZONADO	
VERTICAL ROTATORIO		60
3.1.	Presentación del sistema diseñado	61
3.1.1.	Columna (A)	63
3.1.2.	Columnas y ejes	64
3.1.3.	Tren de ruedas de punzón y matriz	65
3.2.	Cálculos básicos del sistema de punzonado vertical rotatorio	67
3.2.1.	Esfuerzo necesario para el corte	68
3.2.2.	Análisis de esfuerzo del eje porta punzón	69
3.2.3.	Análisis de esfuerzo y deformación del eje principal	71
3.2.4.	Análisis de torsión del eje principal	74
3.2.5.	Cálculo a la flexión de los dientes de las ruedas dentadas	75
3.2.6.	Esfuerzo y deformación en las columnas	76
3.3.	Rediseño de elementos	79
3.3.1.	Rediseño de la matriz	79
3.3.2.	Rediseño de los rodillos	80

3.3.3. Extractor aplicado al punzón	82
3.4. Valoración económica	84
3.5. Conclusiones parciales	86
CONCLUSIONES GENERALES	87
RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS	93

Introducción

El crecimiento de la manufactura ha conducido a avances innegables, al crear las bases económicas para mejoras genuinas en la calidad de vida. La manufactura ocupa una posición central en la economía de las naciones y, por supuesto, en la economía del mundo. De aquí, que mejorar las secuencias complejas de producción en los procesos de manufactura trae consigo múltiples ventajas. (Schey, 2002).

Los cambios bruscos que ha venido sufriendo Venezuela le da cabida a la creación de empresas que comiencen a trabajar transformando el producto interno bruto para convertirlo en producto final, lo que podría generar cambios sustanciales necesarios para que se inicie su transformación a país desarrollado, tomando en cuenta que debe incluir la innovación con base en el conocimiento para que nuestros productos sean competitivos a nivel global. Innovar en los procesos de manufactura traería consigo múltiples ventajas económicas para el país, más aún si se generan cambios sobre la base de la producción haciendo que esta sea más rápida y eficiente.

El aumento mundial del costo del petróleo, la contaminación del aire en áreas industriales y la disminución de los recursos naturales año tras año, demandan partes con formas más complejas, por ejemplo, en la industria automotriz, para aumentar y distribuir rigidez según sea necesario y reducir peso. La construcción de peso ligero es una forma de contribuir a la protección del medio ambiente. Por lo tanto, la utilización del proceso de conformado de metales, implica una mejora medio ambiental innata a su propia aplicación.

En la actualidad, más del 70% de las producciones mecánicas son elaboradas por procedimientos de tratamiento de los metales por presión (sin arranque de virutas) y los principales autores que escriben sobre esta temática coinciden en que, en los próximos años, la producción de piezas mediante estos métodos, en los que la configuración deseada se obtiene por deformación plástica de los materiales, se incrementará de forma notable.

La producción mundial de tubos y otros perfiles conformados mostró un incremento del 45 por ciento entre los años 2002 y 2006, según la estadística de la Asociación de los fabricantes de acero en Düsseldorf. El crecimiento de la producción de tubos de China en este período fue del 142 por ciento; en cuanto a la producción global de tubos, las exportaciones de este país crecieron desde 700.000 toneladas en 2002 a 5,9 millones de toneladas en 2006. Un alto porcentaje de la producción de tubos u otros perfiles son perforados y usados con frecuencia en la industria del automóvil, en la producción de sistemas de estanterías, pretilas de seguridad, etc.

Para aumentar la velocidad de producción en la industria metal mecánica y bajar el costo de los productos manufacturados se busca la unión de los procesos de manufactura, a sabiendas de que los más comerciales son el punzonado y el perfilado; el punzonado intermitente y el perfilado continuo se unen utilizando una serie de elementos que garanticen su perfecto funcionamiento. Las punzonadoras intermitentes mecánicas de baja velocidad son las más comerciales por su economía, poco tamaño y sencillez, pero poseen una velocidad limitada por el sistema biela manivela y por los torques máximos que este mecanismo es capaz de soportar, por lo que al unir los dos procesos genera inconvenientes que se traducen en zonas de trabajo que la combinación de los dos sistemas no puede cubrir.

En la actualidad hay máquinas que manejan punzonado a velocidades más altas, por crear mecanismos que equilibran al sistema biela manivela, cubriendo la zona de trabajo que las otras punzonadoras no pueden cubrir, con un costo de máquina mucho más elevado. Pero estos sistemas, al igual que las punzonadoras de baja velocidad, requieren gran cantidad de elementos para acoplar la punzonadora a la perfiladora, elementos que encarecen y condicionan la combinación de los sistemas. Los sistemas rotatorios generados, que actualmente se encuentran en el mercado, para solventar estos inconvenientes, poseen problemas constructivos, ya que pueden punzonar de una manera eficiente sólo con punzones de poco diámetro. Por otro lado, las punzonadoras volantes, ubicadas al final de las perfiladoras y las cuales se acoplan a la velocidad de la chapa para punzonarla y

luego retornar para realizar la misma operación, requieren sistemas muy costosos para su control además de que generan agujeros muy espaciados. Las soluciones a nivel de manufactura en zonas de trabajo, que actualmente la industria mundial no puede cubrir o la cubre con muy altos costos, generaría múltiples beneficios a la industria manufacturera nacional y mayor ingreso per cápita.

Por lo antes expuesto, podemos decir que cuando las velocidades de desplazamiento de la chapa son altas, hay zonas de trabajo que las punzonadoras intermitentes mecánicas de baja velocidad o hidráulicas no pueden cubrir. Las punzonadoras de medias y altas velocidades pueden solventar este inconveniente pero por su tecnología y robustez son máquinas muy costosas y aparte de ello deben venir acompañadas de un sinnúmero de elementos adicionales que encarecen aun más el proceso. No obstante, las rotatorias pueden punzonar a altas velocidades pero no pueden realizar agujeros de cualquier dimensión; sin embargo, tienen la ventaja de ser económicas, ocupan poco espacio, no requieren ningún tipo de elemento adicional para realizar el proceso y ameritan menor esfuerzo para punzonar.

Los sistemas actuales de punzonado intermitente ocasionan problemas de espacio y obviamente en costos, dada la cantidad de elementos que requieren para acoplarse a las perfiladoras, de lo que se desprenden problemas de características constructivas. Por otro lado, las punzonadoras rotatorias presentes en el mercado están limitadas a perforados de pequeños diámetros con punzones muy cortos y rodillos de grandes dimensiones, de allí que tengan problemas tecnológicos y constructivos.

En la industria nacional de conformado existen muy pocas empresas que operan máquinas de perfilado y perforado donde se utilizan únicamente punzonadores intermitentes de baja velocidad, y por ende, de baja productividad, que no cubren las necesidades del mercado interno; convirtiéndose esto en una limitación para la economía nacional debido a que se exporta el material sin procesar y se importa el material procesado.

Esta limitación se puede superar con la utilización de perforadoras rotatorias que están disponibles en el mercado, pero a elevados costos de obtención y poseen limitaciones tecnológicas y de durabilidad de los punzones.

Una propuesta de solución a estos inconvenientes de las perforadoras rotatorias representa un significativo aporte a la economía y a la rama del conocimiento.

Situación problemática: En las máquinas de perforado rotatorio el punzón penetra en la matriz de manera angular, generando un claro excesivamente grande, disminuyendo la vida útil de los punzones al fracturarse los bordes.

Problema de la investigación: La minimización del ángulo de ataque del punzón para disminuir el claro en las máquinas de punzonado rotatorio.

El objeto de estudio de esta investigación: Ángulo de ataque del punzón de perforadoras rotatorias de las máquinas de conformado.

Campo de la investigación: Diseño de un utillaje de punzonado para cubrir el déficit de características tecnológicas y constructivas de los sistemas de perforados actuales.

Objetivo general:

Diseñar, con un enfoque científicamente argumentado, un dispositivo rotatorio vertical que minimice el ángulo de ataque del punzón y el claro en punzonadoras rotatorias.

Tareas:

1. Realizar un profundo estudio bibliográfico que permita conocer aspectos relevantes de los procesos de punzonado y perfilado.
2. Comprobar las limitaciones que presentan los diámetros y longitudes de los punzones empleados en los sistemas de perforado continuo y su dependencia con el diámetro del rodillo que los porta.

3. Diseñar un dispositivo que mejore características constructivas y tecnológicas de las punzonadoras intermitentes y rotativas.

Hipótesis

El establecimiento de una relación entre la longitud y diámetro del punzón y el radio del rodillo permiten obtener una expresión que minimiza el ángulo de ataque del punzón para regular adecuadamente el claro de las punzonadoras rotativas.

Aporte al conocimiento: Diseño de un mecanismo de punzonado vertical continuo, que supera a los existentes en sus características constructivas y tecnológicas.

Utilidad práctica y beneficios esperados de los resultados de esta investigación:

- A través del uso de herramientas tecnológicas como CAD y matlab se generan ventajas económicas al aumentar la fiabilidad de los cálculos, disminuir los tiempos de entrega de resultados y reducir los costos de diseño.
- Contribuir al fortalecimiento de las políticas de desarrollo endógeno que impulsa el gobierno nacional.
- Impulsar y/o estimular a las empresas nacionales para iniciar una producción masiva de elementos altamente mercadeados a nivel mundial con tecnología innovadora nacional, lo que generaría un aumento del ingreso per cápita y más puestos de trabajo.
- Mayor tratamiento a la materia prima nacional y aumento de exportación de material procesado.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se muestran las características generales de funcionamiento de los sistemas de punzonado, acoplados a los trenes de laminación, presentes actualmente en el mercado, así como la revisión de patentes a nivel mundial que muestran sistemas de punzonado rotatorio para la optimización del proceso de conformado. Se analizan sus principales fallas y se particulariza la posibilidad de aplicación de un sistema que cubra parte de los inconvenientes determinados, utilizando herramientas tecnológicas CAD y matlab para la búsqueda de soluciones y análisis del problema.

1.1 Perfilado.

Debido al bajo costo de las láminas el conformado de las mismas ha logrado una posición preponderante entre los procesos de manufactura. Originalmente, la materia prima de este proceso eran hojas laminadas que se suministraban en tamaños limitados. Desde la aparición de los trenes para laminación continua, la lámina se ha producido en rollos de tira ancha los cuales posteriormente se procesan en las prensas y en líneas de conformado del fabricante. La laminación en frío de la chapa genera un calibre más delgado que se compensa con una mayor resistencia a las propiedades mecánicas del material, dándole así mayor rigidez, de aquí que la búsqueda para obtener masa reducida apesure el desarrollo de materiales más resistentes a los esfuerzos mecánicos. Uno de los procesos más utilizados, por ser el mecanismo de más bajo costo, es el de conformado en frío de la lámina, proceso que genera endurecimiento por deformación, lo que incrementa la resistencia del metal (Shey, 2002).

Muchos componentes se conforman posteriormente por medio del doblado en uno o varios lugares, lo que genera la ventaja de dar mayor rigidez a la pieza. Las características de este proceso son la tensión de las fibras externas y la compresión de las internas (Doyle, 1988).

El conformado con rodillos o perfilado es un método de producción continua altamente productivo. El doblado se hace progresivamente, pasando la tira entre

rodillos accionados y contorneados colocados en tándem. Esta operación se realiza en máquinas de movimiento circular (figura 1.1).

Este proceso de deformación es particularmente adecuado para grandes volúmenes de producción, obteniendo perfiles de chapa de la longitud deseada y con tolerancias finales aceptables. Además necesita muy poca manipulación de los elementos para conseguir que sea operativa, y por lo tanto los tiempos de productividad son bastante elevados (Shey, 2002).



Figura 1.1. Perfilado con rodillos
Fuente: <http://www.gonvarri.com>

De igual forma presenta la ventaja de que se puede complementar con sistemas de punzonado de chapa, mecanizado y corte final, obteniendo así una pieza totalmente acabada sin necesidad de manipularla posteriormente. Estas máquinas trabajan a una velocidad entre 15 a 20 m/min, aunque en la actualidad la empresa Diper, S.L. con la colaboración de Berriola, S. Coop., ubicada en Navarra España, desarrolló una máquina de perfilar lamas de persianas de aluminio que trabaja a una velocidad que varía de 10 a 70 m/min (<http://www.fagorarrasate.com> (2007)). Además de la máquina de perfilar propiamente dicha, varios equipos pueden o deben ser introducidos en serie para la obtención del perfil deseado. En la figura 1.2 se puede observar una línea de perfilado complejo, con varios elementos auxiliares y con una disposición bastante típica.

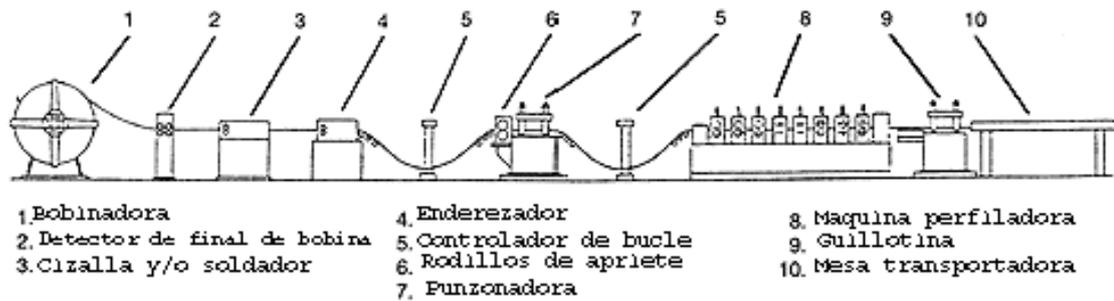


Fig. 1.2. Línea de perfilado compleja

Fuente: <http://www.compuroll.com/>

1.2. Debanadora

En el caso que se utilice bobinas o flejes, la mayoría de los casos, será necesario la adquisición de una devanadora. Estas máquinas consisten en un mandrino expansible que permite encajarse en el diámetro interior del fleje o bobina deseada. Los parámetros de selección básicos son la capacidad de carga de la bobinadora, la anchura máxima y el diámetro máximo de la bobina o fleje que albergará ([http://www.metalfformingmagazine.com/\(2007\)](http://www.metalfformingmagazine.com/(2007)))



Figura 1.3. Devanadora con dos brazos y base giratoria

Fuente: <http://www.senfung.com>

Algunas de estas devanadoras, como la mostrada en la figura 1.3, presentan una base giratoria y dos brazos. Una bobina puede ser posicionada en un brazo mientras otra bobina está siendo utilizada en el otro brazo, reduciendo el tiempo de cambio de bobina en la devanadora. Este tipo es ventajoso cuando las bobinas

son relativamente pequeñas y la producción requerida es alta, ya que la proporción del tiempo consumido en el cambio de bobinas podría llegar a ser importante dentro del tiempo total de la producción.

Las bobinas utilizadas en este tipo de sistema son laminadas en frío y poseen espesores de 0,3 a 2 mm. Las bobinas laminadas en caliente poseen espesores de 1,8 a 9,5 mm (<http://www.senfung.com>).

1.3. Punzonado

Otra posibilidad muy común y extendida, es hacer pasar la lámina por una punzonadora o prensa que perfora la chapa de una forma equidistante, según los cálculos realizados por el diseñador, para obtener perfiles perforados o con formas diversas. A esta operación se acostumbra designarla con la denominación de troquelado, y troqueles a las estampas empleadas en él (Rossi, 1971).

El punzonado es una operación que va unida a los fenómenos de la transformación plástica de los metales y que, por otra parte, en la práctica, resulta casi siempre ligada al proceso de estampado propiamente dicho. Éste se divide en dos fases, en una primera fase algunas partes de la chapa, en la zona de corte, quedan sometidas a esfuerzos de tracción, y otras a esfuerzos de compresión, originándose una zona periférica al punzón sometida a fuertes tensiones internas; se origina en esta primera fase, un vientre cóncavo (Shey, 2002).

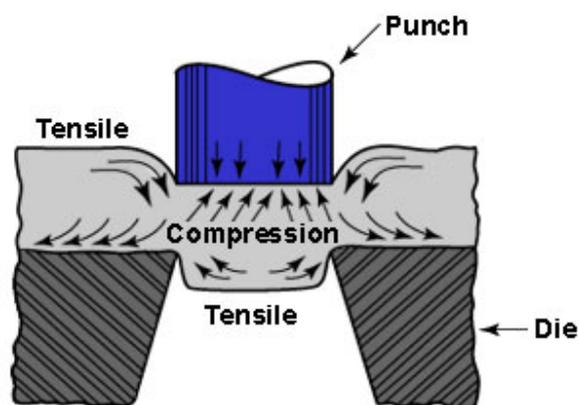


Figura 1.4. Proceso de punzonado

Fuente: <http://www.ToolingU.com/> University Tooling

En una segunda fase las tensiones de la zona periférica son tan grandes que rebasan la resistencia al cizallamiento de la chapa; en estas condiciones sobreviene un brusco desgarro y el trozo de plancha sujeto al punzón se separa del resto y cae al fondo de la matriz (Shigley, 1987).

Durante el punzonado se ha comprobado que, en la proximidad de los hilos cortantes de las herramientas, las fibras de la chapa se doblan hacia abajo, siguiendo, por breves instantes, el movimiento del punzón (como si inicialmente quisieran escapar de la separación) y después, reaccionan para oponerse a la acción del corte. (figura 1.4) (<http://www.toolingu.com>).

1.3.1. Parámetros principales

Los parámetros importantes en el corte de láminas metálicas son el claro entre el punzón y la matriz, el espesor del material, el tipo de metal y su resistencia, y la longitud del corte. En una operación de corte, el claro es la distancia entre el punzón y el dado o la matriz. Los claros típicos en el prensado convencional

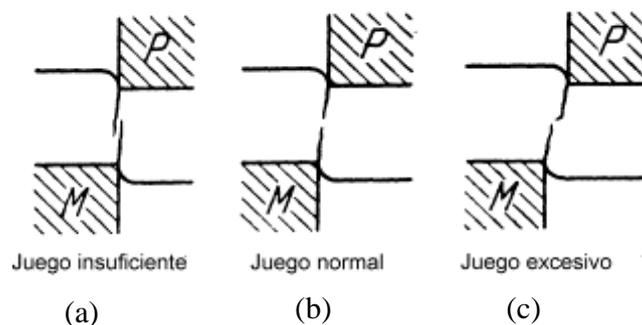


Figura 1.5. Efecto del claro: (a) un claro demasiado pequeño ocasiona una fractura poco menos que óptima y fuerzas excesivas, (b) claro normal ocasiona un corte óptimo (c) un claro demasiado grande ocasiona rebaba más grande (<http://www.siderex>)

fluctúan entre 4 y 8% del espesor de la lámina metálica. El efecto de los claros inapropiados se ilustra en la figura 1.5. Si el claro es demasiado pequeño, las líneas de fractura tienden a pasar una sobre otra, causando un doble bruñido y requiriendo mayor fuerza de corte. Si el claro es demasiado grande, los bordes de corte pellizcan el metal y resulta una rebaba excesiva, de igual forma requiere de una fuerza adicional. En operaciones especiales que requieren bordes muy rectos

como en el rasurado y el perforado, el claro es solamente el 1 % del espesor del material (Doyle 1988).

Tabla 1.1. Valores de tolerancias para tres materiales de láminas

Fuente: <http://www.ToolingU.com/>

Determinación de claro			
Tipo de material	Espesores de chapa		
	0,04 in	0,08 in	0,12 in
5052 aluminio aleado 4,5 % de claro	0,0018	0,0036	0,0054
2024 aluminio aleado 6 % de claro	0,0024	0,0048	0,0072
Acero laminado en frio, 7,5% de claro	0,003	0,006	0,009

El claro correcto depende del tipo de lámina y de su espesor. Algunos claros recomendado se pueden mostrar en la tabla 1.1.

1.3.2. Características de los bordes punzonados o cizallados

Los bordes cizallados de la lámina tienen formas características que se muestran en la figura 1.6. Encima de la superficie de corte hay una región que se llama

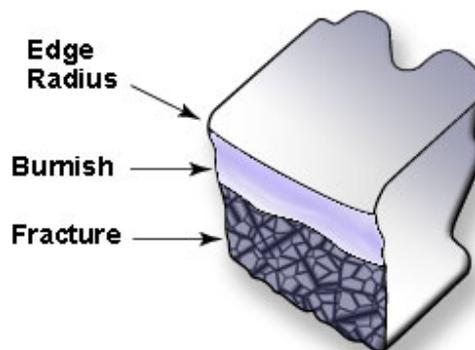


Figura 1.6. Bordes cizallados característicos del material de trabajo

Fuente: <http://www.ToolingU.com/>

redondeado (Edge Radius). Éste corresponde a la compresión hecha por el punzón en el material de trabajo antes de empezar el corte. Aquí es donde

empieza la deformación plástica del material de trabajo; justo abajo del redondeado hay una región relativamente lisa llamada *bruñido (Bumish)*. Ésta resulta de la penetración del punzón en el material antes de empezar la fractura. Debajo del bruñido está la *zona de fractura (Fracture)*, una superficie relativamente tosca del borde de corte donde el movimiento continuo del punzón hacia abajo causa la fractura del metal. Finalmente al fondo del borde está la *rebaba*, un filo causado por la elongación del metal durante la separación final de las dos piezas (figura 1.7) (Black, 1999).



Figura 1.7. Bordes cizallados característicos del material de trabajo
Fuente: Boothroyd Geoffrey, 1978

1.4. Descripción de una estampa o matriz de corte

Los troqueles, como todas las estampas, están formados de dos partes fundamentales: la matriz y el punzón (figura 1.8). La sección del punzón o de la matriz definen el contorno de la pieza a cortar, tomando en consideración si lo que se requiere utilizar es la lámina agujereada o el material que formaba parte de la lámina. Los filos de corte están constituidos por el perímetro exterior del punzón y el perímetro interior de la matriz (Rossi, 1971). Esta operación se realiza comúnmente en máquinas de movimiento rectilíneo alternativo. Para el punzonado la elección del proceso se rige por las características y la cantidad del producto:

1. Los agujeros de tamaño y forma estándar se pueden cortar en prensas punzonadoras de propósito general con herramientas intercambiables.
2. Las geometrías complejas se pueden crear en matrices compuestas que trabajan simultáneamente varios bordes de corte.

3. En los troqueles progresivos se realizan varias operaciones de punzonado y estampado en secuencia, mientras que la tira se alimenta en incrementos exactos (con topes).

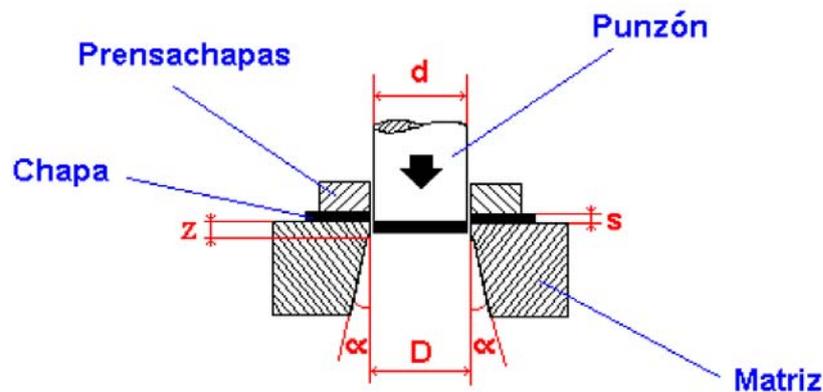


Figura 1.8. Estampa de corte
Fuente: Xavier Salueña, 2002

4. Las tasas de producción más altas se obtienen con el perforado mediante rodillos; la matriz y el punzón se ubican en la superficie de los rodillos.
5. Para corridas cortas, una solución económica es la matriz de regla de acero. La matriz está hecha con tiras de borde biselado (placas) presionando fuertemente contra ranuras hechas en madera contraenchapada.
6. Ha habido un desarrollo rápido de los métodos de corte, con el uso de las técnicas usuales en procesos de soldadura (rayos láser, haces de electrones, soplete de plasma, arco eléctrico, corte con oxígeno y gas combustible, y con chorro de agua a alta velocidad) (Schey, 2002).

1.5. Prensas

La prensa es una máquina herramienta que tiene como finalidad lograr la deformación permanente o incluso cortar un determinado material, mediante la aplicación de una carga. Transmite energía mecánicamente (prensa de revolución total) mediante un volante de inercia que acumula energía o neumáticamente (prensa de revolución parcial) a un troquel o matriz (B.H. Amstead, 1984).

1.5.1. Prensas mecánicas

El motor hace girar un volante de la prensa que está unido al cigüeñal de la misma directamente o por medio de engranes o bandas, operándose con auxilio de un embrague de fricción. Una biela transmite el movimiento del cigüeñal a una parte móvil de la prensa o ariete, deslizándose éste en unas guías.

1.5.1.1. Clasificación según su mecanismo

Las prensas manejadas con el pie generalmente son llamadas prensas de pedal, son usadas solo para trabajos livianos. Las prensas de manivela, son el tipo más común por su simplicidad. Son usadas para la mayoría las operaciones de perforado, recorte y de estirado simple. Las prensas de doble manivela están provistas de un método para mover los soportes de discos o las matrices de acción múltiple. Las de conducción excéntrica se usan sólo donde se necesita un solo martinete de golpe corto. Las de acción de leva están provistas de un reposo, en la parte inferior del golpe, por esta razón a veces se usan para accionar los anillos de sostén del disco en las prensas de estampado. Las de conducción por charnela son usadas donde se requieren grandes adelantos mecánicos junto a una acción rápida, como puede ser en el acuñado, cortado o en el modelado

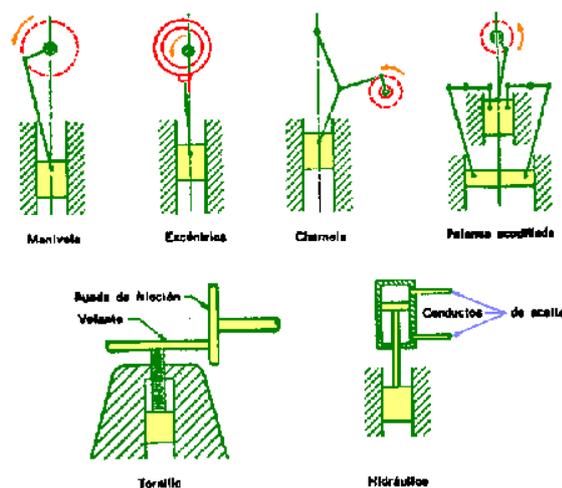


Figura 1.9. Mecanismo de las prensas
Fuente: B.H. Amstead- Phillip F. Oswald, 1984

Guerin. Los mecanismos de palanca acodillada son usados principalmente en las prensas de estirado para accionar el soporte de discos. (figura 1.9) (B.H. Amstead, 1984).

Por ser las de manivela las más comunes y las de más alta comercialización por su economía con respecto a las de mayor cantidad de golpes por minuto, se analizan con más detalle. La velocidad del cabezal en este tipo de máquinas no es constante; esta velocidad es nula en el punto muerto superior y en el punto muerto inferior. Y máxima cerca de la mitad de la carrera. La variación de la carrera sigue una sinusoidal (figura 1.10).

Esta ley sinusoidal resulta de la transformación del movimiento de rotación circular continuo de la manivela del cigüeñal en un movimiento rectilíneo alternativo de la corredera.

Si se realiza un análisis cinemático del mecanismo con movimiento plano se aprecia la multiplicación de la fuerza que genera el peso del pistón, por las altas aceleraciones producidas en esos puntos. De hecho como $|a_A| = \omega^2 \cdot \overline{AO}$ y

$$|a_{BA}| = \frac{|v_{BA}|^2}{\overline{AB}}$$

entonces: $|a_B| = |a_A| + |a_{BA}|$ cuando llega al punto inferior y

$$|a_B| = |a_A| - |a_{BA}| \text{ cuando llega al punto superior (Perez, 2006)}$$

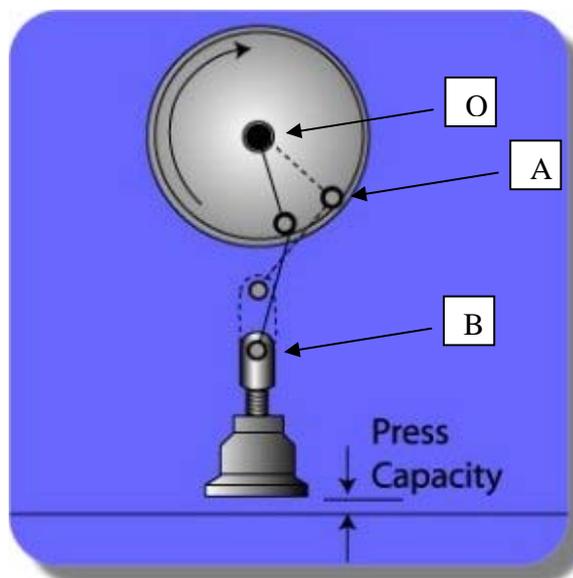


Figura 1.10. Mecanismo biela manivela
Fuente: <http://www.siderex>

Como a su vez $J = m \cdot |a_B|$; donde “J” es la fuerza de inercia resultante para una masa m de la pieza que se une a la biela. Lo que significa, que para una misma máquina la velocidad angular queda limitada por la inercia generada con este tipo de sistemas, por lo que el número de golpes por minuto de estos mecanismos tiene un valor máximo, delimitado por la carga que puedan soportar los elementos que conforman la máquina. Otro factor a tomar en cuenta son las vibraciones a las que estaría sometida la máquina (Perez, 2006).

1.5.1.2. Clasificación por su estructura y velocidad

Por su estructura se pueden clasificar en prensas de cuello de cisne y prensas de doble montante (dentro de estas existen las monobloc y las de piezas armadas por tirantes). Por su velocidad se clasifican en prensas convencionales (de 12 a 200 golpes minuto en función de su tamaño), prensas rápidas (de 300 a 700 golpes por minuto) y prensas de alta velocidad (de 800 hasta 1600 golpes por minuto en las más rápidas de fabricación japonesa y suiza) (Xavier 2002).

Existen también las prensas mecánicas de bigornia, con bastidores de arcada, de montantes rectos, de doble efecto, de rodillera, tipo inverso, de mesa ascendente, transfer, de recortar y de extrusionar y trefilar (B.H. Amstead, 1984).

Las principales empresas del mercado fabrican máquinas de manivela cuya velocidad en golpes por minuto oscila entre los 30 y 125, tal como lo muestra la tabla 1.2

1.5.2. Prensas hidráulicas

Las prensas hidráulicas son producidas en varios tipos y tamaños. Debido a que pueden proveerse de casi ilimitada capacidad, la mayoría de las prensas más grandes son de este tipo. El uso de varios cilindros hidráulicos permite la aplicación de fuerzas en el martinete en varios puntos, y proveen de la fuerza y ritmo necesario al soporte de discos. Las prensas hidráulicas de alta velocidad proporcionan más de 600 golpes por minuto, y se utilizan para operaciones de corte de alta velocidad. (figura 1.11).

Tabla 1.2. Variables de prensas mecánicas excéntricas de bastidor con cuello de cisne

Fuente: <http://www./Beckwood Press Company com St. Louis, MO>

Especificaciones (mm):										
Modelo:	SM-16	SM-25	SM-32	SM-40	SM-50	SM-63	SM-80	SM-100	SM-160	SM-250
Capacidad (Toneladas)	16	25	32	40	50	63	80	100	160	250
CORREDERA										
Carrera Fija:	63	80	80	88	88	100	125	125	160	200
Ajustable (Opcional):	8 - 63	8 - 80	8 - 80	8 - 88	8 - 88	8 - 100	8 - 125	8 - 125	12 - 160	20 - 160
Ajusto de Corredera:	50	50	50	63	63	63	80	80	100	125
Área Izquierdo a Derecho x Frente a Atrás:	315 x 200	355 x 220	355 x 220	400 x 250	400 x 250	450 x 280	500 x 315	500 x 315	800 x 600	900 x 650
Agujero de Espiga:	40 x 75	40 x 75	40 x 75	50 x 85	50 x 85	50 x 85	63 X 85	63 X 85	--	--
VELOCIDAD										
Versión sin engranajes:	125	112	112	100	100	90	80	80	--	--
Versión con engranajes:	63	56	56	50	50	45	40	40	35	30
ESPACIO PARA MATRIZ										
Shut Height - Distancia entre Cima del banco y Pisón - Estándar:	224	250	250	280	280	315	380	380	560	600
Shut Height - Distancia entre Cima del banco y Pisón - Opcional:	315	355	355	355	355	400	560	560	Apto	Apto
Garganta Estándar:	180	200	200	225	225	250	280	280	315	400
Garganta Opcional:	235	260	260	290	290	325	410	410	Apto	Apto
Ancho de abertura en la parte de atrás:	280	315	315	355	355	400	450	450	650	700

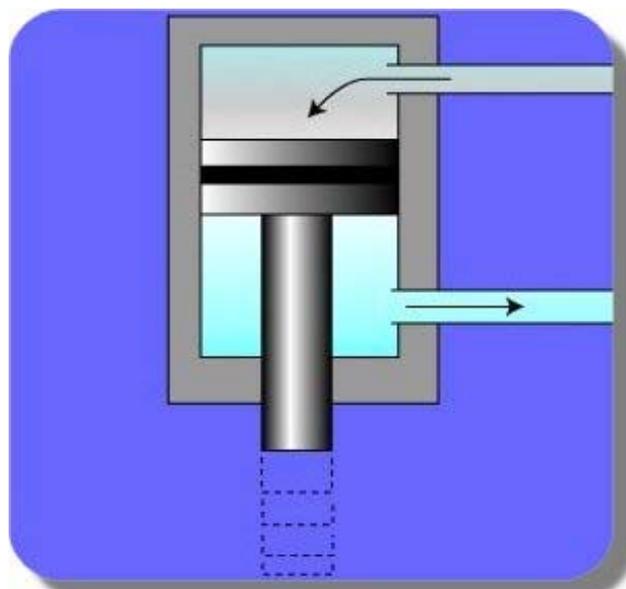


Figura 1.11. Mecanismo de las prensas hidráulicas [35]

Fuente: <http://www.siderex>

La velocidad de bajada del pistón de una prensa no depende de una ley algebraica como ocurre en la prensa mecánica.

Esta velocidad es proporcional al caudal de la bomba, y puede ser constante durante toda la carrera de trabajo, o variar según las necesidades de trabajo.

Estas prensas se adaptan particularmente a los trabajos para los cuales se necesita ejercer una fuerte presión de intensidad continua, tales como piezas embutidas profundas o difíciles, formado por extrusión, matrizado, formado en caliente, moldeados de metales en polvo, brochado, plegado, engastado y todos los trabajos que necesitan un tiempo de paro al final de la carrera. Estas máquinas trabajan a velocidades más lentas que las prensas mecánicas (Baránov, 1985).

1.6. Punzonadoras volantes

Éstas son punzonadoras que están montadas en un carro móvil a lo largo de unos carriles lineales. Los carros son móviles intermitentemente en una línea recta hacia delante y atrás a lo largo del eje longitudinal de la banda continua en movimiento. Los carros aceleran desde una posición estacionaria y alcanzan la velocidad lineal de la banda continua en movimiento. Llegados a este punto, los carros se acercan entre sí, cerrando los punzones sobre la banda continua y punzonando o perforando así la abertura mientras los punzones se estaban moviendo longitudinalmente con la banda continua. A continuación, los punzones se abren y el carro se mueve por los carriles de vuelta hasta la posición inicial. Este sistema requiere el uso de equipos relativamente caros, y el control del carro requiere controles computarizados sofisticados. Éstos resultan necesarios para garantizar que el carro alcanzara una velocidad que igualase la velocidad de la banda continua en movimiento, y que los punzones se cerrasen exactamente en el momento adecuado para realizar la abertura en el punto exacto requerido. El carro móvil es igual al utilizado en las perfiladoras para gillotinar las láminas ya perfiladas. (figura 1.12). Este sistema no puede ser utilizado para pasos pequeños ya que mientras se levanta el punzón y regresa para realizar el otro agujero la chapa se avanza. Otro problema más serio consiste en el hecho de que detener el carro y darle marcha atrás y, a continuación, ponerlo nuevamente en marcha

para acelerar para la siguiente abertura, requiere un tiempo apreciable. Lo que genera pasos en exceso distanciados (Xavier, 2002).

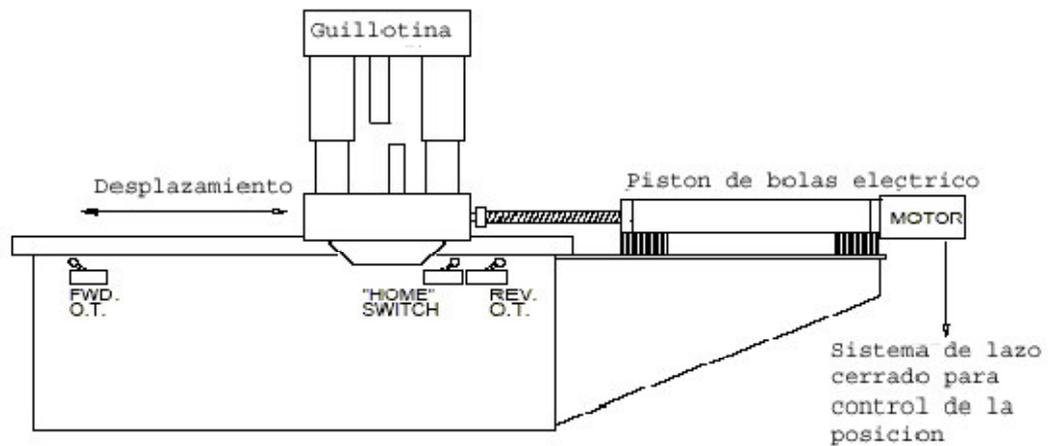


Figura 1.12. Guillotina de lámina perfilada
Fuente: <http://www.compuroll.com/>

1.7. Básquet

Por básquet se denomina a un elemento necesario en caso de usar, como

Figura 1.13. Basquet
Fuente: <http://www.fagorarrasate.com>

suministro de chapa, uno bobina o fleje. Se trata de un elemento de rodillos con una cierta curvatura que evita que la chapa no pueda doblarse en la entrada de la máquina. Es decir, al usar una bobina la chapa presenta el abombamiento descrito anteriormente, llamado bucle, y entra de forma plana sobre la máquina. Si no se usase este elemento este cambio de dirección de la chapa podría tener un radio demasiado pequeño, haciendo que la chapa se doblase antes de la entrada a la máquina, cosa que produciría problemas importantísimos. La figura 1.13 presenta un ejemplo de básquet (Doyle, 1988).

1.8. Bucle de chapa

Es una cantidad de chapa que se deja expresamente para que sirva de reserva, y que de esta forma evitar un estiramiento de la chapa por parte de la máquina perfiladora. Se trata de un parámetro fundamental, y que debe ser tenido muy en cuenta por el cliente. En la figura 1.14 se puede observar un ejemplo de bucle de chapa (<http://www.ToolingU.com>).

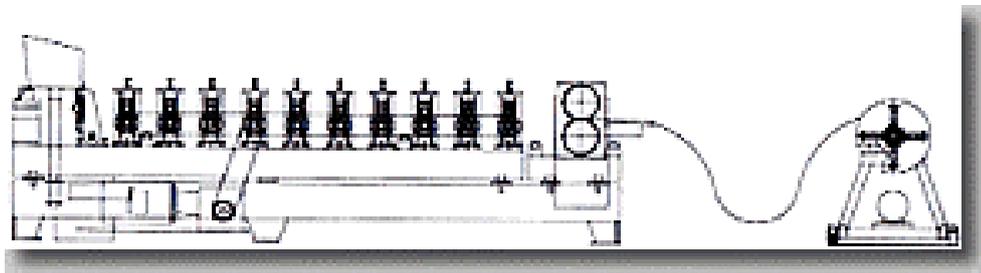


Figura 1.14. Bucle de chapa
Fuente: <http://www.compuroll.com>

1.9. Freno mecánico

Existe un freno que permite parar el giro de la devanadora en caso de que sea necesario o por un evento inesperado que haga parar de forma repentina la máquina perfiladora. En algunos casos, la devanadora incorpora un sensor que permite limitar la altura de bucle de la chapa. Este sensor, situado en el punto donde consideramos que el bucle debe ser máximo, actúa parando la máquina devanadora. Esto permite que no se obtenga un exceso de chapa debido a que la devanadora gire más rápido que lo que la perfiladora necesita.

El tipo de devanadora, la altura del bucle, la distancia de este y el número y forma de ubicación de los sensores debe ser estudiado por el cliente para un correcto funcionamiento del proceso en conjunto y, de esta forma, poder disminuir el tiempo de ciclo del proceso. Además de evitar excesivas arrancadas y paros por parte de los motores involucrados, evitando los inconvenientes asociados a este hecho (Black, 1999).

1.10. Rodillos enderezadores

Se trata de unos rodillos situados normalmente a la salida de la bobinadora o después del bucle de chapa, unido al básquet, que permiten aplanar la chapa. La razón es que la chapa al estar enroscada en la bobina o después de bucle presenta una forma curva por defecto, no plana, y por lo tanto la chapa debe ser enderezada a una posición plana. Después del bucle es opcional, ya que la deformación a la que es sometida la chapa en esta curvatura no es plástica.



Figura 1.15. Enderezador
Fuente: Boothroyd Geoffrey, 1978

Consiste en una serie de rodillos situados a diferente altura que obligan a la chapa a hacer cambios de dirección en ellos, obteniendo a la salida una chapa plana por defecto. En la Figura 1.15 se puede observar un ejemplo de rodillos enderezadores.

1.11. Punzonado continuo

Una de las fases de la tesis consistió en buscar empresas que en el ámbito mundial se encargan de diseñar y construir dispositivos de punzonado continuo, con la finalidad de observar las opciones disponibles en el mercado, a objeto de conocer los aspectos positivos y negativos de cada uno de los diseños, así como la verificación de la no existencia del sistema planteado (Schey, 2002).

1.11.1. Utillaje para punzonado

El punzonado se realiza comúnmente en máquinas de movimiento rectilíneo alternativo; sin embargo, actualmente existen sistemas para altas tasas de producción, que trabajan por perforado mediante rodillos, donde la matriz y el punzón se ubican fijos en la periferia de los mismos; estos sistemas son fabricados por muchas empresas, en sustitución del punzonado con prensas mecánicas o hidráulicas, para evitar el uso de varios sistemas mecánicos que se requieren al acoplar una máquina punzonadora intermitente a la línea de perfilado, a objeto de optimizar la unión de estos dos procesos. Los sistemas indispensables, para acoplar las punzonadoras intermitente a los sistemas de perfilado, generan problemas de espacio, encarecen el proceso de conformado y aumentan las posibilidades de fallas. Estos elementos son el básquet, la enderezadora, el bucle de chapa y el freno. El freno de la bobina podría utilizarse para resolver algunos inconvenientes en el uso las punzonadoras continuas, pero no, como en el caso anterior, para controlar el bucle de chapa.

1.12. Empresas generadoras de utillaje

1.12.1. Utillaje rotatorio de la empresa SAMCO (USA)

Los sistemas rotativos de punzonado, como el mostrado en la figura 1.16 realizado por la empresa Maquinaria Samco Toronto U.S.A., presentan grandes ventajas económicas, por su simplicidad de fabricación, por trabajar como un parasito del tren de laminado extrayendo energía de su motor para el proceso de punzonado (lo que hace que ocupe menos espacio) y por evitar el uso de varios mecanismos



Matriz fija al ro

jo al rodillo con
mucho menor al
o.

Figura 1.16. Utillaje para punzonado o punzonador rotatorio con paso constante
Fuente: <http://www.samco-machinery.com>

requeridos en la *línea de perfilado compleja*, cuando se utiliza una prensa común para punzonar. A pesar de presentar estas ventajas, los sistemas rotatorios, no están tan altamente difundidos, a nivel comercial, ya que son sistemas muy robustos en comparación al diámetro del agujero que los mismos pueden realizar. Al revisar las empresas que realizan estos sistemas, se puede observar que todos los punzones presentan diámetros de pequeñas dimensiones y longitudes en extremo cortas, con algunas excepciones. La característica de longitud no coincide con los punzones generados en las prensas intermitentes ni con la teoría de conformado, la cual indica que la gran longitud de los punzones se requiere para aumentar la vida de los mismos.

Los punzones colocados en el rodillo de esta empresa no son extraíbles y poseen muy poca longitud para ser rectificados, por lo que una vez culminado su tiempo de vida son desechados con todo y rodillos, esto va en contra del medio ambiente. El desplazamiento de la chapa entre los rodillos se produce de manera tangencial a ambos, manteniendo la chapa recta y perpendicular al eje que une al centro de los rodillos. Bajo esta condición de desplazamiento el punzón deforma la chapa antes de que se genere el punzonado, ya que por su longitud el punzón toca la chapa antes que el rodillo. Mientras mayor sea la longitud del punzón mayor será la deformación que este le aportara a la chapa. La empresa SAMCO así como otras empresas utilizan un tercer y cuarto rodillo de menores dimensiones ubicados adelante y atrás de los rodillos punzonadores para obligar a la chapa, durante la entrada, que se acerque a la matriz adoptando la curvatura del rodillo, de modo de evitar la deformación generada por la longitud del punzón, y a la salida de la lámina que el rodillo cumpla con la función de extractor. En la figura 1.17 se representa un par de rodillos con punzón, matriz y chapa generada en un software CAD, en la cual se observa como el punzón tiende a penetrar en la chapa antes de tocar la matriz y el por qué del tercer y cuarto rodillo ubicado por la empresa SAMCO en el mecanismo propuesto para acercar la chapa a la matriz.

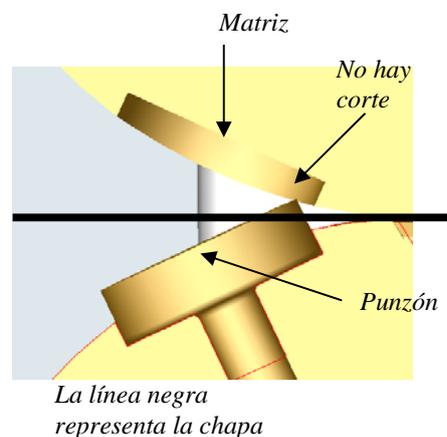


Figura 1.17. Punzonado rotatorio

1.12.2. Utillaje rotatorio de la empresa Baust Stanztechnologie (Alemania)

La empresa alemana describe este sistema en internet en la página [WWW.Baust Stanztechnologie.de](http://WWW.BaustStanztechnologie.de), como un sistema económico, rápido e innovador para la industria metal mecánica, alcanzando una velocidad de perforado hasta los 200

m/min. Las características especiales son la alta velocidad en comparación con las punzonadoras convencionales así como la reducción de fuerzas de corte. Estos sistemas son designados como unidad de punzonado rotatorio. (figura 1.18) (<http://www.BaustStanztechnologie.de>).

El sistema tiene punzones extraíbles, lo que hace el sistema más ecológico que el presentado por la empresa SAMCO, ya que los punzones pueden ser rectificadas y desechados al final de su vida útil, permaneciendo así el rodillo intacto. Sin embargo el rodillo que posee la matriz no tiene la misma ventaja, ya que el agujero está generado sobre el rodillo.

Los punzones sobresalen del rodillo una gran longitud, pero no penetran en exceso en la matriz por la separación que poseen los rodillos del sistema y por que la penetración en exceso traería consigo una deformación permanente en la chapa y generaría trabas en el sistema, ya que el punzón y la matriz tienen un

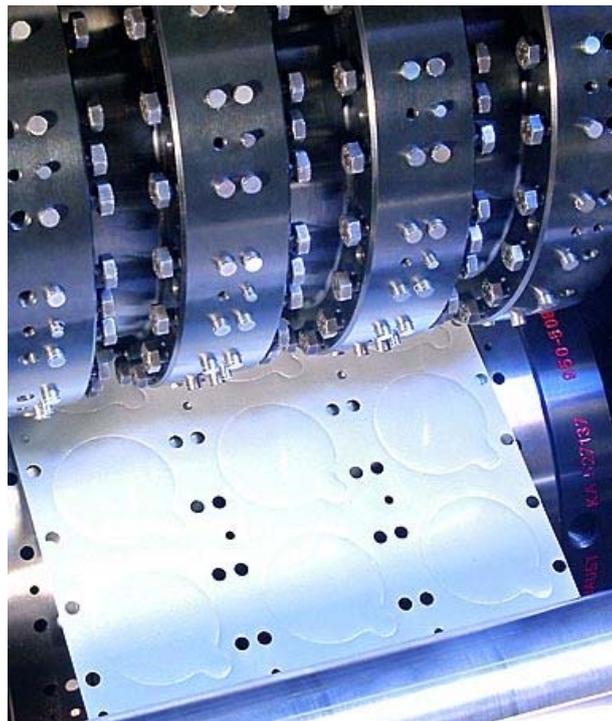


Figura 1.18. Unidad de punzonado rotatorio
Fuente: <http://www.BaustStanztechnologie.de>

juego muy pequeño y los dos cilindros no podrían ni acoplarse, ni desacoplarse, por su diferencia angular durante el proceso.

El paso entre punzonado puede variarse a ciertos valores al colocar solo los punzones que le interesen al diseñador del producto.

1.12.3. Utillaje rotatorio por la empresa Baust Stanztechnologie 2 (Alemania)

Esta empresa alemana presenta otra unidad punzonadora rotatoria similar a la anterior, donde los punzones son extraíbles y poseen una gran longitud. Los rodillos tienen una separación entre sí que va más allá del espesor de la chapa, por lo que se deduce que son los mismos punzones los que sostienen la chapa en posición, durante la rotación, mientras otros punzones inician el perforado. Si el sistema funciona bajo esa premisa el paso no podría estar muy distanciado, ya que los sistemas mostrados no tienen un mecanismo que sostenga la chapa mientras es punzonada. (figura 1.19). A pesar de su longitud los punzones no tienen una gran penetración en el rodillo hembra por la separación presente entre los rodillos, por lo que los punzones son intercambiables pero no rectificables, a menos que los rodillos se puedan acercar entre sí. El agujero de la matriz es

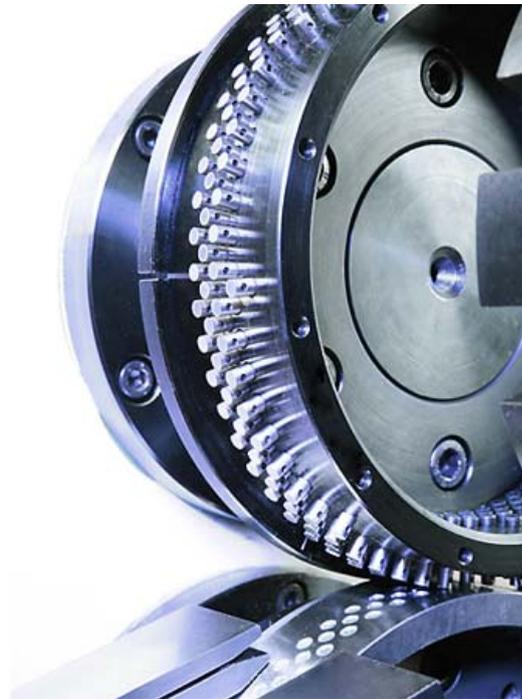


Figura 1.19. Unidad de punzonado rotatorio
Fuente: <http://www.BaustStanztechnologie.de>

realizado directamente sobre el rodillo lo que hace que el mismo sea desechado una vez que culmine su tiempo de vida. Al hacer los agujeros directamente sobre los rodillos significa que el material de todo el rodillo debe ser una aleación en extremo costosa.

Este sistema no utiliza rodillos para obligar a la chapa a estar cerca del agujero matriz sino unas guías fijas ubicadas a los lados del sistema.

1.12.4. Prototipo de unidad rotatoria generado por la empresa Baust Stanztechnologie (Alemania)

Este sistema es presentado por la empresa alemana en un video en internet mostrando las ventajas del perforado continuo. En el sistema se puede observar que el punzón no solo es extraíble, sino que de igual forma el punzón se puede invertir por su simetría, utilizando dos caras. (figura 1.20).

Tal como se presenta el prototipo no funciona bien, ya que no posee prensa chapa que mantenga la lámina en posición y los punzones no tienen un paso tan pequeño como para sostener la lámina, como en los casos descritos con anterioridad. El sistema tampoco posee rodillos ni guías que acerquen la lámina a la matriz para generar un punzonado sin deformación previa de la chapa.

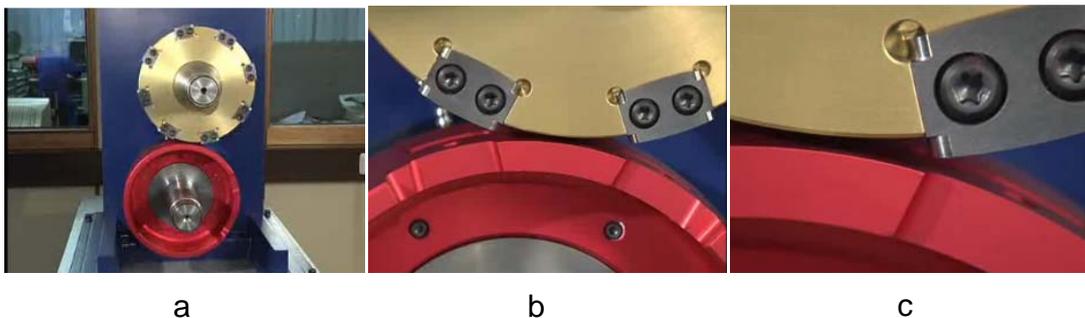


Figura 1.20. Unidad de punzonado rotatorio
Fuente: <http://wwwBaustStanztechnologie.de>

1.12.5. Unidad rotatoria comercializada por la empresa Cut Smart Engineering & Manufacturing, Inc. (USA)

El sistema trabaja bajo el mismo principio utilizado en los sistemas anteriores pero su objetivo no es perforar, sino cortar una chapa bajo una forma predefinida. Describen el sistema como una máquina de muy alta velocidad, precisión y la

aplicación de menos presión de corte que los sistemas convencionales. Lo denominan **troquelado rotativo con herramientas de metales combinados**. (figura 1.21) (<http://www.cutsmart.com>).

La forma de la herramienta y su corta longitud la hace por demás compleja de fabricar y de una vida en exceso limitada. Con la ventaja de que los punzones son intercambiables.

Sistemas parecidos son utilizados para el corte de papel y plástico y da excelentes resultados por su alta velocidad y durabilidad, pero el desgaste que generan los metales sobre el punzón y matriz los hace poco rentables y poco ecológicos.

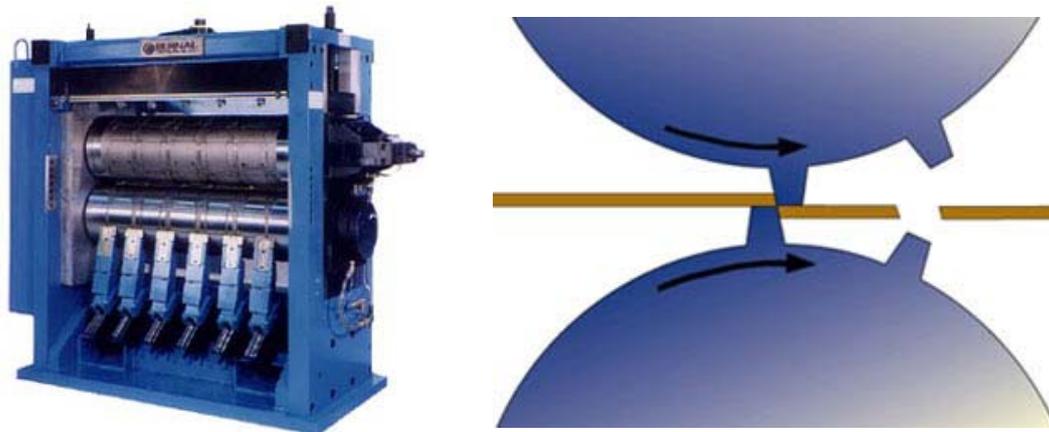


Figura 1.21. Unidad de punzonado rotatorio
Fuente: <http://www.cutsmart.com>

Otras empresas consultadas del mundo que fabrican sistemas de punzonado continuo son las siguientes:

1. **HE Hill Engineering Builders of tooling and special Machinery USA** (<http://www.hillrotary.com>)
2. **EMT international, Inc USA** (<http://www.emtinternational.com>)
3. **Baust Werkzeugtechnik Alemania** (<http://www.Printequip.net>)
4. **La corporación Sen Fung Rollform Machinery Taiwan** (<http://www.senfung.com>)

1.13. Patentes

E00972515 (2003) (España) / *Aparato punzonador giratorio* (figura 1.22): La invención se refiere a un aparato punzonador giratorio para perforar aberturas en

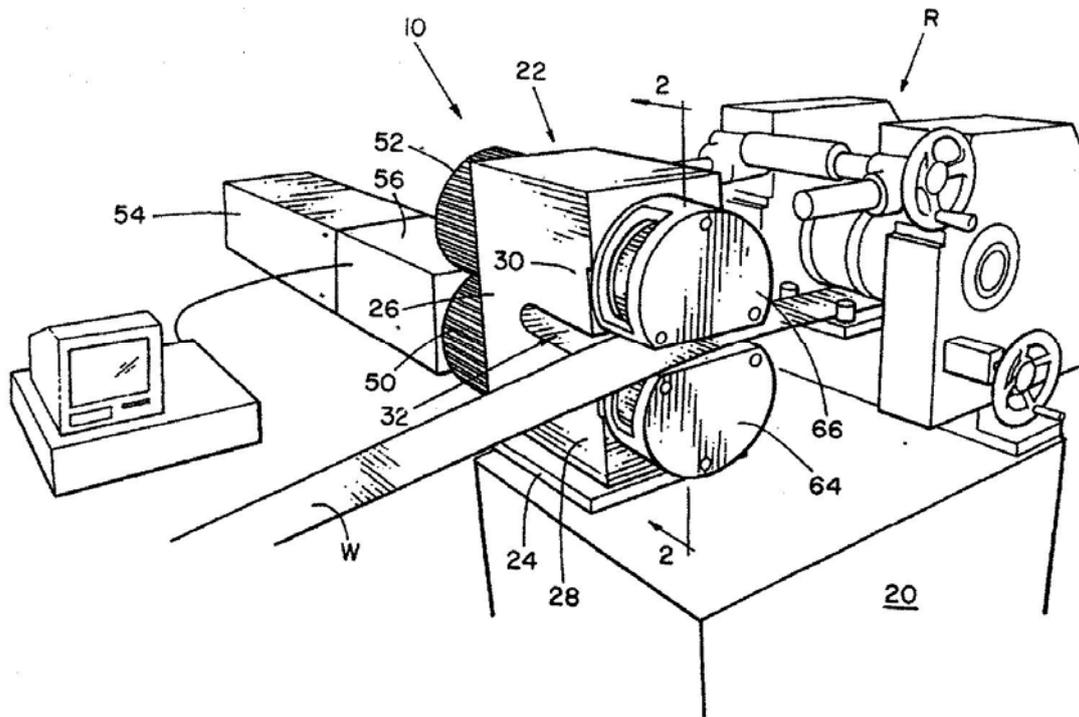


Figura 1.22. Unidad de punzonado rotatorio [5]

un material laminado de banda continua en movimiento y, en particular, para aberturas punzonadas que tienen una longitud significativa a lo largo del eje longitudinal de la banda continua en movimiento.

Análisis:

En este sistema el punzón se encuentra fijo al rodillo y la perforación puede presentar un buen corte si el punzón posee una longitud que oscila entre 0,6 y 2,16 mm y diámetros de punzones hasta de 260 veces más pequeño que el rodillo que lo porta. Ello ocurre para evitar un deterioro rápido del punzón o una mala calidad de la perforación. Lo que hace el sistema poco eficiente y muy robusto para el agujero a realizar.

EP-1419861A1(2003) (Bloque Europeo; Alemania) / *Punzonadora rotatoria para materiales extruidos* (figura 1.23): El sistema punzona formas triangulares en

piezas extruidas con un par de rodillos acoplados a un sistema de ruedas dentadas. Los punzones acoplados al rodillo son extraíbles con un mecanismo similar al de las placas de carburo sinterizado de las máquinas herramientas. La distancia entre los rodillos es ajustable y para mantener la relación entre los rodillos se utiliza un sistema con cadena y tensor en la parte posterior del sistema. Es capaz de punzonar a muy altas velocidades.

Análisis:

El sistema propone punzonado con formas triangulares en vez de circulares, lo que demuestra que este sistema es versátil en cuanto a la forma que puede tener el punzón. Aun así el tamaño del punzón debe ser de muy poca sección

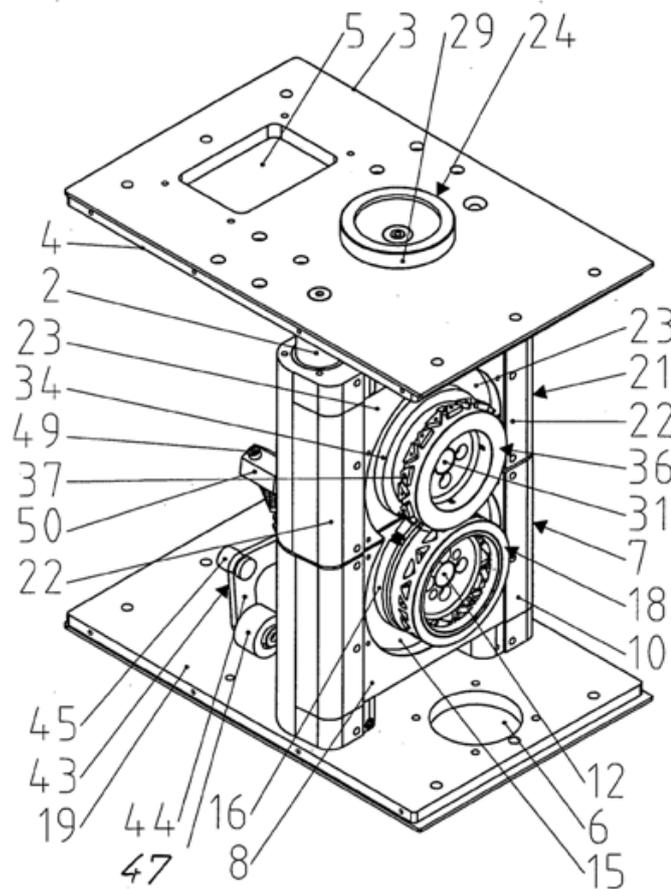


Figura 1.23. Punzonador rotatorio [5]

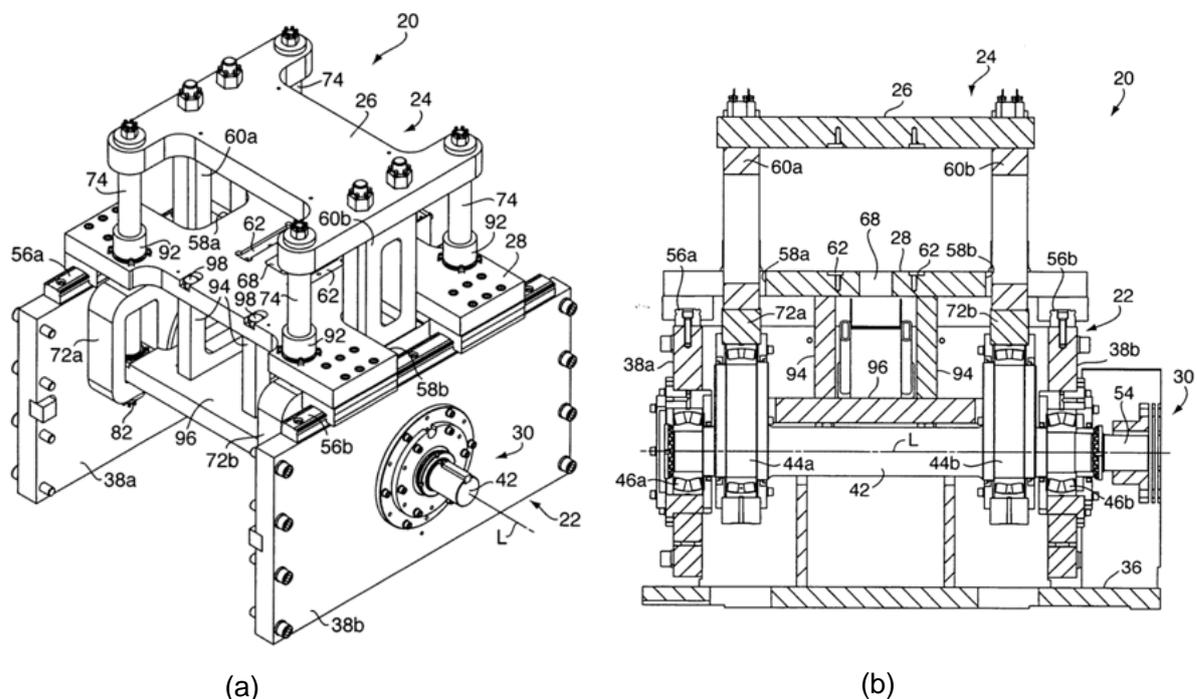
transversal en comparación con el diámetro que debe tener el rodillo, para no

deteriorar el material cortado durante el proceso, lo que sigue limitando al mecanismo.

Si el punzón es una placa de carburo sinterizado se puede conseguir a bajo precio en el mercado y puede rotarse después de su deterioro para continuar su trabajo, lo que da grandes ventajas económicas.

El rodillo que presenta la matriz no tiene postizo donde se punzone, por lo que al deteriorarse será sustituido por un rodillo nuevo, eso es anti ecológico y anti económico, sin embargo el rodillo matriz es hueco y sus aberturas son pasantes lo que facilita el desalojo del material sobrante.

CA-2651310A1 (2008) (Canadá) / *Punzonador rotatorio* (figura 1.24): El punzonador rotatorio incluye un punzón, una matriz y un soporte que sostiene al punzón y maneja el ensamble generando un movimiento horizontal y vertical a lo largo de un desplazamiento circular. La matriz está conectada al soporte pero solo recibe un movimiento horizontal. El punzón se mueve verticalmente con respecto a la matriz, pero circularmente con respecto a un observador externo al sistema. La



Fuente: Patente CA-2651310A1

Figura 1.24. Unidad de punzonado rotatorio: (a) vista isométrica, (b) corte frontal

estructura que sostiene al punzón se desplaza de forma circular por medio de un excéntrico que forma parte del sistema. El mecanismo mantiene de manera constante, durante su movimiento periódico, al punzón alineado con la matriz, mientras se desplaza entre el material.

Análisis:

El mecanismo punzona de manera vertical con un sistema que mueve al punzón de forma circular. Es un sistema parásito que es capaz de acoplarse a las perfiladoras extrayendo su energía. Es capaz de punzoner con punzones de diferentes diámetros, pero punzona solo para un paso, a menos que se utilice un embrague externo con el que se regule la distancia entre agujeros. Es un mecanismo que funciona bajo un principio similar al sistema propuesto, pero no es igual.

La desventaja de este sistema es su robustez y complejidad de fabricación por la multiplicidad de piezas que lo conforman. Lo que hace el sistema por demás costoso, pero a su vez ingenioso. En apariencia no presenta problemas de características tecnológicas.

US-005937719A (1999) (USA) / *Punzonador rotatorio* (figura 1.25): El aparato tiene un rodillo que posee esferas que se utilizan como punzón y un rodillo con agujeros que funcionan como matriz. Acoplado al rodillo que posee las esferas se encuentra un rodamiento (150) que estrecha el paso de la esfera y la comprime contra la matriz para generar el punzonado. Si se desplaza el rodamiento con ayuda del tornillo (188) a otra posición puede no punzoner sino deformar la chapa, generando irregularidades esféricas sobre la misma, de igual manera este sistema podría ser utilizado para perforar chapas de mayor espesor.

Análisis:

El sistema planteado perfora de una manera atípica, ya que utiliza la presión generada por una esfera sobre una matriz circular para punzoner la lámina. Pero tomando en consideración que la esfera va a punzoner una chapa y que mientras la punzona se pondrá en contacto con un anillo de acero (152), que bordea a un rodamiento, en un área de contacto que tiende a ser cero, la presión de contacto

en este punto será un valor en extremo grande, que deformará a la esfera o al anillo de acero.

Antes de generarse el punzonado la lámina es deformada, adquiriendo la forma de la esfera por deformación plástica, esta sería una energía consumida extra que no tendría ningún tipo de función.

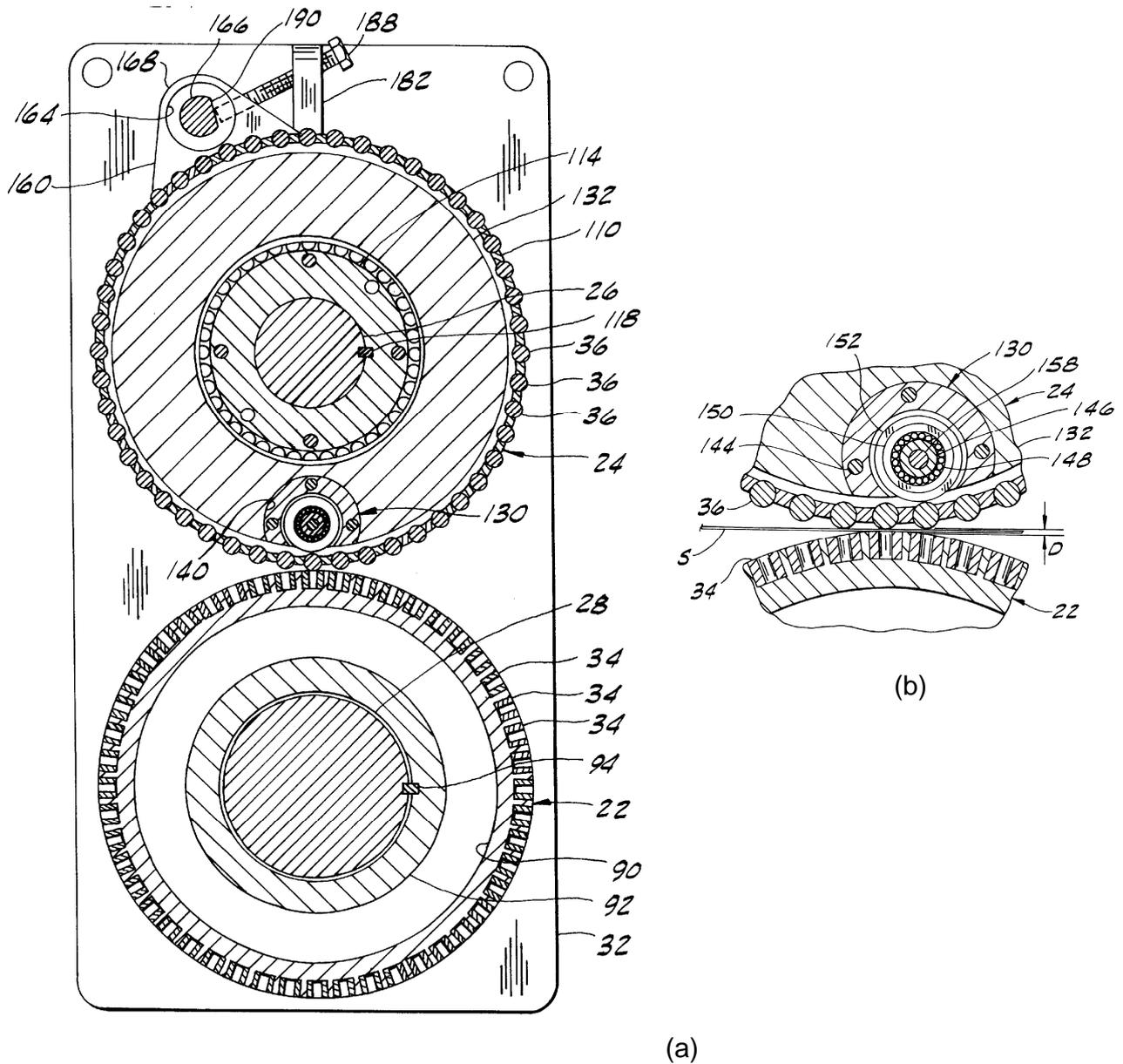


Figura 1.25. Unidad de punzonado rotatorio: (a) Sistema, (b) detalle de punzonado

Fuente: Patente US-005937719A

WO 2009058175 (A1) (2009) (Patente internacional) / *Proceso de perforado continuo para una chapa de ventilación* (figura 1.26): El proceso de perforación se realiza con punzones puntiagudos que generan una deformación plástica sobre la chapa cuando el rodillo gira, por lo que no se produce material de desecho. El proceso es rápido y de manera continua, lo que produce un ahorro de tiempo, en comparación con los métodos convencionales, muy elevado. Estas láminas son utilizadas para las puertas de los garajes (Santamaría), y las láminas son luego conformadas para darles rigidez.

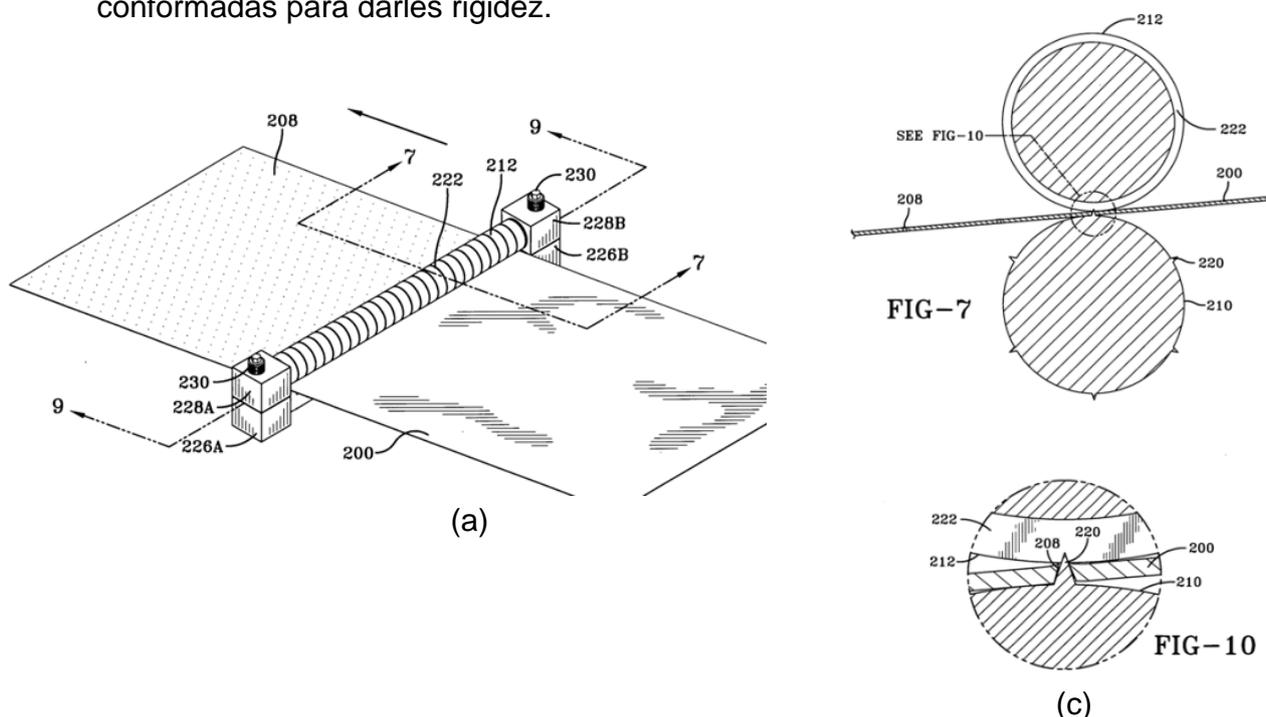


Figura 1.26. Unidad de punzonado rotatorio: (a) sistema, (b) sección transversal de los rodillos, (c) detalle del punzonado

Fuente: Patente WO 2009058175 (A1)

Análisis:

El proceso absorbe energía por la deformación plástica de la lámina. No hay material de desecho, por lo que la lámina sigue con el mismo peso que tenía antes de ser perforada. La perforación inicia con el punzón a cierto ángulo con respecto a la chapa, lo que genera un vector fuerza que trata al punzón como una viga en voladizo y lo deteriora con mayor velocidad. Mientras menor sea el diámetro que

posea el rodillo que porta al punzón, mayor será la fuerza que tratará al punzón como viga.

Es un sistema que solo puede ser aplicado a agujeros de muy pequeño diámetro. Además fueron revisadas las siguientes patentes, las cuales también tienen relación directa con el sistema planteado, pero muchas no fueron colocadas por tener una gran similitud con las patentes ya expuestas:

1. **RO 122188** (B1) (2009) (Rumania) / Mecanismo de punzonado continuo.
2. **E97108834** (2000) (Europa) / Dispositivo para la perforación de chapas.
3. **W9700241CA** (2000) (Europa) / Aparato de estampación giratoria.
4. **US 7066066 B2** (2006) (USA) / Aparato y método de punzonado de agujero continuo con rotación.
5. **4561336** (1985) (USA) / Corte rotatorio.
6. **1180102** (1916) (USA) / Máquina de perforación.
7. **4273015** (1981) (USA) / Perforadora cabeza de cúpula.
8. **3965786** (1976) (USA) / Rotary die cutter.
9. **4499802** (1985) (USA) / Rotary cutting die with scrap ejection.
10. **3749626** (1973) (USA) / Rotary die apparatus and process for manufacturing labels or the like.
11. **4846774** (1989) (USA) / Rotary die cutting and laminating process and machine.
12. **3119312** (1964) (USA) / Rotary die cutting apparatus and method.
13. **4205596** (1980) (USA) / Rotary die cutting device.
14. **4063493** (1977) (USA) / Rotary die cutting machine.
15. **5286317** (1994) (USA) / Rotary die cutting mechanism.
16. **3981213** (1976) (USA) / Rotary sheet material cutter and creaser.
17. **3805657** (1974) (USA) / Steel rules rotary die and method of making same.
18. **4073208** (1978) (USA) / Anvil Structure for rotary die cutting apparatus.
19. **4073207** (1978) (USA) / Luck for rotary die cutting blanket.
20. **4867024** (1989) (USA) / Locking rotary die cutting cover.

21. US 6263819B1 (2001) (USA) / Method and apparatus for die cutting and making laminate articles.

1.14. Conclusiones parciales:

1. El uso de prensas mecánicas para punzonado, en las máquinas perfiladoras, crea problemas de características constructivas y tecnológicas en las líneas de perfilado complejo.
2. Las prensas hidráulicas requieren de mayor energía que las mecánicas para producir un punzonado y se desplazan a velocidades más bajas, por lo que son menos recomendadas para acoplarlas a las líneas de perfilado.
3. Se encontró que las empresas del mercado construyen sólo dos sistemas para perforado rotatorio, desarrollados por USA y Alemania.
4. En base a las empresas y patentes encontradas, que estudian y diseñan sistemas de perforado continuo, se puede decir que no se encontró un diseño igual o similar al propuesto.
5. Los sistemas construidos presentan punzones de muy pequeños diámetros, con respecto al tamaño de los rodillos, por lo que ocupan un gran volumen y obviamente gran peso para el perforado que son capaces de hacer.

2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE PERFORADO CONTINUO.

La mayoría de los sistemas de perforado continuo, mostrados por las patentes y las principales empresas del mundo, basan sus diseños en un mecanismo de perforado conformado por un par de rodillos que giran en sentido opuesto y a la misma velocidad, un punzón y una matriz que se encuentran fijos a los rodillos y un par de columnas que sirven de sostén al mecanismo. Su diseño está basado en la industria del papel y está dirigido al perforado de láminas embobinadas de pequeño espesor. En estos sistemas el punzón entra en la matriz de manera angular y de forma progresiva, por lo que disminuye la carga del perforado con respecto al sistema convencional. Son sistemas parásitos que se acoplan a los trenes de laminación y adquieren la velocidad que demande el perfilado, manteniendo siempre el mismo paso entre agujeros. Actualmente se conocen dos modalidades fabricadas sólo por USA y Alemania. Hay presentes otros sistemas pero se derivan de los mecanismos desarrollados por estos dos países.

2.1. Sistema construido por empresas de Estados Unidos.

Los sistemas diseñados por USA están provistos de un par de rodillos que poseen el mismo diámetro, el porta punzón y el porta matriz. Los mismos están separados a una ligera distancia que permite el paso de la lámina a punzonar. Esta distancia debe ser menor al espesor de la lámina para que los rodillos generen una presión que produzca una fuerza de arrastre capaz de desplazarla, a la vez que es punzonada.

El rodillo superior que porta al punzón puede desplazarse verticalmente con ayuda de dos tornillos sin fin que se encuentran inmersos en sendas columnas. Cada tornillo sin fin gira libremente cuando se acciona un volante que está acoplado directamente al mismo y ubicado en la parte superior de cada columna. El rodillo porta punzón se acopla a las columnas a través de un par de tuercas ubicadas a cada lado del mismo. Cada tuerca es capaz de desplazarse verticalmente cuando los tornillos inmersos en las columnas son movidos por los volantes. Este sistema permite distanciar un rodillo del otro para punzonar diferentes espesores de

lámina. En el volante se coloca un nonio que permite visualizar el desplazamiento que sufre el rodillo.

Para visualizar el sistema desarrollado por USA y analizar las variables que intervienen en el mismo durante su movimiento, se esquematizaron los elementos implicados en el sistema. El análisis de estas variables permite conocer la relación de las mismas con el espacio existente entre el punzón y la matriz, al inicio de la penetración. La variación de los valores numéricos en esta relación muestra la posible dependencia entre las variables y el claro. Este espacio entre punzón y matriz o claro debe encontrarse entre el 4 y el 8% del espesor de la chapa para que se genere un buen punzonado. Si el claro está fuera de este rango la fuerza necesaria para el punzonado se acrecienta, ya que las grietas generadas a ambos lados de la pieza no se encuentran en un punto común. (figura 2.1).

El punzón de este tipo de sistema penetra en la matriz de manera angular originando dificultades en el tamaño del claro que se traducen en un deterioro prematuro del punzón y de la matriz.

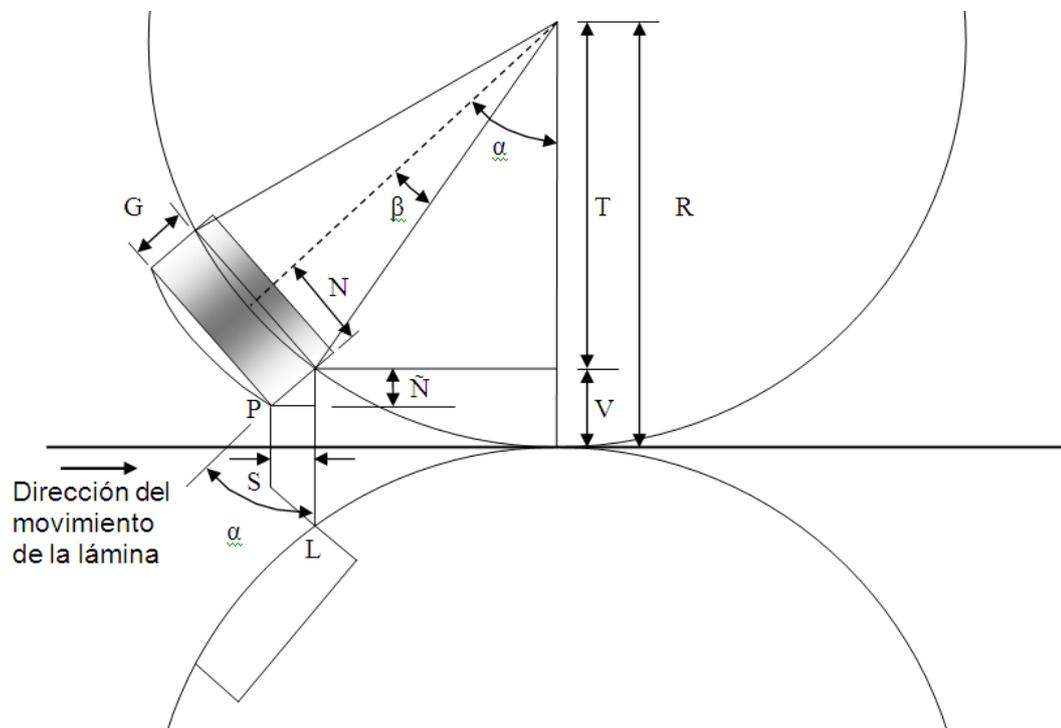


Figura 2.1. Representación de las variables para estudiar el sistema

Para este análisis la lámina se colocará horizontal o perpendicular a la línea que une los ejes de los rodillos y será arrastrada por los rodillos, por lo que éstos tendrán constante contacto con la lámina y una ligera presión para que se genere el arrastre necesario, acorde a lo mencionado.

Tabla 2.1. Variables, datos y puntos de ubicación para el sistema de punzonado

	β : ángulo que ocupa el punzón en el rodillo (Dato)
G: altura del punzón (Dato)	P: punto más bajo del punzón (Ubicación)
N: Radio del punzón (Dato)	L: punto más alto de la matriz (Ubicación)
R: Radio del rodillo (Dato)	S: claro entre punzón y matriz (Variable)
\tilde{N} : componente vertical de la altura del punzón (Variable)	α : ángulo en el que el punzón se desplaza con respecto a una vertical (Variable)
V: distancia entre el punto más bajo de la intercepción entre punzón y rodillo y la lámina (Variable)	T: distancia entre centro de rodillo y el punto más bajo de la intercepción entre punzón y rodillo (Variable)

Las únicas variables en el sistema serán “ α ”, S, \tilde{N} , V y T; los demás valores serán datos y puntos de ubicación. Los tres datos principales son N, R y G, el resto dependen de estos tres. Los datos se colocan, al igual que las variables, con letras para darle diferentes dimensiones al sistema, comparar las respuestas obtenidas y verificar la funcionalidad del sistema bajo diferentes condiciones.

2.1.1. Determinación de “ α_1 ” cuando el punzón toca la chapa.

Se determinará el valor de “ α_1 ” para el momento en el que el punto “P” del punzón toca la chapa, para poder establecer el valor de “ \tilde{N} ” en ese instante, el cual se llamará “ \tilde{N}_1 ”. De igual forma se calculará “ α_2 ” para el momento en el que el punto “P” y el punto “L” se encuentren en la misma línea horizontal; este valor de “ α_2 ” se utilizará para determinar lo que se llamará “ \tilde{N}_2 ” y para determinar “S₂” que será el claro entre punzón y matriz. El valor del claro dirá, apoyándose en datos experimentales, si el corte que inicia el punzón es aceptable, mientras que la diferencia entre “ \tilde{N}_1 ” y “ \tilde{N}_2 ” dará la deformación que sufre la chapa antes de generarse el punzonado.

El punto “P” del punzón toca la chapa cuando “Ñ” se iguala con “V”, es decir:

$\tilde{N} = V$; Igualdad 1 (sólo cuando “P” toca la chapa); para este caso “ α ” se llamará “ α_1 ”.

$$\cos \alpha_1 = \frac{\tilde{N}_1}{G} \Rightarrow \tilde{N}_1 = G \cdot \cos \alpha_1 ; \quad (1)$$

$$\cos(\alpha_1 - \beta) = \frac{T}{R} \Rightarrow T = R \cdot \cos(\alpha_1 - \beta) ; \quad (2)$$

$$V = R - T ; \quad (3)$$

Sust. ecu. 2 \Rightarrow ecu. 3 tenemos:

$$V = R - R \cdot \cos(\alpha_1 - \beta) \Rightarrow V = R(1 - \cos(\alpha_1 - \beta)) ; \quad (4)$$

Sust. ecu. 4 y ecu. 1 $\Rightarrow \tilde{N}=V$, tenemos:

$$G \cdot \cos \alpha_1 = R(1 - \cos(\alpha_1 - \beta)) ; \quad (5)$$

$$\text{De igual forma: } \text{sen} \beta = \frac{N}{R} ; \quad (6)$$

por lo tanto β queda definida

En la ecuación 5 la única incógnita es “ α ”, y con “ α ” se podrá determinar “ \tilde{N}_1 ”, pero “ α ” no es despejable en esa ecuación. La misma puede expresarse de la siguiente forma:

$$\cos \alpha_1 - \frac{R}{G} (1 - \cos(\alpha_1 - \beta)) = 0 ; \quad (7)$$

Esta ecuación es reconocida como una ecuación no lineal, donde para encontrar la raíz se debe aplicar un algoritmo general para ecuaciones de una variable. Los siguientes métodos son para calcular las raíces reales de una ecuación dada por $f(x) = 0$, donde se exige al menos que la función f sea una función continua para garantizar la existencia de solución: bisección, Newton, secante y falsa posición.

Es de hacer notar que esta ecuación se puede resolver con diferentes tipos de software presentes en el mercado, pero uno de los de mayor aplicación por su reconocimiento a nivel científico es el matlab. Por ello se utilizó esta versátil herramienta matemática para la solución del sistema planteado, a objeto de obtener “ α ” en base a diferentes valores de R , G y N .

Al sustituir la ecuación 6 en la ecuación 7 y despejar α_1 del $\cos \alpha$ se obtendrá:

$$\alpha_1 = \text{arc} \cos \left\{ \frac{R}{G} \left(1 - \cos \left(\alpha_1 - \text{arc} \text{sen} \frac{N}{R} \right) \right) \right\} \quad (8)$$

rápidamente; pero la limitada longitud del punzón le resta tiempo de vida, por reducirse el número de rectificaciones.

En este caso “ α ” se denominará “ α_2 ”, para los diferentes valores de N, R y G.

El punto “P” del punzón coincide con el punto “L” cuando:

$\tilde{N} = 2.V$; Igualdad 2 (Sólo cuando “P” coincide con “L” en una línea horizontal)

Utilizando el mismo razonamiento que en el caso anterior, tenemos:

$$\cos\alpha_2 - \frac{2.R}{G}(1 - \cos(\alpha_2 - \beta)) = 0; \quad (10)$$

La ecuación 10 es una ecuación lineal que permite expresar los valores de “ α_2 ” necesarios para encontrar tanto el claro entre el punzón y la matriz como el valor de “ \tilde{N}_2 ”, el cual es indispensable para determinar la deformación de la chapa.

Los valores de “ α_2 ” se producirán con ayuda del software matlab. Analizando el esquema se puede obtener que:

$$S_2 = G.\text{sen}\alpha_2 ; \quad (11)$$

Sust. ecu. 6 en ecu. 8 y despejando “ α_2 ”, en uno de los lados de la ecuación tenemos:

$$\alpha_2 = \text{arc cos} \left\{ \frac{2.R}{G} \cdot \left(1 - \cos \left(\alpha_2 - \text{arc sen} \left(\frac{N}{R} \right) \right) \right) \right\}; \quad (12)$$

Esta ecuación fue utilizada para generar el esquema necesario para la obtención de “ α_2 ” en matlab (figura 2.3).

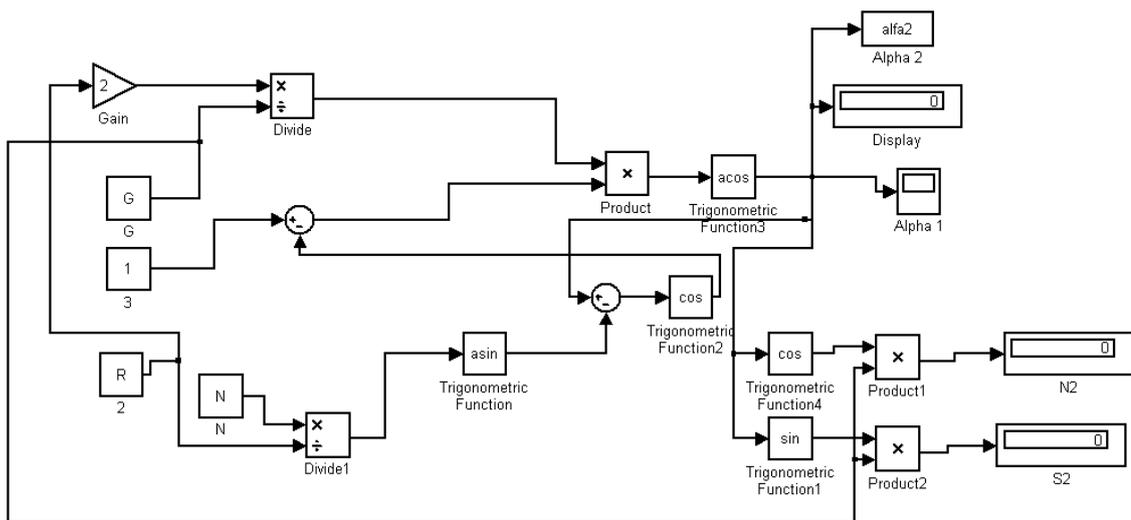


Figura 2.3. Esquematización de la ecuación 12 para su solución (matlab)

Es factible aplicar diseño experimental al estudio de las variables, pero todo el proceso creado se puede desarrollar de manera digital. El diseño experimental está planteado para dar respuestas confiables con un número mínimo de ensayos, a objeto de ahorrar costos; pero aquí se pueden estudiar un sin número de datos creando un mallado lo más extenso posible para visualizar y analizar la mayor cantidad de respuestas y variables.

2.1.3. Expresión de valores en el matlab para $G = 6,1667$ mm; $N = 2,5$ mm y con diferentes valores de R.

La teoría indica que es suficiente con que el punzón penetre 1/3 del espesor de la chapa para que la separación de la lámina se genere. El modelo formado tiene en principio como objetivo punzonar una lámina de 0,5 mm de espesor; de allí que la longitud mínima necesaria del punzón sea de 0,1667 mm. Para iniciar los cálculos se fijaron las variables G y N, asignándoles valores de 6,1667 mm de longitud y 2,5 mm de diámetro al punzón. Comúnmente la longitud de los punzones en las matrices excede 6 mm de lo necesario para aumentar su tiempo de vida; si tomamos en cuenta la longitud mínima necesaria del punzón y su tiempo de vida se puede partir del valor inicial de 6,1667 mm de longitud para su estudio. Así mismo, se le asignó un valor en extremo pequeño al diámetro del punzón, a objeto de estudiar su relación con el resto de las variables e ir aumentando progresivamente su valor en otro mallado, hasta encontrar su valor idóneo.

Tabla 2.2. Valores obtenidos con la aplicación del matlab

R (mm)	N (mm)	L (mm)	β (rad)	G (mm)	α_1 (rad)	α_1 (grad)	S ₁ (mm)	\tilde{N}_1 (mm)	α_1 (rad)	α_2 (grad)	S ₂ (mm)	\tilde{N}_2 (mm)	$\tilde{N}_2 - \tilde{N}_1$ (mm)
50	2,5	0,229	0,050	6,1667	0,517	29,64	3,050	5,360	0,389	22,31	2,341	5,705	0,3452
100	2,5	0,198	0,025	6,1667	0,366	20,97	2,207	5,758	0,269	15,44	1,641	5,944	0,1860
150	2,5	0,188	0,017	6,1667	0,298	17,07	1,811	5,895	0,217	12,46	1,330	6,022	0,1266
200	2,5	0,182	0,013	6,1667	0,257	14,74	1,569	5,964	0,187	10,70	1,145	6,059	0,0957
250	2,5	0,179	0,010	6,1667	0,230	13,16	1,403	6,005	0,166	9,52	1,020	6,082	0,0770
300	2,5	0,177	0,008	6,1667	0,209	11,99	1,281	6,032	0,151	8,65	0,928	6,097	0,0643
350	2,5	0,176	0,007	6,1667	0,193	11,08	1,185	6,052	0,139	7,98	0,856	6,107	0,0552
400	2,5	0,175	0,006	6,1667	0,181	10,35	1,108	6,066	0,130	7,45	0,799	6,115	0,0483
450	2,5	0,174	0,006	6,1667	0,170	9,75	1,044	6,078	0,122	7,00	0,752	6,121	0,0430
500	2,5	0,173	0,005	6,1667	0,161	9,24	0,990	6,087	0,116	6,63	0,712	6,125	0,0387
550	2,5	0,172	0,005	6,1667	0,154	8,79	0,943	6,094	0,110	6,31	0,678	6,129	0,0351
600	2,5	0,172	0,004	6,1667	0,147	8,42	0,903	6,100	0,105	6,03	0,648	6,133	0,0323
650	2,5	0,172	0,004	6,1667	0,141	8,08	0,867	6,106	0,101	5,79	0,622	6,135	0,0298
700	2,5	0,171	0,004	6,1667	0,136	7,78	0,835	6,110	0,097	5,57	0,598	6,138	0,0277

A la tercera variable "R" se le asignaron valores entre 50 y 700 mm de radio con un salto de 50 en 50 mm. Con estos valores se analizaron rodillos desde un mínimo de 10 cm hasta un máximo de 1,4 m de diámetro (Tabla 2.2).

Análisis

"S₂" es el claro que hay entre el punzón y la matriz justo en el momento en el que el punzón está a punto de penetrar. Como ya se mencionó, la teoría indica que los claros típicos en el punzonado convencional fluctúan entre 4 y 8% del espesor de la lámina metálica. Si la lámina a punzonar tiene un espesor de 1 mm, el claro deberá estar entre 0,04 y 0,08 mm, por lo tanto ninguno de los valores expresados en esta tabla satisfacen la condición arriba expuesta, la misma teoría indica que estos valores son para corte, para punzonado es 1%, pero se utilizaron los de corte para comparar los sistemas con estos resultados. Sólo se podría utilizar para chapas cuyo espesor sea superior a los 7,5 mm, tomando en cuenta el máximo claro que soporta este espesor. Es oportuno recordar que las bobinas utilizadas en este tipo de sistema son laminadas en frío y poseen espesores de 0,3 a 2 mm. Las bobinas laminadas en caliente poseen espesores de 1,8 a 9,5 mm.

La diferencia entre "Ñ₂" y "Ñ₁" muestra la deformación que sufre la chapa antes de iniciar la fase de punzonado, si se mantiene horizontal durante el proceso. Para evitar esta deformación los sistemas desarrollados por USA tienen rodillos de menores dimensiones a la entrada y salida del sistema, a objeto de forzar la chapa a que adquiera la forma de curvatura del rodillo de la matriz, evitando que el punzón empuje la chapa antes de iniciar el punzonado; así mismo, el rodillo ubicado a la salida curva la lámina para prevenir que el punzón se trabe en la chapa durante su retracción.

Los sistemas desarrollados por Alemania, para evitar la deformación que genera el punzón a la entrada y salida del proceso de perforado, utilizan piezas de acero situadas a los lados del rodillo matriz, con ranuras que sirven de guía a la lámina forzandola a que adquieran la forma de la curvatura del rodillo. Es un sistema que ofrece mayor resistencia al paso de la lámina pero es menos robusto y costoso que el fabricado por USA.

Los valores de la tabla muestran que al aumentar el radio de los rodillos (R) el claro (S₂) disminuye progresivamente, de lo cual se podría concluir que la solución del problema del claro está en el aumento del tamaño de los rodillos, pero 700 mm

implica un rodillo de 1,4 m de diámetro; al tomar en cuenta que son dos los rodillos, éstos además del gran peso ocuparían 2,8 m de altura.

Ante esta situación se puede pensar en cambiar otra de las variables para estudiar el efecto que ésta genera sobre el claro (S_2).

2.1.4. Expresión de valores en el matlab para $G = 6,1667$ mm; $N = 5$ mm y con diferentes valores de R.

El punzón ya posee un diámetro de dimensiones muy pequeñas, por lo que se considera inviable disminuir aún más este valor; sin embargo se puede acrecentar para verificar si la ecuación da como resultado una disminución en el claro (S_2), originando con ello un cambio positivo. Para iniciar este cambio de variable se aumentó el radio del punzón (N) a 5 mm, arrojando como resultado: (Tabla 2.3)

Tabla 2.3. Valores obtenidos con la aplicación del matlab

R (mm)	N (mm)	L (mm)	β (rad)	G (mm)	α_1 (rad)	α_1 (grad)	S_1 (mm)	\tilde{N}_1 (mm)	α_2 (rad)	α_2 (grad)	S_2 (mm)	\tilde{N}_2 (mm)	$\tilde{N}_2 - \tilde{N}_1$ (mm)
150	5	0,250	0,033	6,1667	0,314	17,99	1,904	5,865	0,234	13,39	1,428	5,999	0,1338
200	5	0,229	0,025	6,1667	0,269	15,44	1,641	5,944	0,199	11,41	1,220	6,045	0,1007
250	5	0,217	0,020	6,1667	0,239	13,71	1,462	5,991	0,176	10,08	1,080	6,071	0,0806
300	5	0,208	0,017	6,1667	0,217	12,45	1,330	6,022	0,159	9,12	0,978	6,089	0,0671
350	5	0,202	0,014	6,1667	0,200	11,48	1,227	6,043	0,146	8,39	0,900	6,101	0,0574
400	5	0,198	0,013	6,1667	0,187	10,70	1,145	6,059	0,136	7,80	0,837	6,110	0,0502
450	5	0,194	0,011	6,1667	0,176	10,06	1,077	6,072	0,128	7,32	0,786	6,116	0,0445
500	5	0,192	0,010	6,1667	0,166	9,52	1,020	6,082	0,121	6,92	0,743	6,122	0,0400
550	5	0,189	0,009	6,1667	0,158	9,06	0,971	6,090	0,115	6,57	0,706	6,126	0,0363
600	5	0,188	0,008	6,1667	0,151	8,65	0,928	6,097	0,109	6,27	0,674	6,130	0,0333
650	5	0,186	0,008	6,1667	0,145	8,30	0,890	6,102	0,105	6,01	0,645	6,133	0,0307
700	5	0,185	0,007	6,1667	0,139	7,98	0,856	6,107	0,101	5,78	0,621	6,135	0,0285

Análisis:

La variación de valores (S_2) de la tabla 2.3 muestra un claro (S_2) aún de mayores dimensiones que el generado en la tabla 2.2 para los mismos diámetros de rodillo. Analizando estos resultados se puede observar que el mínimo espesor de chapa que puede ser punzonada es de 8 mm, con un rodillo de 1,4 m. Este resultado indica que un aumento en el diámetro del punzón perjudica el perforado de este tipo de sistemas, por lo que para obtener el mismo claro (S_2), bajo las mismas

condiciones, debe aumentarse la dimensión del rodillo porta punzón más de 1,4m, aumento éste por demás absurdo, ya que el sistema sería demasiado voluminoso y pesado.

2.1.5. Expresión de valores en el matlab para $G = 4,1667$ mm; $N = 5$ mm y con diferentes valores de R.

Si se mantienen iguales las dimensiones del radio del punzón (N) de la tabla 2.3, la variación de valores en los diámetros de los rodillos (R) y acortamos en 2 mm la longitud del punzón (G), se obtendrá la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores obtenidos con la aplicación del matlab

R (mm)	N (mm)	L (mm)	β (mm)	G (mm)	α_1 (rad)	α_1 (grad)	S_1 (mm)	\tilde{N}_1 (mm)	α_2 (rad)	α_2 (grad)	S_2 (mm)	\tilde{N}_2 (mm)	$\tilde{N}_2 - \tilde{N}_1$ (mm)
150	5	0,250	0,033	4,1667	0,265	15,21	1,093	4,021	0,199	11,38	0,822	4,085	0,0640
200	5	0,229	0,025	4,1667	0,227	13,00	0,937	4,060	0,168	9,65	0,699	4,108	0,0478
250	5	0,217	0,020	4,1667	0,201	11,52	0,832	4,083	0,148	8,51	0,616	4,121	0,0380
300	5	0,208	0,017	4,1667	0,182	10,44	0,755	4,098	0,134	7,68	0,557	4,129	0,0315
350	5	0,202	0,014	4,1667	0,168	9,61	0,695	4,108	0,123	7,05	0,511	4,135	0,0269
400	5	0,198	0,013	4,1667	0,156	8,94	0,648	4,116	0,114	6,55	0,475	4,140	0,0235
450	5	0,194	0,011	4,1667	0,147	8,40	0,609	4,122	0,107	6,14	0,445	4,143	0,0208
500	5	0,192	0,010	4,1667	0,139	7,94	0,576	4,127	0,101	5,79	0,420	4,145	0,0187
550	5	0,189	0,009	4,1667	0,132	7,55	0,547	4,131	0,096	5,50	0,399	4,148	0,0169
600	5	0,188	0,008	4,1667	0,126	7,21	0,523	4,134	0,092	5,24	0,381	4,149	0,0155
650	5	0,186	0,008	4,1667	0,121	6,91	0,501	4,136	0,088	5,02	0,365	4,151	0,0143
700	5	0,185	0,007	4,1667	0,116	6,64	0,482	4,139	0,084	4,82	0,350	4,152	0,0132

Análisis:

La disminución de la longitud del punzón (G) reduce en más del 40% el claro (S_2) en el rodillo de 700 mm de radio, lo que significa que el mismo sistema, pero con un punzón dos milímetros más corto, es capaz de punzonar una lámina desde 4,5 mm de espesor sin inconvenientes. Sin embargo, como los punzonados de estos sistemas están dirigidos hacia las chapas laminadas en frío, cuyo espesor es menor a los dos milímetros, todavía no se cumple con el sistema requerido y menos aún porque éste, que es capaz de punzonar la lámina de 4,5 mm de espesor, posee dimensiones muy grandes.

2.1.6. Análisis de datos en diagrama

La tabla 2.4 y la tabla 2.3 presentan los resultados del claro del punzón para diferentes radios de rodillo con longitudes de punzón de 6,1667 y 4,1667 mm. Los resultados de las mismas indicaban que la disminución de la longitud del punzón produce cambios muy representativos en el claro (S_2). De allí que para los mismos valores de diámetros de rodillos y diámetro de punzón se generaron tablas con longitudes de punzón de 2,1667 y 0,6667 mm. N, R y G se expresaron en función del claro para visualizar los cambios que generan sus variaciones sobre el sistema.

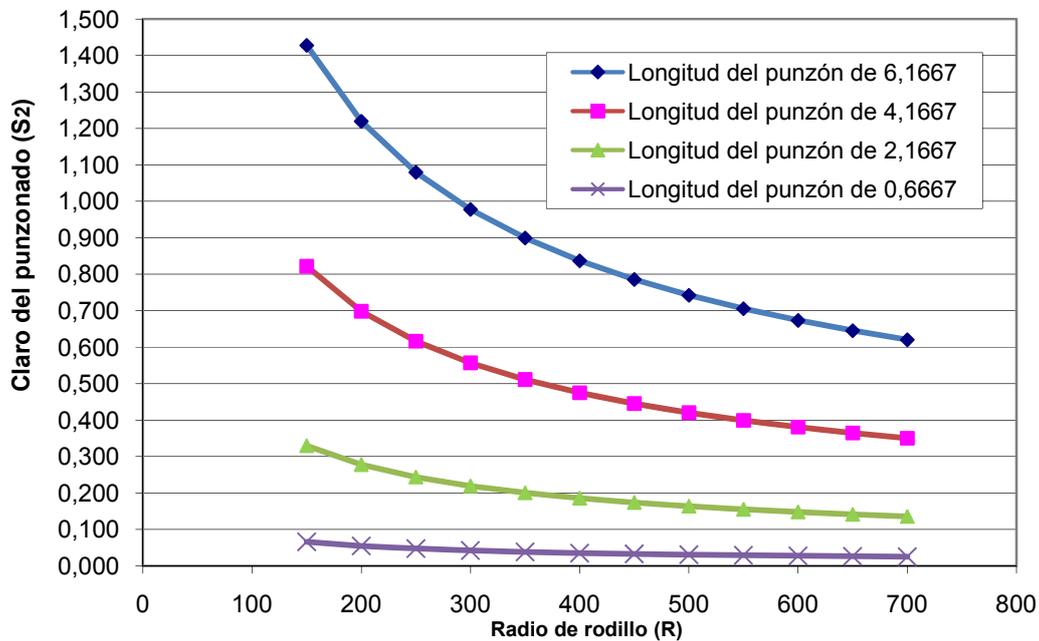


Figura 2.4. Diagrama de claro de punzonado vs radio de rodillo para varias longitudes de punzón con N=5, obtenidos de las tablas 2.3, 2.4 y anexos

Análisis:

En la figura 2.4 se puede observar como la longitud del punzón afecta tanto al claro del punzonado, a medida que se disminuye la longitud disminuye el claro. De hecho para el mismo radio de rodillo de 700 mm al disminuir la longitud del punzón de 4,1667 a 2,1667 mm, disminuye el claro en más del 60%. De hecho al analizar el resultado de esta tabla (Anexo1) con el mismo rodillo se puede punzonar una lámina de 2 mm de espesor. Pero la lámina de 1,5 mm no puede ser punzonada

sin problemas. Habría que disminuir más la longitud del punzón. Esto explica la razón por la que el sistema de USA posee punzones de tan corta longitud y con punzones de tan pequeño diámetro, ya que como se pudo observar en las tablas anteriores al aumentar el diámetro del punzón, disminuye el claro del perforado, esta limitación acorta la vida del sistema y limita el uso de este sistema a perforados de pequeñas dimensiones.

Estos sistemas son diseñados colocando el punzón de modo que forme parte directa del rodillo, dando por hecho que su ciclo de vida es corto y que será simplemente desechado cuando cumpla con los punzonados.

2.1.7. Dimensiones de los sistemas que pueden punzonar sin daños a la chapa, ni deterioro rápido de punzón y matriz.

El análisis de varias tablas creadas en matlab para diferentes valores de diámetros de rodillos, así como diferentes longitudes y diámetros de punzón, facilitó la elaboración de una cuadro donde se indican las dimensiones mínimas que debe tener un sistema de punzonado continuo para perforar chapas laminadas en frío de diferentes espesores, sin generar daños a la lámina ni deterioro rápido al punzón y matriz (tabla 2.5).

Tabla 2.5. Valores resumidos obtenidos con la aplicación del matlab

e (mm)	S ₂ = 8% (mm)	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=	G(mm)=
		2,1667	1,1667	0,6667	2,1667	1,1667	0,667	2,1667	1,1667	0,6667	2,1667	1,1667	0,6667
		N=2,5 mm	N=2,5 mm	N=2,5 mm	N=5 mm	N=5 mm	N=5 mm	N=10 mm	N=10 mm	N=10 mm	N=20 mm	N=20 mm	N=20 mm
0,3	0,024			≥650									
0,5	0,040			≥250			≥300				≥450		
1	0,080		≥300	≥100			≥150				≥200		≥300
1,5	0,120		≥150	≥50		≥200	≥150		≥250	≥150		≥400	≥200
2	0,160	≥450	≥100	≥50	≥500	≥150	≥150	≥600	≥200	≥50		≥300	≥150

Análisis:

Esta tabla permite una visión global de las medidas que debe tener un sistema de punzonado continuo para generar un perforado con un claro que entra dentro del rango de los valor de claros entre los 4 y 8%, para generar un buen claro, tomando

en cuenta los espesores de chapa que hay en el mercado, para chapas laminadas en frío, con punzones que oscilan entre 2,5 y 30 mm de radio, longitudes que van desde 6,1667 hasta 0,6667 mm y rodillos con radios entre 50 a 150 mm. Los punzones con longitudes mayores a 2,1667 mm no se expresan en esta tabla por no tener capacidad para punzonar ninguna chapa bajo los límites establecidos.

En caso de que se deseen obtener agujeros de 10 mm de diámetro a un paso fijo en una bobina de 1 mm de espesor, el sistema a utilizar debe tener un punzón con una longitud máxima de 0,6667 mm y un rodillo mayor o igual a 200 mm de diámetro, en cuyo caso, el claro generado con un valor de 0,08 mm será máximo, evitando que se produzca una fuerza excesiva, un producto imperfecto y el deterioro de los elementos del sistema. Todos los valores de la tabla se basan en el claro máximo necesario para generar un punzonado sin originar una fuerza excesiva al inicio del corte.

Los valores de la tabla expresan las limitaciones del sistema USA, exige que los punzones sean de muy poca longitud, el diámetro de los rodillos de dimensiones muy exageradas, que el perforado se realice a un paso único y punzona espesores limitados de chapa.

2.2. Sistema construido por empresas alemanas.

El sistema generado por Alemania está formado por un par de rodillos de diferente diámetro, separados por una distancia mucho mayor al espesor de la lámina que transitará por entre los mismos. El mecanismo no posee prensa chapa, pero ésta se mantiene en posición, para ser perforada, porque los punzones antes de punzonar sostienen y arrastran la chapa. A objeto de mantener la lámina adherida al rodillo matriz durante su desplazamiento, el sistema posee una gran cantidad de punzones que actuando como dedos arrastran y punzonan la lámina, figuras 1.19 y 1.20. Sin embargo, tiene la ventaja de que puede perforar láminas de diferente espesor, sin necesidad de unir o separar los rodillos, pero el paso entre los agujeros debe ser pequeño para que los punzones puedan arrastrar y sostener la lámina, mientras en otra zona la misma es perforada.

Para visualizar el sistema desarrollado por Alemania y analizar las variables que intervienen en el mismo durante su movimiento, se esquematizaron los elementos implicados en el sistema. El análisis de estas variables permite conocer la relación de las mismas con el espacio existente entre el punzón y la matriz, al inicio de la penetración. La variación de los valores numéricos en esta relación muestra la posible dependencia entre las variables y el claro. Este espacio entre punzón y matriz o claro debe encontrarse entre el 4 y el 8% del espesor de la chapa para que se genere un buen punzonado. Si el claro está fuera de este rango la fuerza necesaria para el punzonado se acrecienta, ya que las grietas generadas a ambos lados de la pieza no se encuentran en un punto común. (figura 2.5).

El punzón de este tipo de sistema penetra en la matriz de manera angular, igual que en el sistema USA, originando dificultades en el tamaño del claro que se traducen en un deterioro prematuro del punzón y de la matriz.

Para este análisis la lámina se colocará horizontal o perpendicular a la línea que une los ejes de los rodillos y arrastrada por los punzones y el rodillo matriz.

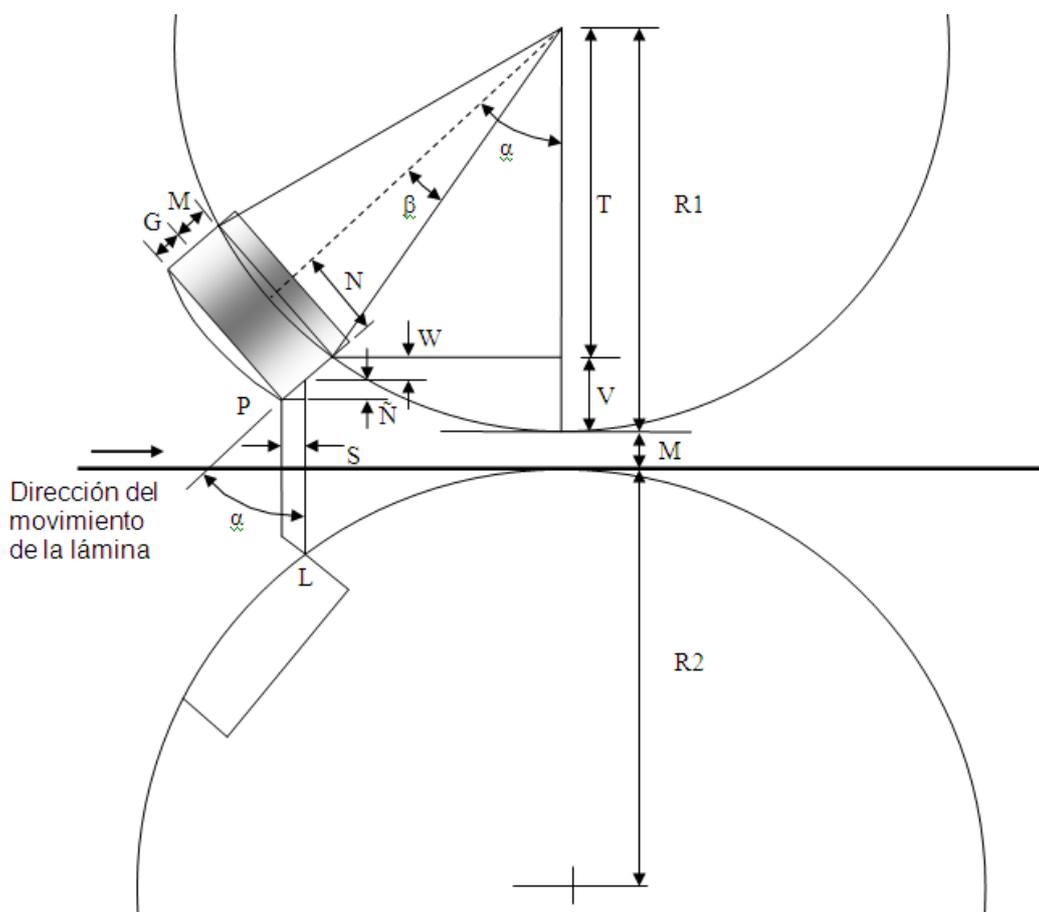


Figura 2.5 Representación de las variables para estudiar el sistema alemán

Tabla 2.6. Variables, datos y puntos de ubicación para el sistema alemán de punzonado continuo

R1: Radio del rodillo 1 (Dato)	β : ángulo que ocupa el punzón en el rodillo (Dato)
N: Radio del punzón (Dato)	L: punto más alto de la matriz (Ubicación)
R2: Radio del rodillo 2 (Dato)	S: claro entre punzón y matriz (Variable)
P: punto más bajo del punzón (Ubicación)	W: Componente vertical de la componente saliente necesaria para completar R2 (Variable)
\tilde{N} : componente vertical de la del punzón (Variable)	α : ángulo en el que el punzón se desplaza con respecto a una vertical (Variable)
M: Longitud necesaria para que sumada a R1 de el radio del rodillo 2 o R2 (Dato)	V: distancia entre el punto más bajo de la intercepción entre punzón y rodillo y el punto mas bajo (Variable)
G: Distancia que el punzón puede penetrar en la matriz (Dato)	T: distancia entre centro de rodillo y el punto más bajo de la intercepción entre punzón y rodillo (Variable)

Las únicas variables en el sistema serán “ α ”, W , S , \tilde{N} , V y T ; los demás valores serán datos y puntos de ubicación. Los tres datos principales son N , R_1 , R_2 y G , el resto dependen de estos tres. Los datos se colocan con letras, al igual que las variables, para darle diferentes dimensiones al sistema, comparar las respuestas obtenidas y verificar la funcionalidad del mecanismo bajo diferentes condiciones.

2.2.1. Determinación de “ α_1 ” cuando el punzón toca la chapa.

Se determinará el valor de “ α_1 ” para el momento en el que el punto “P” del punzón toca la chapa, para poder establecer el valor de “ \tilde{N} ” en ese instante, el cual se llamará “ \tilde{N}_1 ”. De igual forma se calculará “ α_2 ” para el momento en el que el punto “P” y el punto “L” se encuentren en la misma línea horizontal; este valor de “ α_2 ” se utilizará para determinar lo que se llamará “ \tilde{N}_2 ” y para determinar “ S_2 ” que será el claro entre punzón y matriz. El valor del claro dirá, apoyándose en datos experimentales, si el corte que inicia el punzón es aceptable, mientras que la diferencia entre “ \tilde{N}_1 ” y “ \tilde{N}_2 ” dará la deformación que sufre la chapa antes de generarse el punzonado.

Para este caso $R_1 < R_2$

Como puede deducirse del esquema:

$$\text{sen}\beta = \frac{N}{R_1} \Rightarrow \beta = \text{arc sen} \left(\frac{N}{R_1} \right) \quad (13)$$

De igual manera se puede observar que:

$$\text{cos}(\alpha - \beta) = \frac{T}{R_1} \Rightarrow T = R_1 \cdot \text{cos}(\alpha - \beta) \quad (14)$$

El punto “P” del punzón toca la chapa cuando:

$$W + \tilde{N} = V + M \quad (15)$$

Realizando un análisis exhaustivo del esquema podemos obtener también:

$$\text{cos}\alpha = \frac{W}{M} \Rightarrow W = M \cdot \text{cos}\alpha \quad (16)$$

$$\text{cos}\alpha = \frac{\tilde{N}}{G} \Rightarrow \tilde{N} = G \cdot \text{cos}\alpha \quad (17)$$

$$R_1 = T + V \Rightarrow V = R_1 - T \quad (18)$$

$$R_1 + M = R_2 \Rightarrow M = R_2 - R_1 \quad (19)$$

$$\text{Sust. ecu. 14} \Leftrightarrow 18: V = R_1 - R_1 \cdot \text{cos}(\alpha - \beta) \quad (20)$$

$$\text{Sust. ecu. 19} \Leftrightarrow 16: W = (R_1 - R_2) \cdot \text{cos}\alpha \quad (21)$$

Sust. ecu. 21, ecu. 17, ecu. 20 y ecu. 19 \Rightarrow ecu. 15:

$$(R_2 - R_1) \cdot \cos \alpha + G \cdot \cos \alpha = R_1 - R_1 \cdot \cos(\alpha - \beta) + R_2 - R_1 \Rightarrow$$

$$\cos \alpha_1 \cdot (R_2 - R_1 + G) = R_2 - R_1 \cdot \cos(\alpha_1 - \beta) \quad (22)$$

Sust. ecu. 13 \Rightarrow ecu. 22

$$\cos \alpha_1 \cdot (R_2 - R_1 + G) = R_2 - R_1 \cdot \cos \left(\alpha_1 - \arcsen \left(\frac{N}{R_1} \right) \right) \quad (23)$$

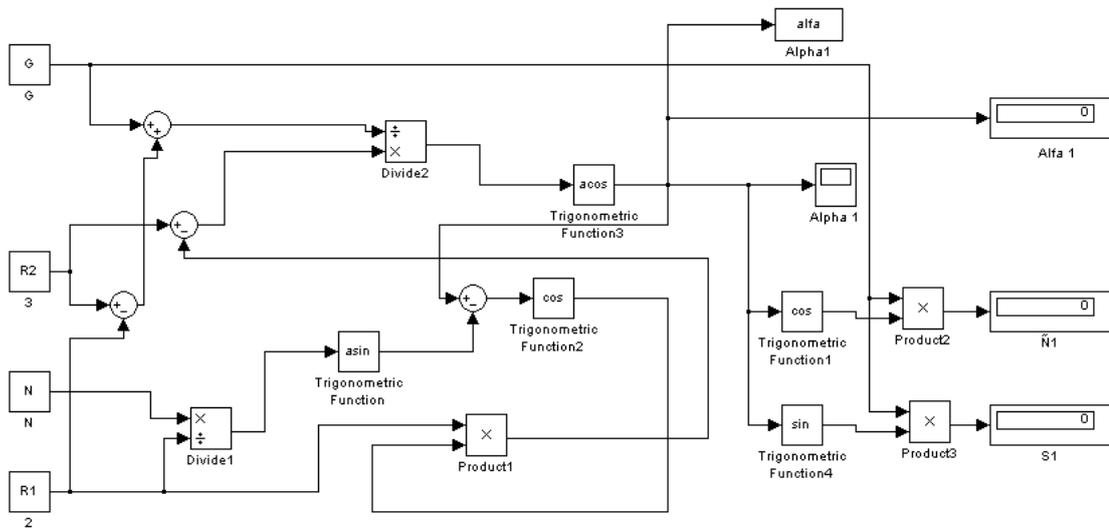


Figura 2.6. Esquemización de la ecuación 23 para su solución (matlab)

2.2.2. Determinación de “ α_2 ” cuando el punto “P” y el punto “L” coinciden en una línea horizontal.

Cuando el punto “P” y el punto “L” coinciden en una línea horizontal el punzón inicia su penetración en la matriz, está distancia horizontal entre estos dos puntos es lo que denominamos el claro. Al igual que en la descripción anterior si el claro excede de los valores obtenidos en forma práctica el material será pellizcado, quedará con una rebaba excesiva y por no poderse encontrar las grietas del material se generará de igual forma una fuerza excesiva, además de que el punzón será sometido a una fuerza de flexión y a la de compresión, por el ángulo de inclinación con el que está iniciando el punzonado con respecto a la matriz. En este caso el daño que puede sufrir el punzón es mayor que en el caso anterior ya que el punzón tiene mayor longitud, de allí que el momento sufrido en el punto de apoyo será más grande. Este tipo de sistema resuelven ese problema colocando

La diferencia básica entre los dos mecanismos estriba en que el rodillo porta punzón alemán tiene menores dimensiones, pero esta diferencia de longitud en el rodillo alemán se complementa con el largo del punzón que no penetra en la matriz, que se ha denominado "M". Esta complementación permite que la velocidad tangencial generada en el diámetro imaginario formado por el diámetro del rodillo porta punzón, aunado a la longitud "M" del punzón, sea igual a la velocidad tangencial generada en el rodillo porta matriz, manteniendo el mismo paso entre la matriz y el punzón. De otra forma, tendrían que girar a velocidades diferentes para poder encontrarse punzón y matriz cada vuelta.

La disminución de radio en el rodillo porta punzón permite que este sistema no requiera de un mecanismo, que lo desplace verticalmente, para poder punzonar diferentes espesores de chapa, ya que la lámina no queda limitada por el espacio entre los rodillos sino prensada por el contacto con los punzones que todavía no la han perforado. Este sistema tiene la ventaja de que permite mayores dimensiones en los rodillos, por no tener un mecanismo elevador que limite la maniobrabilidad del sistema, como el utilizado en las columnas del mecanismo USA. Es decir, en el sistema alemán el rodillo se ubica fijo a las columnas, lo que le da mayor rigidez y disminución del claro por aumento de volumen.

Luego de esquematizar las ecuaciones en matlab y generar tablas, con los mismos valores numéricos producidos en el mecanismo desarrollado por USA, se observó que los resultados del claro son idénticos, considerando que G es igual para ambos sistemas, y que las variables de entrada al sistema alemán no deben ser cuatro, sino tres, que son R_2 , G y N. Lo antes expuesto se basa en que la disminución de R_1 simplemente aumenta la longitud del punzón, por acrecentamiento de "M". El punzón actúa como una viga en voladizo por entrar en la matriz de manera angular, generándose una fuerza que produce un esfuerzo combinado sobre el elemento. Al aumentar el valor de "M" aumenta de flexión en el punzón y por tanto su riesgo de ruptura.

Al disminuir el radio del rodillo se acrecienta el valor de " α_2 ", tal como se observa en las tablas 2.2, 2.3 y 2.4. El valor de " α_2 " está directamente relacionado con la fuerza de flexión que se produce sobre el punzón. La fuerza perpendicular al

rodillo, la cual produce la fuerza de flexión, se acrecienta cuando aumenta el valor de " α_2 ", de aquí que para disminuir la falla del punzón por ruptura por flexión conviene aumentar las dimensiones del rodillo.

Los resultados derivados del análisis de la figura 2.4 son aplicables al sistema alemán.

2.3. Conclusiones parciales:

1. La relación entre los ángulos del sistema y el momento de penetración del punzón en la matriz, de los mecanismos creados por USA y Alemania, demuestra que todo perforado rotatorio, donde el punzón se halle fijo al sistema, genera perforado angular.
2. Todo perforado angular mejora algunas características constructivas y tecnológicas de las punzonadoras intermitentes, pero conlleva a limitaciones de vida en el punzón, dimensionales en el sistema, baja calidad en el perforado, de distancia entre agujeros, de peso, entre otras.
3. La ampliación de dimensiones en longitud y diámetro del punzón, debe venir acompañado de un aumento de diámetro, y por ende peso y costo del rodillo del sistema de perforado rotatorio para mantener la calidad de punzonado y no acortar la vida de la herramienta.

CAPITULO 3. DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUNZONADO VERTICAL ROTATORIO

Los sistemas de punzonado que se fabrican actualmente en las empresas, a nivel mundial, tienen problemas para producir piezas en masa. Las punzonadoras intermitentes de baja velocidad son las más usadas por la industria, pero requieren de muchos utensilios para poder acoplarse a una máquina de perfilado, o tienen problemas con el paso cuando el perfilado adquiere mucha velocidad. Las máquinas de punzonado continuo son ideales en estos casos porque no requieren del uso de gran cantidad de elementos y además mantienen el paso de perforado, así la máquina de perfilado adquiera alta velocidad.

Estos problemas condujeron a la aplicación, basándose en sistemas de punzonado rotatorio, de herramientas de creatividad con miras a encontrar la posibilidad de una solución alternativa (Milani, 1997). Primero se averiguaron las causas del problema, sus raíces y sus factores, para luego imaginar posibles soluciones. En esta última fase se aplicó la técnica de brainstorming o tormenta de idea y la técnica de pensamiento lateral aunada a la técnica de analogía (Rodríguez, 2007). La aplicación de estas prácticas arrojó múltiples soluciones, las cuales, luego de un estudio matemático y mecánico, dio como resultado la selección de un sistema semejante a un tren epicycloidal. El sistema seleccionado funciona en forma similar al punzonado intermitente, ya que los punzones suben y bajan verticalmente, realizan el corte y se retiran manteniendo en todo momento, durante su punzonado, la velocidad de la chapa, gracias al desplazamiento circunferencial que le ofrece el rodillo por un punto de pivote del punzón. Es decir, se acerca mucho al comportamiento de punzonado alternativo y a la construcción tradicional de punzón y matriz, sin romper con la condición de que trabaje de manera continua.

Este sistema ofrece múltiples ventajas sobre las punzonadoras rotatorias y es el hecho de que: a.- el punzón, a pesar de que originalmente se diseñó para que fuera de forma cilíndrica, puede tener cualquier forma, logrando así mayor versatilidad; b.- tal como está concebido se le puede colocar un extractor para evitar la deformación de la chapa o la rotura del punzón; c.- se puede acoplar al tren de laminación a cualquier velocidad; d.- al punzón se le puede dar inclinación

para que corte en forma de tijera; e.- sin desarmarlo se puede cambiar punzón y matriz y f.- se le pueden acoplar varios punzones a distancias limitadas por el tamaño del sistema.

Se utilizó como referencia el punzonado rotatorio por ser un sistema que evita el uso de múltiples utensilios en el conformado complejo. Por lo tanto, la idea tiene similitud en algunos aspectos, ya que al igual que el otro sistema trabaja como un parásito extrayendo energía de la máquina de conformado, es un sistema rotatorio y posee constante contacto con la lámina.

En este sistema el diámetro del punzón no se relaciona con el del rodillo que lo porta, tal como sucede con los sistemas de perforado rotatorio, lo significa que el sistema puede ser de poco tamaño y peso, independientemente del diámetro del punzón, esto sucede porque el punzón tiene en todo momento un " α_2 "=0.

El claro entre el punzón y la matriz, en el sistema propuesto, tampoco tiene relación con el radio del rodillo del sistema, ya que el punzón se mantiene vertical en todo momento (" α_2 "=0) y la relación con el claro, en los sistemas de perforado rotatorio, depende del ángulo con el que el punzón penetra en la matriz; los valores del ángulo " α_2 " en el sistema de perforado rotatorio varían en función de las dimensiones del rodillo, tal como se muestra en las tablas 2.2, 2.3 y 2.4.

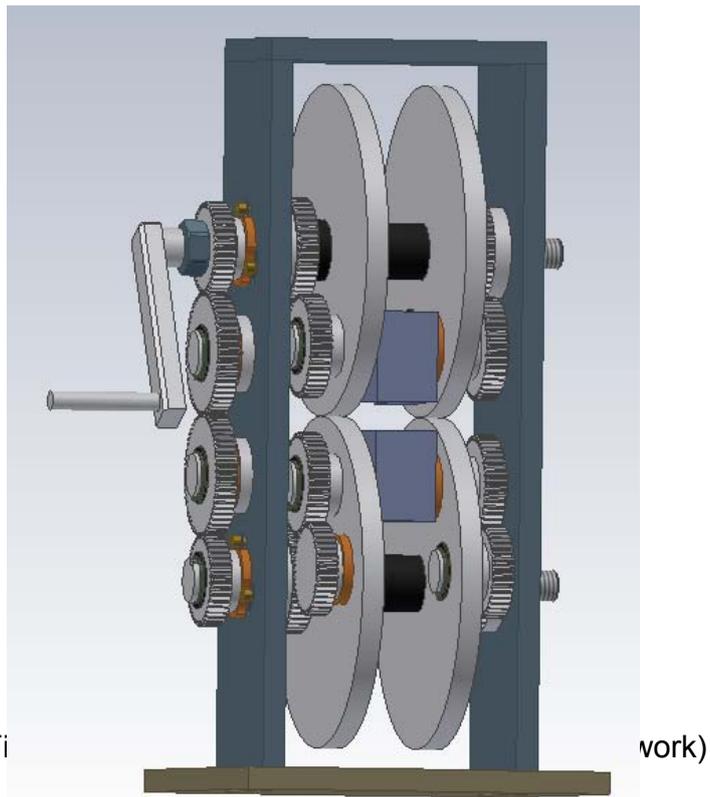
En este sistema el punzón no presenta problemas de flexión debido a su longitud, tal como en los sistemas rotatorios (tabla 2.2), ya que las cargas durante el perforado son paralelas al eje del punzón, por lo que éste puede tener una gran longitud limitada sólo por el pandeo, lo que le daría larga vida al punzón, debido no sólo al poco daño que puede sufrir, por no tener cargas que generen flexión, sino también porque puede rectificarse múltiples veces durante su uso.

Los claros quedan fuera de rango de forma notoria " S_2 ", en los sistemas rotatorios, cuando el punzón posee altas longitudes, lo que genera grandes fuerzas que deterioran el punzón, mientras que en el sistema propuesto la variación de longitud del punzón no incide sobre la dimensión del claro.

3.1. Presentación del sistema diseñado

La idea concebida, con la ayuda de las herramientas de creatividad, se esbozó con apoyo del software solidwork arrojando varios esquemas, entre los cuales se eligió aquel que cubría las bases de la idea original y a la vez cumplía con las condiciones mecánicas necesarias.

El sistema diseñado posee un par de columnas y rodillos de manera muy similar a los sistemas de punzonado rotatorio, cuya diferencia estriba en que tanto el punzón como la matriz se encuentran encerrados entre dos discos que fungen de rodillos. Estos discos portan sendas bocinas de bronce que sostienen ejes, los cuales a su vez sirven de soporte al punzón y a la matriz. Estos ejes son accionados por trenes de ruedas dentadas, sustentados por los mismos discos, que transmiten movimiento rotatorio al punzón y a la matriz en sentido contrario al giro del rodillo, a manera de mantener verticalmente, en todo momento, a estos elementos (figura 3.1).



Los discos giran en sentido opuesto con ayuda de un grupo de ruedas dentadas, organizadas linealmente, fijas a la columna y ubicadas en la parte exterior de la misma, las cuales son soportadas por ejes colocados a presión, de corta longitud y en voladizo.

3.1.1. Columna (A)

Primero se modeló la columna que sostendrá al sistema (figura 3.2), alrededor de cuyos agujeros extremos se realizaron ranuras a 120 grados de separación que

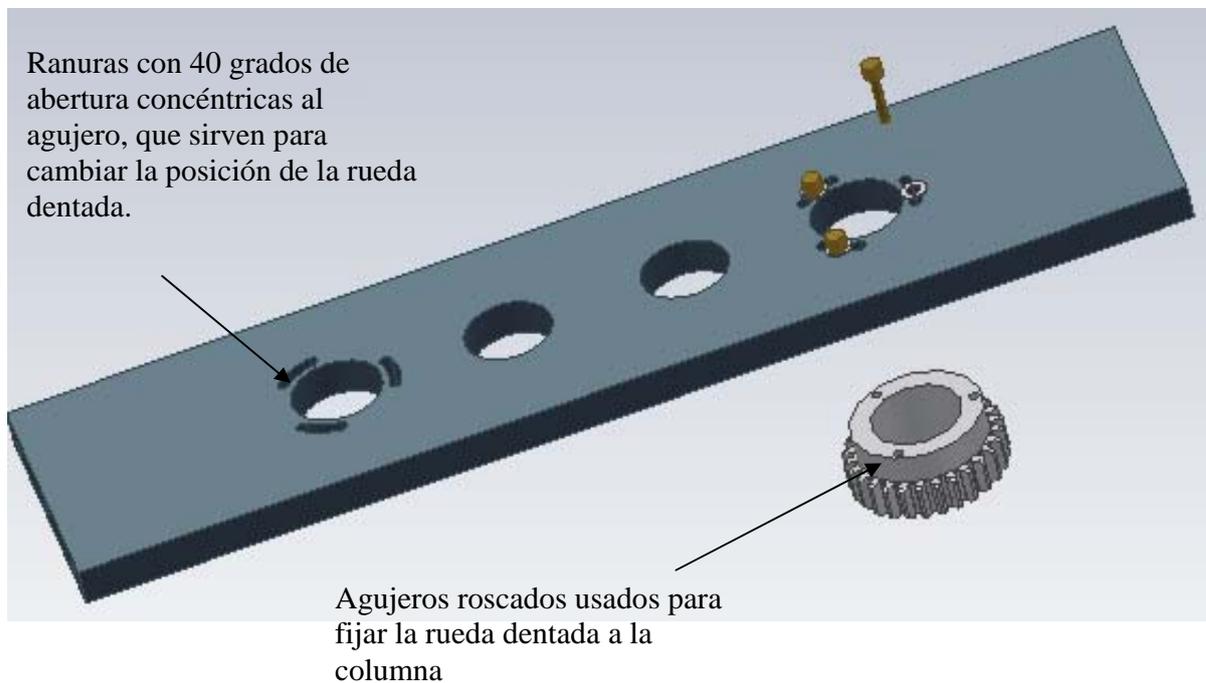


Figura 3.2. Columna con rueda fija (Solidwork)

tendrán como función fijar, a la columna, una de las cuatro ruedas dentadas que formará parte del tren. Se puede observar que hay tres tornillos con arandelas, en las ranuras mencionadas, que atraviesan la columna y que tendrán como función, al aflojar y ajustar de nuevo los tornillos, deslizar la rueda dentada concéntrica al agujero en múltiples posibles posiciones. Este sistema se diseñó para ubicar la posición exacta en la que el punzón se encontrará con la matriz.

A través del agujero extremo de la columna donde se ubica la rueda dentada fija, se soporta una bocina de bronce que tiene como función resistir el eje principal del sistema (figura 3.3), la cual será mecanizada con ranuras a 120 grados para

facilitar el paso a los tornillos que fijarán a la rueda dentada descrita en el párrafo anterior. Para mayor rigidez, la longitud total de la bocina es mayor que el espesor de la columna, por lo ésta quedará concéntrica y dentro de la rueda dentada que está fija a la columna.

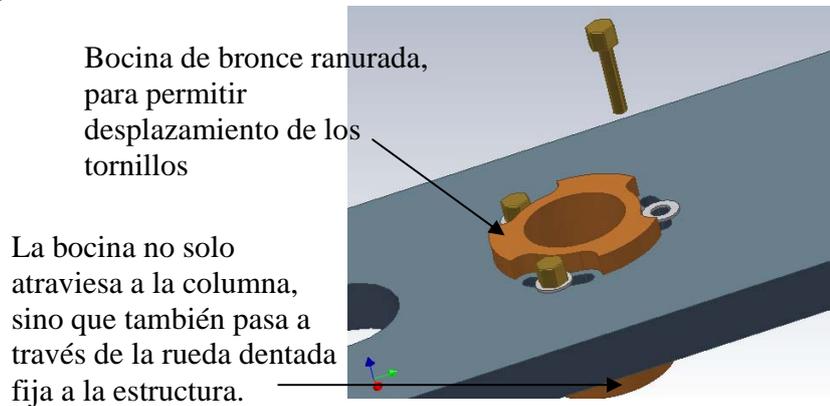


Figura 3.3. Bocina de bronce para deslizamiento de eje (Solidwork)

3.1.2. Columnas y ejes

El sistema está compuesto, como lo indica el corte de la figura 3.4, por un par de columnas, un sostén de columnas y la base; todo ello fabricado con chapa laminada en caliente de acero 1010 de 10 mm de espesor.

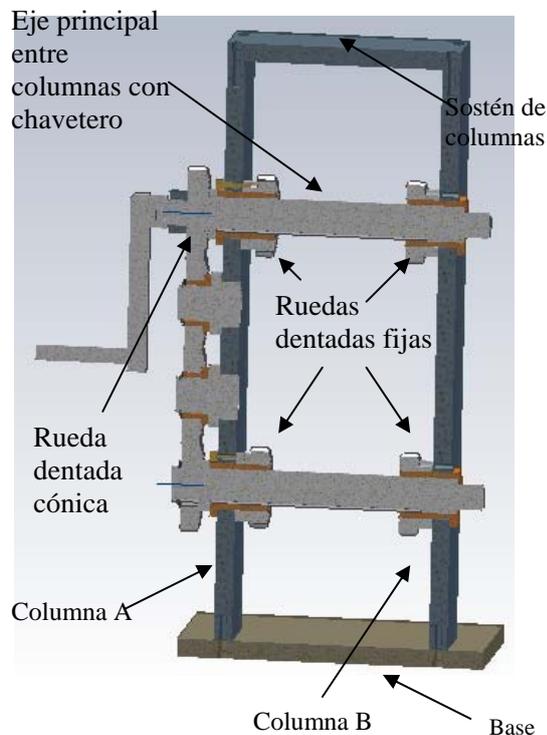


Figura 3.4. Columnas y ejes (Solidwork)

En los agujeros extremos de las columnas del sistema se ubican las cuatro ruedas dentadas fijas, las cuales no sólo servirán de apoyo a las bocinas sino también a los ejes principales. En la figura 3.5 se observan también dos ruedas dentadas locas que tienen como objetivo transmitir el movimiento al eje inferior.

Acoplada al eje superior del sistema y en uno de sus extremos se ubica una rueda dentada, en cuyo interior se halla un agujero cónico; la conicidad permite que se adhiera el eje a la rueda dentada, transmitiendo su momento torsor. Es de hacer notar que no se utilizó una chaveta, como sistema de acople entre el eje y la rueda dentada, a objeto de que sea a través de este elemento que se facilite el ajuste del ángulo de posición entre los dos rodillos del sistema, para hacer coincidir el punzón y la hembra. La rueda dentada cónica se usará para ajustar las grandes diferencias entre el punzón y la hembra, pero las pequeñas diferencias serán ajustadas gracias al giro que se puede ejercer a las ruedas dentadas fijas a las columnas, ya que aquéllas poseen ranuras que permiten su desplazamiento.

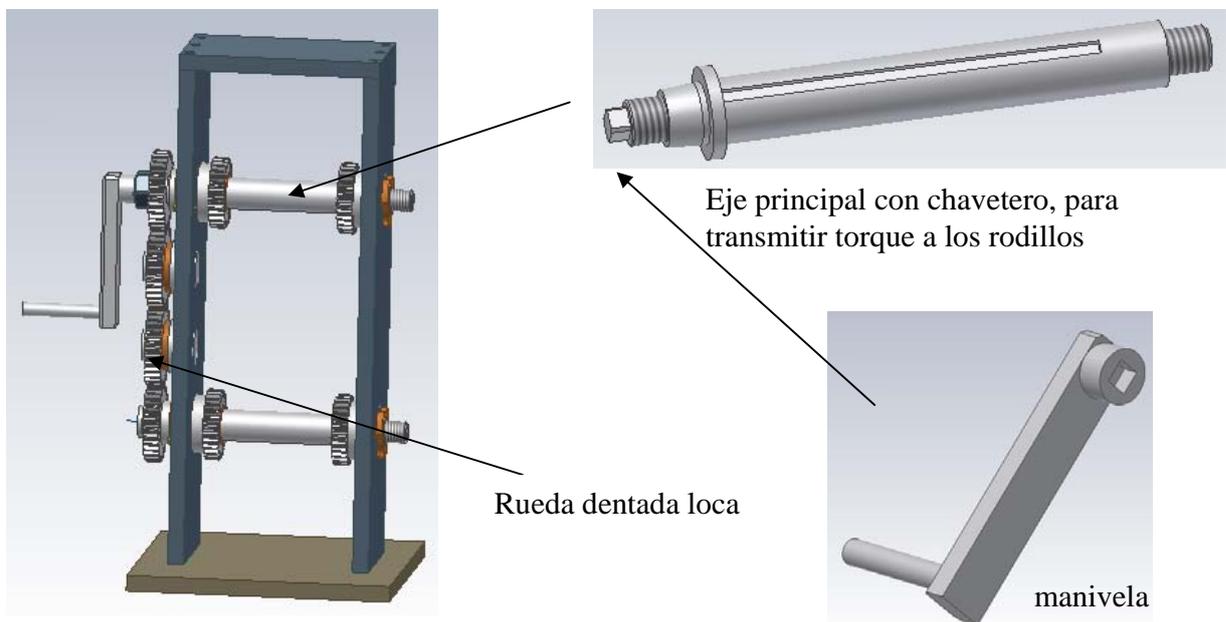


Figura 3.5. Transmisión de movimiento de los ejes (Solidwork)

3.1.3. Tren de ruedas de punzón y matriz

Sobre el disco superior de la figura 3.6 se observa un tren de engranaje formado por tres ruedas dentadas, cuyo objetivo es transmitir movimiento al punzón y a la matriz. La rueda dentada que está unida a la bocina y a los tres tornillos mostrados, es la misma rueda fija que se observa en la figura 3.2, la segunda rueda dentada es una rueda loca sujeta al rodillo y que transmite movimiento a una tercera rueda fija al eje porta punzón, cuando se gira el disco (figura 3.7). Las tres ruedas dentadas poseen el mismo diámetro y su objetivo es invertir el movimiento de giro del punzón, con respecto al rodillo, pero a la misma velocidad.

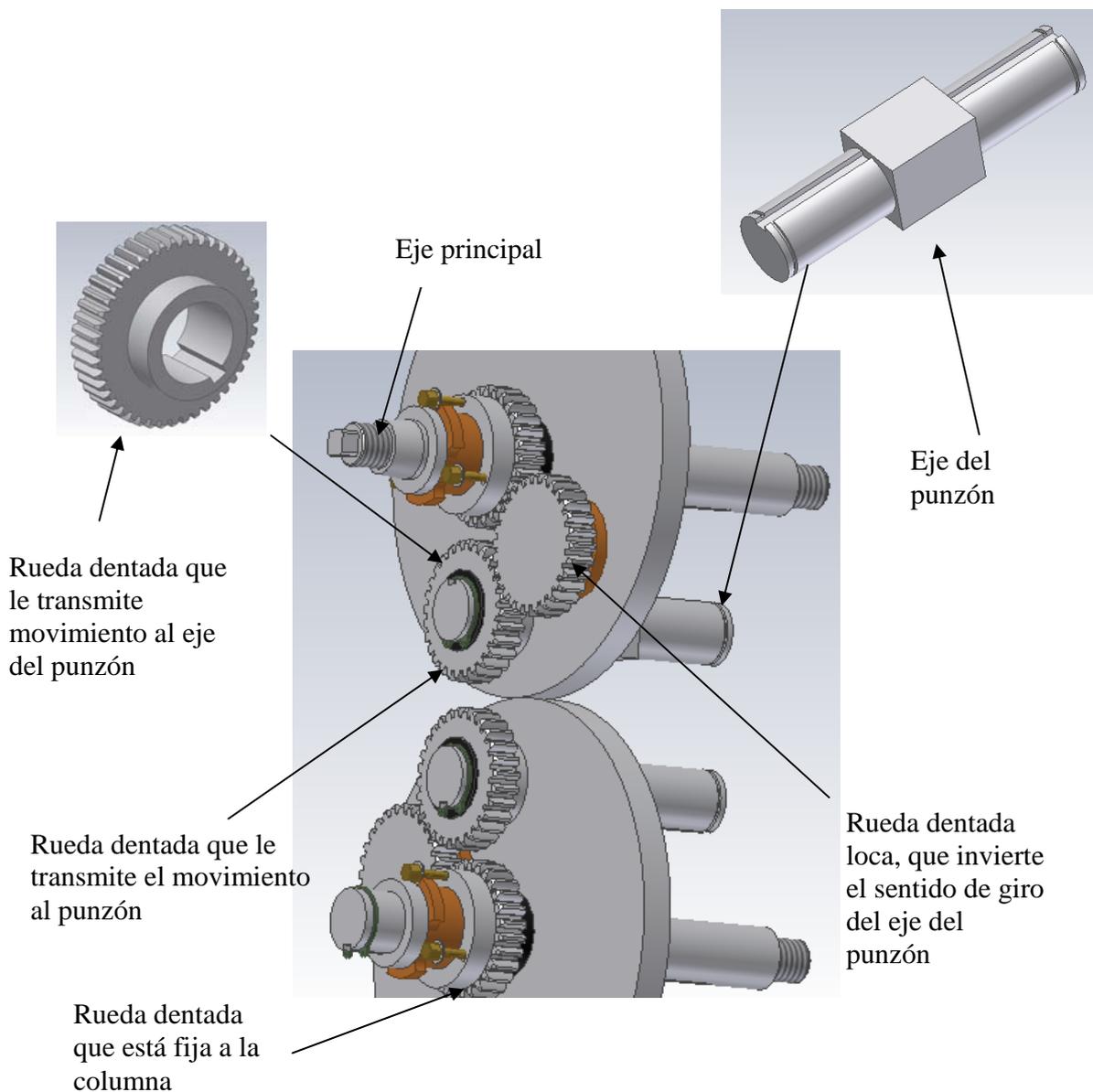


Figura 3.6. Tren de engranaje (Solidwork)

Este sistema permite cambiar la matriz y el punzón con suma facilidad por otro de forma cualquiera, bien sea rectangular, triangular, elíptica, etc, y dado que el desplazamiento del punzón y matriz es completamente vertical se adaptarían al sistema sin problema alguno.

El mecanismo fue desarrollado de tal forma que pudiera armarse y desarmarse cómodamente y que cada pieza que conforma al sistema pudiese ser mecanizada en máquinas convencionales. Sólo el agujero cuadrado con el cual acopla el punzón y la matriz, a los ejes que los portan, son difíciles de obtener por mecanizado convencional.

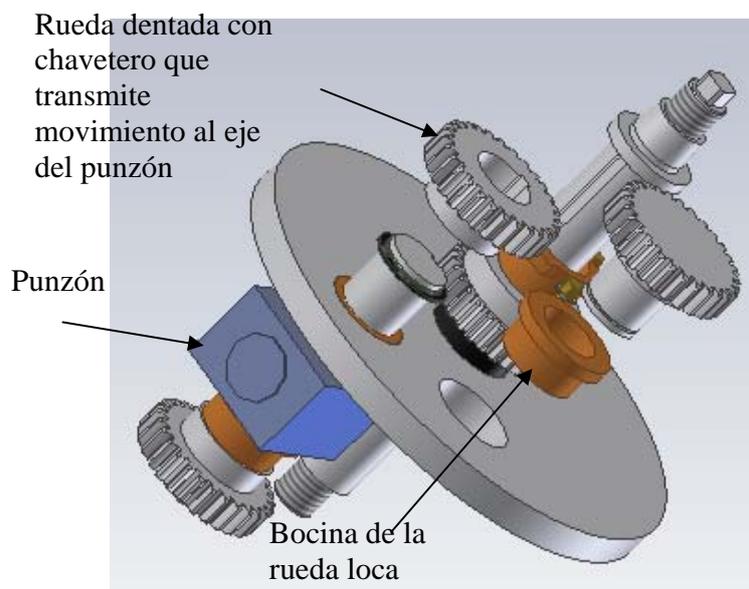


Figura 3.7. Sujeción del tren de engranaje (Solidwork)

En la figura 3.8 se observa en detalle el lado opuesto del disco donde se ubica el tren de ruedas dentadas, destacándose la verticalidad que mantienen el punzón y la matriz durante el giro del rodillo, posición que se conserva por el tren de engranaje sujeto al mismo.

3.2. Cálculos básicos del sistema de punzonado vertical rotatorio

El sistema está diseñado para trabajar como prototipo para someterlo a prueba, por lo que los cálculos están basados en el punzonado de un material de poca resistencia al corte para crear un mecanismo de poca robustez y tamaño.

3.2.1. Esfuerzo necesario para el corte

El punzón en el momento de tomar contacto con la chapa inicia sobre el material su acción de compresión, seguida de la acción de corte. El esfuerzo cortante necesario puede determinarse fácilmente, según las siguientes ecuaciones:

P: Perímetro de la figura

s: Espesor de la chapa

τ : Esfuerzo de corte, en MPa.

F_c : Fuerza cortante total necesaria, en N.

σ_r : Esfuerzo de rotura por tracción, en MPa.

El valor de F viene dado por:

$$F_c = p \cdot s \cdot \tau \quad (27)$$

$$\tau = \frac{3}{4} \cdot a \cdot \frac{4}{5} \cdot de \cdot \sigma_r \quad (28) \text{ (Alting, 1990)}$$

En la práctica es bueno tener en cuenta el rozamiento que el material dilatado genera a lo largo de las paredes de la matriz durante el corte; se deberá, por consiguiente, tener en cuenta la mayor fuerza F_c' debido a dichos rozamientos, multiplicando la fuerza teórica F_c por un coeficiente que puede variar de 1,1 a 1,2 (Alting, 1990). Por consiguiente:

$$F_c' = 1,1 \text{ a } 1,2 F_c \quad (29)$$

Para este caso se tiene:

D = Diámetro del punzón = 10mm

Material de la chapa a perforar: Aluminio

Resistencia a la rotura, dado como dato de tabla de materiales es $\sigma_r = 20 \text{ Kgf/mm}^2$

Espesor de la chapa: S = 0,5 mm

Al sustituir los valores en la ecuación 28:

$$\tau = (4/5) \cdot 20 = 16 \text{ Kgf/mm}^2 = 1,63 \text{ MPa}$$

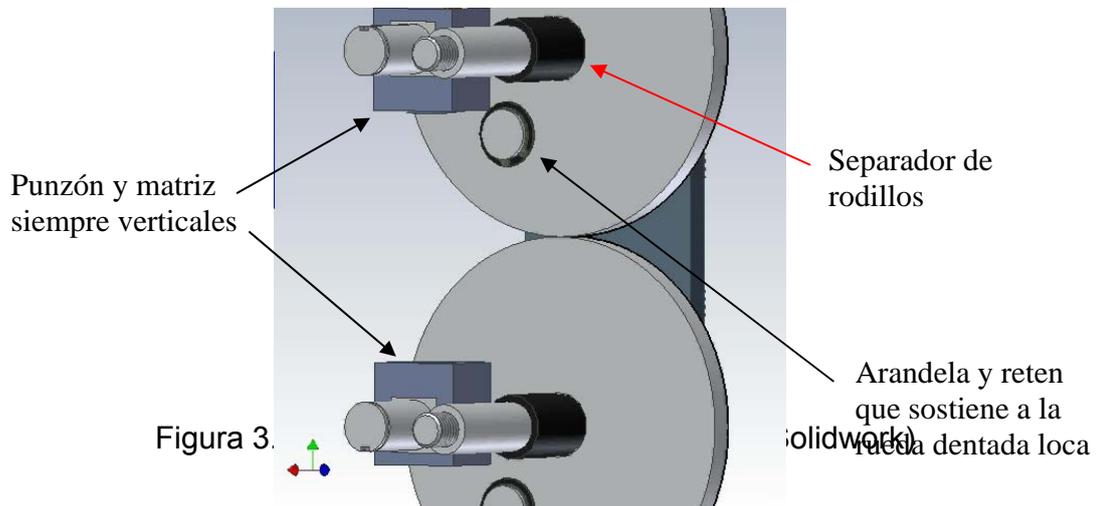
El perímetro del agujero será: $P = \pi \cdot 10 \text{ mm}$

Sustituyendo en la ecuación 27:

$$F = P.S.T = \pi \cdot 10 \text{ mm} \cdot 0,5 \text{ mm} \cdot 16 \text{ Kgf/mm}^2 = 251,33 \text{ Kgf} = 25,65 \text{ N}$$

Al sustituir F en la ecuación 29, deberá desarrollar una fuerza de:

$$F_c' = 1,2 \cdot F = 1,2 \cdot 251,33 \text{ Kgf} = 301,6 \text{ Kgf} \approx 302 \text{ Kgf} = 30,78 \text{ N}$$



3.2.2. Análisis de esfuerzo del eje porta punzón

La carga calculada se distribuye longitudinalmente sobre el eje del punzón, cubriendo una longitud total de 28 mm, lo que da como resultado una carga distribuida a lo largo del eje de $302\text{Kgf}/28\text{mm} = 10,78 \text{ Kgf/mm} \approx 11 \text{ Kgf/mm} = 1,12\text{N/mm}$ (figuras 3.9 (a) y 3.9 (b))

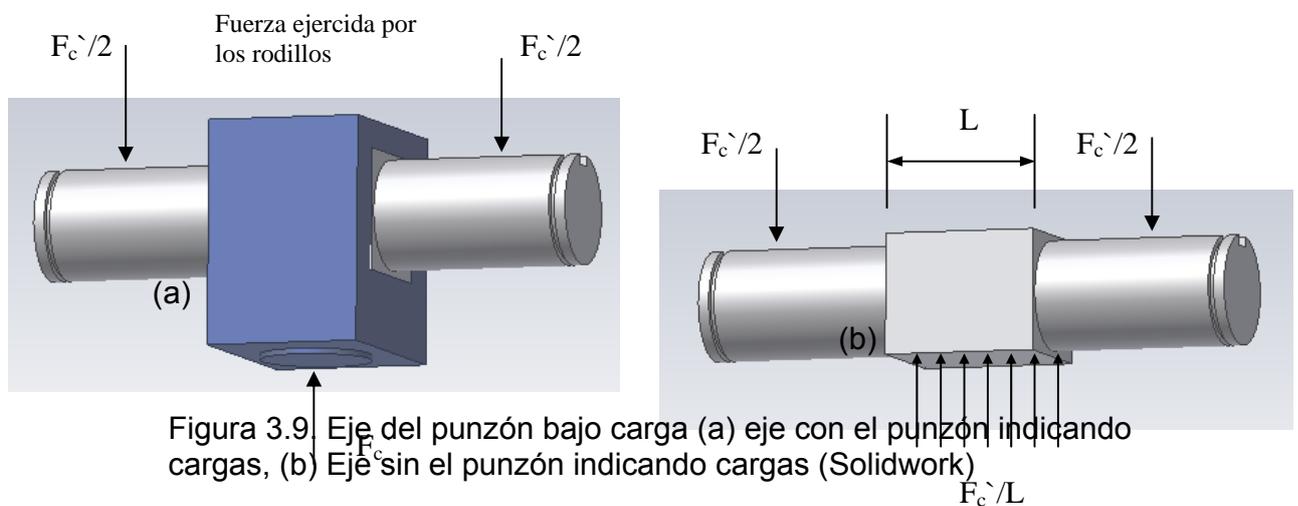


Figura 3.9. Eje del punzón bajo carga (a) eje con el punzón indicando cargas, (b) Eje sin el punzón indicando cargas (Solidworks)

Diagrama de fuerza cortante y momento flector del eje porta punzón (figura 3.10):

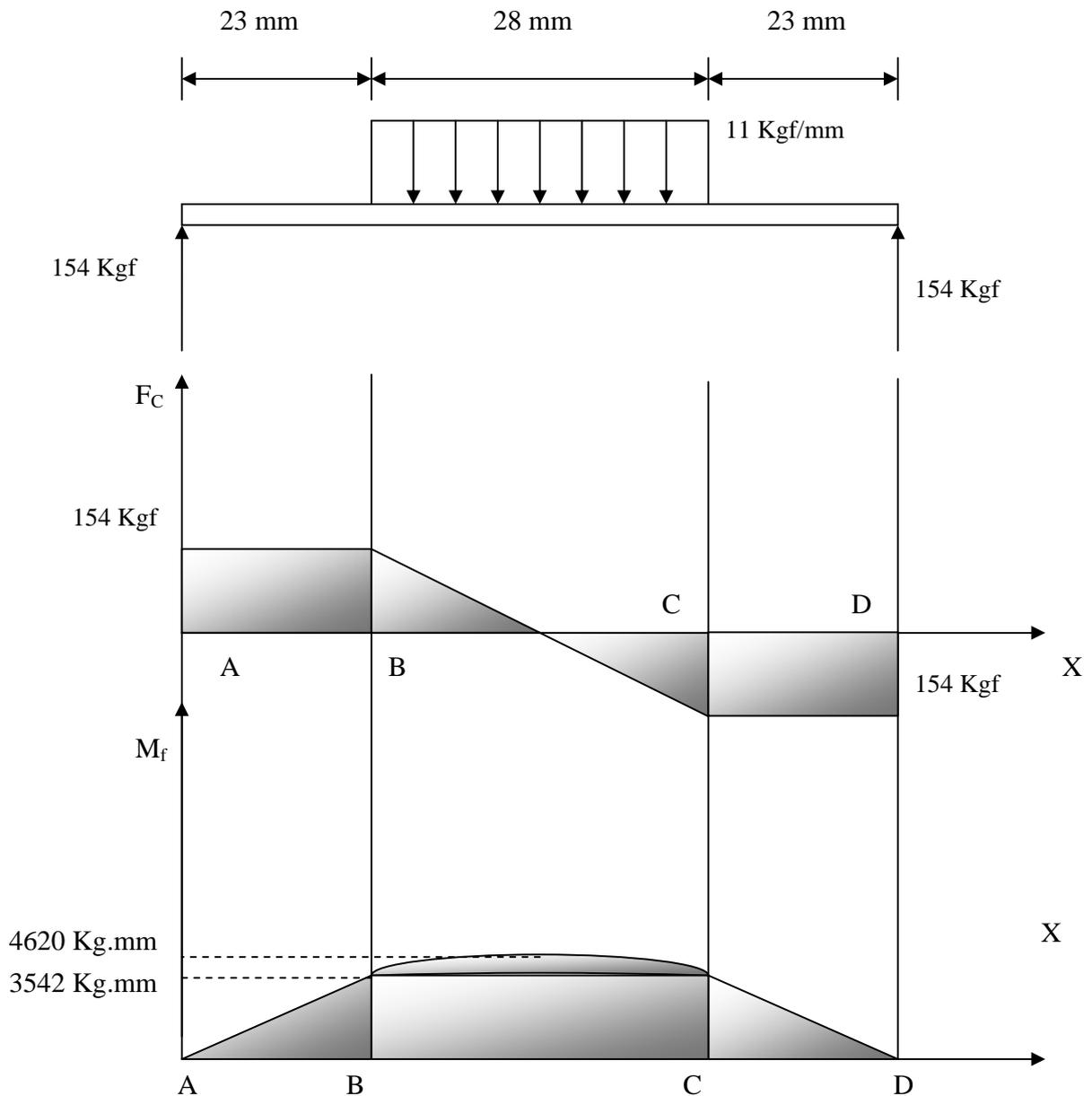


Figura 3.10. Diagrama de corte y momento de eje porta punzón (Word)

$$\sigma = \frac{M_f \cdot Y}{I} = \frac{4620 \text{ Kgf} \cdot \text{mm} \cdot 10 \text{ mm}}{\frac{\pi \cdot (20 \text{ mm})^4}{64}} = 5,88 \text{ Kgf} / \text{mm}^2 = 0,6 \text{ MPa} \quad (30) \text{ (Popov, 1989)}$$

Si se toma cuenta el sigma a la tracción mencionado anteriormente de $\sigma_T =$

$(4/5) \cdot 20 = 16 \text{ Kgf/mm}^2 = 1,63 \text{ MPa}$, se puede decir que hay un factor de seguridad

de: $F_s = \frac{16}{5,88} = 2,72$

3.2.3. Análisis de esfuerzo y deformación del eje principal

La viga anterior posee una carga $p(x)$ como una función continua entre los puntos B y C, la resolución de la ecuación diferencial $d^2M/dx^2 = p(x)$ es un método conveniente para determinar $V(x)$ y $M(x)$, donde al integrar dos veces más esta función se tendrá como resultado E.I. $\theta(x)$ y E.I. $y(x)$ en una sola ecuación, para todos los tramos de la viga (Popov, 1989).

Al realizar el cálculo de flecha de la viga se tiene:

$$P_{(x)} = -11 \cdot \langle X - 23 \rangle^0 + 11 \cdot \langle X - 51 \rangle^0 \Rightarrow V_{(x)} = -11 \langle X - 23 \rangle^1 + 11 \langle X - 51 \rangle^1 + C_1 \quad (31)$$

$$M_{(x)} = -\frac{11}{2} \langle X - 23 \rangle^2 + \frac{11}{2} \langle X - 51 \rangle^2 + C_1 \cdot X + C_2 \quad (32)$$

Para $M_{(0)} = 0$; $C_2 = 0$

Para $M_{(74)} = 0$; $-\frac{11}{2} \langle 74 - 23 \rangle^2 + \frac{11}{2} \langle 74 - 51 \rangle^2 + C_1 \cdot 74 = 0$; $C_1 = 232,64$ Kgf

$$E.I.\theta_{(x)} = -\frac{11}{6} \langle X - 23 \rangle^3 + \frac{11}{6} \langle X - 51 \rangle^3 + \frac{232,64}{2} \cdot X^2 + C_3 \quad (33)$$

$$E.I.Y_{(x)} = -\frac{11}{24} \langle X - 23 \rangle^4 + \frac{11}{24} \langle X - 51 \rangle^4 + \frac{232,64}{6} \cdot X^3 + C_3 \cdot X + C_4 \quad (34)$$

$Y_{(0)} = 0$; $C_4 = 0$

$$Y_{(74)} = 0; -\frac{11}{24} \cdot (51)^4 + \frac{11}{24} \cdot (23)^4 + \frac{232,64}{6} \cdot (74)^3 + C_3 \cdot 74 = 0 \Rightarrow C_3 = -172154,44 \text{ Kgf} \cdot \text{mm}^2$$

Por lo que la ecuación general queda expresada:

$$E.I.Y_{(x)} = -\frac{11}{24} \langle X - 23 \rangle^4 + \frac{11}{24} \langle X - 51 \rangle^4 + \frac{232,64}{6} \cdot X^3 - 172154,44X$$

Despejando la deformación se tiene como resultado:

$$Y_{(x)} = -\frac{11}{E.I.24} \langle X - 23 \rangle^4 + \frac{11}{E.I.24} \langle X - 51 \rangle^4 + \frac{232,64}{E.I.6} \cdot X^3 - \frac{172154,44X}{E.I.}$$

Por ser simétrica la carga sobre la viga y a su vez las reacciones, se puede que la mayor deformación se produce en todo el centro de la viga, por lo tanto:

$$Y_{(37)} = \frac{64 \cdot (-17607,33 + 1963985,65 - 6369714,25)}{2,1 \times 10^4 \cdot \pi \cdot (20)^4} = 0,026 \text{ mm}$$

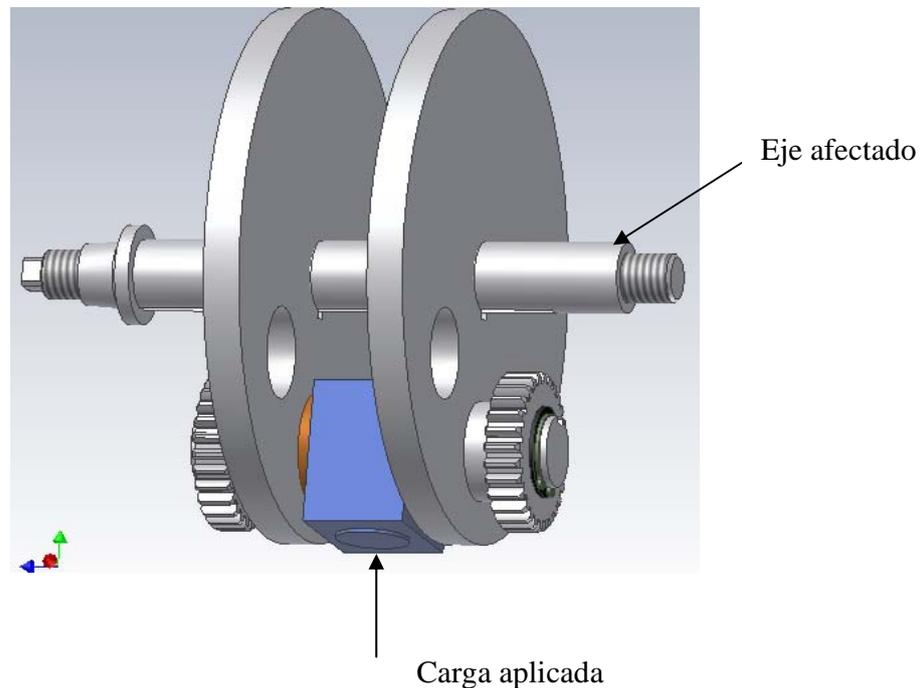


Figura 3.11. Efecto de la carga sobre el eje de los rodillos (Solidwork)

La misma carga es transmitida al eje que soporta los rodillos (figura 3.11), pero con la diferencia de que el eje posee mayor longitud y la fuerza se distribuye en forma diferente, para este caso se considera que la carga es puntual.

Además de la deformación calculada se puede, utilizando el diagrama de esfuerzo deformación, calcular el esfuerzo máximo al que es sometida el eje tomando el valor de M_{fmax} entre los tramos de la eje.

De donde se tiene que, con el uso de la ecuación 29:

$$\sigma = \frac{M_f \cdot Y}{I} = \frac{6345 \text{Kgf} \cdot \text{mm} \cdot 10 \text{mm}}{\frac{\pi \cdot (20 \text{mm})^4}{64}} = 8,07 \text{Kgf} / \text{mm}^2 = 0,823 \text{MPa} \quad (\text{Shigley, 1987})$$

El eje que soporta el punzón de igual forma sufre deformación, la cual puede ser determinada directamente, por medio de la ecuación hallada en la tabla (Shigley, 1987), que dice que:

P : Carga considerada puntual, aplicada sobre el eje

L: Longitud total del eje

A: Distancia desde la carga hasta los puntos de apoyo

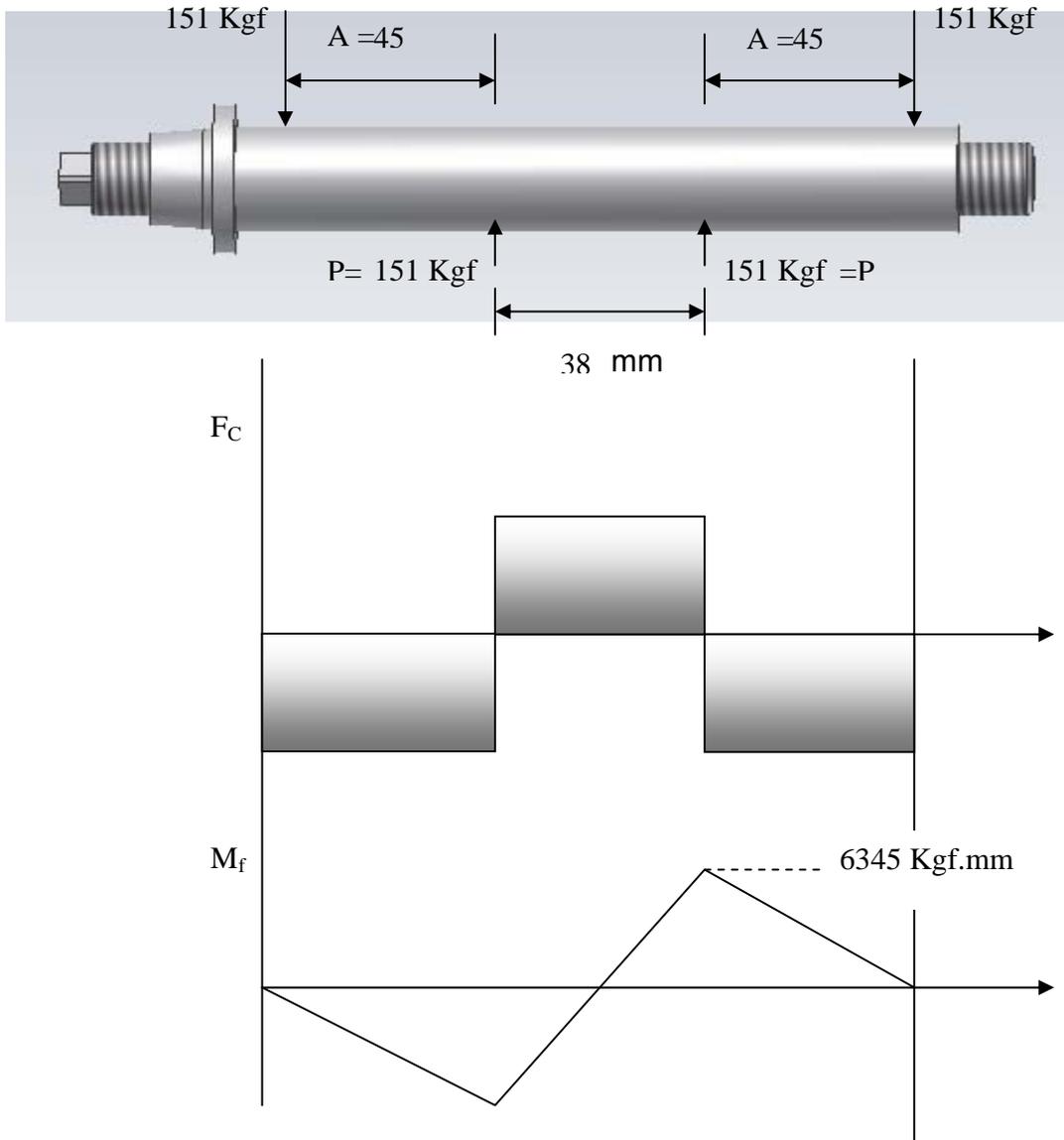


Figura 3.11. Efecto de la carga sobre el eje de los rodillos (Solidwork)

E: Módulo de elasticidad

I: Momento de inercia

$$Y_{\max} = \frac{P \cdot A}{24 \cdot E \cdot I} (3L^2 - 4A^2) = \frac{151 \text{ Kg} \cdot 45 \text{ mm}}{24 \cdot 2,1 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 20^4}{64} \right)} (3 \cdot 3128^2 - 4 \cdot 45^2) = 0,07 \text{ mm} \quad (35)$$

Al sumar la flecha de los dos ejes, se tendrá el desplazamiento que sufre el punzón verticalmente en sentido opuesto a la penetración del mismo.

$$\text{Flecha del eje del punzón} + \text{Flecha del eje principal} = Y_{MP} + Y_{MR}$$

$$Y_{MP} + Y_{MR} = 0,07 + 0,026 = 0,096 \approx 0,1 \text{ mm}$$

Pero como el sistema es simétrico y recibe la misma carga la matriz, entonces se puede decir que la deformación de los ejes que se hallan en la parte inferior, sufren la misma deformación. Por lo tanto la abertura total entre los punzones por causa de la carga de 300 Kgf es el doble de lo calculado anteriormente. Este análisis arroja como resultado:

$$Y_{\text{total}} = 0,2 \text{ mm}$$

El tamaño del punzón deberá ser de 0,2 más grande de lo originalmente establecido.

3.2.4. Análisis de torsión del eje principal

Además de estar sometido a flexión, el eje principal está sujeto a torsión y la misma se transmite a los dientes de las ruedas dentadas, por lo que, para calcular las cargas aplicadas sobre los dientes de las ruedas, se debe expresar cuánto torque se genera sobre el eje principal, y si el mismo resiste este esfuerzo (figura 3.12).

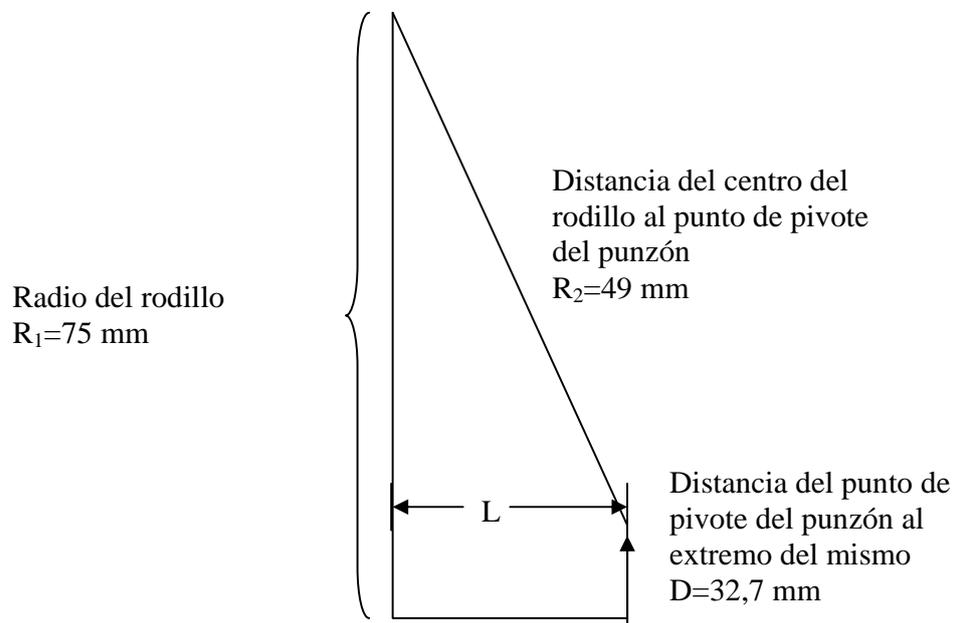


Figura 3.12. Brazo generado para el cálculo de torsión (word)

$$L^2 = R^2 - (R_1 - D)^2 \Rightarrow L = \sqrt{49^2 - (75 - 32,7)^2} = 24,73 \text{ mm} \quad (36)$$

De aquí que el torque generado sobre el eje principal es:

$$T = F.L = 300\text{Kgf} \cdot 24,73\text{mm} = 7419 \text{Kgf} \cdot \text{mm} \quad (37)$$

La teoría indica que el esfuerzo cortante máximo en un eje está dado por:

$$\tau_{Max} = \frac{T.r}{J} \quad \text{Donde: } J = \frac{\pi.d^4}{32} \quad (38 \text{ y } 39)$$

$$\tau_{Max} = \frac{32.T.r}{\pi.d^4} = \frac{32.7419\text{Kgf} \cdot \text{mm} \cdot 10\text{mm}}{\pi.(20\text{mm})^4} = 4,72 \text{Kgf}/\text{mm}^2 = 0,482 \text{MPa}$$

Si se toma en cuenta que el eje principal posee un chavetero que genera concentraciones de esfuerzo que debilitan la sección transversal del eje, se puede entonces determinar el verdadero valor del esfuerzo cortante máximo al usar el factor de corrección de esfuerzo. El valor más crítico que podría tomar es $K=4$; Se debe utilizar entonces este valor, lo que da:

$$\tau_{Max} = K \times 4,72 \text{Kgf} / \text{mm}^2 = 4 \times 4,72 \text{Kgf} / \text{mm}^2 = 18,88\text{Kgf}/\text{mm}^2 = 1,927 \text{MPa}$$

El esfuerzo de corte de un acero crudo con 0,45% de carbono es de $56\text{Kgf}/\text{mm}^2=5,7\text{MPa}$, por lo que el eje soportará la carga sin ningún problema.

3.2.5. Cálculo a la flexión de los dientes de las ruedas

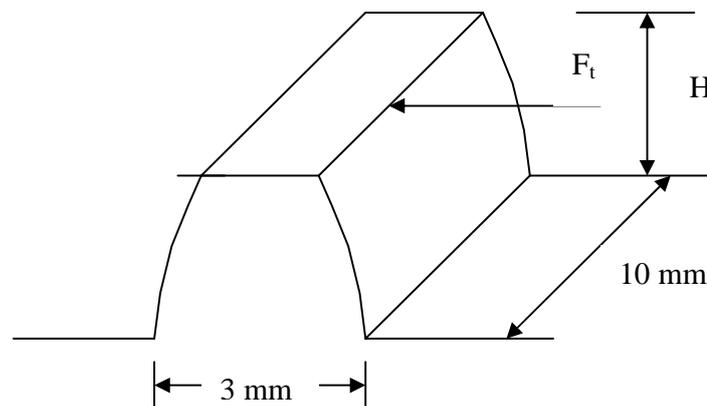


Figura 3.13. Diente sometido a carga (word)

Al analizar los cálculos arriba mostrados, se puede con el torque generado sobre el eje, calcular la resistencia del diente de las ruedas dentadas (figura 3.13).

Sabiendo que:

$$T = F_t \cdot R \quad (42)$$

La rueda dentada que está directamente acoplada al eje principal tiene un diámetro externo de 51 mm, de aquí que:

$$F_t = \frac{T}{R} = \frac{7419 \text{Kgf} \cdot \text{mm}}{51 \text{mm} / 2} = 290,54 \text{Kgf} = 29,65 \text{MPa}$$

Los dientes de las ruedas dentadas tienen un espesor de 10mm y un ancho de 3mm, por lo tanto:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_f \cdot Y}{I} ; I = \frac{b \cdot h^3}{12} ; Y = h/2 \Rightarrow \sigma_{\max} = \frac{6 \cdot M_f}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F_t \cdot H}{b \cdot h^2} \quad (43 \text{ y } 44)$$

Donde H es la altura del diente y m es el módulo: $H = 2,157m = 2,157 \times 1,5 = 3,24 \text{ mm}$ [7]

$$\text{De aquí que: } \sigma_{\max} = \frac{6 \cdot M_f}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 290,54 \text{Kgf} \cdot 3,24 \text{mm}}{3 \text{mm} \cdot (10 \text{mm})^2} = 18,82 \text{Kgf/mm}^2 = 1,92 \text{MPa}$$

Ahora el esfuerzo del acero 1045 en estado de recocido es de $70 \text{Kgf/mm}^2 = 7,14 \text{MPa}$, por lo que no hay problema, con el diente elegido de hecho el modulo del diente podría ser menor, y generar mayor precisión en el movimiento entre los rodillos.

3.2.6. Esfuerzo y deformación en las columnas

Hasta los momentos sólo se ha tomado en cuenta la deformación que sufrió el eje del punzón y el eje de los rodillos, más sin embargo no se ha tomado en consideración la deformación que sufren las columnas, las cuales poseen un espesor de chapa de 10 mm. Las mismas soportan una carga de $302 \text{Kgf} = 30,77 \text{MPa}$ al igual que los ejes pero esta carga debe ser dividida entre dos, ya que son dos las columnas que sostienen el sistema.

Asumiendo en principio que la carga se aplica a toda la sección transversal de la columna y sabiendo que la chapa es de **acero laminado en caliente 1010**, se puede entonces a través de las figuras 3.14 (a) y (b) verificar que:

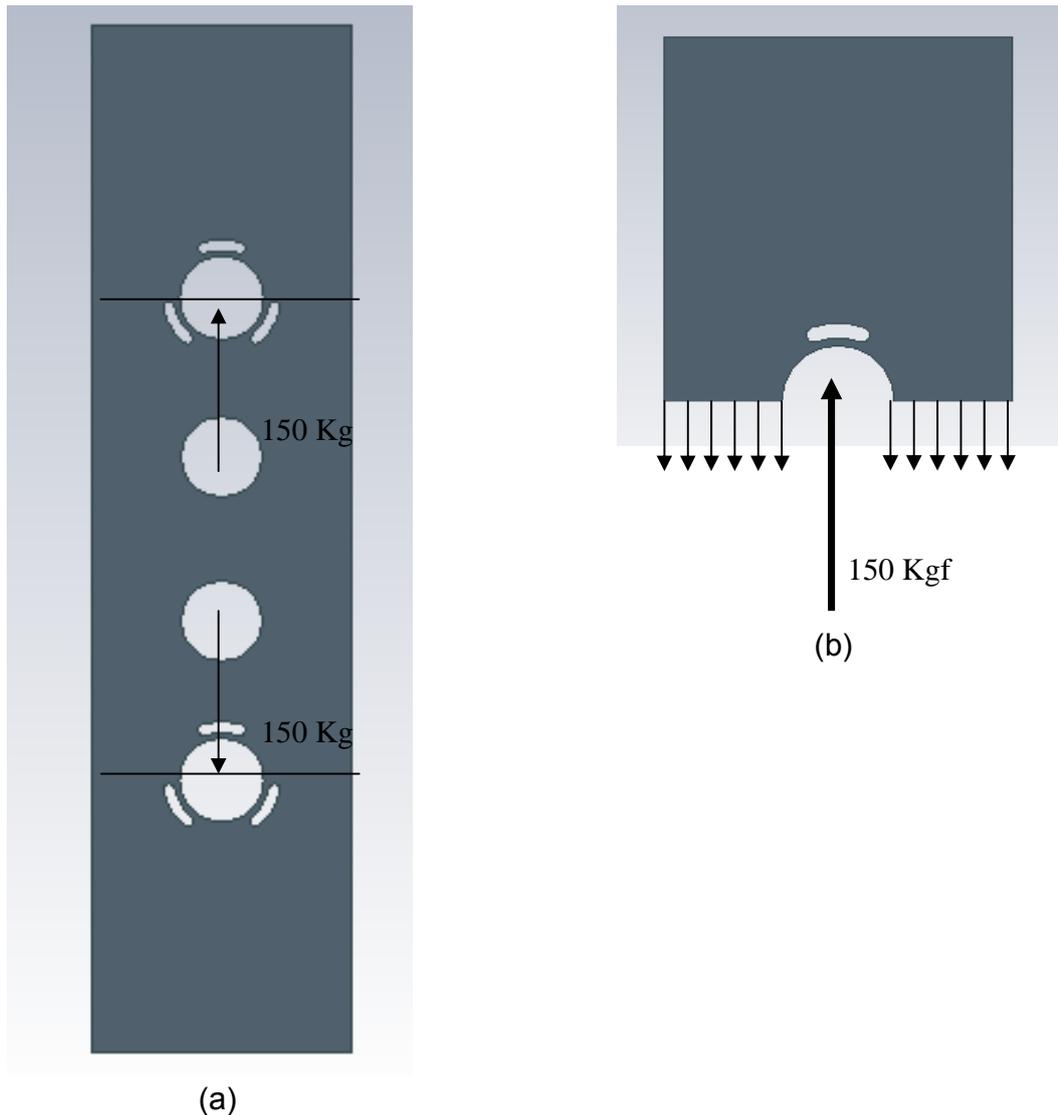


Figura 3.14. Columna sometida a carga (a) columna entera con cargas (b) columna seccionada con cargas y esfuerzo (solidwork)

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{e(a-d)} \quad (45)$$

F: Fuerza de 150 Kgf

e: Espesor de la chapa

a: Ancho

d: Diámetro del agujero

$$\sigma = 0,27 \text{ Kgf/mm}^2 = 27,55 \text{ KPa}$$

La resistencia a la rotura del acero laminado con **0,1% de carbono, es de 31 Kg/mm² = 3,16 MPa**, por lo se puede decir que a pesar de que faltan muchos cálculos en la columna por realizar, ya que hay agujeros intermedios que generan concentraciones de esfuerzo que minimizan la resistencia del material, no es

necesario la ejecución de los mismos, por la diferencia tan grande entre el esfuerzo admisible y el calculado.

Más sin embargo, si se utiliza el factor de concentración de esfuerzo, teórico o geométrico, K_t o K_{ts} , el cual se utiliza para relacionar el esfuerzo máximo real en la discontinuidad con el nominal (Shigley, 1987) (figura 3.15) se tendrá:

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_o \quad (\text{Shigley, 1987})$$

σ_o

σ_{\max}

Figura 3.15. Columna sometida a carga (solidwork)

Después de calcular la relación entre el espesor de la chapa y el diámetro del agujero ($d/a = 25/80 = 0,3125$), se pudo obtener del diagrama de la figura A-26-1 (Barra de sección rectangular en tensión simples con un agujero transversal) del libro “Diseño de ingeniería industrial” de Joseph Shigley, el valor de $K_t = 2,35$; por lo tanto:

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_o = 2,35 \cdot 0,27 \text{ Kgf/mm}^2 = 0,6345 \text{ Kgf/mm}^2 = 64,75 \text{ MPa}$$

Si se toma en cuenta el esfuerzo máximo y la sección transversal mínima de la columna para calcular la deformación que presentará la misma medida entre ejes se tiene que:

$$\varepsilon = \sigma/E = 0,6345 \text{ Kgf/mm}^2 / 2,1 \cdot 10^4 \text{ Kgf/mm}^2 = 0,00003$$

$$\Delta L / L = \varepsilon \Rightarrow \Delta L = 300 \text{ mm} \cdot 0,00003 = 0,009 \text{ mm}$$

Deformación en extremo pequeña en comparación con la obtenida con los ejes para la misma carga.

La columna B del sistema no es necesario estudiarla, ya que la misma posee los mismos agujeros extremos de la columna A mostrada, pero carece de los agujeros centrales, por lo que esta columna debe soportar mayores cargas y de menores deformaciones.

Los cálculos realizados hasta ahora justifican las dimensiones y materiales seleccionados de la estructura del sistema. Sin embargo, todavía hay detalles no cubiertos en los elementos básicos, como son el punzón, la matriz y los rodillos, que tomando en consideración la información bibliográfica, se pueden generar cambios sustanciales que garanticen el funcionamiento adecuado.

Hasta el momento los cálculos garantizan que a pesar de las pequeñas dimensiones que posee el sistema puede no solo soportar las cargas a las que estará sometido y con pequeñas deformaciones, sino que además es factible su fabricación y altas posibilidades de buen funcionamiento, ya que sus movimientos se modelaron en solidworks.

3.3. Rediseño de elementos

La ampliación de conocimientos sobre el tema, terminó generando cambios en beneficio del sistema, en los elementos que se muestran a continuación.

3.3.1. Rediseño de la matriz

Las matrices lo mismo que los punzones se hacen, en general, en una sola pieza de acero, de forma troncocónica, y de sección cuadrada o rectangular, cuando el agujero a realizar es de dimensiones muy pequeñas. En esta pieza se mecaniza el hueco que exige la estampa (Lassheras, 2000).

Sin embargo, cuando las matrices son de grandes dimensiones se puede economizar acero y reducir el peligro de las deformaciones en el temple, construyéndolas en varias piezas ajustadas sobre una placa base.

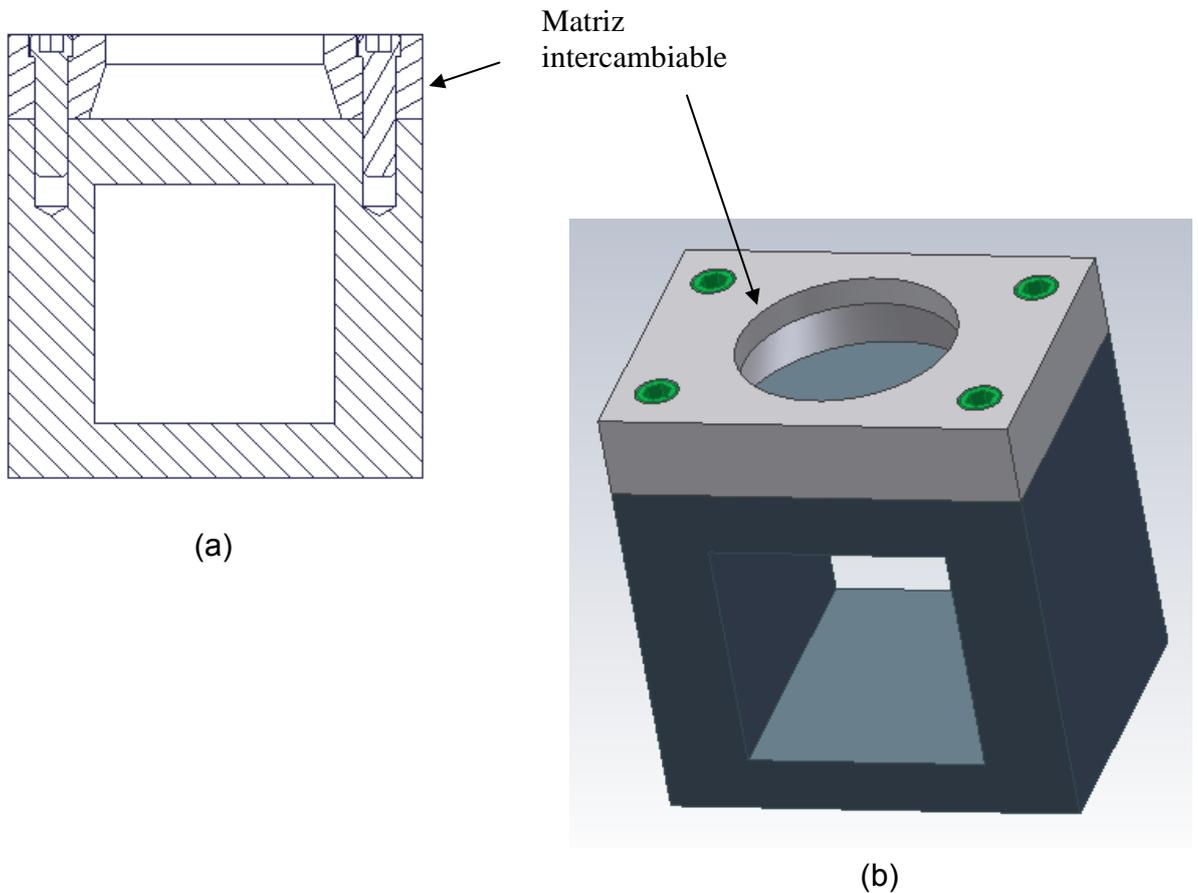


Figura 3.16. Matriz en dos piezas (a) matriz seccionada (b) vista isométrica de la matriz (solidwork)

Al tomar en consideración lo antes mencionado se realizó una matriz de varias piezas, de fácil maquinabilidad, sencilla e intercambiable, para colocar cualquier forma deseada sobre el porta matriz tal como se muestra en las figuras 16 (a) y (b). La matriz no tiene desahogo para las chapas cortadas, ya que la intención es construir solo un modelo, para observar su comportamiento y verificar si el diseño funciona o no; por lo tanto, para desalojar el material cortado se quitará la matriz y se extraerá el material.

3.3.2. Rediseño de los rodillos

Como se debe saber, una matriz completa se compone también de un bloque o mazo, que actúa de guía del punzón y de dos piezas que tienen por objeto crear un

pasillo por el que se hace deslizar la tira o cinta de chapa (Rosaler, 1987). En el diseño expuesto, no se puede adaptar una guía para el punzón, pero si se puede crear el pasillo de la tira, rediseñando el sistema.

Para la creación del pasillo se rediseñaron los rodillos simplemente formando en ellos un escalón, así la tira de chapa quedará atrapada lateralmente, sirviendo este como guía, tal como muestra la figura 3.17.

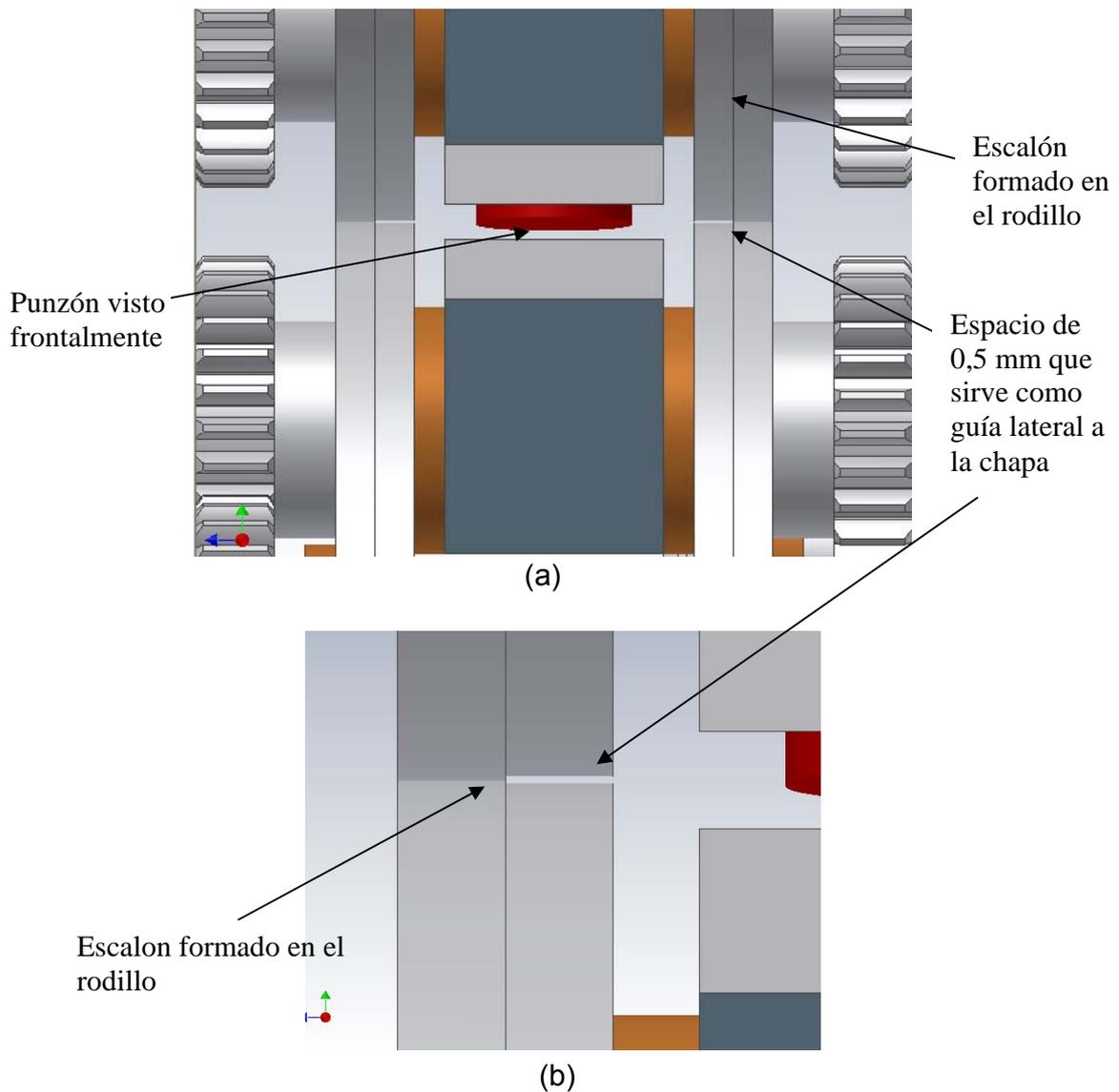


Figura 3.17. Escalón en los rodillos que sirve de guía a la chapa (a) vista frontal del sistema con punzón, matriz y rodillos (b) detalle del escalón en los rodillos (solidwork)

3.3.3. Extractor aplicado al punzón

Si el sistema se construye tal como se ha diseñado hasta el momento, se puede correr el riesgo de que durante la operación de corte se produzca deformación en la chapa. La aplicación del extractor elimina dicho inconveniente. Como no se puede utilizar el extractor denominado tipo puente, que es el más sencillo, por el hecho de que tanto la matriz como el punzón están girando continuamente y la tira

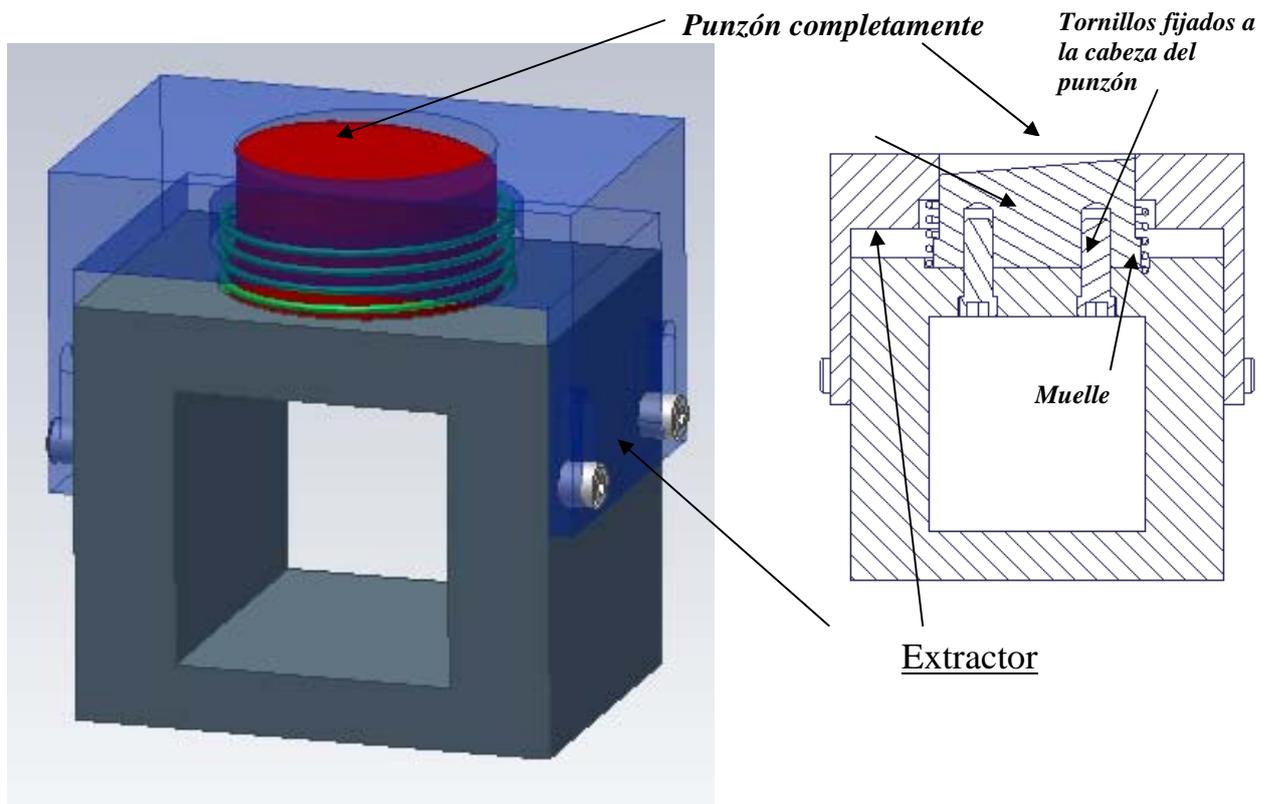


Figura 3.18. Porta punzón y punzón con prensa chapa (a) Porta punzón seccionado (b) vista isométrica (solidwork)

de chapa no sigue este movimiento, entonces obligatoriamente se debe crear un extractor con muelle en el punzón (Boothroyd, 1978). Al realizar estos cambios de igual forma debemos rediseñar la sujeción del punzón. Como se tiene la ventaja de que la perforación es de un diámetro pequeño, la sujeción no necesariamente debe ser entre placas; por lo tanto una sujeción que se adapta bastante bien a nuestro

sistema es por medio de tornillos fijados directamente a la cabeza del tornillo (figura 3.18).

En este caso, como explica la teoría de este tipo de sistemas, el punzón durante su movimiento descendente avanza hacia la matriz y comprime el muelle hasta hacerle alcanzar la presión máxima. En la carrera de ascenso, dado que el muelle comprimido debe volver a su longitud primitiva, se realiza la extracción (figura 3.19).

El rediseño, se realizó colocando un extractor, el cual estará limitado a un desplazamiento axial al punzón y al mismo tiempo tendrá un recorrido definido por cuatro tornillos colocados a los lados del portapunzón. Se ubicó un único muelle

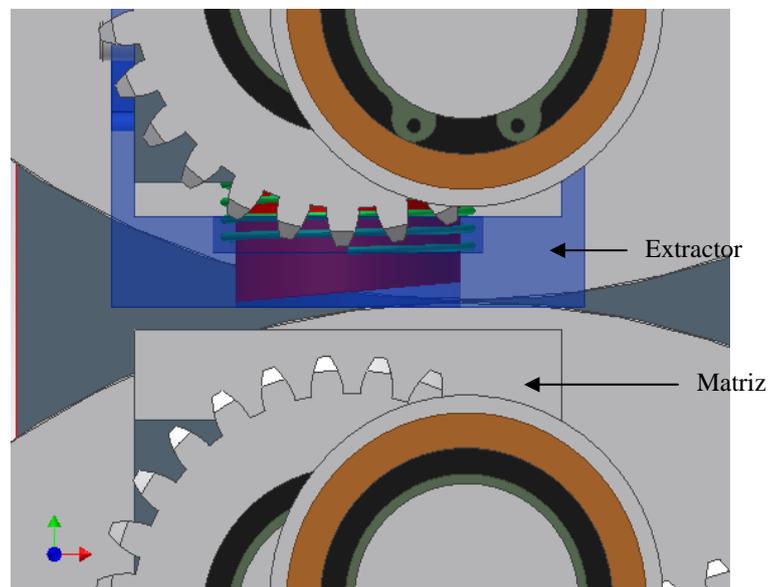


Figura 3.19. Movimiento descendente del punzón (solidwork)

concéntrico al punzón por falta de espacio y para que el centro de presión de ambos lados coincidiera, fijado con la ayuda de un par de ranuras circulares ubicadas tanto en el extractor como en el portapunzón.

Si el mecanismo del sistema propuesto se compara con el esquema del sistema de perforado rotatorio, se puede observar que el ángulo denominado " α ", en los sistemas rotatorios, varía en relación directa con la rotación del rodillo, mientras que en el sistema propuesto este ángulo " α " es "0" independientemente de la

posición que tenga el rodillo. Si este valor numérico es sustituido en la ecuación 11:

$$S_2 = G \cdot \text{sen} \alpha_2 \text{ arroja como resultado}$$

$$S_2 = G \cdot \text{sen} (0) = 0$$

Lo que significa que para valores de ángulos de ataque iguales a “0”, el claro entre el punzón y la matriz es nulo y por consiguiente, las fuerzas generadas sobre el punzón son menores, disminuyéndose la magnitud de los esfuerzos que actúan sobre el mismo. Así mismo, se elimina el ataque del borde del punzón en forma angular, lo que elimina la flexión sobre el mismo y por lo tanto la posibilidad de fractura de sus bordes.

Estos resultados permiten dar solución al problema planteado, cumplir el objetivo propuesto y verificar el cumplimiento de la hipótesis científica.

3.5. Valoración económica

Venezuela tiene amplia utilización de máquinas de punzonado intermitente con un costo de adquisición de alrededor de 98.000 BsF. Estas máquinas tienen que venir acompañadas de dispositivos para acoplarlas a un sistema de perfilado de 2 basquets, 2 juego rodillos enderezadores, un freno mecánico y sensores de bucle para la sección de alimentación (suministro), del semiproducto a troquelar, que implican costos adicionales de hasta 30.000 BsF, arrojando costos totales de alrededor 128.000 BsF.

El sistema propuesto es factible de fabricar en un taller de máquinas convencionales incurriendo en un mínimo de costos según las partidas de costos mostradas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Partidas de costo para la fabricación del prototipo de punzonadora propuesta.

Partidas de costo	Costos
Gastos de salario	200*25=5.000 BsF
Gastos de materiales y materias primas	3.100 BsF
Gastos de energía	500 BsF
Herramientas	1.100 BsF
Total	9.700 BsF

Como se observa, la fabricación de una maquina de troquelado con las exigencias tecnológicas del diseño propuesto, permite ahorrar alrededor de 118.300 Bsf. Si a ello se le agrega un incremento en la productividad en el troquelado de chapas y láminas que aunque está determinado por las características de diseño del troquel (diámetro del rodillo y cantidad de punzones), siempre garantizará al menos, el doble de la productividad, pues cualquier rodillo que se acople a la máquina, siempre tendrá más de un punzón.

El diseño propuesto permitirá, además, disminuir los costos de mantenimiento al disminuirse las averías de los punzones por los efectos del ángulo de ataque en la rotura de los bordes del punzón y al disminuirse el número de elementos a utilizar durante la explotación de la instalación.

El elemento diseñado propuesto reduce, además, el espacio útil de labor, por lo que la capacidad instalada de los talleres se incrementa.

En tal sentido, se pueden enunciar una serie de ventajas del sistema planteado en relación con los existentes actualmente:

1. El sistema produce mejoras en las características constructivas y tecnológicas en las líneas de perforado complejo.
2. En el sistema de perforado vertical rotatorio el diámetro del punzón no se relaciona con el diámetro del rodillo, por lo que el punzón puede aumentar su diámetro sin que se afecten las dimensiones del sistema, de allí que el mecanismo pueda ocupar el mismo espacio independientemente del tamaño del punzón.
3. La variación de longitud del punzón, en el sistema de perforado vertical rotatorio, no se relaciona con el claro generado en el sistema porque el punzón penetra de manera vertical, no angular, por lo que puede tener mayor longitud y perforar un notable número de veces.

3.4. Conclusiones parciales:

1. El diámetro del punzón no se relaciona con el diámetro del rodillo, por lo que el punzón puede aumentar su diámetro sin que se afecten las dimensiones del sistema, por lo que requiere el mismo espacio sin importar el tamaño del punzón.
2. La variación de longitud del punzón no se relaciona con el claro generado en el sistema por que el punzón no penetra de manera angular en la matriz, sino de manera vertical, por ello el punzón pueda tener mayor longitud y perforar mayor número de veces.
3. Por ser un utillaje requiere menor número de elementos, para producir el mismo trabajo, que una punzonadora intermitente, por lo que ocupa menos espacio y por obiedad genera menos costo que el mismo.
4. Las dimensiones de los elementos diseñados garantizan la condición de resistencia para las condiciones de carga analizadas durante operaciones de punzonado.

Conclusiones generales

1. El perforado angular mejora algunas características constructivas y tecnológicas de las punzonadoras intermitentes, pero conlleva a limitaciones de vida en el punzón, dimensionales en el sistema, calidad en el perforado, de distancia entre agujeros, de peso, entre otras.
2. Se estableció una relación entre la longitud y diámetro del punzón y el radio del rodillo permitió obtener una expresión para minimizar el ángulo de ataque del punzón y regular adecuadamente el claro de las punzonadoras rotativas.
3. Se diseñó, con un enfoque científicamente fundamentado, un dispositivo para minimizar el ángulo de ataque del punzón y el claro de punzonadoras rotativas.
4. En base a las empresas y patentes encontradas que estudian y diseñan sistemas de perforado continuo, se puede decir que no se encontró un diseño igual o similar al propuesto.

Recomendaciones

1. Fabricar el prototipo de punzonadora rotaria propuesta para su validación en el troquelado de láminas de espesores pequeños.
2. Analizar variantes que permitan eliminar la limitación que impone la aparición de un paso fijo en el sistema propuesto.
3. Perfeccionar el diseño de manera que posibilite la aplicación a sistemas de menores pasos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alting Leo, Procesos para Ingeniería de Manufactura, tercera edición, Ediciones Alfaomega, 1990.
2. B.H. Amstead- Phillip F. Oswald, Procesos de Manufactura Versión S.I., S.A. de C.V., Segunda Impresión, CIA. Editorial Continental, 1984.
3. Baránov G.G., Curso de la teoría de mecanismos y máquinas, Segunda Edición, Editorial Mir Moscu, 1985.
4. Black Stewart C. – Vic Chiles, Principios de Ingeniería de Manufactura, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. Mexico, Primera edición, Mexico, 1999.
5. Boothroyd Geoffrey, Fundamentos del Corte de Metales y de las Máquinas – Herramientas, Editorial McGraw-Hill latinoamericana, S.A., primera edición, 1978.
6. Bralla James, Manual de diseño de producto para manufactura, Tomo II, McGraw-Hill, México, 1993.
7. Casillas A. L., Máquinas, Cálculos de Taller, Madrid, España. Ediciones Máquinas, 1982.
8. Doyle Lawrence E. -Carl A. Keyser, Procesos y materiales de manufactura para ingenieros, Prentice-hall hispanoamericana, S.A, 1988.
9. Lassheras José María, Tecnología mecánica, Tomo II, Editorial Donostiarra, S.A, 2000.
10. Milani Rodolfo, Diseño Para Nuestra Realidad, Equinoccio Ediciones de La Universidad Simón Bolívar, Caracas, 1997.
11. Perez Roque Calero – Carta Gonzalez José, Fundamento de Mecanismos y Máquinas para Ingenieros, Mc Graw Hill Interamericana de España. (2006)
12. Popov Egor P., Mecánica de Sólidos, Limusa, 1989
13. Rodriguez Mauro estrada, Manual de Creatividad Los procesos Psíquicos y el Desarrollo, Editorial Trillas, 2007.
14. Rosaler Robert, Manual de Mantenimiento Industrial, Tomo IV, McGraw Hill, México 1987.

15. Rossi Mario, Estampado en Frio de la Chapa, Editorial Científico-Médica Barcelona, 1971
16. Schey John, Procesos de Manufactura, Tercera edición, McGraw-Hill, México, 2002.
17. Shigley Joseph E., Diseño en Ingeniería Mecánica, Mc Graw Hill, México 1987.
18. Ulrico Kart, Steven Eppinger, Diseño y Desarrollo de Productos, Tercera edición, McGraw-Hill, México, 2004.
19. Xavier Salueña Verna , Tecnología Mecánica, Ediciones UPC, (2002).
20. Patente 1180102, *Máquina de perforación*, USA, 1916
21. Patente 3119312, Rotary die cutting apparatus and method, USA, 1964
22. Patente 3749626, Rotary die apparatus and process for manufacturing labels or the like, USA, 1973
23. Patente 3805657, Steel rules rotary die and method of making same, USA, 1974
24. Patente 3965786, *Rotary die cutter*, USA, 1976
25. Patente 3981213, Rotary sheet material cutter and creaser, USA, 1976
26. Patente 4063493, Rotary die cutting machine, USA, 1977
27. Patente 4073207, Luck for rotary die cutting blanket, USA, 1978
28. Patente 4073208, Anvil Structure for rotary die cutting apparatus, USA, 1978
29. Patente 4205596, Rotary die cutting device, USA, 1980
30. Patente 4273015, *Perforadora cabeza de cúpula*, USA, 1981
31. Patente 4499802, Rotary cutting die with scrap ejection, USA, 1985
32. Patente 4561336, *Corte rotatorio*, USA, 1985
33. Patente 4846774, Rotary die cutting and laminating process and machine, USA, 1989
34. Patente 4867024, Locking rotary die cutting cover, USA, 1989
35. Patente 5286317, Rotary die cutting mechanism, USA, 1994
36. Patente CA-2651310A1, *Punzonador rotatorio*, Canada, 2008
37. Patente E00972515, *Aparato punzonador giratorio*, España, 2003

38. Patente E97108834, *Dispositivo para la perforación de chapas*, Europa, 2000
39. Patente EP-1419861A1, *Punzonadora rotatoria para materiales extruidos*, Bloque Europeo; Alemania, 2003
40. Patente RO 122188 (B1), *Mecanismo de punzonado continuo*, Rumania, 2009
41. Patente US 6263819B1, *Method and apparatus for die cutting and making laminate articles*, USA 2001
42. Patente US 7066066 B2, *Aparato y método de punzonado de agujero continuo con rotación*, USA, 2006
43. Patente US-005937719A, *Punzonador rotatorio*, USA, 1999
44. Patente W9700241CA, *Aparato de estampación giratoria*, Europa, 2000
45. Patente WO 2009058175 (A1), *Proceso de perforado continuo para una chapa de ventilación*, Patente internacional, 2009
46. [http://www./Beckwood Press Company com](http://www.Beckwood Press Company com) St. Louis, MO, 11 junio (2008)
47. <http://www.BaustStanztechnologie.de>
48. <http://www.compuroll.com/> (2009)
49. <http://www.cutsmart.com> (2009)
50. <http://www.emtinternational.com> (2009)
51. <http://www.fagorarrasate.com/productos/producto> (2007)
52. <http://www.ficepiberica.com/perfiladoras.html> (2007)
53. <http://www.gonvarri.com> (2006)
54. <http://www.hiasa.com/> (2007)
55. <http://www.hillrotary.com> (2009)
56. <http://www.metalfformingmagazine.com> /(2007)
57. <http://www.Printequip.net> (2009)
58. <http://www.samco-machinery.com/images/rotary-punch-die-lg.jpg>
59. <http://www.senfung.com> (2009)
60. http://www.senfung.com/Ceiling_T-BAR_Roll_Forming_Machine.htm (2009)
61. <http://www.siderex.es/empresas/48.htm> (2008)
62. <http://www.ToolingU.com/> University Tooling (2002)

63. <http://www.toolingu.com/definition-401120-21232-punzonado.html> (2009)

64. Rotation <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/Articulo.asp?>

A=14738