



REPUJADORA AUTOMÁTICA DE LÁMINA EN TORNO (SPINNING PROCESS)

JUAN DAVID RENDÓN VÉLEZ  
JAIME EDUARDO PALACIO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2009

REPUJADORA AUTOMÁTICA DE LÁMINA EN TORNO (SPINNING PROCESS)

JUAN DAVID RENDÓN VÉLEZ  
JAIME EDUARDO PALACIO GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico

Asesor:

Gabriel Jaime Páramo Bermúdez  
Ing. Producción, área de manufactura, EAFIT

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2009

## CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.....	11
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	11
2.2.1 Objetivo específico 1. ....	11
2.2.2 Objetivo específico 2. ....	11
2.2.3 Objetivo específico 3. ....	11
2.2.4 Objetivo específico 4. ....	11
2.2.5 Objetivo específico 5. ....	11
2.2.6 Objetivo específico 6. ....	11
3 MARCO TEORICO .....	12
3.1 EL TORNO .....	12
3.1.1 Cabezal.....	12
3.1.2 Bancada.....	12
3.1.3 Carro principal.....	12
3.1.4 Contrapunto.....	12
3.1.5 Carro móvil.....	12
3.1.6 Portaherramientas.....	12
3.2 PROCESO DE REPUJADO.....	13
3.2.1 Repujado manual .....	13
3.2.2 Repujado automático .....	22

4	PROCESOS DE REPUJADO .....	33
5	DISEÑO SISTEMA DE MOVIMIENTO HERRAMENTAL .....	37
5.1	CLARIFICACIÓN DE LA TAREA .....	37
5.2	LISTA DE REQUERIMIENTOS .....	38
5.2.1	Energía.....	38
5.2.2	Materia prima .....	39
5.2.3	Movimiento .....	39
5.2.4	Control.....	39
5.2.5	Ergonomía y operación .....	40
5.2.6	Mantenimiento.....	40
5.2.7	Costos de implantación .....	40
5.2.8	Eficiencia del sistema .....	40
5.2.9	Diseño modular .....	40
5.2.10	Resistencia de dispositivos.....	40
5.3	ESPECIFICACIONES DETALLADAS.....	41
5.4	FUNCION PRINCIPAL.....	41
5.5	CAJA NEGRA.....	42
5.6	LLUVIA DE IDEAS.....	43
5.7	MATRIZ MORFOLÓGICA.....	44
5.8	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS .....	46
5.9	DISEÑO DE DETALLE .....	48
5.9.1	Calculo torque necesario para repujado.....	48
5.9.2	Calculo tornillo de bolas .....	49
5.9.3	Ensamble .....	50

6	ACOPLES AL TORNO.....	52
6.1	HUSILLO ROSCADO PARA SUJECIÓN DE MOLDES.....	52
6.2	PUNTA GIRATORIA CON GEOMETRÍA CILÍNDRICA .....	53
7	VALIDACIÓN Y ENSAYO DE MOVIMIENTOS .....	54
8	CONCLUSIONES .....	56
9	RECOMENDACIONES.....	58
10	BIBLIOGRAFÍA .....	59
11	ANEXOS .....	62
11.1	ANEXO 1. ESPECIFICACIONES ACERO W1 Y ACERO O1 .....	62
11.2	ANEXO 2. LUBRICANTE SHELL ALBIDA SDM .....	64
11.3	ANEXO 3. TORNO PRAZI MD 100, MD 200, SD300.....	65
11.4	ANEXO 4. ESPECIFICACIONES SERVOMOTORES.....	66
11.5	ANEXO 5 ESPECIFICACIONES ACERO 1020 .....	67
11.6	ANEXO 6. ESPECIFICACIONES TORNILLOS DE BOLAS .....	68
11.7	ANEXO 7. PLANOS DE LAS PIEZAS A FABRICAR.....	69

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Reducción en el espesor de la lámina después del repujado .....	25
Tabla 2. Especificaciones detalladas de diseño de producto (PDS) .....	41
Tabla 3. Tabla de evaluación de alternativas ponderada.....	47
Tabla 4. Especificaciones Tornillo de bolas .....	68

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1. Chapas cónicas y cilíndricas formadas con repujado manual .....	14
Ilustración 2. Configuración repujado manual .....	16
Ilustración 3. Esquema piezas de trabajo repujado manual .....	16
Ilustración 4. Configuración usando tijeras y con herramienta de rodillo .....	17
Ilustración 5. Molde en acero de una campana .....	18
Ilustración 6. Partición del proceso por etapas con diferentes moldes .....	19
Ilustración 7. Típicas formas de herramientas para repujado manual .....	19
Ilustración 8. Tipos de herramientas de rodillos para repujado .....	20
Ilustración 9. Lubricación con jabón .....	21
Ilustración 10. Relaciones de la operación de repujado automático en cono. ....	23
Ilustración 11. Segunda etapa del proceso a ángulo menor de 35° .....	24
Ilustración 12. Rizado por baja reducción y ruptura por exceso de reducción. ....	26
Ilustración 13. Extrusión hacia atrás .....	27
Ilustración 14. Perfil esquemático de una máquina para repujado automático .....	28
Ilustración 15. Tipos básicos de rodillos para repujado de lámina .....	30
Ilustración 16. Distribución dureza en pieza de cobre reducida 43% en repujado .	32
Ilustración 17. Redondeo exterior .....	33
Ilustración 18. Expansión .....	33
Ilustración 19. Bordeo externo .....	34
Ilustración 20. Bordeo interno .....	34
Ilustración 21. Cuellos .....	35
Ilustración 22. Reducción .....	35
Ilustración 23. Estampado .....	36
Ilustración 24. Repujado de secciones huecas .....	36
Ilustración 25. Bancada de torno .....	37



Ilustración 26. Configuración de torno existente. ....	38
Ilustración 27. Función principal del sistema.....	41
Ilustración 28. Estructura funcional .....	42
Ilustración 29. Cajas negras de las funciones del sistema .....	42
Ilustración 30. Síntesis funcional.....	43
Ilustración 31. Matriz morfológica del proceso completo. ....	44
Ilustración 32. Husillo roscado para montaje de moldes .....	52
Ilustración 33. Punta giratoria con geometría cilíndrica .....	53

## 1 INTRODUCCIÓN

El proceso de repujado de lámina en torno consiste en la deformación, normalmente en frío, de una lámina metálica, acoplándola a un molde para obtener la forma de este, por medio de una combinación de rotación y fuerza y utilizando diferentes herramientas de acuerdo a la necesidad de la deformación. El proceso es apto para formas de revolución, ya que el molde y la lámina se encuentran en constante giro.

En el medio, el proceso de repujado se realiza en forma artesanal, en nuestro entorno es utilizado para la fabricación de elementos como acoples de lámparas, ollas, copas, vasos, moldes para helados, etc. Son pocas las empresas que trabajan con la tecnología de CNC (control numérico computarizado). Es por este motivo que se realizó el presente proyecto, la construcción de un dispositivo mecánico, adaptado a un torno existente, para la generación del proceso automático de repujado de lámina en torno. Este dispositivo es apto para la generación de movimientos en un plano, donde se mueve la herramienta encargada de la fuerza en el proceso.

La implantación de este sistema automático es importante para lograr bases experimentales para métodos manufactureros más eficientes y al alcance de los artesanos que utilizan el repujado manual.

El alcance del proyecto incluye la construcción total del sistema. La parte correspondiente al software para el control del movimiento, será en otra fase diferente al presente proyecto. Se encuentra dentro de este proyecto las bases teóricas para el proceso de repujado, además se entrega:

- Planos y piezas construidas.
- Documentación de los ensayos realizados en el proyecto.
- El molde de geometría sencilla para la generación de una pieza.
- El sistema en funcionamiento.

La realización del proyecto abarca los conocimientos vistos en la carrera en cuanto a procesos de manufactura, diseño metódico, mecanismos, dibujo técnico, y demás afines, los cuales permiten el buen desarrollo y terminación del proyecto planteado.

Para el desarrollo del proyecto se siguió la siguiente metodología.

- Documentación bibliográfica.
- Documentación desde la experiencia, vivencias del proceso de repujado manual, observación de maquinas en el entorno, parámetros utilizados en el repujado manual por aprendizaje experimental.
- Proceso de diseño
- Construcción y ensamble
- Ensayos

## 2 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseño y fabricación de un sistema de movimiento para realizar el proceso de repujado automático en torno (Metal Spinning process), de pequeñas piezas y geometrías sencillas, en un torno existente en el centro de laboratorios de la Universidad EAFIT.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

2.2.1 Objetivo especifico 1. Realizar el estado del arte del proceso de repujado de lámina en torno, con el fin de conocer los avances en esta área y fijar el punto de partida del proyecto.

2.2.2 Objetivo especifico 2. Definir procesos básicos de repujado realizables y sus herramientas, con el fin de determinar el alcance del diseño.

2.2.3 Objetivo especifico 3. Diseño y fabricación del sistema de movimiento para la realización del proceso, evaluando entre el sistema neumático y el sistema mecánico.

2.2.4 Objetivo especifico 4. Fabricación de los elementos necesarios para los acoples de la maquina al torno.

2.2.5 Objetivo especifico 5. Validación y ensayos pertinentes de los movimientos generados por el herramental.

2.2.6 Objetivo especifico 6. Conclusiones

## 3 MARCO TEORICO

### 3.1 EL TORNO

Se denomina torno a un conjunto de máquinas herramienta que permiten mecanizar piezas de forma geométrica de revolución. Estas máquinas operan haciendo girar la pieza a mecanizar mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado de avance contra la superficie de la pieza, cortando la viruta de acuerdo con las condiciones tecnológicas de mecanizado adecuadas.

Las principales partes del torno son:

- 3.1.1 Cabezal. Van montados generalmente los órganos encargados de transmitir el movimiento del motor al eje y la mordaza de agarre a la pieza.
- 3.1.2 Bancada. Es la base o apoyo del torno. Es pesada y fundida de una sola pieza. Es la "espina dorsal" del torno, sostiene y soporta todas las demás partes. Sobre la parte superior de la bancada están las guías.
- 3.1.3 Carro principal. Sostiene el carro móvil y el portaherramientas. Avanza sobre el tornillo patrón.
- 3.1.4 Contrapunto. Se sostiene en la bancada y se encarga de no dejar en voladizo la pieza a maquinar.
- 3.1.5 Carro móvil. Se puede desplazar en el plano XZ del torno sobre el carro principal.
- 3.1.6 Portaherramientas. Elemento de sujeción para las herramientas de corte para los diferentes procesos, buriles, pastillas, etc.

(Ospina, 2006)

Para el proceso de repujado se encuentran disponibles tornos horizontales de tamaños estándar que pueden hacer girar láminas que van de 6,4 mm hasta 1,8 m de diámetro. Existen en el mercado tornos especiales con un agujero que permite

el repujado de materiales tan grandes como 4.9 metros de diámetro. Los tornos se deben encontrar equipados con control variable de la velocidad para permitir cambios rápidos que se consideren necesarios por parte del operador. (American Society For Metals, 2001)

## 3.2 PROCESO DE REPUJADO

Repujado es un proceso de formación de lámina metálica sin fisuras en cilindros huecos, conos, hemisferios u otras formas circulares, mediante una combinación de fuerza y rotación. En la base de las técnicas utilizadas, las aplicaciones y los resultados obtenidos, el proceso se puede dividir en dos categorías, Repujado manual (Con o sin asistencia mecánica para incrementar la fuerza) y Repujado automático. (American Society For Metals, 2001)

### 3.2.1 Repujado manual

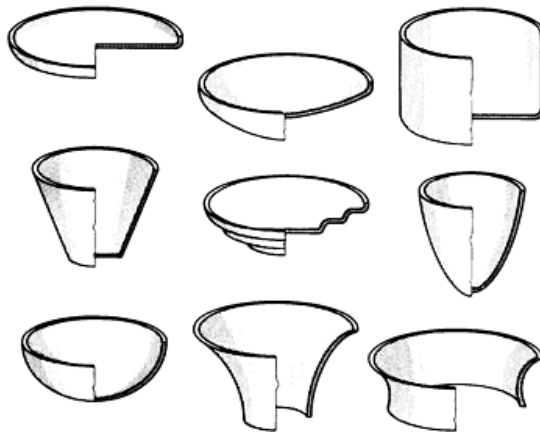
El repujado manual no implica ningún adelgazamiento apreciable de la lámina metálica. La operación se realiza con el uso de un torno, y consiste en presionar una herramienta contra una lámina circular metálica que gira sobre el cabezal del molde, obligando a la lámina a copiar la determinada forma del molde. Varios dispositivos mecánicos se utilizan para aumentar la fuerza que se puede aplicar sobre la lámina. La mayoría de los procesos de repujado se realiza sobre la lámina en frío, solo en ciertas ocasiones el metal es calentado con 2 objetivos, aumentar la ductilidad de metales duros o con secciones gruesas y disminuir el esfuerzo de trabajo sobre los metales para tener un mejor adelgazamiento en el repujado.

#### 3.2.1.1 Aplicabilidad del repujado

El repujado manual se utiliza para laminados en rines, tazas, conos, y superficies de doble curvatura de revolución como campanas. Entre los productos finales se

encuentran reflectores de luz, tapas de tanques, carcasas, escudos, y componentes para instrumentos musicales. El repujado manual también es ampliamente utilizado para la producción de componentes para la industria aérea y aeroespacial, a menudo con asistencia mecánica para el aumento de la fuerza debido al gran tamaño del material.

Ilustración 1. Chapas cónicas y cilíndricas formadas con repujado manual



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

El espesor máximo de trabajo recomendado para láminas de acero de bajo carbono es de 3.2 mm (1/8 in) y con estas laminas de acero se puede generar hasta un diámetro de 1.8 m (72 in). Los diámetros obtenidos con el repujado pueden ser mayores cuando la hoja de acero es más delgada, pero este se ve limitado por la disponibilidad de equipo. El límite superior de espesor a repujar aumenta a medida que aumenta la ductilidad del metal o disminuye la resistencia de este. Por ejemplo, en el repujado manual de aluminio es factible trabajar con un grosor de 6,4 mm (1/4 in). (American Society For Metals, 2001)

### 3.2.1.2 Ventajas del repujado manual

El repujado manual posee ciertas ventajas que lo hacen competitivo frente a otros procesos, como la embutición.

- Las herramientas son de bajo costo y la inversión en equipos es relativamente pequeña.
- El tiempo de configuración para inicio de trabajo es corto.
- Cambios en los diseños de las piezas de trabajo pueden realizarse con mínimos gastos.
- Cambios en la composición del metal de trabajo o en el espesor de las láminas requiere cambios mínimos en las herramientas de trabajo.
- Apto para pequeñas producciones, como el caso de la industria de lámparas.

#### 3.2.1.3 Desventajas del repujado manual

Las desventajas del proceso de repujado manual son las siguientes.

- Se requieren operadores calificados y con experiencia en el proceso ya que la uniformidad de los resultados depende en gran medida de la habilidad del operario de máquina.
- El repujado manual es más lento que procesos de formación con presión como el proceso de embutición.
- Es probable que en el repujado manual la disponibilidad de la fuerza sea insuficiente para llevar a cabo el proceso.
- No es apto para grandes producciones, en este caso es mejor el proceso de embutición para perfiles de revolución.

#### 3.2.1.4 Equipo para repujado manual

El molde se encuentra montado en el cabezal del torno. La lámina circular (lámina de trabajo) está anclada al molde, aprisionada por este y un bloque que se encuentra sostenido por el contrapunto para evitar que se mueva. Generalmente

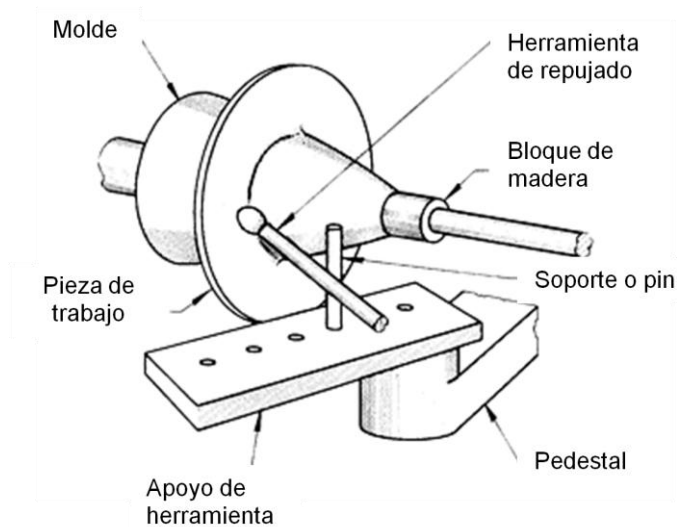


se utiliza cierto material antifricción para ayudar a evitar que la lámina se mueva. El resto del herramental y el pedestal de apoyo permite sostener pines para el traslado a diversas posiciones según sea necesario de la herramienta de repujado para realizar el movimiento de balanceo. (American Society For Metals, 2001)

Ilustración 2. Configuración repujado manual

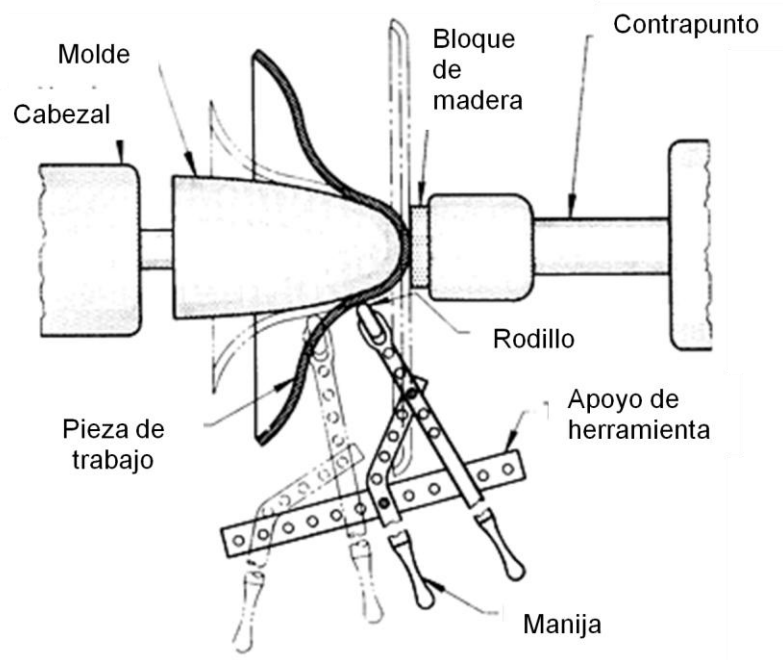


Ilustración 3. Esquema piezas de trabajo repujado manual



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

Ilustración 4. Configuración usando tijeras y con herramienta de rodillo



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

### 3.2.1.5 Moldes

Normalmente hecho en madera. La mayoría de moldes de madera están contruidos por proceso de aglomeración, con pegante, de tiras de 25 a 50 mm de grosor para crear una estructura transversal laminada. Luego de tener el bloque, este se maquina por torneado de madera a la forma que se necesite para el proceso de repujado. Ocasionalmente se utilizan refuerzos de acero en los extremos y en los pequeños radios y curvaturas para facilitar el mantenimiento y garantizar dimensiones durante el repujado en serie de piezas.

Algunos moldes, ya sean de madera o que alternen placas de acero con anillos, se utilizan con el fin de obtener una forma más duradera, sin embargo no es más

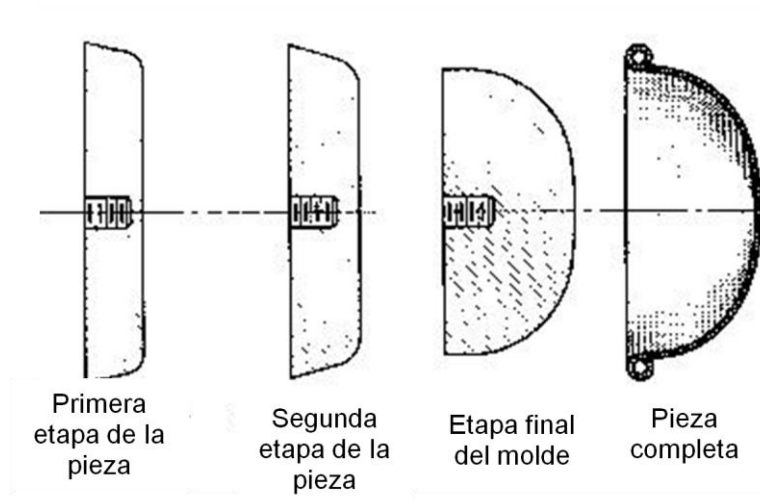
económico. Otros incluyen composiciones de fibras, acero, hierro fundido, aluminio, magnesio y recubrimientos de plástico. Pocos son los moldes totalmente de metales pesados como el acero o el hierro fundido, a excepción de moldes de pequeña dimensión. Los moldes sólidos de acero o de hierro fundido deben de estar estáticamente equilibrados, y para el uso a gran velocidad, también deben estar equilibrados dinámicamente.

Ilustración 5. Molde en acero de una campana



En general, el molde para generar la forma de una pieza completa, cuando esta posee una forma muy compleja o cuando es necesario un tratamiento térmico intermedio, es necesario repartir el proceso en etapas utilizando una serie sucesiva de moldes diferentes. Los moldes para las primeras etapas de la pieza se llaman preforma o desglose moldes. (American Society For Metals, 2001)

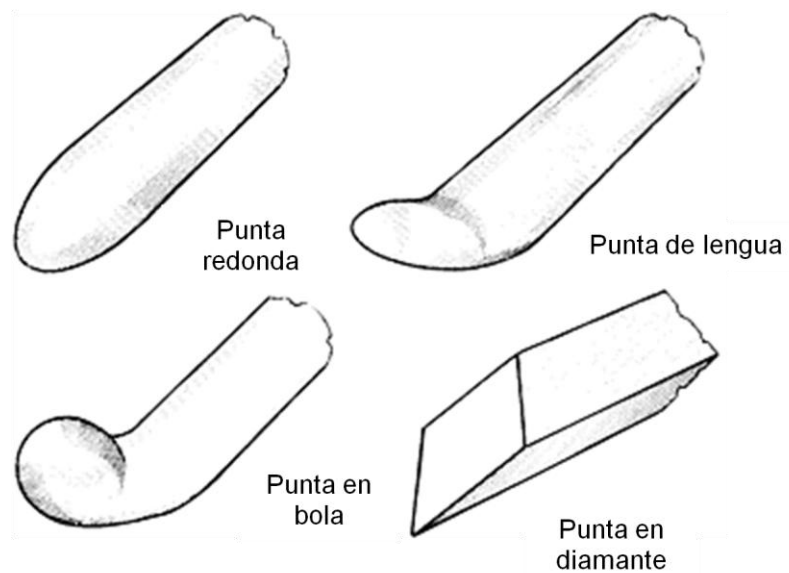
Ilustración 6. Partición del proceso por etapas con diferentes moldes



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

### 3.2.1.6 Herramientas para repujado manual

Ilustración 7. Típicas formas de herramientas para repujado manual



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

Las herramientas de repujado manual generalmente son realizadas forjando el acero de bajo carbono o aceros aleados para herramientas (como W1 u O1, Ver ANEXO 1), llevando la herramienta a su forma deseada y realizándole luego tratamiento térmico para alcanzar una dureza de 60 HRC aproximadamente; estas se pulen para darle un mejor acabado superficial. Hay varios tipos de formas típicas y de diferentes materiales de acuerdo al material de trabajo, es así como para trabajos en acero se utilizan herramientas de bronce aluminio, para metales dúctiles se puede utilizar madera dura. Las herramientas de rodillos, llamadas herramientas de anillo, generalmente son de acero endurecido o de bronce aluminio.

Ilustración 8. Tipos de herramientas de rodillos para repujado



(Maytool, 2009)

#### 3.2.1.7 Velocidades

Las velocidades que mejor se adaptan al repujado manual dependen principalmente de la composición y el espesor de la lámina de trabajo. Por ejemplo, una lámina de acero inoxidable se repuja con éxito con una velocidad de

60 m/min y una lámina de aluminio permitirá velocidades de 120 a 180 m/min. La velocidad es generalmente determinada por el operador de maquina teniendo en cuenta al máximo las condiciones de trabajo y su experiencia.

Del mismo modo, si el espesor de la lámina de trabajo se redujera a la mitad del grosor original sin sufrir ningún otro cambio, es posible duplicar, hasta triplicar, la velocidad del proceso. Se podría decir que la velocidad es inversamente proporcional al espesor del material de trabajo. La selección de una velocidad adecuada de trabajo depende básicamente de la experiencia del operador del proceso. Normalmente el proceso de repujado requiere cambios de velocidad constantes, es por este motivo que es necesario que la maquina posea un control de velocidad variable sobre el cabezal. (American Society For Metals, 2001)

#### 3.2.1.8 Lubricantes

Ilustración 9. Lubricación con jabón



Los lubricantes se deben utilizar en todas las etapas de repujado, independientemente de la composición del material de trabajo, la forma de trabajo, o el tipo de herramientas utilizadas. La práctica habitual consiste en aplicar el lubricante sobre la lamina antes de montarla sobre la maquina. En algunos casos, se añade lubricante adicional durante la operación, dependiendo de lo que juzgue el técnico operador. La propiedad más importante que debe poseer un lubricante utilizado para repujado, es su capacidad de adherirse a la lámina pese a su rotación. Grasa común se utiliza con frecuencia, otros lubricantes utilizados para el repujado incluyen jabones, ceras y cebos, sin embargo, luego de terminado el proceso son más difíciles de eliminar que la simple grasa. (American Society For Metals, 2001)

### 3.2.2 Repujado automático

El repujado automático también es conocido como repujado por cizalladura, ya que en este método la lámina de metal se adelgaza intencionalmente por altas fuerzas de cizalladura tales como 3,5 MN (400 tonf). El repujado automático tiene dos grandes aplicaciones: el repujado de tubo y el repujado de cono.

Prácticamente todos los metales dúctiles pueden ser procesados por el repujado automático. Laminas tan grandes como 6 metros de diámetro y 25 mm de espesor se pueden repujar sin la aplicación de calor externo. Cuando el material se calienta por una fuente externa se pueden llegar a repujar hasta 140 mm de espesor. Las formas cónicas y las formas curvilíneas son las más comúnmente producidas a partir de preformas en el repujado automático. Para la utilización de repujado automático en procesos de manufactura debe ser bien conocida la mecánica del proceso y se deben seguir las normas en la planificación.

### 3.2.2.1 Mecánica de repujado de cono

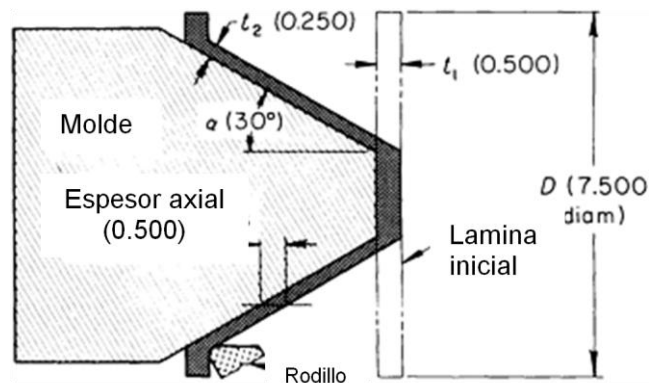
La deformación de la lámina metálica es tal que se rige por la ley del seno, que establece que el espesor de la pared de la lámina antes de deformación,  $t_1$ , y el espesor de la pieza terminada,  $t_2$ , se relacionan de la siguiente manera:

$$t_2 = t_1(\sin \alpha)$$

ASM HANDBOOK, Forming and Forging

Donde  $t_1$  es el espesor de la lámina en estado inicial,  $t_2$  es el espesor de la pieza repujada y  $\alpha$  es la mitad del ángulo de vértice del cono. De acuerdo con esto, el espesor axial de la lámina es igual al espesor inicial.

Ilustración 10. Relaciones de la operación de repujado automatico en cono.

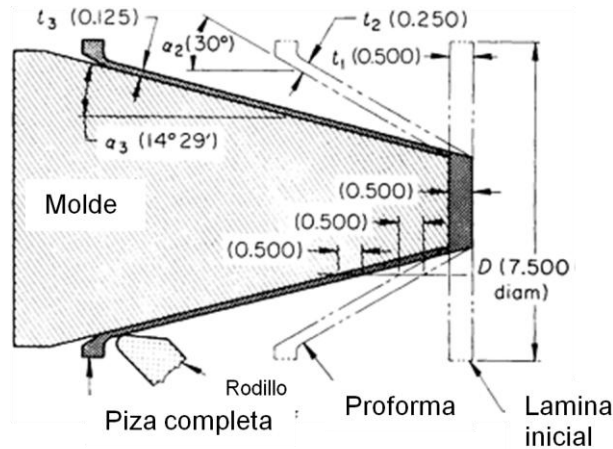


ASM HANDBOOK, Forming and Forging

Cuando en el proceso de repujado de conos el ángulo  $\alpha$  es menor a  $30^\circ$  se recomienda que el proceso se realice en dos pasos: Primero a un ángulo de  $30^\circ$  y luego al ángulo que se necesite. Cuando se utiliza esta técnica es recomendable utilizar un recocido para la disminución de esfuerzos y dureza del material en medio de las etapas del proceso. (American Society For Metals, 2001)



Ilustración 11. Segunda etapa del proceso a ángulo menor de 35°



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

Esta práctica en etapas permite una alta reducción del espesor, manteniendo al mismo tiempo un límite práctico de 50 a 75% utilizando el proceso de recocido. La reducción total entre las sucesivas operaciones de recocido es determinada por los límites máximos de deformación aceptables por el metal.

El espesor axial de la lámina luego del proceso de repujado es igual al espesor inicial. La ley del seno también aplica para múltiples operaciones de repujado seguidas, es así como para una reducción de espesor máxima de 75% es necesaria primero una reducción de 50% y las relaciones de ley del seno son las siguientes.

$$t_2 = t_1(\sin \alpha_1) \text{ y } t_3 = t_1(\sin \alpha_2)$$

ASM HANDBOOK, Forming and Forging

Donde  $t_1$  es el espesor inicial de la lámina,  $t_2$  ( $t_1 = 2t_2$ ) el espesor de la preforma con reducción del 50%,  $t_3$  ( $t_1 = 4t_3$ ) el espesor final con reducción del 75%,  $\alpha_1$  es el ángulo medio de 30° para una reducción de 50% y  $\alpha_2$  es el ángulo medio de 14,47° para una reducción total de 75%. (American Society For Metals, 2001)

Tabla 1. Reducción en el espesor de la lámina después del repujado

Metal de trabajo	Maxima reduccion del espesor %		
	Conos	Semiesfera	Tubos
<b>Aleaciones de Acero</b>			
4130	75	50	75
4340	65	50	75
6434	70	50	75
D-6ac	70	50	75
H11	50	35	60
Acero al niquel (18% Ni)	65	50	82
<b>Aceros inoxidables</b>			
321	75	50	75
347	75	50	75
410	60	50	65
17-7 PH	65	45	65
A286	70	55	-
<b>Aleaciones resistentes al calor</b>			
A-286	70	55	70
René 41	40	35	60
Waspaloy	40	35	60
<b>Aleaciones de aluminio</b>			
1100	75	50	75
2014	50	40	70
2024	50	-	70
2219	50	40	70
3003 y 3004	75	50	75
5052 y 5056	50	35	75
5086	65	50	60
5154	65	50	75
5256	50	35	-
6061	75	50	75
7075	65	50	75
<b>Aleaciones de titanio (Repujado en caliente)</b>			
Comercial puro	45	-	65
Ti-6Al-4V	55	-	75
Ti-6Al-4V-2Sn	50	-	70
Ti-3Al-13V-11Cr	30	-	30
<b>Otros Metales (Repujado en caliente)</b>			
Berilio	35	-	-
Molibdeno	60	45	60
Tungsteno	50	-	-
<b>Otros metales</b>			
Cobre	75	-	-

ASM HANDBOOK, Forming and Forging

### 3.2.2.2 Efectos de desviación de la Ley de Seno

La desviación de la ley del seno siempre se expresa en términos de “exceso de reducción” o “baja reducción”. En exceso de reducción, el espesor final de la pieza es menor que la condición impuesta por la ley del seno; en baja reducción, el espesor final es mayor. En exceso de reducción, la pestaña de la lámina se inclina hacia adelante, en baja reducción, la pestaña se inclina hacia atrás. Si la pieza que es repujada tiende en gran medida a baja reducción, la pestaña se arrugara, este fenómeno es llamado en el medio artesanal como rizado.

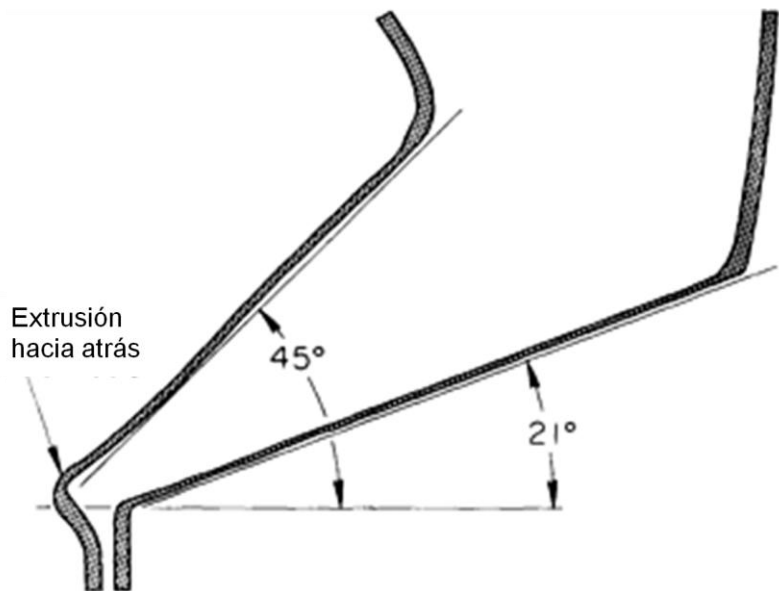
Ilustración 12. Rizado por baja reducción y ruptura por exceso de reducción.



En el repujado automático, el exceso de reducción tiene un efecto adicional sobre la forma de la pieza, puede ocurrir una “extrusión hacia atrás”, la cual es una deformación en la pieza de trabajo. Este fenómeno normalmente se da en acero de bajo carbono. Para una considerable disminución de espesor, la probabilidad de que ocurra una extrusión hacia atrás aumenta con el aumento del ángulo del molde.

El fenómeno de extrusión hacia atrás en repujado de alta presión se explica en términos de alta compresión en el proceso, la cual empuja hacia atrás la sección repujada de la lámina. Es posible obtener formas curvilíneas en un molde cónico variando la cantidad de sobre reducción durante el repujado, como una deformación realizada a propósito. (American Society For Metals, 2001)

Ilustración 13. Extrusión hacia atrás



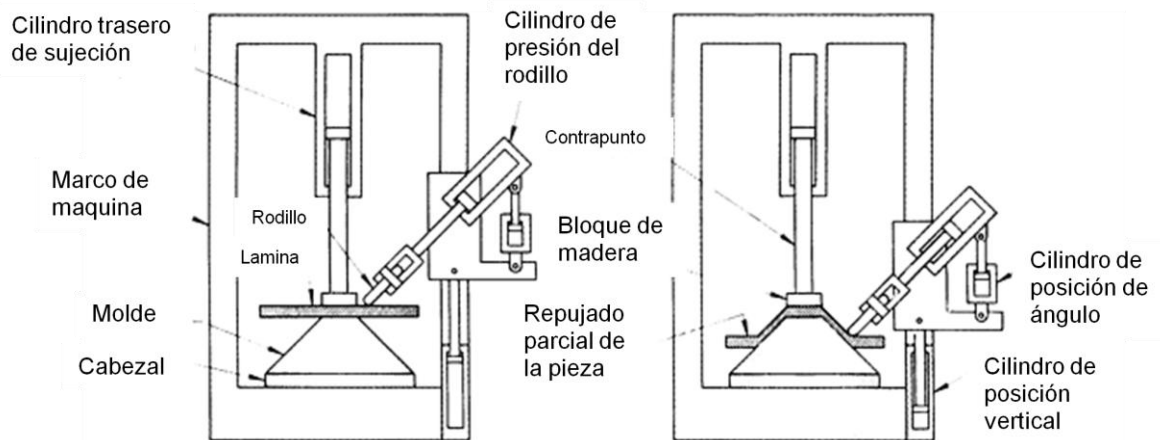
ASM HANDBOOK, Forming and Forging

### 3.2.2.3 Maquinas para repujado automático

El repujado automático se hace en máquinas especialmente diseñadas y construidas para este fin. Los componentes importantes de una máquina de este tipo se muestran en la siguiente figura.

Las máquinas para el repujado automático suelen describirse especificando la longitud y diámetro de la pieza más grande que se puede trabajar en esta y la fuerza máxima que se puede aplicar sobre la lámina de trabajo. También es común indicar que la máquina puede, en una sola pasada, reducir el espesor de metal en un 50%.

Ilustración 14. Perfil esquemático de una máquina para repujado automático



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

Las máquinas de repujado pueden tener una configuración horizontal o vertical. Máquinas utilizadas para repujado de piezas de 1,8 m de diámetro o más, son generalmente verticales, ya que se adaptan mejor a la manipulación de grandes trabajos. La mayoría de las máquinas utilizadas para la producción de repujado son semiautomáticas, es decir, el ciclo de repujado se controla automáticamente,

pero son cargadas y descargadas por el operario. (American Society For Metals, 2001)

#### 3.2.2.4 Herramientas para repujado automático de conos

Moldes, rodillos, y otros instrumentos son sometidos a esfuerzos mayores en el repujado automático que en el repujado manual, por lo tanto, hay que tener más cuidado a la hora de hacer el diseño y escoger los materiales para la construcción.

En el repujado automático los problemas más frecuentes con los moldes de forma cónica son las fallas por grietas o por desgaste. Los moldes deben poseer alta dureza con el fin de resistir el desgaste, y deben resistir la fatiga resultante de los casos de carga excéntrica. La selección de los materiales para los moldes cónicos depende en primer lugar del número de piezas que se vayan a repujar. Sobre la base de la cantidad, los más utilizados son:

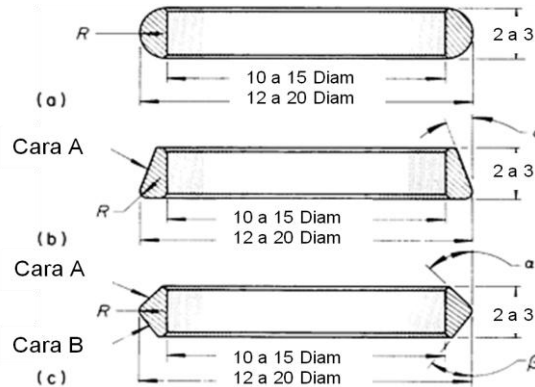
- Fundición de hierro gris para baja producción (10 a 100 piezas).
- Aleación de hierro fundido, para el repujado de 100 a 250 piezas.
- Acero 4150 o 52100 endurecido a 60 HRC, para 250 a 750 piezas.
- Aceros para herramientas tales como O6, A2, D2 o D4 endurecido a 60 HRC o ligeramente superior, para una alta producción.

El acabado superficial de los moldes debe tener una rugosidad máxima de 1,5  $\mu\text{m}$ .

Existen tres tipos básicos de rodillos los cuales se muestran en la ilustración anterior. Los rodillos son generalmente diseñados en función del tipo y el tamaño del torno repujador. Básicamente la forma de los rodillos depende en gran medida de la forma de la pieza a ser repujada; con curvatura completa se utilizan para producir formas curvilíneas con escalones, mientras que los rodillos con

superficies planas o con puntas se prefieren para el repujado de los conos. (American Society For Metals, 2001)

Ilustración 15. Tipos básicos de rodillos para repujado de lámina



ASM HANDBOOK, Forming and Forging

### 3.2.2.5 Velocidades y avances para repujado automático

Para la mayoría de los materiales las velocidades altas de proceso son mejores, pero velocidades bajas también se utilizan, salvo para el repujado de piezas de pequeño diámetro, las cuales exigen altas velocidades. Prácticamente las velocidades entre 305 a 610 m/min son las más ampliamente utilizadas, independiente de la composición de la lamina metálica de trabajo, la forma de la pieza, o la reducción por paso.

El avance de la herramienta, en la mayoría de las operaciones de repujado de cono, se encuentra entre 0,25 y 2 mm por revolución, sin embargo, en la práctica los pasos de avance son normalmente descritos en mm/min. La mayoría de máquinas utilizadas están equipadas con dispositivos electrónicos o hidráulicos, los cuales sin escala pueden variar la velocidad de avance desde 38 hasta 380

mm/min. La velocidad de avance es muy importante para controlar el acabado y el ajuste de la pieza.

Para encontrar la combinación óptima de velocidad de rotación, avance y presión, lo más conveniente es girar experimentalmente en el inicio de cada nuevo trabajo, en este paso es muy importante la experiencia del operario. Durante una operación continua, factores del proceso como la temperatura en los moldes y en las herramientas ocasiona cambios en los parámetros iniciales, por lo tanto, después de la primera hora, a menudo es necesario ajustar la presión, la velocidad y el avance para conservar resultados uniformes. (American Society For Metals, 2001)

#### 3.2.2.6 Refrigeración y lubricantes para repujado automático

El proceso de repujado generalmente utiliza un fluido que sirve tanto para refrigerar como para lubricar, esto debido a la gran cantidad de calor que se genera por la alta fricción. El fluido base más comúnmente utilizado es el agua, generalmente, una solución coloidal de zinc en pasta de litio o pasta de disulfuro de molibdeno se mezclan con agua para que funcione como lubricante. Estas combinaciones de lubricante-refrigerante se utilizan para la mayoría de los metales, a pesar que las combinaciones libres de zinc, son las más adecuadas para el repujado de acero inoxidable. Lubricante SHELL® con estas especificaciones, Ver ANEXO 2.

Diversos aceites y mezclas de petróleo, como 10% de manteca de cerdo en queroseno, también se han utilizado con éxito. Independiente de la composición, el líquido debe ser de flujo libre y aplicado en grandes cantidades, o las piezas de trabajo y herramientas serán dañadas por el calor. En el proceso con aluminio o acero inoxidable, normalmente las piezas son recubiertas con lubricantes antes de iniciar el proceso. (American Society For Metals, 2001)



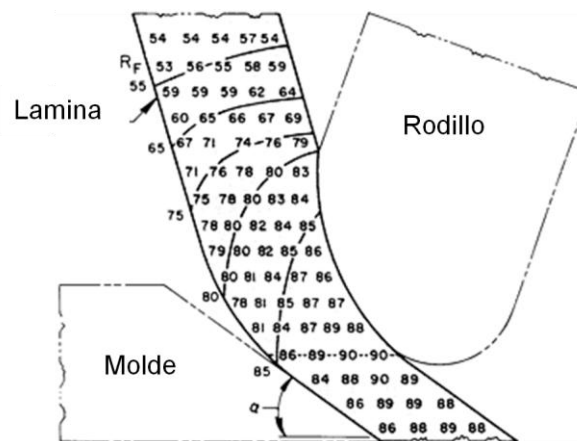
### 3.2.2.7 Efectos del repujado en las propiedades del metal

El repujado es un proceso de deformación en frío, por lo tanto tiene un marcado efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. El tamaño del grano y la dirección son redefinidos por el giro del repujado. El acabado superficial de la pieza de trabajo suele ser suficiente para no necesitar mecanizados adicionales luego del proceso.

En el repujado, la tracción y los puntos duros aumentan mientras disminuye la ductilidad. La magnitud del efecto depende de la cantidad de reducción de la pared y la susceptibilidad del metal de trabajo al endurecimiento por deformación en frío.

Para medir el endurecimiento en la zona de deformación, Rockwell F (HRF, dureza con bola de 1/16 in, con carga de 60 kg) se recogieron datos en la sección transversal de una de pieza de cobre repujado con reducción del 43%. Es evidente que el área cerca del rodillo de contacto tiene mayor dureza que el área en el lado de mandril. (American Society For Metals, 2001)

Ilustración 16. Distribución dureza en pieza de cobre reducida 43% en repujado

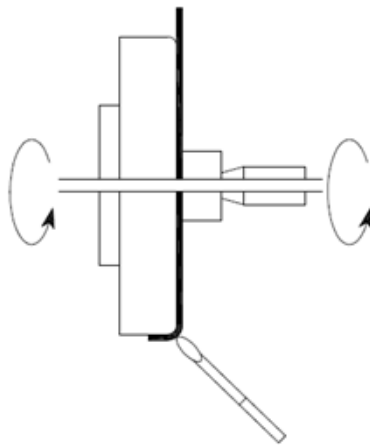


ASM HANDBOOK, Forming and Forging

#### 4 PROCESOS DE REPUJADO

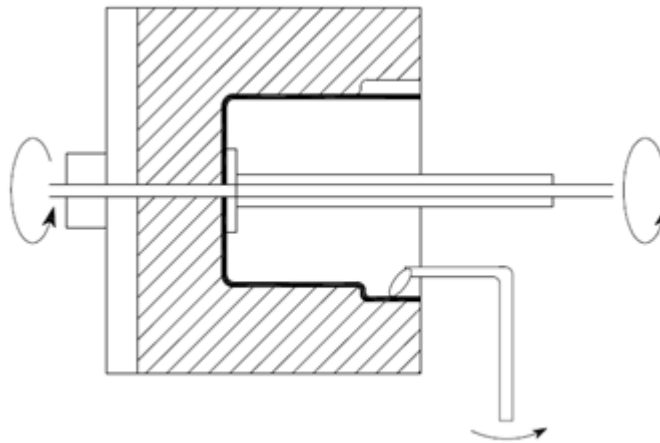
A continuación se presentan los diferentes tipos de repujado. La diferenciación de cada uno de ellos depende del molde y de la posición en la que se realiza la operación.

Ilustración 17. Redondeo exterior



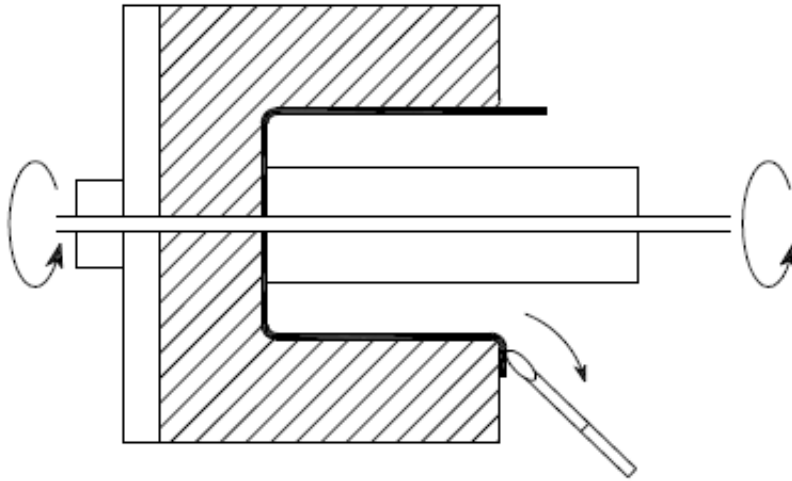
(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

Ilustración 18. Expansión



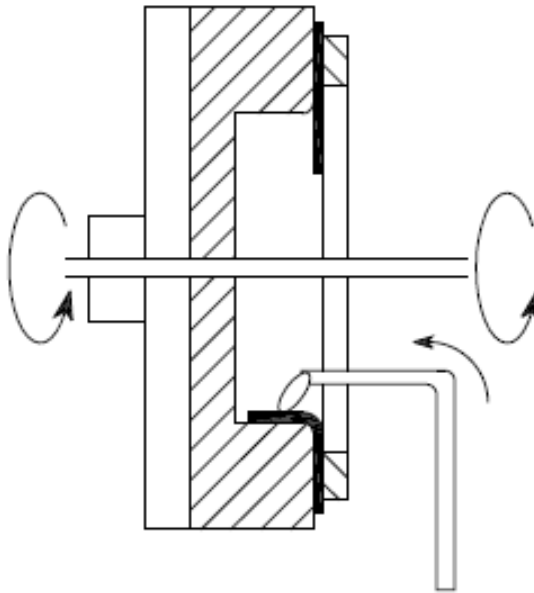
(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

Ilustración 19. Bordeo externo



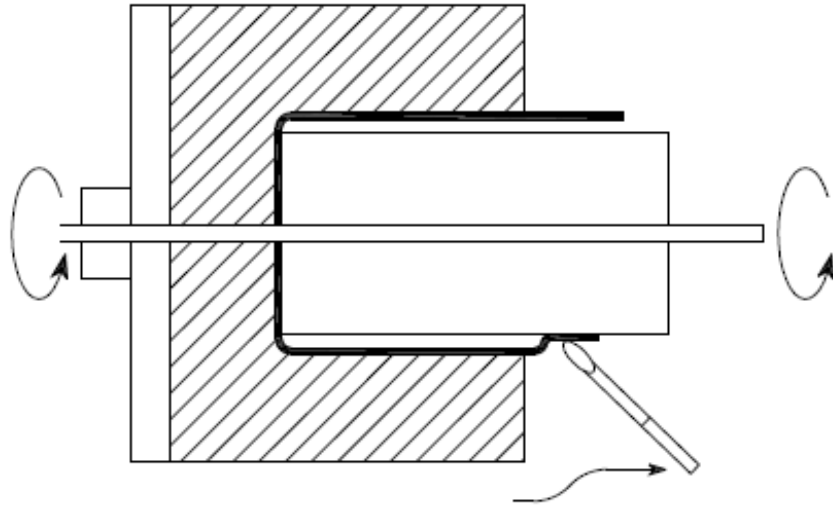
(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

Ilustración 20. Bordeo interno



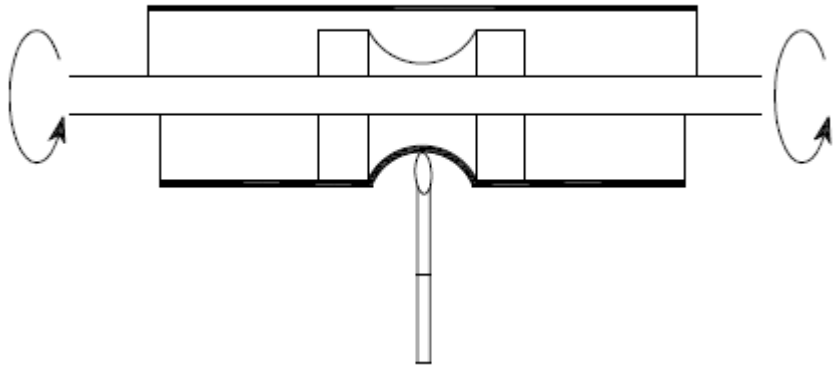
(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

Ilustración 21. Cuellos



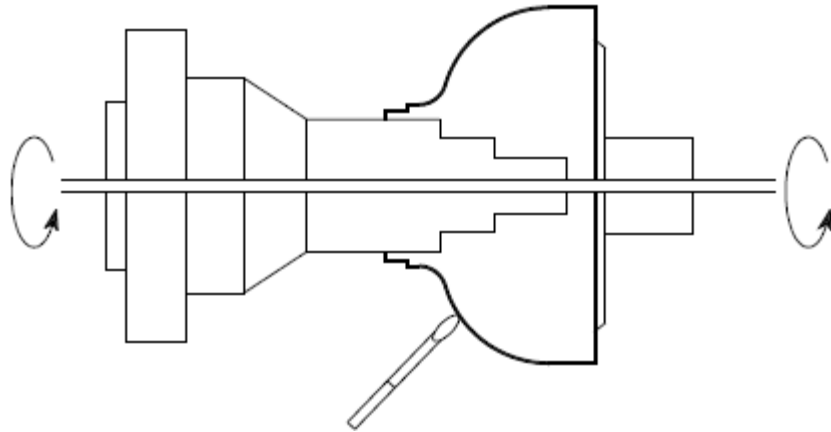
(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

Ilustración 22. Reducción



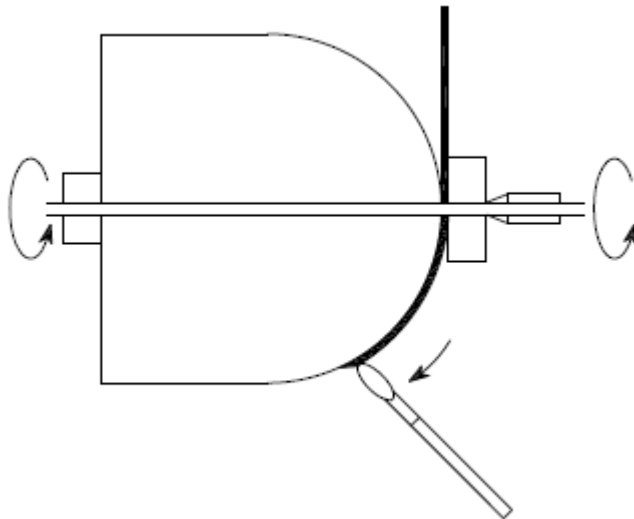
(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

Ilustración 23. Estampado



(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

Ilustración 24. Repujado de secciones huecas



(Toledo Metal Spinning Company, 2009)

## 5 DISEÑO SISTEMA DE MOVIMIENTO HERRAMENTAL

### 5.1 CLARIFICACIÓN DE LA TAREA

Actualmente el sector de la industria colombiana dedicado al repujado de lámina en torno posee un sistema de procesamiento netamente artesanal, con conocimientos validos obtenidos a través de largos años de experiencia; son pocas las empresas que cuentan con modernas tecnologías CNC. Por esta razón se ve la necesidad de explorar los campos de la automatización del proceso, para generar mejoras en la calidad del producto, la eficiencia del proceso y el bajo esfuerzo necesario por el operario para desarrollar el proceso.

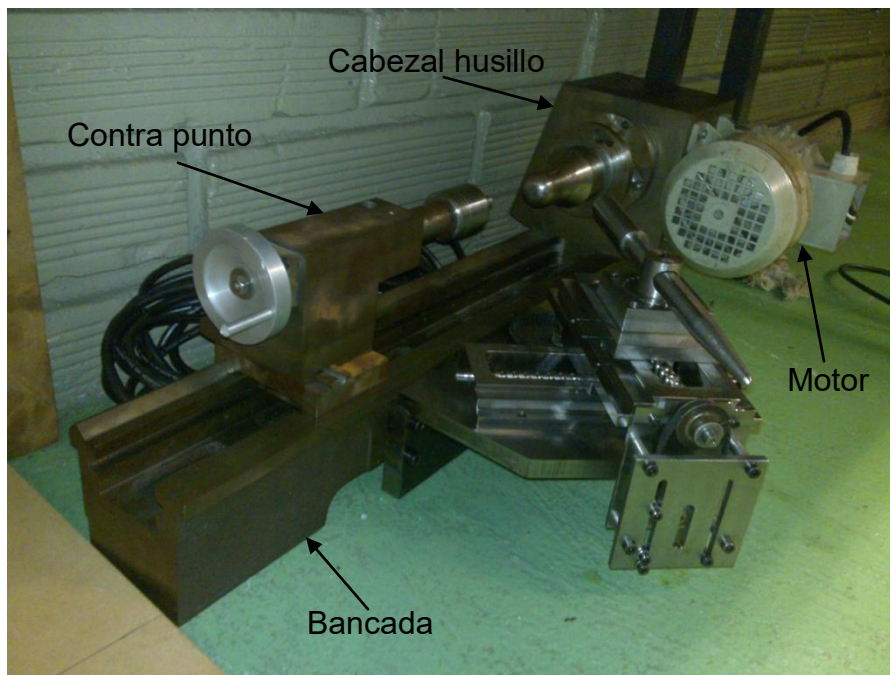
El deseo principal del proyecto es diseñar y acoplar los mecanismos necesarios para la realización de repujado automático a un torno existente, ubicado en el centro de laboratorios de la Universidad EAFIT y disponible para trabajar sobre él, sin entorpecer los procesos educativos de la Universidad. El diseño de los mecanismos para realizar los movimientos necesarios para generar el proceso, es decir, un sistema de movimiento y posicionamiento en un plano el cual sea capaz de reproducir ciertas trayectorias las cuales dependen de la forma que se desee repujar.

Ilustración 25. Bancada de torno



El proyecto parte de una bancada de torno existente, la cual tiene montados el sistema de contrapunto y el sistema de potencia del husillo. Motor SIEMENS ® trifásico, a 220 V, con un variador de velocidad. La transmisión se realiza por un sistema de banda en V al husillo. El husillo fue modificado para el montaje rápido de los moldes. Especificaciones del torno, Ver ANEXO 3.

Ilustración 26. Configuración de torno existente.



## 5.2 LISTA DE REQUERIMIENTOS

### 5.2.1 Energía

El diseño se realizara con servomotores disponibles en el centro de laboratorios de la universidad EAFIT, con las siguientes características, Ver ANEXO 4.

### 5.2.2 Materia prima

Maquina apta para repujar lámina de aluminio de máximo 1 mm de espesor y diámetro máximo de 140 mm.

La lámina de aluminio posee las siguientes características: Aluminio con 99% de pureza, modulo de elasticidad de 370 GPa, esfuerzo ultimo 300 GPa, esfuerzo flexión 400 GPa, esfuerzo a compresión 1900 GPa. (Bauccio, 1994)

Todas las piezas a fabricar se realizaran en acero comercial 1020, incluso las herramientas, las cuales para trabajo de aluminio deben ser de aceros con un grado de dureza aproximado de 60 HRC. Ver ANEXO 5.

### 5.2.3 Movimiento

Es obligación que el sistema pueda posicionar una herramienta en un punto de un plano; el desplazamiento mínimo requerido a lo largo del eje principal del torno es de 110 mm.

El sistema de movimiento será apto para cumplir con los procesos de repujado de redondeo externo y repujado de secciones huecas, esto debido a que son los procesos más comunes dentro de la industria del repujado en torno.

### 5.2.4 Control

Las señales del sistema las recibirá de forma visual el operador y se controlara los movimientos de los servomotores y la velocidad de giro del motor mediante una caja de control existente.



### 5.2.5 Ergonomía y operación

La forma en la que el operario interactúa con la maquina debe ser de fácil acceso, ya que el operario será el encargado de realizar el montaje y dirigir el proceso.

### 5.2.6 Mantenimiento

La maquina debe ser de fácil limpieza y lubricación, con el fin de evitar corrosión para hacer más duradera la vida de los componentes.

### 5.2.7 Costos de implantación

Bajos costos de implantación no superiores a \$ 500.000, en lo posible se tratara de trabajar con los recursos de la Universidad, con el fin de minimizar gastos.

### 5.2.8 Eficiencia del sistema

La transmisión de potencia del sistema debe ser lo más eficiente posible, cerca al 90%, esto con el fin de tener dispositivos más pequeños que faciliten su movilidad.

### 5.2.9 Diseño modular

El sistema debe ser completamente independiente al torno para no limitar este a las funciones de repujado. Además debe ser de fácil montaje y ensamblaje.

Los moldes de diferentes formas deben ser intercambiables y fijados al torno por sistema de rosca-tuerca, para facilidad de montaje.

### 5.2.10 Resistencia de dispositivos

A través de la herramienta de repujado el sistema recibirá grandes cargas, las cuales tendrá que soportar sin cambios en su geometría.

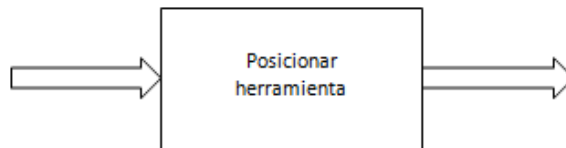
### 5.3 ESPECIFICACIONES DETALLADAS

Tabla 2. Especificaciones detalladas de diseño de producto (PDS)

NECESIDAD		Interpretación técnica	Métrica	Unidad	Valor
Deseo	Demanda				
	Desplazamiento en un plano	Permite realizar movimientos lineales en el eje X y Y de un plano	Distancia	mm	> 110
		Area de movimiento en el plano XY	Area	mm <sup>2</sup>	12100
	Que el sistema repuje	El sistema ejerce una presión sobre la lamina de trabajo para su deformación	Presión	MPa	> 150
	Que sea liviano	El artefacto es liviano	Peso (masa)	Kg	< 25
	Que no se dañe	Posee una vida útil prolongada	Vida útil	Años	10
	Que no sea costoso	Que no sobrepase de \$500.000	Costo final	Pesos	500.000
	Que sea fácil de limpiar	Fácil mantenimiento diario	Tiempo de mantenimiento diario	min	10
	Que el sistema sea eficiente	Alta eficiencia en la transmisión de potencia	Perdidas	%	10
Sin ruido		La emisión de ruido debe ser baja	Intensidad sonora	Decibeles	30
Que el proceso sea rápido		Eficiencia en el procesamiento	Tiempo de proceso	min	5
Que sea fácil de usar		Facilidad de uso	Tiempo necesario para aprender su uso	min	10
Que no genere defectos		Maquina precisa	Distancia	mm	< 0.25

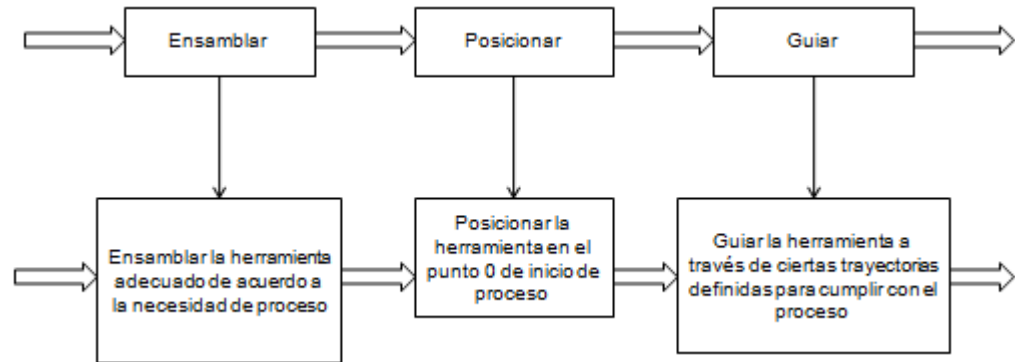
### 5.4 FUNCION PRINCIPAL

Ilustración 27. Función principal del sistema



La función principal del sistema consiste en dar una posición a la herramienta encargada del proceso de repujado de acuerdo con las necesidades de posicionamiento impuestas por el molde y el operario.

Ilustración 28. Estructura funcional



## 5.5 CAJA NEGRA

Ilustración 29. Cajas negras de las funciones del sistema

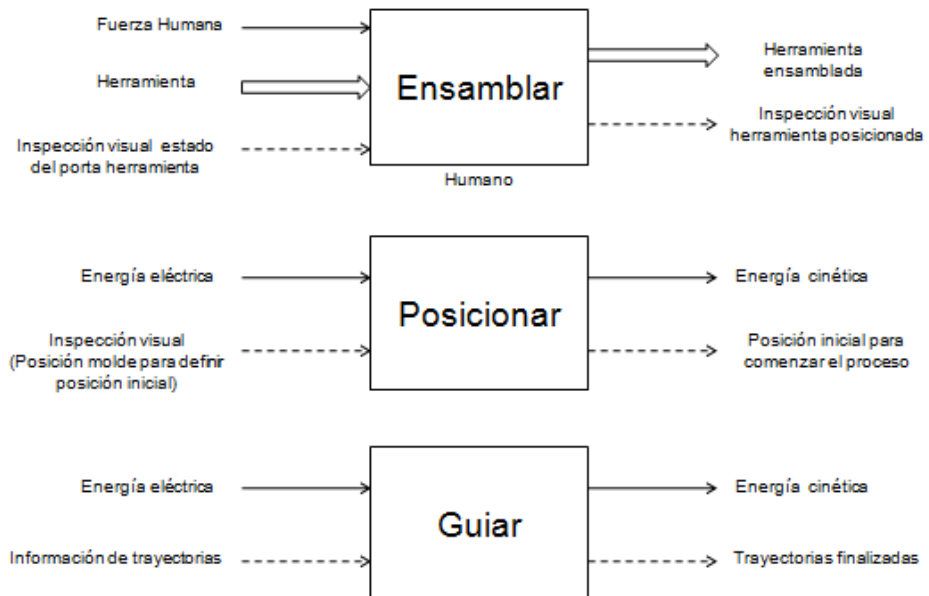
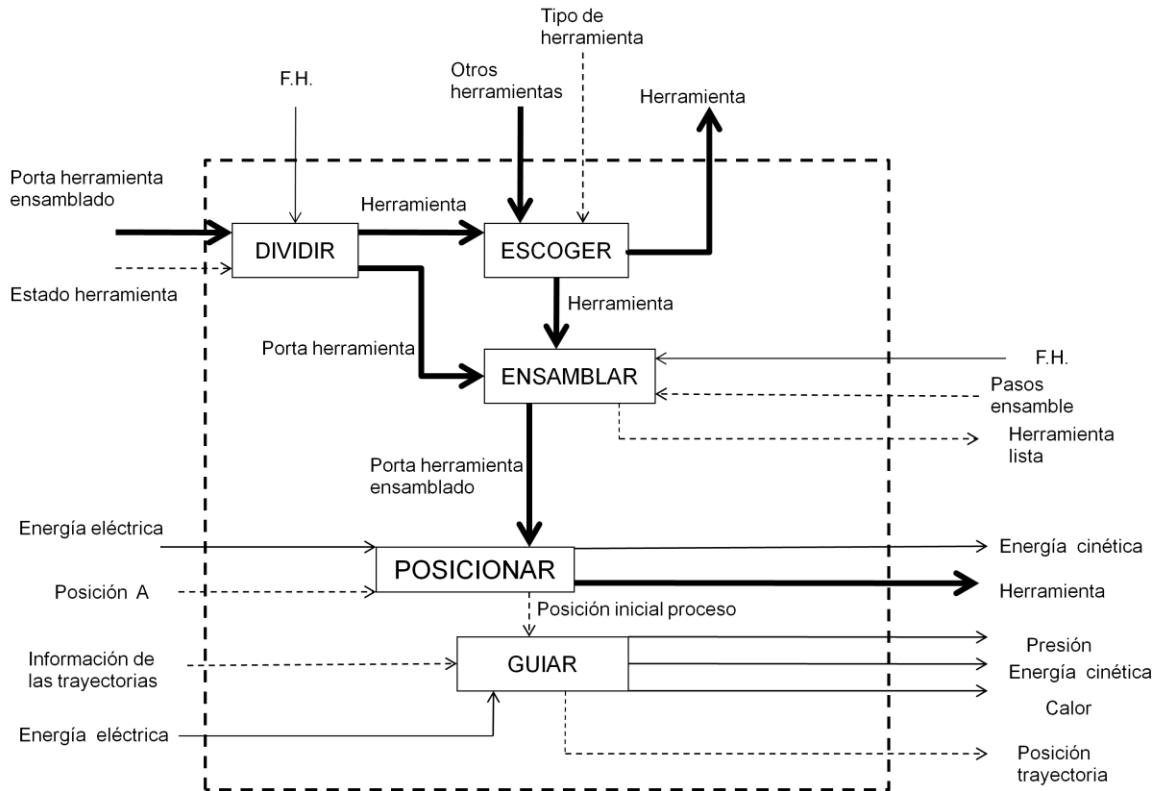


Ilustración 30. Síntesis funcional



## 5.6 LLUVIA DE IDEAS

1. Alternativa 1. Generación de movimientos en un plano XY por medio de un arreglo de actuadores neumáticos estándar, con control CNC y porta herramientas de acople rápido por inspección visual.
2. Alternativa 2. Generación de movimientos en un plano XY por medio de un arreglo de actuadores hidráulicos estándar, con control CNC y porta herramientas de acople rápido por inspección visual.

3. Alternativa 3. Generación de movimientos en un plano XY por medio de un arreglo de actuadores mecánicos estándar, con control CNC y porta herramientas de acople rápido por inspección visual.

## 5.7 MATRIZ MORFOLÓGICA

Ilustración 31. Matriz morfológica del proceso completo.

Funciones parciales	Tipos de solución			
DIVIDIR Desmontar herramienta actual para poner necesaria	Acople rápido	Pernos	Estrias	Conos Morse
ESCOGER Herramienta adecuada para el proceso	Inspección visual y manual	Torreta intercambiable	Sistema automático	
ENSAMBLAR Montar herramienta adecuada sobre el portaherramientas	Acople rápido	Pernos	Estrias	Conos Morse
POSICIONAR Transformación energía eléctrica en mecánica y desplazamiento lineal, energía cinética	Tornillo de potencia rosca cuadrada	Tornillo de bolas	Cadena	Engranaje cremallera
GUIAR Información sobre generación de trayectorias	Manual control por joystick	Control numérico computarizado	Control analógico con botones	

Alternativa 4. Línea Azul.

Este concepto constará de una mesa XY con un portaherramientas de acople rápido con el fin de montar y desmontar las herramientas de forma fácil y sencilla.

La herramienta más adecuada para el proceso a realizar se escogerá por el operario de acuerdo a los parámetros de proceso. Se vuelve a ensamblar la herramienta escogida con el portaherramientas. Por medio de tornillos de bolas se posiciona la herramienta al punto de inicio y posteriormente se procede a generar las trayectorias con un control de manera manual por medio de un joystick.

#### Alternativa 5. Línea Negra.

En este diseño de la mesa XY, el portaherramientas está fijado por medio de pernos que serán ajustados o desajustados por el usuario con una llave hexagonal, se mirara que la herramienta que este ubicada en el portaherramientas sea la adecuada de lo contrario se procederá a cambiar dicha herramienta por la que se acople más a las necesidades de trabajo y luego de cambiar la herramienta se volverá a apretar los pernos con la llave. Seguido se llevara a posicionar la herramienta con la lamina de aluminio por medio de un tornillo de bolas movido por servomotores y controlados por medio de joysticks.

#### Alternativa 6. Línea Café.

La mesa XY tiene un portaherramientas que va adherido a la mesa por medio de un estriado para facilidad del usuario de girar y cambiar la herramienta, esta se cambia por medio de una torreta intercambiable. Luego de escoger la herramienta más adecuada para el trabajo que se vaya a realizar, se vuelve a ensamblar la herramienta a la mesa por el sistema de estriado y se procede a posicionar la herramienta en el punto cero de la lámina de aluminio por medio de un sistema de movimiento por cadenas controlado por medio de control numérico computarizado CNC para generar las trayectorias necesarias para el proceso de repujado de la lámina.

#### Alternativa 7. Línea Verde

En el diseño de la mesa XY, el portaherramientas estará constituido por conos Morse de acople rápido para el montaje y desmontaje de la herramienta, luego se escogerá la herramienta adecuada mediante una inspección visual y se ensamblara de nuevo en el cono Morse. Se procede a posicionar la herramienta con la lámina de aluminio al punto de inicio mediante un engranaje de cremallera y posteriormente se generaran las trayectorias mediante el control numérico computarizado (CNC).

## 5.8 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Las alternativas a analizar son las 3 alternativas de la lluvia de ideas y las 4 alternativas de la matriz morfológica, con un total de 7 alternativas, pero la evaluación se realizara al sistema de generación de movimiento de cada una de estas, no en la totalidad del sistema, ya que es esta parte la más importante dentro del diseño a realizar. Es así como tenemos las siguientes alternativas a analizar.

- Actuadores Neumáticos
- Actuadores Hidráulicos
- Actuadores Mecánicos
- Servomotores con tornillo bolas
- Servomotores con tornillo rosca cuadrada
- Servomotores con piñón cremallera
- Servomotores con cadenas

Los objetivos para realizar la evaluación se definieron de acuerdo a las especificaciones más importantes que debe poseer el diseño. En el objetivo de disponibilidad se verificara la existencia de las partes de maquina en la universidad o la posibilidad de fabricación dentro de esta.

Tabla 3. Tabla de evaluación de alternativas ponderada

Objetivos		Bajo Costo	Disponibilidad universidad	Bajo Peso	Tamaño reducido	Eficiencia	TOTAL RESULTADOS PONDERADOS
Importancia		50%	10%	20%	10%	10%	100%
1	Actuadores Neumaticos	2	1	2	3	3	2,1
2	Actuadores Hidraulicos	1	1	1	2	5	1,5
3	Actuadores Mecanicos	2	1	2	3	3	2,1
4	Servomotores con tornillo bolas	2	4	4	5	5	3,2
5	Servomotores con tornillo rosca cuadrada	2	4	4	5	3	3
6	Servomotores con piñon cremallera	2	3	4	4	4	2,9
7	Servomotores con cadenas	2	3	4	4	4	2,9
Calificacion de 1 a 5 siendo 1 la calificacion mas baja y 5 la mas alta							

A pesar que todos los sistemas de movimiento presentes en la tabla son apropiados para realizar el proceso requerido y todos presentan un alto costo, el más apropiado dentro del marco de restricciones propuesto son los servomotores acoplado a un tornillo de bolas, esto debido a su alta disponibilidad en el centro de laboratorios de la universidad (Servomotores), a la posibilidad de construcción de los tornillos de bolas en el centro de mecanizado CNC, su reducido peso y tamaño en comparación con otros sistemas y a la alta eficiencia presente en los tornillos de bolas, cerca del 90%. (Mott, 1995).

Además los recursos energéticos para su funcionamiento (Energía eléctrica) están a disposición en cualquier lugar, en comparación con los recursos necesarios por los pistones (Bomba hidráulica o compresor).



## 5.9 DISEÑO DE DETALLE

El cálculo más importante para el diseño de la mesa XY es la potencia del motor para poder ejercer una presión necesaria para deformar la lamina de trabajo (Aluminio) y para realizar el movimiento.

### 5.9.1 Calculo torque necesario para repujado

Para calcular la potencia del motor se utilizara la siguiente fórmula:

$$Pot = Torque \times Velocidad\ angular$$

(Norton, 1999)

Definido el movimiento de la herramienta por un tornillo de bolas, se tiene que el torque necesario para mover una carga axial es el siguiente.

$$Tu = \frac{FL}{2\pi c} = 0.177FL$$

(Mott, 1995)

Donde:

F = fuerza a mover

L = Desplazamiento del tornillo (Axial luego de una vuelta completa = paso = 10mm)

c = eficiencia tornillo de bolas = 90%

En el proceso de repujado de lámina en torno el material se deforma por esfuerzo de cizalladura. Se puede inferir que el esfuerzo de cizalladura es aproximadamente la mitad del esfuerzo de fluencia, luego el esfuerzo es igual a 150 Mpa para una lámina de aluminio (Bauccio, 1994).

Si se posee un área de contacto puntual, definido aproximadamente como 1 mm<sup>2</sup>, se tiene, reemplazando en la fórmula de torque que:

$$Tu = 0.177 \times (150000000Pa \times A_{\text{contacto}})(10mm)$$

$$Tu = 0.177 \times (150000000Pa)(1mm^2)(10mm)$$

$$Tu = 0.2655Nm$$

El torque máximo entregado por los motores KL23H276-28-4B es 270 oz in, los cuales convertidos a unidades del sistema internacional (1ozin=0.0071Nm) son 1.917 Nm. Comparando el torque necesario Tu igual 0.2655 Nm con el entregado por los motores de 1.917 Nm, es evidente que se suple la potencia necesaria para realizar el proceso de repujado. (Keling Technology)

#### 5.9.2 Cálculo tornillo de bolas

Para la selección del sistema tornillo de bolas se tienen en cuenta los criterios de selección del catálogo del fabricante Bosch-Rexroth®. Los factores a tener en cuenta en la selección del conjunto son grado de precisión de posicionamiento, cargas, vida útil, carga axial y velocidad máxima lineal. (Bosch-Rexroth, 2005)

La precisión en el posicionamiento debe ser inferior 0.25 mm. El tornillo estará sometido a cargas dinámicas por el proceso de repujado y por el torque del motor. La carga del proceso de repujado no será muy grande, debido a las condiciones del aluminio y a que las cargas serán de forma axial en su mayoría. El torque del motor es 2Nm aproximadamente como se especificó antes. La máxima velocidad lineal del tornillo es aproximadamente 30 m/min, teniendo en cuenta un paso de 10 mm y 3000 rpm.

Con estos parámetros, utilizando el catalogo del fabricante, se tiene que el tornillo apto para la función es 12 x 10R x 2, donde 12 es el diámetro externo del tornillo en mm, 10R es el avance por revolución en mm y 2 mm es el diámetro de los balines. Ver ANEXO 6. (Bosch-Rexroth, 2005)

Para el caso del proyecto, los tornillos se fabricaran en el centro de laboratorios de la universidad EAFIT de una manera un poco empírica. Se remplazaran las bolas por balines de 3/16 de pulgada y el diámetro del tornillo y el avance se dejaran fijos, además como se fabricara en acero 1020 no se realizara ningún tipo de tratamiento térmico. Ver ANEXO 5.

Los planos de cada una de las piezas a fabricar se encuentran en el ANEXO 7

### 5.9.3 Ensamble

Recomendaciones para realizar el ensamble de componentes.

- A. Ensamblar los tornillos a cada una de las bases, verificando su correcta posición. Los tornillos de bolas van sujetos a cada una de las bases por rodamientos referencia 61800 con las siguientes características dimensionales; Diámetro externo 19mm, diámetro interno 10mm y espesor 5mm. (SKF). Los componentes se encuentran fabricados para un ajuste por interferencia entre los rodamientos, sus camas y los tornillos.
  
- B. Ensamblar las tuercas de cada tornillo, verificando que se encuentren en las posiciones óptimas para el ensamble. Los balines de cada tuerca son en total 29, con un diámetro de 3/16 de pulgada. Se recomienda el uso de aceite para realizar una sujeción de los balines a la tuerca debido a su viscosidad mientras las mitades son ajustadas. Sujetar las tuercas con tornillos M4 de 12 mm de longitud.

- C. Ensamblar las guías de cada base. Base 1 con Guía 1 y Base 2 con Guía 2; estas encarrilan en las colas de milano de cada base y ajustan por medio de 4 tornillos M4 de 20 mm de longitud a cada tuerca para realizar la tracción. Queda un espacio de 3 mm de espesor para una placa de ajuste, preferiblemente en material blando como latón.
  
- D. Luego de tener ambos sub ensambles de bases, se procede a ensamblarlos, montando la Base 2 sobre la Guía 1 y ajustando con 4 tornillos M4 de 20 mm de longitud en las perforaciones y roscas.
  
- E. Se procede a montar todo sobre el soporte principal, ajusta la Base 1 con este por medio de 4 tornillos M4 de 20 mm de longitud.
  
- F. Se monta el porta herramienta Estriado 1 sobre la Guía 2 y se perna con 4 tornillos M4 de 20 mm de longitud.
  
- G. El ajuste de todo el sistema a la bancada del torno se realiza por medio de 4 tornillos de  $\frac{1}{4}$  in NC.
  
- H. El ensamble de los soportes para los motores se realiza por medio de 2 tornillos M4 de 20 mm de longitud para cada soporte. Soporte 1 con Base 1 y Soporte 21 con Base 2. El soporte 21 lleva adicional ensamblado, como se muestra en el plano de explosión de los soportes, los 4 soportes placa y el soporte 22, por medio de 8 tornillos M6 de 10 mm de longitud.

## 6 ACOPLES AL TORNO

Los acoples al torno que se fabricaron son los siguientes.

### 6.1 HUSILLO ROSCADO PARA SUJECIÓN DE MOLDES

Se adiciono una rosca saliente al husillo para el montaje de los moldes. Esta modificación se realizo con la posibilidad de poder ser retirada para el posible montaje de mordazas de sujeción en el husillo. Se realizo rosca de 1 pulgada NC, esta decisión fue tomada en la experiencia del señor Guillermo Zapata, operario de repujado manual con más de 30 años de experiencia.

Ilustración 32. Husillo roscado para montaje de moldes



## 6.2 PUNTA GIRATORIA CON GEOMETRÍA CILÍNDRICA

Las puntas giratorias convencionales para los contrapuntos de los tornos tienen una forma cónica. Como se menciona en el marco teórico, entre la punta giratoria y el molde hay un taco de madera para realizar una buena sujeción de la lámina de trabajo. Si la punta giratoria es cónica, esta tiende a abrir el taco de madera y a rajarlo, generando una mala sujeción del material a repujar. Es por esta razón que se decide modificar la geometría de la punta y volverla cilíndrica.

Ilustración 33. Punta giratoria con geometría cilíndrica



## 7 VALIDACIÓN Y ENSAYO DE MOVIMIENTOS

El sistema de movimiento completamente ensamblado fue ensayado, en vacío, para validar los movimientos generados y las trayectorias generadas en los planos de movimiento.

En las pruebas que se realizaron en el laboratorio de Maquinas y Herramientas de la Universidad EAFIT, se montaron al sistema 2 motores KL23H276-28-4B, controlados por medio de MACH 3®, un software especializado en control numérico de varias variables, el cual se configuró para el control de los motores, definiendo parámetros básicos de trabajo como salidas de control, paros de emergencia, control de cada motor y revoluciones de estos, entre otros.

Verificado el movimiento de los motores con órdenes impuestas desde el software, se procedió a verificar los topes de movimiento máximo de cada eje. Cada guía es apta para generar un desplazamiento máximo de 100 mm. Con este valor se impone una restricción de movimiento para los controles de cero de máquina y cero de pieza para el proceso a realizar. La generación de trayectorias que debe describir la herramienta es una combinación de movimientos en ambos ejes, los cuales deben ser programados en software, de acuerdo a las restricciones del molde. El alcance del proyecto no contempla la parte de programación.

Los motores KL23H276-28-4B poseen un movimiento mínimo paso a paso de 1.8 grados. (Keling Technology). Teniendo en cuenta que el paso de los tornillos fabricados es 10 mm, el movimiento axial más pequeño que se puede tener en el sistema de movimiento, calculándolo con una simple regla de 3, 10mm de movimiento en 360° (1 revolución) como X mm de movimiento en 1.8°. Calculando X se obtiene que el movimiento mínimo es 0.05 mm, lo que ofrece un rango pequeño de movimiento que se convierte en precisión adecuada para el diseño.

Definidas las revoluciones de trabajo como 3000 por minuto, la velocidad de avance axial del tornillo con paso de 10 mm sería igual a 30 m/min. Teniendo en cuenta que estas revoluciones de trabajo se pueden variar desde el software de control de acuerdo a las necesidades del proceso, generando alternativas para desempeños óptimos de la herramienta.



## 8 CONCLUSIONES

En la actualidad la mayoría de las industrias colombianas que trabajan con el tema del repujado, se basan más que todo en la experiencia de los empleados para definir los parámetros de proceso y en unos pocos argumentos que encuentran en la escasa bibliografía. Si los parámetros no se encuentran dentro de un rango establecido de confiabilidad, la pieza a repujar puede quedar defectuosa, es decir, se puede rizar o se puede llegar a romper el material debido a la alta presión ejercida.

A partir de nuestra experiencia en el proceso, para los diferentes tipos de material de lámina metálica para repujado, existen varios tipos de materiales para herramientas; si se trabaja con lamina de aluminio el material más adecuado para el herramental es el acero; si se trabajan láminas de acero inoxidable el material más adecuado para el herramental es el bronce, y así dependiendo del tipo del material en que se vaya a realizar la pieza. Además, dependiendo de la pieza que se vaya a realizar y dependiendo de la geometría del molde existen varios tipos de configuraciones y formas de herramientas.

Es indispensable tener en cuenta, a la hora de la construcción de una mesa XY, los siguientes aspectos: precisión, acabado superficial, facilidades para ensamble, entre otras, ya que si no se tienen en cuenta, es posible que al realizar el repujado de una pieza se generen errores a la hora de formar la pieza al molde, debido a desajustes del sistema.

Es importante que en nuestro entorno se adopten procesos automáticos, que impulsen la estandarización y mayor control de las variables, en aras de la calidad del producto. Este proceso manufacturero ha sido altamente artesanal por ello

nuestra motivación al realizar el presente proyecto, con satisfactorios resultados en la construcción, acople y ensayos realizados de los movimientos generados.

Durante el proceso se tuvieron en cuenta varios parámetros para generar el sistema de movimiento, dentro de los cuales algunos se fueron descartando metódicamente, hasta llegar al diseño elaborado, el cual se acomoda a la proyección que tiene la Universidad en maquinas de control numérico.

## 9 RECOMENDACIONES.

Se recomienda realizar la siguiente fase del proyecto la cual consiste en la generación de las trayectorias mediante el código G, para los diferentes tipos de moldes que se vayan a repujar.

Fabricación y utilización de los diferentes tipos de herramientas entre las cuales se destacan los roller, las de punta redonda, de punta diamante, entre otras y observar los tipos de acabados que dichas herramientas proporcionan.

Realizar pruebas experimentales para definir y obtener parámetros estándares del proceso para los diferentes tipos de moldes y así facilitar la preparación para llevar a cabo un proceso exitoso.

Como consecuencia a un mal ajuste entre las guías de desplazamiento en el momento de realizar el movimiento, este tiende a trabarse en un punto. Se recomienda cambiar el material de las placas de ajuste por un material más blando y auto lubricante y así mismo realizarse un acabado superficial de poca rugosidad a las guías principales.

Por condiciones económicas, se decidió realizar la fabricación de las piezas en acero comercial 1020, pero lo ideal es fabricarlo en un tipo de acero con una alta resistencia al desgaste y a la corrosión, que además permita realizar tratamientos térmicos para cambiar ciertas propiedades que se necesiten.

Se recomienda el rediseño de sujeción de herramienta debido a la alta vibración que posee generada por el gran voladizo que tiene.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

American Society For Metals. 2001. *METALS HANDBOOK*. [ed.] Joseph R. Davis. Desk Edition. Ohio : ASM International, 2001. Vol. 14. ISBN/ISSN 0-87170-654-7.

Bauccio, Michael. 1994. *ASM Engineered Materials Reference Book*. Materials Park : ASM International, 1994. ISBN 0871705028 9780871705020.

Bosch-Rexroth. 2005. Catalogo productos Bosch Rexroth. [En línea] Bosch Rexroth, Mayo de 2005. [Citado el: 21 de Octubre de 2009.] [http://www.boschrexroth.com/business\\_units/brl/sys/auswahlhilfe\\_en/index.jsp?oid=14816](http://www.boschrexroth.com/business_units/brl/sys/auswahlhilfe_en/index.jsp?oid=14816).

DeGarmo, E. Paul, Black, J. Temple y Kohser, Ronald A. 1997. *MATERIALS AND PROCESSES IN MANUFACTURING*. Eighth Edition. s.l. : Prentice Hall, 1997. ISBN 0-02-328621-0.

Groover, Mikell P. 2007. *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*. . Tercera Edición. Mexico D.F. : Mc Graw Hill, 2007. ISBN-13: 978-970-10-6240-1.

Industrial Pipe and Steel. 2006. Catalogo prazi. [En línea] 2006. [Citado el: 12 de Noviembre de 2009.] <http://www.ipstool.com/Catalog/0246.pdf>.

Kalpakkian, Serope y Schmid, Steven R. 2008. *MANUFACTURA, INGENIERIA Y TECNOLOGIA*. Quinta Edición. Mexico : Pearson Educación, 2008. ISBN: 978-970-26-1026-7.

Keling Technology, Inc. Keling Technology. *KL23H276-28-4B*. [En línea] [Citado el: 13 de Octubre de 2009.] <http://www.kelinginc.net/KL23H276-28-4B.pdf>.

Maytool. 2009. Spinning files. *Rollers*. [En línea] 2009. [Citado el: 17 de Septiembre de 2009.] [http://www.maytool.com/spinning\\_files/Spinning20Tool-400.jpg](http://www.maytool.com/spinning_files/Spinning20Tool-400.jpg).

Mott, Robert L. 1995. *Diseño de elementos de maquina*. Mexico : Prentice Hall, 1995. ISBN/ISSN 970-26-0812-0.

Norton, Robert L. 1999. *Diseño de Maquinas*. Mexico : Prentice Hall, 1999. ISBN 970-17-0257-3.

*Notas de clase, Diseño metódico, Metodo de evaluación de alternativas*. Bravo, Santiago. 2009. Medellín : s.n., 2009.

Ospina, Carolina. 2006. El Torno. [En línea] Monografias, 23 de Marzo de 2006. [Citado el: 18 de Agosto de 2009.] <http://www.monografias.com/trabajos35/torno/torno.shtml>.

Palmexico, Grupo. 2008. Aceros Palmexico. *Especificaciones Aceros*. [En línea] Mayo de 2008. [Citado el: 12 de Noviembre de 2009.] <http://www.acerospalmexico.com.mx/w1.htm>.

SKF. Catalogo interactivo SKF. [En línea] SKF Mexico. [Citado el: 17 de Septiembre de 2009.] <http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=es&imperial=false&windowName=null&perfid=101002&prodid=1010021800>.

Toledo Metal Spinning Company. 2009. Metal Spinning. [En línea] BusinessOL, 2009. [Citado el: 26 de Agosto de 2009.] <http://www.toledometal spinning.com/services/spinning/>.

Zapata, Guillermo. 2009. *Repujado manual de coquillas*. Universidad EAFIT, Medellin : 2009.

## 11 ANEXOS

### 11.1 ANEXO 1. ESPECIFICACIONES ACERO W1

C	Si	Mn	P máx.	S máx.	Cr máx.	Ni máx.	V máx.	W máx.	Mo máx.
0.95-1.05	0.10-0.40	0.10-0.40	0.030	0.030	0.15	0.20	0.10	0.15	0.10

Otros residuales, valor máximo:     Cu = 0.25%     Cu + Ni = 0.40%     As + Sn + Sb = 0.040%

**Tipo:**    Acero de temple al agua tipo carbono.

**Formas y Acabados:**                          Redondo, cuadrado, solera, lámina, disco y anillo forjados, barra hueca y barra rectificada.

**Características:**                                Es éste un acero particularmente apto para herramientas que demandan una dureza elevada en la superficie, combinada con un alma tenaz.

**Aplicaciones:**                                 Se emplea en matrices de corte y modelo, herramientas de roscar, estampar y desbastar, cuchillas de cizallas, punzones y herramientas destinadas a trabajar madera, entre otros.

**Observaciones:**                                Al forjar, evitar temperaturas mayores a las necesarias; el final de la operación debe hacerse abajo de los 800° C. Proteger contra descarburación mediante atmósfera controlada o recubrir al recocer. Dureza después de recocido: 150-190 Brinell. Remover toda la capa de laminado o forjado antes de templar. Revenir inmediatamente.

#### Tratamientos Térmicos recomendados ( valores en °C ):

FORJADO	NORMALIZADO PIEZAS FORJADAS	RECOCIDO			DUREZA BRINELL MÁXIMA BARRAS RECOCIDAS (1)
		TEMPERATURA	MEDIO DE ENF.	VEL. ENF.	
930-1050 enfriar al aire	870-930 enfriar al aire	750-760	enfriar en horno	30°C/hr hasta horno negro y apagar.	202

#### Temple recomendado según NMX B-82 (tabla 3)(valores en °C ):

Efecto de la temperatura  
de revenido sobre la dureza (3)

PRECALENTAMIENTO	AUSTENIZACIÓN		TIEMPO A TEMP. AUSTENIZACIÓN	MEDIO DE ENFRIAMIENTO	REVENIDO	DUREZA Rc MÍNIMA(2)	TEMPERATURA REVENIDO	DUREZA Rc
	BAÑO DE SALES	ATM. CONTROLADA						
565-650 solo piezas grandes	735-840		1 min/mm de esp.	agua o salmuera	180-340	50-64		
							90	66-67
							150	64-65
							180	63-64
							190	62-63
							200	61-62
							260	58-59
							320	54-55
							370	50-51
							430	46-47

Notas:  
(2).- La dureza se da en base a probetas hasta de 25mm. de sección.  
(3).- Temple a 790°C.

## ESPECIFICACIONES ACERO O1

C	Si	Mn	P m <sub>àx.</sub>	S m <sub>àx.</sub>	Cr	V m <sub>àx.</sub>	W
0.85-1.00	0.50	1.00-1.40	0.030	0.030	0.40-0.60	0.30	0.40-0.60

Otros residuales, valor máximo: Cu = 0.25% Ni = 0.30% Cu + Ni = 0.40% As + Sn + Sb = 0.040%

**Tipo:** Acero para trabajo en frío, tipo temple al aceite.

**Formas y Acabados:** Redondo, cuadrado, solera, lámina, disco y anillo forjados, barra hueca y barra rectificada.

**Características:** Este acero tiene buena resistencia al desgaste y buena tenacidad. Presenta dureza profunda en diámetros menores a 40 mm. En sección de 100 mm., la profundidad de dureza es de aprox. 10 mm., Excelente maquinabilidad y buen afilado.

**Aplicaciones:** Se emplea en matrices para estampar, cortar y punzonar; así como en herramientas de corte a baja temperatura. También se utiliza en herramientas para filetear, instrumentos de precisión, calibres y matrices para plástico, entre otros.

**Observaciones:** Durante el recocido, las herramientas deben rodearse de viruta de hierro fundido para evitar la descarburización. Dureza después de recocido: 170-210 Brinell. Limpiar la cáscara de forjado o rolado antes de templear. Revenir inmediatamente. Siempre revenir por lo menos a 100° C . Para obtener buenos resultados, es esencial igualar la temperatura en toda la herramienta.

### Tratamientos Térmicos recomendados (valores en °C ):

FORJADO	NORMALIZADO PIEZAS FORJADAS	RECOCIDO			DUREZA BRINELL MÁXIMA BARRAS RECOCIDAS (1)
		TEMPERATURA	MEDIO DE ENF.	VEL. ENF.	
1050-1100 enfriar al aire (3)	820-880 enfriar al aire	720-730	enfriar en horno	11°C/hr hasta horno negro y apagar.	228

### Temple recomendado según NMX B-82 (tabla 3)(valores en °C ):

Efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza (4)

PRECALENTAMIENTO	AUSTENIZACIÓN		TIEMPO A TEMP. AUSTENIZACIÓN	MEDIO DE ENFRIAMIENTO	REVENIDO	DUREZA Rc MÍNIMA(2)	TEMPERATURA REVENIDO	DUREZA Rc
	BAÑO DE SALES	ATM. CONTROLADA						
650	790	800	1 min./mm de esp.	aceite	205	60	90 150 180 190 200 260 320 370 430 480 540	63-65 63-64 62-63 61-62 60-61 58-59 54-55 50-51 47-48 43-44 33-37

**Notas:** (2).- La dureza se da en base a probetas hasta de 25mm. de sección.  
(4).- Temple a 800°C.



## 11.2 ANEXO 2. LUBRICANTE SHELL ALBIDA SDM

## 11.3 ANEXO 3. ESPECIFICACIONES TORNO PRAZI MD 100, MD 200, SD300

### BENCHTOP LATHES

The Prazi MD-100 This new addition to the Prazi line weighs a hefty 37#. Features large dials for easy reading and is a very smooth and quiet running machine.

The Prazi MD-200 Mini turn lathe is ideal for professionals and demanding hobbyist who must machine small precision metal and plastic parts. The exceptionally well designed lathe runs very quietly and is extremely accurate as a result of the headstock design, weight, and special welded steel base construction. The high precision spindle has the capability to accept various watchmakers, jewelers turning accessories, WW and Boley collets. The Mini turn has a complete line of accessories for all your machining requirements. Milling and drilling can be achieved with the use of a Prazi Optional Mill Attachment.

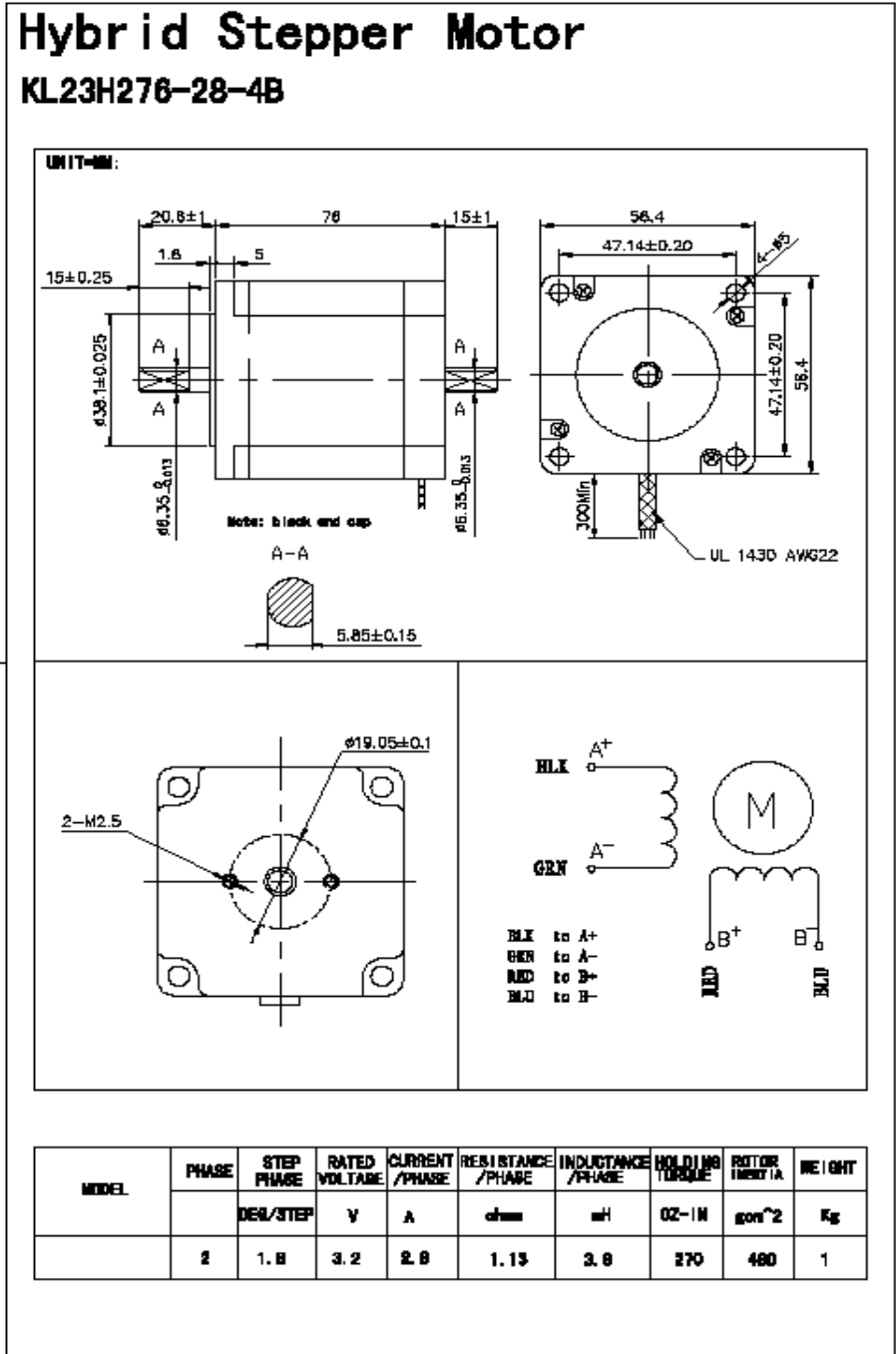
The Prazi SD-300 Master turn 5" x 12" lathe was specifically designed to meet the exacting needs of machinists, serious hobbyist, mechanics, vocational and technical schools, medical, dental, optical, electrical and scientific laboratories. The SD-300 Headstock has adjustable spindle tapered roller bearings with a spindle accuracy of .0002" which provides close tolerance turning, facing and boring applications.



PRAZI BENCH TOP LATHES			
SPECIFICATIONS	MD 100	MD 200	SD 300
Center Height	1.97"	1.97"	2.58"
Distance Between Centers	7.87"	7.87"	11.81"
Swing Over Bed	3.94"	3.94"	5.12"
Swing Over Cross Slide	.63"	.797"	2.44"
Cross Slide Travel	2.76"	2.16"	3.15"
Top Slide Travel	----	Optional	2.17"
Leadscrew Diameter	----	.465"	.700"
Spindle Accuracy	.0002"	.0002"	.0002"
Spindle Nose - Bolt On		14mm Thread	Chuck Flange
Spindle Bore	.276"	.350"	.438"
Spindle Speeds RPM	690-1200-2400	690-1200-2240	300-600-1200-2400
Tail Stock Quill Dia.		.866"	.866"
Tail Stock Taper	MT-1	MT-1	MT-1
Tail Stock Travel	1.60"	1.6"	1.50"
Threads - Inch (15)	----	----	11 - 56 TPI
Threads - Metric (18)	----	----	0.2 - 3.0MM
Threads - Module (8)	----	----	0.1 - 0.6
Longitudinal Feed Rates (2)	----	----	0.16MM & .018MM
Motor	1/8 HP	1/8 HP	1/3 HP
Power Supply	110v	110v	110v
Dimensions L x W x H	19.7" x 7.5" x 9.1"	25" x 9.5" x 7.5"	31.5" x 11" x 8.5"
Weight	37 lbs.	55 lbs.	97 lbs.
Price	\$595.00	\$1,095.00	\$1,595.00

(Industrial Pipe and Steel, 2006)

## 11.4 ANEXO 4. ESPECIFICACIONES SERVOMOTORES



(Keling Technology)

## 11.5 ANEXO 5 ESPECIFICACIONES ACERO 1020

Grado de Acero	Composición Química (% en peso)											Espesor		Requerimientos Físicos (Típicos)							
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cb	V	Ni	Cr	Mo	Pulg.	mm	Límite de Fluencia Min.		Resistencia a la Tensión Min.		Elongación % Min.			
	Máx.	Mín.	Máx.	Máx.	Máx.									KSI	MPA	KSI	MPA	EN 8"	EN 2"		
	SAE 1020	0.17 - 0.23	0.30 - 0.60	0.030	0.035	(*)	—	—	—	—	—	—	0.187 - 2.500	4.7 - 63.5	30	210	55	380	N/A	25	
Prueba de Impacto CVN				Prueba de Dobleces				Dureza (RB)		Grados equivalentes: <b>AISI 1020</b>											
Temperatura de Prueba	Promedio Min. en 3 Probetas Ft-Lb (Joules)	Promedio Min. Individual Ft-Lb (Joules)	Espeor	Angulo																	
°F	°C		Pulg. mm	Longit.	Transv.																
NO APLICA																					

### Características:

**Acero** medio carbono bajo la norma SAE.

Por su contenido de carbono estos aceros se utilizan para la fabricación de piezas estructurales de mediana resistencia.

### Observaciones:

Garantía; Solo se garantiza el análisis químico.

(\*) Cuando el silicio (Si) es requerido, los siguientes rangos son los mas comúnmente usados:  
Si = 0.10 máximo Si = 0.10 - 0.20 % Si = 0.15 - 0.35 %

### Propiedades y pruebas físicas (Típicas):

Los valores de propiedades físicas son típicas y no se garantizan solo sirven como referencia.

Algunes propietats de l'acer AISI 1020 són:

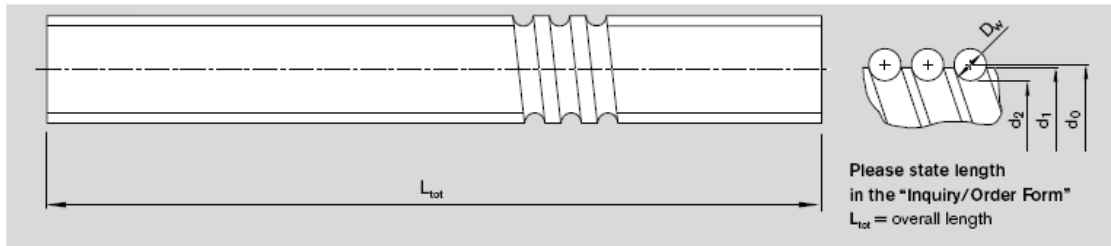
- DENSITAT → 7860 Kg / m<sup>3</sup>.
- MÒDUL YOUNG → 207 GPa.
- COEFICIENT DILATACIÓ → 11,7 °C<sup>-1</sup> · 10<sup>-6</sup>.
- CONDUCTIVITAT TÈRMICA → 52 W / m · °C.
- CALOR ESPECIFIC → 500 J / Kg · °K.
- MÒDUL TALLANT → 8 · 10<sup>9</sup> N / m<sup>2</sup>.
- RESISTÈNCIA FLUÈNCIA → 295 (MPa).
- COEFICIENT POISSON → 0,3.

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3891/14/34039-14.pdf>

## 11.6 ANEXO 6. ESPECIFICACIONES TORNILLOS DE BOLAS

Tabla 4. Especificaciones Tornillo de bolas

### Precision-Rolled Screw SN-R



Ordering code: SN 20 x 5R x 3 X X T7 R 00T200 00T200 1250 1 0

Size $d_o \times P \times D_w$	Part number			Dimensions (mm)		Moment of inertia $J_s$ (kgcm <sup>2</sup> /m)	Maximum length (mm)		Weight (kg/m)
	Tolerance grade T5	Tolerance grade T7	Tolerance grade T9	$d_1$	$d_2$		Standard	On request	
6 x 1R x 0.8	R1531 105 00	R1531 107 00	R1531 109 00	6.0	5.3	0.02		On request	0.19
6 x 2R x 0.8	R1531 125 00	R1531 127 00	R1531 129 00	6.0	5.3	0.02			0.19
8 x 1R x 0.8	R1531 205 00	R1531 207 00	R1531 209 00	8.0	7.3	0.04			0.36
8 x 2R x 1.2	R1531 225 00	R1531 227 00	R1531 229 00	8.0	7.0	0.04			0.36
8 x 2.5R x 1.588	R1531 235 00	R1531 237 00	R1531 239 00	7.5	6.3	0.04			0.30
12 x 2R x 1.2	R1531 425 00	R1531 427 00	R1531 429 00	11.7	10.8	0.13	1500	2500	0.79
12 x 5R x 2	R1531 465 10	R1531 467 10	R1531 469 10	11.4	9.9	0.11			0.75
12 x 10R x 2	R1531 495 00	R1531 497 00	R1531 499 00	11.4	9.9	0.11			0.74
16 x 5L x 3	R1551 015 00	R1551 017 00	R1551 019 00	15.0	12.9	0.31			1.24
16 x 5R x 3	R1511 015 00	R1511 017 00	R1511 019 00	15.0	12.9	0.31			1.24
16 x 10R x 3	R1511 045 00	R1511 047 00	R1511 049 00	15.0	12.9	0.31			1.23
16 x 16R x 3	R1511 065 10	R1511 067 10	R1511 069 10	15.0	12.9	0.34			1.29

(Bosch-Rexroth, 2005)

## 11.7 ANEXO 7. PLANOS DE LAS PIEZAS A FABRICAR