

ANÁLISIS DE VARIABLES Y ACONDICIONAMIENTO DEL PROCESO DE  
REPUJADO EN TORNO CNC

DAVID ISAZA MEJÍA

PABLO SÁNCHEZ VICENTE

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2011

ANÁLISIS DE VARIABLES Y ACONDICIONAMIENTO DEL PROCESO DE  
REPUJADO EN TORNO CNC

DAVID ISAZA MEJÍA

PABLO SÁNCHEZ VICENTE

Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Asesor:

Gabriel Jaime Páramo

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2011

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial a nuestro asesor de proyecto Gabriel Jaime Páramo, por su apoyo incondicional y sus valiosos aportes en el desarrollo de este proyecto.

A todo el personal administrativo y operativo de la Universidad EAFIT., ya que su ayuda fue fundamental para la realización del proyecto.

Agradecemos a nuestros padres, por su invaluable labor en nuestra formación personal y profesional.

## CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	11
2 OBJETIVOS.....	14
3 MARCO TEÓRICO.....	15
4 MÉTODOS TRADICIONALES Y NO TRADICIONALES DEL REPUJADO EN TORNO.....	17
4.1. REPUJADO TRADICIONAL.....	18
4.1.1 Herramientas del proceso tradicional.....	21
4.1.2 Velocidades para repujado tradicional.....	23
4.1.3 Lubricantes utilizados en repujado tradicional.....	23
4.2 REPUJADO NO TRADICIONAL.....	24
4.2.1 Mecánica de repujado de cono.....	25
4.2.2 Efectos de la desviación de la ley del seno.....	27
4.2.3 Técnica CNC como herramienta para el repujado automático.....	28
4.2.4 Aplicaciones del CNC en el repujado de metal.....	29
4.2.5 Diferencias entre el repujado de metal mediante técnica CNC y el repujado manual.....	30
4.2.6 Máquina utilizada para el repujado automático.....	31
5 CONFIGURACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA.....	32
5.1 MODIFICACIONES Y ADECUACIONES AL TORNO.....	32
5.1.1 Carro porta herramientas.....	33
5.1.2 Herramientas.....	33
5.1.3 Rediseño del nuevo centro punto.....	34
5.1.4 Molde.....	35
5.1.5 Nueva caja de control.....	36
5.2 SIMULACIÓN DE LA CURVA PARA EL PROCESO DE REPUJADO Y GENERACIÓN DEL CÓDIGO G.....	38
6 INSTRUMENTACIÓN, PREDICCIÓN Y ANALISIS DE LAS FUERZAS INVOLUCRADAS EN EL PROCESO.....	41
6.1 GALGAS DE DEFORMACIÓN.....	47
6.2 FENÓMENO FÍSICO.....	48
6.3 VENTAJAS.....	49



6.4 LIMITACIONES.....	49
7 PRUEBAS FINALES Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS PARA EL PROCESO.....	51
7.1 AVANCE.....	51
7.2 VELOCIDAD DEL MOTOR.....	51
7.3 RESULTADOS.....	52
7.3.1 Combinación parámetros 150mm/min – 1500PM.....	59
7.3.2 Combinación parámetros 150mm/min – 1800RPM.....	59
7.3.3 Combinación parámetros 250mm/min – 1500RPM.....	60
7.3.4 Combinación parámetros 250mm/min – 1800RPM.....	61
7.3.5 Combinación parámetros 350mm/min – 1500RPM.....	61
7.3.6 Combinación parámetros 350mm/min – 1800RPM.....	62
7.3.7 Variación del espesor.....	63
8 CONCLUSIONES.....	66
9 RECOMENDACIONES.....	67
10 BIBLIOGRAFÍA.....	68
11 ANEXOS.....	69

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados análisis FEA sistema herramienta- Portaherramientas.....	46
Tabla 2. Valores para cálculo de componentes de las fuerzas en X, Y, Z....	56
Tabla 3. Tabla modelo de los datos registrados de deformación unitaria y cálculo de las fuerzas.....	57
Tabla 4. Medición del espesor de la pieza en diferentes puntos.....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1.Descripción proceso de repujado.....	15
Gráfico 2.Torno y sus principales componentes.....	17
Gráfico 3. Esquema repujado tradicional.....	20
Gráfico 4. Partición del proceso con diferentes moldes.....	21
Gráfico 5. Herramientas repujado tradicional.....	22
Gráfico 6. Relaciones de las operaciones de repujado tradicional.....	25
Gráfico 7. Segunda etapa del proceso para ángulos menores a 35°.....	26
Gráfico 8. Elementos del torno acondicionados para las pruebas de repujado CNC.....	32
Gráfico 9. Espacio entre molde y herramienta en proceso de repujado.....	35
Gráfico 10. Curvas de entrada y salida para deformación en la pieza.....	39
Gráfico 11. Simulación de las trayectorias y curvas para el proceso de repujado CNC en el software Pro/Engineer.....	40
Gráfico 12. Modelo inicial para análisis FEA en SolidWorks.....	41
Gráfico 13. Análisis de tensiones y esfuerzos del sistema en conjunto herramienta-porta herramienta.....	42
Gráfico 14. Análisis de desplazamientos sufridos en el sistema en conjunto herramienta-portaherramientas.....	43
Gráfico 15. Deformaciones unitarias sufridas en el sistema herramienta-portaherramientas.....	43
Gráfico 16. Resumen análisis FEA sistema herramienta-portaherramientas.....	45
Gráfico 17. Galga extensiométrica de lámina.....	48
Gráfico 18. Herramienta maquinada para ubicación de las galgas.....	50
Gráfico 19. Programa CNC Simulando las curvas en tiempo real en la máquina.....	52
Gráfico 20. Productos obtenidos mediante repujado automático a diferentes valores de parametros.....	53
Gráfico 21. Inclinación de la herramienta respecto a la pieza de trabajo.....	54
Gráfico 22. Descomposición de fuerzas en sus componentes X y Z.....	56
Gráfico 23. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para	

los parámetros 150 mm/min - 1500 RPM.....	59
Gráfico 24. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 150 mm/min - 1800 RPM.....	59
Gráfico 25. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 250 mm/min - 1500 RPM.....	60
Gráfico 26. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 250 mm/min - 1800 RPM.....	61
Gráfico 27. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 350 mm/min - 1500 RPM.....	61
Gráfico 28. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 350 mm/min - 1800 RPM.....	63
Gráfico 29. Variación observada del espesor de la lámina repujada.....	64

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Proceso de repujado tradicional.....	19
Foto 2. Herramientas de rodillo para repujado tradicional.....	22
Foto 3. Piezas obtenidas por repujado tradicional.....	24
Foto 4. Rizado por baja reducción y ruptura por exceso de reducción.....	28
Foto 5. Torno CNC para repujado automático.....	31
Foto 6. Herramientas de rodillo para prueba de repujado CNC.....	33
Foto 7. Centro punto para prueba de repujado CNC.....	35
Foto 8. Molde a utilizar para prueba de repujado mediante CNC.....	36
Foto 9. Caja o consola de control.....	37
Foto 10. Sistema en conjunto puesto a punto para pruebas de repujado mediante CNC.....	37
Foto 11. Galga de lámina en la herramienta para mediciones en las pruebas.....	50
Foto 12. Imágenes corrida del proceso de repujado automático mediante CNC.....	52
Foto 13. Pieza obtenida con mejores resultados para medición de su espesor.....	63

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Código G del proceso de repujado.....	70
Anexo B. Planos eje de la herramienta.....	73
Anexo C. Planos ensamble del centro-punto.....	74
Anexo D. Plano punta 2.....	75
Anexo E. Plano cuna balinera.....	76
Anexo F. Planos del molde.....	77
Anexo G. Planos extensión del molde.....	78

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de repujado en diferentes metales y aleaciones, es un proceso muy antiguo, pero, poco estudiado, quizá debido al bajo tonelaje procesado por este método, lo que lo ha hecho poco relevante frente a otros procesos de deformación plástica<sup>1</sup>.

Al ser un proceso económicamente competitivo y con grandes aplicaciones en la industria metalmecánica, es necesario estandarizar las principales variables incidentes en dicho proceso, con el fin de darle mayor fiabilidad y tecnificación, ya que en la actualidad se ha seguido de forma artesanal. Son escasas las empresas que trabajan con tecnologías automatizadas en la implementación del mismo, tecnologías como CNC (Control numérico computarizado). Esto lo haría un proceso mucho más eficiente, tecnificado y al alcance del personal involucrado en el proceso de repujado artesanal, al ser una tecnología fácilmente adaptable y práctica.

La relación costo beneficio de este proyecto es muy positiva, puesto que una buena planeación, adecuación, diseño y análisis de los diferentes parámetros en el proceso de repujado en torno CNC, arrojarán grandes avances y aplicaciones en el ambiente industrial y manufacturero, que cada día crece más en nuestro entorno Colombiano y hará las empresas más competitivas respecto a nuevas tecnologías de producción a nivel mundial.

El proyecto se realiza en la Universidad Eafit, en el departamento de Ingeniería Mecánica, en el grupo de investigación “Tecnologías para la Producción” de la escuela de ingeniería, cuyo coordinador es el asesor de este proyecto.

---

<sup>1</sup> Deformación plástica

Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada. Esto sucede porque, en la deformación plástica, el material experimenta cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica. La deformación plástica es lo contrario a la deformación reversible

El objetivo de este grupo es el estudio de cada empresa como un "Todo" desde el punto de vista de la "Producción" para adelantar, junto con el personal de las mismas, un proceso de investigación e implementación de las medidas que lleven a un aumento de la productividad y de la eficiencia en las plantas de producción.

Dentro del grupo de investigación en el cual está suscrito este proyecto, se planteó anteriormente el diseño y construcción de un torno parametrizado por el método de Top-Down<sup>2</sup>, con implementación de tecnología CNC, pero analizando su factibilidad y practicidad para usos posteriores se decidió cambiar el proyecto y redefinir algunos objetivos.

La razón principal para el cambio de proyecto es el alto costo que significa este para el grupo de investigación en el cual está suscrito, ya que la estandarización y utilización de piezas comerciales del torno que se fabricaría tienen un alto costo el cual no representa una gran ventaja como instrumento pedagógico para su posterior utilización en la universidad; por esta razón se eligió rediseñar un torno de repujado que fue inicialmente concebido por otros estudiantes con el mismo asesor, el cual requiere de puesta a punto, diseño y construcción de herramientas, análisis de fuerzas y variables incluidas en el proceso e investigación acerca de software CNC, para ser implementado dentro de varios procesos de esta técnica de transformación de metales; el cual presenta mejores ventajas dentro del grupo de investigación y puede ser posteriormente utilizado como herramienta útil de aprendizaje en los laboratorios de mecánica de la universidad.

---

<sup>2</sup> Método Top-Down

Estrategia de procesamiento de información, que formula un resumen del sistema, sin especificar detalles. Cada parte del sistema se refina diseñando con mayor detalle. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo. Este método se diseña con frecuencia con la ayuda de "cajas negras" que hacen más fácil cumplir requerimientos aunque estas cajas negras no expliquen en detalle los componentes individuales.



En el laboratorio de mecánica existe un torno que se construyó en un proyecto de grado anterior, el cual quedó en una fase inicial, ya que las herramientas no funcionan de forma adecuada y no existe un software con parámetros definidos para el proceso de repujado.

El repujado en torno es una operación útil que cuenta con poca información en el medio ya que se lleva a cabo de una forma muy artesanal y con herramientas rudimentarias lo cual conlleva a realizar piezas poco precisas y de baja calidad.

Existen muchas opciones en el mercado de software para controlar procesos de torneado por medio de arranque de viruta, pero estos no son útiles para el proceso de repujado, ya que este requiere de parámetros adicionales que contemplen la deformación gradual del material para evitar daños en las piezas garantizando espesores uniformes y regularidad en la fabricación en serie de piezas.

Por lo anterior en este proyecto se evaluará el torno existente, analizando las fuerzas por medio de herramientas de medición y su relación con los parámetros de funcionamiento, para así definir tipos de herramientas que se puedan adaptar para llevar a cabo este proceso de manufactura;

Con el presente proyecto se espera realizar un rediseño de herramientas para un torno de repujado, análisis de fuerzas e implementación de software CNC, teniendo en cuenta el análisis de las piezas construidas así como las herramientas y software requerido.

A partir de un torno existente se diseñaran y construirán herramientas que permitan la elaboración de piezas para realizar experimentos que permitan determinar los parámetros que debe tener el software CNC para ejecutar un correcto repujado en serie.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

- Analizar las variables y acondicionamiento del proceso de repujado en torno CNC.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

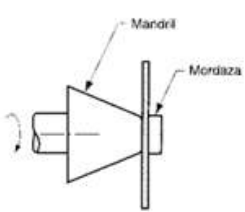
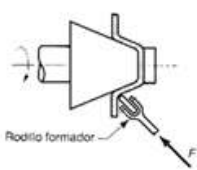




- Recopilar información y documentación existente en el medio acerca de los métodos tradicionales y no tradicionales de repujado en torno.
- Identificar los componentes del torno para definir las herramientas que admitan llevar a cabo la correcta validación del modelo a construir.
- Configurar y poner a punto el sistema.
- Realizar la instrumentación de las herramientas para llevar a cabo mediciones de las fuerzas involucradas en proceso.
- Analizar los parámetros con base en las mediciones de fuerzas obtenidas para optimizar el proceso.

### 3. MARCO TEÓRICO

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.

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. A continuación en la figura 1 se describe gráficamente paso a paso el proceso, donde intervienen las diferentes variables a analizar en este proyecto.

Gráfico 1. Descripción proceso de repujado

Descripción gráfica del proceso de repujado		
		
1) Disposición antes del proceso	2) Durante el proceso	3) Proceso completado
		

(Fuente: ASM Handbook)

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 dos 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.

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. El repujado automático tiene dos grandes aplicaciones: el repujado de tubo y el repujado de cono.

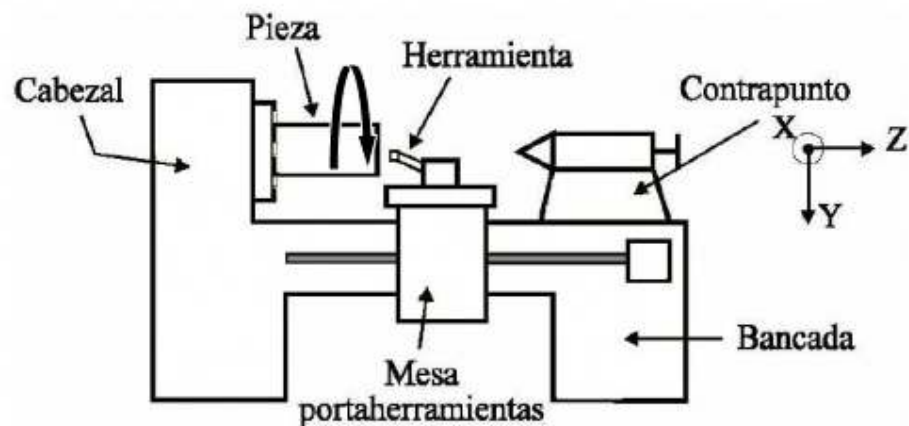
Prácticamente todos los metales dúctiles pueden ser procesados por el repujado automático. Láminas tan grandes como 6 metros de diámetro y 25 mm de espesor se pueden repujar sin la aplicación de calor externo. (Rendón Vélez & Palacio Gonzalez, 2009)

#### 4. METODOS TRADICIONALES Y NO TRADICIONALES DE REPUJADO EN EL TORNO

En principio es necesario describir el torno como tal, su función y sus componentes principales, de manera breve pero concisa.

El torno es la “espina dorsal de un taller metalmecánico” (Krar y Oswald,1989). La función principal del torno es hacer girar perfiles y piezas cilíndricas, lo anterior se lleva a cabo haciendo girar la pieza que está sostenida en un dispositivo diseñado a propósito, mientras se fuerza una herramienta de corte contra su circunferencia. En la figura 2, se muestra una vista frontal de un torno convencional con sus principales componentes.

Gráfico 2. Torno y sus principales componentes



(Fuente: es.wikipedia.org)

- Cabezal: En esta parte, generalmente están montados los entes encargados de transmitir el movimiento del motor al eje y la mordaza que agarra la pieza.
- Bancada: Es una pieza fundida pesada y basta hecha para soportar las partes de trabajo del torno. En su parte superior están maquinadas las guías con las que se dirigen y alinean las partes principales del mismo.

- Mesa portaherramientas: Como su nombre lo indica, en ella se encuentran las herramientas con la cual se hará el mecanizado de la pieza, se desliza a necesidad del mecanizado deseado.
- Contrapunto: Se sostiene en la bancada y se encarga de no dejar en voladizo la pieza a maquinar.

El torno es una máquina indispensable para el proceso de repujado, sin torno no hay repujado, por decirlo en su forma más simple.

El 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).

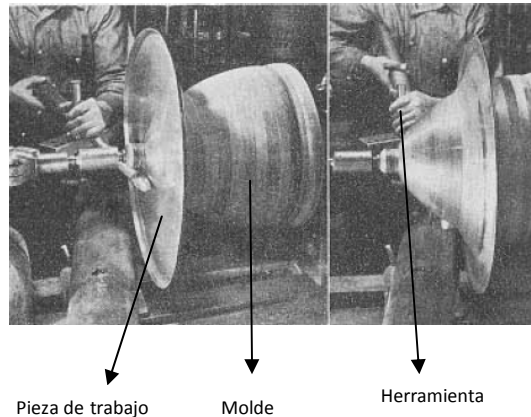
A continuación se describe los métodos tradicionales y no tradicionales de repujado en el torno

#### 4.1 REPUJADO TRADICIONAL

El repujado convencional es la operación de repujado básico, un disco de lámina se sostiene en el extremo de un mandril rotatorio que tiene la forma interior deseada para la parte final, mientras la herramienta o rodillo deforma el metal contra el mandril. En algunos casos la forma inicial puede ser diferente a la de un disco plano, el proceso requiere una serie de pasos para completar el formado de la parte. La posición de la herramienta la puede controlar un operador usando un punto de apoyo fijo para el apalancamiento necesario, o un método automático como control numérico. Estas alternativas son repujado manual y repujado mecanizado. El repujado mecanizado tiene la capacidad de aplicar fuerzas más altas a la operación, lo cual representa ciclos más rápidos y mayor capacidad en cuanto al tamaño del trabajo. También se logra un mejor control del proceso que en el repujado manual.

A continuación en la foto 1, se muestra un proceso de formación por repujado y se identifican algunos componentes esenciales del proceso.

Foto 1. Proceso de repujado tradicional



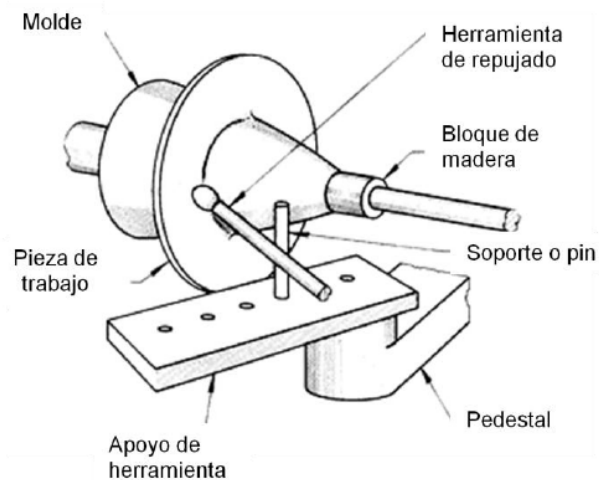
(Fuente: metalmecánica)

El repujado tradicional dobla el metal alrededor de un eje circular en movimiento para conformar el metal de acuerdo a la superficie externa de un mandril de simetría axial. El espesor del metal permanece sin cambio (más o menos) respecto al espesor de la forma inicial. El diámetro de la forma debe ser algo más grande que el diámetro de la parte resultante. El diámetro inicial requerido se puede estimar asumiendo volúmenes constantes, antes y después del repujado.

La aplicación del repujado convencional incluye la producción de formas cónicas y curvas, en bajas cantidades. Por este proceso se pueden hacer partes con diámetros muy grandes (hasta 5 m o más). Los métodos alternativos de formado de lámina podrían requerir altos costos en los dados. La horma de repujado se puede hacer de madera u otro material suave fácil de formar. Por tanto es una herramienta de bajo costo comparada con el punzón y dado requeridos para embutido profundo, que podría ser un proceso sustituto para algunas partes.

En el gráfico 3 se muestra el esquema del proceso más a profundidad que soporta la foto 1.

Gráfico 3. Esquema repujado tradicional

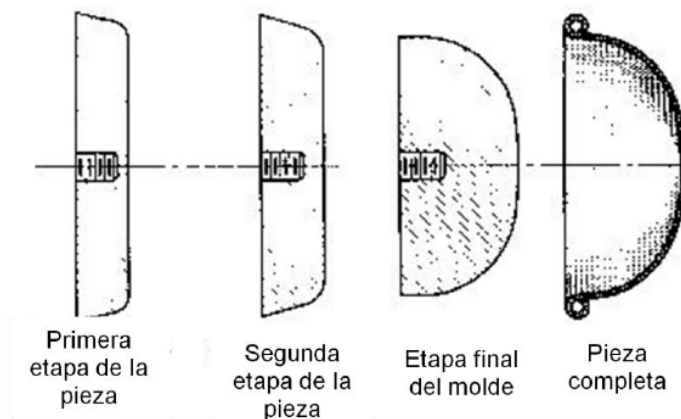


(Fuente: ASM Handbook)

Normalmente el molde es hecho en madera, aunque algunas veces 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. 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, ver gráfico 4. Los moldes para las primeras etapas de la pieza se llaman preforma o desglose moldes (American Society For Metals, 2001).



Gráfico 4. Partición del proceso con diferentes moldes



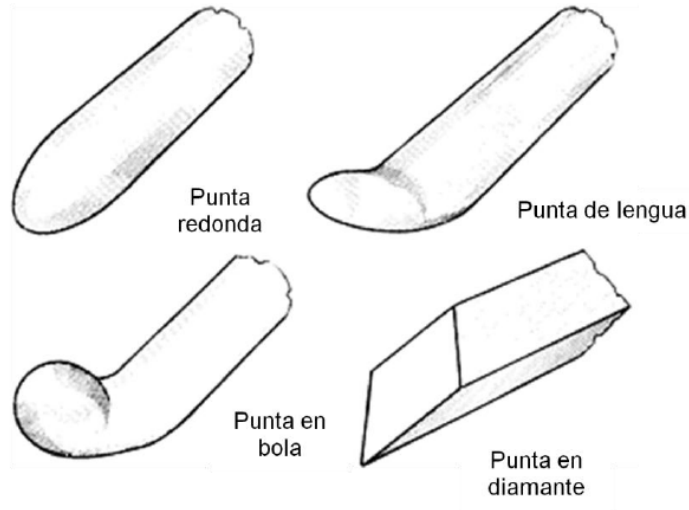
(Fuente: ASM HANDBOOK)

#### 4.1.1 Herramientas del proceso tradicional

Las herramientas de repujado tradicional generalmente son realizadas forjando el acero de bajo carbono o aceros aleados para herramientas, 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 al aluminio, para metales dúctiles se puede utilizar madera dura.

A continuación en el gráfico 5, se muestran las herramientas más utilizadas y generales del repujado tradicional.

Gráfico 5. Herramientas repujado tradicional



(Fuente: ASM HANDBOOK)

También existen las herramientas de rodillo, las cuales también son llamadas herramientas de anillo, y, generalmente son de acero endurecido o de bronce aluminio. En la foto 2 se muestran las herramientas de rodillo utilizadas en el proceso de repujado tradicional.



Foto 2. Herramientas de rodillo para repujado tradicional (Fuente: Metalmecánica 2009)

#### 4.1.2 Velocidades para repujado tradicional

Dependen principalmente de la composición y el espesor de la pieza o lámina de trabajo, Por ejemplo, una lámina de acero inoxidable se repuja con éxito con una velocidad de avance 60 mm/min y una lámina de aluminio permitirá velocidades de 120 a 180 mm/min. La velocidad es generalmente determinada por el operador de maquina teniendo en cuenta al máximo las condiciones de trabajo y su experiencia. La velocidad es inversamente proporcional al espesor de la pieza de trabajo (Vélez, González, 2009), la selección de la velocidad adecuada es lograda por el operador del proceso quien sabe por experiencia cual da el mejor resultado. El proceso de repujado requiere constantes cambios de velocidad, por este motivo, es necesario que la máquina tenga un control de velocidad variable sobre el cabezal.

#### 4.1.3 Lubricantes utilizados en repujado tradicional

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 lámina 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, parafina, ceras y cebos, sin embargo, luego de terminado el proceso son más difíciles de eliminar que la simple grasa. (American Society For Metals, 2001). A continuación en la foto 3 se muestran algunas piezas logradas mediante repujado tradicional.

Foto 3. Piezas obtenidas por repujado tradicional



(Fuente: Metalmecánica 2009)

#### 4.2 REPUJADO NO TRADICIONAL

Se basa en el control numérico programable, se programa para una lectura consecutiva que duplica exactamente los movimientos de forma manual.

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. Láminas 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.

#### 4.2.1 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:

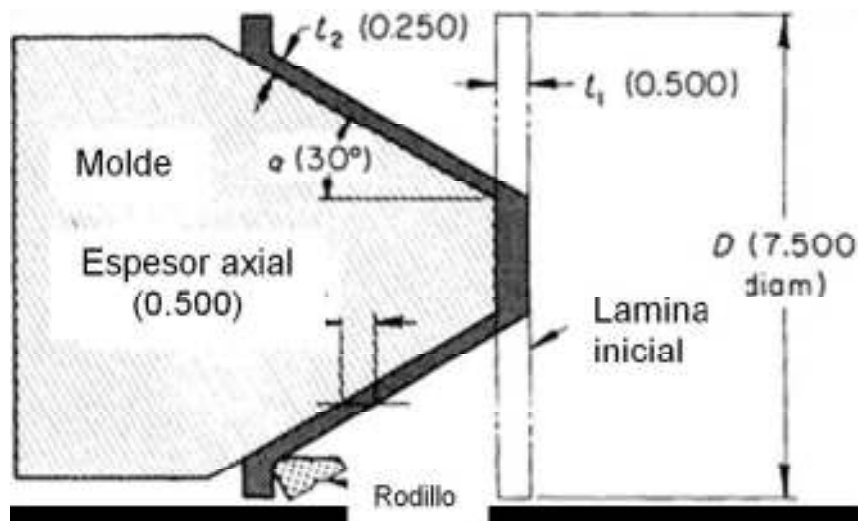
$$t_2 = t_1 (\sin(\alpha))$$

(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.

En el gráfico 6 se muestran las variables mencionadas así como la explicación gráfica de su relación.

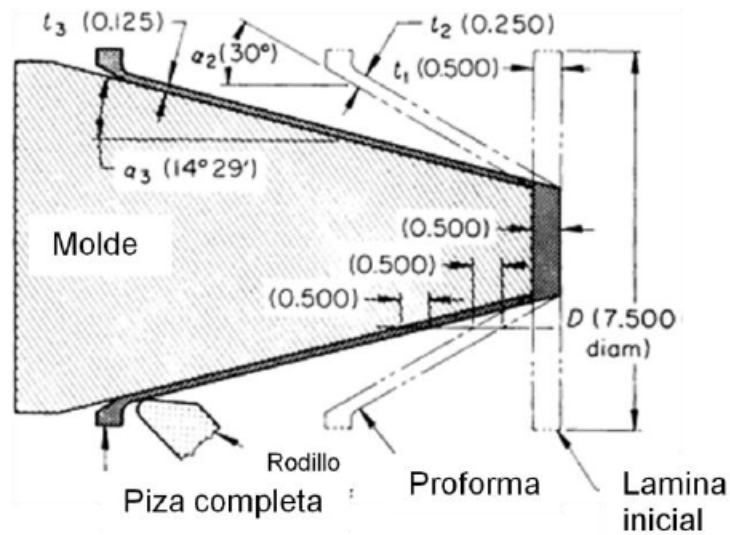
Gráfico 6. Relaciones de la operación de repujado no tradicional en cono



(Fuente: ASM HANDBOOK)

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)

Gráfico 7. Segunda etapa del proceso para ángulos menores a  $35^\circ$  ( $\alpha \leq 35^\circ$ )



(Fuente ASM HANDBOOK)

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:

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

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  $30^\circ$  para una reducción de 50% y  $\alpha_2$  es el ángulo medio de  $14,47^\circ$  para una reducción total de 75%. (American Society For Metals, 2001)

#### 4.2.2 Efectos de desviación de la ley del 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.

Foto 4. Rizado por baja reducción y ruptura por exceso de reducción



(Fuente: Vélez, González, 2009)

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.

#### 4.2.3 Técnica CNC como herramienta para el repujado automático

La aplicación de CNC<sup>3</sup> en repujado automático consiste en una máquina CNC, que realiza una secuencia pre-programada de las operaciones en la pieza de trabajo. Con esto, el equipo se mueve a una velocidad muy rápida, la máquina puede aplicar el rodillo de varias maneras diferentes, con resultados múltiples. Por ejemplo, un vaso de acero inoxidable puede requerir una serie de

---

<sup>3</sup> CNC

Se considera **Control Numérico por Computador**, también llamado **CNC** (en inglés *Computer Numerical Control*) (también Control Numérico Continuo *Continuous Numerical Control*), a todo dispositivo capaz de dirigir el posicionamiento de un órgano mecánico móvil mediante órdenes elaboradas de forma totalmente automática a partir de informaciones numéricas en tiempo real.



surcos o decorativas características, un diseñador puede programar el rodillo del CNC para crear cada una de estas formas en cualquier orden, la realización de ellos dentro de aproximadamente con una tolerancia de 1/32 de pulgadas de precisión cada vez que se realiza la etapa. La máquina CNC pocas veces requiere de nuevas herramientas, que da lugar a períodos de entrega y de alistamiento mucho más estrictos, pero incluso si el proyecto requiere de nuevas herramientas, los operarios podrán montar rápidamente nuevos rodillos para el repujado.

#### 4.2.4 Aplicaciones del CNC en el repujado de metal

La utilización de la técnica CNC en el repujado de hojas de metal es rápido, eficiente y preciso, pero, generalmente, carece de versatilidad para procesos de embutición y de presión. Debido a la naturaleza de este proceso, no se puede trabajar con formas irregulares, sin embargo hay un gran radio de aplicación en geometrías definidas como las esféricas y tubulares en forma de campana en las cuales aplicar el proceso de repujado con CNC es muy rentable y eficiente, ya que los costos variables para una gran producción pueden ser relativamente bajos como el gran resultado de una buena economía de escalas<sup>4</sup>.

El repujado de metal es bastante flexible debido a la facilidad de aplicación de la automatización, lo que conduce a llevar tiempos de ciclo de producción más corto de un producto. Si un producto no requiere de herramientas especializadas, los tiempos de entrega del mismo serán muy bajos, estos plazos de entrega fomentan el desarrollo de esta técnica de repujado como una eficiente alternativa de producción, el uso de máquinas CNC suele ser una alternativa muy eficiente y competitiva frente a otros tipos de procesamiento de metal. Los fabricantes utilizan repujado de metal para producir luces, esferas,

---

<sup>4</sup> Economía de escalas

Se llama economía de escala al proceso mediante el cual los costos unitarios de producción disminuyen al aumentar la cantidad de unidades producidas o, dicho de otra forma, aumentos de la productividad o disminuciones del coste medio de producción, derivados del aumento del tamaño o lote de producción.

jarrones y muchos otros artículos. También tiene usos alternativos, como la producción de escultura en metal con fines artísticos y de diseño.

#### 4.2.5 Diferencias entre el repujado de metal mediante técnica CNC y el repujado manual

Aunque los sistemas de control de computadora (CNC) proporcionan una variedad de ventajas, incluso las más avanzadas tecnológicamente, algunas veces, el repujado manual resulta ser apetecido para cortos lotes de producción. Los dispositivos manuales permiten un mayor control, que ayuda a los fabricantes a una mejor evaluación y sistematización de las etapas posibles de un plan de producción de un componente o un producto en particular.

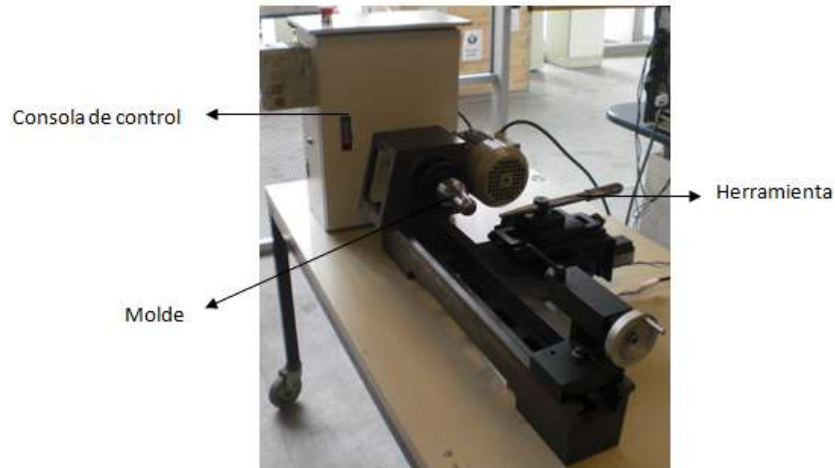
Según la interpretación a través de historias sobre grabados medievales en madera, se ha demostrado que el repujado manual se remonta desde hace siglos, pero este método se basó en antiguos tornos manuales. Como resultado de nuevas técnicas desarrolladas, los fabricantes comenzaron a utilizar propulsión eléctrica y potencia hidroeléctrica, sin embargo, pese al incremento de las velocidades de torno, los procesos de repujado todavía sólo se limitaban para dar forma a metales más suaves, como el aluminio y sus aleaciones. Sólo después de la introducción de los procesos hidráulicos, los fabricantes podrían comenzar a aplicar el proceso de repujado de metales más duros como el acero. El aumento de velocidad de máquinas hidráulicas, cuando se combina con las capacidades del CNC, permitió una mayor parte de evacuación de trabajo y la garantía de la seguridad, pero sacó un cierto nivel de la artesanía de los procesos de producción. (Thomasnet.com,2011)

Aunque el repujado de metal mediante CNC es muy eficaz para procesar los productos de manera rápida y eficiente, el repujado manual considera necesario el repujado por etapas, y suele ser una alternativa bastante considerable para series cortas de producción con el fin de liberar costosos equipos de CNC en lotes de producción no tan complejos

#### 4.2.6 Máquina utilizada para el repujado automático

La máquina para la realización de este proyecto se encuentra en los laboratorios de la Universidad EAFIT, bloque de ingenierías, la cual cuenta con una tecnología adaptable CNC y ya ha realizado algunos ensayos preliminares de repujado.

Foto 5. Torno CNC para repujado automático



(Fuente: propia)

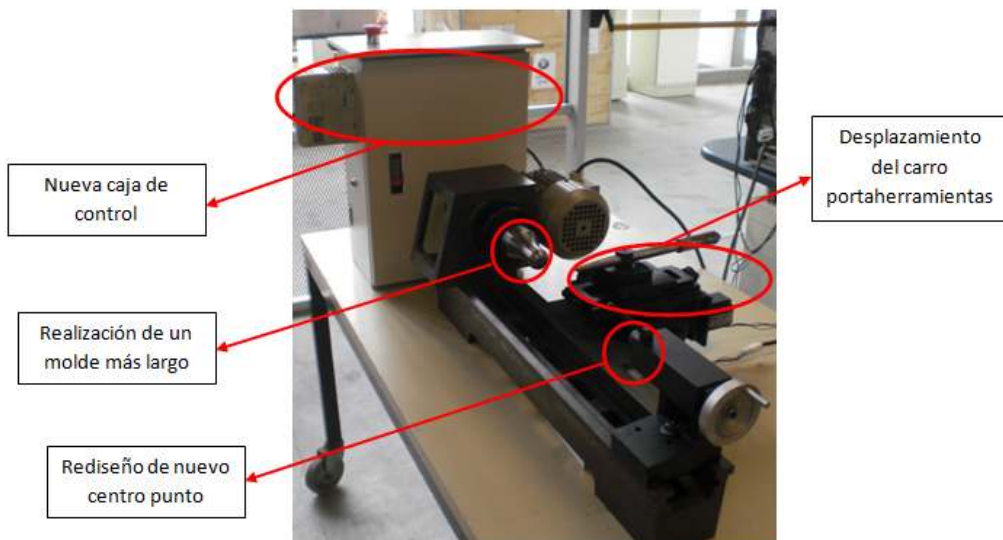
## 5. CONFIGURACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA

Para la realización de las pruebas finales de repujado mediante CNC en el torno, fue necesario adecuar la máquina (Foto 5) ya que algunos elementos debían ser rediseñados, y otros reajustados, por las condiciones del proceso. A continuación se detallan algunas modificaciones realizadas al torno para la realización de las pruebas de repujado mediante CNC.

### 5.1 Modificaciones y adecuaciones al torno

En el siguiente gráfico, gráfico 8, se muestran los elementos acondicionados, rediseñados y realizados para poner a punto el sistema y posteriormente realizar las simulaciones y pruebas de repujado CNC en el torno anteriormente mencionado.

Gráfico 8. Elementos del torno acondicionados para las pruebas de repujado CNC



(Fuente: propia)

### 5.1.1 Carro portaherramientas

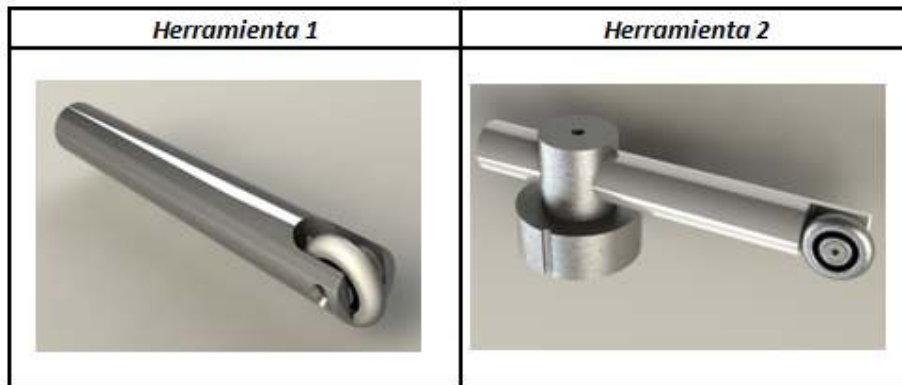
El carro portaherramientas debió ser desplazado hacia atrás, es decir, respecto al eje perpendicular al molde de repujado tuvo que ser desplazado con el fin de evitar choques del carro porta herramientas con la lámina, para ello simplemente se hace el ajuste, teniendo en cuenta las dimensiones de la lámina con el fin de que no haya contacto físico entre el carro y la lámina, y, garantizar dicho contacto entre la herramienta escogida y la lámina. A continuación se muestran las herramientas previas al proceso y la escogida para realizarlo, según las condiciones aptas para un correcto proceso.

Con el desplazamiento de el carro porta herramientas se aumento la capacidad (diámetro de volteo) del torno a 150 mm

### 5.1.2 Herramientas

Para la selección de las herramientas, se tuvo en cuenta el contacto físico de la misma con la lámina, en principio las dos herramientas adaptables al proceso eran de rodillo, ya que para procesos automáticos mediante CNC, esta es la herramienta más adecuada, ya que aumenta la calidad de las piezas, evita cortes y disminuye la fricción entre la herramienta y la lámina, según la literatura vista (Metal Handbook) y las recomendaciones hechas por docentes y personal del laboratorio. A continuación se muestran las dos herramientas que se tendrán en cuenta para realizar el proceso. Ver plano del eje de la herramienta en anexo B.

Foto 6. Herramientas de rodillo para prueba de repujado CNC



(Fuente: propia)

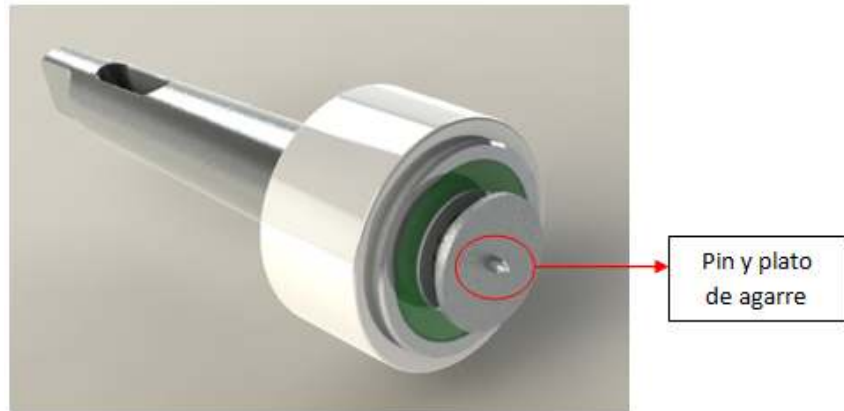
Como se observa en la foto anterior, , la herramienta 1 genera choques de la barra que soporta los rodillos o rodamientos con la lámina, lo mas adecuado es que quien debe hacer contacto físico y moldear la lámina es el rodillo, por ello, la herramienta 1 no es la más adecuada para el proceso, a diferencia de esta, se elimina una parte de la barra y sólo una sostendrá el rodamiento que estará en contacto y moldeará la lámina, es decir se muestra la herramienta 2, que, con estas características, podrá brindar mejores resultados en la prueba.

Por lo anterior se escoge la herramienta 2, y esta será analizada, abordada en su conjunto con el portaherramientas, para el análisis de fuerzas que se realizará en este proyecto.

#### 5.1.3 Rediseño de nuevo centro punto

El sistema de centro punto de un torno convencional, no brinda las mejores condiciones de agarre y sujeción de la lámina hacia el molde, puesto que es cónico y su terminación en un solo punto no soporta la lámina cuando las máquina y el proceso este en movimiento, para ello fue necesario realizar un nuevo sistema de centro punto que garantizara el agarre y sujeción de la lámina hacia el molde. Es importante anotar que el molde también tuvo que ser adecuado para garantizar dicho agarre y sujeción. A continuación se muestra gráficamente el sistema del centro punto y la manera de agarre y sujeción de la lámina al molde. Ver plano ensamble en anexo C.

Foto 7. Centro punto para proceso de repujado CNC

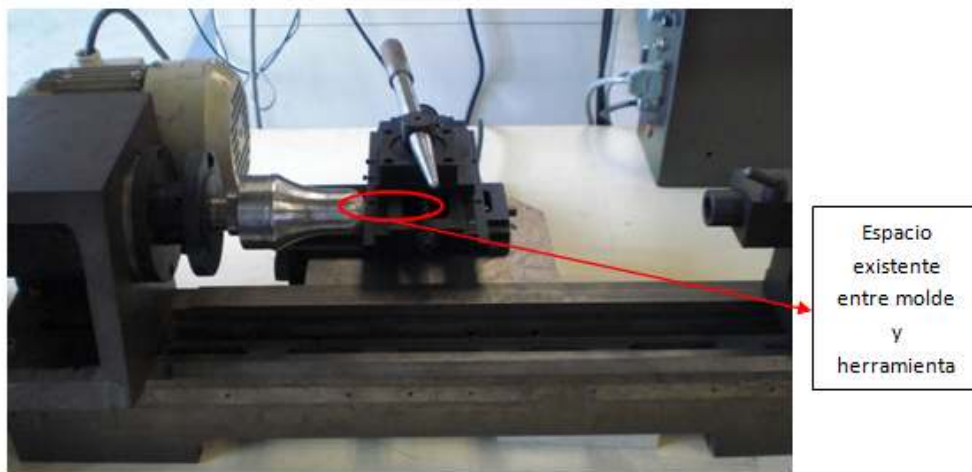


(Fuente: propia)

#### 5.1.4 Molde

El molde existente para el proceso de repujado, presentaba la siguiente dificultad para el proceso de repujado mediante CNC:

Gráfico 9. Espacio entre molde y herramienta en proceso de repujado



(Fuente: propia)

Si bien inclinando y ajustando la herramienta del gráfico 9 se podría solucionar la existencia de dicho espacio, la herramienta que muestra este gráfico no es la que requiere este proyecto ya que esta aunque se puede ajustar, no es una herramienta de rodillo, y, la escogida, presentaría grandes dificultades por la existencia de dicho espacio, por ello, para que no existiera este espacio, fue necesario realizar y diseñar un nuevo molde más largo, que garantizara la no existencia de espacio y pudiera haber contacto entre la herramienta de rodillo y la lámina sujeta al molde que se muestra a continuación.

Foto 8. Molde a utilizar para prueba de repujado mediante CNC



(Fuente: propia)

Material: Acero 1020. (Ver plano en anexo D)

#### 5.1.5 Nueva caja de control

Anteriormente la caja de control era distinta, esta caja de control, es la que se utilizó para la comunicación entre el sistema o código G generado y la máquina (Torno), la anterior ya presentaba defectos y podría no garantizar un correcto seguimiento de las líneas del código para la prueba de repujado CNC mediante código G.



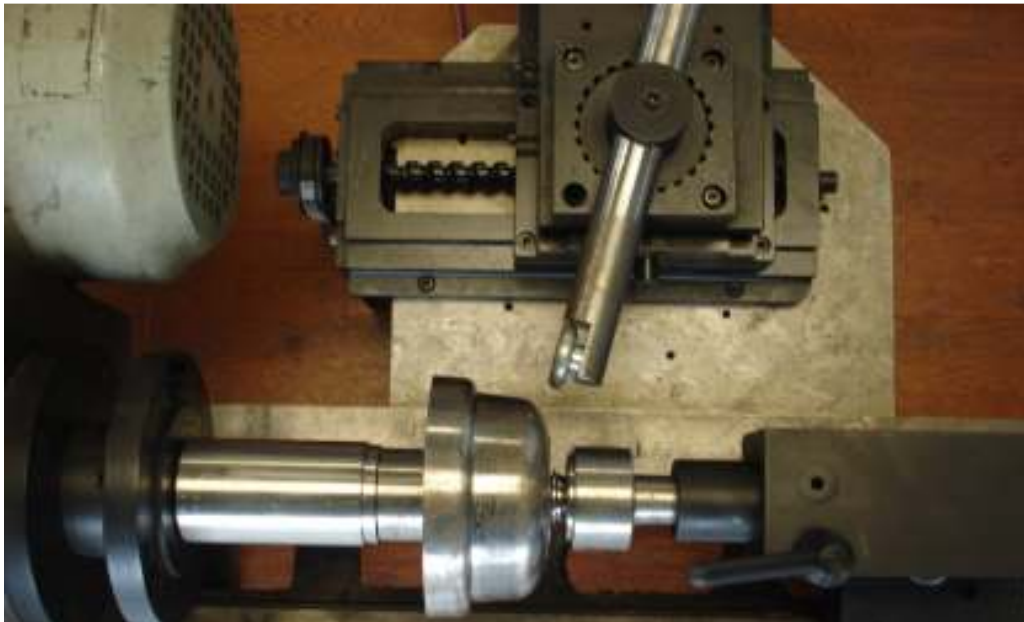
Foto 9. Caja o consola de control



(Fuente: propia)

En la siguiente foto se muestra todo el sistema en conjunto, con los ajustes mencionados anteriormente realizados, y la puesta a punto de todo el sistema, una vez antes de hacer las simulaciones de las curvas y trayectorias de la herramienta, con el fin de observar que físicamente no existieran problemas en el movimiento de la herramienta, configuraciones erróneas y elementos que pudiesen entorpecer u obstruir el proceso de repujado.

Foto 10. Sistema en conjunto puesto a punto para pruebas de repujado mediante CNC



(Fuente: propia)

En la foto anterior, se puede observar la herramienta 2 montada en el portaherramientas, no se presentan choques entre el molde y el portaherramientas, garantizando sólo el contacto físico entre la herramienta y la lámina, que es lo ideal. También se puede observar la extensión del molde diseñado y la correcta sujeción y agarre del molde, gracias al reajuste y diseño del centro punto.

Una vez configurado todo el sistema, y garantizando la no presencia de obstáculos que se puedan presentar en las futuras pruebas de repujado mediante CNC, se procede a la simulación de las curvas y trayectorias que la herramienta deberá seguir.

## 5.2 Simulación de la curva para el proceso de repujado y generación del código G

Para la realización y simulación de las curvas que la herramienta debe seguir, se recurrió al software especializado en la simulación del proceso de repujado mediante CNC, este software (Pro/Engineer) contiene en sus módulos la opción para la simulación de las trayectorias de las curvas en el proceso de repujado, la generación del código G<sup>5</sup> que se le introduce a la máquina, y el análisis de las fuerzas y esfuerzos generados en el proceso.

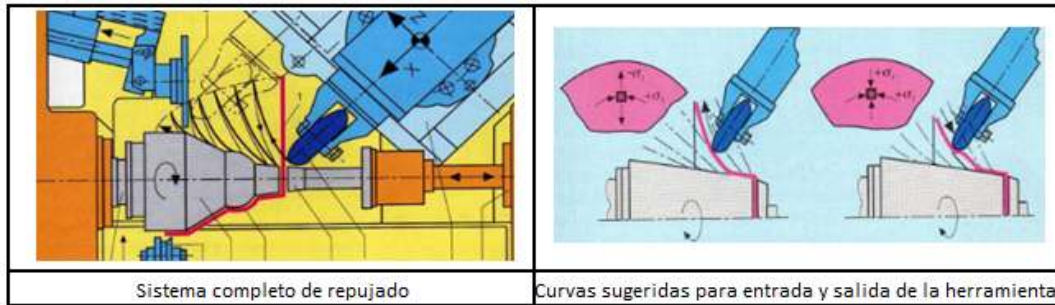
Para la generación de las curvas y trayectorias se tuvo en cuenta de procesos de repujados anteriores el número de veces en que la herramienta tenía contacto con la lámina y la literatura existente e imágenes de libros para el proceso de repujado, donde se afirma que hay necesidad de crear curvas que deformen la lámina saliendo de la pieza, y, de igual forma, devolverse al centro de la misma (Runge,1994), siempre deformando tanto saliendo de la pieza como entrando a la misma, como se muestra en el siguiente gráfico 10,

---

<sup>5</sup> Las funciones preparatorias, también conocidas como G-Codes o Códigos G, son las más importantes en la programación CNC, ya que controlan el modo en que la máquina va a realizar un trazado, o el modo en que va a desplazarse sobre la superficie de la pieza que está trabajando. Los posibles valores que acompañan a este comando, van de 00 a 99, y cada uno tiene una función determinada.

además recomendaciones hechas por personal experimentado en el proceso de repujado, fue necesario realizar varios programas de simulación de las curvas en el software Pro/Engineer, hasta obtener el de mejor resultados y con el que se realizaron las mediciones de las fuerzas, estas curvas describen la trayectoria a seguir de la herramienta en contacto con la lámina.

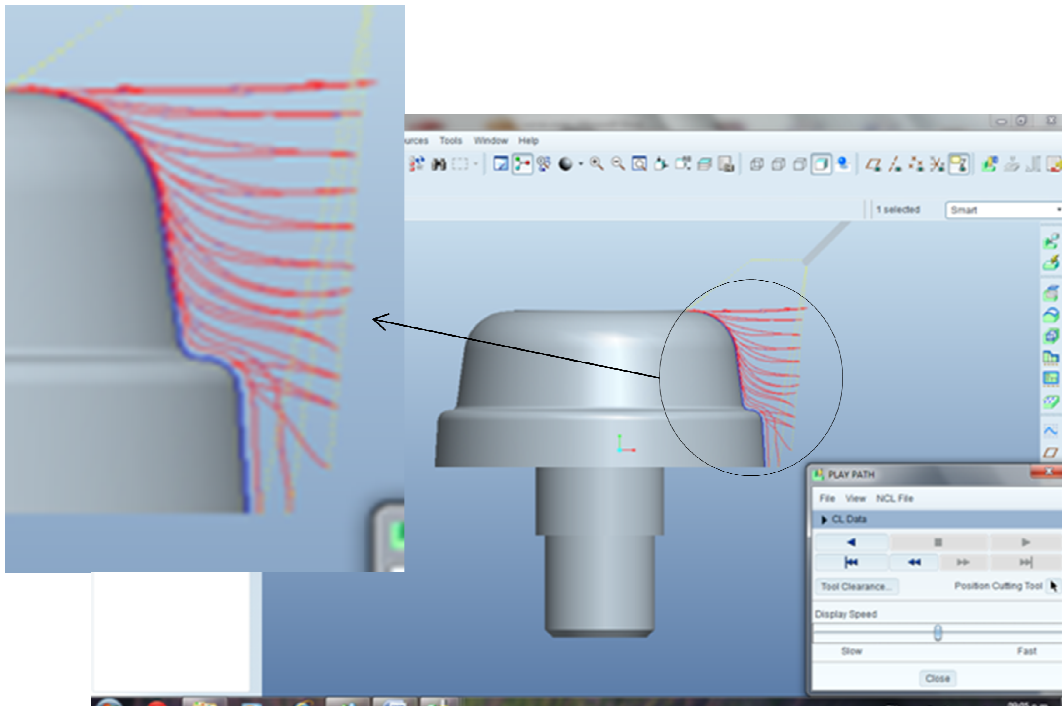
Gráfico 10. Curvas de entrada y salida para deformación en la pieza



(Fuente: Runge, 1994)

En el siguiente gráfico, gráfico 11, se muestra la trayectoria de las curvas generadas para el proceso de repujado en el software Pro/Engineer, luego de haber probado con 9 simulaciones anteriores, esta fue la que mejores resultados arroja para la trayectoria de las curvas y la medición de las fuerzas en el proceso.

Gráfico 11. Simulación de las trayectorias y curvas para el proceso de repujado CNC en el software Pro/Engineer



(Fuente: propia)

Una vez hecha la simulación, el software genera el código G, que se introducirá en la máquina y ésta, mediante la caja de control, da la orden de seguir los movimientos de las curvas originada en el software a la herramienta de rodillo. A esta máquina se le pueden variar los parámetros de velocidad como RPM y avance, pero el seguimiento de las trayectorias siempre se restringe al generado por el código G. En el anexo A se encuentra el código G respectivo a la simulación mostrada en el gráfico 11, el cual será introducido a la máquina para las pruebas de repujado CNC.

## 6. INSTRUMENTACIÓN, PREDICCIÓN Y ANÁLISIS DE LAS FUERZAS INVOLUCRADAS EN EL PROCESO.

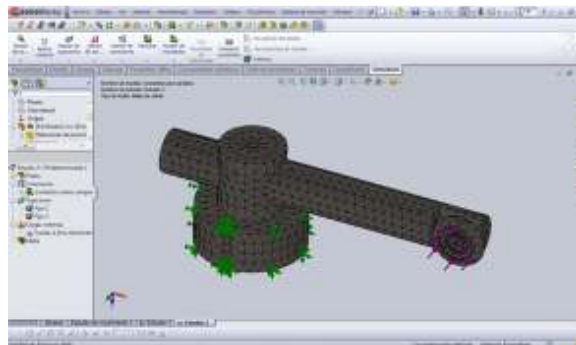
Para el proyecto posteriormente se realizará un análisis de fuerzas por medio de galgas extensiométricas; para la ubicación de estas se realizó un análisis de elementos finitos para determinar la posición que tendrían las mismas en la herramienta. Teniendo en cuenta que estas deben ser ubicadas en una zona donde las deformaciones sean las más altas.

Una vez configurado el sistema y sus elementos para las pruebas finales de repujado, se procedió al análisis de las fuerzas involucradas en el proceso, así como las deformaciones sufridas en la herramienta, con el fin de identificar los puntos críticos o de mayor concentración de fuerzas y esfuerzos en la herramienta y en el porta herramientas.

A continuación se muestra, con en el soporte del software de ingeniería SolidWorks, el análisis de ingeniería del sistema en conjunto del portaherramientas y la herramienta, simulando las condiciones reales de esfuerzos y deformaciones sufridos una vez se esté corriendo las pruebas finales de repujado.

En el siguiente gráfico, gráfico 12, se muestra el modelo inicial del sistema a analizar.

Gráfico 12. Modelo inicial para análisis FEA en SolidWorks

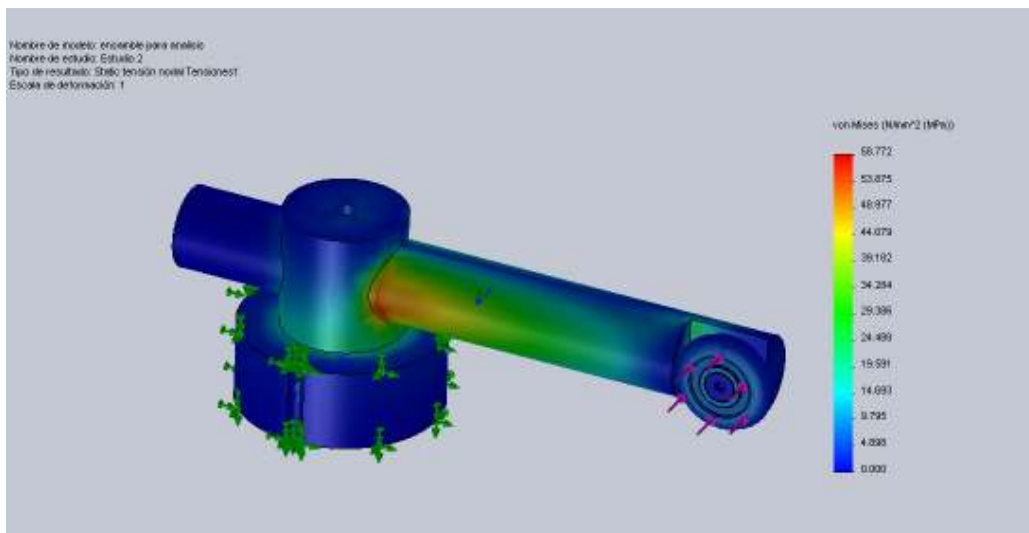


(Fuente: propia)

En el gráfico 12, se muestra el sistema inicial, con las restricciones en principio, es decir, las flechas verdes en cada punto de la malla generada por defecto en el programa, indican que el sistema se encuentra empotrado y esta ajustado en los principales ejes o grados de libertad y sus restricciones, X, Y, Z, en otras palabras, que el portaherramientas no se mueve, producto de que se encontrará ajustado y totalmente empotrado en el carro portaherramientas.

Se introduce en el programa (SolidWorks) los datos, tales como materiales de las partes componentes del sistema, generando el siguiente gráfico a analizar.

Gráfico 13. Análisis de tensiones y esfuerzos del sistema en conjunto herramienta-portaherramienta



(Fuente: propia)

El gráfico 13, muestra una representación por colores de los esfuerzos producidos en el sistema, así como las restricciones del sistema, las partes o zonas azules no representan esfuerzos y la parte o zona roja, representa los mayores esfuerzos producidos en el sistema. El objetivo de encontrar, identificar y localizar el punto donde se generaría mayores esfuerzos y deformaciones, es con el fin de ubicar en las pruebas finales, galgas (que mas adelante se explicarán), para medir y analizar físicamente las deformaciones

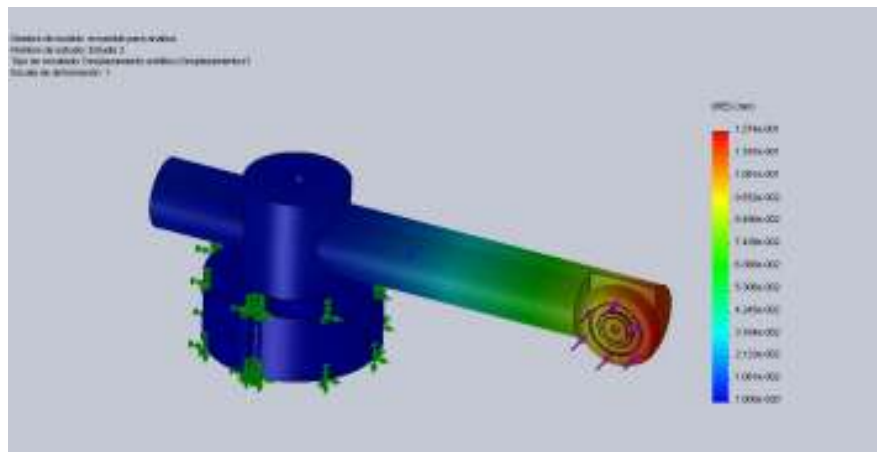
producidas, una vez hechas las pruebas finales del proceso de repujado mediante CNC, y empezar a analizar y correr el proceso con diferentes condiciones de las variables y parámetros, a fin de recomendar cual podría haber obtenido los mejores resultados desde el punto de vista físico y estético de la lámina repujada obtenida.

Volviendo al gráfico 13, se muestra que hay un mayor esfuerzo en la zona cercana al porta herramientas, como se ve en la zona roja del gráfico, sufriendo un esfuerzo máximo de 58.772 Mpa, en el cuadro de resultados, que se mostrará más adelante, se da la ubicación exacta de este máximo esfuerzo producido en el sistema.

Así como el programa muestra los esfuerzos producidos en las distintas zonas del sistema, también hace lo mismo con las deformaciones unitarias y desplazamientos generados por dichos esfuerzos y su respectiva localización.

En el gráfico 14, en principio, se muestra los desplazamientos de los puntos del sistema como resultado de la suma de todas las deformaciones sufridas en el sistema, y como se había explicado anteriormente, la zona verde representará que no hubo desplazamiento, y, la zona roja, los puntos donde se generan los mayores desplazamientos.

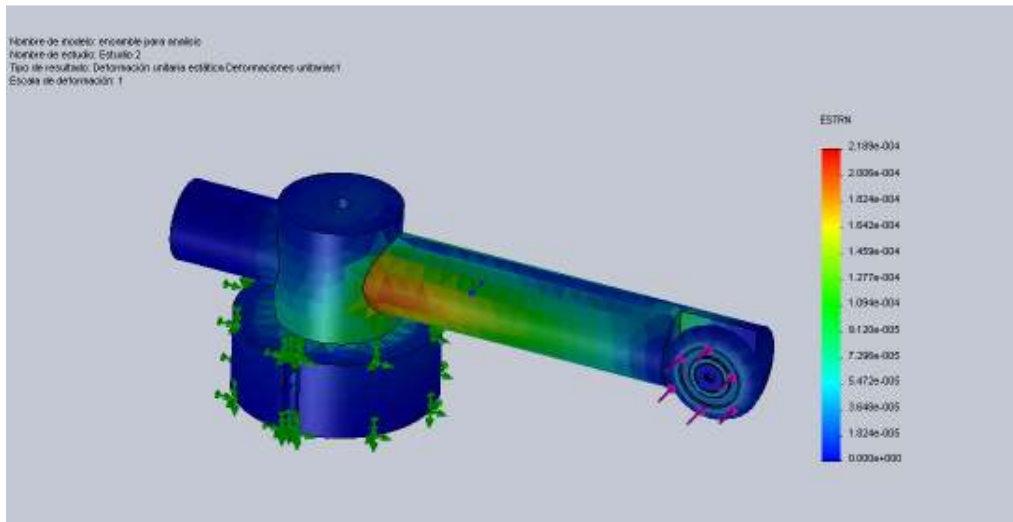
Gráfico 14. Análisis de desplazamientos sufridos en el sistema en conjunto  
Herramienta-portaherramienta



(Fuente: propia)

En el gráfico anterior, se muestra el máximo desplazamiento en la parte de la extrema derecha de la herramienta, tanto en la zona derecha del rodamiento (desde el frente) como en la parte donde este mismo se encuentra atornillado. El máximo desplazamiento que describe el programa es de 0.127353 mm. Estos desplazamientos sufridos, son el resultado de la suma de las deformaciones unitarias registradas en todo el sistema. A continuación, se muestran dichas deformaciones unitarias, en el gráfico 15.

Gráfico 15. Deformaciones unitarias sufridas en el sistema herramienta-portaherramientas



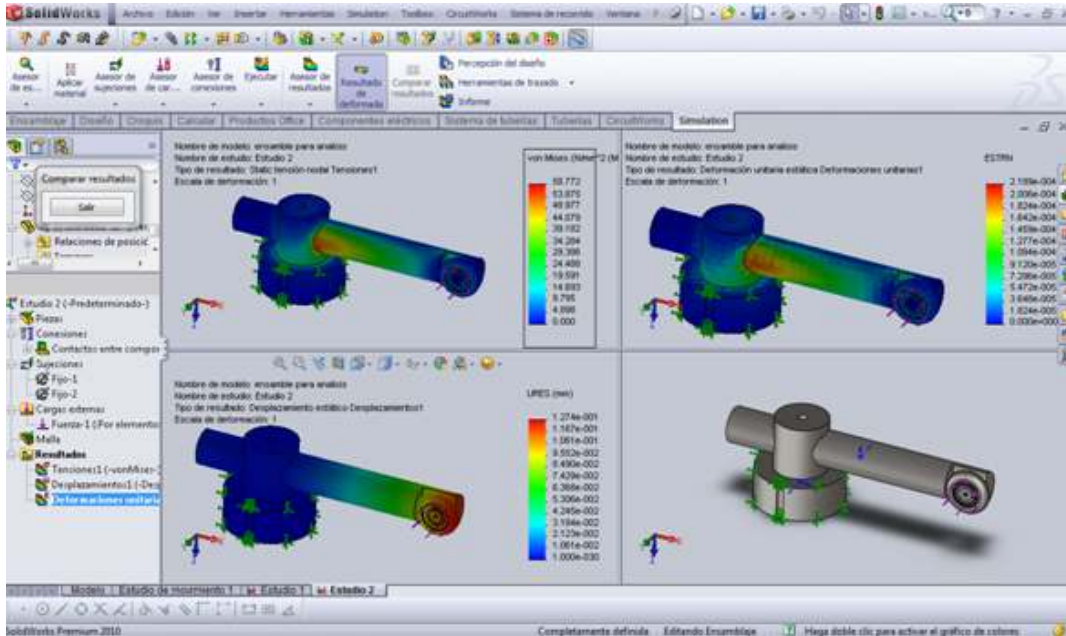
(Fuente: propia)

Si se observa y se analiza del gráfico anterior, es consecuente con el gráfico de esfuerzos del sistema, gráfico 15, donde, las mayores deformaciones unitarias se localizan donde se generan los máximos esfuerzos, por válidas razones físicamente descriptibles. La mayor deformación unitaria (zona roja) es de 0.000218881, y su localización es cerca al porta herramientas, al igual que la del esfuerzo máximo.



A continuación, en el gráfico 16, se muestra en resumen el análisis FEA y el cuadro de resultados, con los datos exactos y precisos de las ubicaciones de los puntos críticos que se buscan en este capítulo, con el fin de ubicar las galgas que medirán datos reales en las pruebas finales reales de repujado mediante CNC.

Gráfico 16. Resumen análisis FEA sistema herramienta-portaherramientas



(Fuente: propia)

Tabla 1. Resultados análisis FEA sistema herramienta-portaherramientas

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1  Gráfico 12	VON: Tensión de von Mises	0 N/mm <sup>2</sup> (MPa)  Nodo: 191	(-1.9984 mm,  24.92 mm,  10 mm)	58.7723 N/mm <sup>2</sup> (MPa)  Nodo: 11228	(14.3101 mm,  - 8.31858 mm,  - 19.4465 mm)
Desplazamientos1  Gráfico 13	URES: Desplazamiento resultante	0 mm  Nodo: 154	(-1.9984 mm,  -24.92 mm,  -10 mm)	0.127353 mm  Nodo: 13047	(114.869 mm,  6.87339 mm,  - 26.0543 mm)
Deformaciones unitarias1  Gráfico 14	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0  Elemento: 1387	(- 2.89477 mm,  24.4168 mm,  9 mm)	0.000218881  Elemento: 7050	(14.2624 mm,  - 7.42597 mm,  - 20.0748 mm)

(Fuente: propia)

De la tabla 1, se puede extraer la información de la localización de los puntos críticos que se buscaban al iniciar este capítulo. Con estos datos exactos, se procederá a la ubicación de las galgas y deformímetros en el sistema con el fin de registrar los datos reales en las pruebas reales de repujado mediante CNC, así como iniciar a analizar todo el sistema en diferentes corridas con diferentes cambios en las condiciones de los parámetros, a fin del último objetivo de este proyecto que es optimizar el proceso y recomendar los parámetros con los cuales se logren los mejores resultados.

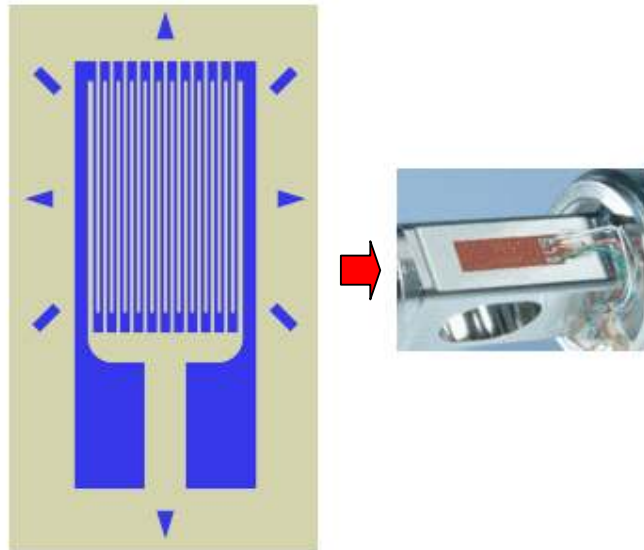
### 6.1 Galgas de deformación

Una galga extensométrica o extensómetro es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica. Inventado por los ingenieros Edward E. Simmons y Arthur C. Ruge en 1938.

En su forma más común, consiste en un estampado de una lámina metálica fijada a una base flexible y aislante. La galga se adhiere al objeto cuya deformación se quiere estudiar mediante un adhesivo, como el cianoacrilato. Según se deforma el objeto, también lo hace la lámina, provocando así una variación en su resistencia eléctrica.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones metálicas, como por ejemplo constantán, nicrom o elementos semiconductores como por ejemplo el silicio y el germanio. Es por ello que podemos clasificar las galgas en dos tipos: las metálicas y las semiconductoras.

Gráfico 17. Galga extensiométrica de lámina (Strength Gage)



(Fuente: es.wikipedia.org)

La galga es mucho más sensible a las deformaciones en la dirección vertical que en la horizontal. Las marcas alrededor sirven para alinear la galga durante la instalación.

## 6.2 Fenómeno físico

Las galgas extensiométricas aprovechan la propiedad física de la resistencia eléctrica y su dependencia no sólo de la resistividad del conductor, la cual es una propiedad del propio material, sino también de la geometría del conductor. Cuando un conductor eléctrico es deformado dentro de su límite de elasticidad, de tal forma que no se produzca rotura o deformación permanente en el mismo, éste se volverá más estrecho y alargado.

Este hecho incrementa su resistencia eléctrica. Análogamente, cuando el conductor es comprimido se acorta y ensancha, reduciendo así su resistencia al paso de corriente eléctrica. De esta manera, midiendo la resistencia eléctrica de la galga, puede deducirse la magnitud del esfuerzo aplicado sobre el objeto.

### 6.3 Ventajas

- Pequeño tamaño
- Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna
- Tienen una excelente respuesta en frecuencia
- Pueden utilizarse para medidas estáticas y dinámicas
- Compensación de temperatura relativamente fácil
- No son influidas por los campos magnéticos

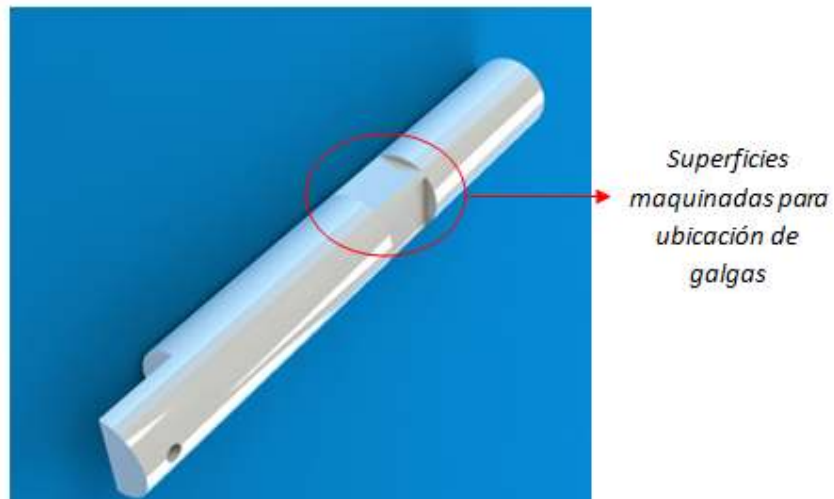
### 6.4 Limitaciones

- El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico
- Se necesita una buena adhesión al objeto, para que la medida de la deformación sea correcta.
- Un incremento en la temperatura tiene como consecuencia una variación de la resistencia aún sin aplicar ningún esfuerzo.
- Coeficiente de dilatación de la galga parecido al del soporte para evitar tensiones mecánicas.
- Auto calentamiento de la galga por la disipación de potencia de alimentación.

Para la ubicación de las galgas fue necesario realizar un previo maquinado en la herramienta, la cual en principio es totalmente tubular, pero, se debió garantizar una superficie plana en donde se ubicarían las galgas, para lo cual se hizo dicho maquinado.

En el gráfico 18, se muestra la herramienta con las superficies maquinadas, en donde fue ubicada la galga de deformación, con base en los puntos críticos ya identificados anteriormente.

Gráfico 18. Herramienta maquinada para ubicación de las galgas



(Fuente: propia)

En la foto 11, se muestra la galga extensiométrica de lámina ya ubicada y utilizada para las pruebas y la medición de las deformaciones.

Foto 11. Galga de lámina en la herramienta para mediciones en las pruebas



(Fuente: propia)

## 7. PRUEBAS FINALES Y ANALISIS DE PARAMETROS PARA EL PROCESO

Con el montaje listo y la configuración del sistema puesto a punto, se procede a las pruebas finales del proceso de repujado, para lo cual, es necesario definir los parámetros de trabajo del proceso y la variación de los mismos. Los parámetros utilizados son los siguientes

### 7.1 Avance

Es la distancia que recorre o avanza la herramienta hacia la pieza, este avance es generado en los carros del torno, en donde esta soportado el portaherramientas, el avance es medido en mm por minuto. Se definieron tres valores a trabajar en las pruebas, los cuales son 150,250 y 350 mm/min. Estos valores fueron definidos con base a recomendaciones de personal ya experimentado en procesos de repujado anteriores.

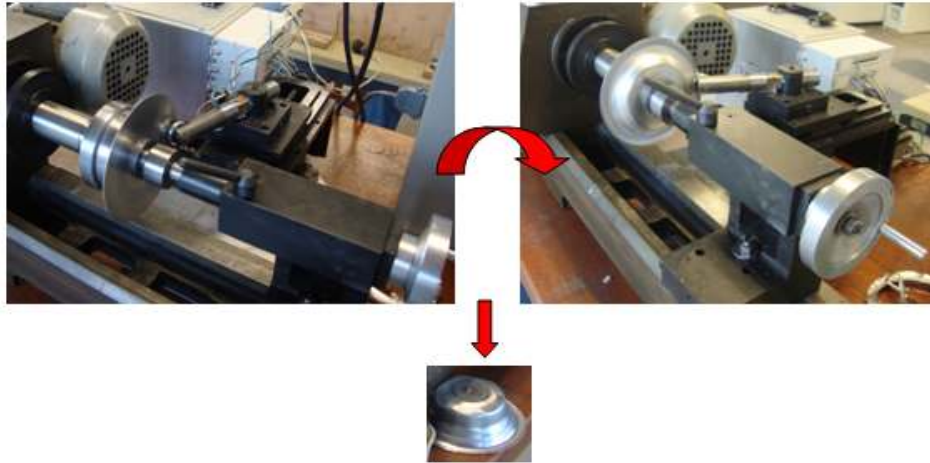
### 7.2 Velocidad del motor (RPM)

Esta velocidad es controlada mediante porcentajes, para lo cual se estipularon porcentajes de 45% y 55% de la velocidad del motor (1500 y 1800 RPM). Las RPM totales que alcanza el motor (100%) corresponden a 3320 RPM., es decir que las RPM trabajadas en el proceso son de 1500 RPM (45%) y 1800 RPM (55%).Lo anterior también fue siguiendo recomendaciones de proceso de repujado por el personal del laboratorio.

### 7.3 Resultados

A Continuación se muestran fotos de corridas del proceso

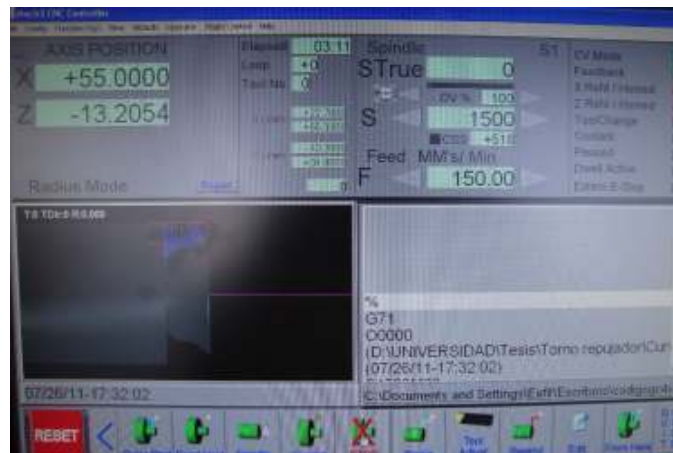
Foto 12. Imágenes corrida del proceso de repujado automático mediante CNC



(Fuente: propia)

En el gráfico siguiente, gráfico 19, también se muestra la simulación de las curvas seguidas por la herramienta y el código G, el cual muestra la trayectoria que sigue la herramienta en tiempo real, con base a la simulación previa hecha en software Pro/Engineer, a medida que el proceso está corriendo.

Gráfico 19. Programa CNC Simulando las curvas en tiempo real en la máquina



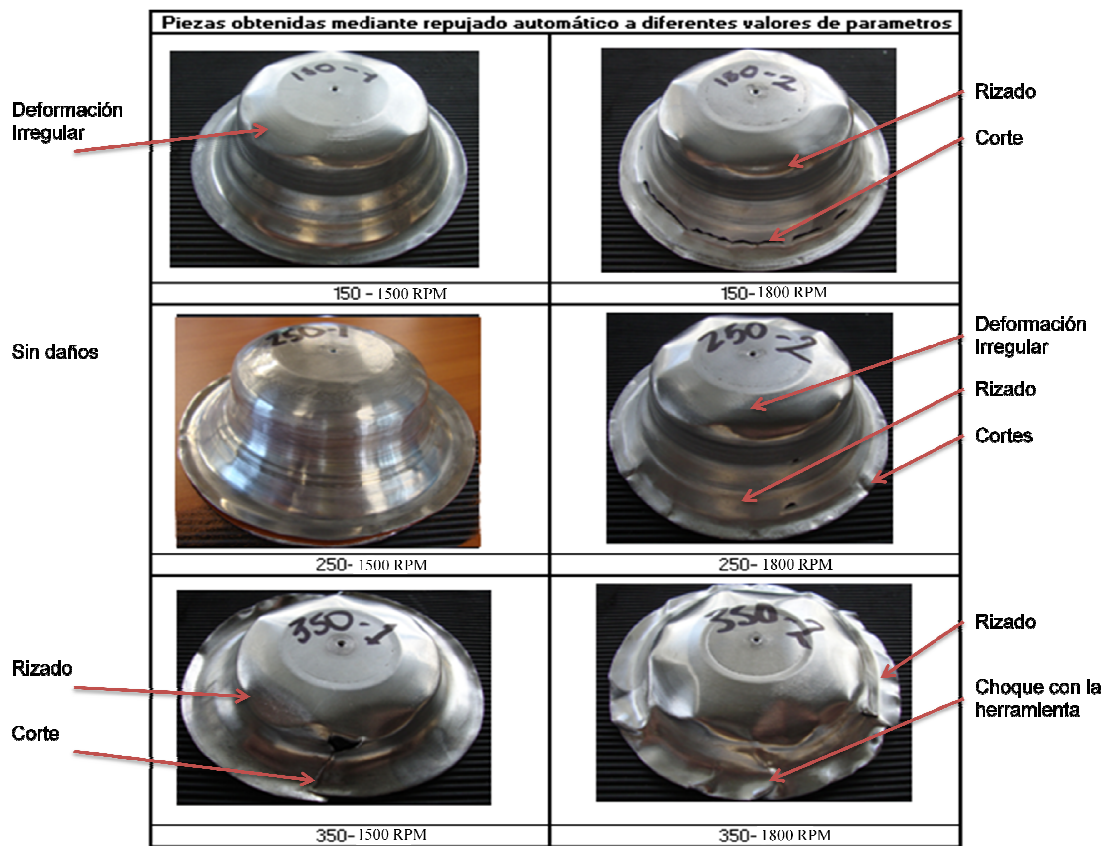
(Fuente: propia)



Se puede observar al lado izquierdo de la pantalla del programa la trayectoria de las curvas que sigue la herramienta a medida que esta deformando la pieza, tanto entrando como saliendo, tal como se había previsto anteriormente en capítulos anteriores, en la parte derecha muestra el código G que genera dichas curvas mostradas, en tiempo real, y los diferentes movimientos de interpolación lineal.

En el siguiente gráfico, gráfico 20, se muestran los productos obtenidos con la variación de las diferentes velocidades (150,250,350) mm/min y (1500 y 1800) RPM del motor.

Gráfico 20. Productos obtenidos mediante repujado automático a diferentes valores de parametros

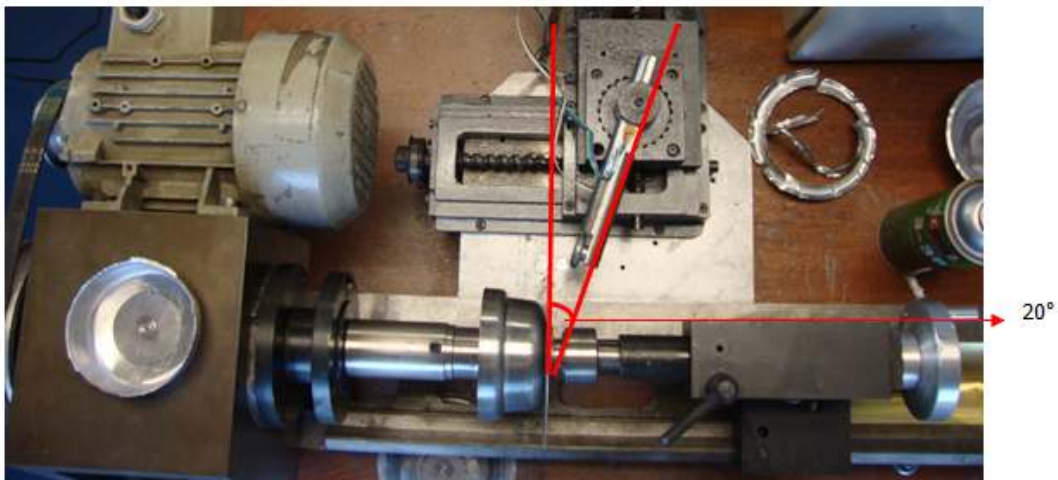


(Fuente: propia)

Ahora es necesario, gracias a las galgas de medición, analizar los datos registrados de de deformación unitaria longitudinal y transversal, que sufre la herramienta, con el fin de identificar en que momento se pudiesen presentar fallas.

La deformación unitaria longitudinal corresponde a las deformaciones unitarias a lo largo del eje Y , y, la deformación unitaria transversal corresponde a los datos deformaciones en el eje X y Z, ya que la herramienta esta trabajando a 20° de inclinación con respecto a la pieza (ver en el gráfico 21) , por lo tanto esta fuerza se descompone para hallar las deformaciones en cada eje.

Gráfico 21. Inclinación de la herramienta respecto a la pieza de trabajo



(Fuente: propia)

Con la medición de las galgas se puede observar que pasa con las fuerzas cuando se producen fallos, por esta razón se registran los siguientes datos y sus respectivas gráficas, de las cuales se sacaran importantes conclusiones.

Se buscará a partir del modulo de Young del material de la herramienta, las deformaciones unitarias, los valores de las diferentes componentes de fuerzas en el eje X, Y y Z. Para lo anterior se parte de la siguiente formula

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde :        E= Modulo de Young del material de la herramienta  
                   $\epsilon$ = Deformación unitaria en un punto de la herramienta  
                   $\sigma$ = Esfuerzo

El modulo de Young (E) para el material de la herramienta (Acero 1020) es de 207 GPA.

$$\sigma = E \times \epsilon$$

Asi mismo para la obtención de las fuerzas partimos de la ecuación de esfuerzo, donde se tiene:

$$\sigma = F/A$$

Donde:        F = Fuerza  
                  A = Area de la sección transversal de la herramienta (265,02 mm<sup>2</sup>)

$$1\text{mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A = 0,00026502 \text{ m}^2$$

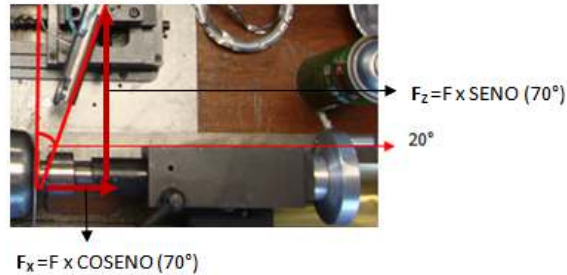
El area de la sección transversal se puede observar en el anexo B donde tambien se encuentra el valor calculado de la misma.

Se obtiene de lo anterior las fuerzas y sus componentes.

$$F = \sigma \times A$$

Como la herramienta esta inclinada a 20° respecto a la pieza, se obtienen las componentes de las fuerzas en el eje X y Z partiendo de las deformaciones longitudinales sufridas en la herramienta. En el gráfico 22, se muestra la descomposición de esta fuerza a lo largo del eje de la herramienta en sus componentes en el eje X y Z.

Gráfico 22. Descomposición de fuerzas en sus componentes X y Z



(Fuente: propia)

En la siguiente tabla, tabla 2, se muestran los valores ya obtenidos con los cuales será necesario el cálculo de las diferentes componentes de las fuerzas, para su posterior análisis con base en los gráficos obtenidos.

Tabla 2. Valores para cálculo de componentes de las fuerzas en X, Y y Z

E-Modulo de Young Acero 1020 (Pa)	2,07E+11
A-Área sección transversal (m <sup>2</sup> )	0,00026502
Seno 70°	0,342
Coseno 70°	0,9397

Para cada corrida del proceso su producto, se registraron los datos en lecturas por segundo, para lo cual se obtienen gran cantidad de lecturas (alrededor de 1000 lecturas) por cada combinación de parámetros.

Debido a la gran extensión y cantidad de datos, se sacaron las gráficas correspondientes a dichos datos, las cuales serán de vital importancia para el análisis e interpretación de los resultados y sacar las respectivas conclusiones.

Las tablas para cada gráfico se encuentran en archivos de Excel donde se encuentran los datos de deformación unitaria registrados por las galgas.

En la siguiente tabla, tabla 3, es una tabla modelo en la cual se muestra el encabezado y final de los datos extraídos con base a las formulas ya anteriormente explicadas y los datos de deformación registrados por las galgas. Posteriormente se generan los gráficos con base a estas tablas para cada combinación de parámetros.

Tabla 3. Tabla modelo de los datos registrados de deformación unitaria y cálculo de las fuerzas

Tabla de datos registrados por las galgas y cálculo de fuerzas							
Lect.	$\epsilon$ Longitudinal	$\epsilon$ transversal	$\sigma$ Long.	$\sigma$ transv.	Fz (Newton)	Fx (Newton)	Fy (Newton)
1	1,22369E-07	-6,11578E-07	25330,383	-126596,646	2,29586587	6,308260699	-33,5506431
2	-2,44738E-07	-9,78524E-07	-50660,766	-202554,468	-4,59173174	-12,6165214	-53,6809851
3	-1,22369E-07	-1,34547E-06	-25330,383	-278512,29	-2,29586587	-6,3082607	-73,8113271
4	-1,22369E-07	-1,46779E-06	-25330,383	-303831,495	-2,29586587	-6,3082607	-80,5214228
5	-2,44738E-07	-1,46779E-06	-50660,766	-303831,495	-4,59173174	-12,6165214	-80,5214228
6	-3,67108E-07	-1,34547E-06	-75991,356	-278512,29	-6,88761638	-18,9248336	-73,8113271
7	-1,22369E-07	-1,46779E-06	-25330,383	-303831,495	-2,29586587	-6,3082607	-80,5214228
8	-1,22369E-07	-1,22316E-06	-25330,383	-253193,085	-2,29586587	-6,3082607	-67,1012314
9	-2,44738E-07	-1,22316E-06	-50660,766	-253193,085	-4,59173174	-12,6165214	-67,1012314
10	-1,22369E-07	-1,5901E-06	-25330,383	-329150,907	-2,29586587	-6,3082607	-87,2315734
11	-4,89477E-07	-1,95705E-06	-101321,739	-405108,522	-9,18348225	-25,2330943	-107,361861
12	0	-1,95705E-06	0	-405108,522	0	0	-107,361861
13	8,56586E-07	-2,44631E-06	177313,302	-506385,549	16,0711174	44,15797955	-134,202298
14	9,78955E-07	-2,93557E-06	202643,685	-607662,369	18,3669833	50,46624025	-161,042681
15	1,22369E-06	-2,93557E-06	253304,658	-607662,369	22,9587338	63,0828132	-161,042681
16	1,46843E-06	-3,54714E-06	303965,631	-734258,187	27,5504843	75,69938614	-194,593105
17	1,34606E-06	-3,42483E-06	278635,248	-708938,982	25,2546184	69,39112545	-187,883009
18	6,11847E-07	-2,81325E-06	126652,329	-582343,164	11,4793669	31,5414066	-154,332585
19	4,89477E-07	-3,30251E-06	101321,739	-683619,777	9,18348225	25,23309435	-181,172913
20	7,34216E-07	-2,93557E-06	151982,712	-607662,369	13,7752328	37,8496673	-161,042681
21	4,89477E-07	-3,30251E-06	101321,739	-683619,777	9,18348225	25,23309435	-181,172913
22	2,44739E-07	-3,66946E-06	50660,973	-759577,392	4,5917505	12,61657295	-201,3032

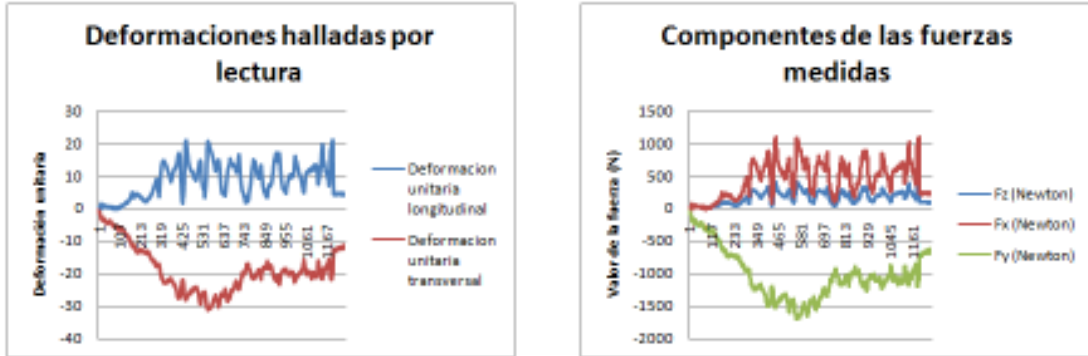
1244	4,40531E-06	-1,18645E-05	911899,584	-2455946,53	82,6516967	227,0988286	-650,87495
1245	4,28294E-06	-1,18645E-05	886568,994	-2455946,53	80,3558121	220,7905163	-650,87495
1246	4,65005E-06	-1,19868E-05	962560,971	-2481265,32	87,2434847	239,7155046	-657,584936
1247	4,0382E-06	-1,18645E-05	835907,814	-2455946,53	75,7640428	208,1738918	-650,87495
1248	4,28294E-06	-1,22314E-05	886568,994	-2531902,7	80,3558121	220,7905163	-671,004853
1249	4,40531E-06	-1,21091E-05	911899,584	-2506583,91	82,6516967	227,0988286	-664,294867
1250	4,52768E-06	-1,17422E-05	937230,381	-2430627,74	84,9476001	233,4071924	-644,164964
1251	4,28294E-06	-1,22314E-05	886568,994	-2531902,7	80,3558121	220,7905163	-671,004853
1252	4,28294E-06	-1,21091E-05	886568,994	-2506583,91	80,3558121	220,7905163	-664,294867
1253	4,52768E-06	-1,19868E-05	937230,381	-2481265,32	84,9476001	233,4071924	-657,584936
1254	4,16057E-06	-1,16199E-05	861238,404	-2405308,95	78,0599274	214,4822041	-637,454978
1255	4,0382E-06	-1,13752E-05	835907,814	-2354671,58	75,7640428	208,1738918	-624,035061
1256	4,28294E-06	-1,17422E-05	886568,994	-2430627,74	80,3558121	220,7905163	-644,164964
1257	4,28294E-06	-1,18645E-05	886568,994	-2455946,53	80,3558121	220,7905163	-650,87495
1258	4,40531E-06	-1,18645E-05	911899,584	-2455946,53	82,6516967	227,0988286	-650,87495
1259	4,65005E-06	-1,18645E-05	962560,971	-2455946,53	87,2434847	239,7155046	-650,87495
1260	4,28294E-06	-1,23537E-05	886568,994	-2557221,49	80,3558121	220,7905163	-677,714839
1261	4,40531E-06	-1,2476E-05	911899,584	-2582540,07	82,6516967	227,0988286	-684,42477
1262	4,52768E-06	-1,22314E-05	937230,381	-2531902,7	84,9476001	233,4071924	-671,004853
1263	4,28294E-06	-1,2476E-05	886568,994	-2582540,07	80,3558121	220,7905163	-684,42477
1264	4,28294E-06	-1,2476E-05	886568,994	-2582540,07	80,3558121	220,7905163	-684,42477
1265	4,52768E-06	-1,21091E-05	937230,381	-2506583,91	84,9476001	233,4071924	-664,294867
1266	4,28294E-06	-1,25984E-05	886568,994	-2607858,86	80,3558121	220,7905163	-691,134756

(Fuente: propia)

Para cada combinación de parámetros, se calcularon los datos de las fuerzas como el modelo de la tabla anterior, para cada combinación Avance-RPM existe una tabla de datos, como la tabla modelo, tabla 3, con gran cantidad de datos, y con base a dichas tablas, se generaron los gráficos de deformación y fuerzas calculadas en cada corrida del proceso de repujado automático. Estos gráficos y su respectivo análisis se muestran a continuación.

### 7.3.1 Combinación parámetros 150mm/min - 1500 RPM

Gráfico 23. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 150 mm/min - 1500 RPM

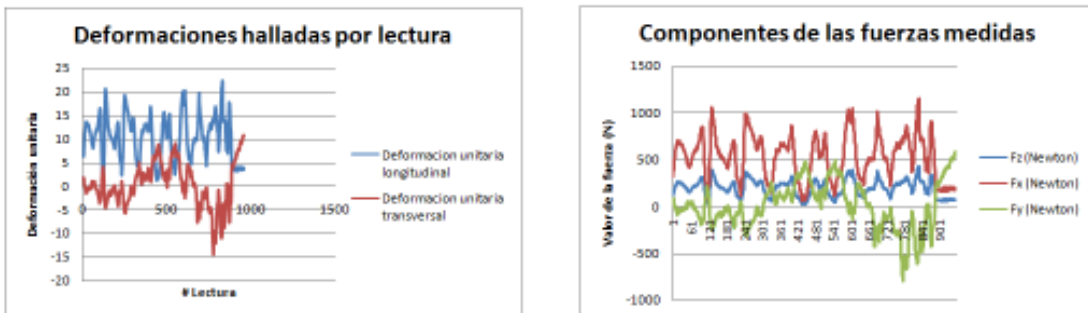


(Fuente: propia)

En términos físicos, del gráfico 23, se observa claramente que los valores de fuerzas y deformaciones no tienen oscilaciones bruscas, y dichas deformaciones explican el comportamiento físico de la herramienta ya que esta entra y sale con respecto a la pieza, como en realidad se percibe en el proceso.

### 7.3.2 Combinación parámetros 150mm/min - 1800 RPM

Gráfico 24. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 150mm/min - 1800 RPM



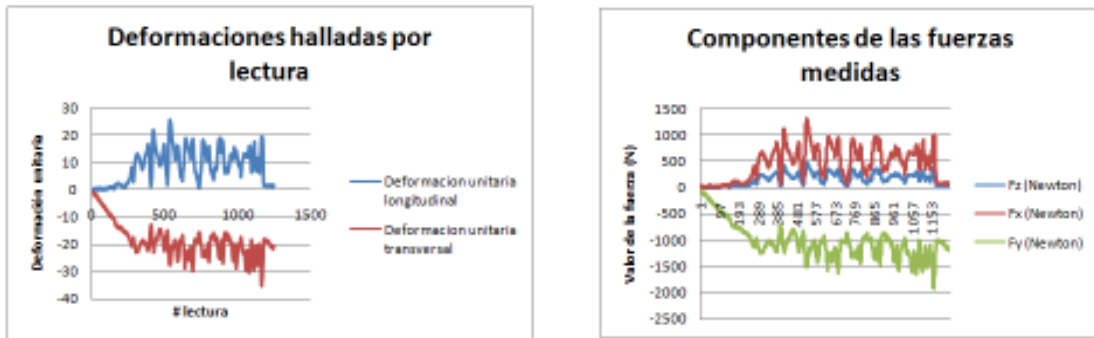
(Fuente: propia)



Durante la prueba se observó rizado a partir de la lectura #300 que corresponde al rizado que se vio en la realidad, el cual produce mayores esfuerzos y hace que la lámina impacte en cada pico contra la herramienta, todo esto debido a la alta velocidad del motor que hace que la lámina se deforme de una forma indeseada, por ello el gráfico 24 muestra ciertos picos cada periodo de lectura.

### 7.3.3 Combinación parámetros 250mm/min – 1500 RPM

Gráfico 25. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 250mm/min - 1500 RPM



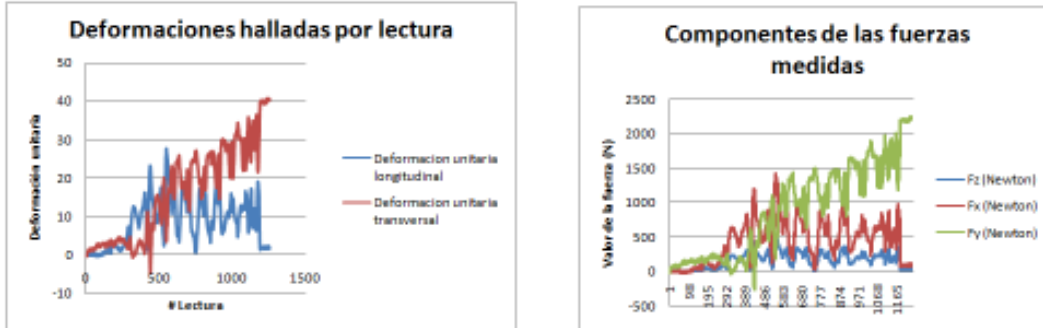
(Fuente: propia)

En la prueba se observó mejor comportamiento y estabilidad de acuerdo a las curvas programadas, y el producto obtenido presentó mejor apariencia y funcionalidad, del gráfico 25, se observa claramente que los valores de fuerzas y deformaciones no tienen oscilaciones bruscas, como en la prueba (150-45), igualmente dichas deformaciones explican el comportamiento físico de la herramienta ya que esta entra y sale con respecto a la pieza, como en realidad se percibe en el proceso.



### 7.3.4 Combinación parámetros 250mm/min – 1800 RPM

Gráfico 26. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 250mm/min - 1800 RPM

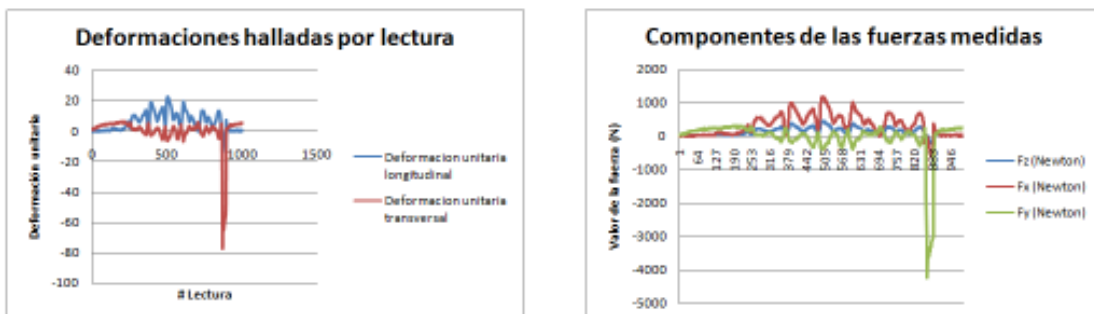


(Fuente: propia)

Igualmente en esta prueba existe una deformación irregular, y rizado por la misma razón anterior además de un excesivo esfuerzo transversal que se incrementa cada vez más en toda la prueba y, esto es debido al daño en la lámina desde el principio y que se va empeorando al avanzar, tal como lo muestra el gráfico 26, donde las deformaciones y fuerzas y esfuerzos producidos son cada vez mayores.

### 7.3.5 Combinación parámetros 350mm/min – 1500 RPM

Gráfico 27. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 350mm/min - 1500 RPM

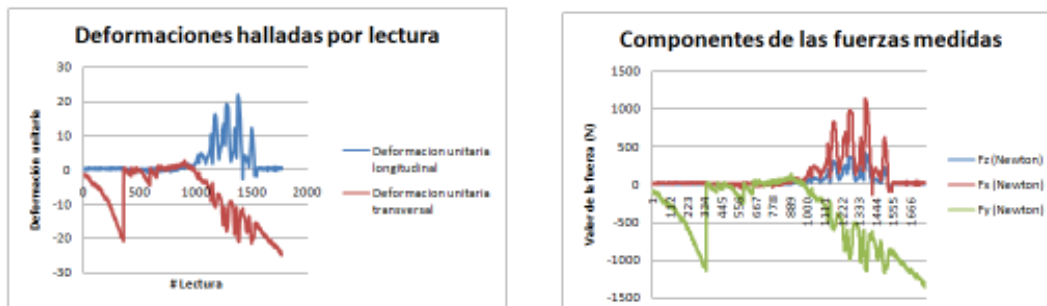


(Fuente: propia)

En esta prueba, se presentan los mismos problemas pero en mayor grado, ya que existe una deformación irregular en la pieza debido al gran avance que no permite que la lámina se deforme gradualmente contra el molde, además se observa que en el dato 850 aprox. se produce un atranque del disco que se revienta contra la herramienta y se registra como una gran deformación en el gráfico 27.

### 7.3.6 Combinación parámetros 350mm/min – 1800 RPM

Gráfico 28. Gráfico de deformaciones unitarias y fuerzas calculadas para los parámetros 350mm/min - 1800 RPM



(Fuente: propia)

En esta prueba no existe atranque pero se presentan los mismos problemas que en el proceso anterior.

Con todo lo anterior, se puede observar que si las gráficas reportan unos esfuerzos menores y cíclicos que correspondan a las curvas programadas previamente, se obtienen mejores resultados, además se observan mejores resultados en un valor de 1500 RPM del motor que corresponde a lo hecho manualmente por un experto repujador, y una velocidad de avance media, ya que muy baja produce elevados esfuerzos, aumenta el tiempo de producción y puede ocasionar cortes por fricción y baja calidad de la pieza; por otra parte, la alta velocidad de avance no permite que la pieza se deforme gradualmente, puede producir rizado, corte y daños a la herramienta o a los componentes del torno.

### 7.3.7 Variación del espesor

La lámina de aluminio utilizada para realizar las pruebas 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); con un espesor de 0.5 mm.

Con base a los mejores resultados obtenidos en las pruebas, la combinación de parámetros 250 mm/min- 1500 RPM, se analizó el espesor de la pieza repujada, en la foto 13, se muestra el producto analizado y posteriormente, en la tabla 4, los datos de las mediciones de espesor registradas desde el centro de la pieza.

Foto 13. Pieza obtenida con mejores resultados para medición de su espesor



(Fuente: propia)

Desde el centro de la pieza se tomaron 20 marcas para registrar los datos del espesor y su posterior gráfica.

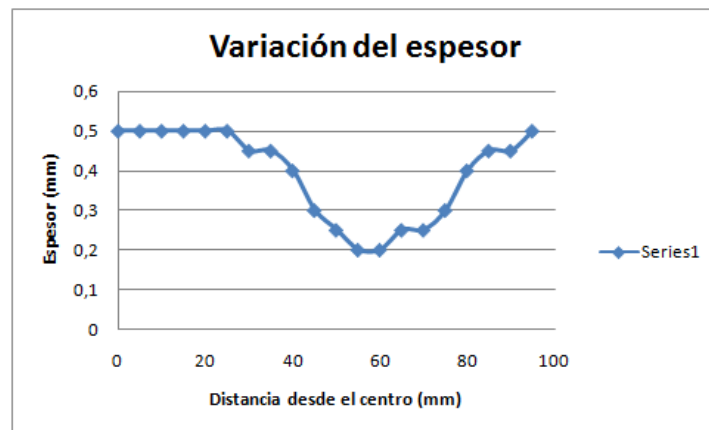
Tabla 4. Medición del espesor de la pieza en diferentes puntos

Dato	Medida desde el centro (mm)	Espesor (mm)
1	0	0,5
2	5	0,5
3	10	0,5
4	15	0,5
5	20	0,5
6	25	0,5
7	30	0,45
8	35	0,45
9	40	0,4
10	45	0,3
11	50	0,25
12	55	0,2
13	60	0,2
14	65	0,25
15	70	0,25
16	75	0,3
17	80	0,4
18	85	0,45
19	90	0,45
20	95	0,5

(Fuente: propia)

De la tabla anterior se puede analizar gráficamente los resultados obtenidos en la misma en términos de espesor.

Gráfico 29. Variación observada del espesor de la lámina repujada



(Fuente: propia)

Como se observa en el gráfico 29, los espesores de la pieza disminuyen entre ciertos valores, esto indica que a medida que la herramienta entra sobre la pieza, se muestran las mayores lecturas, si se observa el gráfico 25 de las fuerzas y deformaciones unitarias para esta combinación de parámetros, es decir mayores fuerzas que actúan en la misma entre las distancias de 20mm y 80mm medidas desde el centro de la pieza, esto quiere decir físicamente, que la presión ejercida entre estos valores anteriormente mencionados es mayor por lo cual se afecta el espesor de la pieza, de manera que este disminuye por dicha acción y efecto de las fuerzas ejercidas sobre la pieza, hay mayor efecto de compresión entre estas medidas y por ende el resultado es la reducción del espesor de la misma.

## 8. CONCLUSIONES

- Los mejores resultados físicos fueron con las pruebas de las combinaciones 150mm/min- 1500 RPM y 250mm/min- 1500 RPM y al observar las graficas se ve esto claramente ya que no se presentan variaciones bruscas en las deformaciones y adicionalmente las deformaciones (longitudinal y transversal) oscilan a medida que la herramienta entra y sale de la pieza como lo hace en realidad.
- Con base a lo anterior se observó mejor comportamiento y estabilidad de acuerdo a las curvas programadas, en la prueba con los parámetros 250 mm/min y 1500 RPM ,ya que el producto obtenido presentó mejor apariencia y funcionalidad , se observó que los valores de fuerzas y deformaciones no tienen oscilaciones bruscas, como en las otras pruebas, igualmente dichas deformaciones explican el comportamiento físico de la herramienta ya que esta entra y sale con respecto a la pieza, como en realidad se percibe en el proceso.
- Las fuerzas longitudinales a lo largo de la herramienta, presentan valores positivos, partiendo del gráfico 22, el sentido de las fuerzas muestran la compresión la cual sufre la herramienta cuando ejerce contacto con la pieza, explicándose claramente el fenómeno de deformaciones que sufre la herramienta cuando está en constante contacto con la pieza.
- Aunque el repujado de metal mediante CNC es muy eficaz para procesar los productos de manera rápida y eficiente, el repujado manual considera necesario el repujado por etapas, y suele ser una alternativa bastante considerable para series cortas de producción con el fin de liberar costosos equipos de CNC en lotes de producción no tan complejos y los productos son muy competitivos en términos de calidad y funcionalidad.

## 9. RECOMENDACIONES

- Para repujar piezas de mayor calibre y materiales menos dúctiles, se recomienda instalar un dispositivo de apoyo en la parte trasera de la lámina, que ayude a controlar su deformación y evite problemas como el rizado o cortes.
- Con la creación de curvas y análisis posterior de estas, se abre la posibilidad de crear un software que permita la creación de estas curvas automáticamente dando unos parámetros de entrada, como son geometría, material y espesor de lámina, que permitan por medio de variable pre-establecidas la interpretación automática de recorridos que se deben dar para la realización de piezas para cualquier tipo de molde.
- Observando el repujado manual y algunos beneficios que este proceso posee, se podría además de los dos movimientos propios de un torno convencional, agregar un tercer movimiento de rotación de la herramienta, que permitiría ahorrar algunas trayectorias, mejorar la deformación de la lámina, disminuir tiempos de maquinado, evitar daños y mejorar la calidad final de las piezas.
- Para optimizar el sistema, disminuir tiempos de producción y mejorar el agarre, se recomienda reemplazar el centro punto convencional, por un sistema neumático que además garantice la concentricidad de la lamina con el molde; este debe permitir el montaje de la lámina y desmontaje de la pieza terminada en un solo movimiento rápido, como lo hacen maquinas industriales que existen en el medio.
- Para maquinado de piezas de mayores dimensiones, mayor espesor, material más rígido o que requieran un mejor acabado se puede incluir un sistema de auto lubricación que disminuya la fricción en el contacto herramienta-lámina.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

Ferdinand P. Beer, E.Russell Jhonston Jr. (1997). Mecánica vectorial para ingenieros, Estática. Ed.: Mc Graw Hill, sexta edición 1997.

Rendón Vélez, J. D., & Palacio Gonzalez, J. E. (2009). Repujadora automática de lámina en torno. Medellín.

ICONTEC NTC- 976. (1975). Consultado en 2010, de <http://www.icontec.org/Catalogo/N/ntc%20976/ntc%20976.asp?CodIdioma=ESP>

ICONTEC NTC-1324. (1977). Consultado en 2010, de <http://www.icontec.org/Catalogo/N/ntc%201324/ntc%201324.asp?CodIdioma=ESP>

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

Davis, J. (2001). American Society For Metals. Ohio: Metals Handbook

Krar, S. & Oswald, J. (1989). Operación de máquinas herramientas. Mc Graw Hill

Runge, M. (1994). Spinning and flow forming. Germany. Verlag Moderne Industrie AG.



## 11. ANEXOS

### ANEXO A. CÓDIGO G DEL PROCESO DE REPUJADO

%	X80.983Z10.655	X80.328Z22.499
G71	X87.77Z12.576	X82.576Z23.561
O0000	G00X100.	X84.601Z24.658
(C:\Users\TEMP\Desktop\curvafinal.ncl.1)	Z-8.2	X86.45Z25.81
(06/21/11-12:48:28)	Z-3.2	G00X100.
S1500M03	X30.	Z-8.2
G00X30.Y0.	Z.3	Z-3.2
Z-3.2	X22.7	X30.
Z.3	G01X25.7	Z.3
X22.7	X29.914Z1.285	X22.7
G01X87.7F300.	X38.229Z3.339	G01X23.684Z.232
G00X100.	X46.502Z5.532	X25.123Z.252
Z-8.2	X54.733Z7.862	X26.598Z.415
Z-3.2	X62.923Z10.331	X28.108Z.723
X30.	X71.073Z12.939	X29.65Z1.181
Z.3	X79.183Z15.686	X31.214Z1.794
X22.7	X87.256Z18.572	X32.791Z2.562
G01X24.7	G00X100.	X34.364Z3.486
X25.793Z.303	Z-8.2	X35.908Z4.555
X31.375Z.4	Z-3.2	X37.454Z5.787
X37.258Z.642	X30.	X39.089Z7.248
X43.516Z1.037	Z.3	X40.77Z8.874
X50.262Z1.598	X22.7	X43.175Z11.283
X57.659Z2.344	G01X25.7	X45.158Z13.196
X65.88Z3.293	X26.717Z.342	X46.836Z14.673
X74.247Z4.338	X28.067Z.522	X48.533Z15.991
X87.787Z6.07	X29.499Z.85	X50.393Z17.263
G00X100.	X31.038Z1.34	X52.518Z18.558
Z-8.2	X32.713Z2.007	X55.022Z19.941
Z-3.2	X34.546Z2.859	X58.064Z21.473
X30.	X36.487Z3.852	X61.447Z23.029
Z.3	X39.935Z5.692	X65.259Z24.649
X22.7	X43.307Z7.386	X69.32Z26.277
G01X24.7	X46.989Z9.124	X73.608Z27.954
X25.73Z.403	X48.179Z9.676	X78.756Z30.003
X32.74Z1.19	X52.025Z11.469	X82.761Z31.7
X39.718Z2.117	X56.892Z13.713	X86.183Z33.275
X46.665Z3.186	X60.667Z15.354	G00X100.
X53.583Z4.396	X63.963Z16.662	Z-8.2
X60.473Z5.748	X67.311Z17.852	Z-3.2
X67.335Z7.242	X70.707Z18.979	X30.
X74.171Z8.877	X74.739Z20.331	Z.3
	X77.773Z21.443	X22.7

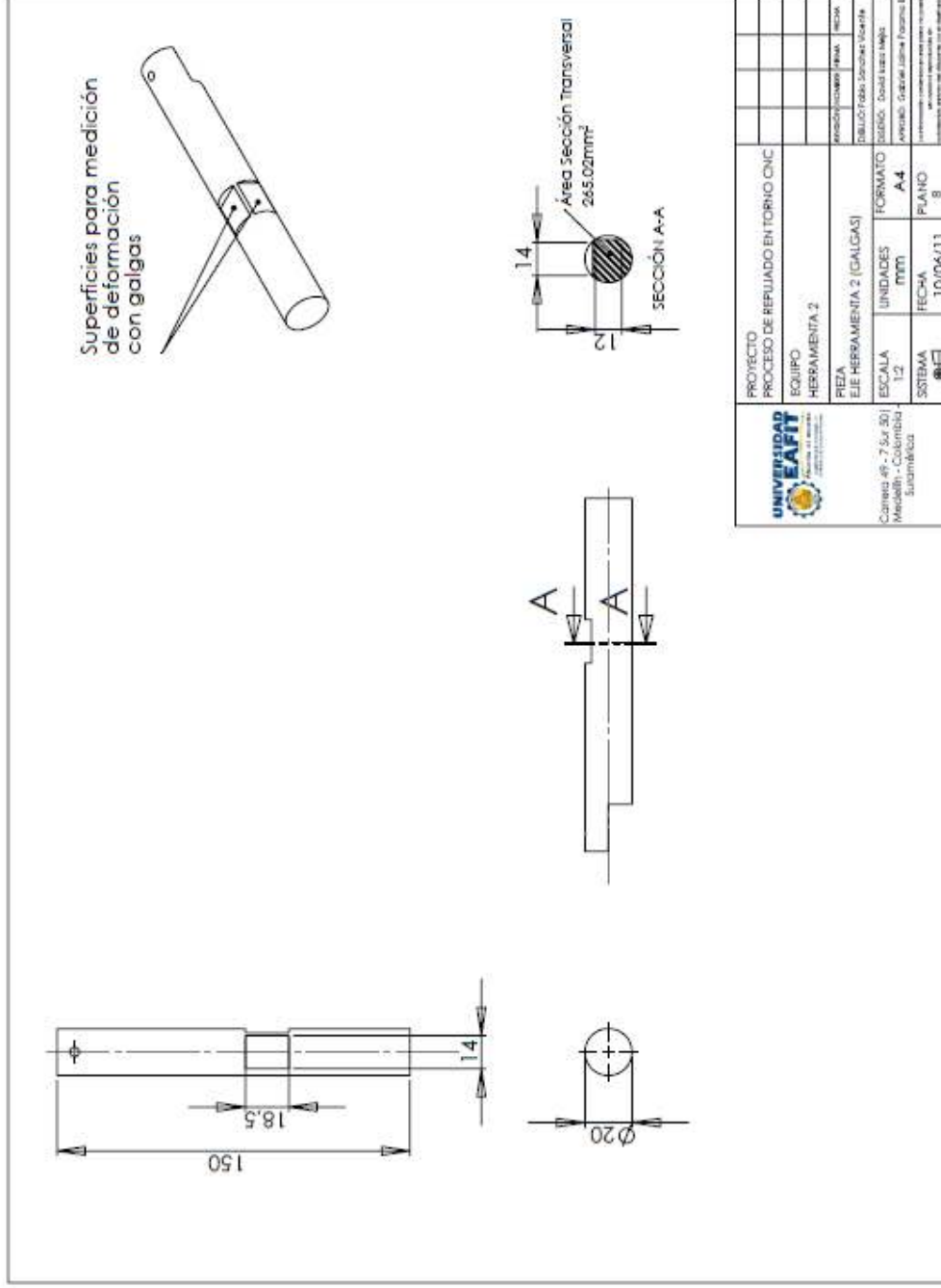
G01X23.033Z.279	X37.557Z10.954	X39.482Z22.852
X24.496Z.277	X38.137Z12.643	X40.078Z23.74
X25.986Z.419	X39.05Z15.509	X40.745Z24.495
X27.449Z.702	X39.709Z17.367	X41.497Z25.139
X28.848Z1.114	X40.34Z18.835	X42.326Z25.736
X30.156Z1.643	X40.996Z20.063	X43.018Z26.325
X31.358Z2.279	X41.713Z21.133	X43.623Z27.022
X32.481Z3.03	X42.541Z22.126	X44.16Z27.854
X33.588Z3.937	X43.565Z23.155	X44.631Z28.836
X34.699Z5.022	X44.795Z24.237	X45.029Z29.964
X35.837Z6.318	X45.931Z25.167	X45.359Z31.178
X37.03Z7.862	X47.483Z26.418	X45.806Z33.074
X38.245Z9.585	X49.696Z28.269	X46.127Z34.22
X40.034Z12.226	X51.397Z29.822	X46.246Z34.845
X41.861Z14.804	X52.776Z31.237	X46.787Z37.203
X43.52Z16.946	X53.91Z32.575	X47.467Z39.521
X45.108Z18.795	X54.844Z33.873	X48.285Z41.8
X46.713Z20.46	X55.604Z35.152	G00X100.
X48.433Z22.043	X56.208Z36.43	Z-8.2
X50.395Z23.666	X56.668Z37.72	Z-3.2
X52.654Z25.367	X56.989Z39.036	X30.
X55.255Z27.18	X57.173Z40.392	Z.3
X57.85Z28.904	X57.219Z41.8	X22.7
X62.078Z31.682	G00X100.	G01X27.2
X65.005Z33.695	Z-8.2	X28.231Z.61
X67.371Z35.452	Z-3.2	X29.353Z1.087
X69.379Z37.091	X30.	X30.443Z1.704
X71.12Z38.674	Z.3	X31.493Z2.459
X72.645Z40.236	X22.7	X32.517Z3.37
X73.988Z41.8	G01X23.024Z.278	X33.463Z4.402
G00X100.	X24.471Z.267	X34.302Z5.525
Z-8.2	X25.862Z.392	X34.995Z6.678
Z-3.2	X27.199Z.652	X35.534Z7.836
X30.	X28.483Z1.045	X35.921Z8.98
Z.3	X29.697Z1.563	X36.163Z10.123
X22.7	X30.826Z2.197	X36.312Z11.315
G01X23.564Z.241	X31.884Z2.953	X36.46Z12.473
X24.909Z.267	X32.874Z3.836	X36.988Z16.006
X26.263Z.436	X33.762Z4.819	X37.304Z18.327
X27.604Z.749	X34.519Z5.867	X37.844Z22.388
X28.906Z1.199	X35.151Z6.979	X38.057Z23.968
X30.153Z1.783	X35.698Z8.22	X38.152Z24.767
X31.347Z2.499	X36.173Z9.629	X38.295Z25.319
X32.468Z3.339	X36.588Z11.255	X38.519Z25.751
X33.517Z4.303	X36.952Z13.104	X38.814Z26.063
X34.5Z5.399	X37.653Z17.242	X39.192Z26.267
X35.406Z6.623	X38.047Z19.09	X39.609Z26.34
X36.222Z7.965	X38.473Z20.574	X40.04Z26.332
X36.935Z9.408	X38.949Z21.809	X40.647Z26.367

X41.216Z26.536  
X41.746Z26.836  
X42.274Z27.287  
X42.713Z27.832  
X43.019Z28.43  
X43.209Z29.073  
X43.332Z29.854

X43.388Z30.69  
X43.412Z31.43  
X43.463Z32.591  
X43.526Z33.543  
X43.606Z34.638  
X43.764Z37.084  
X44.095Z41.324

X44.58Z45.84  
G00X100.  
Z-8.2  
M30  
%

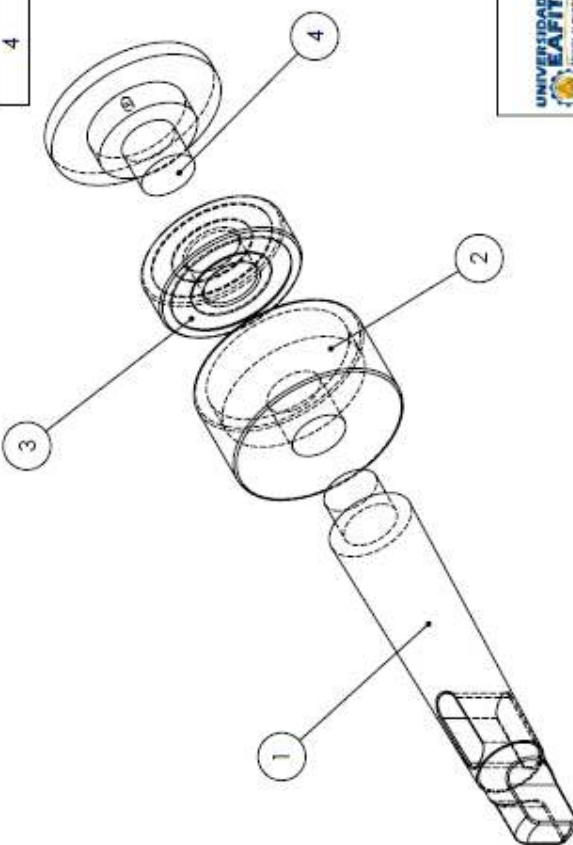
## ANEXO B. PLANOS EJE DE LA HERRAMIENTA




 <b>UNIVERSIDAD EAFIT</b> <small>Escuela de Ingeniería</small> <small>Facultad de Ingeniería</small>	PROYECTO	PROCESO DE REFILADO EN TORNO CNC						
	EQUIPO	HERRAMIENTA 2						
	PIEZA	EJE HERRAMIENTA 2 (GALGAS)						
	ESCALA	1:2	UNIDADES	mm	FORMATO	A4		
	SISTEMA	ISO	FECHA	10/06/11	PLANO	8		
	Carrera 49 - 7 Sur 30 Medellín - Colombia Suramérica							
	<small>El presente documento es propiedad de EAFIT. No se permite la explotación económica ni la transformación de esta obra. Queda permitida la impresión en su totalidad.</small>							

## ANEXO C. PLANOS ENSAMBLE DEL CENTROPUNTO

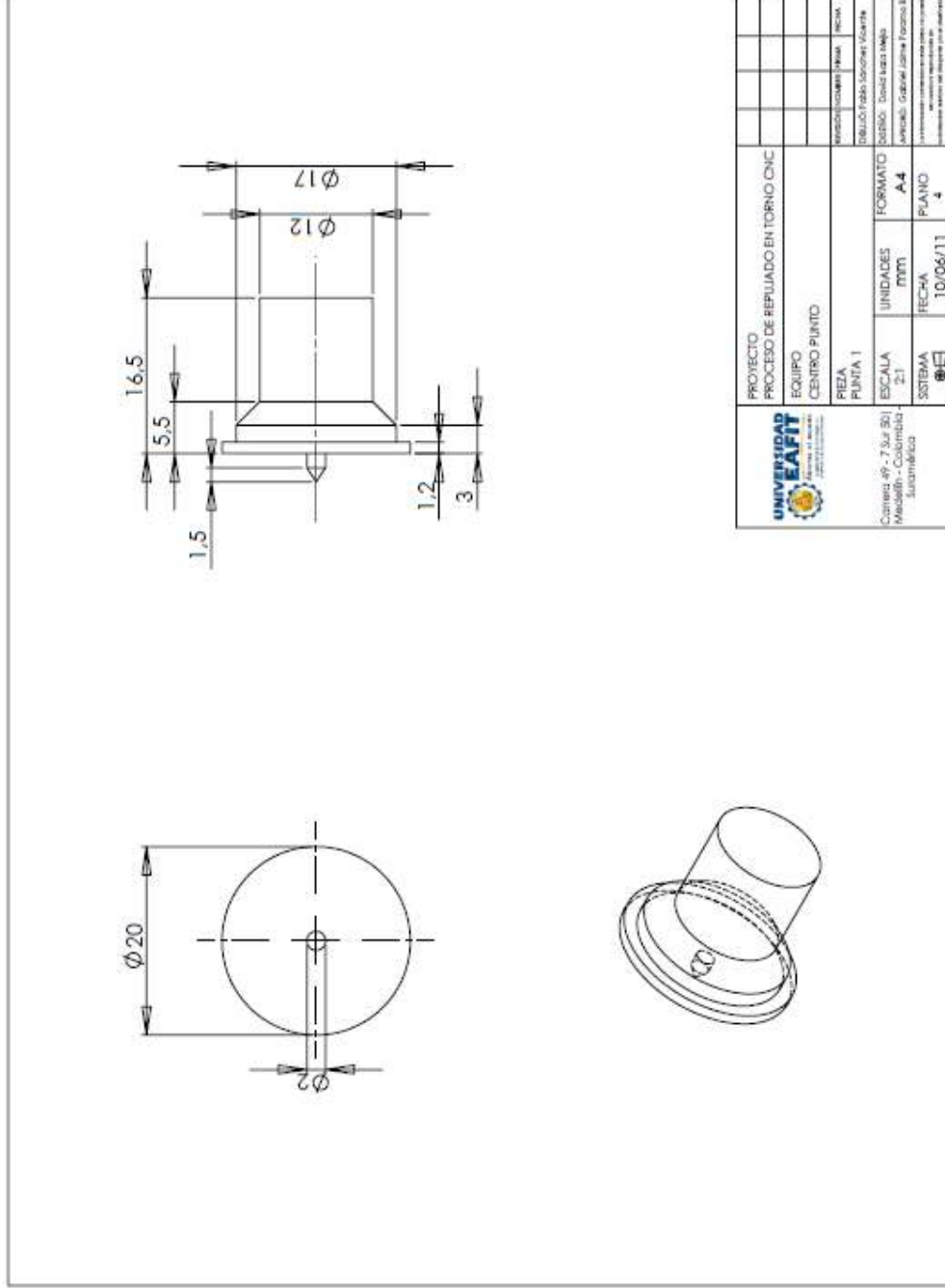
LISTA DE COMPONENTES		
NÚMERO	NOMBRE	PLANO
1	Cono reductor 2-1	
2	Cuna para rodamiento	3
3	Rodamiento	
4	Punta 2	5

The diagram shows an exploded view of a mechanical assembly. Callout 1 points to a conical part (reducer cone). Callout 2 points to a housing or support structure. Callout 3 points to a bearing. Callout 4 points to a tip or end component. The parts are shown in their relative positions as they would be assembled.

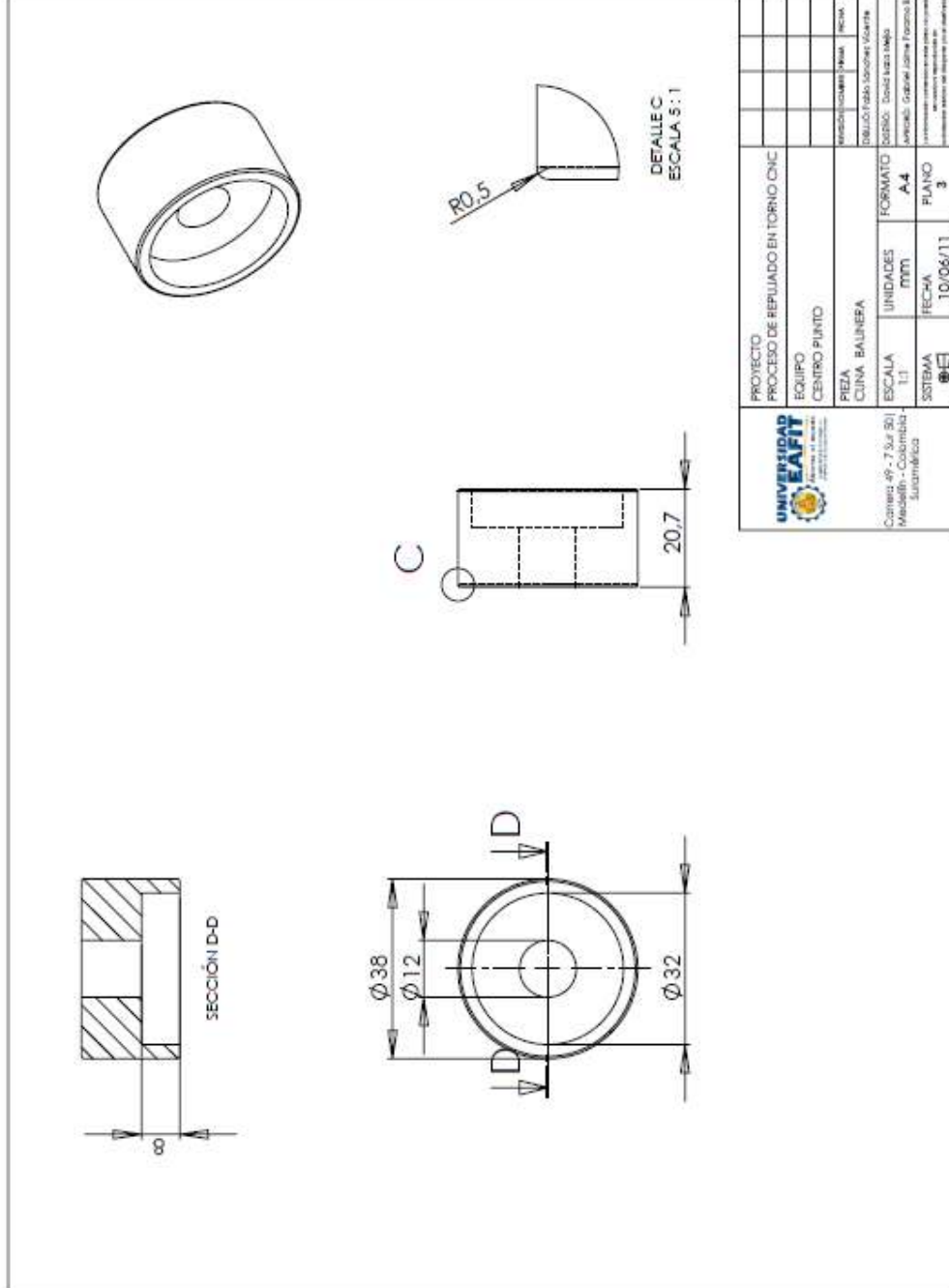
 <p style="font-size: 8px;">UNIVERSIDAD <b>EAFIT</b> Escuela de Ingeniería y Arquitectura Carrera #9 - 7 Sur 501 Medellín - Colombia Suramérica</p>	PROYECTO PROCESO DE REPLUADO EN TORNO CNC						
	EQUIPO CENTRO PUNTO 2						
PIEZA ENSAMBLE							
ESCALA 1:1	UNIDADES MM	FORMATO A4					
SISTEMA ☑	FECHA 10/06/11	PLANO 2					



ANEXO D. PLANO PUNTA 2



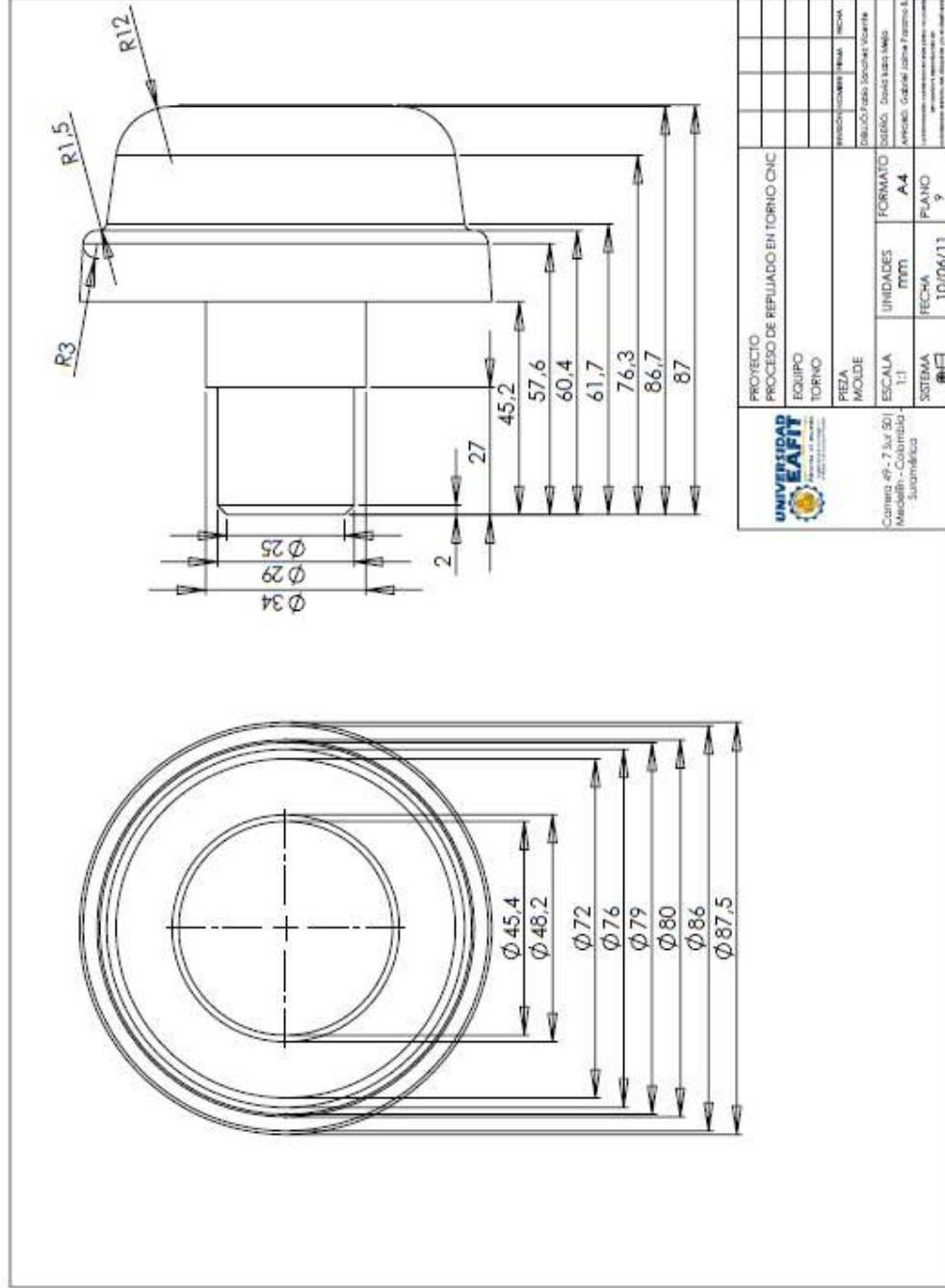
 Universidad <b>EAFIT</b> Escuela de Ingeniería y Tecnología	PROYECTO PROCESO DE REPLIADO EN TORNO CNC				
	EQUIPO CENTRO PUNTO				
PIEZA PUNTA 1					
ESCALA 2:1	UNIDADES MM	FORMATO A4			
SISTEMA 	FECHA 10/06/11	PLANO 4			
Carrera 49 - 7 Sur 30 Medellín - Colombia Suramérica	DISEÑO: Fabio Sánchez Valencia DIBUJO: David Luis Mejía Aprobado: Gabriel Jaime Pardo B.				

ANEXO E: PLANO CUNA BALINERA



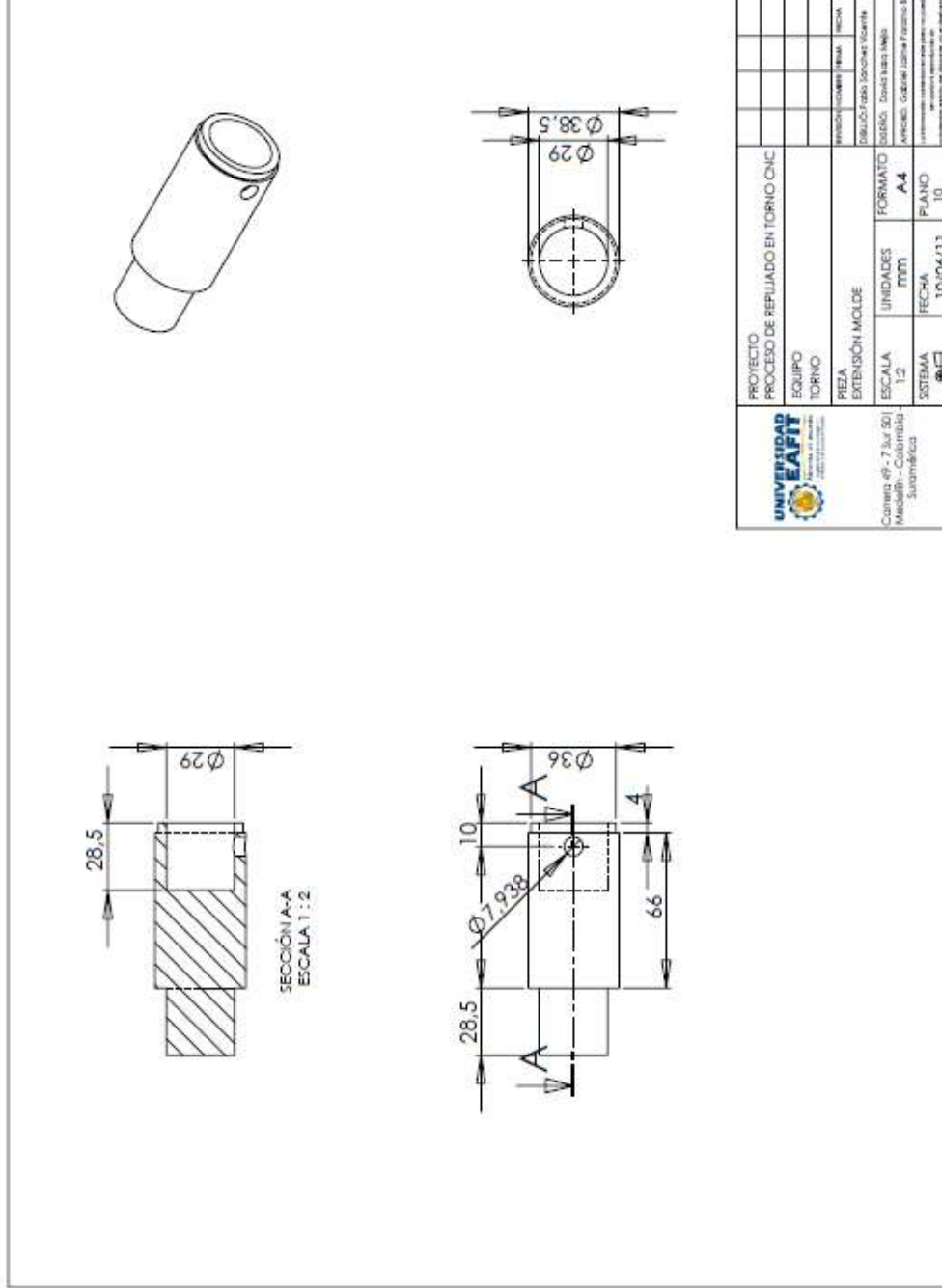
 Universidad EAFIT Escuela de Ingeniería	PROYECTO PROCESO DE REPLIADO EN TORNO CNC				
	EQUIPO CENTRO PUNTO				
PREZA CUNA BALINERA	UNIDADES MM	FORMATO A4			
ESCALA 1:1	FECHA 10/06/11	PLANO 3			
SISTEMA 					

ANEXO F. PLANOS DEL MOLDE





ANEXO G. PLANOS EXTENSIÓN DEL MOLDE



 Universidad EAFIT Escuela de Ingeniería	PROYECTO PROCESO DE REPLAJADO EN TORNO CNC				
	EQUIPO TORNO				
PIEZA EXTENSIÓN MOLDE					
ESCALA 1:2	UNIDADES mm	FORMATO A4			
SISTEMA 	FECHA 10/06/11	PLANO 10			
Carrera #7 Sur 20   Medellín - Colombia Suafinámica		DISEÑO: David Martínez ANÁLISIS: Gabriel Jaime Patiño & Verificación: Verificación por parte de: Profesor: Verificación de: Universidad EAFIT - Facultad de Ingeniería			