

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO CONCURRENTENTE DE UN DISPOSITIVO PARA LA FABRICACIÓN DEL INSERTO ACETABULAR DE UNA PRÓTESIS DE CADERA**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Bachiller:  
Barboline M., Maurizio J.  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, noviembre 2015

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO CONCURRENTES DE UN DISPOSITIVO PARA LA FABRICACIÓN DEL INSERTO ACETABULAR DE UNA PRÓTESIS DE CADERA**

Tutor Académico: Prof. Víctor Othman Falcón

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Bachiller:  
Barboline M., Maurizio J.  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, noviembre 2015



## ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller:

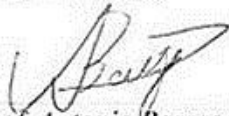
*Maurizio Barboline*


Titulado

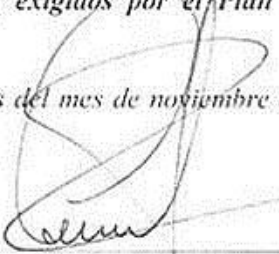
*“Diseño Concurrente de un Dispositivo para la Fabricación del Inserto Acetabular de una Prótesis de Cadera”*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los seis días del mes de noviembre del año dos mil quince.

  
Prof. Antonio Barragán  
Jurado

  
Prof. Víctor Germán Falcón  
Tutor

  
Prof. Crisanto Villalobos  
Jurado

## **Dedicatoria**

A mis padres por ser ejemplos a seguir como personas y profesionales, inculcarme los valores y el carácter necesarios para afrontar y superar cualquier adversidad, fundamentalmente por creer en mí desde el día en que nací.

Este trabajo especial de grado se lo dedico principalmente a mi Nonno Bruno Barbolini Cavazzuti, modelo y ejemplo honrado de trabajo duro, compromiso y responsabilidad. Gracias a su apoyo en conjunto con mis padres me permitieron optar por estudiar en la ciudad de Caracas en la gran Escuela de Ingeniería Mecánica de la Ilustre Universidad Central de Venezuela, la que se ha convertido en mi segundo hogar y Alma Máter.

A los profesores que me han formado y se han enfocado en fomentar sus conocimientos y experiencias, de los cuales he aprendido todos estos años.

A mis compañeros de clase y de carrera junto a los cuales he afrontado, sufrido y celebrado innumerables retos y dificultades exitosamente.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Central de Venezuela por brindarme la oportunidad de prepararme y formarme profesionalmente y alcanzar así, esta meta tan importante.

A mi tutor Víctor Othman Falcón por su asesoría, orientación y guía a lo largo de este trabajo especial de grado.

Al Centro para el Desarrollo Tecnológico C.A. por su asistencia financiera en la adquisición de los materiales, herramientas y elementos requeridos en esta tesis.

En agradecimiento por su colaboración y apoyo a Gustavo González, Marcos Arcila, Hernán Gómez, Yolmaiker García y Anderson Palacios. Equipo del taller mecánico de Corpórea Producciones C.A. Ubicado en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad Central de Venezuela.

**Barboline M., Maurizio J.**

## **DISEÑO CONCURRENTE DEL INSERTO ACETABULAR DE UNA PRÓTESIS DE CADERA**

**Tutor Académico: Prof. Víctor Othman Falcón. Trabajo Especial de Grado.  
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica. 2015, 138 P.**

**Palabras Clave: Inserto de Copa Acetabular – Polietileno de Ultra Alto Peso  
Molecular (UHMWPE) – Extrusión Pastosa – Prótesis de Cadera**

### **Resumen**

Debido al incremento en el número de pacientes en Venezuela que anualmente son sometidos a la cirugía del remplazo de la articulación coxofemoral y al elevado costo de adquisición de la prótesis implementada, como consecuencia de las importaciones, este trabajo propone diseñar el proceso de fabricación del componente en Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular UHMWPE de la prótesis, conocido como inserto de copa acetabular, por medio del método de extrusión pastosa. Para lograr esto se procedió a generar el diseño, adquisición, construcción y montaje de las piezas y elementos requeridos para realizar la extrusión. Posteriormente se efectuaron diversos ensayos en donde se identificó la velocidad de compresión, la temperatura y la presión que garantiza que el polietileno se adapte y copie satisfactoriamente la nueva geometría impresa. Confeccionando de esta manera la metodología del proceso de fabricación a seguir, tomando en cuenta la calidad del inserto de copa acetabular producido.

## **Abstract**

**Barboline M., Maurizio J.**

### **CONCURRENT DESIGN OF THE INSERT ACETABULAR OF A HIP PROSTHESIS**

**Academic Tutor: Prof. Victor Othman Falcon. Degree thesis. Caracas, U.C.V. Faculty of Engineering, Mechanical's School. 2015, 138 P.**

**Keywords: acetabular cup insert – ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) - Extrusion Pasty - Hip Prosthesis**

#### **Summary**

Due to the increase in the number of patients in Venezuela that are annually undergoing replacement surgery of the hip joint and the high cost of acquisition of the prosthesis deployed, as a result of imports, this degree work proposes to design the manufacturing process of the polyethylene UHMWPE Ultra High Molecular Weight component of the prosthesis, known as acetabular cup insert, by the method of doughy extrusion.

To achieve this it was proceeded to generate the design, procurement, construction and assembly of parts and elements required for extrusion.

Subsequently, several tests were made where was identified the compression rate, the temperature and pressure that ensures that the polyethylene suits and copy satisfactorily the new geometry printed. Making up in this way the methodology of the manufacturing process to be followed, considering the quality of the acetabular cup insert produced.

# TABLA DE CONTENIDO

|   | <b>pp.</b> |
|---|------------|
| Resumen.....  | vi         |
| Abstract .....  | vii        |
| LISTA DE TABLAS.....  | xi         |
| LISTA DE FIGURAS.....   | xii        |
| LISTA DE ANEXOS .....   | xiv        |
| ABREVIATURAS.....   | xv         |
| INTRODUCCIÓN.....   | 1          |
| <b>CAPÍTULO I</b> .....   | <b>2</b>   |
| 1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN .....  | 2          |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....  | 2          |
| 1.2 ANTECEDENTES .....  | 3          |
| 1.3 OBJETIVOS .....   | 4          |
| 1.3.1 Objetivo General .....  | 4          |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.....  | 4          |
| 1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....  | 5          |
| <b>CAPITULO II</b> .....  | <b>6</b>   |
| 2. MARCO TEÓRICO.....   | 6          |
| 2.1 CADERA .....  | 6          |
| 2.2 ANATOMÍA Y BIOMECÁNICA DE LA CADERA.....  | 6          |
| 2.2.1 Huesos de la Articulación Coxofemoral: .....  | 7          |
| 2.2.2 Músculos de la Articulación Coxofemoral.....  | 9          |
| 2.2.3 Biomecánica De La Cadera (Explicación del movimiento) .....                         | 14         |
| 2.3 REPARTO DEL ESFUERZO EJERCIDO SOBRE LA ARTICULACIÓN COXOFEMORAL ....                  | 20         |
| 2.4 ENVEJECIMIENTO NATURAL DE LA CADERA .....   | 21         |
| 2.5 LESIONES DE LA ARTICULACIÓN COXOFEMORAL .....   | 22         |
| 2.6 PRINCIPAL CAUSA DE LA INTERVENCIÓN QUIRÚRGICA DE LA ARTICULACIÓN<br>COXOFEMORAL ..... | 22         |
| 2.6.1 Artrosis u Osteoartritis.....   | 22         |



|                           |   |    |
|---------------------------|---|----|
| 2.6.2                     | ¿Cómo se Produce?.....  | 23 |
| 2.6.3                     | Síntomas y Riesgos .....  | 24 |
| 2.6.4                     | Diagnostico.....  | 24 |
| 2.6.5                     | Tratamiento.....  | 25 |
| 2.7                       | Reemplazo total de cadera (artroplastia de cadera; hemiartroplastia de cadera) .        | 26 |
| 2.7.1                     | Componentes Protésicos: .....   | 27 |
| 2.8                       | Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular UHMWPE .....                                   | 28 |
| 2.8.2                     | Ventajas de las Piezas Fabricadas en UHMWPE Contra las Piezas de Otros Materiales ..... | 30 |
| 2.8.3                     | Principales Propiedades físicas del UHMWPE.....   | 31 |
| 2.9                       | MÉTODO DE FABRICACIÓN DEL INSERTO ACETABULAR.....                                       | 33 |
| 2.9.1                     | Extrusión Pastosa o Squeeze Casting .....   | 33 |
| <b>CAPITULO III</b> ..... |   | 35 |
| 3.                        | DISEÑO DEL INSERTO ACETABULAR Y PIEZAS PARA SU FABRICACIÓN .....                        | 35 |
| 3.1                       | DISEÑO DEL INSERTO ACETABULAR.....  | 35 |
| 3.2                       | DISEÑO DEL MOLDE PARA FABRICAR LOS INSERTOS ACETABULARES.....                           | 36 |
| 3.2.1                     | Punzón.....   | 37 |
| 3.2.2                     | Molde .....   | 38 |
| 3.2.3                     | La Matriz.....  | 39 |
| 3.3                       | MECANIZADO DE LAS PIEZAS NECESARIAS PARA LA FABRICACIÓN .....                           | 41 |
| 3.3.1                     | Mecanizado del Punzón .....   | 41 |
| 3.3.2                     | Mecanizado del Molde.....   | 48 |
| 3.3.3                     | Mecanizado de la Matriz.....  | 56 |
| 3.4                       | Hojas de Procesos .....   | 61 |
| <b>CAPITULO IV</b> .....  |   | 71 |
| 4.                        | FABRICACIÓN DE LOS INSERTOS ACETABULARES .....  | 71 |
| 4.1                       | MATERIALES Y EQUIPOS USADOS PARA LA FABRICACIÓN DE LOS INSERTOS ACETABULARES: .....     | 71 |
| 4.2                       | PRUEBAS PRELIMINARES.....   | 72 |
| 4.2.1                     | Recolección de Datos de las Pruebas Preliminares.....                                   | 73 |

|                               |   |           |
|-------------------------------|---|-----------|
| 4.2.2                         | Observaciones del Proceso de Extrusión Pastosa de los Insertos Acetabulares                       | 74        |
| 4.2.3                         | Modificaciones de la Metodología de Fabricación y de los Moldes de los Insertos Acetabulares..... | 76        |
| 4.2.4                         | Metodología Final de Fabricación de los Insertos Acetabulares.....                                | 79        |
| <b>CAPÍTULO V.....</b>        |   | <b>84</b> |
| 5.                            | ANÁLISIS DE RESULTADOS.....   | 84        |
| 5.1                           | PRUEBAS PRELIMINARES.....   | 84        |
| 5.2                           | DIMENSIONES PRINCIPALES.....  | 84        |
| 5.3                           | PERFILES DE LOS INSERTOS ACETABULARES.....  | 88        |
| <b>CAPÍTULO VI.....</b>       |   | <b>98</b> |
| 6.                            | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 98        |
| 6.1                           | CONCLUSIONES.....   | 98        |
| 6.2                           | RECOMENDACIONES.....  | 99        |
| BIBLIOGRAFIA.....             |   | 100       |
| REFERENCIAS ELECTRÓNICAS..... |   | 101       |
| APÉNDICE.....                 |   | 102       |
| ANEXOS.....                   |   | 118       |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Cargas y Presiones de Contacto en la Articulación Coxofemoral para las 3 Principales Actividades (Bergman G., 2001) ..... | 20 |
| Tabla 2 Propiedades Físicas UHMWPE-1050 (González, 2004) .....  | 31 |
| Tabla 3 Propiedades Mecánicas UHMWPE-1050 (González, 2004).....   | 31 |
| Tabla 4 Propiedades Eléctricas UHMWPE-1050 (González, 2004).....  | 32 |
| Tabla 5 Propiedades Térmicas UHMWPE-1050 (González, 2004).....  | 32 |
| Tabla 6 Barras Cilíndricas Empleados en el Mecanizado .....   | 41 |
| Tabla 7 Sobre Dimensionamiento FERRUM.....  | 41 |
| Tabla 8 Datos de las Pruebas Preliminares.....  | 74 |
| Tabla 9 Desviación Molde y Punzón.....  | 87 |
| Tabla 10 Variación de la Altura del Inserto Acetabular .....  | 91 |
| Tabla 11 Variación del Diámetro Externo del Inserto Acetabular Eje X.....   | 92 |
| Tabla 12 Variación del Diámetro Externo del Inserto Acetabular Eje Y .....  | 93 |
| Tabla 13 Variación del Diámetro Interno de la Cavidad Femoral .....   | 94 |
| Tabla 14 Variación del Diámetro Externo de la Cavidad Coxal .....   | 95 |
| Tabla 15 Resultados de la Desviación.....   | 96 |
| Tabla 16 Ajuste de las Medidas Considerando la Contracción del UHMWPE .....   | 96 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 La Cadera .....  | 7  |
| Figura 2 Hueso Coxal .....  | 8  |
| Figura 3 Cabeza Femoral.....  | 9  |
| Figura 4 Planos Anatómicos del Espacio (A: Plano Sagital, B: Plano Frontal, C: Plano Transversal) (Kapandji, 2006)..... | 10 |
| Figura 5 Músculos de la Cadera Grupo Flexor (Kapandji, 1997) .....  | 11 |
| Figura 6 Músculos de Cadera Grupo Extensor (Kapandji, 1997) .....   | 12 |
| Figura 7 Músculos de Cadera Grupo Abductor (Kapandji, 1997) .....   | 12 |
| Figura 8 Músculos de Cadera Grupo Aductor (Kapandji, 1997) .....  | 13 |
| Figura 9 Músculos de Cadera Rotación (Kapandji, 1997) .....   | 14 |
| Figura 10 Movimientos de Flexión (Kapandji, 1997) .....   | 15 |
| Figura 11 Movimientos de Extensión (Kapandji, 1997) .....   | 16 |
| Figura 12 Movimientos de Aducción (Kapandji, 1997).....   | 17 |
| Figura 13 Movimientos de Abducción (Kapandji, 1997).....  | 18 |
| Figura 14 Movimientos de Rotación (Kapandji, 1997).....   | 19 |
| Figura 15 Sistema de Coordenadas Empleado en el Fémur Izquierdo.....  | 20 |
| Figura 16 Cadera Sana.....  | 21 |
| Figura 17 Artrosis.....   | 23 |
| Figura 18 Síntomas Osteoartritis .....  | 24 |
| Figura 19 Prótesis .....  | 26 |
| Figura 20 Molécula UHMWPE.....  | 28 |
| Figura 21 Extrusión Pastosa (González, 2004) .....  | 34 |
| Figura 22 Inserto Acetabular Din 28 Dex 45 .....  | 35 |
| Figura 23 Piezas del Molde .....  | 37 |
| Figura 24 Matriz .....  | 40 |
| Figura 25 Punzón A a Mecanizar .....  | 42 |
| Figura 26 Punzón B a Mecanizar .....  | 44 |
| Figura 27 Punzón C a Mecanizar .....  | 46 |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| Figura 28 Molde A a Mecanizar.....  | 48                         |
| Figura 29 Molde B a Mecanizar.....  | 51                         |
| Figura 30 Molde C a Mecanizar.....  | 54                         |
| Figura 31 Matriz a Mecanizar.....   | 56                         |
| Figura 32 Bases a Mecanizar.....  | 61                         |
| Figura 33 Etapa de Calentamiento Temperatura (T) Vs tiempo (t).....               | 76                         |
| Figura 34 Conducto de Escape Inferior.....  | 77                         |
| Figura 35 Conducto de Escape Superior.....  | 78                         |
| Figura 36 Pastilla de UHMWPE de 18mm Altura con Bordes Redondeados.....           | 79                         |
| Figura 37 Grafica de Compresión Fuerza Vs Desplazamiento.....                     | 81                         |
| Figura 38 Medidas Principales.....  | 85                         |
| Figura 39 Curvas de Desviación de Perfil Molde A-B.....                           | 86                         |
| Figura 40 Curvas de Desviación Perfil Punzón A-B Eje X.....                       | 86                         |
| Figura 41 Curvas de Desviación Perfil Punzón A-B Eje Y.....                       | 87                         |
| Figura 42 170 °C #1   | Figura 43 170 °C #2.....88 |
| Figura 44 170 °C #3   | Figura 45 180 °C #1.....89 |
| Figura 46 180 °C #2   | Figura 47 180°C #3.....89  |
| Figura 48 190 °C #1   | Figura 49 190 °C #2.....90 |
| Figura 50 190°C #3.....   | 90                         |
| Figura 51 Variación y Desviación de la Magnitud "h" respecto a la medida estándar | 91                         |
| Figura 52 Medida Estándar h = 29,43 mm.....                                       | 91                         |
| Figura 53 Variación y Desviación de la magnitud "D1 x".....                       | 92                         |
| Figura 54 Medida Estándar D1x = 47,48 mm.....                                     | 92                         |
| Figura 55 Desviación de la magnitud "D1 y" respecto a la medida estándar.....     | 93                         |
| Figura 56 Medida Estándar D1y = 47,32 mm.....                                     | 93                         |
| Figura 57 Desviación de la magnitud "D2" respecto a la medida estándar.....       | 94                         |
| Figura 58 Medida Estándar D2 = 27,60 mm.....                                      | 94                         |
| Figura 59 Desviación de la magnitud "D3" respecto a la medida estándar.....       | 95                         |
| Figura 60 Medida Estándar D3 = 44.40 mm.....                                      | 95                         |
| Figura 61 Punzón y Molde Corregido.....   | 97                         |

## LISTA DE ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| Figura A. 1 Fresa de Control Numérico Computarizado Bridgesport TORQ-CUT22 del IMME .....       | 118 |
| Figura A. 2 Mecanizado Superficie Esférica del Molde A.....                                     | 118 |
| Figura A. 3 5to Eje Construido para el Maquinado del Punzón A en la Fresa CNC                   | 119 |
| Figura A. 4 Torno Manual Empleado para el Tronzado, Refrentado y Pulido. ....                   | 119 |
| Figura A. 5 Pulido del Punzón B en el Torno .....   | 120 |
| Figura A. 6 Barra de UHMWPE de la Cual se Extrajeron las Pastillas .....                        | 120 |
| Figura A. 7 Máquina de Tracción Universal SHIMADZU AUTOGRAPH AG-I 250 KN FII .....              | 121 |
| Figura A. 8 Montaje en la Prensa de la Fundación Instituto de Ingeniería .....                  | 121 |
| Figura A. 9 Pruebas Preliminares .....  | 122 |
| Figura A. 10 Medidor de Altura Con Vernier Empleado para Determinar la Variable “h” .....       | 122 |
| Figura A. 11 Perfilómetro CONTRACER CA-102 MITUTOYO Empleado en los Análisis de Resultados..... | 123 |
| Figura A. 12 Copiador de Perfiles Escala 5:1 Velocidad del Papel 5 .....                        | 123 |

## ABREVIATURAS

|         |   |
|---------|---|
| mm:     | Milímetros.   |
| CNC:    | Control Numérico Computarizado.   |
| IMME:   | Instituto de Materiales y Modelos Estructurales.                                    |
| UCV:    | Universidad Central de Venezuela.   |
| UHMWPE: | Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular) |
| in – “: | Pulgadas  |
| CDT:    | Centro para el Desarrollo Tecnológico C.A.  |
| °:      | Grados.   |
| FDA:    | Food and Drug Administration.   |
| °C:     | Grados Celsius.   |
| ASTM:   | American Society for Testing Materials.   |
| CAD:    | Diseño Asistido por Computadora.  |
| AISI:   | American Iron and Steel Institute.  |
| rpm:    | Revoluciones Por Minuto.  |
| min:    | Minutos.  |
| FIIDT:  | Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico.      |
| NPT:    | National Pipe Thread.   |
| Kgf:    | Kilogramos Fuerza.  |
| RTD:    | Resistance Temperature Detector.  |
| HP:     | Horse Power   |

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación propone el diseño concurrente del inserto de copa acetabular (componente de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular UHMWPE de la prótesis de cadera), por medio del método de extrusión pastosa. El cual se basa en realizar la compresión de un material en estado fundido con el fin de imprimirle una geometría específica, para esto es necesario contar con un molde y un punzón que geoméricamente son el perfil negativo de la pieza fabricada. Para lograr esto se realizó el diseño del inserto acetabular junto al conjunto de piezas y elementos empleados, través del software Autodesk Inventor Professional 2013 y SOLIDWORKS 2015 los cuales permiten el dimensionamiento, así como generar los comandos en Control Numérico Computarizado (CNC).

Los diseños de estas piezas fueron realizados basándose en las recomendaciones del trabajo especial de grado presentado por el Ing. Gustavo González en el 2004 titulado **“Fabricación de Discos Articulares con Polietileno de Alto Peso Molecular (UHMWPE) por Medio de Extrusión Pastosa”**, principal antecedente de este trabajo de investigación. Permitiendo identificar las piezas, elementos y parámetros empleados en este proceso, además de tener una idea del comportamiento del material al ser comprimido.

Para el maquinado, la elaboración y construcción del equipo que permitirá fabricar los insertos acetabulares, se recibió la colaboración de CORPOREA PRODUCCIONES C.A. en las máquinas y herramientas del taller mecánico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la UCV y los recursos necesarios aportados por CDT, Centro para el Desarrollo Tecnológico, C.A.

Para establecer los valores de presión, temperatura y determinar la metodología que se debe emplear en este proceso de fabricación, se realizaron diversos ensayos que permitieron examinar los insertos acetabulares fabricados, en el perfilómetro ubicado en el laboratorio de metrología de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV. Permitiendo verificar la calidad y precisión de las piezas producidas.



# CAPÍTULO I

## 1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los objetivos del ser humano ha sido aumentar la esperanza y la calidad de vida de los pacientes que sufren de alguna patología o limitación, mediante el ingenio, la tecnología y el entendimiento del organismo.

El esqueleto humano es un conjunto estructural dinámico conformado por huesos y cartílagos el cual puede sufrir de ciertas patologías como osteoartritis, artritis reumatoidea, necrosis vascular, artritis traumática, tumores, espondilitis anquilosante entre otras, las cuales son enfermedades crónicas y degenerativas de la membrana sinovial de las articulaciones, ocasionando que el paciente pierda movilidad natural. (Callaghan, 1995). Se considera a la Osteoartritis un problema de salud pública debido a su alta incidencia, la padece al menos 15% de la población mundial, de edad superior a los 60 años. La incidencia de la osteoartritis de cadera es 88/100.000 habitantes-año. (Jiménez, 2013). Para devolverle la movilidad de la articulación afectada, en casos donde se agotan las posibilidades de técnicas y tratamientos no invasivos, ha sido necesario reemplazar la articulación por dispositivos mecánicos o articulaciones artificiales, conocidas como prótesis.

En Venezuela existe un gran número de pacientes que son sometidos al reemplazo de cadera o articulación coxofemoral anualmente. Consecuencia tanto de la pérdida de la masa ósea, ocasionada por la osteoartritis en la población mayor a los 50 años, como a accidentes y lesiones en la población joven. (Hobecker, 2005), la población que se encuentra en esta situación y en especial las que poseen bajos recursos se les dificulta tener acceso a este tipo de tecnología ya que los componentes de las prótesis no se fabrican en el país; elevando los costos por importación, como es el caso del inserto de copa acetabular. Es importante considerar las mejoras en los diversos campos de

las tecnologías para el desarrollo de las prótesis que hacen posibles alcanzar alta eficiencia en la construcción, la disminución de costos y el cumplimiento de requisitos fundamentales como la comodidad, funcionalidad y durabilidad.

Actualmente el proceso de fabricación del inserto de copa acetabular es por desbaste y mecanizado en equipos de control numérico o CNC, garantizando un elevado grado de precisión geométrica y del acabado superficial, esto es fundamental para un eficaz acople entre las piezas móviles de la prótesis de cadera (coxal y cabeza femoral). Este método resulta costoso si lo comparamos con un proceso de inyección de plástico, en el cual podemos lograr los mismos niveles de calidad sin requerir de un operador con altos niveles de formación y un equipo muy costoso.

El material seleccionado para el inserto de copa acetabular es el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE); por sus excelentes propiedades como la elevada resistencia al impacto y al desgaste, la capacidad de mantener su buen desempeño a bajas temperaturas, la cualidad de ser ligero, fácil de maquinar, ser totalmente atóxico e ideal para ambientes húmedos ya que no absorbe humedad y su aspecto ceroso proporciona excelente lubricidad.

El proceso de extrusión pastosa es un proceso de conformado, desarrollado por el Prof. Othman Falcón, tutor de este trabajo especial y fue escogido debido a que el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) posee una característica de viscosidad infinita a temperatura de fusión, esto impide la aplicación de la técnica de inyección al molde.

## **1.2 ANTECEDENTES**

En 2004, González A., Gustavo A., presento su trabajo especial de grado **“Fabricación de Discos Articulares con Polietileno de Alto Peso Molecular (UHMWPE) por Medio de Extrusión Pastosa”**, El cual estableció los parámetros

que garantizan la factibilidad y la metodología de fabricación de piezas de UHMWPE por extrusión pastosa permitiendo la futura fabricación de otro tipo de piezas en nuestro país, para implantes u otras aplicaciones de forma más económica y de una excelente calidad. Además con sus conclusiones y recomendaciones, permiten aplicar mejoras al proceso de fabricación para elevar así su eficiencia.

En Noviembre del 2014, Méndez S., Ángel A., presentó su trabajo especial de grado “**Análisis de la Respuesta Mecánica del Rediseño de una Prótesis Modular de Cadera Bajo un Estado Dinámico de Carga**”, Donde estudia el comportamiento de la prótesis de cadera a diferentes cargas tanto estáticas como dinámicas con el fin de optimizar un nuevo diseño; Aunque no se enfoca en el inserto acetabular, logra establecer las cargas y los esfuerzos alternantes que soporta esta prótesis en las diversas marchas de movimientos, igualmente hace énfasis en la importancia de desarrollar nuevas y novedosas tecnologías sobre esta área de la bioingeniería.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar el proceso de fabricación del inserto de copa acetabular de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular UHMWPE por medio del método de extrusión pastosa.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Determinar las dimensiones y características de la pieza antes de ser sometida al proceso de extrusión pastosa.

Diseñar la matriz y el punzón que se usará en el proceso de extrusión pastosa.

Determinar el rango de temperatura y presión en el proceso de extrusión pastosa que garantice la precisión requerida en la fabricación de la pieza.

Evaluar la precisión, el acabado superficial, y la calidad de la pieza fabricada.

## **1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES**

Se desarrollará el diseño del molde y punzón en el programa de Solid Works que permitirá obtener las medidas, formas y dimensiones de las piezas a fabricar además de tener las bases para generar las hojas de procesos de mecanizado.

Los equipos de medición y control definirán parte de la geometría inicial, junto a las recomendaciones de los trabajos anteriores realizados de este proceso.

Las temperaturas, presiones y el medio de contacto permiten seleccionar el material del cual se fabricaran las piezas y de aquí los cálculos de transferencia de calor para conocer el tiempo de calentamiento del conjunto y poder diseñar el proceso de refrigeración.

Las diversas pruebas de presión y temperaturas permitirán observar las posibles distorsiones en la geometría de los insertos de copa acetabular fabricados y comenzara la corrección por rediseño.

Al establecer una presión y temperatura que garantice los parámetros establecidos de geometría, acabado superficial y calidad de la pieza se formará la metodología de fabricación y con esto la factibilidad de fabricar los insertos acetabulares por este método.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 CADERA

Es la estructura que une el muslo con el tronco, por medio del encaje de la cabeza del fémur, de forma convexa, dentro del acetábulo, parte cóncava del hueso de la pelvis o hueso coxal, esta estructura también es conocida como articulación coxofemoral y se clasifica como enartrosis de tipo diartrosis debido a que las dos superficies articulares que intervienen son esféricas o casi esféricas, permitiendo una gran movilidad.

La articulación está recubierta por una capsula, tiene membrana y liquido sinovial que facilita los desplazamientos de las superficies de los huesos.

Esta articulación, junto a la musculatura que la rodea es responsable de soportar el peso del cuerpo en diferentes posturas tanto estáticas como dinámicas.

La articulación de la cadera se compone de dos partes principales:

- La cavidad de la cadera (una parte del hueso de la pelvis llamada acetábulo).
- El extremo superior del fémur (llamado cabeza femoral).

#### 2.2 ANATOMÍA Y BIOMECÁNICA DE LA CADERA

La cadera es la parte anatómica involucrada directamente en el remplazo articular, es un hueso de la pelvis, par, plano, esponjoso, en forma cuadrilátera helicoidal, compuesto por tres huesos embrionarios: Ilión, Pubis e Isquion (**Figura 1**). Posee dos caras: externa e interna; cuatro bordes: superior, inferior, anterior y posterior, y cuatro ángulos.

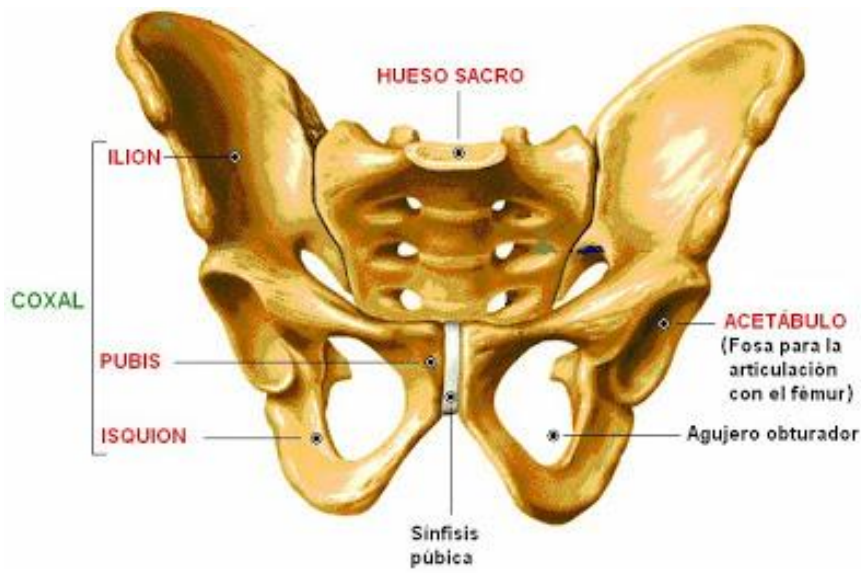
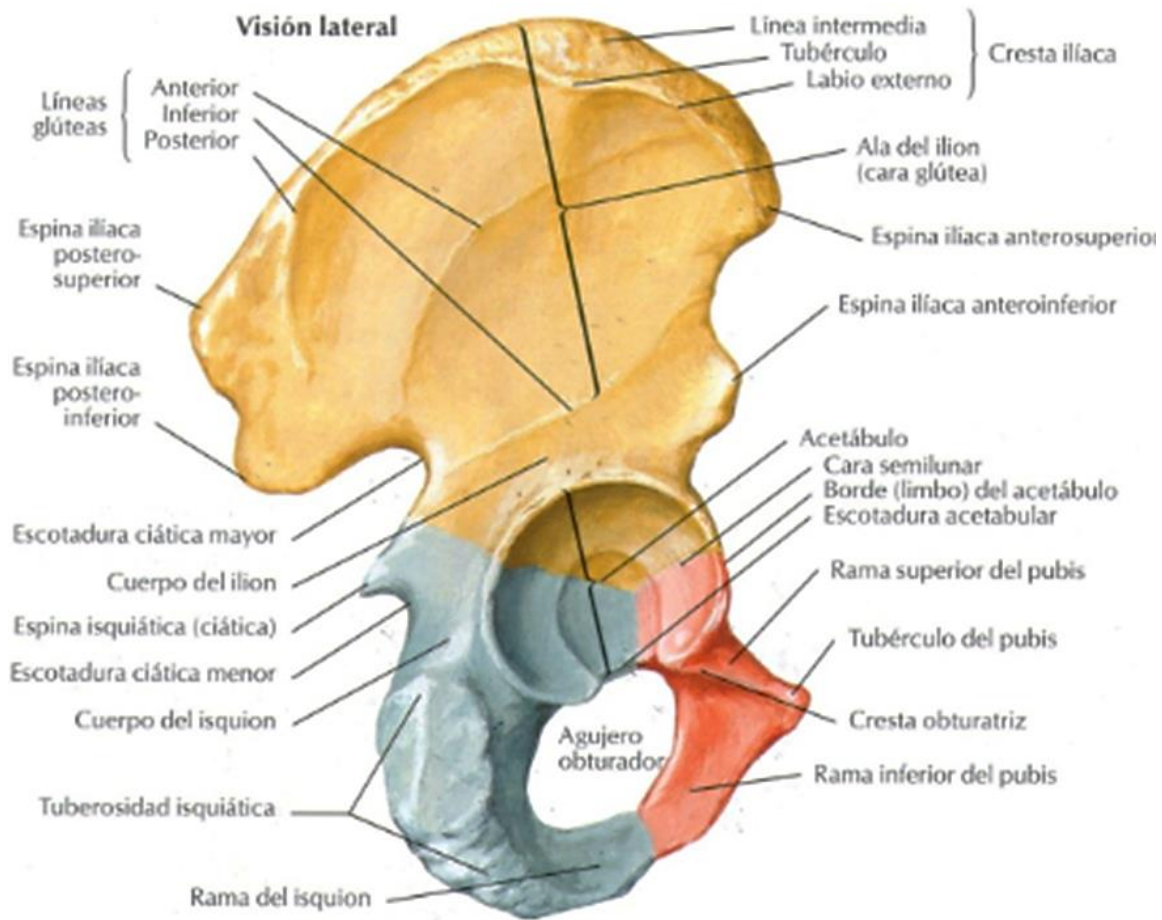


Figura 1 La Cadera

## 2.2.1 Huesos de la Articulación Coxofemoral:

### 2.2.1.1 Hueso Coxal o Iliaco

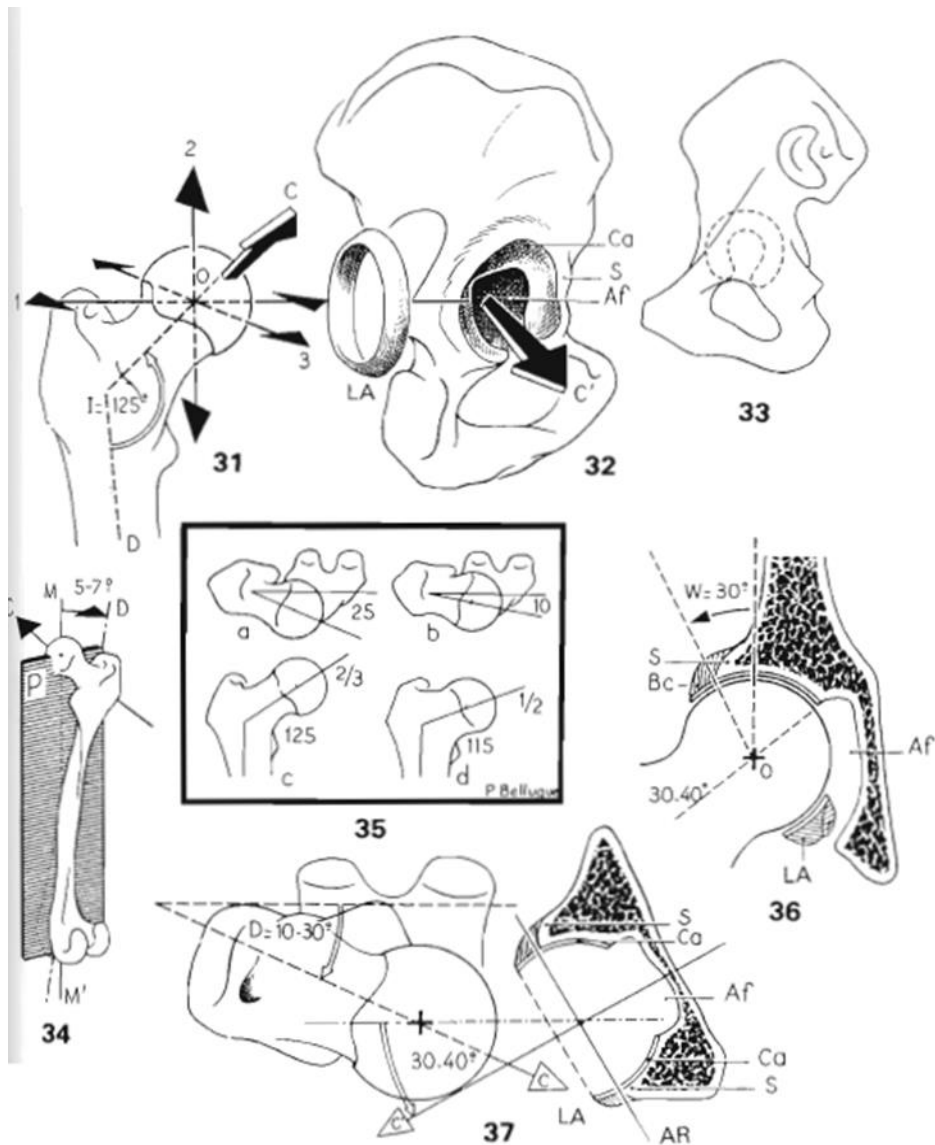
Conforma la parte cóncava de la cadera llamada acetábulo. Se encuentra en la unión del iliaco con las ramas ilio e isquion pubiana (**Figura 2**), forma una cavidad circular, que está en anteversión entre 15° y 30°, con una inclinación caudal de 45°; revestida por el ligamento redondo, que en su extremo opuesto esta insertado en la cabeza del fémur, seguido por la zona cervical y trocantérica, donde se inserta la sinovial y la capsula, recubierta de un cartílago liso de 1.5 a 2.5mm de espesor. Sobre estas estructuras están los ligamentos (Kapandji, 2006).



**Figura 2 Hueso Coxal**

### 2.2.1.2 Cabeza Femoral

Está constituida por dos tercios de una esfera de 40 a 50mm de diámetro, el cuello del fémur sirve de apoyo a la cabeza femoral y asegura su unión con la diáfisis, el eje del cuello del fémur es oblicuo hacia arriba, hacia adentro y hacia adelante, de este modo forma con el eje diafisario un ángulo llamado de inclinación o ángulo Cervicodiafisario cuyo valor oscila entre 120° y 125° en el adulto y con el plano frontal forma un ángulo de 10° a 30°, llamado ángulo de declinación, abierto hacia adentro y adelante también recibe el nombre de ángulo de anteversión femoral.



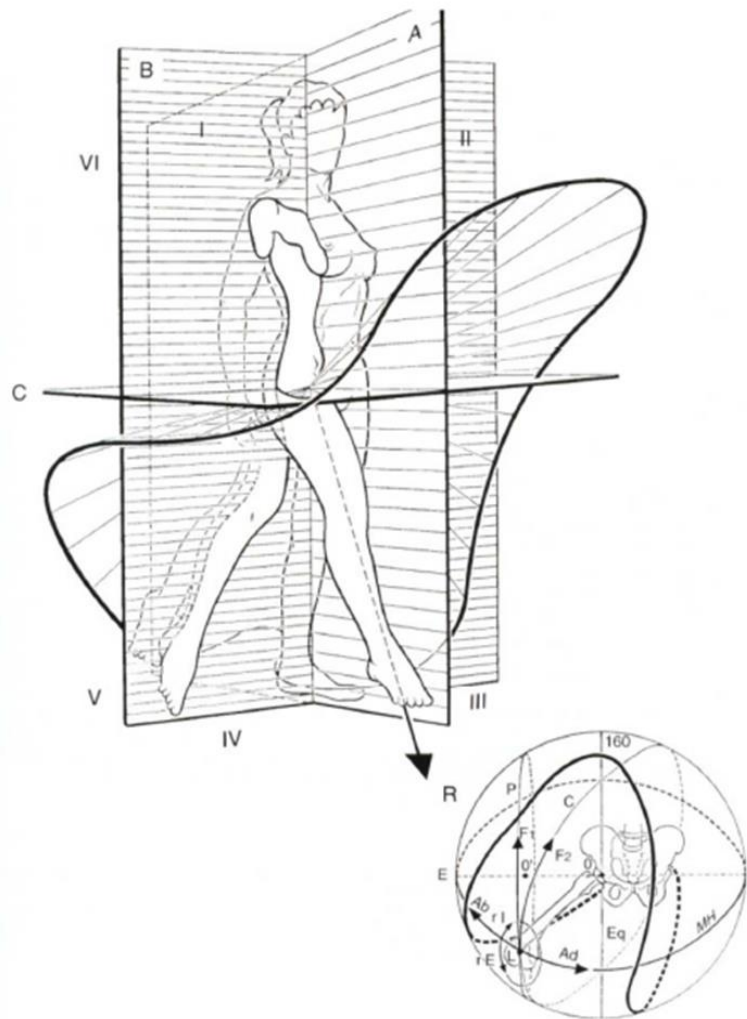
**Figura 3 Cabeza Femoral**

### **2.2.2 Músculos de la Articulación Coxofemoral**

Debido a la posibilidad que presenta la cadera de moverse en los tres ejes planos del espacio, podemos integrar los músculos que actúan a este nivel en tres grupos funcionales o sinérgicos según su acción en cada uno de dichos planos. Así tendremos los músculos que actúan en el plano sagital que comprenden a los del grupo flexor y grupo extensor, los que actúan en el plano frontal, que se subdividen en grupo abductor y aductor, y los que provocan movimientos en el plano transversal,



subdividido en el grupo de rotadores internos y externos (Figura 4). De la variada distribución de acciones musculares, se desprende el hecho de que, en la mayor parte de los casos, los movimientos de la cadera son complejos, siendo raro que se llegue a dar un movimiento puro en un solo plano del espacio. Es importante destacar que de todos los músculos que gobiernan el movimiento de la cadera, los más importantes son el glúteo mayor y el mediano, ya que son los principales responsables de la estabilización en el plano sagital y frontal.



**Figura 4 Planos Anatómicos del Espacio (A: Plano Sagital, B: Plano Frontal, C: Plano Transversal) (Kapandji, 2006)**

### 2.2.2.1 Grupos Ejecutores de Movimiento:

- Grupo Flexor: Ubicados en el cuadrante anterior (Figura 5), está compuesto por el musculo mayor psoas (1), iliaco (2), el sartorio (3), recto anterior (4), el tensor de la fascia lata (5), pectíneo (6), aductor mediano (7), aductor menor y recto interno (8).

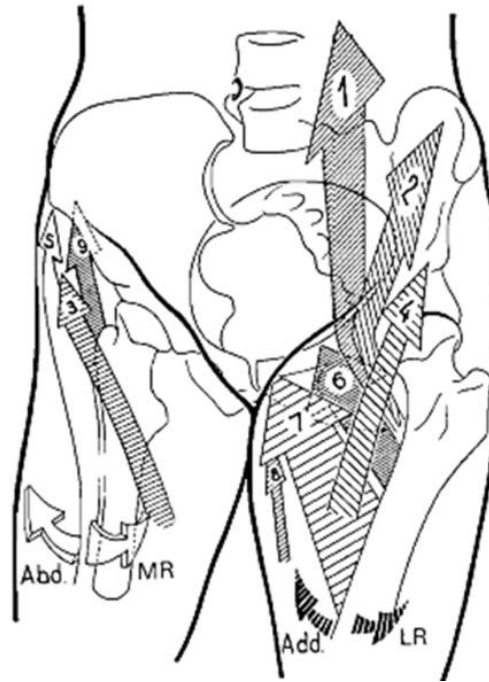
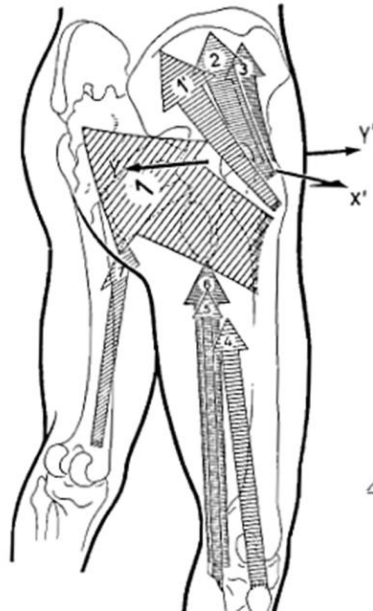


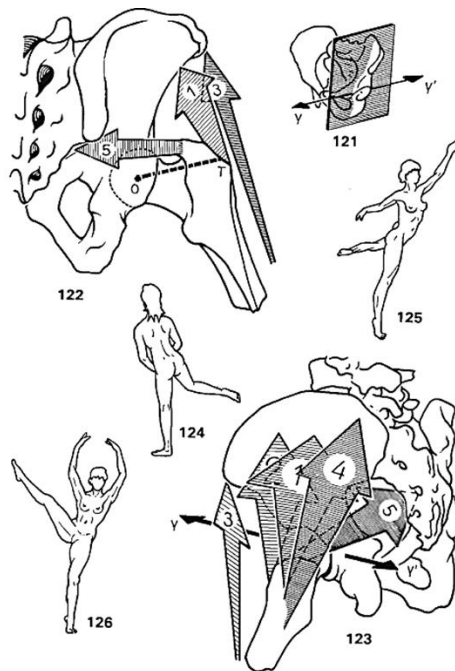
Figura 5 Músculos de la Cadera Grupo Flexor (Kapandji, 1997)

- Grupo Extensor: Ubicados en el cuadrante posterior (Figura 6), está compuesto por el glúteo mayor (1 – 1'), glúteo mediano (2) (posición posterior) e isquiotibiales (3), bíceps crural (4), semitendinoso o semimembranoso (5 – 6) y aductor mayor (7) (posición isquiocondilar).



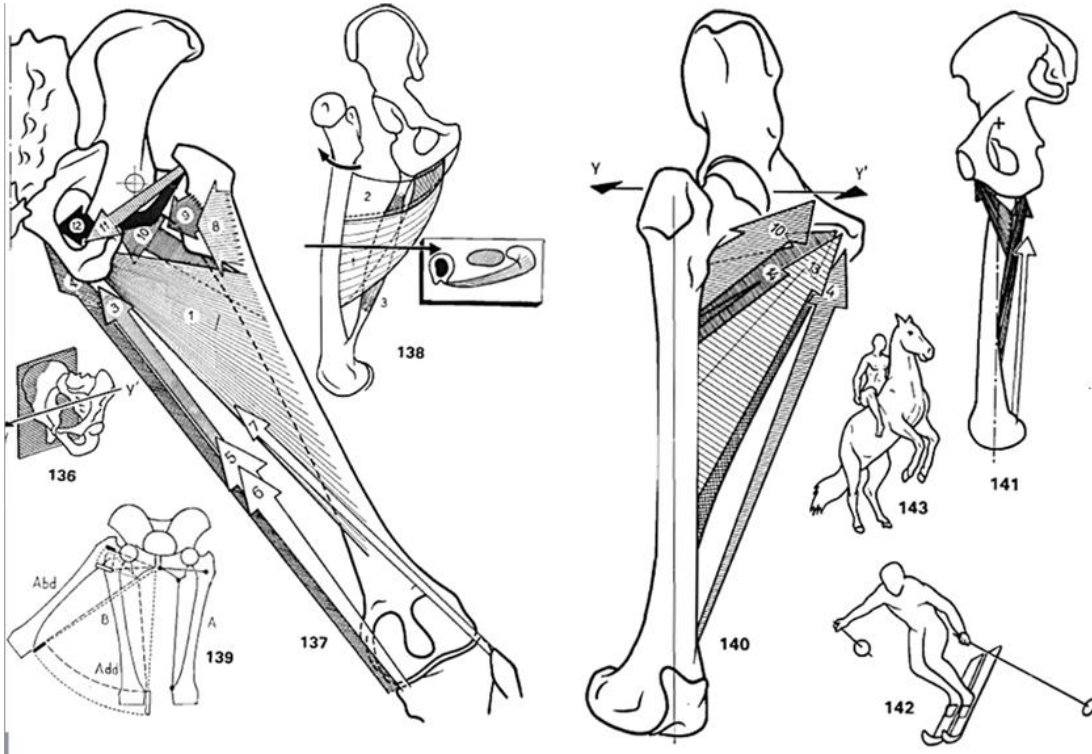
**Figura 6 Músculos de Cadera Grupo Extensor (Kapandji, 1997)**

- Grupo Abductor: Ubicados en el cuadrante lateral, está compuesto por los músculos glúteo mayor (4), medio (1) y menor (2), además del tensor de la fascia lata (3) y sartorio (5).



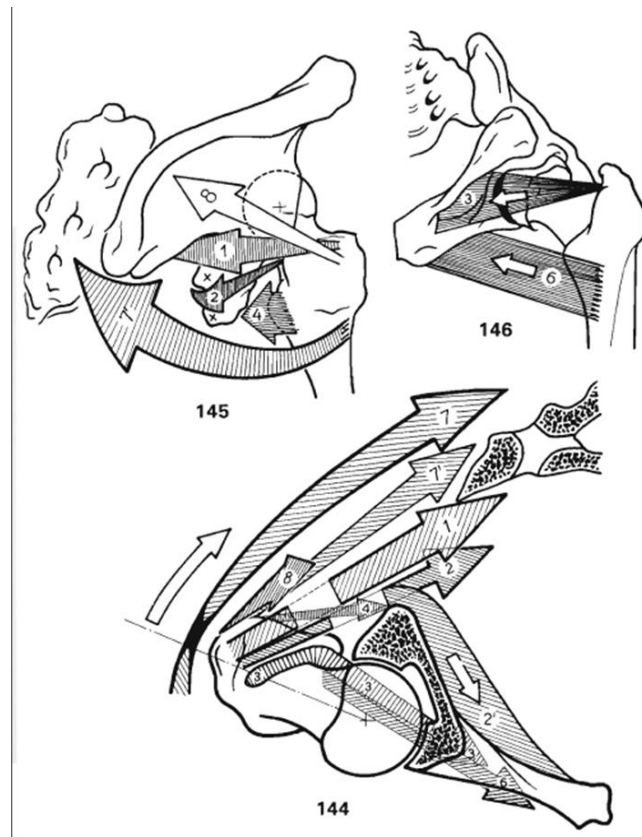
**Figura 7 Músculos de Cadera Grupo Abductor (Kapandji, 1997)**

- Grupo Aductor: Ubicados en el cuadrante medial, está compuesto por el recto interno (4), el pectíneo (10), el aductor mayor (1) (porción isquiofemoral), aductor mediano (14) y aductor menor (13). Secundariamente, semimembranoso, semitendinoso, glúteo mayor (10), Cuadrado crural y obturadores interno (11) y externo (12).



**Figura 8 Músculos de Cadera Grupo Aductor (Kapandji, 1997)**

- Rotación: Están compuestos por: los Pelvi-trocánteres (el piramidal de la pelvis (1), el obturador interno (2), el obturador externo (3), y por algunos músculos aductores como el cuadrado crural (4), el pectíneo (6) y los glúteos mayor-mediano-menor (7-7'-8).



**Figura 9 Músculos de Cadera Rotación (Kapandji, 1997)**

### **2.2.3 Biomecánica De La Cadera (Explicación del movimiento)**

La articulación Coxofemoral es una enartrosis de acoplamiento muy firme, de gran estabilidad. (Kapandji, 2006).

#### **2.2.3.1 Ejes de movimiento:**

Eje transversal: situado en un plano frontal, se realizan los movimientos de FLEXION-EXTENSION.

Eje anteroposterior: situado en un plano sagital, se efectúan los movimientos de ABDUCCION-ADUCCION.

Eje vertical: permite los movimientos de ROTACION EXTERNA-ROTACION INTERNA. (Bauer, 2004).

### 2.2.3.2 Flexión:

La flexión de la cadera es el movimiento que lleva la cara anterior del muslo al encuentro del tronco. La flexión de la cadera está íntimamente relacionada con la rodilla, así vemos como:

Flexión activa con la rodilla extendida: 90°.

Flexión activa con la rodilla flexionada: 120°.

Flexión pasiva con la rodilla extendida: menor que los anteriores.

Flexión pasiva con la rodilla flexionada: 145°.

En la flexión de cadera junto con la flexión de las rodillas, permite que la cara anterior de los muslos establezca un amplio contacto con el tronco, ya que a la flexión de las coxofemorales se añade la inclinación hacia atrás de la pelvis por enderezamiento de la lordosis lumbar.

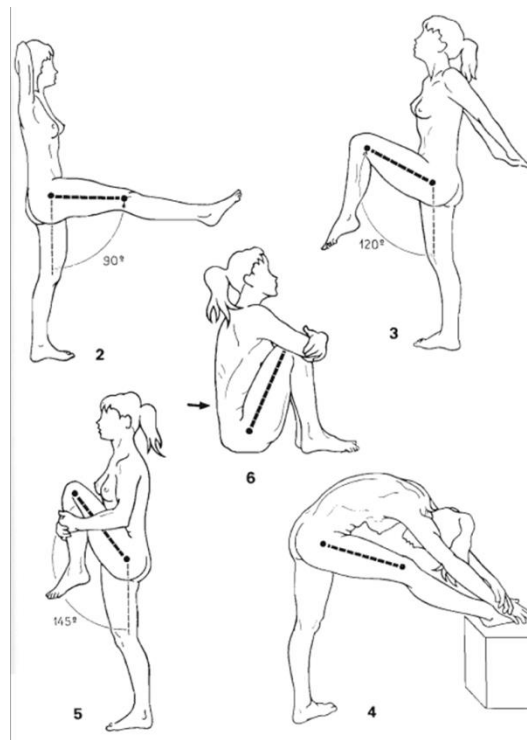


Figura 10 Movimientos de Flexión (Kapandji, 1997)

### 2.2.3.3 Extensión:

La extensión conduce al miembro inferior por detrás del plano frontal, siendo limitada por la tensión que desarrolla el ligamento iliofemoral.

Extensión activa con la rodilla extendida: 20°.

Extensión activa con la rodilla flexionada: 10° debido a que los músculos Isquiotibiales pierden su eficacia como extensores por haber empleado una parte importante de su fuerza de contracción en la flexión de la rodilla.

Extensión pasiva: tiene lugar al adelantar un pie, inclinando el cuerpo hacia adelante mientras el otro permanece inmóvil.

Se pueden conseguir aumentos considerables de amplitud con la práctica de ejercicios apropiados.

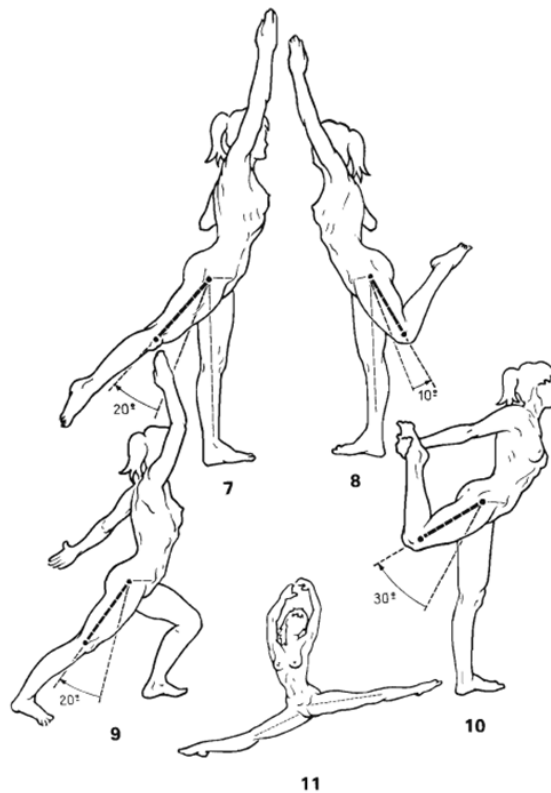


Figura 11 Movimientos de Extensión (Kapandji, 1997)

#### 2.2.3.4 Aducción:

La aducción pura no existe. Existen movimientos de aducción relativa, cuando a partir de una posición de abducción llevamos al miembro inferior hacia adentro.

Existen movimientos de aducción combinados con maniobras de extensión y flexión de cadera. En todos estos movimientos de aducción combinada, la amplitud máxima es de 30°.

La posición de sentado con las piernas cruzadas una sobre otra, está formada por una aducción asociada a una flexión y a una rotación externa. En esta posición, la estabilidad de la cadera es mínima.

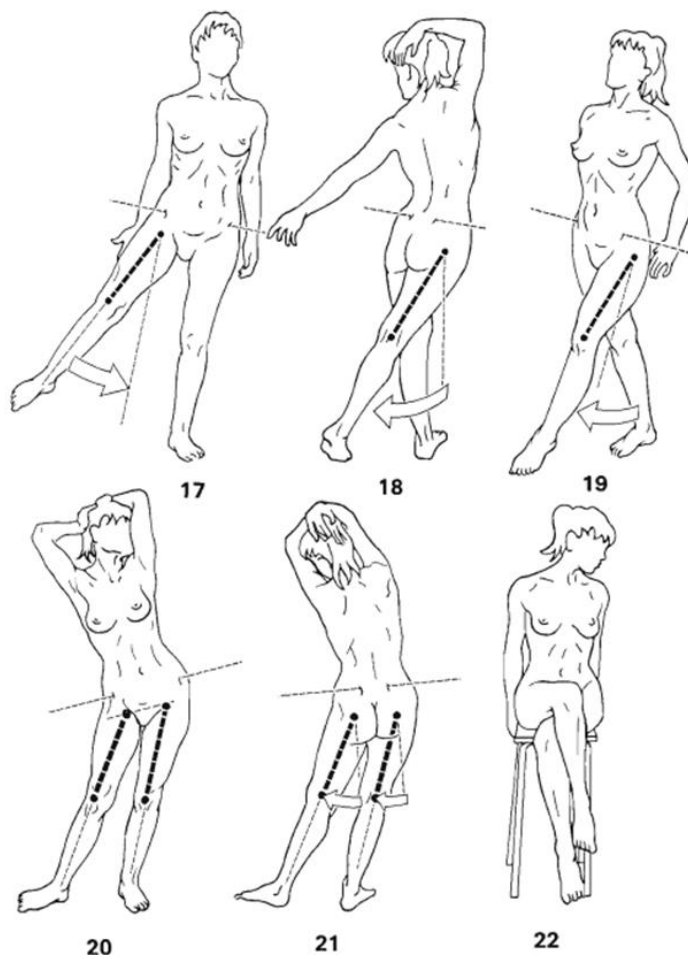


Figura 12 Movimientos de Aducción (Kapandji, 1997)



### 2.2.3.5 Abducción:

La abducción lleva al miembro inferior en dirección hacia afuera y lo aleja del plano de simetría del cuerpo.

Cuando llevamos el movimiento de abducción al máximo, el ángulo que forman los miembros inferiores es de  $90^\circ$ , de lo cual se deduce que la amplitud máxima de la abducción de una cadera es de  $45^\circ$ .

Con entrenamiento es posible conseguir una abducción de  $180^\circ$ , pero este caso está en Abducción-Flexión.

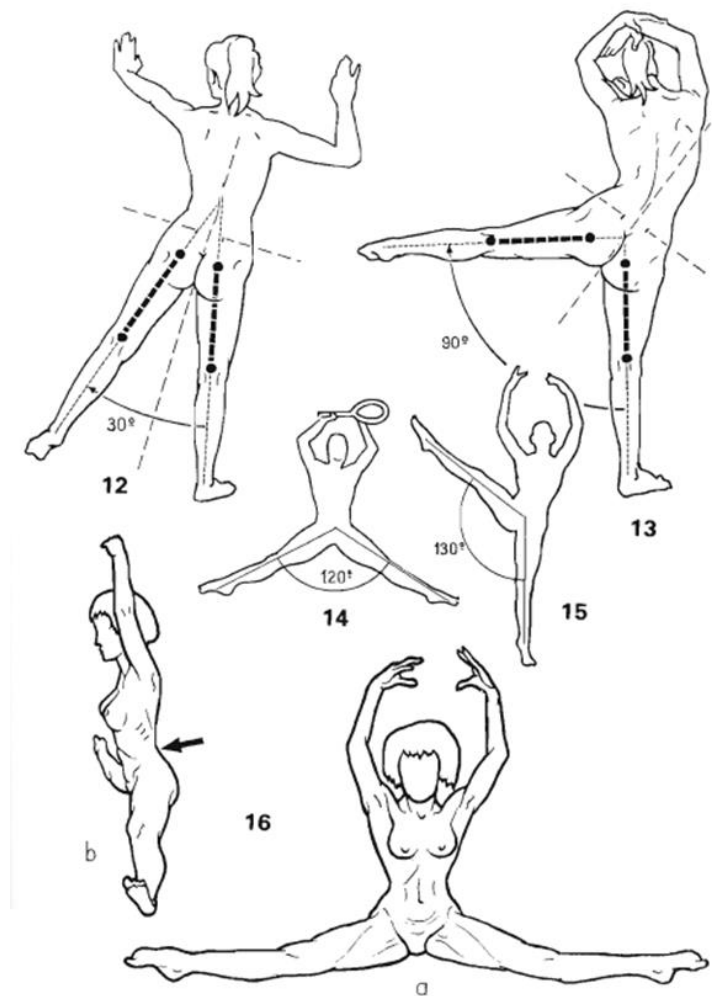


Figura 13 Movimientos de Abducción (Kapandji, 1997)

### 2.2.3.6 Rotación:

La rotación externa es el movimiento que conduce la punta del pie hacia afuera.

La rotación interna lleva la punta del pie hacia adentro.

La posición de referencia, mediante la cual estudiamos la rotación, se obtiene estando el sujeto boca abajo con la rodilla en flexión de 90° sobre el muslo, en esta posición nos encontramos: rotación interna 30° rotación externa 60°.

Con el sujeto sentado al borde de una mesa, con la cadera y rodilla flexionadas a 90°, podemos rotar tanto externamente 30° como internamente 60°.

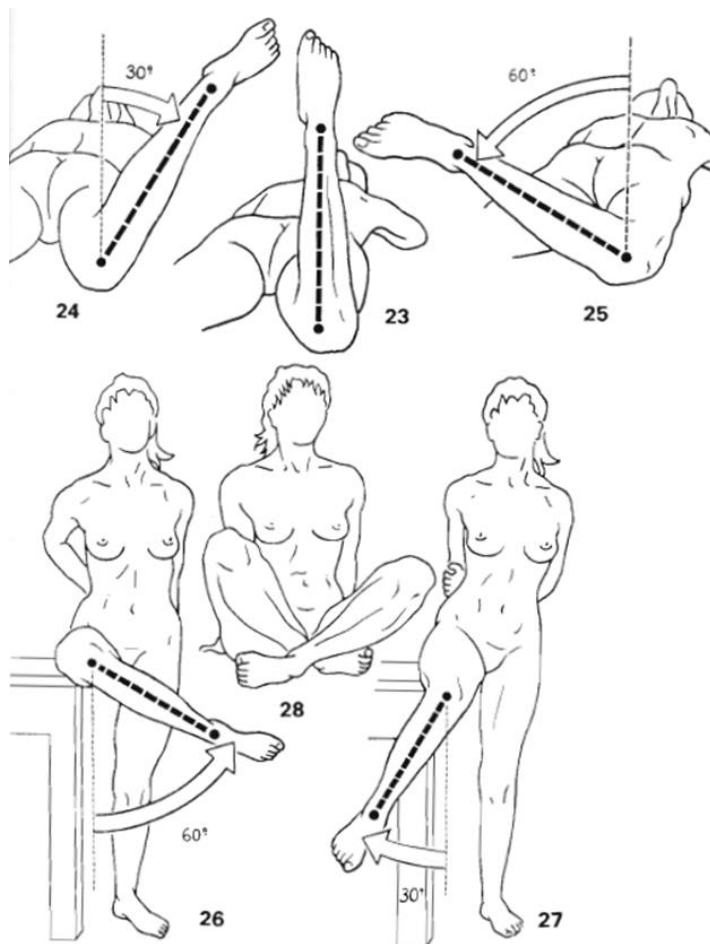


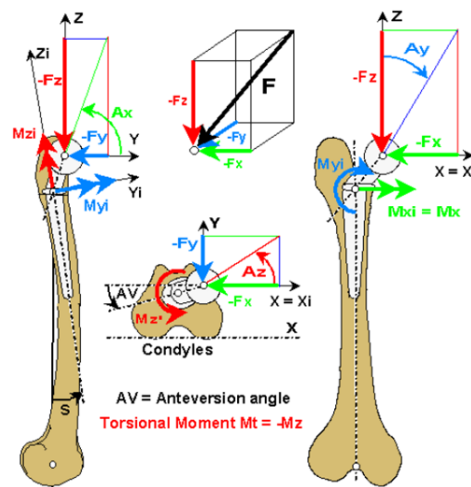
Figura 14 Movimientos de Rotación (Kapandji, 1997)

## 2.3 REPARTO DEL ESFUERZO EJERCIDO SOBRE LA ARTICULACIÓN COXOFEMORAL

Para conocer el óptimo funcionamiento de la articulación de la cadera es necesario identificar las cargas y presiones de contacto que se originan por consecuencia de los músculos y ligamentos sobre la cabeza femoral y el acetábulo. Todos estos elementos contribuyen a contrarrestar el peso propio del miembro inferior, la acción del contacto de la pierna con el suelo y la fuerza de inercia necesaria para ejecutar cualquier movimiento. (Mendez, 2014)

**Tabla 1 Cargas y Presiones de Contacto en la Articulación Coxofemoral para las 3 Principales Actividades (Bergman G., 2001)**

| Actividad                              | Fuerza Contacto (N) | Presión Contacto (Mpa) |
|--|---------------------|------------------------|
| <b>Caminata rápida (Resultante)</b>    | 3900                | 13,45                  |
| (eje X)                                | 890                 | 3                      |
| (eje y)                                | 540                 | 1,86                   |
| (eje z)                                | 3760                | 13                     |
| <b>Caminata normal (Resultante)</b>    | 1785                | 6,2                    |
| (eje X)                                | 405                 | 1,4                    |
| (eje y)                                | 248                 | 0,9                    |
| (eje z)                                | 1718                | 5,9                    |
| <b>Subiendo escalones (Resultante)</b> | 4690                | 16                     |
| (eje X)                                | 1120                | 3,86                   |
| (eje y)                                | 1140                | 3,93                   |
| (eje z)                                | 4410                | 15,21                  |



**Figura 15 Sistema de Coordenadas Empleado en el Fémur Izquierdo (Mendez, 2014)**

## 2.4 ENVEJECIMIENTO NATURAL DE LA CADERA

La cadera joven cuenta con 1.5 a 2.5 mm de cartílago liso entre el coxo-acetabular y la cabeza femoral, de apariencia transparente y de color acerado, el cual es el encargado de absorber los impactos, minimizar el roce entre los huesos y mantener la estabilidad e integridad de la articulación. En el transcurso de la vida este cartílago sufre el desgaste natural conocido como cambios degenerativos, reduciendo su espesor y elasticidad. Estos efectos pueden ser más notables en pacientes con sobre peso o atletas que practican deportes de alto impacto. A los 55 años se pueden observar ulceraciones y erosiones que dejan a los huesos de la articulación sin su cubierta cartilaginosa, sin que se presente ninguna alteración patológica conocida. El desgaste se observa y se mide en la zona de mayor carga a compresión a nivel supero externa del cótilo y de la cabeza femoral conocido como zona horizontal y se compara con la zona vertical donde el desgaste es menos frecuente por medio de una radiografía de la cadera.

Las personas pierden masa o densidad ósea conforme envejece debido a la pérdida de calcio y otros minerales volviendo a la parte interna porosa, especialmente en las mujeres después de la menopausia esto aumenta el riesgo de la fractura de cadera o de cabeza femoral.

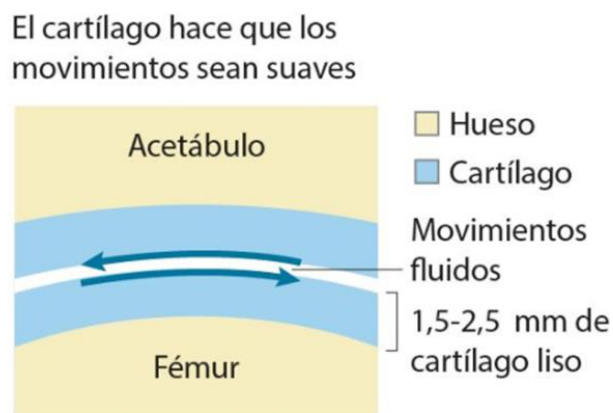


Figura 16 Cadera Sana

## **2.5 LESIONES DE LA ARTICULACIÓN COXOFEMORAL**

La cadera generalmente es muy difícil de dañar aunque existen diversos factores como el peso o el uso excesivo que pueden favorecer un incremento progresivo de degeneración, entre las lesiones más frecuentes tenemos:

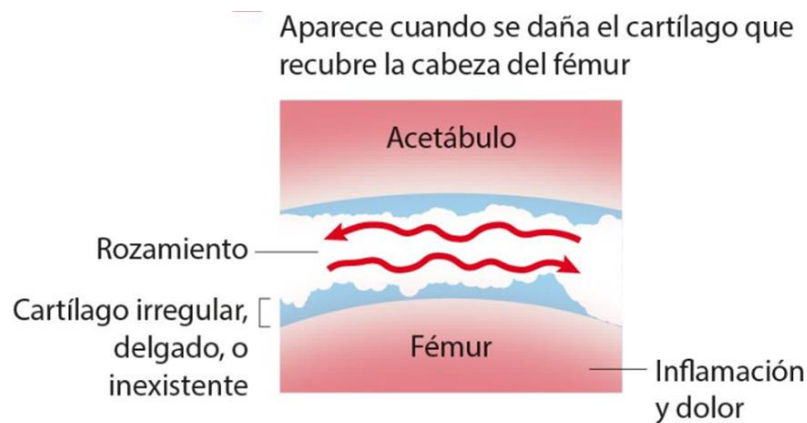
- Necrosis de cadera u osteocondrosis femoral.
- Espondilitis anquilosante.
- Pubalgia u Osteopatía de pubis.
- Fibromialgia.
- Sobrecarga muscular.
- Artrosis de Cadera o artrosis coxofemoral.
- Choque femoroacetabular.
- Ontogénesis Imperfecta.

## **2.6 PRINCIPAL CAUSA DE LA INTERVENCIÓN QUIRÚRGICA DE LA ARTICULACIÓN COXOFEMORAL**

### **2.6.1 Artrosis u Osteoartritis**

Es la enfermedad reumática más frecuente a nivel mundial. Es una de las principales causas de dolor articular y discapacidad en la población adulta. Se reportan valores de 47 hasta 88 casos por 100.000 habitantes de osteoartritis de cadera. El 80% de las prótesis de cadera se implantan debido a la artrosis.

Se estima que el 30% de las personas de 45 a 65 años de edad y más del 80% de las personas mayores de 60 años presentan alteraciones radiológicas de osteoartritis en al menos una articulación. (López, 2011)



**Figura 17 Artrosis**

### **2.6.2 ¿Cómo se Produce?**

Algunas situaciones, labores o comportamientos pueden favorecer la aparición o el desarrollo de esta enfermedad ([www.arthrolink.com](http://www.arthrolink.com), 2015)

Los micros traumatismos repetidos, ocasionados por algunas profesiones donde se esté expuesto a vibraciones como usuarios del martillo neumático o conductor de maquinaria pesada.

Los traumatismos articulares ocasionados por la práctica excesiva de deportes como los esguinces graves o fracturas articulares, originan a menudo, una osteoartritis precoz cuyos primeros síntomas aparecen unos 10 años más tarde.

Las anomalías metabólicas pueden conducir al depósito de cristales microscópicos causando repetidas crisis inflamatorias que favorecen el desgaste del ligamento como la gota (cristales constituidos de ácido úrico), la condrocalcinosis (cristales de fosfato de calcio), la hemocromatosis (sobrecarga del hierro en el cuerpo) o la enfermedad de Wilson (exceso de cobre).

El exceso de peso como la obesidad, es un factor de predisposición a la aparición de la osteoartritis tanto de cadera como de rodilla ya que aumenta el esfuerzo y la carga soportada por las articulaciones y conlleva a su agravamiento.

En las mujeres la artritis es más frecuente tras la menopausia.

La herencia suele influir en la osteoartritis ya que existen anomalías genéticas hereditarias que influyen en la fabricación de los elementos del cartílago.

Anomalías en la estructura ósea que altere o modifique el acople natural de las articulaciones como la deformación genu varum (desplazamiento de las rodillas alejándose una de otra) o la genu valgum (rodillas en forma de x)

### 2.6.3 Síntomas y Riesgos

Fricción, dolor e hinchazón en la zona de la ingle, el muslo y el glúteo. Provoca pérdida del movimiento de la articulación imposibilitando movimientos o actividades sencillas como cruzar las piernas o ponerse los calcetines. Con el tiempo la articulación llega a perder su forma original ocasionando cojera, y pueden crecer en ella espolones, en casos avanzados de desgaste progresivo se pueden desprender trozos de hueso y de cartílago que pueden quedar vagando entre el acetábulo y la cabeza femoral incrementando en gran medida el avance del desgaste.



Figura 18 Síntomas Osteoartritis

### 2.6.4 Diagnostico

El médico debe indagar sobre la naturaleza, aparición y el origen de sus dolores o molestias articulares, posteriormente debe examinar el desencadenamiento del dolor por medio de la presión y/o la movilización de la articulación; percibiendo la disminución de la movilidad y alguna inflamación. Generalmente aparecen tras el esfuerzo y se alivian mediante el reposo. La radiografía simple es suficiente para confirmar el diagnóstico y el seguimiento.

## **2.6.5 Tratamiento**

En caso de comenzar los síntomas se recurre a tratamientos no invasivos.

### **2.6.5.1 Tratamiento Conservador**

Se recurre a analgésicos y antiinflamatorios para reducir el dolor.

Rehabilitación, ultrasonidos y masajes que pueden reducir la inflamación.

Indagar si la artrosis se debe a una causa concreta y la manera de solventarla a esto se conoce como tratamiento de la causa.

Infiltraciones por medio de ácido hialurónico o factores de crecimiento en la articulación, que alivian el dolor.

Condroprotectores para intentar retrasar el desgaste del cartílago.

### **2.6.5.2 Tratamiento invasivo**

Si el paciente no puede realizar sus actividades cotidianas, conciliar el sueño en casos donde se agotan las posibilidades de técnicas y tratamientos no invasivos, ha sido necesario reemplazar la articulación por dispositivos mecánicos o articulaciones artificiales, conocidas como prótesis para devolverle la movilidad de la articulación afectada.



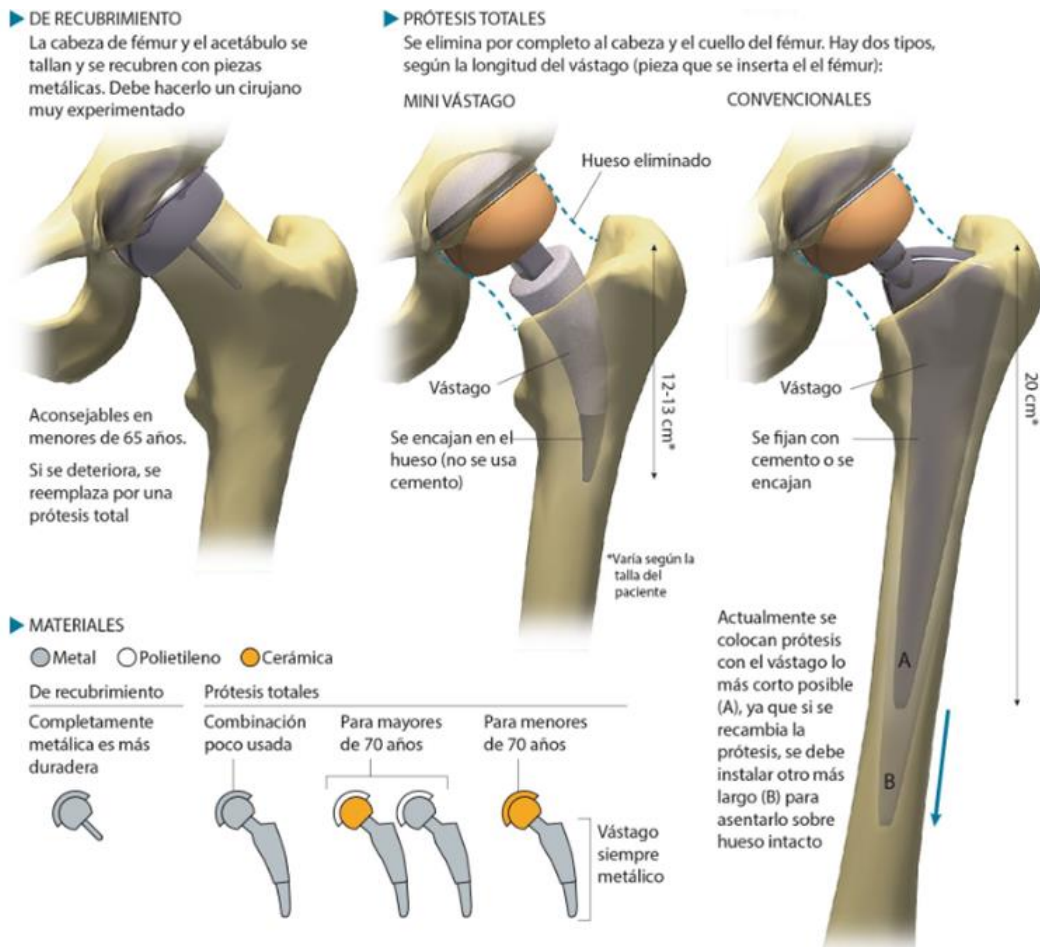


Figura 19 Prótesis

## 2.7 Reemplazo total de cadera (artroplastia de cadera; hemiarthroplastia de cadera)

Es una cirugía para reemplazar toda la articulación coxofemoral por una articulación artificial, en este procedimiento el cirujano retira el cartílago y el hueso de la articulación de la cadera que está lesionado y lo reemplaza con piezas artificiales. (Bauer, 2004)

El médico puede recomendar una artroplastia de cadera para estos problemas:

No poder dormir debido al dolor de cadera.

Su dolor de cadera no ha mejorado con otros tratamientos.

El dolor de cadera limita o le impide realizar actividades cotidianas, como bañarse, preparar alimentos, realizar las labores del hogar y caminar.

Tiene problemas para caminar que exigen el uso de bastón o un caminador.

Fracturas en el fémur.

Tumores de la articulación coxofemoral.

El 80% de las prótesis de cadera se implantan debido a la artrosis, 9 de cada 10 prótesis siguen operativas después de 15 años, 90% de las personas que requieren un reemplazo de cadera poseen más de 55 años.

### **2.7.1 Componentes Protésicos:**

El componente femoral o vástago está fabricado en metal, normalmente en una aleación de cromo-cobalto o en titanio, recubiertos en su parte proximal de un material osteoconductor (hidroxipatita). Su fijación al hueso se realiza mediante un cemento biológico o a presión (press-fit). Cada técnica posee sus indicaciones y sus ventajas y desventajas.

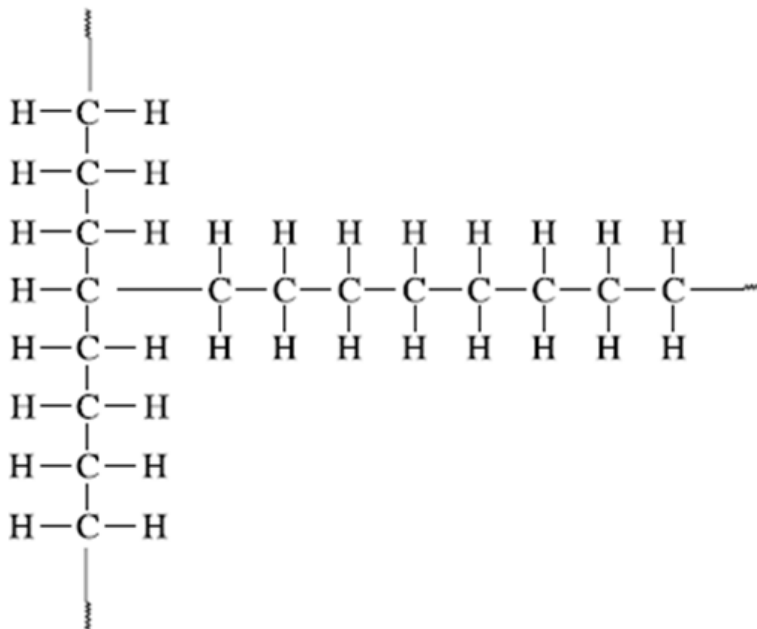
El componente acetabular o cótilo puede ser metálico o de polietileno, en función de si su encaje al hueso es Press-fit o mediante cemento biológico. Los cótilos metálicos se suelen fabricar en aleación o titanio con recubrimiento poroso. Los cótilos press-fit pueden ver ayudada su fijación mediante la utilización de tornillos.

La cabeza femoral se fabrica en metal o cerámica con distintos tamaños.

El recubrimiento interno del cótilo. El inserto acetabular también se puede fabricar en polietileno de alta densidad, metal o cerámica.

## 2.8 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular UHMWPE

El UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Poliethylene) es un plástico blanquecino y opaco que (químicamente) es un polietileno de alta densidad con un peso molecular muy elevado, la norma ISO 11542-1 Parte 1 lo especifica y define el polietileno de Ultra Alto Peso Molecular de grado quirúrgico empleado en esta investigación por medio de la nomenclatura UHMWPE-1050 concretando que éste es un polímero ramificado **Figura 20**, no posee estearato de calcio y que posee un peso molecular mayor a 4 millones g/mol. Una de sus características principales es la de mostrar una viscosidad de fundido extremadamente alta (efectivamente infinita) cuando alcanza su temperatura de fusión, pudiendo solo ser transformado por sinterización de polvo. Su dureza, su resistencia química al desgaste y a la cizalla son excelentes y algo mejores que la del polietileno de alta densidad. Sus aplicaciones incluyen muchas piezas sometidas al desgaste. Por ejemplo: piezas de máquinas de manejo de botellas, engranajes, cojinetes, juntas artificiales, implantes quirúrgicos, etc... (Cardona, Lavernia, & Alcerro, 2010)



**Figura 20** Molécula UHMWPE

El alto peso molecular proporciona al UHMWPE características extraordinarias que son importantes en el sistema biológico, algunas de ellas son:

1. Una resistencia al impacto extremadamente alta.
2. Respuesta excepcional al desgaste y a la abrasión, conduciendo a una vida más larga lo cual es una de las principales expectativas de una prótesis.
3. Coeficiente de fricción muy bajo, haciéndose la opción natural como superficie de la articulación.
4. Resistencia química muy buena.
5. Comportamiento excelente a baja temperatura, conveniente para las condiciones ambientales del cuerpo. Sin embargo las propiedades químicas y mecánicas disminuyen rápidamente al incrementar la temperatura además de poseer un punto de fusión relativamente bajo.

Estas características hacen del UHMWPE una superficie de articulación excelente en reemplazos de empalmes artificiales, generalmente se utilizan en el inserto acetabular de la cadera, así como en reemplazo para el cartílago en la prótesis artificial de rodilla.

#### 2.8.1.1 **Ventajas**

- Fácil de maquinar.
- Alta duración.
- Bajo peso (más liviano que el agua).
- Buena resistencia química a algunos ácidos, solventes orgánicos, medios salinos).
- Buenas propiedades Dieléctricas.
- Aprobado por la FDA (Food and Drug Administration) para estar en contacto con alimentos.
- Bajo coeficiente de fricción.

### **2.8.1.2 Limitaciones del UHMWPE**

- Baja resistencia a la abrasión con alta carga.
- Baja resistencia a la compresión bajo cargas elevadas.
- Baja resistencia a alto esfuerzo cortante.
- Temperaturas superiores a 70 °C.

## **2.8.2 Ventajas de las Piezas Fabricadas en UHMWPE Contra las Piezas de Otros Materiales**

### **2.8.2.1 Superficie de baja Fricción**

Posee un bajo coeficiente de fricción cercano al del teflón, su superficie limpia y auto lubricada permite que partes móviles como bandas y cadenas se muevan fácilmente y sin sufrir desgaste prematuro o temiendo que se agregue tensión excesiva sobre componentes de alto valor. Las superficies recubiertas con UHMWPE permiten el desplazamiento suave y libre de materiales en polvo y cohesivos. También evita que se maltraten o rayen objetos como botellas y otros empaques, se instala mecánicamente, ya que, a excepción de los acrílicos, no existe adhesivo que se adhiera.

### **2.8.2.2 Resistencia al Desgaste**

La estructura molecular del UHMWPE lo hace inherentemente superior en su resistencia al desgaste por fricción. Su coeficiente es superior al polietileno de alta densidad, Nylon, Acetal.

### **2.8.2.3 Resistencia al Impacto**

Es el mejor sustituto de muchos materiales que están en contacto con sacudidas repentinas, golpes fuertes, frecuentes o constantes. Los materiales tradicionales se agrietan, se astillan o simplemente presentan fatiga. Sometido a la prueba ASTM D-256 Izod no se quiebra, ni siquiera a temperatura por debajo de los 0°C.

#### 2.8.2.4 Resistencia a la corrosión

Resiste los ataques químicos severos y no absorbe humedad. Es Excelente para ser aplicado en ambientes cáusticos. Mantiene la maquinaria en movimiento sin bloqueos causados por bordes de metales corroídos. Se puede usar sumergido en agua, como también a temperaturas de -30 °C.

#### 2.8.3 Principales Propiedades físicas del UHMWPE

Tabla 2 Propiedades Físicas UHMWPE-1050 (González, 2004)

##### **FISICAS:**

|                                      | <b>Normas ASTM</b> | <b>Valor</b>                 |
|--------------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Densidad                             | D792               | 0,93 g/cm <sup>3</sup>       |
| Absorción de Humedad<br>(24Hr./23°C) | D570               | Higroscópico<br>(No Absorbe) |
| Índice de Oxígeno<br>Limite (%)      |                    | 17%                          |
| Inflamabilidad                       |                    | Combustible                  |
| Resistencia a los Ultra-<br>Violetas |                    | Aceptable                    |

Tabla 3 Propiedades Mecánicas UHMWPE-1050 (González, 2004)

##### **MECANICAS:**

|   | <b>Normas ASTM</b> | <b>Valor</b> |
|---|--------------------|--------------|
| Alargamiento a la<br>Rotura                   | D638               | 350%         |
| Coefficiente de Fricción<br>Dinámico          | D1894              | 0,1 - 0,2    |
| Dureza  | D2240              | 65 SHORE     |
| Tensión al Sede                               | D638               | 20 - 40 Mpa  |
| Resistencia al Impacto<br>(Izod Doble Muesca) | D256               | 1,74 Kgm/cm  |

Tabla 4 Propiedades Eléctricas UHMWPE-1050 (González, 2004)

**ELECTRICAS:**

|                                 | Valor                   |
|---------------------------------|-------------------------|
| Constante Dieléctrica<br>@ 1μHz | 2,3                     |
| Factor de Disipación a<br>1μHz  | 0,1 - 0,2               |
| Dureza                          | 1-10x10 <sup>-4</sup>   |
| Resistencia Dieléctrica         | 28 KV/mm                |
| Resistividad Superficial        | 10 <sup>13</sup> Ohm/sq |

Tabla 5 Propiedades Térmicas UHMWPE-1050 (González, 2004)

**TERMICAS:**

|   | Normas ASTM | Valor                   |
|---|-------------|-------------------------|
| Coefficiente Lineal de<br>Expansión Térmica           | D696        | 2X10 <sup>-4</sup> 1/°C |
| Temperatura de<br>Servicio                            |             | 70 - 80 °C              |
| Calor Especifico                                      |             | 1,9 KJ/Kg°K             |
| Conductividad Térmica<br>@ 23°C                       |             | 0,42 - 0,51<br>W/m°K    |
| Temperatura Máxima<br>de Utilización                  |             | 55 - 95 °C              |
| Temperatura de<br>Deflexión en Caliente<br>@ 0,45 Mpa |             | 69 °C                   |
| Temperatura de<br>Deflexión en Caliente<br>@ 1,8 Mpa  |             | 42 °C                   |
| Punto de Fusión                                       | D2117       | 130 °C                  |

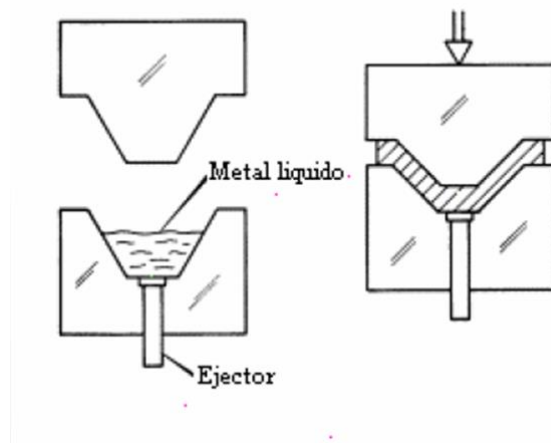
## **2.9 MÉTODO DE FABRICACIÓN DEL INSERTO ACETABULAR**

Debido a las propiedades del UHMWPE este material cumple con grandes ventajas para formar parte de las piezas de diferentes prótesis tanto como elemento fundamental como de recubrimiento, una de las características más resaltantes es la elevadísima densidad en su punto de fusión; es decir mantiene su estructura o geometría sólida en su punto de fusión, lo que impide el proceso de inyección al molde para generar una geometría específica. El método para fabricar los insertos acetabulares es “Extrusión Pastosa” ya que el acabado superficial generado por este proceso es excelente, permite aprovechar la propiedad de viscosidad infinita del polietileno y generar en un solo proceso de compresión una pieza de geometría compleja.

### **2.9.1 Extrusión Pastosa o Squeeze Casting**

Es un proceso de formado de materiales, empleando la compresión en moldes precalentados utilizando cantidades moderadas de metal fundido como materia prima; aplicado principalmente para la obtención de piezas de aluminio o aleaciones ligeras. Es principalmente usado para los componentes automotores de alta seguridad, como el freno y partes de la suspensión. Una vez vertido el material fundido dentro del molde cerrado a velocidad de llenado lenta, para evitar el salpicado y minimizar la porosidad, se aplica una presión constante hasta que la solidificación del material sea completa como podemos observar en la **Figura 21 Extrusión Pastosa Figura 21**





**Figura 21 Extrusión Pastosa (González, 2004)**

En la versión aplicada a la fabricación de las piezas metálicas, estas poseen una integridad metalúrgica equivalente a la forja en un solo paso, posee la ventaja de producir componentes totalmente forjados, de dimensiones precisas y de un acabado superficial excelente. Los moldes deben ser suficientemente rígidos para resistir las presiones empleadas, estos suelen estar hechos de aceros de herramienta de alta calidad y de buenas propiedades mecánicas.

Por su parte, en la versión aplicada a polímeros, las piezas son calentadas a temperaturas superiores a las de fusión y luego comprimidas hasta ocupar toda la cavidad del molde. Debido a su simplicidad este proceso reduce considerablemente los costos de producción de piezas de alta calidad. Y gracias a las investigaciones anteriores realizadas se demostró su factibilidad para generar piezas de UHMWPE.

Este proceso de fabricación usa un molde o base y un punzón, estas piezas se deben acoplar a una prensa para lograr aplicar la presión y de esta manera imprimir la forma deseada al material de trabajo. Los procesos de mecanizado implementados en este trabajo para lograr la geometría del punzón y de la base (moldes) requeridos para el inserto de copa acetabular fueron el torneado y el fresado en CNC.

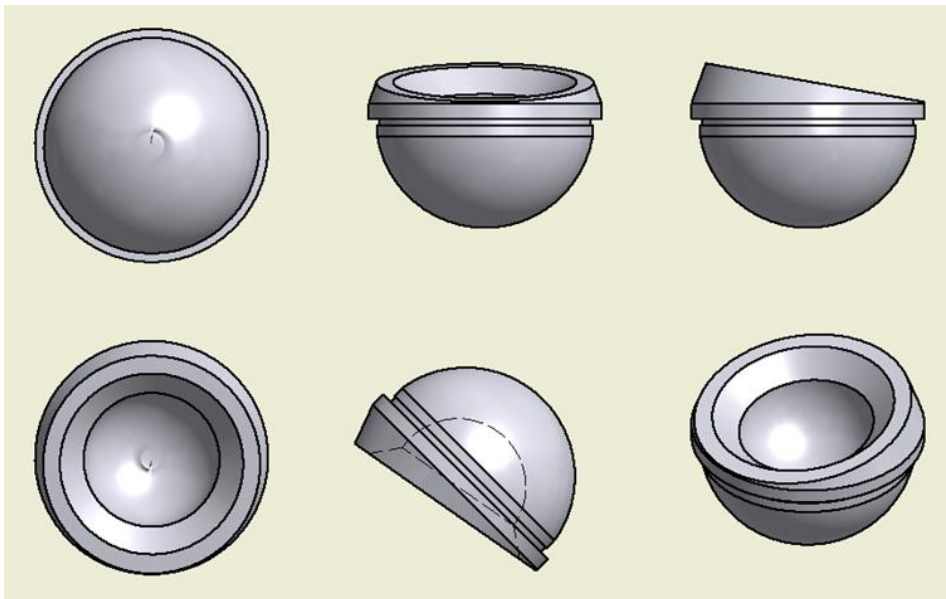
## CAPITULO III

### 3. DISEÑO DEL INSERTO ACETABULAR Y PIEZAS PARA SU FABRICACIÓN

#### 3.1 DISEÑO DEL INSERTO ACETABULAR

Para realizar el diseño del inserto acetabular se seleccionó el modelo con ceja a  $10^\circ$  que posee la ventaja de aumentar la superficie de apoyo del fémur evitando luxaciones o futuras dislocaciones, se seleccionó la talla de diámetro interno de cabeza femoral de 28 mm y de diámetro externo de 45 mm con el fin de aprovechar la misma matriz de calentamiento para poder generar cualquier otro inserto acetabular de medidas menores.

Debido a la geometría compleja del inserto acetabular se utilizó el perfilómetro MITUTOYO ubicado en el laboratorio de metrología de la escuela de mecánica con el fin de garantizar la mayor precisión posible en el levantamiento de medidas y de esta manera generar un modelo 3D en el software CAD, como podemos observar en la **Figura 22 Inserto Acetabular Din 28 Dex 45**.



**Figura 22 Inserto Acetabular Din 28 Dex 45**

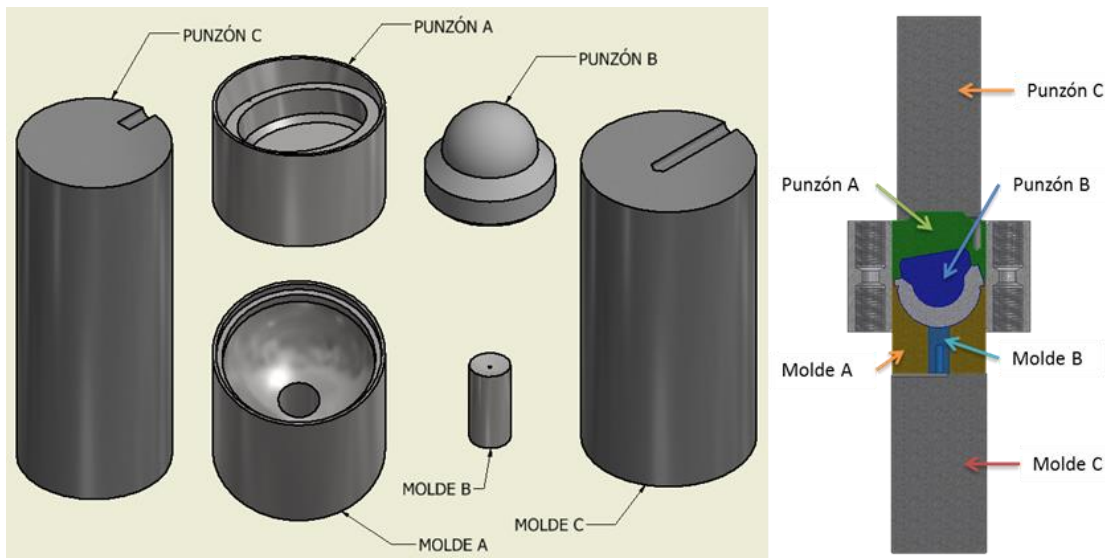
Una vez establecido esto y realizados los planos del inserto (ver Anexos), se realizó el diseño del punzón, la base y la matriz, piezas que deben ser mecanizadas para dar forma al polietileno.

### **3.2 DISEÑO DEL MOLDE PARA FABRICAR LOS INSERTOS ACETABULARES**

El conjunto de las piezas para moldeado fue diseñado basándose en las recomendaciones del trabajo especial de grado presentado por el ingeniero Gustavo Gonzalez en el 2004, las cuales permitieron mejorar el proceso empleado y conocer ciertos comportamientos del polietileno, como la implementación de canales de escape de manera que el aire y/o la vitamina E que forman parte del proceso no queden atrapadas y puedan escapar de manera controlada o la ampliación de un punzón formado por 2 partes para evitar la pérdida de calor por convección.

Las piezas que forman el molde, deben ser de un acero de alta resistencia mecánica, para poder soportar altas presiones, ejercidas en el proceso de fabricación, para ello se trabajó con acero AISI 4140.

Las Piezas realizadas en acero 4140 deben formar parte de la columna principal de compresión y constan de 2 conjuntos (Punzón y Molde) y a su vez de 6 partes: El Punzón formado por 3 piezas (A-B-C), 2 de estas llamadas Punzón A y Punzón B las cuales poseen la función de dar forma a la parte superior al polietileno, el punzón C es el encargado de ejercer la presión necesaria para llevar a cabo la extrusión pastosa, El molde formado por 3 piezas (A-B-C), al igual que el punzón las piezas Molde A y Molde B son encargadas de darle forma a la parte inferior del polietileno, la pieza Molde C cumple la función de soportar cargas de compresión y de mantener al resto de las piezas en su correspondiente altura para garantizar la eficiente transferencia de calor al polietileno, centrado dentro de la estructura **Figura 23**.



**Figura 23 Piezas del Molde**

### 3.2.1 Punzón

El punzón se diseñó con el fin de recrear la compleja geometría superior del inserto acetabular, debido al complejo maquinado de esta pieza se decidió realizar en 2 partes por separado de menor grado de complejidad para su posterior ensamblaje.

#### 3.2.1.1 Punzón A

Cumple la función de recrear la ceja a 10° grados de inclinación, característica sobresaliente y ventajosa de nuestro modelo de inserto acetabular; Además de servir de soporte para el Punzón B y poseer el canal de escape superior, necesario para extraer la burbuja de aire y/o vitamina E que queda atrapada dentro de la compresión, este canal de escape fue ubicado en el extremo superior de la concavidad ya que es el último lugar al cual accedería el UHMWPE en estado pastoso. Esta pieza debe calentarse dentro de la matriz, ya que a la hora de aplicar la carga de compresión la superficie de esta pieza debe estar a una temperatura mayor a 130°C para evitar que la pastilla de polietileno pierda calor al contacto con esta superficie y se endurezca perjudicando el acabado superficial del inserto acetabular.

### 3.2.1.2 **Punzón B**

Encargada de generar la cavidad cóncava de 28 milímetros de diámetro del inserto acetabular, en la cual va alojada la cabeza femoral de la prótesis de cadera, esto demanda de una superficie lisa y pulida ya que es en esta concavidad donde se genera el mayor desgaste por roce e impacto, posee un chaflán a 45° que permite la gran movilidad que goza la articulación de cadera. Se encuentra acoplado al Punzón A por un forzado medio H7 para el agujero y k6 para el eje y de igual manera se calienta dentro de la matriz.

### 3.2.1.3 **Punzón C**

Esta pieza se diseñó bajo la recomendación de construir el punzón en 2 partes por separado, evitando las pérdidas de calor por convección que genera un punzón macizo que sobresalga de la matriz en calentamiento. Posee la longitud necesaria para expulsar todas las piezas centrales por la parte inferior de la matriz, sin que la prensa entre en contacto o genere daños contra los conectores de bronce en la parte superior. También se le aplicó la modificación de una ranura la cual debe ser alineada con el canal de escape del Punzón A permitiendo una salida del material en exceso sin obstrucciones al momento de la compresión. Posee un diámetro menor que el del resto de las piezas del conjunto con el fin de evitar o prever daños en la pared interna de la matriz por introducir el punzón de manera incorrecta, inclinada o descentrada.

## 3.2.2 **Molde**

Posee la forma del negativo inferior del inserto acetabular de forma de copa. En esta geometría esférica calza el coxo o el componente acetabular el cual se fija al hueso de la pelvis, el molde se diseñó en 2 partes con el fin de poder extraer el inserto acetabular posterior a la extrusión evitando que se quede adherido a esta pieza.

### 3.2.2.1 **Molde A**

Permite replicar la geometría casi esférica del inserto, posee una superficie lisa y pulida, se diseñó con la altura suficiente como para ser extraído de la matriz por la

parte inferior acoplado al Punzón A-B, y de la misma manera este se calienta dentro de la matriz para garantizar el buen acabado superficial de la pieza resultante, sirve también de soporte para el Molde B.

#### **3.2.2.2 Molde B**

Esta pieza diseñada con el fin de evitar que el inserto se quede atascado dentro del Molde A, posee el canal de escape inferior ubicado en la base de la concavidad, necesario para que el exceso de material atrapado entre la pastilla y el molde por causa de la misma compresión pueda fugarse de manera segura y controlada.

#### **3.2.2.3 Molde C**

Esta pieza sirve como apoyo de toda la columna principal de compresión, se diseñó con la altura para que mantenga a todas las piezas del conjunto principal de compresión en su debida posición y además poder ser retirada fácilmente de la matriz a la hora de extraer el inserto ya comprimido. Posee al igual que el Punzón C una ranura para que el canal de escape inferior posea un camino sin obstáculos para expulsar el material atrapado o sobrante.

### **3.2.3 La Matriz**

Pieza fundamental para este proceso fue fabricada en aluminio, la cual cumple diversas funciones, principalmente limita y confina el proceso de compresión del punzón y el molde en un solo eje por medio de un juego deslizante con lubricación H7 para el agujero y h6 para el eje. Permite una excelente transferencia de calor gracias a las propiedades del aluminio, condiciones favorables para realizar el calentamiento desde la resistencia tipo banda ajustada en su superficie y la refrigeración por medio de los 8 conectores tipo codo, distribuidos uniformemente en la parte superior e inferior. Podemos encontrar acoplado cerca de la ranura principal un bulbo de resistencia, de esta manera se conoce la temperatura en ese punto y por medio de un circuito control cerrado, encender o apagar la resistencia eléctrica controlando así la temperatura, además de poseer 6 bases las cuales permiten retirar la

pieza polimérica luego de la extrusión, sin necesidad de mover la matriz de su posición.

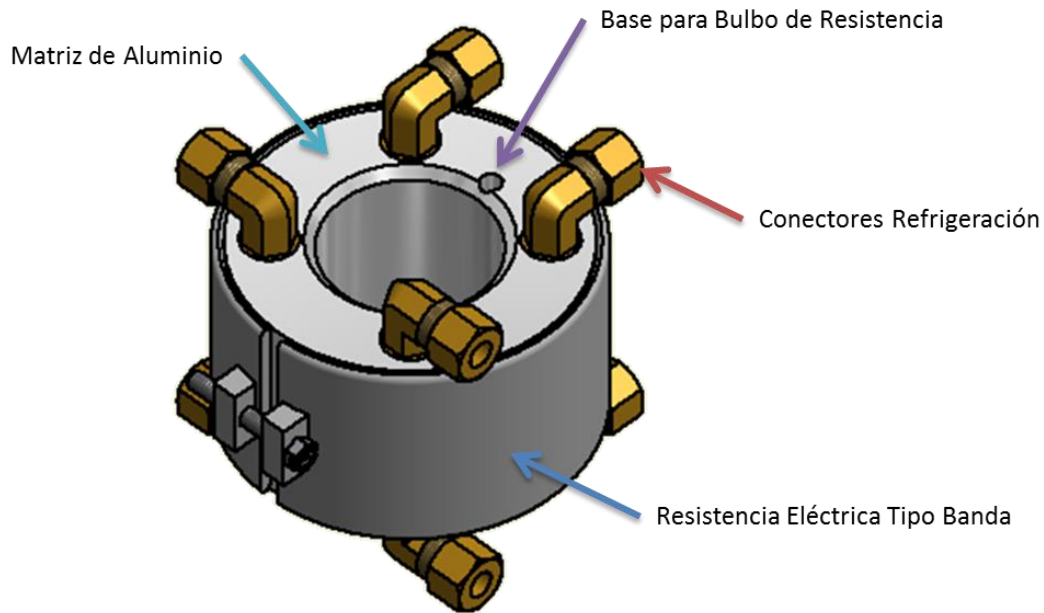


Figura 24 Matriz

### 3.2.3.1 Bases

Las 6 bases roscadas en la parte inferior de la matriz se diseñaron con el fin de poder extraer el inserto acetabular junto a las piezas del moldeado sin la necesidad de desmontar, tocar o mover la matriz de su posición. Permitiendo que esta quede centrada y alineada para una próxima extrusión. Cumple también la vital función de nivelar la matriz y mantenerla en una perfecta horizontalidad, permitiendo que la compresión se realice estrictamente sobre el eje Z, de esto fallar podría ocasionar daños severos en las piezas del moldeado y en la matriz. Para extraer estas piezas se debe ejercer con la misma prensa una mínima carga compresiva, lo suficiente para vencer el roce entre las piezas de moldeado y la pared interna de la matriz, esta carga debe ser absorbida y soportada por estas 6 bases.

Una vez el diseño fue concretado, se comenzó con el proceso de cotización y adquisición de los materiales para su mecanizado.

### 3.3 MECANIZADO DE LAS PIEZAS NECESARIAS PARA LA FABRICACIÓN

Una vez los diseños fueron concretados se comenzó a generar los cálculos de las hojas de procesos basándonos en la materia prima adquirida y en las dimensiones ya estipuladas en los planos (ver Apéndice). Para su posterior mecanizado.

En el transcurso de las pruebas preliminares se fueron agregando ligeras modificaciones a las piezas por requerimientos del proceso de fabricación, los cálculos y los procesos que se presentan a continuación corresponden a las piezas después de ser modificadas.

Para el mecanizado de las piezas se dispuso de tres barras cilíndricas con las siguientes medidas y especificaciones:

**Tabla 6 Barras Cilíndricas Empleados en el Mecanizado**

|                      | Matriz        | Molde y Punzón | Bases de Soporte |
|----------------------|---------------|----------------|------------------|
| Material             | Aluminio 6063 | AISI 4140      | Aluminio 6063    |
| Dimensiones<br>Ø x L | 100mm x 100mm | 2 1/2" x 0,5m  | 1/2" x 1m        |

#### 3.3.1 Mecanizado del Punzón

Para realizar los procesos de mecanizado se emplearon las tablas de la parte procesos de maquinado tradicionales, torneado, taladrado y fresado del manual Handbook ASM (1995).

Para identificar la geometría de las barras redondas de cada una de las piezas mecanizadas se utilizó la tabla sobre dimensionamiento del catálogo de FERRUM como podemos observar a continuación en la **Tabla 7 Sobre Dimensionamiento FERRUM**Tabla 7.

**Tabla 7 Sobre Dimensionamiento FERRUM**

|                     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |      |
|---------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Medida final en mm. | < 16 | 16  | 25  | 40  | 63  | 80  | 100 | 125 | 160  | 200  |
| Sobre medida en mm. | 2.0  | 2.5 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 10.0 | 12.0 |



### 3.3.1.1 Punzón A

|                    |  |            |         |
|--------------------|--|------------|---------|
| Acero AISI<br>4140 | Esfuerzo de fluencia= 690MPa<br>(100ksi) | Do=2 1/2'' | Lo=55mm |
|--------------------|--|------------|---------|

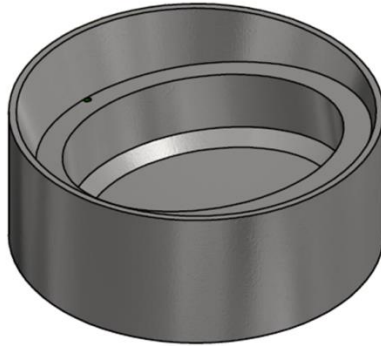


Figura 25 Punzón A a Mecanizar

#### 1. Operación: Refrentado y desbastado de diámetro externo

-Refrantar ambas caras llevando a la longitud final de 50mm.

-Velocidad de corte:

$$Vc = 17,5 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 175,45 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - Df}{2} = \frac{63,5 - 50}{2} = 6,75 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 4 \quad \text{[Ecuación 3]}$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 1,273 \text{min} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

## 2. Operación: Taladrado

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

- Taladrar 1 agujero con una broca de 1mm de diámetro.

Profundidad de taladrado de 12mm

$$Vc = 190 \frac{m}{min}; \quad n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 60478,88 \text{rpm} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 6]

$$t = \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * Vc * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,00132 \text{min}$$

### 3. Operación: Fresado de cavidad con CNC

-Fresado con CNC para cavidad semiesférica.

#### 3.3.1.2 Punzón B

|                    |  |            |         |
|--------------------|--|------------|---------|
| Acero AISI<br>4140 | Esfuerzo de fluencia= 690MPa<br>(100ksi) | Do=2 1/2'' | Lo=35mm |
|--------------------|--|------------|---------|

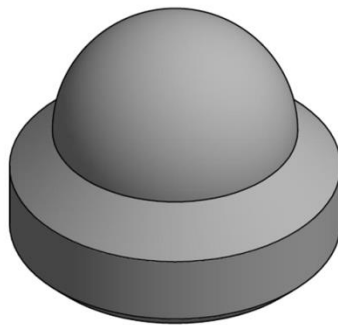


Figura 26 Punzón B a Mecanizar

#### 1. Operación: Refrentado y desbastado de diámetro externo

-Refrentar ambas caras llevando a la longitud final de 29mm.

-Velocidad de corte:

$$V_c = 17,5 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 175,97 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - D_f}{2} = \frac{63,5 - 37,8}{2} = 12,85 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 8}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 7 \quad [\text{Ecuación 9}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 2,88 \text{min} \quad [\text{Ecuación 10}]$$

## 2. Operación: Cilindrado externo y conado

-Velocidad de corte:

$$V_c = 17,5 \frac{m}{\text{min}}; \quad n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 270,90 \text{rpm} \quad [\text{Ecuación 11}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - D_f}{2} = \frac{37,8 - 28}{2} = 4,9 \text{mm} \quad [\text{Ecuación 12}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 3 \quad [\text{Ecuación 13}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 0,39min \quad \text{[Ecuación 14]}$$

-Luego se hace un coneadado hasta llegar a la parte de la pieza donde se acaba de cilindrar.

### 3. Operación: Fresado de la punta del punzón con CNC

-Fresado con CNC para una punta semiesférica.

#### 3.3.1.3 Punzón C

|                    |  |            |          |
|--------------------|--|------------|----------|
| Acero AISI<br>4140 | Esfuerzo de fluencia= 690MPa<br>(100ksi) | Do=2 1/2'' | Lo=120mm |
|--------------------|--|------------|----------|



Figura 27 Punzón C a Mecanizar

#### 1. Operación: Refrentado y desbastado de diámetro externo

-Refrentar ambas caras llevando a la longitud final de 110mm.

-Velocidad de corte:

$$V_c = 17,5 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 175,45 rpm \quad [\text{Ecuación 15}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - D_f}{2} = \frac{63,5 - 45}{2} = 9,25 mm \quad [\text{Ecuación 16}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 5 \quad [\text{Ecuación 17}]$$

-Tiempo de la operación

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 8,369 min \quad [\text{Ecuación 18}]$$

## 2. Operación: Detalle con torno y fresadora

-Línea de marca hecha por el torno para referencia. Detalle adicional a la pieza

-Usar una fresa periférica de 90° y 5mm de diámetro.

-Velocidad de corte recomendada:

$$V_c = 365 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_{fresa}} = 1527,89 rpm \quad [\text{Ecuación 19}]$$

-Profundidad del fresado: 5 mm. Longitud del fresado: 10,5mm. Avance: 1,5 mm/rev.

-Tiempo de la operación:

$$t = \frac{L + D_{fresa}}{n * Avance} = 0,0262 \text{ min} \quad [\text{Ecuación 20}]$$

### 3.3.2 Mecanizado del Molde

#### 3.3.2.1 Molde A

|                    |  |            |         |
|--------------------|--|------------|---------|
| Acero AISI<br>4140 | Esfuerzo de fluencia= 690MPa<br>(100ksi) | Do=2 1/2'' | Lo=55mm |
|--------------------|--|------------|---------|



Figura 28 Molde A a Mecanizar

#### 1. Operación: Refrentado y desbastado de diámetro externo

-Refrentar ambas caras llevando a la longitud final de 50mm.

-Velocidad de corte:

$$Vc = 17,5 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 175,45 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 21}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - Df}{2} = \frac{63,5 - 50}{2} = 6,75 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 22}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 4 \quad [\text{Ecuación 23}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 0,636 \text{ min} \quad [\text{Ecuación 24}]$$

## 2. Operación: Taladrado

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

- Taladrar 1 agujero con una broca de 12mm de diámetro.

Profundidad de taladrado de 40mm

$$Vc = 190 \frac{m}{min}; \quad n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 5039,91 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 25}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 26]

$$t = \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * Vc * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,0529 \text{ min}$$



### 3. Operación: Cilindrado interno

-Velocidad de corte:

$$V_c = 28 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 316,05 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 27}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D_f - D_o}{2} = \frac{44,4 - 12}{2} = 16,2 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 28}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 9 \quad [\text{Ecuación 29}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 0,948 \text{ min} \quad [\text{Ecuación 30}]$$

### 4. Operación: Cilindrado interno

-Velocidad de corte:

$$V_c = 28 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 192,92 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 31}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{Df - Do}{2} = \frac{48 - 44,4}{2} = 1,8 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 32}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 1 \quad [\text{Ecuación 33}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

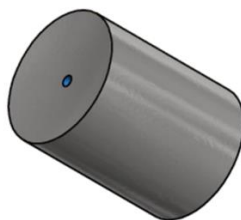
$$t = \frac{L * i}{n * f} = 0,0778 \text{ min} \quad [\text{Ecuación 34}]$$

## 5. Operación: Fresado de cavidad con CNC

-Fresado con CNC para cavidad semiesférica.

### 3.3.2.2 Molde B

|                    |  |          |         |
|--------------------|--|----------|---------|
| Acero AISI<br>4140 | Esfuerzo de fluencia= 690MPa<br>(100ksi) | Do=2 ½'' | Lo=16mm |
|--------------------|--|----------|---------|



**Figura 29 Molde B a Mecanizar**

## 1. Operación: Refrentado y desbastado de diámetro externo

-Refrentar ambas caras llevando a la longitud final de 12mm.

-Velocidad de corte:

$$Vc = 17,5 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 175,45 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 35}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - Df}{2} = \frac{63,5 - 12}{2} = 25,75 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 36}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 10 \quad [\text{Ecuación 37}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 1,621 \text{ min} \quad [\text{Ecuación 38}]$$

## 2. Operación: Taladrado

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

- Taladrar 1 agujero con una broca de 1mm de diámetro.

Profundidad de taladrado de 15,31mm

$$Vc = 190 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 60478,88 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 39}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 40]

$$t = \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * Vc * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,0017 \text{ min}$$

### 3. Operación: Taladrado

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

- Taladrar 1 agujero con una broca de 5mm de diámetro.

Profundidad de taladrado de 5mm

$$Vc = 190 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 12095,78 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 41}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 42]

$$t = \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * Vc * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,002$$

### 3.3.2.3 Molde C

|                    |  |          |         |
|--------------------|--|----------|---------|
| Acero AISI<br>4140 | Esfuerzo de fluencia= 690MPa<br>(100ksi) | Do=2 ½'' | Lo=37mm |
|--------------------|--|----------|---------|



Figura 30 Molde C a Mecanizar

#### 1. Operación: Refrentado y desbastado de diámetro externo

-Refrentar ambas caras llevando a la longitud final de 31,75mm.

-Velocidad de corte:

$$Vc = 17,5 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 155,95 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 43}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - Df}{2} = \frac{63,5 - 50,8}{2} = 6,35 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 44}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 4 \quad \text{[Ecuación 45]}$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 6,219 \text{min} \quad \text{[Ecuación 46]}$$

## 2. Operación: Detalle con fresadora

-Usar una fresa periférica de 90° y 5mm de diámetro.

-Velocidad de corte recomendada:

$$Vc = \frac{m}{\text{min}}; \quad n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D_{\text{fresa}}} = 1527,89 \text{rpm} \quad \text{[Ecuación 47]}$$

-Profundidad del fresado: 5 mm. Longitud del fresado: 10,5mm. Avance: 1,5 mm/rev.

-Tiempo de la operación:

$$t = \frac{L + D_{\text{fresa}}}{n * Avance} = 0,0092 \text{min} \quad \text{[Ecuación 48]}$$

### 3.3.3 Mecanizado de la Matriz

|                  |   |          |          |
|------------------|---|----------|----------|
| Aluminio<br>6063 | Resistencia a la tracción: 42,27<br>kgf/mm <sup>2</sup> | Do=100mm | Lo=100mm |
|------------------|---|----------|----------|

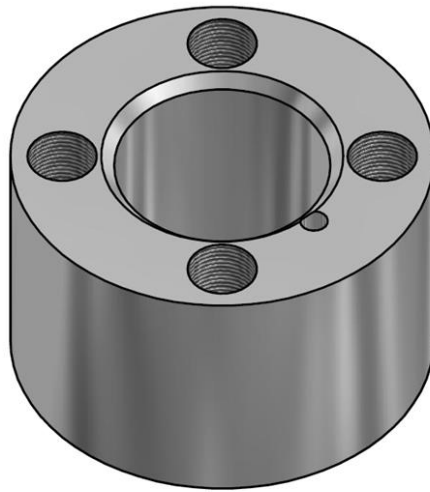


Figura 31 Matriz a Mecanizar

#### 1. Operación: Refrentado y desbastado de diámetro externo

-Refrentar ambas caras llevando a la longitud final de 98mm.

-Velocidad de corte:

$$Vc = 200 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 514,4 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 49}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D - Df}{2} = \frac{100 - 98}{2} = 1 \text{ mm} \quad [\text{Ecuación 50}]$$

-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 1 \quad [\text{Ecuación 51}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 0,393 \text{min} \quad [\text{Ecuación 52}]$$

## 2. Operación: Taladrado, Cilindrado Interno y avellanado

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

-Con una broca de 1pulg (25,4mm) de diámetro y un avance de 0,15 mm perforar una longitud de 60mm:

$$Vc = 1300 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 16291,45 \text{rpm} \quad [\text{Ecuación 53}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 54]

$$t = \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * Vc * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,0245 \text{min}$$

- Después, con el cilindrado interno se llega al diámetro final del agujero de 50mm y se obtiene el acabado superficial deseado.

-Velocidad de corte:

$$Vc = 200 \frac{m}{min}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 1350,92 \text{rpm} \quad [\text{Ecuación 55}]$$

-Distancia a desbastar en dirección radial:

$$d = \frac{D_f - D_0}{2} = \frac{50 - 25,4}{2} = 12,3 \text{mm} \quad [\text{Ecuación 56}]$$



-Número de pasadas:

$$i = \frac{d}{\text{profundidad de corte}} = 7 \quad [\text{Ecuación 57}]$$

-Tiempo de la operación:

Avance= 0,4

$$t = \frac{L * i}{n * f} = 0,777 \text{min} \quad [\text{Ecuación 58}]$$

-Finalmente, avellanar el agujero por ambos lados con un bisel de 3mm.

### 3. Operación: Taladrado (x4)

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

- Taladrar 4 agujeros con una broca de mm de diámetro. Profundidad de taladrado de 60mm

$$Vc = 1300 \frac{m}{\text{min}}; n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D} = 43421,08 \text{rpm} \quad [\text{Ecuación 59}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 60]

$$t = 4 * \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * Vc * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,1105 \text{min}$$

### 4. Operación: Taladrado (x4)

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

- Taladrar 4 agujeros con una broca de 9,525 mm de diámetro.

Profundidad de taladrado de 25mm:

$$V_c = 1300 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 43421,08 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 61}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 62]

$$t = 4 * \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * V_c * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,0153 \text{ min}$$

### 5. Operación: Agujero NPT en fresa CNC y roscado interno

-Usar una fresadora CNC dándole una conicidad a los 4 agujeros para que se les haga un roscado NPT con un machuelo hasta llegar a una longitud de roscado de 24mm

### 6. Operación: Taladrado (x6) y Roscado

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

- Taladrar 6 agujeros con una broca de 12,7mm de diámetro.

Profundidad de taladrado de 40mm

$$V_c = 1300 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 32582,90 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 63}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 64]

$$t = 6 * \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * V_c * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,0491 \text{ min}$$

-Luego, usar macho para rosca convencional en los agujeros previamente hechos con una longitud de roscado de 35mm.

### 7. Operación: Taladrado

-Usar una broca para centro punto de máximo un milímetro de diámetro en la punta.

-Con una broca de 6,4 mm de diámetro y un avance de 0,15 mm perforar una longitud de 45mm:

$$V_c = 1300 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 64656,70 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 65}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 66]

$$t = \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * V_c * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,00463 \text{ min}$$

### 8. Operación: Taladrado (x4)

- Taladrar 4 agujeros con una broca de 9,525 mm de diámetro.

Profundidad de taladrado de 25mm:

$$V_c = 1300 \frac{m}{min}; n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = 43443,87 \text{ rpm} \quad [\text{Ecuación 67}]$$

-Tiempo de la operación:

[Ecuación 68]

$$t = 4 * \frac{\text{profundidad de corte} + \frac{1}{2} \text{diámetro orificio}}{\frac{12 * V_c * f}{\pi * \text{Diametro orificio}}} = 0,00368 \text{ min}$$

### 9. Operación: Agujero NPT en fresa CNC y roscado interno

-Usar una fresadora CNC dándole una conicidad a los 4 agujeros para que se les haga un roscado NPT con un machuelo hasta llegar a una longitud de roscado de 24mm.

#### 3.3.3.1 Bases de Soporte

|                  |   |           |          |
|------------------|---|-----------|----------|
| Aluminio<br>6063 | Resistencia a la tracción: 42,27<br>kgf/mm <sup>2</sup> | Do=12,7mm | Lo=160mm |
|------------------|---|-----------|----------|

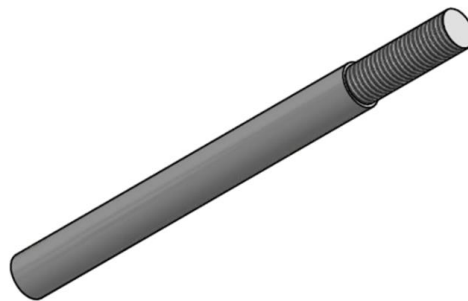


Figura 32 Bases a Mecanizar

#### 1. Operación: Refrentado

-Refrentar ambas caras llevando a la longitud final de 154mm. No se procede a cilindrar para llevar a medida ya que se tiene en físico la materia prima con el diámetro final.

#### 2. Operación: Roscado externo

-Usar tarraja para rosca convencional en el extremo con una longitud de roscado de 19mm.

### 3.4 Hojas de Procesos

A continuación se presentan las hojas de procesos empleadas para maquinar las 8 piezas con todas las modificaciones realizadas a lo largo de la fabricación de los insertos acetabulares.

| Nombre de la Pieza:<br>Punzón A |                                   | Material:<br>Acero AISI 4140 |          | N° de Parte:   |         |        | Cantidad: 1 |   |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------|----------------|---------|--------|-------------|---|
| N°                              | Máquina-Operación-<br>Herramienta | Vc<br>(m/min)                | N (rpm)  | f<br>(rpm/min) | Dr (mm) | L (mm) | T (min)     | OBSERVACIONES   |
| 1                               | Refrentado (x2)                   | 17,5                         | 175,45   | 0,4            | 0,00    | 31,75  | 0,9048348   | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 2 ½'', Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2                         |
| 2                               | Cilindrado externo                | 28                           | 157,05   | 0,4            | 50,00   | 20     | 1,273467    | Devastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 2 ½'', Dr= 50mm<br>Número de pasadas= 4<br>Profundidad de corte=2 mm |
| 3                               | Taladrado                         | 190                          | 60478,88 | 0,15           | 1       | 12     | 0,0013228   | Taladrar 1 agujero con una broca de<br>1mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 12mm                 |
| 4                               | CNC para cavidad                  | -                            | -        | -              | -       | -      | -           | Fresado con CNC para cavidad<br>semiesférica  |

| Nombre de la Pieza:<br>Punzón B |  | Material:<br>Acero AISI 4140 |         | N° de Parte:   |         |        | Cantidad: 1 |   |
|---------------------------------|--|------------------------------|---------|----------------|---------|--------|-------------|---|
| N°                              | Máquina-Operación-<br>Herramienta      | Vc<br>(m/min)                | N (rpm) | f<br>(rpm/min) | Dr (mm) | L (mm) | T (min)     | OBSERVACIONES   |
| 1                               | Refrentado (x2)                        | 17,5                         | 175,45  | 0,4            | 0,00    | 31,75  | 0,9048348   | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 2 ½'', Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2                           |
| 2                               | Cilindrado externo                     | 28                           | 175,97  | 0,4            | 37,80   | 29     | 2,8840802   | Devastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 2 ½'', Dr= 37,8mm<br>Número de pasadas= 7<br>Profundidad de corte=2 mm |
| 3                               | Cilindrado externo                     | 28                           | 270,90  | 0,4            | 28,00   | 14,1   | 0,3903625   | Devastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 37,8, Dr= 28mm<br>Número de pasadas= 3<br>Profundidad de corte=2mm     |
| 4                               | Coneado                                | 28                           | 270,90  | 0,4            | 28,00   | 4,9    | 0,0904386   | Devastado<br>Coneado<br>Do= 37,8, Dr= 28mm<br>Número de pasadas= 3<br>Profundidad de corte=2 mm               |
| 5                               | Fresado con CNC para<br>punta esférica | -                            | -       | -              | -       | -      | -           | Fresado con CNC para punta esférica   |

| Nombre de la Pieza:<br>Punzón C |                                   | Material:<br>Acero AISI 4140 |         | N° de Parte:   |         |        | Cantidad: 1 |   |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------|----------------|---------|--------|-------------|---|
| N°                              | Máquina-Operación-<br>Herramienta | Vc<br>(m/min)                | N (rpm) | f<br>(rpm/min) | Dr (mm) | L (mm) | T (min)     | OBSERVACIONES   |
| 1                               | Refrentado (x2)                   | 17,5                         | 175,45  | 0,4            | 0,00    | 31,75  | 0,9048348   | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 2 ½'', Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2                         |
| 2                               | Cilindrado externo                | 28                           | 164,29  | 0,4            | 45,00   | 110    | 8,3693992   | Devastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 2 ½'', Dr= 45mm<br>Número de pasadas= 5<br>Profundidad de corte=2 mm |
| 3                               | Detalle con torno                 | -                            | -       | -              | -       | -      | -           | Línea de marca hecha por el torno para referencia. Detalle adicional a la pieza.                            |
| 4                               | Fresado periférico                | 365                          | 1527,89 | 1,5            | 5       | 10,5   | 0,0262      | Con fresado periférico se maquina una ranura de 5mm de ancho con 10,5mm de longitud                         |

| Nombre de la Pieza:<br>Molde A |                                   | Material:<br>Acero AISI 4140 |         | N° de Parte:   |         |        | Cantidad: 1 |   |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------|----------------|---------|--------|-------------|---|
| N°                             | Máquina-Operación-<br>Herramienta | Vc<br>(m/min)                | N (rpm) | f<br>(rpm/min) | Dr (mm) | L (mm) | T (min)     | OBSERVACIONES   |
| 1                              | Refrentado (x2)                   | 17,5                         | 175,45  | 0,4            | 0       | 31,75  | 0,9048348   | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 2 ½'', Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2                         |
| 2                              | Cilindrado externo                | 28                           | 157,05  | 0,4            | 50,0    | 40     | 0,6367335   | Devastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 2 ½'', Dr= 50mm<br>Número de pasadas= 4<br>Profundidad de corte=2 mm |
| 3                              | Taladrado                         | 190                          | 5039,91 | 0,15           | 1       | 40     | 0,052911    | Taladrar 1 agujero con una broca de<br>1mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 40mm                 |
| 4                              | Cilindrado interno                | 28                           | 316,05  | 0,2            | 44,4    | 6,66   | 0,9482606   | Devastado<br>Cilindrado interno<br>Do= 12mm, Dr= 44mm<br>Número de pasadas=9                                |
| 5                              | Cilindrado interno                | 28                           | 192,92  | 0,2            | 48      | 3      | 0,0777544   | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 44,4mm, Dr= 48mm<br>Número de pasadas=1                       |
| 6                              | CNC para cavidad                  | -                            | -       | -              | -       | -      | -           | Fresado con CNC para cavidad<br>semiesférica  |



| Nombre de la Pieza:<br>Molde B |                                   | Material:<br>Acero AISI 4140 |          | N° de Parte:   |         |        | Cantidad: 1   |  |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------|----------------|---------|--------|---------------|--|
| N°                             | Máquina-Operación-<br>Herramienta | Vc<br>(m/min)                | N (rpm)  | f<br>(rpm/min) | Dr (mm) | L (mm) | T (min)       | OBSERVACIONES  |
| 1                              | Refrentado (x2)                   | 17,5                         | 175,4    | 0,4            | 0       | 31,75  | 0,905         | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 2 ½'' ,, Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2                        |
| 2                              | Cilindrado externo                | 28                           | 236,1    | 0,4            | 12,0    | 15,31  | 1,621         | Devastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 2 ½'' , Dr= 12mm<br>Número de pasadas=10<br>Profundidad de corte=2 mm |
| 3                              | Taladrado                         | 190                          | 60478,88 | 0,15           | 1       | 15,31  | 0,00168<br>76 | Taladrar 1 agujero con una broca de<br>1mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 15,31mm               |
| 4                              | Taladrado                         | 190                          | 12095,78 | 0,15           | 5       | 5      | 0,00275<br>58 | Taladrar 1 agujero con una broca de<br>5mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 5mm                   |
| 5                              | CNC para cavidad                  | -                            | -        | -              | -       | -      | -             | Fresado con CNC para cavidad<br>semiesférica   |

| Nombre de la Pieza:<br>Molde C |                                   | Material:<br>Acero AISI 4140 |         | N° de Parte:   |         |        | Cantidad: 1 |   |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------|----------------|---------|--------|-------------|---|
| N°                             | Máquina-Operación-<br>Herramienta | Vc<br>(m/min)                | N (rpm) | f<br>(rpm/min) | Dr (mm) | L (mm) | T (min)     | OBSERVACIONES   |
| 1                              | Refrentado (x2)                   | 17,5                         | 175,45  | 0,4            | 0,00    | 31,75  | 0,9048348   | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 2 ½'', Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2                           |
| 2                              | Cilindrado externo                | 28                           | 155,95  | 0,4            | 50,80   | 97     | 6,2198486   | Devastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 2 ½'', Dr= 50,8mm<br>Número de pasadas= 4<br>Profundidad de corte=2 mm |
| 3                              | Fresado periférico                | 25                           | 1527,89 | 1,5            | 5       | 30     | 0,0092      | Con fresado periférico se maquina una ranura de 5mm de ancho con 30mm de longitud                             |

| Nombre de la Pieza:<br>Matriz |                                   | Material:<br>Aluminio 6063 |          | N° de Parte:   |                     |        | Cantidad: 1 |   |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------|----------------|---------------------|--------|-------------|---|
| N°                            | Máquina-Operación-<br>Herramienta | Vc<br>(m/min)              | N (rpm)  | f<br>(rpm/min) | D <sub>c</sub> (mm) | L (mm) | T (min)     | OBSERVACIONES   |
| 1                             | Refrentado (x2)                   | 200                        | 636,6    | 0,4            | 0                   | 50     | 0,393       | Desvastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 100mm, Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2                          |
| 2                             | Cilindrado Externo                | 200                        | 514,4    | 0,4            | 98,0                | 100    | 0,486       | Desvastado<br>Cilindrado Externo<br>Do= 100mm, Dr= 98mm<br>Número de pasadas=1<br>Profundidad de corte=2 mm   |
| 3                             | Taladrado                         | 1300                       | 16291,45 | 0,15           | 25,40               | 60     | 0,0245528   | Taladrar 1 agujero con una broca de 25.4mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 60mm                   |
| 4                             | Cilindrado interno                | 200                        | 1350,92  | 0,4            | 50,00               | 60     | 0,7772497   | Con el cilindrado interno se llega al diámetro final del agujero y se obtiene el acabado superficial deseado. |
| 5                             | Avellanado                        | 1100                       | 6252,52  | -              | 56,00               | 3      | 0,0191923   | Avellanar el agujero de 56mm a 45°  |
| 6                             | Taladrado (x4)                    | 1300                       | 43421,08 | 0,15           | 9,53                | 60     | 0,1105454   | Taladrar 4 agujeros con una broca de mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 60mm                      |
| 7                             | Taladrado (x4)                    | 1300                       | 43443,87 | 0,15           | 9,525               | 25     | 0,0153455   | Taladrar 4 agujeros con una broca de 9,525 mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 25mm                |
| 8                             | Agujero NPT en fresa              | -                          | -        | -              | -                   | 25     | -           | Con fresa CNC se abren 4 agujeros cónicos de 24 mm de longitud para maquinarse las roscas NPT                 |

|    |                      |      |          |      |       |    |           |  |
|----|----------------------|------|----------|------|-------|----|-----------|--|
| 9  | Roscado Interno (x4) | 1400 | 46908,83 | 1    | 9,5   | 24 | 0,0030698 | Usar macho para rosca NPT en los agujeros previamente hechos con una longitud de roscado de 24mm                             |
| 10 | Taladrado (x6)       | 1300 | 32582,90 | 0,15 | 12,7  | 40 | 0,0491055 | Taladrar 6 agujeros con una broca de 12,7mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 40mm                                 |
| 11 | Roscado Interno (x6) | 1400 | 35089,28 | 1    | 12,7  | 35 | 0,0059847 | Usar macho para rosca convencional en los agujeros previamente hechos con una longitud de roscado de 35mm                    |
| 12 | Taladrado            | 1300 | 64656,70 | 0,15 | 6,4   | 45 | 0,0046399 | Taladrar 1 agujero con una broca de 6,4mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 45mm                                   |
| 13 | Avellanado           | 1100 | 6252,52  |      | 56,00 | 3  | 0,0191923 | Avellanar el agujero de 56mm a 45°   |
| 14 | Taladrado (x4)       | 1300 | 43443,87 | 0,15 | 9,525 | 25 | 0,0036829 | Taladrar 4 agujeros con una broca de 9,525 mm de diámetro.<br>Profundidad de taladrado de 25mm                               |
| 15 | Agujero NPT en fresa | -    | -        | -    | -     | 25 | -         | Con fresa CNC se abren 4 agujeros cónicos de 24 mm de longitud para maquinarse las roscas NPT                                |
| 16 | Roscado Interno (x4) | 1400 | 46908,83 | 1    | 9,5   | 24 | 0,0030698 | Habiendo volteado la pieza, usar macho para rosca NPT en los agujeros previamente hechos con una longitud de roscado de 24mm |

| Nombre de la Pieza:<br>Espaciador Base |                                   | Material:<br>Aluminio 6063 |          | N° de Parte:   |         |        | Cantidad: 1 |   |
|--|-----------------------------------|----------------------------|----------|----------------|---------|--------|-------------|---|
| N°                                     | Máquina-Operación-<br>Herramienta | Vc<br>(m/min)              | N (rpm)  | f<br>(rpm/min) | Dr (mm) | L (mm) | T (min)     | OBSERVACIONES   |
| 1                                      | Refrentado (x2)                   | 100                        | 5012,75  | 0,4            | 0       | 6,35   | 0,0063338   | Devastado<br>Refrentado en ambas caras<br>Do= 12,7mm, Dr= 0mm<br>Número de pasadas=2    |
| 2                                      | Roscado                           | 1400                       | 35089,28 | 1              | 12,7    | 35     | 0,0249364   | Usar macho para rosca convencional en el extremo de con una longitud de roscado de 19mm |

## **CAPITULO IV**

### **4. FABRICACIÓN DE LOS INSERTOS ACETABULARES**

#### **4.1 MATERIALES Y EQUIPOS USADOS PARA LA FABRICACIÓN DE LOS INSERTOS ACETABULARES:**

Las piezas necesarias para la fabricación de los insertos acetabulares se maquinaron en el taller mecánico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) ubicado dentro de las instalaciones de la Universidad Central de Venezuela, se emplearon los siguientes equipos:

- Torno Manual de Eje Horizontal.
- Fresadora CNC.

En este lugar también se prepararon las pastillas de UHMWPE requeridas para la fabricación del inserto acetabular, estas fueron cortadas a partir de una barra cilíndrica de 1 1/2 pulgada de diámetro por 1 metro de longitud, mediante una cuchilla de tronzar y redondeada con la finalidad de eliminarle los bordes a las pastillas.

Las pruebas preliminares y los ensayos definitivos fueron realizados en el taller mecánico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) empleando:

- Prensa hidráulica.

Para determinar la presión requerida para efectuar la extrusión pastosa se realizó un ensayo en el taller mecánico de la Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT) empleando el siguiente equipo:

- Máquina de Tracción Universal SHIMADZU AUTOGRAPH AG-I 250 KN

Otros Materiales usados en la fabricación de los insertos acetabulares fueron:

- Vaso de precipitado de 500 ml.
- Vitamina E 0.5 L.
- Bulbo de Resistencia Variable, RTD.
- 1 Controlador marca Watlow 93.
- 1 Contactor marca Siemens de 110V y 220V.
- 1 Resistencia calefactora tipo Arco Mica ( $\Phi$  100mm x 50mm) de 800 Watios y 240 V.
- Guantes Carnaza.
- Bomba sumergible 1/8 HP.
- 2 mangueras de 3/8 pulgada y 2 metros de longitud.
- 1 Recipiente para agua.
- 4 metros de tuberías de cobre de 3/8 pulgada.
- 8 Conectores Anillo de Compresión tipo codo de 3/8"-NPT.
- 6 Conectores Anillo de Compresión tipo T de 3/8".
- Tira de Fibra de Vidrio de 80 mm x 0.5m.
- 4 Metros de aislante de espuma termoplástica elastomérica de 11mm de diámetro interno y 25mm de espesor.

## **4.2 PRUEBAS PRELIMINARES**

El objetivo principal de estas pruebas es conocer el comportamiento del UHMWPE mientras se le aplica la carga de compresión, corregir cualquier defecto del proceso y establecer el rango de temperatura y presión antes de efectuar los ensayos finales para determinar la presión y la temperatura en las cuales el material sea perfectamente moldeable y copie eficazmente la geometría que le imprimen el punzón y el molde.

La pastilla de UHMWPE empleada en los ensayos fue dimensionada utilizando el volumen del 3D del inserto acetabular, proporcionado por el programa CAD

Autodesk Inventor Professional 2013 y fue confirmado físicamente por medio del método de inmersión para el cálculo del volumen de un sólido irregular.

Para la extrusión pastosa del inserto acetabular se realizaron los pasos siguientes:

1. Montaje del Equipo: Se ubica el Molde C en la base de la matriz, insertando el Molde A-B por la parte superior de la matriz y deslizándola hasta su posición final, se introduce la pastilla de UHMWPE, luego se vierte la Vitamina E de manera que recubra completamente la pastilla, se introduce el Punzón A-B hasta que éste haga contacto con la pastilla de polietileno.
2. Proceso de Calentamiento: Se procede a encender la resistencia eléctrica y esperar a que llegue a la temperatura de trabajo (180°C).
3. Extrusión Pastosa: Al llegar a la temperatura de trabajo de los 180°C se ubica el Punzón C y se procede a aplicar la carga de compresiva.
4. Proceso de Refrigeración: Posterior a la compresión de la pastilla de UHMWPE se enciende la bomba de agua iniciando el enfriamiento.
5. Extracción del Inserto Fabricado: Una vez el equipo alcance la temperatura ambiente se procede a extraer el inserto acetabular de la matriz, esto se realiza retirando la carga de la prensa, extrayendo el Molde C de la base de la Matriz, luego se procede a aplicar una carga leve sobre el Punzón C de manera de vencer el roce entre las piezas y la pared interna de la matriz con el fin de extraer todas las piezas por la parte inferior de esta.

#### **4.2.1 Recolección de Datos de las Pruebas Preliminares**

La **Tabla 8** recoge los siguientes datos de las 8 pruebas preliminares que se realizaron:

- Temperatura a la cual se realizó la compresión.
- Presión aplicada por la prensa hidráulica.
- Tiempo 1 lapso en llegar a la temperatura de compresión.
- Tiempo 2 lapso en que la pastilla se mantiene comprimida en caliente.
- Tiempo 3 lapso de enfriamiento del equipo a temperatura ambiente.



- Resultado Observado.

**Tabla 8 Datos de las Pruebas Preliminares**

| Prueba | Temperatura (°C) | Presión (Kgf/mm <sup>2</sup> ) | Tiempo 1 (minutos) | Tiempo 2 (minutos) | Tiempo 3 (minutos) | Resultado  |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|
| 1      | 127              | 0,7736                         | 87                 | 0                  | 0                  | Defectuoso |
| 2      | 180              | 0,7736                         | 67                 | 10                 | 5                  | Defectuoso |
| 3      | 180              | 0,7736                         | 68                 | 10                 | 5                  | Defectuoso |
| 4      | 180              | 0,7736                         | 66                 | 30                 | 30                 | Defectuoso |
| 5      | 180              | 0,7736                         | 70                 | 40                 | 30                 | Defectuoso |
| 6      | 180              | 0,7736                         | 66                 | 40                 | 30                 | Defectuoso |
| 7      | 180              | 0,7736                         | 68                 | 40                 | 30                 | Defectuoso |
| 8      | 180              | 0,7736                         | 67                 | 40                 | 30                 | Defectuoso |

#### **4.2.2 Observaciones del Proceso de Extrusión Pastosa de los Insertos Acetabulares**

##### **4.2.2.1 1era Prueba:**

- La matriz posee pérdidas de calor excesivo que le impiden llegar a la temperatura de trabajo.
- Se observó que la pieza fabricada aunque defectuosa, copio suavemente la geometría superior del Molde A, aunque no de la misma manera el resto de la geometría esférica de este. Se supone un encapsulamiento de Vitamina E entre la pastilla y el molde A-B.

##### **4.2.2.2 2da Prueba**

- Aunque la pieza copio satisfactoriamente el 90% de la geometría, se observa que el polietileno no logró alcanzar la parte superior del punzón. Se supone un encapsulamiento de Vitamina E entre la pastilla y el Punzón A-B.
- Durante la compresión no se logró alcanzar el tope marcado en el Punzón C.

##### **4.2.2.3 3era Prueba**

- Se identifica falta de material en la zona adyacente al canal de extracción superior. Se supone quedó atrapada una burbuja de aire durante la compresión y al ser extirpada busco salida por el conducto de extracción superior arrastrando consigo material de UHMWPE en estado pastoso.

- Durante la compresión no se logró alcanzar el tope marcado en el Punzón C.

#### 4.2.2.4 **4ta Prueba**

- Se puede identificar el borde original de la pastilla de polietileno sobre la superficie esférica externa de inserto fabricado.
- Durante la compresión no se logró alcanzar el tope marcado en el Punzón C.
- Permanece la rebaba en el borde externo de la pieza.

#### 4.2.2.5 **5ta Prueba**

- Durante la compresión no se logró alcanzar el tope marcado en el Punzón C.
- Permanece la rebaba en el borde externo de la pieza.

#### 4.2.2.6 **6ta Prueba**

- Durante la compresión no se logró alcanzar el tope marcado en el Punzón C.
- Permanece la rebaba en el borde externo de del inserto acetabular, justo en la unión entre el Punzón A y el Molde A.

#### 4.2.2.7 **7ma Prueba:**

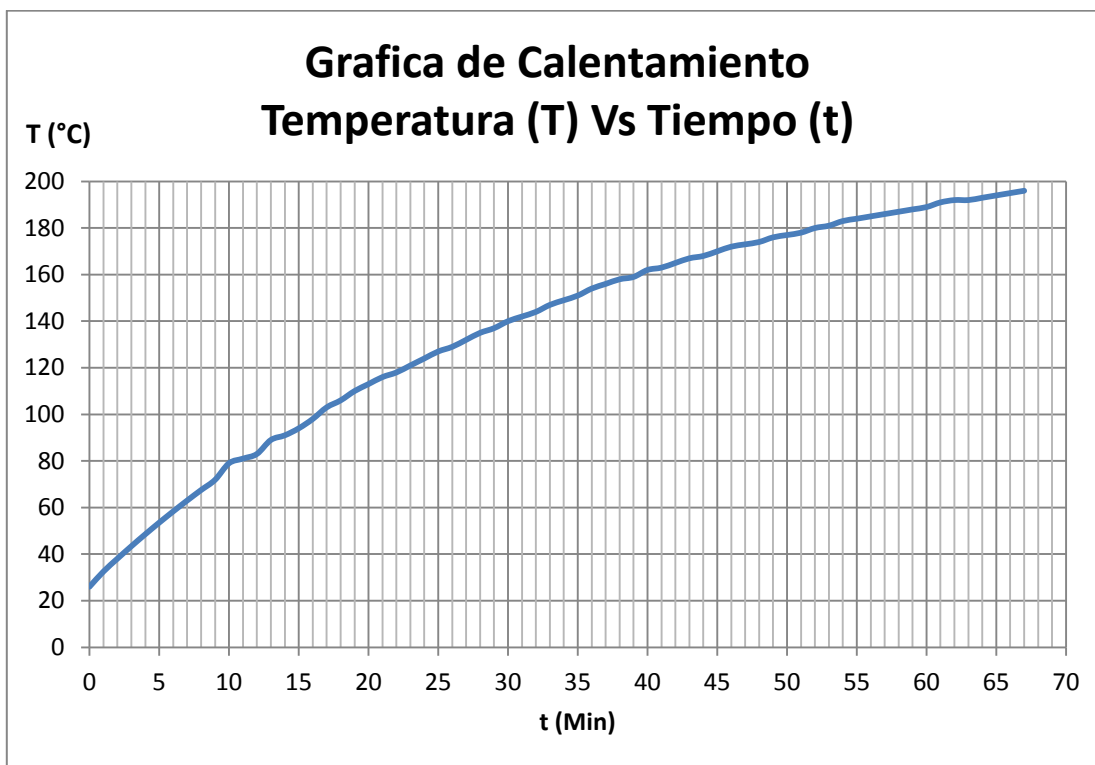
- Se puede identificar un error en la ubicación horizontal de la pastilla mientras se ensamblaba el equipo, esto ocasionó que el canal de extracción superior posea mayor material expulsado que el inferior.
- La rebaba aunque existente ha disminuido su espesor y se identifica  $\frac{1}{4}$  de la circunferencia del inserto acetabular donde el contacto entre el punzón y el molde fue exitoso. se presume que al aplicar una mayor presión esta desaparezca.
- Se perciben 3 marcas en la cavidad interna del inserto acetabular, producto de pequeños defectos en la superficie del Punzón B. Se procede a lijar suavemente la superficie del Punzón B para eliminar la imperfección.

#### 4.2.2.8 8va Prueba:

- En la parte esférica externa se distingue una zona irregular se sospecha de una pequeña cantidad de vitamina E encapsulada por el proceso de compresión.

#### 4.2.3 Modificaciones de la Metodología de Fabricación y de los Moldes de los Insertos Acetabulares

Se minimizó las pérdidas de calor mediante la extracción del agua dentro del sistema de refrigeración y se aisló la matriz y las tuberías de refrigeración que trabajaban como aletas difusoras de calor. El periodo en el que el equipo alcanza la temperatura de trabajo o proceso de calentamiento, se identificó experimentalmente, la curva del comportamiento de la temperatura se puede observar a continuación en la **Figura 33**

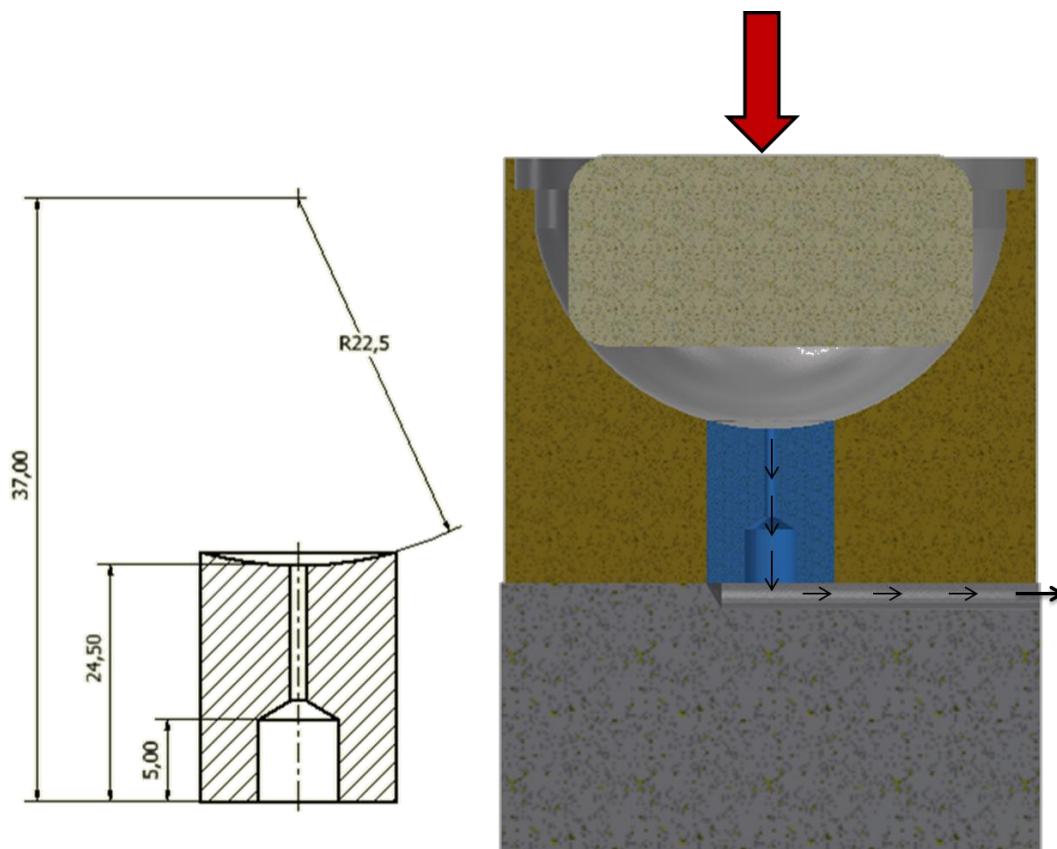


**Figura 33 Etapa de Calentamiento Temperatura (T) Vs tiempo (t)**

El ensayo se llevó a cabo con una temperatura ambiente de 26 °C, sin agua en el sistema de enfriamiento y con el equipo debidamente ensamblado, dando como

resultado una temperatura tope registrada por el bulbo de resistencia de 196 °C dentro de la matriz de aluminio a los 67 minutos de haberla encendido, estableciendo de esta manera el lapso que demora este paso en la metodología de fabricación de los insertos Acetabulares.

Creación del 1er conducto de escape en el Molde B y la creación de la ranura en el Molde C, para expulsar la burbuja de vitamina E que evitó se completara el recorrido de compresión y permita el acceso del polietileno en forma pastosa a la parte esférica inferior del molde. Como podemos observar en la **Figura 34**.

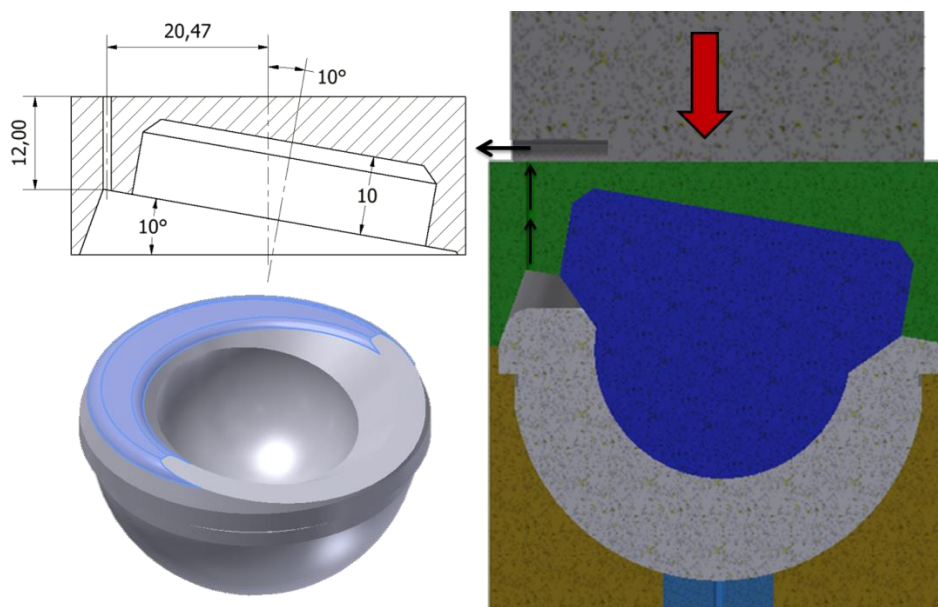


**Figura 34 Conducto de Escape Inferior**

Aumentar el tiempo en que la pastilla se encuentra comprimida con la resistencia encendida a 40 minutos, para que el polietileno libere tensiones, se adapte y copie satisfactoriamente la superficie del molde y del punzón.

Marcar el recorrido de compresión sobre el Punzón C a 25.5mm del contacto con el Punzón A. Para identificar visualmente el límite al cual el punzón debe llegar para que la compresión sea total y efectiva.

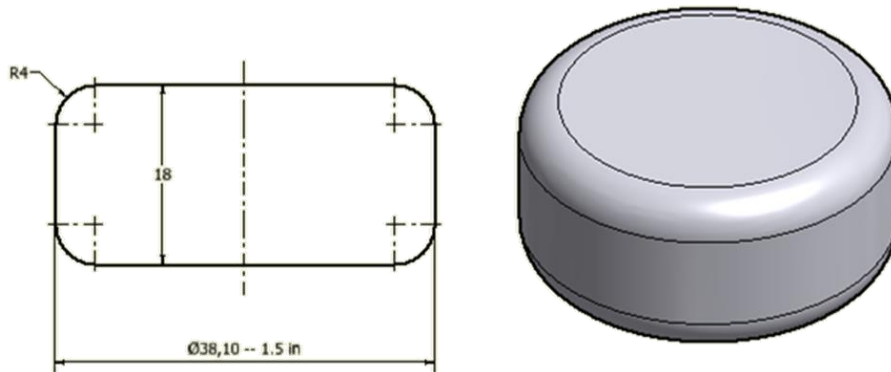
Se requiere la perforación de un 2do canal de extracción sobre el Punzón A para remediar el encapsulamiento de la burbuja de vitamina E que evitó que el polietileno en estado pastoso accediera a la parte superior del Punzón A. Como se muestra en la **Figura 35**.



**Figura 35 Conducto de Escape Superior**

Anexar en la metodología de fabricación la rotación de la pastilla de polietileno en la vitamina E de manera de expulsar cualquier burbuja de aire.

Se procederá a redondear los bordes de las pastillas de UHMWPE. De manera de eliminar la marca del borde original de la pastilla. Y a reducir su altura a 18 mm para evitar el exceso de material. Como se muestra la **Figura 36**.



**Figura 36 Pastilla de UHMWPE de 18mm Altura con Bordes Redondeados.**

Se aplicó la compresión a una velocidad de 10 milímetros por minuto. Con el fin de expulsar de manera controlada cualquier burbuja de Vitamina E.

#### **4.2.4 Metodología Final de Fabricación de los Insertos Acetabulares**

1. Montaje del Equipo: Se ubica el Molde C en la base de la matriz, insertando el Molde A-B por la parte superior de la matriz y deslizándolo hasta su posición final, se introduce la pastilla de UHMWPE, luego se vierte la Vitamina E de manera que recubra completamente la pastilla (aproximadamente 19 cm<sup>3</sup>), se invierte la posición de la pastilla para garantizar que no quede ninguna burbuja de aire atrapada entre la pastilla y el Molde A-B teniendo en cuenta que la pastilla debe quedar en posición horizontal, se introduce el Punzón A-B hasta que éste haga contacto con la pastilla de polietileno.
2. Proceso de Calentamiento: Se procede a encender la resistencia eléctrica. El equipo dura aproximadamente 67 minutos en alcanzar la temperatura de trabajo.
3. Extrusión Pastosa: Al llegar a la temperatura de trabajo se ubica el Punzón C alineándolo con el agujero de escape del Punzón A y se procede a aplicar la carga de compresión, la carrera o el recorrido se encuentra representado sobre el punzón C de manera visual como una línea con el fin de prevenir el cese del desplazamiento.

4. Periodo de Adaptación al Molde: Una vez comprimido se mantiene la compresión por un lapso de 40 minutos con la resistencia aún encendida con el fin de permitirle al UHMWPE que libere tensiones internas favoreciendo que éste se amolde y adapte satisfactoriamente a su nueva geometría.
5. Proceso de Refrigeración: Al cumplirse los 40 minutos de compresión, y aún con la carga compresiva aplicada se apaga la resistencia eléctrica y se enciende la bomba de agua iniciando el enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente aproximadamente a los 30 minutos.
6. Una vez el equipo alcance la temperatura ambiente se procede a extraer el inserto acetabular de la matriz, esto se realiza retirando la carga de la prensa, extrayendo el Molde C de la base de la Matriz, luego se procede a aplicar una carga leve sobre el Punzón C de manera de vencer el roce entre las piezas de moldeado y la pared interna de la matriz con el fin de extraerlas por la parte inferior de esta.

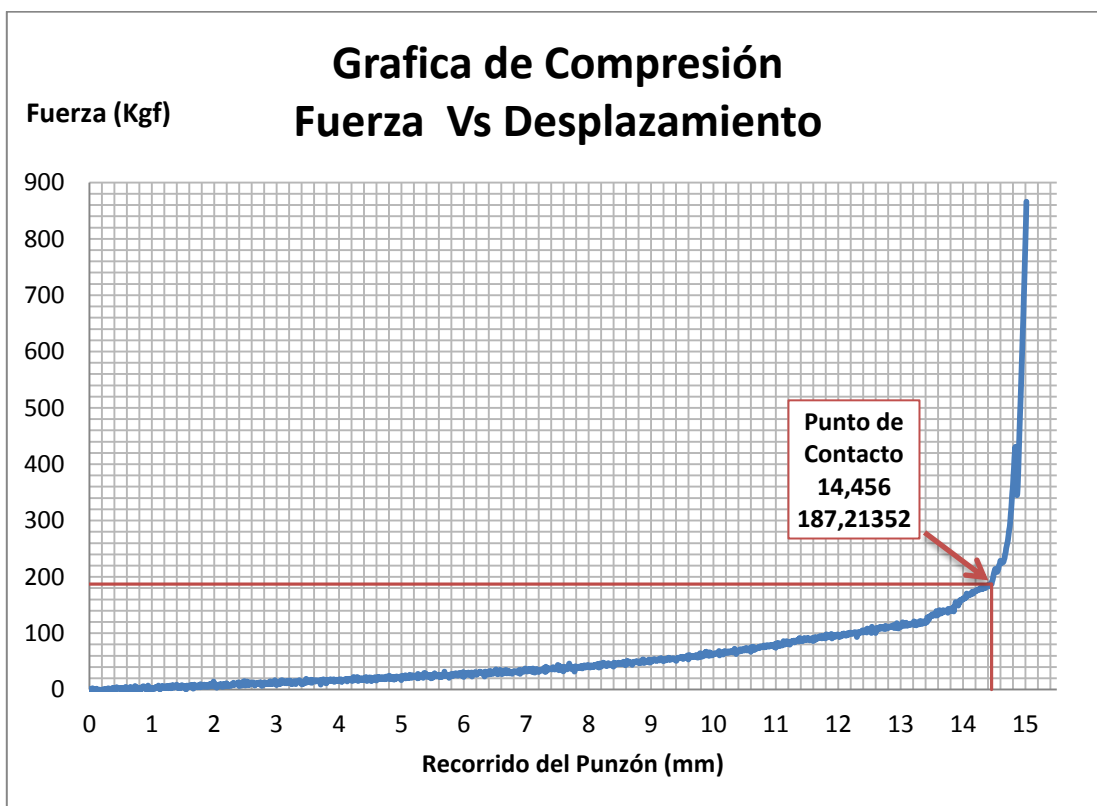
Con este procedimiento finalmente se hicieron las últimas pruebas antes de fabricar los insertos acetabulares definitivos.

Al efectuar estas modificaciones se notaron mejoras considerables en la velocidad del incremento de la temperatura, mejorando notablemente el acabado superficial de la pieza fabricada. Mediante la aplicación de una velocidad de avance baja y los conductos de escape, se logró la supresión y expulsión de las burbujas de aire o Vitamina E que quedaban retenidas en la extrusión, que junto al aumento del lapso de adaptación al molde se garantiza que el UHMWPE fluya correctamente y se adapte satisfactoriamente a su nueva geometría.

El redondeo de los bordes de la pastilla de UHMWPE y la reducción de su altura mejoraron el acabado superficial de la pieza aparte de reducir el desperdicio por exceso de material, minimizando la rebaba y permitiendo un eficiente contacto entre el Punzón y el Molde.

Se logró constatar que la presión no es un parámetro determinante en la fabricación de los insertos acetabulares, debido a que solo se requiere identificar y aplicar la presión necesaria para deformar al UHMWPE en estado pastoso garantizando que este fluya correctamente logrando además el eficaz acople entre el Punzón A y el Molde A. Cualquier otra presión que exceda este valor culminara de igual manera provocando el contacto entre el tope del Punzón A y el tope del Molde A.

Para determinar la presión mínima requerida se realizó un ensayo en la máquina de tracción universal en el taller mecánico de la FII, a una temperatura de 180 °C y una velocidad de compresión de  $10 \frac{mm}{min}$ . Obteniendo la siguiente grafica que demuestra el incremento de la presión en Kgf durante el recorrido de compresión del punzón.



**Figura 37 Grafica de Compresión Fuerza Vs Desplazamiento**

Al analizar esta gráfica podemos determinar que a los 14,456 mm del recorrido del punzón, se registró una fuerza de 187,21352 Kgf debido a la resistencia ejercida por



parte del UHMWPE en estado pastoso, a partir de este punto se supone se realizó el contacto con el tope del Molde A, ya que en una diferencia de 0,558 mm se incrementó enormemente la fuerza registrada producto a la resistencia del acero 4140 a ser comprimido, dando un valor tope registrado por la prensa de 865,96212 Kgf.

Gracias a este ensayo se determinó un fenómeno el cual no se tenía contemplado, y es que al mantener la compresión para que el polietileno se adapte al molde, la máquina de tracción universal aunque detenida en desplazamiento, esta siguió registrando un aumento gradual en la fuerza aplicada que llegó a un tope de 1670 Kgf al culminar los 40 min. Esto es debido al contacto del Punzón C a temperatura ambiente y el Punzón A que se encontraba dentro de la matriz a 180 °C donde se presentó una transferencia de calor por conducción ocasionando la dilatación térmica del Punzón C.

Una vez establecida la fuerza de resistencia máxima ejercida por el UHMWPE en estado pastoso la presión se calcula por medio de:

$$A = \pi \times r^2 = \pi \times 24^2 = 1809.5573 \text{ mm}^2 \quad [\text{Ecuación 64}]$$

Presión (P) Kgf/mm<sup>2</sup>

Fuerza (F) = 187,21352 Kgf

Área (A) mm<sup>2</sup>

Radio (r) = 24 mm

$$P = \frac{F}{A} = \frac{187.21352}{1809.5573} = 0.1034 \text{ Kgf/mm}^2 \quad [\text{Ecuación 65}]$$

La presión mínima que se le debe aplicar al UHMWPE en estado pastoso garantizando que éste fluya correctamente logrando además el eficaz acople entre el Punzón A y el Molde A es de  $0.1034 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$

Una vez establecido este valor se procedió a fabricar 9 insertos acetabulares a 170, 180, 190 °C, y 0,7736 Kgf/mm<sup>2</sup>, con la metodología antes mencionada.

Estos 9 Insertos acetabulares fabricados finalmente presentaron los resultados esperados para su posterior análisis, es decir:

1. Un acabado superficial liso y pulido en la superficie esférica interna y externa.
2. Fluencia completa (a simple vista) del material dentro del molde.
3. Una compresión completa con presencia de algunas rebabas.

Una vez fabricados estos insertos acetabulares se procedió a levantar medidas de sus principales dimensiones inmediatamente después del proceso.

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 PRUEBAS PRELIMINARES

El resultado de las pruebas preliminares permitió realizar una serie de modificaciones en el proceso de fabricación de los insertos acetabulares de UHMWPE mediante el proceso de extrusión pastosa.

Estos primeros resultados permitieron identificar las características o parámetros que se deben supervisar durante el proceso para evaluar la eficiencia del mismo, Estos parámetros son:

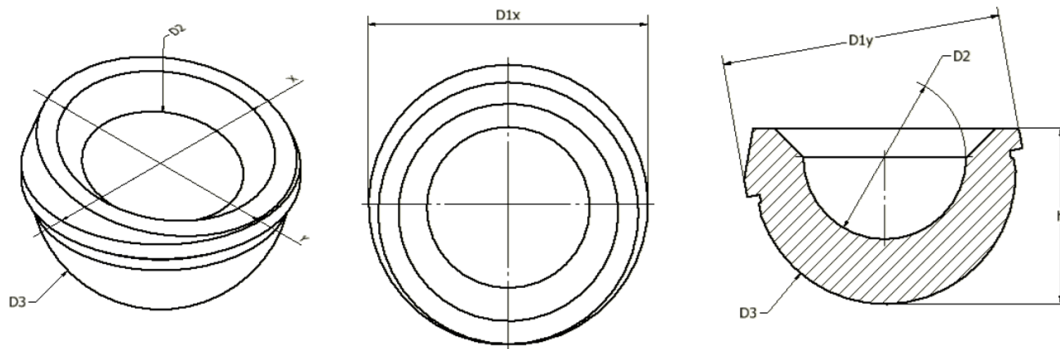
- Valor de las dimensiones principales de los insertos acetabulares.
- El perfil de los insertos acetabulares, con el fin de compararlos con el perfil del punzón y el molde mecanizados.
- Temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso de fabricación.

#### 5.2 DIMENSIONES PRINCIPALES

Durante el proceso de extrusión pastosa se observó que los insertos acetabulares sufren de una recuperación considerable del material o contracción en su geometría, con el fin de analizar los resultados se identificaron las medidas principales que serán tomadas después del proceso. Estas son: altura del disco (h), diámetro principal en el eje X (D1x) y en el eje Y (D1y), diámetro interno de la cavidad femoral (D2) y diámetro externo de la cavidad coxal (D3). Como podremos identificar más fácilmente en la **Figura 38**.

Los valores de estas medidas principales en los planos son:

- h = 30mm
- D2 = 28 mm
- D1x = D1y = 48 mm
- D3 = 45 mm



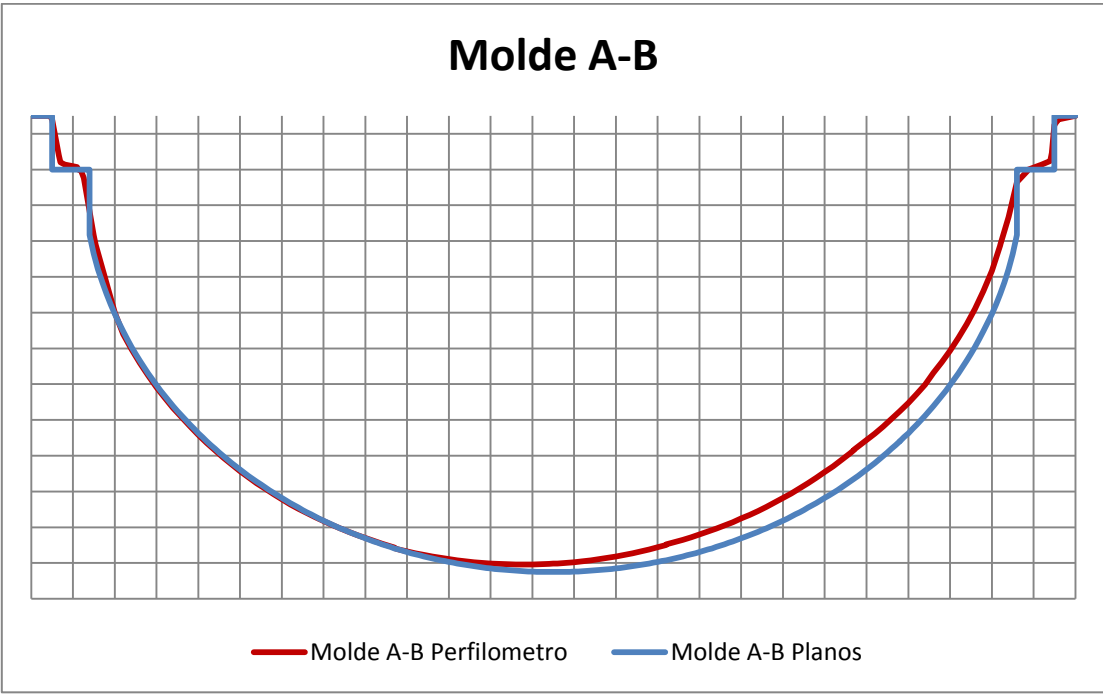
**Figura 38 Medidas Principales**

Aunque las piezas para el moldeo fueron fabricadas con la mayor precisión posible en equipos de alta exactitud como la fresa CNC, siempre existe un grado de tolerancia o de error entre las dimensiones especificadas en los planos y las dimensiones reales en las piezas maquinadas. Las medidas principales, se deben comparar es, con las medidas que poseen las diversas piezas que cumplen la función de moldeo del UHMWPE, ya que de aquí es de donde podremos levantar una apreciación certera de cuanto es el porcentaje de contracción y la zona en que se genera.

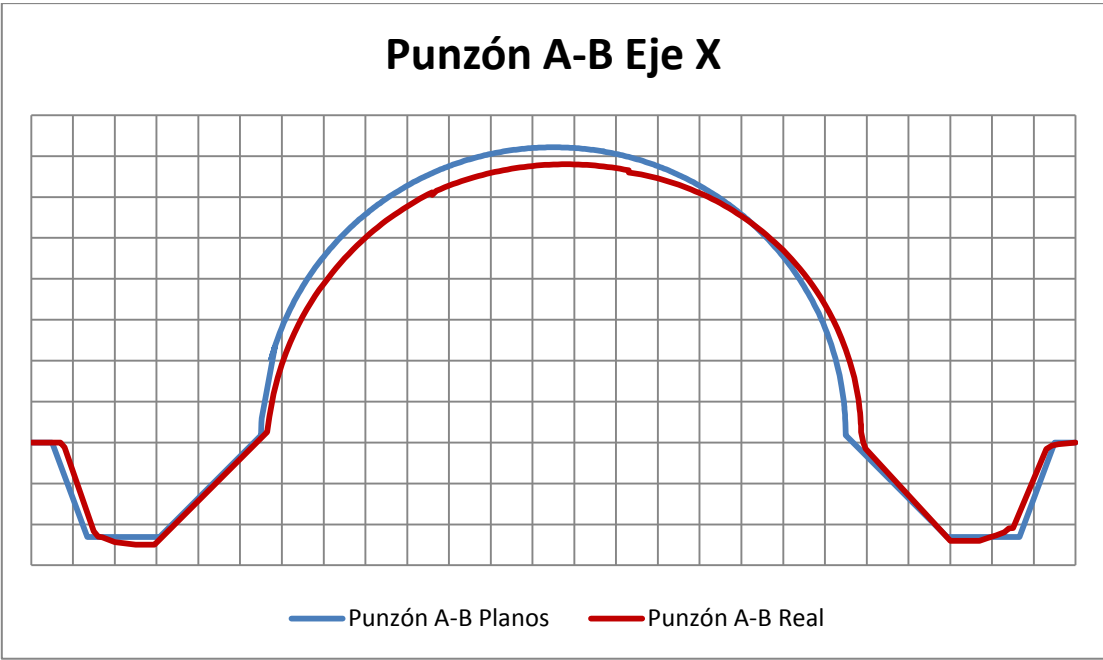
Para efectuar esto, se realizó el levantamiento de las medidas reales de los Punzones A – B y de los Moldes A – B. Encargados de imprimirle la geometría final a la pastilla de polietileno; comparándolos con las geometrías especificadas en los planos. Como podemos observar en la **Figura 39 - Figura 40 - Figura 41**.

La curva representada en Azul corresponde a la geometría de los diseños expresada por los planos.

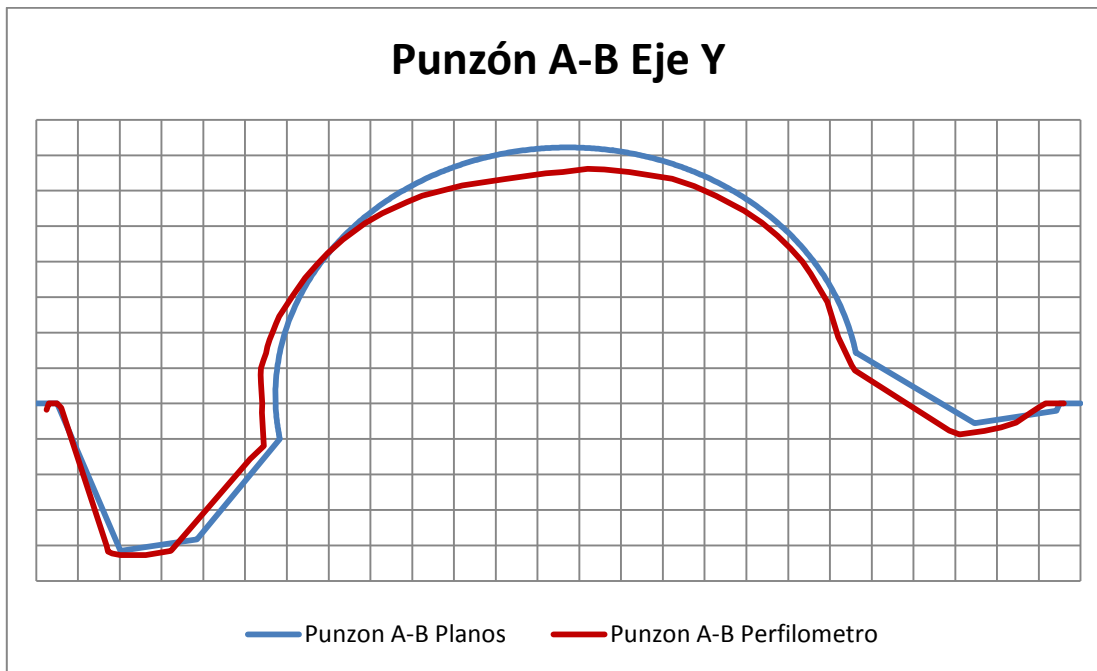
La curva simbolizada en Rojo representa el perfil obtenido de las piezas maquinadas.



**Figura 39** Curvas de Desviación de Perfil Molde A-B



**Figura 40** Curvas de Desviación Perfil Punzón A-B Eje X



**Figura 41 Curvas de Desviación Perfil Punzón A-B Eje Y**

Conocido el perfil del Punzón A-B y del Molde A-B se identificó claramente la desviación existente entre ambas curvas y el porcentaje que estas afectan a las medidas principales.

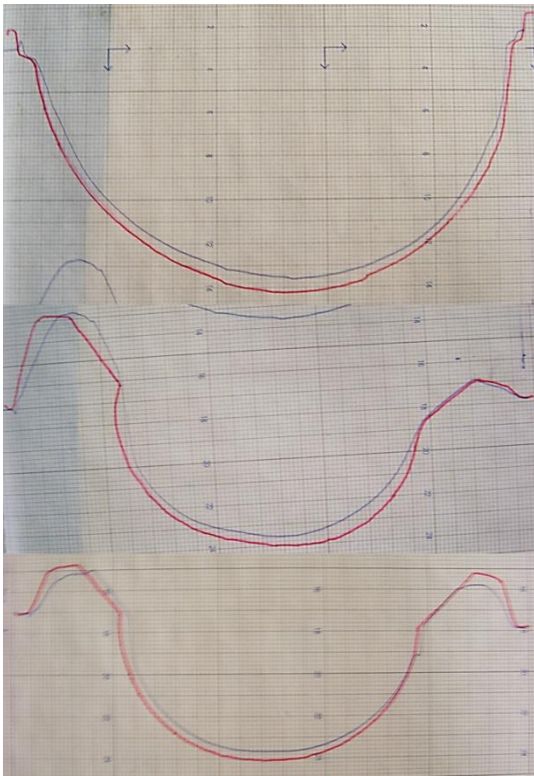
**Tabla 9 Desviación Molde y Punzón**

| <b>Dimensión</b>       | <b>h</b> | <b>D1x</b> | <b>D1y</b> | <b>D2</b> | <b>D3</b> |
|------------------------|----------|------------|------------|-----------|-----------|
| <b>Desviación (mm)</b> | 0,57     | 0,52       | 0,68       | 0,4       | 0,6       |
| <b>Desviación (%)</b>  | 1,90     | 1,08       | 1,42       | 1,43      | 1,33      |
| <b>Corrección</b>      | 29,43    | 47,48      | 47,32      | 27,6      | 44,4      |

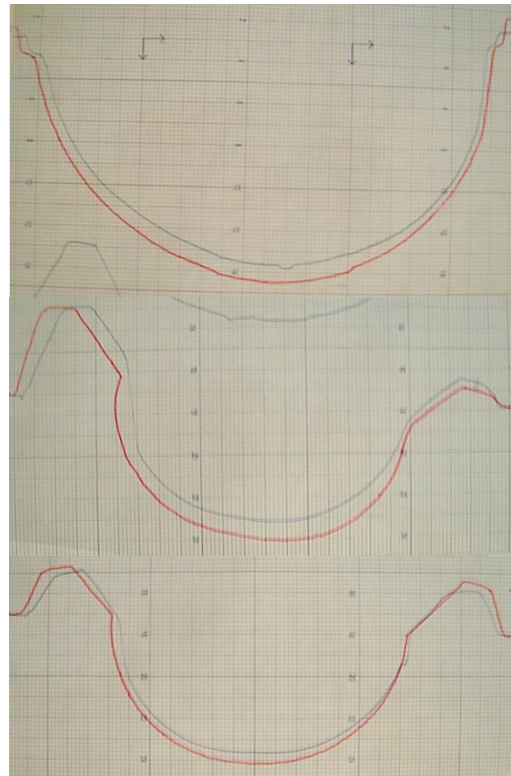
La **Tabla 9** muestra la magnitud y el porcentaje de desviación que posee cada medida principal, mostrando que la más afectada es la altura de la pieza con un 1.9 % seguido por el diámetro interno con un 1.43 % estas medidas llaman la atención ya que la altura de la pieza garantiza un buen acople y movilidad en la articulación, la superficies cóncava del inserto es donde se acopla la cabeza esférica del vástago femoral.

### 5.3 PERFILES DE LOS INSERTOS ACETABULARES

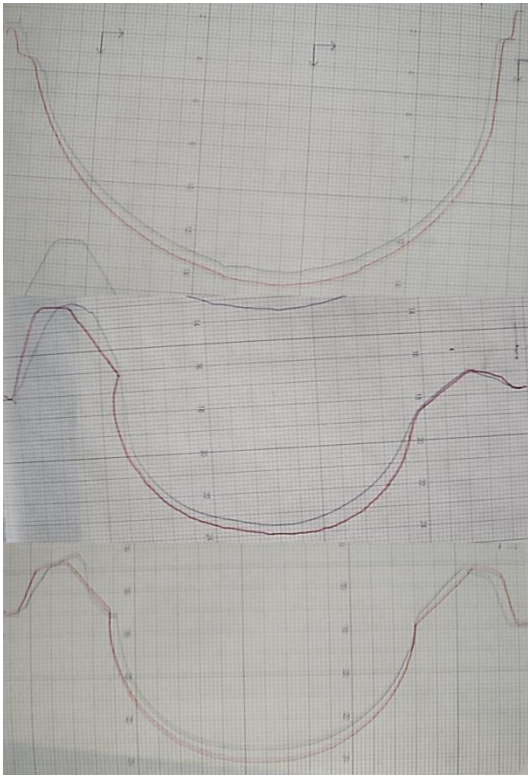
Para verificar el perfil copiado por los insertos acetabulares, se realizó una técnica de comparación, en la cual se superpuso las curvas generadas por las piezas de moldeado (Curva Roja), sobre las curvas generadas por los 9 insertos fabricados (Curva Azul). Logrando observar y cuantificar la recuperación o contracción del UHMWPE luego de la extrusión pastosa. Como podremos observar a continuación desde la **Figura 42** a la **Figura 50**.



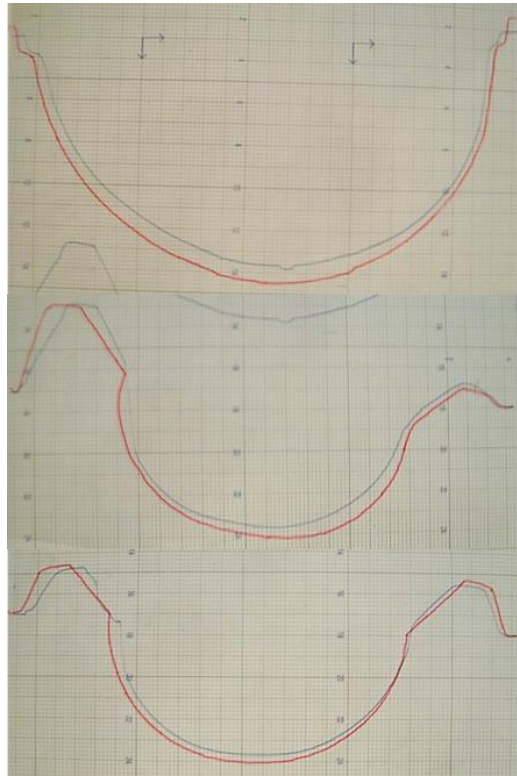
**Figura 42 170 °C #1**



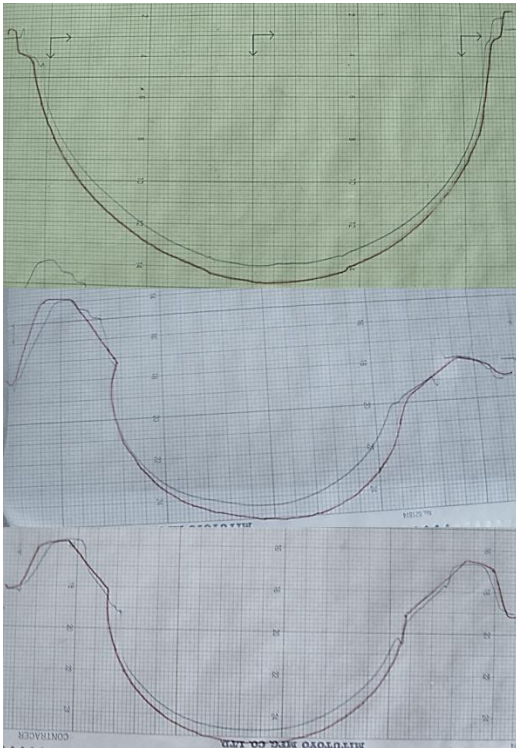
**Figura 43 170 °C #2**



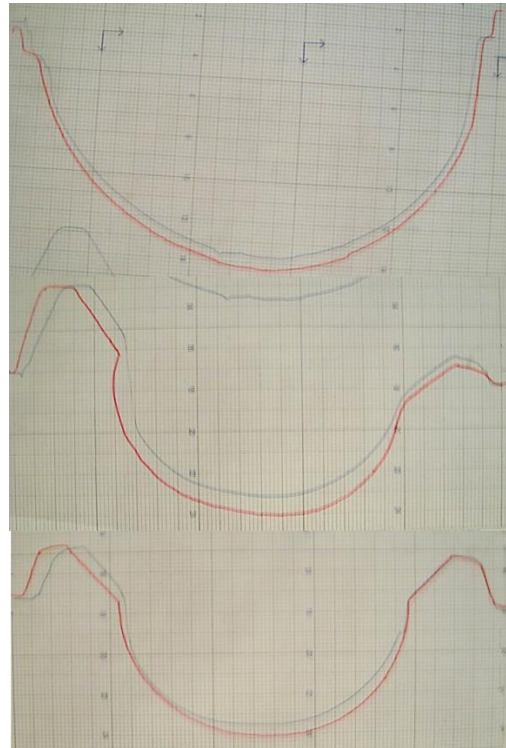
**Figura 44 170 °C #3**



**Figura 45 180 °C #1**

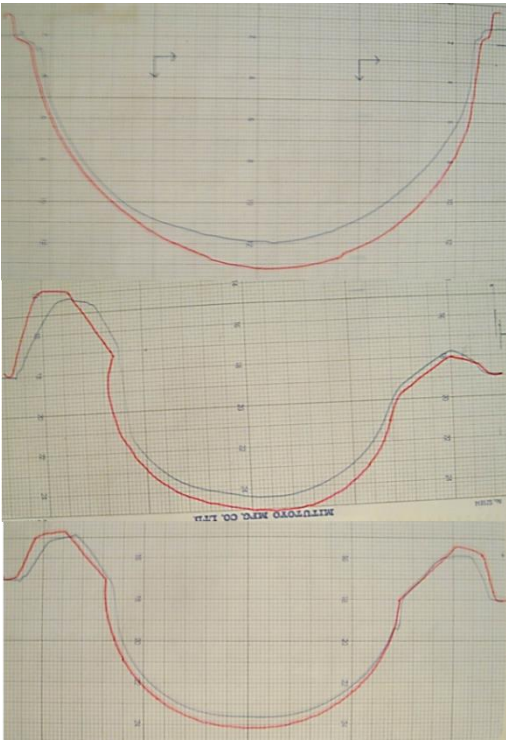


**Figura 46 180 °C #2**

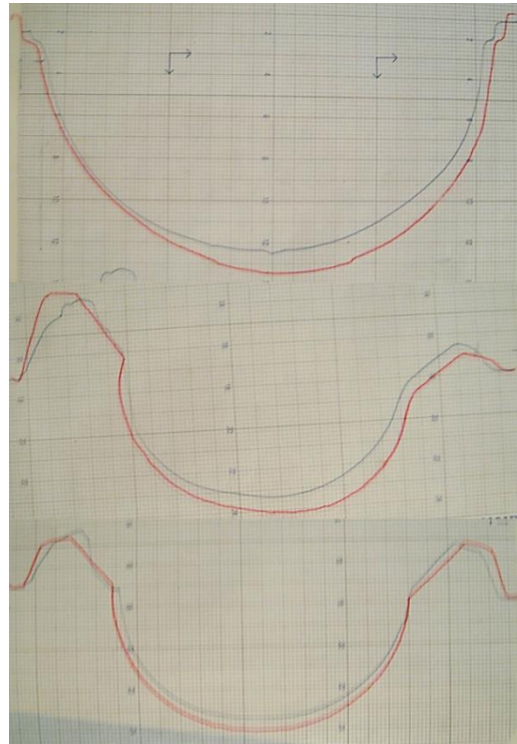


**Figura 47 180 °C #3**

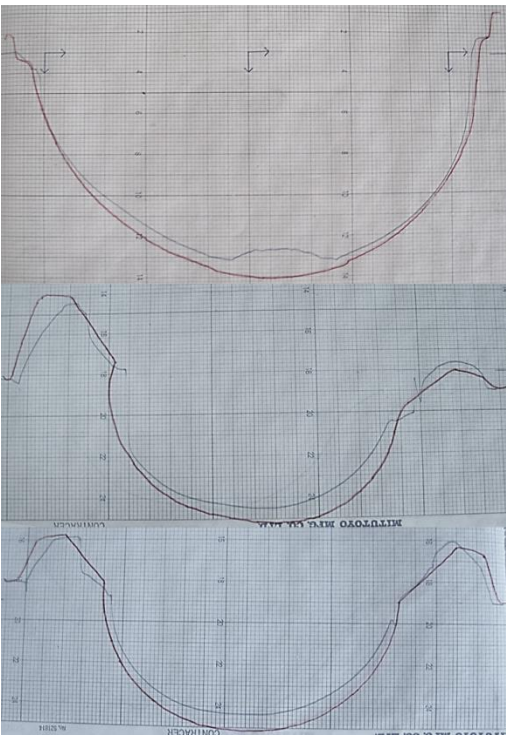




**Figura 48 190 °C #1**



**Figura 49 190 °C #2**



**Figura 50 190°C #3**

A continuación se presentan los gráficos que ilustran la desviación entre las medidas principales obtenidas de estos datos y la medida establecida con la corrección de las piezas de moldeo. Con el fin de establecer la temperatura a la cual la desviación sea la mínima registrada.

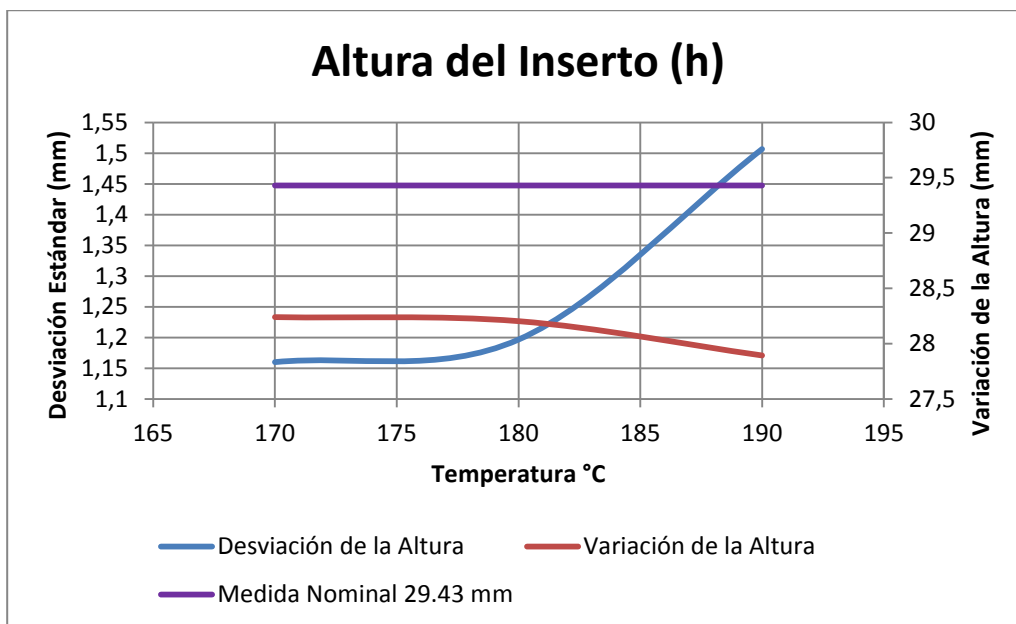


Figura 51 Variación y Desviación de la Magnitud "h" respecto a la medida estándar

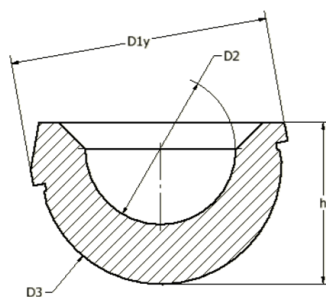
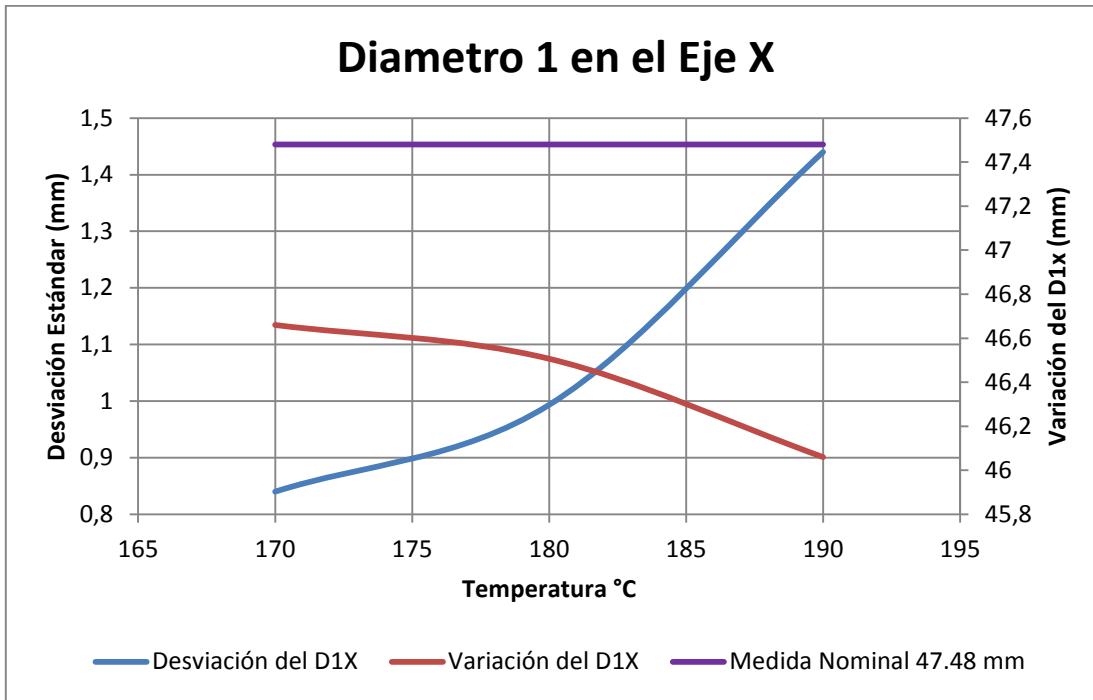


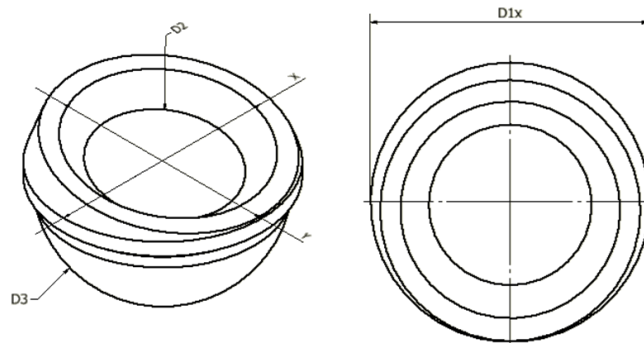
Figura 52 Medida Estándar h = 29,43 mm

Tabla 10 Variación de la Altura del Inserto Acetabular

| Variación de la Dimensión "h"  |        |      |      |
|--------------------------------|--------|------|------|
| Presión (Kgf/mm <sup>2</sup> ) | 0,7736 |      |      |
| Temperatura (°C)               | 170    | 180  | 190  |
| Variación (mm)                 | 1,16   | 1,20 | 1,51 |
| Desv. Estándar (%)             | 3,95   | 4,07 | 5,12 |



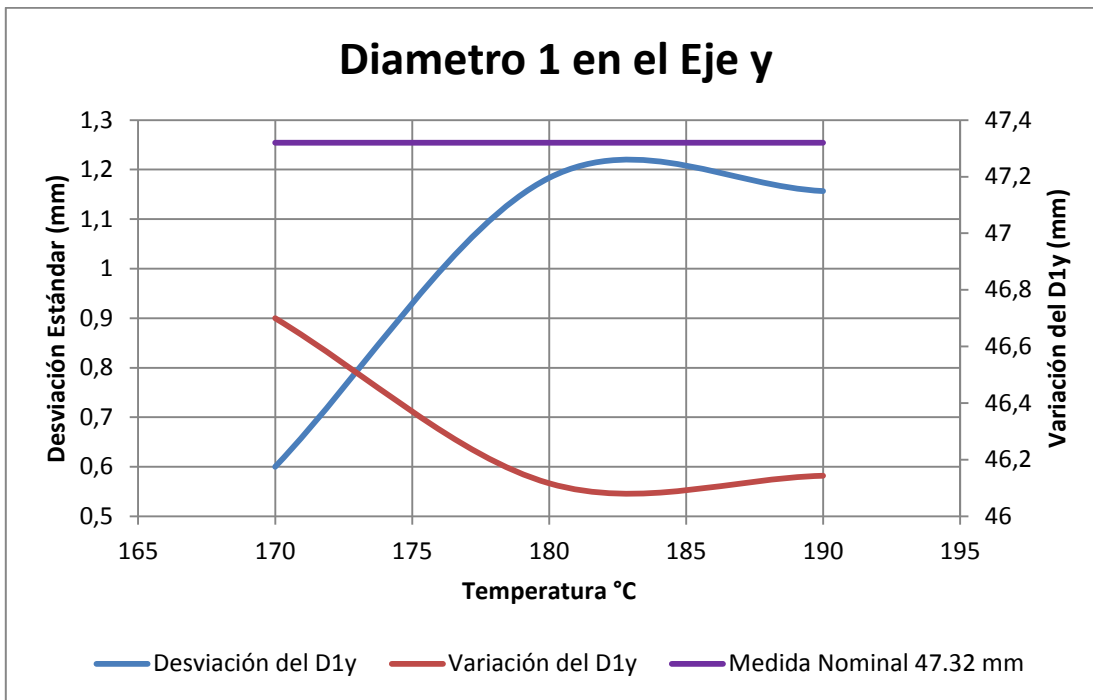
**Figura 53 Variación y Desviación de la magnitud "D1 x" respecto a la medida estándar**



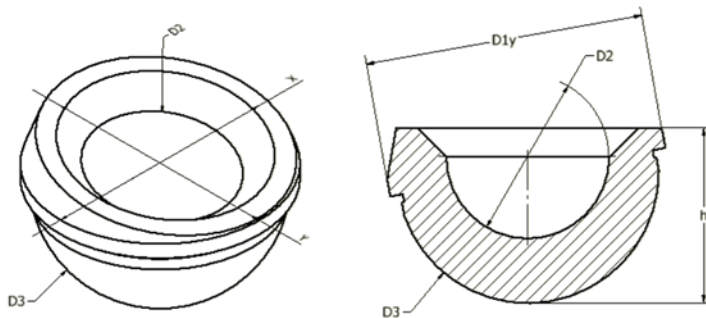
**Figura 54 Medida Estándar D1x = 47,48 mm**

**Tabla 11 Variación del Diámetro Externo del Inserto Acetabular Eje X**

| Variación de la Dimensión "D1 x" |        |      |      |
|----------------------------------|--------|------|------|
| Presión (Kgf/mm <sup>2</sup> )   | 0,7736 |      |      |
| Temperatura (°C)                 | 170    | 180  | 190  |
| Variación (mm)                   | 0,84   | 0,99 | 1,44 |
| Desv. Estándar (%)               | 1,77   | 2,09 | 3,03 |



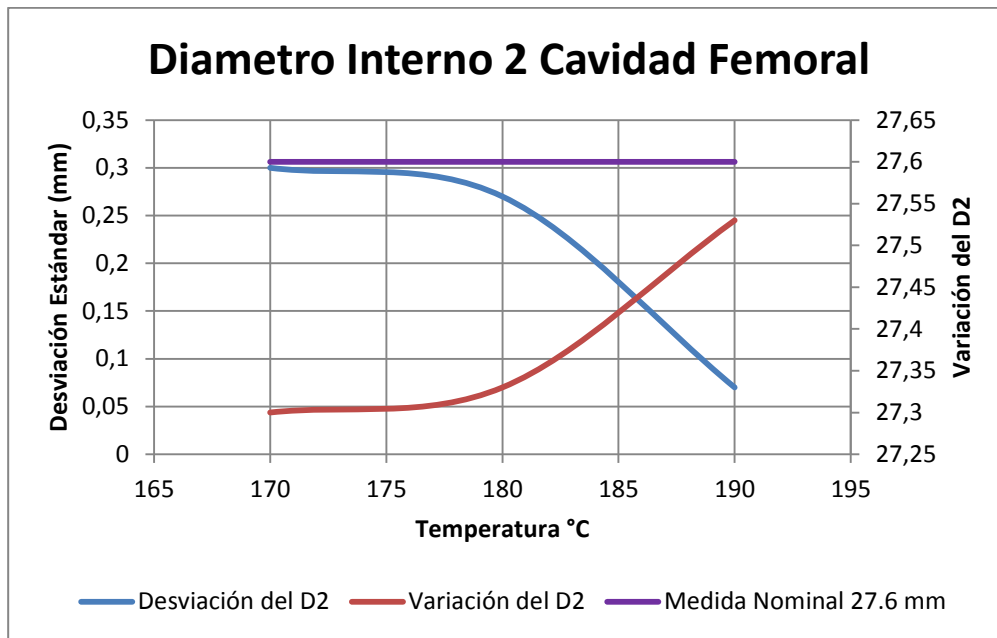
**Figura 55** Desviación de la magnitud "D1 y" respecto a la medida estándar



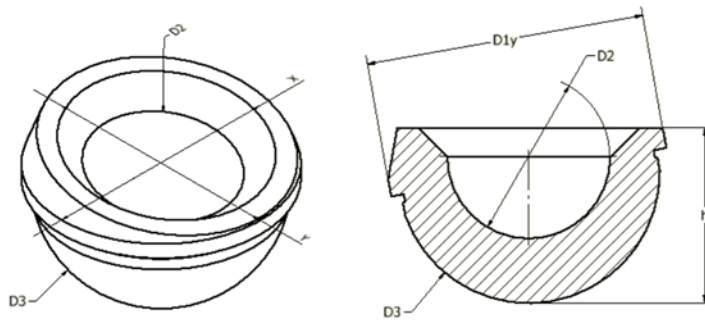
**Figura 56** Medida Estándar D1y = 47,32 mm

**Tabla 12** Variación del Diámetro Externo del Inserto Acetabular Eje Y

| Variación de la Dimensión "D1 y" |        |      |      |
|----------------------------------|--------|------|------|
| Presión (Kgf/mm <sup>2</sup> )   | 0,7736 |      |      |
| Temperatura (°C)                 | 170    | 180  | 190  |
| Variación (mm)                   | 0,6    | 1,18 | 1,16 |
| Desv. Estándar (%)               | 1,27   | 2,50 | 2,45 |



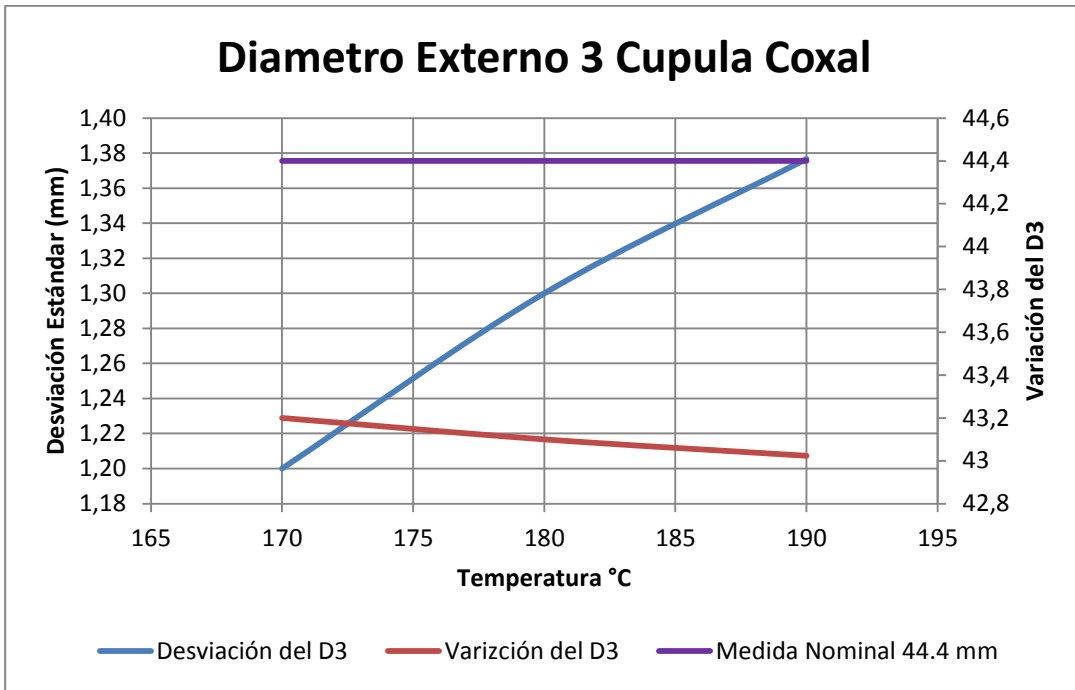
**Figura 57** Desviación de la magnitud "D2" respecto a la medida estándar



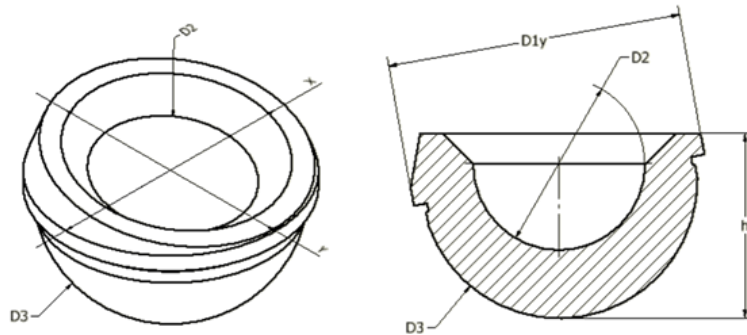
**Figura 58** Medida Estándar D2 = 27,60 mm

**Tabla 13** Variación del Diámetro Interno de la Cavity Femoral

| Variación de la Dimensión "D2" |        |      |      |
|--------------------------------|--------|------|------|
| Presión (Kgf/mm <sup>2</sup> ) | 0,7736 |      |      |
| Temperatura (°C)               | 170    | 180  | 190  |
| Variación (mm)                 | 0,3    | 0,27 | 0,07 |
| Desv. Estándar (%)             | 1,09   | 0,98 | 0,25 |



**Figura 59** Desviación de la magnitud "D3" respecto a la medida estándar



**Figura 60** Medida Estándar D3 = 44.40 mm

**Tabla 14** Variación del Diámetro Externo de la Cavidad Coxal

| Variación de la Dimensión "D3" |        |      |      |
|--------------------------------|--------|------|------|
| Presión (Kgf/mm <sup>2</sup> ) | 0,7736 |      |      |
| Temperatura (°C)               | 170    | 180  | 190  |
| Variación (mm)                 | 1,2    | 1,3  | 1,38 |
| Desv. Estándar (%)             | 2,70   | 2,93 | 3,10 |

**Tabla 15 Resultados de la Desviación**

| Parámetro                                     |          | Presión = 0,7736 (Kgf/mm <sup>2</sup> ) |       |        |       |        |       |
|---|----------|---|-------|--------|-------|--------|-------|
|   |          | 170 °C                                  |       | 180 °C |       | 190 °C |       |
|   |          | Des.                                    | Vari. | Des.   | Vari. | Des.   | Vari. |
| Altura del Inserto Acetabular                 | h (mm)   | 1,16                                    | 28,24 | 1,20   | 28,20 | 1,51   | 27,89 |
| Diámetro Externo del Inserto Acetabular Eje X | D1x (mm) | 0,84                                    | 46,66 | 0,99   | 46,51 | 1,44   | 46,06 |
| Diámetro Externo del Inserto Acetabular Eje Y | D1y (mm) | 0,6                                     | 46,7  | 1,18   | 46,12 | 1,16   | 46,14 |
| Diámetro Interno de la Cavity Femoral         | D2 (mm)  | 0,3                                     | 27,3  | 0,27   | 27,33 | 0,07   | 27,53 |
| Diámetro Externo de la Cavity Coxal           | D3 (mm)  | 1,20                                    | 43,2  | 1,30   | 43,10 | 1,38   | 43,02 |

La **Tabla 15** muestra resaltados en verde, los valores mínimos de desviación en las medidas principales para cada parámetro de temperatura estudiado, estos valores corresponden al promedio de 3 insertos acetabulares fabricados bajo los mismos parámetros y metodología, pudiéndose observar que para la temperatura de 170 °C. se obtiene las desviaciones mínimas para casi todas las medidas principales excepto el diámetro interno de la cavidad de la cabeza femoral (D2).

Al establecer la temperatura ideal para realizar la extrusión pastosa podemos ajustar por rediseño las dimensiones del molde y del punzón para considerar la contracción elástica del UHMWPE y de esta manera producir un inserto acetabular de buena precisión y de mejor calidad que el original. Como podemos observar en la **Tabla 16**.

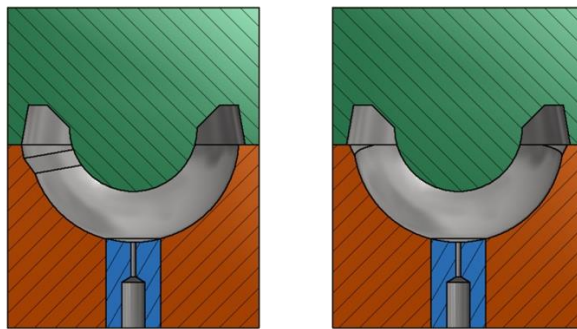
**Tabla 16 Ajuste de las Medidas Considerando la Contracción del UHMWPE**

| Medidas Principales | Obtenidas Originalmente | Obtenidas del Molde y punzón | Variación a los 170°C | Desviación | %         | Ajuste de las medidas |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|------------|-----------|-----------------------|
| h                   | 30                      | 29,4                         | 28,24                 | 1,16       | 3,9455782 | 31,3                  |
| D1 x                | 48                      | 47,5                         | 46,66                 | 0,84       | 1,7684211 | 48,9                  |
| D1 y                | 48                      | 47,3                         | 46,7                  | 0,60       | 1,2684989 | 48,7                  |
| D2                  | 28                      | 27,6                         | 27,3                  | 0,30       | 1,0869565 | 28,4                  |
| D3                  | 45                      | 44,4                         | 43,2                  | 1,20       | 2,7027027 | 46,3                  |

Se puede observar a simple vista que el acabado superficial de la pieza fabricada por extrusión pastosa supera al acabado generado por desbaste y arranque de viruta del proceso de fabricación del inserto original, siempre y cuando la superficie del punzón y el molde se encuentren limpias y lisas, ya que cualquier imperfección en la superficie de estas piezas será copiada fielmente por el polietileno, esta característica no varía considerablemente con el incremento de la temperatura pero a temperaturas por debajo de los 160°C, el polietileno en estado semi-pastoso no fluye exitosamente.

Se detectó un patrón en los insertos fabricados, un incremento inusual en la contracción del UHMWPE en la zona esférica situada debajo de la ceja a 10°, ocasionado por la irregularidad simétrica que genera dicha ceja y por el volumen de material que esta posee. Esto quiere decir que para evitar o minimizar al máximo las desviaciones se debe procurar que el UHMWPE en estado pastoso fluya en el menor número de direcciones posibles dentro de un molde lo más simétrico posible.

Para lograr esto se diseñó un nuevo punzón y molde de mejor simetría que permitan tomar las ventajas que proporciona el proceso de extrusión pastosa, con el defecto de no poder completar un 100% la geometría de la pieza sino que requerirá de la implementación de un proceso de torneado para lograr la geometría final. Además se tomaron en consideración el valor de la mínima desviación en las medidas principales obtenidas de las pruebas a 170°C con el fin de suprimir los efectos de la contracción del polietileno. Como pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Y verificar en los planos de los apéndices.



**Figura 61 Punzón y Molde Corregido**



## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

Mediante los ensayos de las pruebas preliminares se determinó que las pastillas o cilindros de UHMWPE empleadas en el proceso de extrusión, deben poseer una altura de 18mm con un diámetro original de la barra de 1,5”, con los bordes redondeados a un radio de 4mm.

Según lo observado en el análisis de resultados, la temperatura a la cual se obtienen las menores desviaciones en las medidas principales de los insertos acetabulares es de 170 °C y la presión mínima que se le debe aplicar al UHMWPE en estado pastoso garantizando que éste fluya correctamente en el molde y logrando además el eficaz acople entre el Punzón A y el Molde A es de  $0.1034 \frac{Kgf}{mm^2}$ ; por lo que después de las pruebas realizadas anteriormente se estima que estos son los parámetros de temperatura y presión óptimos para la fabricación de los insertos Acetabulares con UHMWPE por extrusión pastosa.

Por medio del método de extrusión pastosa se obtuvo un acabado superficial muy liso y pulido, de aspecto ceroso, excelente para la función principal del inserto acetabular. La reducción del desgaste por roce e impacto que genera la cabeza esférica metálica del vástago femoral en la prótesis de cadera. Este acabado superficial es superior al obtenido por desbaste y arranque de viruta.

Se detectó un patrón en los insertos fabricados, un incremento inusual en la contracción del UHMWPE en la zona esférica situada debajo de la ceja a 10°, ocasionado por la irregularidad simétrica que genera dicha ceja y por el volumen de material que esta posee. La simetría geométrica juega un papel crítico en la contracción uniforme del material deformado.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Para evitar o minimizar al máximo las desviaciones se debe procurar que el UHMWPE en estado pastoso fluya en el menor número de direcciones posibles dentro de un molde lo más simétrico posible.

Al fabricar las pastillas de UHMWPE de la barra de 1.5” emplear herramientas afiladas, con una velocidad de giro del torno elevada y un avance de la cuchilla lento, esto genera una excelente superficie que copia eficazmente la geometría del molde.

Diseñar las piezas del molde con un espesor de pared superior a 5mm. De manera de contar con una superficie de contacto fiable entre el punzón y el molde.

Aumentar la precisión en el mecanizado de las de piezas de moldeado obteniendo una calidad superior, por medio de la selección de un acero más maquinable con una dureza menor a 34 HRc y contar con máquinas y equipos más precisos y exactos.

Aplicar a las piezas del moldeado un proceso de nitruración con el fin de formar nitruros metálicos en las superficies de la pieza, generando lo que se conoce como capa blanca o capa nitrurada la cual proveerá a las piezas de una superficie lisa y pulida, evitando que el UHMWPE se adhiera a la pieza, minimizando de esta manera el trabajo de pulido superficial con material abrasivo, ya que poco a poco esto reduce la superficie, acumulando error en la precisión de la pieza final. Se recomienda utilizar aceros con Aluminio Cromo Molibdeno y Vanadio, como el AISI 1038 o AISI 1045

Mejorar el sistema de calentamiento aplicando resistencias de tipo cartucho. Introducidas y distribuidas dentro de la matriz. Aislar las bases y el contacto de estas con la presa. Evitar las pérdidas de calor por conducción y convección.

Realizar un soporte para el sistema de refrigeración ya que al acoplarlo a la matriz este desplazo el centro de gravedad del equipo ocasionando que se tambalara constantemente.

## BIBLIOGRAFIA

- Bauer. (2004). *Bauer Kerschbaumer - Poisel ( Cirugía Ortopédica - Cadera y Fémur)*. Madrid - España: Georg Thieme Verlag.
- Bergman G., D. G. (2001). *Hip contact forces and gait patterns from routine activities, J. of Biomechanics*.
- Callaghan, J. (1995). *Orthopaedic Knowledge update: Hip and Knee reconstruction*. American Academy of Orthopaedic Surgeons: Hip Society and Knee Society.
- Cardona, D., Lavernia, C. J., & Alcerro, J. C. (2010). Polietileno. *Acta Ortopédica Mexicana* (pp. 123-128). Mexico: Orthopaedic Institute at Mercy Hospital.
- González, G. (2004). *Fabricacion de discos articulares con polietileno de alto peso molecular (UHMWPE) por medio de extrusión pastosa*. Caracas: Trabajo especial de grado - Tesis Pre grado - Universidad Central de Venezuela.
- Hobecker, D. O. (2005). Impacto de la osteoporosis sobre la poblacion. *Revista de posgrado de la Vla Cátedra de Medicina*, 24 - 27.
- Kapandji, A. I. (2006). *Fisiología Articular 6ta Edicion: Tomo 2 Miembro Inferior*. Panamericana.
- López, D. Á. (2011). Behavior of knee osteoarthritis in a group of patients from Venezuela. *Archivo Médico Camaguey*, 9.
- Mendez, A. (2014). *Análisis de la respuesta mecánica del rediseño de una prótesis modular de cadera bajoun estadodinámico de carga*. Caracas: Trabajo especial de grado - Tesis Pre grado - Universidad Central de Venezuela.
- T.E., A., Adams, G., & Agapiou, J. (1975). ASM HandBook Volume 16 Machinig. In A. T.E., G. Adams, & J. Agapiou, 1989 (p. 1089). ASM Handbook Committee.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

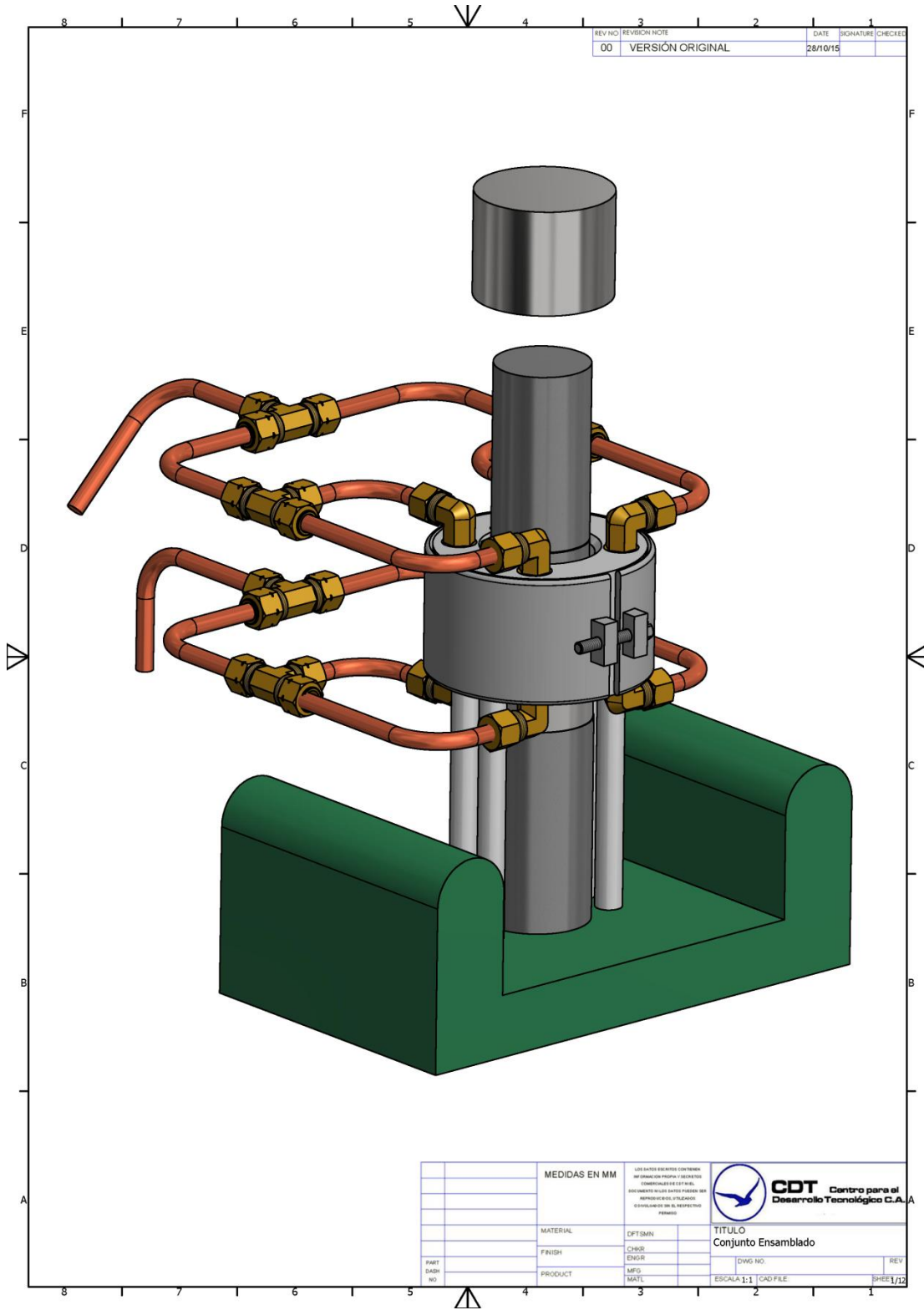
*www.arthrolink.com*. (2015, Octubre 10). Retrieved from *www.arthrolink.com* El sitio dedicado a la osteoartritis:

<http://www.arthrolink.com/es/enfermedad/conocer/factores-de-riesgo>

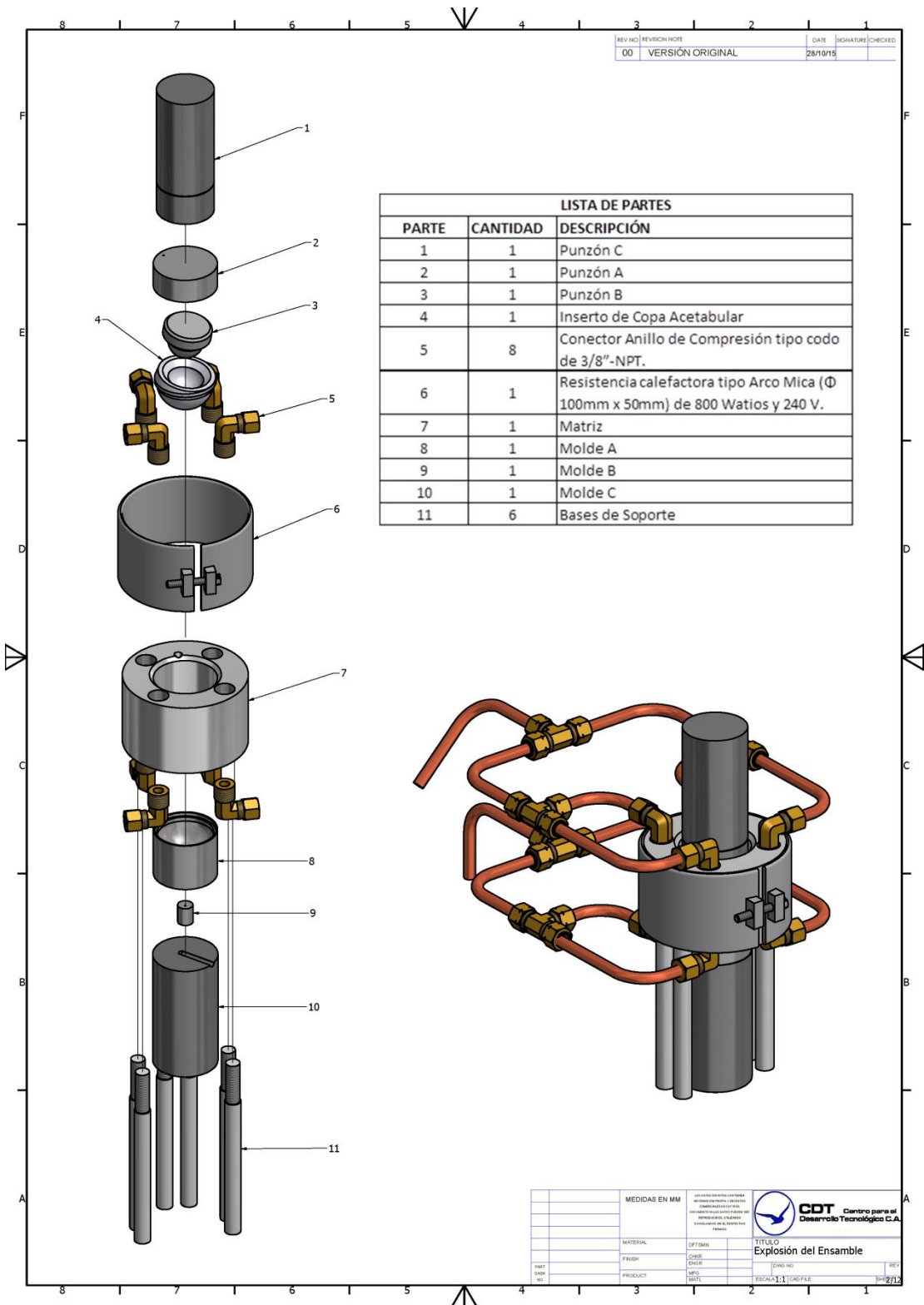
Jiménez, Á. C. (2013, Mayo 15). *Prezi.com*. Retrieved Octubre 12, 2014, from Patología Articular: artrosis coxofemoral. Hospital La Fe de Valencia.:

<https://prezi.com/impzw7uenj5i/patologia-articular-artrosis-coxofemoral-alvaro-campo-jimenez-hospital-la-fe-de-valencia/>

# APÉNDICE



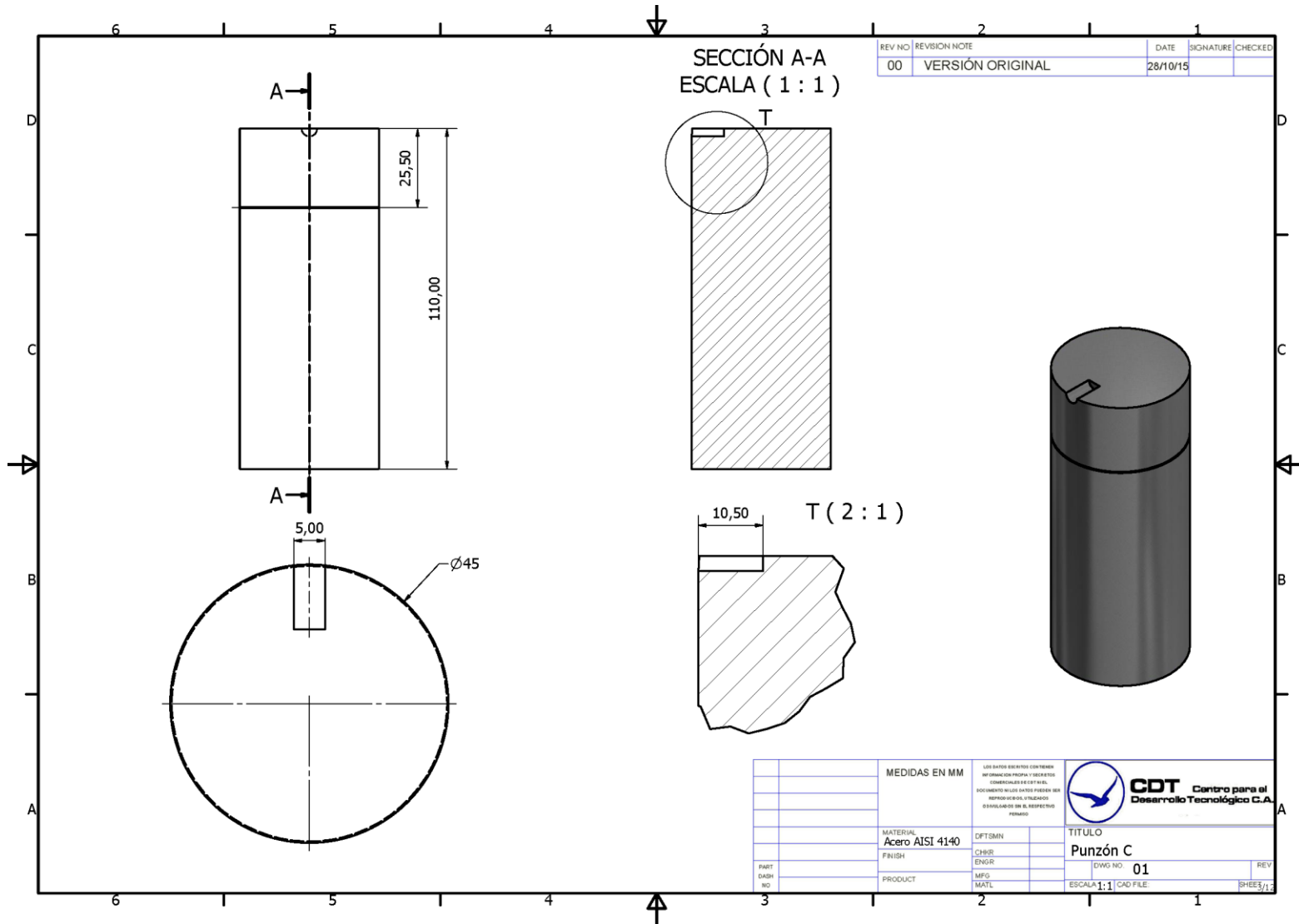
|                    |             |   |          |  |
|--------------------|-------------|---|----------|--|
| MEDIDAS EN MM      |             | <small>LOS DATOS SIGUIENTES CORRESPONDEN<br/>         A LA INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL<br/>         COMERCIALIZADOR DE ESTE TIPO DE VALVULAS<br/>         Y ACCESORIOS, LOS CUALES DEBERÁN SER<br/>         REVISADOS DE ACUERDO A LAS ESPECIFICACIONES<br/>         INDICADAS EN EL MANUAL DE INSTRUCCIONES<br/>         PROPORCIONADO POR EL RESPECTIVO<br/>         FABRICANTE.</small> |          |  <b>CDT</b> Centro para el<br>Desarrollo Tecnológico C.A. |
| MATERIAL           | DPT/SMN     | TÍTULO  |          |  |
| FINISH             | CHOR.       | Conjunto Ensamblado   |          |  |
| PRODUCT            | ENGR.       | DWG NO.   | REV      |  |
| PART<br>DASH<br>NO | MFG<br>MATE | ESCALA 1:1  | CAD FILE | SHEET 1/12   |



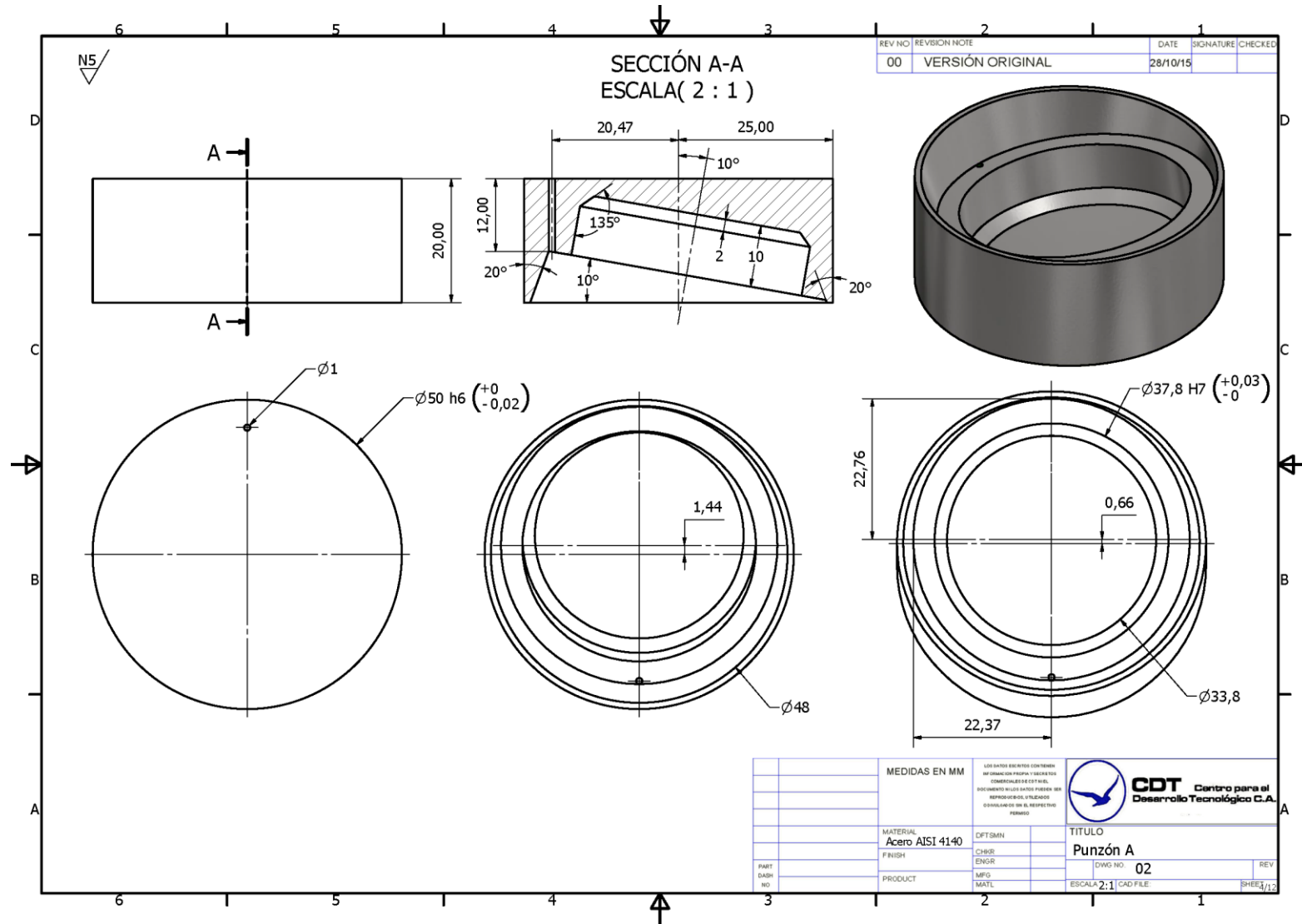
| REV NO | REVISION NOTE    | DATE     | SIGNATURE | CHECKED |
|--------|------------------|----------|-----------|---------|
| 00     | VERSIÓN ORIGINAL | 28/10/15 |           |         |

| LISTA DE PARTES |          |   |
|-----------------|----------|---|
| PARTE           | CANTIDAD | DESCRIPCIÓN   |
| 1               | 1        | Punzón C  |
| 2               | 1        | Punzón A  |
| 3               | 1        | Punzón B  |
| 4               | 1        | Inserto de Copa Acetabular  |
| 5               | 8        | Conector Anillo de Compresión tipo codo de 3/8"-NPT.                          |
| 6               | 1        | Resistencia calefactora tipo Arco Mica (Φ 100mm x 50mm) de 800 Watos y 240 V. |
| 7               | 1        | Matriz  |
| 8               | 1        | Molde A   |
| 9               | 1        | Molde B   |
| 10              | 1        | Molde C   |
| 11              | 6        | Bases de Soporte  |

|               |         |   |      |
|---------------|---------|---|------|
| MEDIDAS EN MM |         |  <b>CDT</b> Centro para el Desarrollo Tecnológico C.A. |      |
| MATERIAL:     | DISEÑO: | TÍTULO  |      |
| FINISH:       | ENGR:   | Exposición del Ensamble   |      |
| PRODUCT:      | REF:    | DWG NO.   | REV  |
|               |         | ESCALA: 1:1   | FILE |

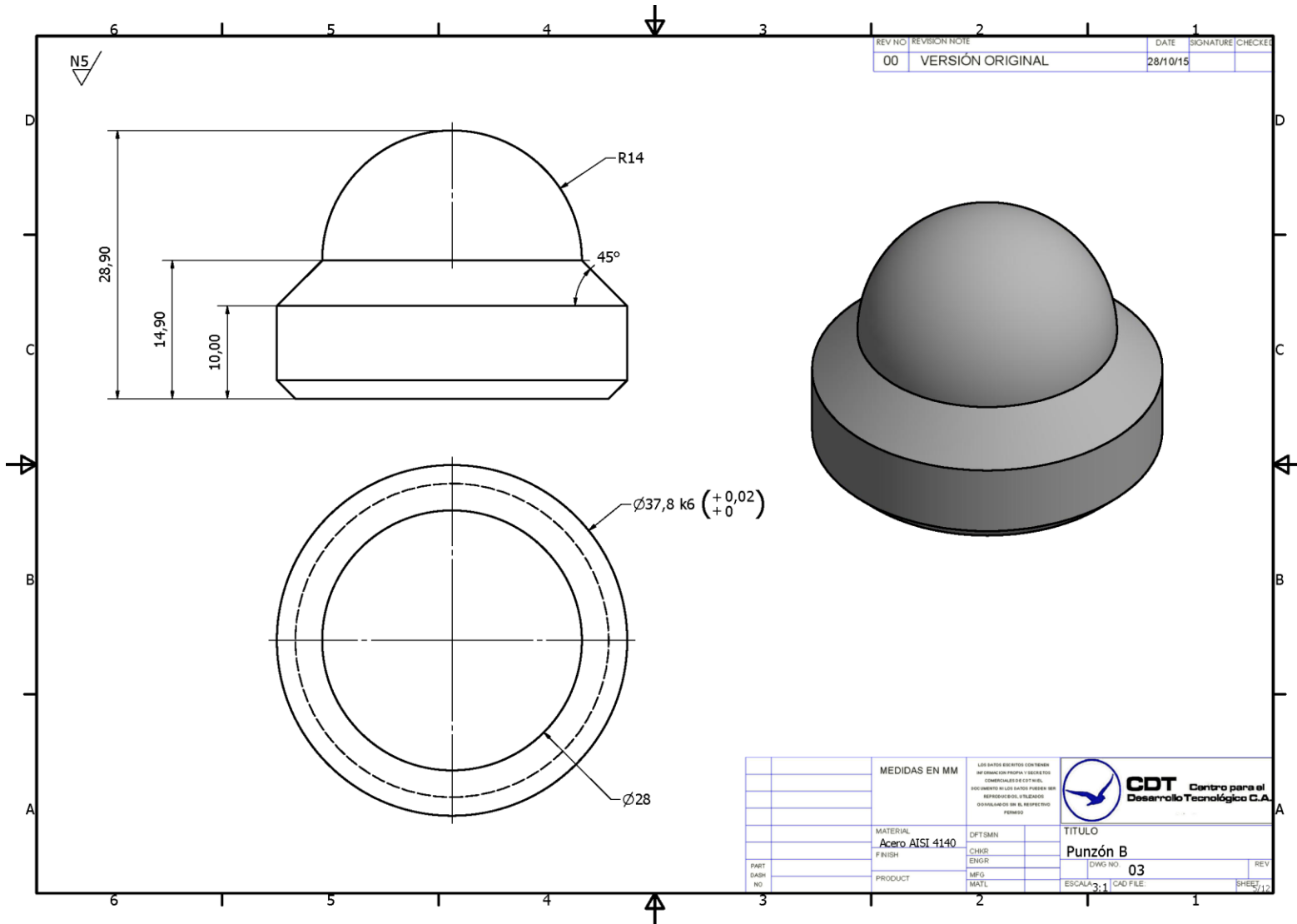


|               |                 |  |  |  |
|---------------|-----------------|--|--|--|
| MEDIDAS EN MM |                 | LOS DATOS ESPECIFICOS CONTIENEN<br>INFORMACION PROPRIETARIA Y CONFIDENTIAL<br>COMERCIAL DE CDT S.A.<br>DOCUMENTO NO DEBE PUBLICARSE NI<br>REPRODUCIRSE, U/TELÉFONOS<br>O REGISTRARSE EN EL RESPECTIVO<br>PUNTO |  |  <b>CDT</b> Centro para el<br>Desarrollo Tecnológico C.A. |
| MATERIAL      | Acero AISI 4140 | DPTSMN   |  |  |
| FINISH        |                 | CHSR   |  |  |
| PRODUCT       |                 | ENGR   |  |  |
|               |                 | MFG  |  |  |
|               |                 | MATL   |  |  |
| TITULO        |                 | Punzón C   |  |  |
| DWS NO        |                 | 01   |  |  |
| ESCALA        |                 | 1:1 CAD FILE   |  |  |
| SHEET         |                 | 3/12   |  |  |



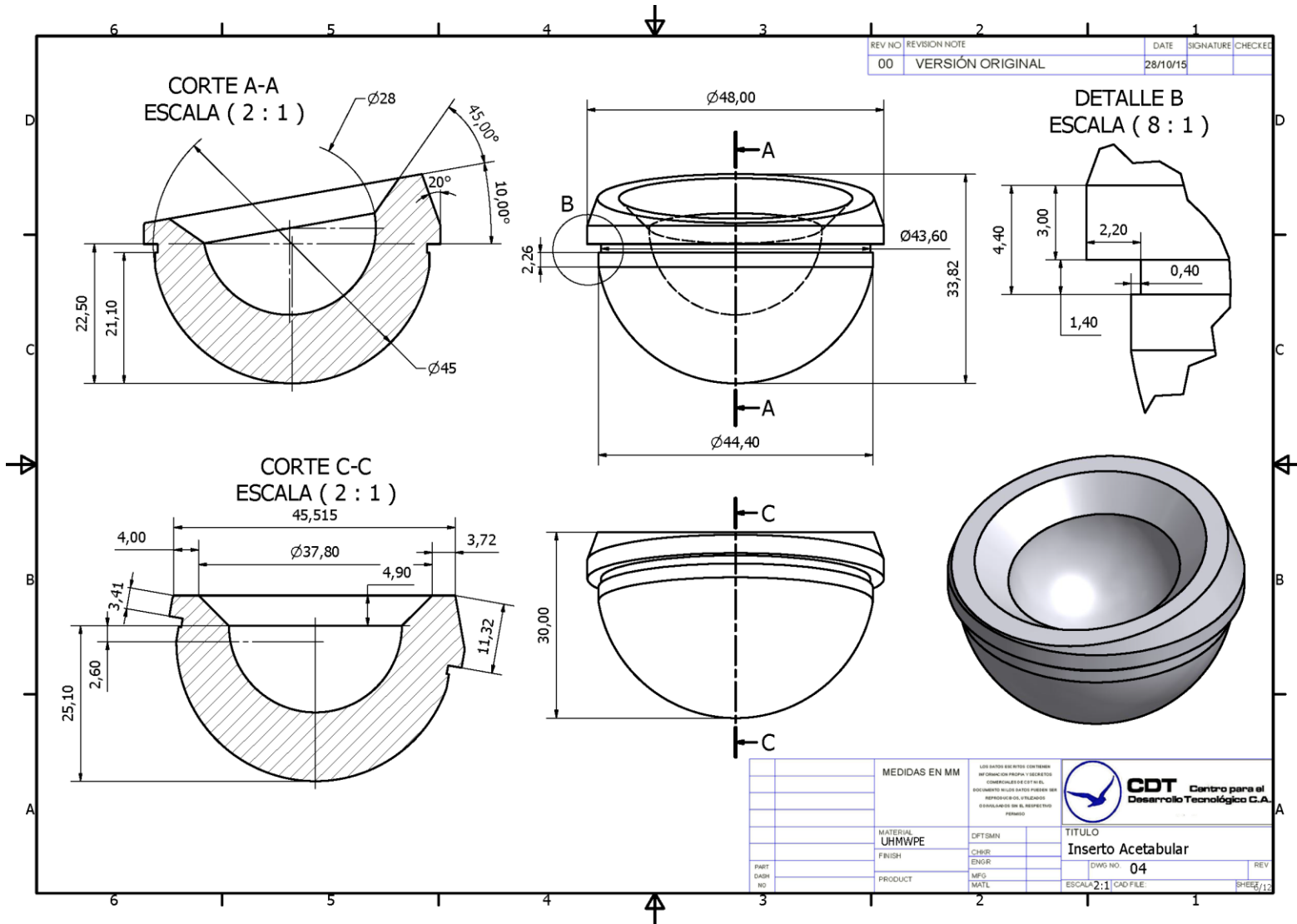
|                              |         |   |  |  |
|------------------------------|---------|---|--|--|
| MEDIDAS EN MM                |         | LOS DATOS ESCRITOS CONTIENEN:<br>1. INFORMACIÓN PARA VERIFICAR<br>2. COMPROBACIONES DE EST. DEL<br>3. EQUIVOCACIONES EN LOS DATOS<br>4. REPRODUCCIONES ÚTILES<br>5. DIMENSIONES EN EL RESPECTIVO<br>PERIODO |  |  <b>CDT</b> Centro para el<br>Desarrollo Tecnológico C.A. |
| MATERIAL:<br>Acero AISI 4140 | DFTSMN: | TÍTULO:<br>Punzón A   |  |  |
| FINISH:                      | CHGR:   | DWG NO: 02  |  |  |
| PRODUCT:                     | ENGR:   | REV:  |  |  |
|                              | MFG:    | ESCALA 2:1 CAD FILE:  |  |  |
|                              | MATL:   | SHEET 1/12  |  |  |

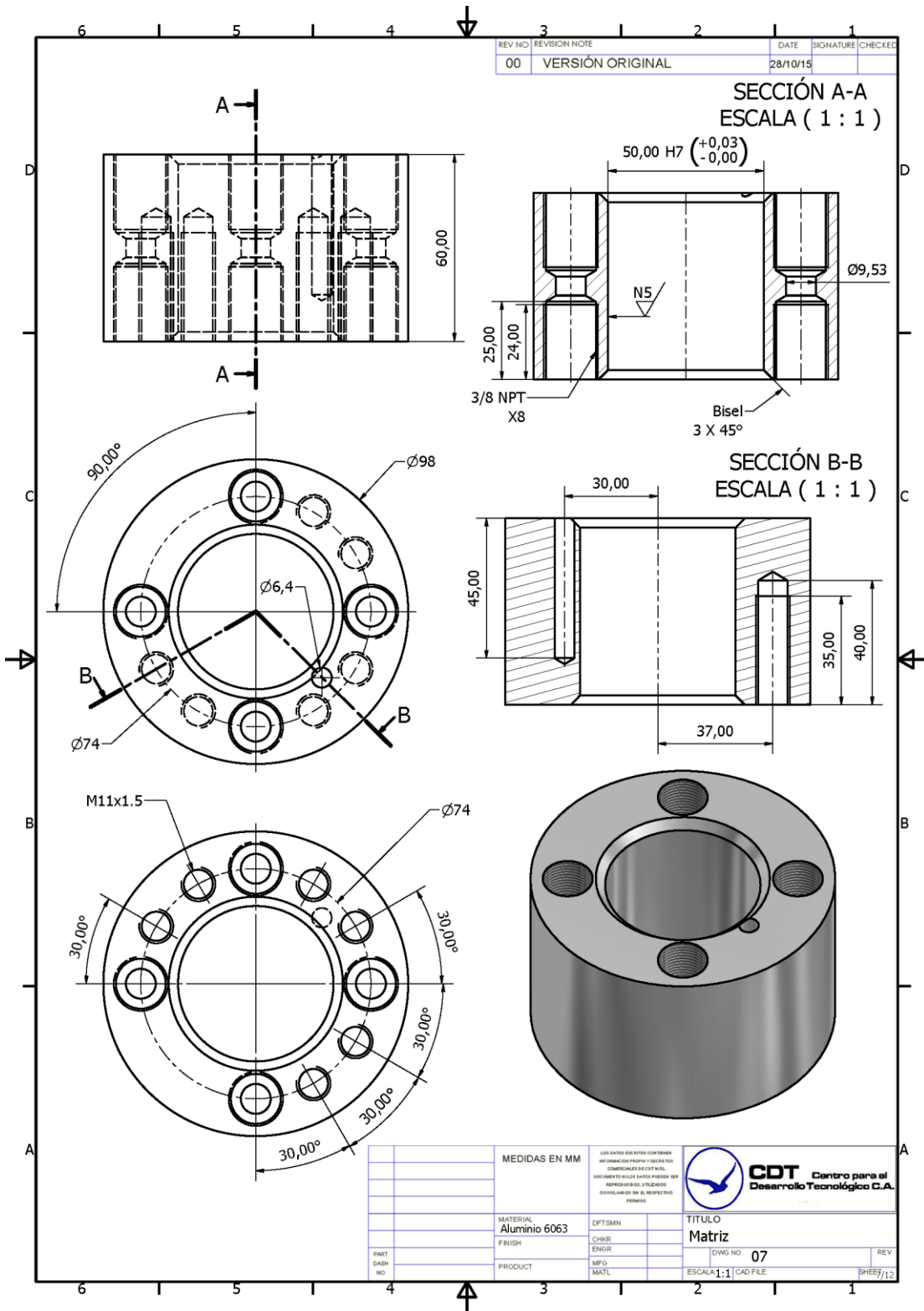


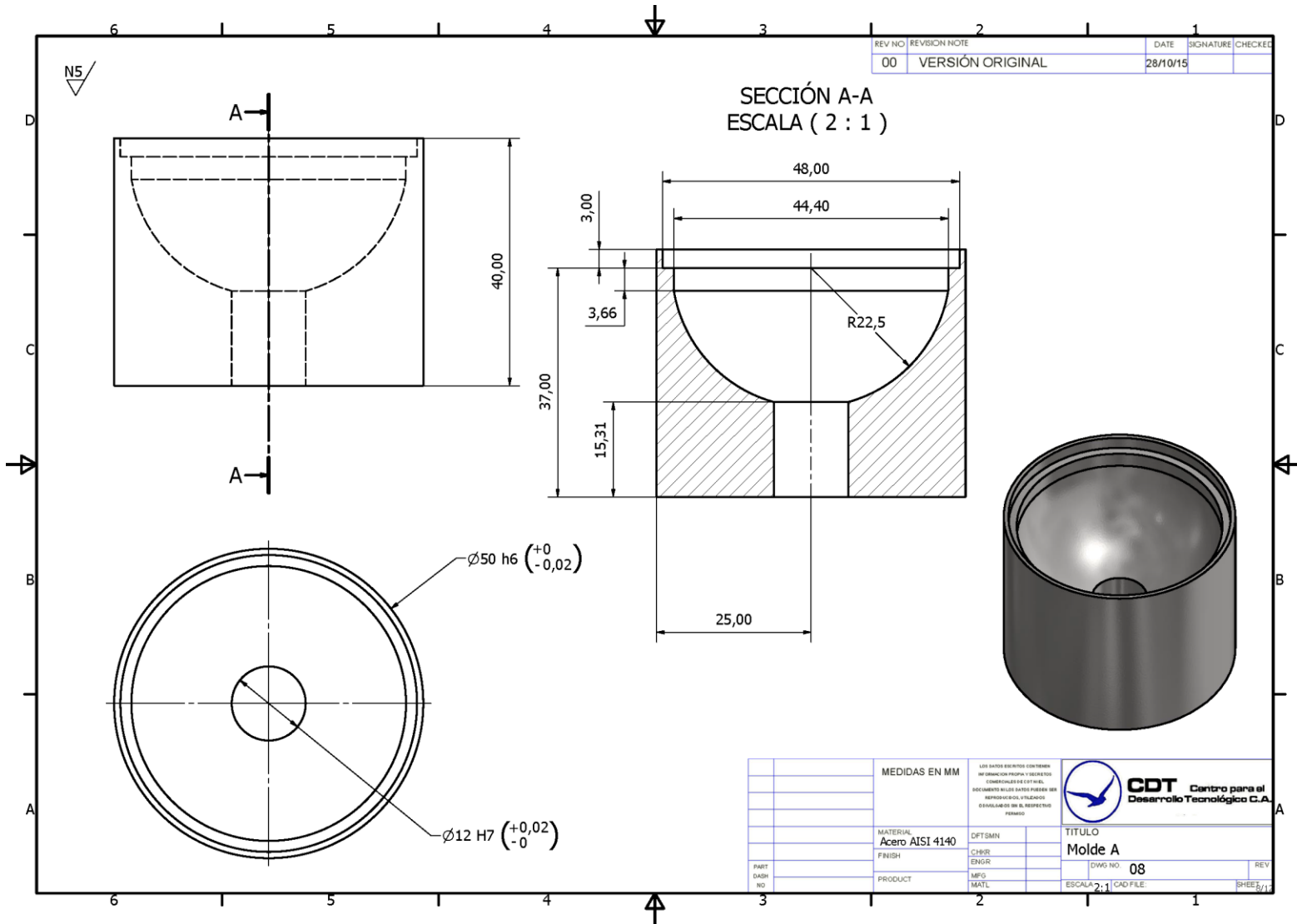


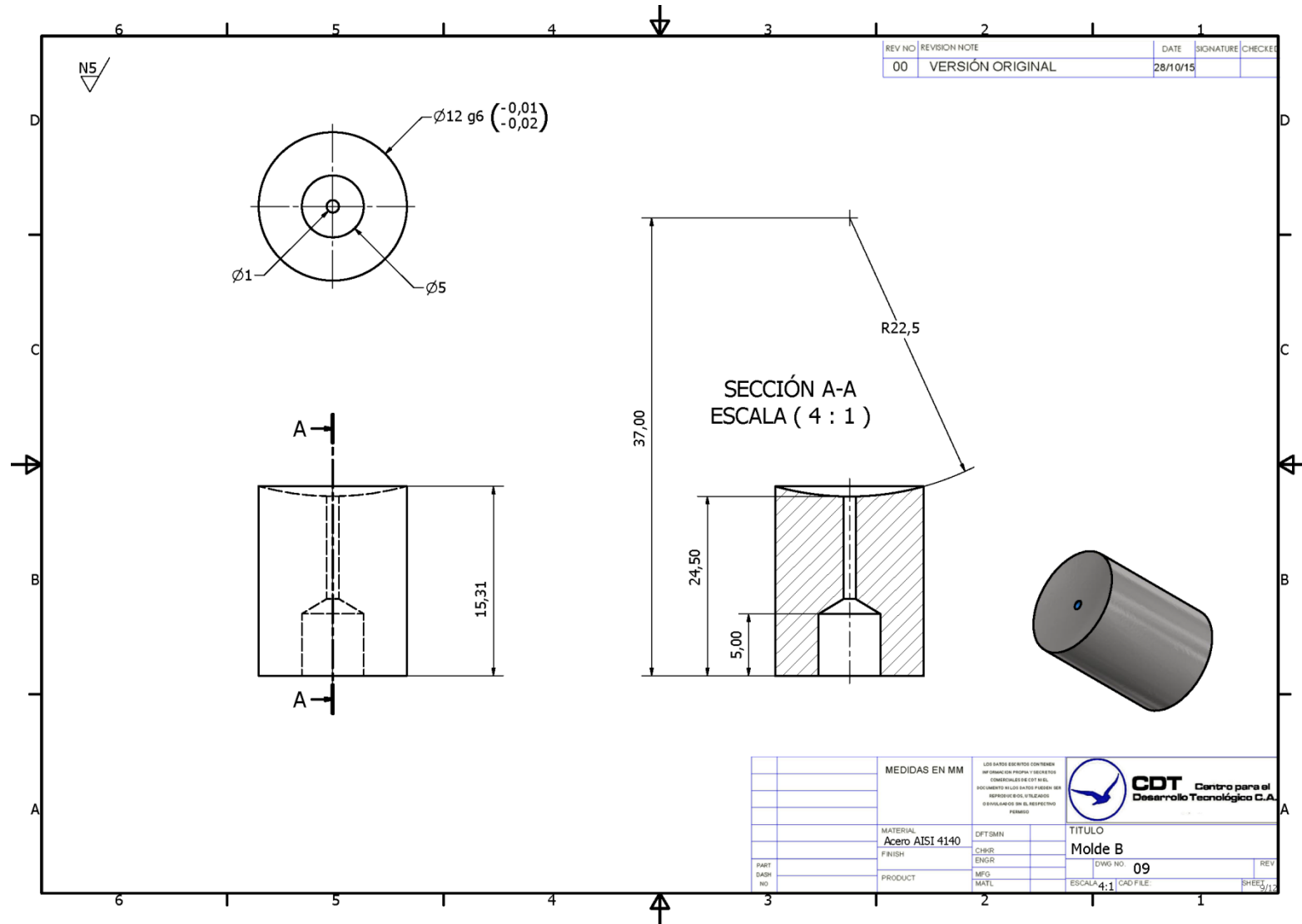
| REV NO | REVISION NOTE    | DATE     | SIGNATURE | CHECKER |
|--------|------------------|----------|-----------|---------|
| 00     | VERSIÓN ORIGINAL | 28/10/15 |           |         |

|                 |         |  |            |  |
|-----------------|---------|--|------------|--|
| MEDIDAS EN MM   |         | <small>LOS DATOS EN ESTOS CAMPOS DEBEN SER LEÍDOS EN SU CONJUNTO. CUALQUIER CAMBIO EN ESTOS DATOS DEBE SER NOTIFICADO AL CLIENTE. EL CLIENTE DEBE VERIFICAR LOS DATOS EN EL DISEÑO ORIGINAL Y EN EL DISEÑO DE FABRICACIÓN.</small> |            |  |
| MATERIAL        | DFT SMN | TÍTULO   |            |  |
| Acero AISI 4140 |         | Punzón B   |            |  |
| FINISH          | CHGR    | DWG NO.  | REV        |  |
|                 | ENGR    | 03   |            |  |
| PRODUCT         | MFG     | ESCALA: 3:1  | CAD FILE   |  |
|                 | MATL    |  | SHEET 1/12 |  |



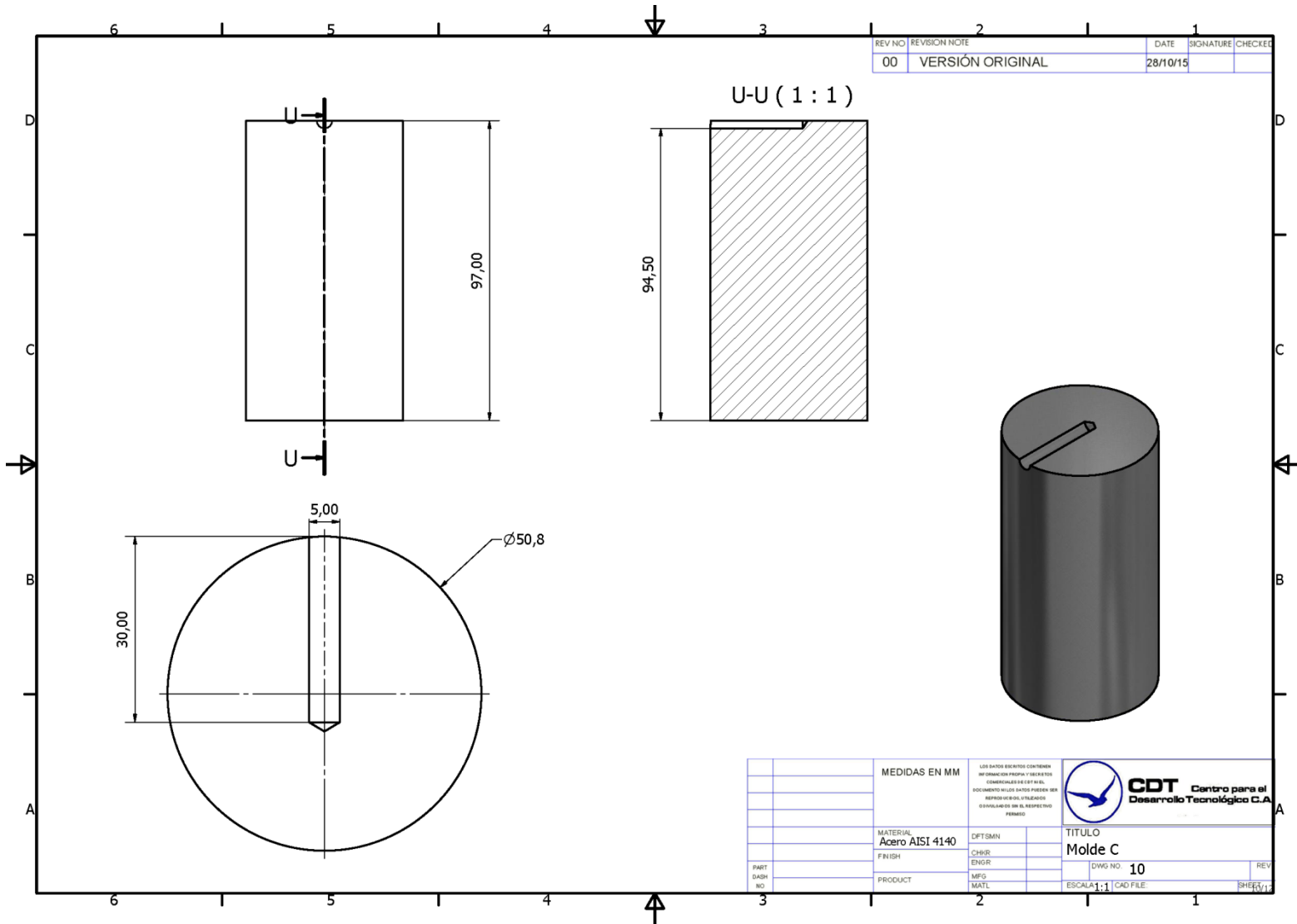


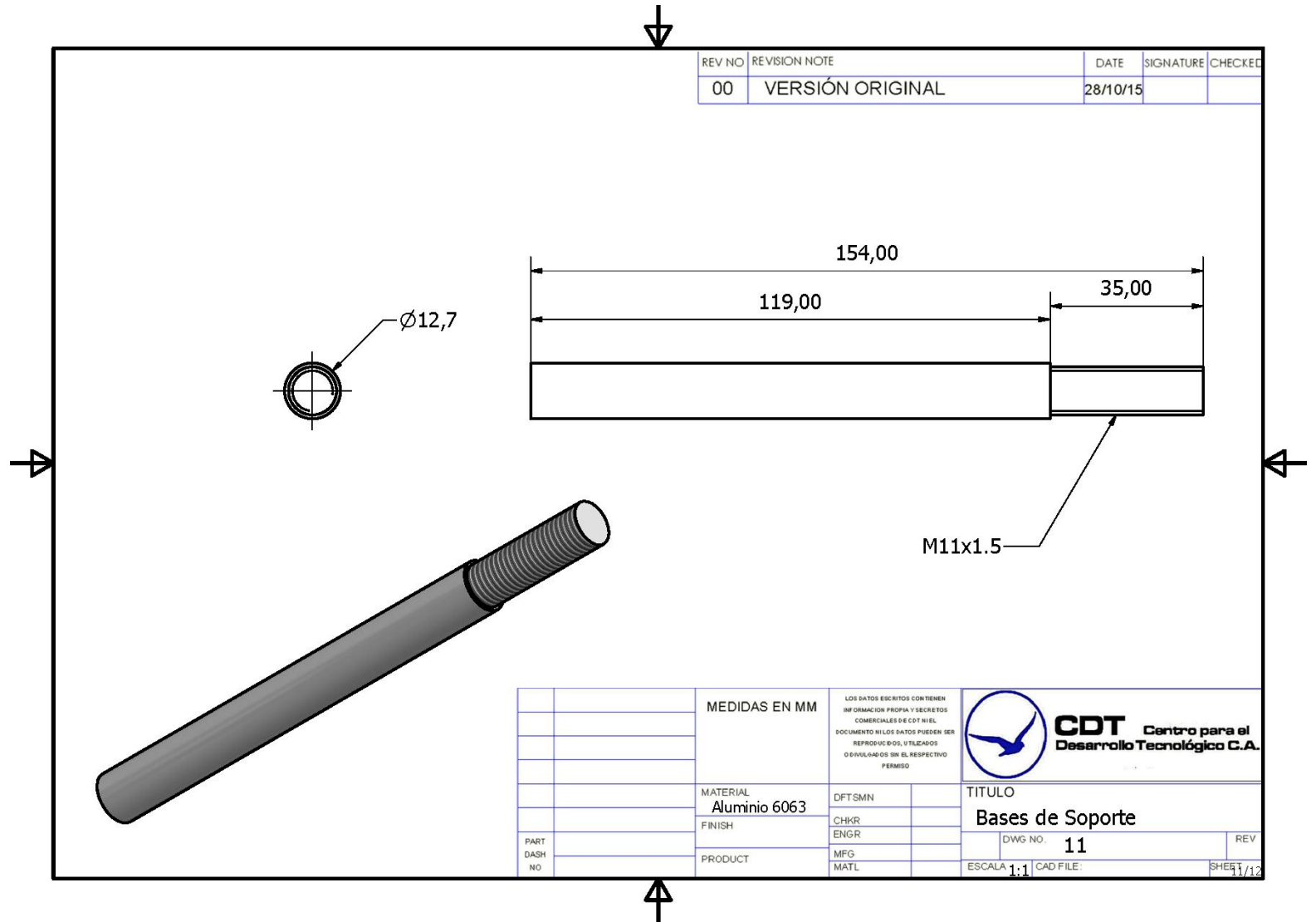




| REV NO | REVISION NOTE    | DATE     | SIGNATURE | CHECKED |
|--------|------------------|----------|-----------|---------|
| 00     | VERSIÓN ORIGINAL | 28/10/15 |           |         |

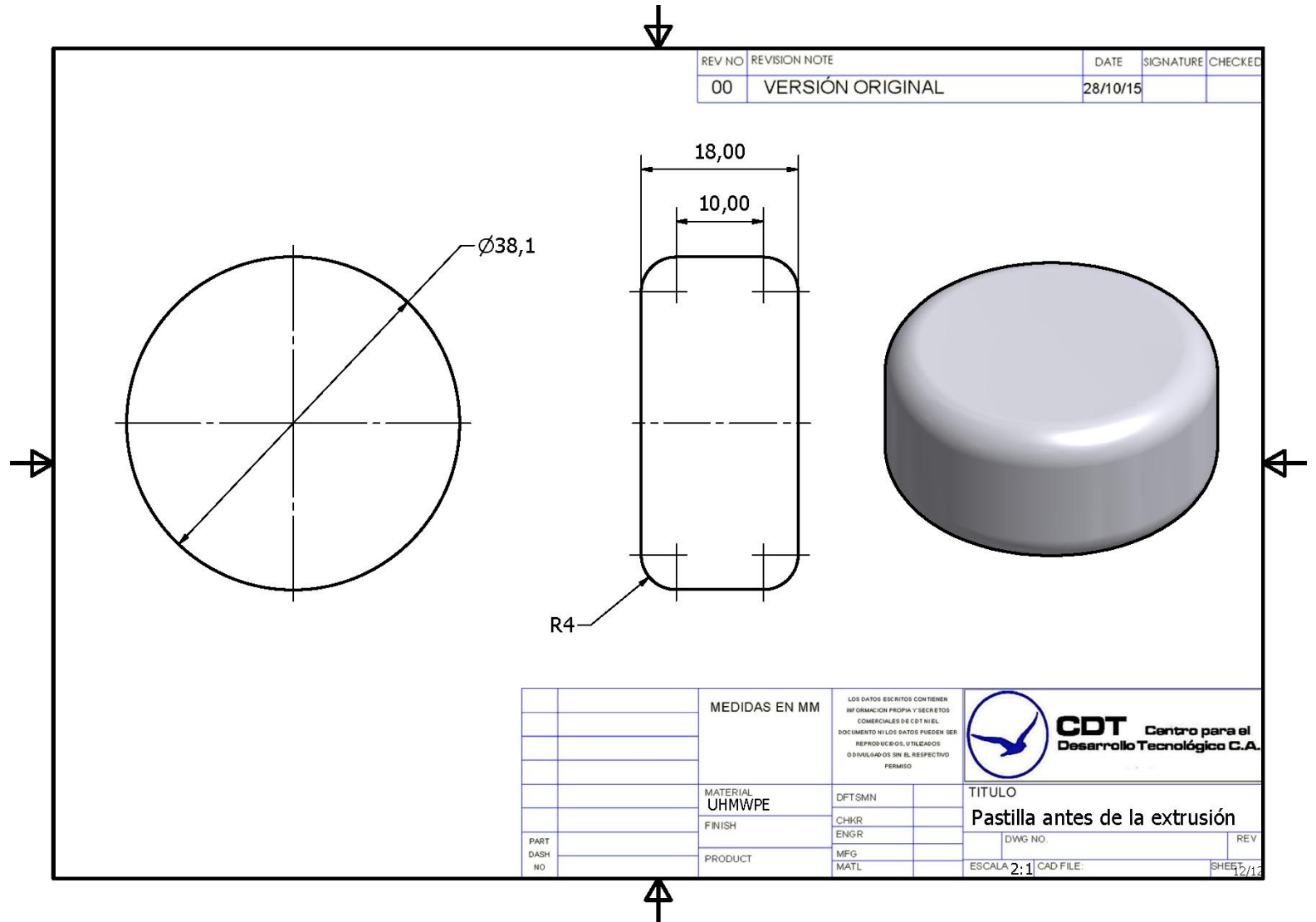
|               |                 |   |             |  |
|---------------|-----------------|---|-------------|--|
| MEDIDAS EN MM |                 | LOS DATOS DE ESTOS CONTORNOS<br>INFORMACION PROPIA Y SECRETA<br>COMERCIAL DE ESTE<br>DOCUMENTO NO DEBE SER REPRODUCIDA<br>NI REPLICADA EN SU RESPECTIVO<br>FINES. |             |  <b>CDT</b> Centro para el<br>Desarrollo Tecnológico C.A. |
| MATERIAL      | Acero AISI 4140 | DFTSMN  | TITULO      |  |
| FINISH        |                 | CHGR  | Molde B     |  |
| PART          |                 | ENGR  | DWG NO. 09  |  |
| DASH          |                 | MFG   | REV         |  |
| NO            |                 | MATL  | ESCALA: 4:1 |  |
|               |                 |   | CAD FILE    |  |
|               |                 |   | SHEETS 9/13 |  |



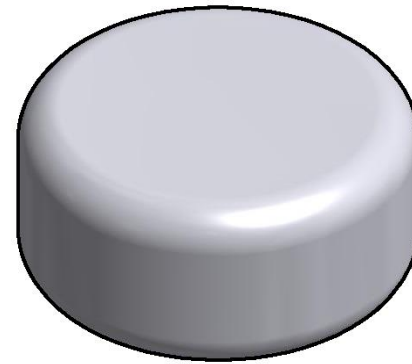
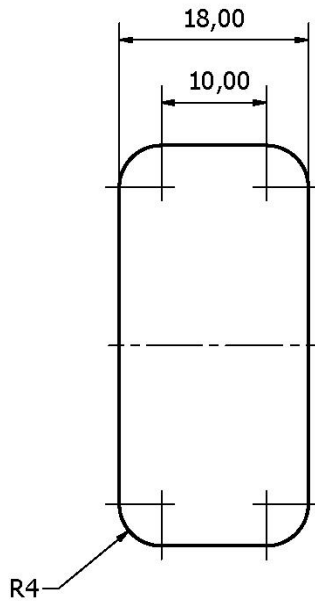
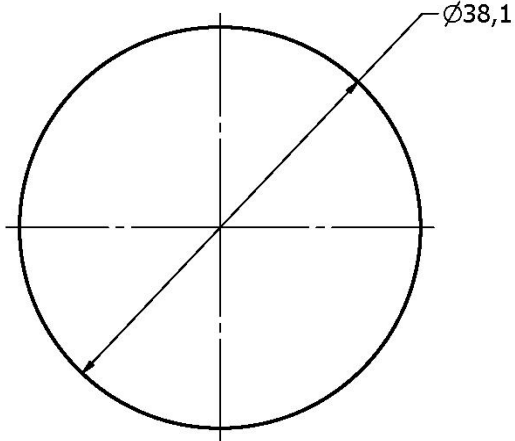


| REV NO | REVISION NOTE    | DATE     | SIGNATURE | CHECKED |
|--------|------------------|----------|-----------|---------|
| 00     | VERSIÓN ORIGINAL | 28/10/15 |           |         |

|      |  |               |  |     |  |
|------|--|---------------|--|-----|--|
|      |  | MEDIDAS EN MM | LOS DATOS ESCRITOS CONTIENEN<br>INFORMACION PROPIA Y SECRETA<br>COMERCIALES DE CDT Y DEL<br>DOCUMENTO NI LOS DATOS PUEDEN SER<br>REPRODUCIDOS, UTILIZADOS<br>O DIVULGADOS SIN EL RESPECTIVO<br>PERMISO |     |  <b>CDT</b> Centro para el<br>Desarrollo Tecnológico C.A. |
|      |  |               |  |     |  |
|      |  | MATERIAL      | DFT  | SMN | TITULO   |
|      |  | Aluminio 6063 |  |     | Bases de Soporte   |
|      |  | FINISH        | CHKR   |     | DWG NO. 11   |
|      |  |               | ENGR   |     | REV  |
| PART |  | PRODUCT       | MFG  |     | ESCALA 1:1   |
| DASH |  |               | MATL   |     | CAD FILE: SHEET 1/12   |
| NO   |  |               |  |     |  |



| REV NO | REVISION NOTE    | DATE     | SIGNATURE | CHECKED |
|--------|------------------|----------|-----------|---------|
| 00     | VERSIÓN ORIGINAL | 28/10/15 |           |         |



|              |  |                    |   |  |   |
|--------------|--|--------------------|---|--|---|
|              |  | MEDIDAS EN MM      | LOS DATOS ESCRITOS CON TIENEN INFORMACION PROPIA Y SECRETOS COMERCIALES DE CDTWEL. DOCUMENTO NI LOS DATOS PUEDEN SER REPRODUCIDOS, UTILIZADOS O DIVULGADOS SIN EL RESPECTIVO PERMISO. |  |  <b>CDT</b> Centro para el Desarrollo Tecnológico C.A. |
|              |  | MATERIAL<br>UHMWPE | DFTSMN  |  |   |
|              |  | FINISH             | CHKR  |  | DWG NO.   |
| PART DASH NO |  | PRODUCT            | ENGR  |  | REV   |
|              |  |                    | MFG   |  | ESCALA 2:1 CAD FILE   |
|              |  |                    | MATL  |  | SHEET 12/13   |



## ACERO AISI-SAE 4140 (UNS G41400)

**1. Descripción:** es un acero medio carbono aleado con cromo y molibdeno de alta templabilidad y buena resistencia a la fatiga, abrasión e impacto. Este acero puede ser nitrurado para darle mayor resistencia a la abrasión. Es susceptible al endurecimiento por tratamiento térmico

**2. Normas involucradas:** ASTM 322

**3. Propiedades mecánicas:** Dureza 275 - 320 HB (29 - 34 HRC)  
Esfuerzo a la fluencia: 690 MPa (100 KSI)  
Esfuerzo máximo: 900 - 1050 MPa (130 - 152 KSI)  
Elongación mínima 12%  
Reducción de área mínima 50%

**4. Propiedades físicas:** Densidad 7.85 g/cm<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)

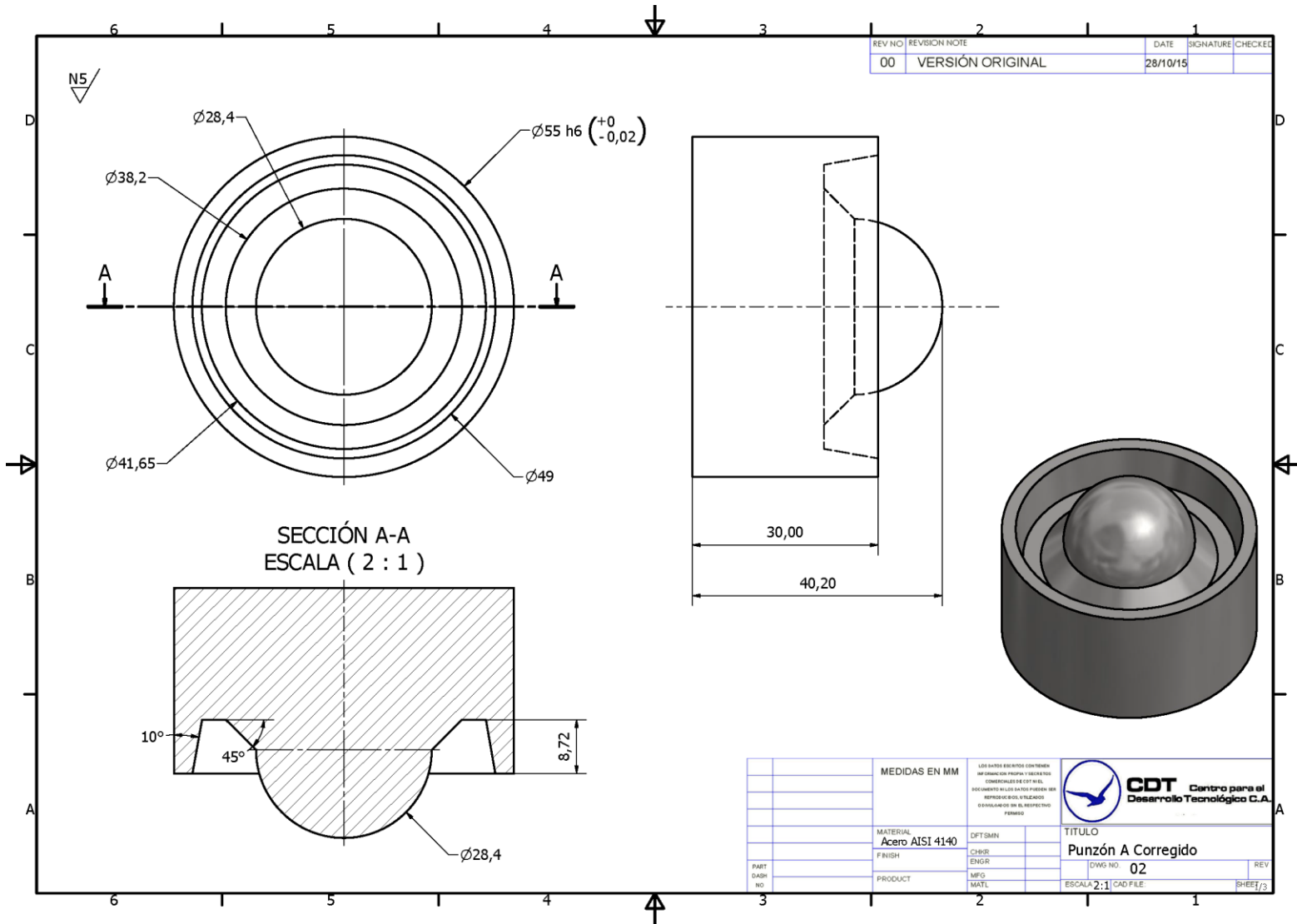
**5. Propiedades químicas:** 0.38 - 0.43% C  
0.75 - 1.00% Mn  
0.80 - 1.10% Cr  
0.15 - 0.25% Mo  
0.15 - 0.35% Si  
0.04% P máx  
0.05% S máx

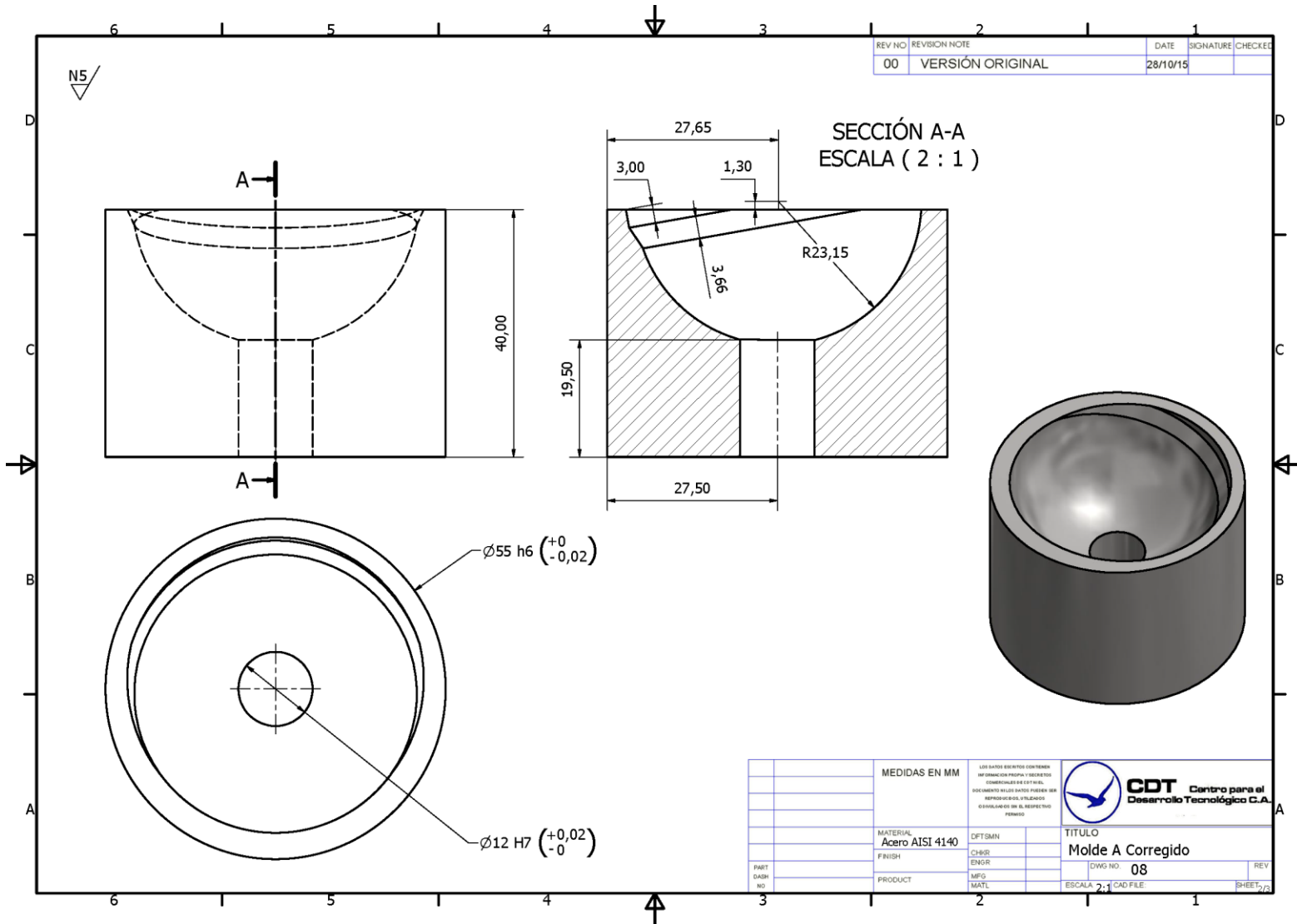
**6. Usos:** se usa para piñones pequeños, tijeras, tornillo de alta resistencia, espárragos, guías, seguidores de leva, ejes reductores, cinceles.

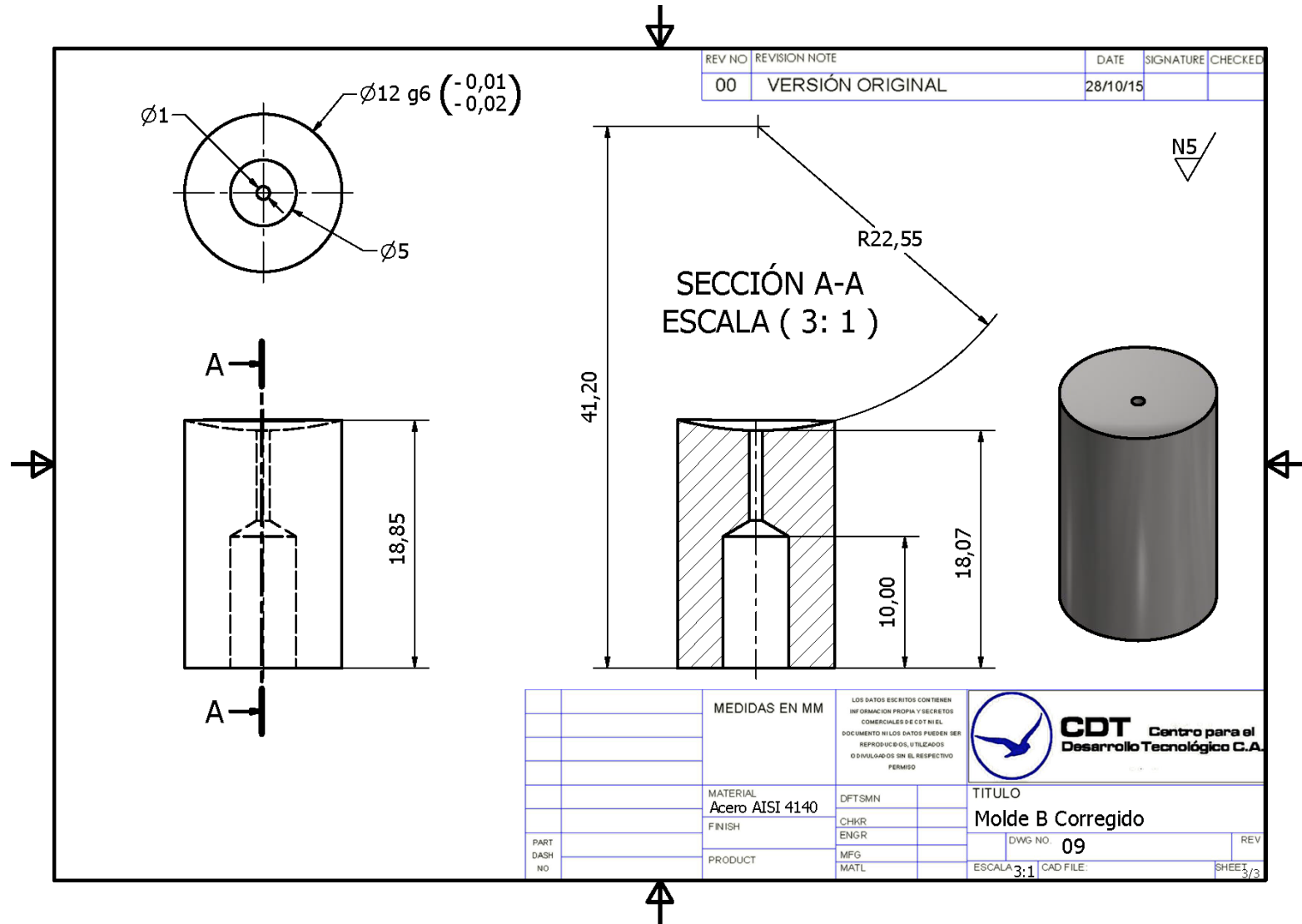
**7. Tratamientos térmicos:** se austeniza a temperatura entre 830 - 850 °C y se da temple en aceite. El revenido se da por dos horas a 200°C para obtener dureza de 57 HRC y si se da a 315°C la dureza será de 50 HRC. Para recocido se calienta entre 680 - 720°C con dos horas de mantenimiento, luego se enfría a 15°C por hora hasta 600°C y se termina enfriando al aire tranquilo. Para el alivio de tensiones se calienta entre 450 - 650°C y se mantiene entre ½ y 2 horas. Se enfría en el horno hasta 450°C y luego se deja enfriar al aire tranquilo.

**NOTA:**

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.







| REV NO | REVISION NOTE    | DATE     | SIGNATURE | CHECKED |
|--------|------------------|----------|-----------|---------|
| 00     | VERSIÓN ORIGINAL | 28/10/15 |           |         |

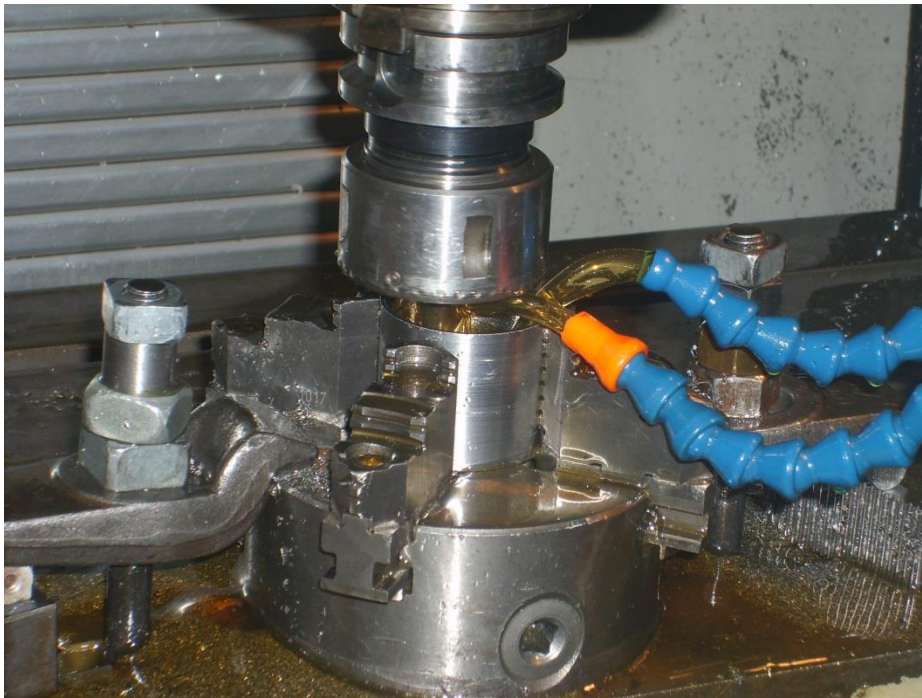
SECCIÓN A-A  
ESCALA ( 3: 1 )

|              |  |                             |   |   |                             |
|--------------|--|-----------------------------|---|---|-----------------------------|
|              |  | MEDIDAS EN MM               | LOS DATOS ESCRITOS CONTIENEN INFORMACION PROPIA Y SECRETOS COMERCIALES DE CDT IN EL DOCUMENTO NI LOS DATOS PUEDEN SER REPRODUCIDOS, UTILIZADOS O DIVULGADOS SIN EL RESPECTIVO PERMISO |  <b>CDT</b> Centro para el Desarrollo Tecnológico C.A. |                             |
|              |  | MATERIAL<br>Acero AISI 4140 | DFTSMN  |   | TITULO<br>Molde B Corregido |
|              |  | FINISH                      | CHKR<br>ENGR  | DWG NO. 09  | REV                         |
| PART DASH NO |  | PRODUCT                     | MFG<br>MATL   | ESCALA 3:1 CAD FILE:  | SHEET 3/3                   |

## ANEXOS

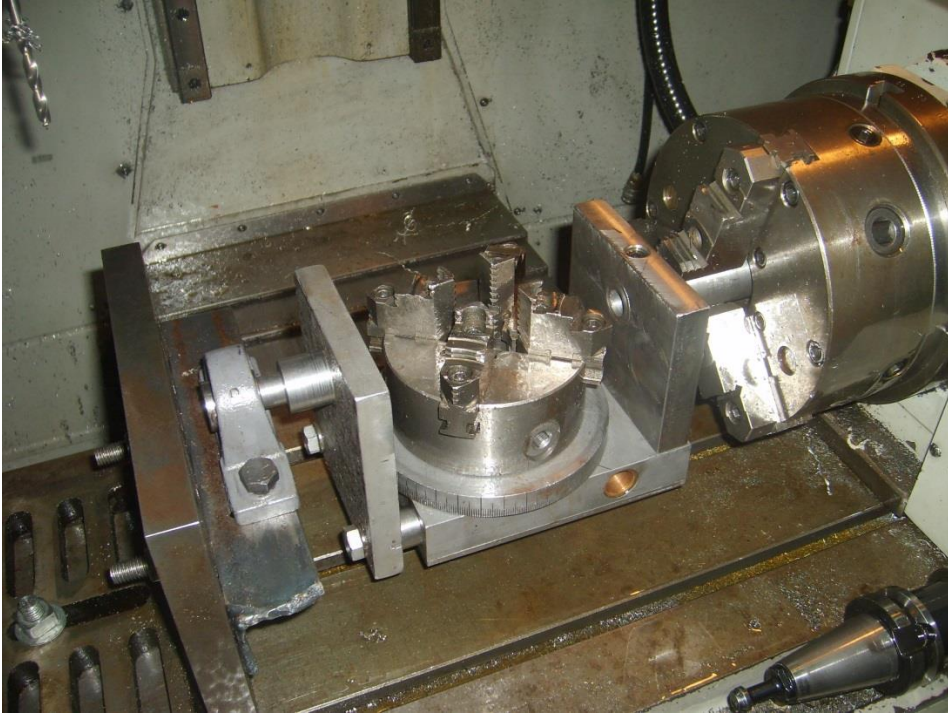


**Figura A. 1 Fresa de Control Numérico Computarizado Bridgesport TORQ-CUT22 del IMME**

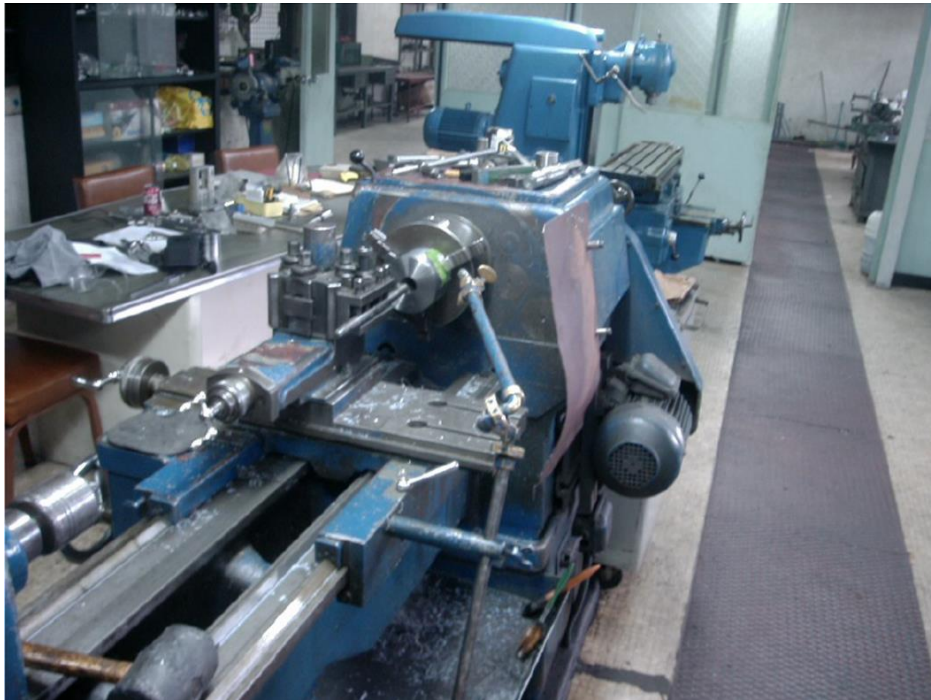


**Figura A. 2 Mecanizado Superficie Esférica del Molde A**

[ANEXOS]



**Figura A. 3 5to Eje Construido para el Maquinado del Punzón A en la Fresa CNC**

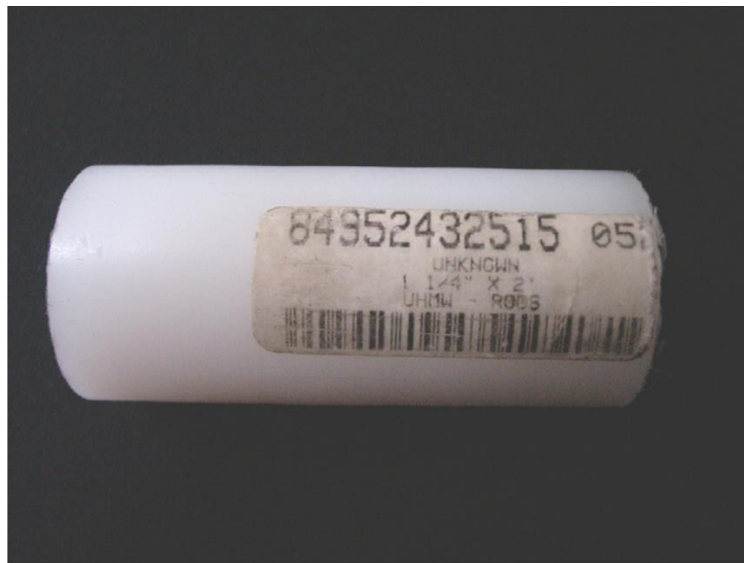


**Figura A. 4 Torno Manual Empleado para el Tronzado, Refrentado y Pulido.**

[ANEXOS]

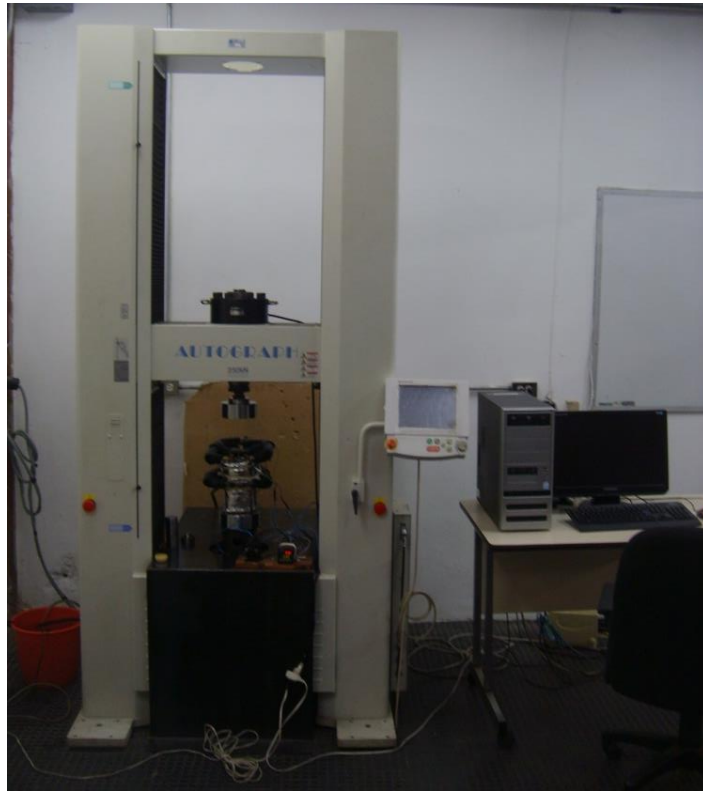


**Figura A. 5 Pulido del Punzón B en el Torno**



**Figura A. 6 Barra de UHMWPE de la Cual se Extrajeron las Pastillas**

[ANEXOS]



**Figura A. 7 Máquina de Tracción Universal SHIMADZU AUTOGRAPH AG-I 250 KN FII**



**Figura A. 8 Montaje en la Prensa de la Fundación Instituto de Ingeniería**



[ANEXOS]



Figura A. 9 Pruebas Preliminares



Figura A. 10 Medidor de Altura Con Vernier Empleado para Determinar la Variable "h"

[ANEXOS]



**Figura A. 11 Perfilómetro CONTRACER CA-102 MITUTOYO Empleado en los Análisis de Resultados**



**Figura A. 12 Copiador de Perfiles Escala 5:1 Velocidad del Papel 5**