



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO TÉCNICO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLDE PARA COMPACTACIÓN DE PULVIMETALURGIA PARA ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.”

AUTOR:

Henry Mauricio Castro Rumipamba

TUTOR:

Ing. Mg. Henry Vaca

AMBATO – ECUADOR

2017

I

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de tutor del trabajo de graduación, certifico que el presente Proyecto Técnico realizado por el Sr. Henry Mauricio Castro Rumipamba, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato, previo a la obtención del Título de Ingeniería Mecánica, se desarrolló bajo mi tutoría, es un trabajo personal e inédito, bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLDE PARA COMPACTACIÓN DE PULVIMETALURGIA PARA ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.”**

En el presente trabajo de graduación bajo mi tutoría fueron concluidos de manera correcta los 4 capítulos que conforman el proyecto técnico dentro del tiempo establecido según la normativa que rige en la Universidad Técnica de Ambato.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y puede continuar con el trámite pertinente.

En la ciudad de Ambato, a los 22 días del mes de diciembre de 2016.

.....
Ing. Mg. Henry Vaca

Tutor

AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO

Yo, Henry Mauricio Castro Rumipamba, declaro que los contenidos y los resultados en el presente proyecto experimental, como requerimiento previo para la obtención del título de Ingeniero Mecánico, son absolutamente originales, auténticos y personales a excepción de las citas, tablas y gráficos de origen bibliográfico.

.....

Egdo. Henry Mauricio Castro Rumipamba

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este proyecto técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi proyecto técnico con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, febrero del 2017

Autor

Henry Mauricio Castro Rumipamba

CI: 180447316-1

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

La Comisión de Estudio y Calificación del Informe del Trabajo de Graduación o Titulación modalidad Proyecto Técnico, bajo el tema: “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLDE PARA COMPACTACIÓN DE PULVIMETALURGIA PARA ELABORACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS.**”, presentada por el Sr. Castro Rumipamba Henry Mauricio, egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica, una vez revisada y calificado el proyecto técnico, se APRUEBA en razón de que cumple con los principios básicos técnicos y científicos de investigación reglamentaria.

Por lo tanto, se autoriza la presentación ante los organismos pertinentes

Para constancia firman,

.....

Ing. Mg. Segundo Espín

.....

Ing. Mg. Gonzalo López

DEDICATORIA

*El presente proyecto de graduación se lo dedicó de la manera más especial a mí querida madre **Mónica**, por su lucha incansable del día a día apoyándome hasta llegar a cumplir mis metas, por lo cual me siento muy orgulloso de ella y jamás podré devolverle todo lo que me ha dado en mi vida.*

*A mis amados papitos **Vicente y Julia** que siempre estuvieron siempre dándome palabras de aliento para seguir mi camino hacia la meta de ser un profesional, su apoyo jamás lo olvidaré y aunque no estén conmigo siempre estarán en mi corazón presente.*

*A mi querida hermana **Carolay**, que siempre ha estado a mi lado en todo momento y ha sido participe de este sueño.*

*A mi hijo **Isaí**, que es lo mejor que me ha pasado en la vida y que con el simple hecho de regalarme una sonrisa me alienta a seguir adelante.*

*A mi esposa **Jessica**, que amo mucho y siempre ha estado para apoyarme y brindarme palabras de aliento para no dejar mi sueño de ser un profesional a un lado.*

A toda mi familia que jamás me abandonado y que confían en mí, me han brindado su apoyo incondicional para cumplir mi sueño.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por jamás soltarme de la mano en todo este largo camino, por guiarme por el camino del bien y por darme la fuerza necesaria para salir adelante en cualquier circunstancia difícil.

*A mi madre **Mónica**, que es la motivación y el pilar más importante de toda mi vida, mil gracias mami por confiar en mí y darme lo mejor siempre.*

*A mis abuelitos **Vicente y Julia**, que siempre mis padres amados, les doy gracias por hacerme un hombre de bien y guiarme hasta el final en mi sueño.*

*A mi hermana **Caro**, por estar siempre ahí siendo un apoyo incondicional en mi vida.*

*A mi esposa **Jessica** e hijo **Isaí**, les doy gracias por darme fuerzas de aliento en este camino y por ser mi inspiración para no abandonar mi sueño hasta cumplirlo.*

A mis tíos, tías y primos que siempre han estado cuando más lo he necesitado y me han alentado a seguir adelante.

*A mi tutor **Ing. Mg. Henry Vaca**, por los conocimientos compartidos durante todo este proyecto.*

ÍNDICE

A.- PÁGINAS PRELIMINARES

PORTADA.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AUTORÍA DEL PROYECTO EXPERIMENTAL.....	III
DERECHOS DE AUTOR.....	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
ÍNDICE.....	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN EJECUTIVO.....	XVI

ÍNDICE GENERAL

B.- TEXTO:

CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES.....	1
1.1. Tema.....	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General:	4
1.4.2 Objetivos Específicos:	4
CAPÍTULO II	5
FUNDAMENTACIÓN.....	5
2.1. Investigaciones previas	5
2.2. Fundamentación teórica	6
2.2.1. Definición de pulvimetalurgia.....	6
2.2.2. Etapas del proceso de pulvimetalurgia	6
2.2.2.1. Obtención del polvo metálico.....	7
2.2.2.3. Compactación	9
2.2.2.4. Sinterización	12
2.2.2.5. Mecanizado final	13
2.3. Moldeo de polvos.....	13
2.3.1. Tipos de moldeo	13
2.3.2. Consideraciones para el diseño	14

2.3.3. Materiales para punzones y matrices.....	14
2.4 Presiones de compactado	14
2.4.1. Fundamentos teóricos de cálculo.....	15
2.4.2. Tolerancias	16
CAPÍTULO III.....	20
DISEÑO DEL PROYECTO	20
3.1 Selección de alternativas.....	20
3.2 Cálculos y selección de materiales.....	21
3.2.1. Cálculo del molde.....	21
3.2.2. Selección del material.....	29
3.2.2.1. Análisis de resistencia del molde y componentes.....	29
3.2.2.2. Análisis del molde rectangular	43
3.2.3. Construcción del molde.....	52
3.2.3.1 Cálculo de velocidades de maquinado.....	52
3.2.3.2. Cálculo de tolerancias.....	53
3.2.3.3. Selección del perno.....	55
3.2.5. Cálculo de la cantidad de polvo para obtención de las probetas	56
3.2.6. Obtención de los polvos metálicos	60
3.3. Ensayos para obtención de las probetas.....	61
3.4. Presupuesto	63
3.5 Especificaciones técnicas.....	64
3.5.1. Dimensiones y material del molde.....	64
3.5.2. Presiones aplicadas en la compactación.....	65
3.5.3. Cantidad de polvo para compactar en el molde	65

3.5.4. Procedimiento	66
3.5.5. Dimensiones de la probeta obtenida y modo de extracción.....	71
CAPÍTULO IV.....	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
4.1 Conclusiones	72
4.2 Recomendaciones.....	73
1. Bibliografía	75
2. Anexos	77
Anexo A. Propiedades físicas del acero AISI H13 (DIN X40CrMoV5-1).....	77
Anexo B. Propiedades mecánicas del acero AISI H13	77
Anexo C. Dimensiones de roscas unificadas	78
Anexo D. Especificaciones SAE para pernos de acero.....	79
Anexo E. Torques de ajuste para tornillos de fijación de cabeza hexagonal hueca.....	79
Anexo F. Tabla de velocidades de corte de acuerdo al material para fresado.	80
Anexo H. Elaboración de los moldes.....	81
Anexo I. Elementos del molde circular.....	82
Anexo J. Elementos del molde rectangular.....	83
Anexo K. Obtención de polvos metálicos.....	84
Anexo L. Obtención de las probetas.	85
Anexo M. Proceso de compactación.....	86
Anexo N. Medición de las probetas finales	87
3. Planos.....	87

Índice de tablas

Tabla 1. Temperaturas típicas de sinterización y tiempo	12
Tabla 2. Prensado isostático en frío	15
Tabla 3. Presiones típicas de compactación y relaciones de compresión de tipos de cobre	15
Tabla 4. Compactación uniaxial.....	16
Tabla 5. Constantes de condiciones finales de las columnas de Euler.....	18
Tabla 6. Análisis de molde circular y sus componentes	42
Tabla 7. Análisis de molde rectangular.....	51
Tabla 8. Calidades de tolerancias.....	54
Tabla 9. Calidad de tolerancias para mecanizado	54
Tabla 10. Resultados de obtención de las probetas.....	62
Tabla 11. Presupuesto	63
Tabla 12. Presupuesto molde 2	63
Tabla 13. Costos de polvos metálicos	63
Tabla 14. Masa en polvo para compactación transversal.....	65
Tabla 15. Masa en polvo para compactación longitudinal.....	66

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de los pasos en la compactación de polvos	10
Figura 2. Esquema de esfuerzos provocados por el prensado.....	16
Figura 3. a) Ambos extremos articulados, b) ambos extremos empotrados, c) un extremo libre, un extremo empotrado, d) un extremo redondo y articulado, y un extremo empotrado.....	18
Figura 4. Gráfica de la curva de Euler con $C=1$	19
Figura 5. Punzón superior	23
Figura 6. Punzón superior para compactación	26
Figura 7. Mallado de la cuarta parte del molde circular	29
Figura 8. Esfuerzo de Von Mises del molde circular.....	30
Figura 9. Desplazamiento del molde circular	30
Figura 10. Deformación equivalente del molde circular.....	31
Figura 11. Presión de contacto entre el punzón y la probeta	31
Figura 12. Factor de seguridad del punzón superior	32
Figura 13. Factor de seguridad de la tapa superior	32
Figura 14. Factor de seguridad de la tapa inferior	33
Figura 15. Factor de seguridad del perno 1	33
Figura 16. Factor de seguridad del perno 2.....	34
Figura 17. Mallado del punzón superior	35
Figura 18. Esfuerzo de Von Mises de punzón superior	35
Figura 19. Desplazamientos en el punzón superior	36
Figura 20. Deformación equivalente del punzón superior	36
Figura 21. Factor de seguridad en el análisis estático del punzón superior	37
Figura 22. Desplazamientos en el análisis de pandeo del punzón superior	37
Figura 23. Factor de seguridad del punzón	38
Figura 24. Mallado del punzón para compactación	38
Figura 25. Esfuerzo de Von Mises del punzón para compactación	39
Figura 26. Desplazamiento en el punzón para compactación	39

Figura 27. Deformación unitaria equivalente del punzón para compactación.....	40
Figura 28. Factor de seguridad del punzón para golpeo	40
Figura 29. Desplazamiento resultante del análisis de pandeo.....	41
Figura 30. Factor de seguridad del punzón para golpeo	41
Figura 31. Mallado de molde rectangular con punzón circular	43
Figura 32. Esfuerzo de Von Mises del molde rectangular	43
Figura 33. Desplazamiento del molde rectangular.....	44
Figura 34. Deformación unitaria equivalente.....	44
Figura 35. Presión de contacto entre el punzón y la probeta	45
Figura 36. Factor de seguridad del punzón circular	45
Figura 37. Factor de seguridad de la tapa frontal.....	46
Figura 38. Factor de seguridad de la tapa lateral	46
Figura 39. Factor de seguridad del perno.....	47
Figura 40. Mallado del molde rectangular con punzón de caras planas	47
Figura 41. Esfuerzo de Von Mises del molde rectangular con punzón de caras planas ..	48
Figura 42. Desplazamiento del molde rectangular.....	48
Figura 43. Deformación unitaria equivalente del molde rectangular.....	49
Figura 44. Presión de contacto entre el punzón de caras planas y la probeta	49
Figura 45. Factor de seguridad del punzón de caras planas	50
Figura 46. Factor de seguridad de la tapa frontal.....	50
Figura 47. Factor de seguridad de la tapa lateral	51
Figura 48. Polvo de aluminio (tamaño 800 um)	61
Figura 49. Polvo de bronce (tamaño 800 um).....	61
Figura 50. Viruta de acero (tamaño 2000um)	61
Figura 51. Partes del molde.....	66
Figura 52. Molde lleno de polvo metálico	67
Figura 53. Molde compactado en la máquina de compresión.....	67
Figura 54. Aplicación de la carga	67
Figura 55. Primer golpe para compactación del polvo	68
Figura 56. Probeta compactada.....	68

Figura 57. Probeta final.....	68
Figura 58. Medición de la probeta	69
Figura 59. Llenado del polvo en el molde.....	69
Figura 60. Molde lleno del polvo metálico	70
Figura 61. Compactación del molde	70
Figura 62. Extracción de la probeta	70
Figura 63. Probeta final.....	71

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto es acerca del diseño y construcción de un molde para compactación de pulvimetalurgia, para lo cual se tomó en consideración dos parámetros fundamentales, que las probetas que se obtienen en el molde sean de fácil extracción por lo cual el molde es desmontable y el otro es como se puede obtener la mejor compactación de los polvos metálicos.

Por tanto para el diseño del molde y la verificación de la resistencia de los materiales se utilizó un software, en el cual se obtuvo las tensiones, deformaciones, desplazamientos y factores de seguridad. Se propuso dos alternativas tomando en consideración los parámetros mencionados, se realizó un molde para compactación longitudinal y otro para compactación transversal mediante golpes.

Para los punzones también se realizó un análisis matemático, además de realizar cálculos para determinar cantidades de polvo metálico necesarias para obtener probetas para ensayos de tracción y sus respectivas fuerzas de compactación para los tres materiales ensayados que son aluminio, bronce y acero.

En la compactación de polvos metálicos se utilizó la máquina de compresión para concreto, en la cual se obtuvieron las tres probetas de compactación longitudinal y tres probetas de compactación transversal y de esta manera obtener el mejor diseño del molde.

EXECUTIVE SUMMARY

The present project is about the design and construction of a mold for compaction of powder metallurgy, for which were taken into account two fundamental parameters, that the specimens obtained in the mold are easy to extract so the mold is dismantlable and how to obtain the best compaction of metallic powders.

Therefore, for the mold design and the verification of the strength of the materials, was used a software, in which were obtained tensions, deformations, displacements and safety factors. Two alternatives were proposed taking into account the mentioned parameters, a mold was made for longitudinal compaction and another one for transverse compaction by blows.

For the punches, was also performed a mathematical analysis, as well as calculations to determine quantities of metallic powder required to obtain tensile test specimens and their respective compaction forces for the three materials tested, aluminum, bronze and steel.

In the compaction of metallic powders, was used the compression machine for concrete, in which were obtained three longitudinal compaction probes and three transverse compaction probes and thus obtaining the best mold design.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Tema

Diseño y construcción de un molde para compactación de pulvimetalurgia para elaboración de probetas cilíndricas.

1.2. Antecedentes

Una vez investigada información relacionada con el tema se tiene un resumen de varios trabajos realizados con la siguiente descripción:

Gonzalo Navarro Vallejo en su proyecto de fin de carrera de Ingeniería Industrial presentado en la Universidad Carlos III de Madrid – Departamento de Ciencia e Ingeniería en Materiales e Ingeniería Química bajo el tema: " Obtención de aceros sinterizados de baja aleación a partir de partículas de tamaños inferiores al convencional" realiza el estudio con la finalidad de encontrar alternativas menos costosas para la obtención de altas prestaciones en estos materiales mediante la obtención de aceros sinterizados de baja aleación con alta densidad, esto a través de la obtención de cinco clases de mezclas de un tamaño de gránulo alrededor de 100 um compuestas de diferentes polvos de hierro, además de estudios de compactación y la influencia de la temperatura en la sinterización sobre la densidad de las mezclas.

Leonardo Osorio Valencia en su tesis presentada para optar al título de ingeniero de Materiales en la Universidad del Valle – Facultad de Ingeniería – Escuela de Ingeniería de Materiales de Santiago de Cali con el tema: "Obtención y caracterización por vía pulvimetalurgia de la matriz de aluminio reforzada con partículas intermetálicas de

CuAl₂ y Cu", buscó experimentalmente reforzar una matriz metálica de aluminio con partículas intermetálicas de la forma Cu-Al teniendo inicialmente polvos de cobre aluminio con la finalidad de obtener la sinterización de materiales compuestos de matriz metálica.

Sergio Gil Gómez en su proyecto de fin de carrera en la Universidad de Valladolid, Escuelas de Ingenierías Industriales bajo el tema: "Comportamiento tribológico de materiales porosos para la fabricación de prótesis", en el cual realiza la selección de material, la técnica de procesado y las condiciones de tratamiento que permiten la optimización del comportamiento tribológico en desgaste seco y desgaste con lubricación de aceros inoxidable pulvimetalúrgicos para su aplicación en implantes médicos.

Óscar Álvaro Perrote, Carlos Ferrero Peña en su proyecto de fin de carrera en la Universidad de Valladolid - Escuela de Ingenierías Industriales con el tema: "Diseño y puesta a punto de un sistema de vacío para sinterización de probetas pulvimetalúrgicas de acero inoxidable", el proyecto tiene como objeto el diseño y puesta a punto de un sistema de vacío para sinterización de probetas pulvimetalúrgicas, que permitirá obtener resultados sobre la influencia del procesado en el comportamiento mecánico a tracción de aceros inoxidable obtenidos a través de polvos.

Monserrat Haro Rodríguez en su tesis de Máster en Ingeniería Mecánica y de Materiales en la Universidad Politécnica de Valencia bajo el tema: "Desarrollo de intermetálicos TiAl mediante técnicas pulvimetalúrgicas convencionales y de alta densificación (Spark Plasma Sintering)", con el objeto de evaluar la capacidad tecnológica de la pulvimetalurgia convencional para desarrollar intermetálicos TiAl y obtener compactos viables a partir de polvos pre aleados atomizados.

En el Ecuador, los estudios de pulvimetalurgia son pocos y no se cuenta con mucha información sin embargo se tiene algunos trabajos relacionados:

Luis Zambrano Durango previo a la obtención de ingeniero en Mecánica en la Escuela Superior Politécnica del Litoral - Facultad de Ingeniería en Mecánica bajo el tema: "Fabricación de polvos metálicos para la industria manufacturera", se desarrolla el diseño y la construcción del equipo experimental para la fabricación de polvos metálicos de bronce utilizando el proceso de atomización con agua.

1.3. Justificación

El presente trabajo se realiza con la finalidad de obtener probetas cilíndricas de materiales como aluminio, bronce y acero, mediante un proceso de compactación de polvos metálicos denominado proceso de Pulvimetalurgia, del cual se obtiene materiales con excelentes propiedades para aplicaciones específicas.

Se tiene mucho interés por el desarrollo de este proyecto, ya que con esto se puede lograr la obtención de materiales con excelentes propiedades debido que parte desde la mezcla de polvos metálicos con aditivos para ser compactados en un molde o matriz, que ingresan a prensas y posteriormente a un proceso de sintetizado del material con lo cual se logra obtener materiales con nuevas y mejores propiedades y concluye con un proceso de acabado.

El diseño y construcción del molde será de excelente utilidad por cuanto se obtendrán probetas cilíndricas de las cuales se partirá hacia la elaboración de probetas para ensayos de tracción y poder determinar posteriormente las propiedades que se lograron mejorar mediante este proceso de pulvimetalurgia.

En este proyecto se puede decir que no tiene un impacto negativo por el contrario se obtienen beneficios por cuanto se aprovechan polvos metálicos o la obtención de los mismos a través de materiales que se pueden reciclar de carrocerías, de procesos de mecanizado, y con lo cual se consigue la elaboración de elementos como cojinetes, partes estructurales, engranes, filtros, válvulas, herramientas de corte, varillas, etc.

Los beneficios que se lograrán mediante este trabajo, son múltiples debido a que mediante la obtención de materiales con mejores resistencias y mejor compactación de su estructura, la calidad y utilidad de piezas metálicas hará que la industria tenga un rápido crecimiento en comparación a otros procesos de manufactura de piezas metálicas.

La factibilidad del proyecto es buena por cuanto se tiene información relacionada con los procesos de compactación de pulvimetalurgia y moldeo ya que se han realizado algunas investigaciones sobre la obtención de filtros metálicos de bronce, el diseño de moldes para bujes de pulvimetalurgia, etc. Finalmente los materiales para la construcción son de fácil adquisición y con un coste accesible.

1.4.Objetivos

1.4.1 Objetivo General:

Diseñar y construir un molde para compactación de pulvimetalurgia para la elaboración de probetas cilíndricas.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Determinar parámetros de diseño para la construcción del molde para compactación de pulvimetalurgia.
- Seleccionar materiales para la elaboración del molde de probetas cilíndricas.
- Recolectar polvos metálicos de aluminio, bronce para su compactación en el molde.
- Tabular el número de pruebas realizadas hasta la obtención de la probeta con sus dimensiones.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN

2.1. Investigaciones previas

El uso de los primeros polvos metálicos se registran en varios lugares, así los Incas utilizaban el polvo de oro para fusionarlas con sus joyas, los Egipcios utilizaban el polvo de acero en el año 3000 AC. La Columna de Delhi en la India en el año 300 DC, la cual está construida por 6.5 toneladas de acero en polvo. El inicio de la pulvimetalurgia empieza con la finalidad de obtener piezas de metales difíciles de fundir industrialmente debido a su punto de fusión alto. La elaboración de lingotes de platino fue la primera aplicación en el siglo XIX, también se elaboraron monedas de polvos de cobre, plata y plomo. En los años 30 se desarrollaron rodamientos porosos de bronce y contactos eléctricos de grafito-cobre y además de desarrollar materiales con carburos sinterizados para herramientas, es así que aparece la widia: carburo de tungsteno en cobalto [1].

Como aplicación industrial la técnica de pulvimetalurgia aparece por primera vez, con el científico ruso P. Sobolevsky en 1827, empleó este método para fabricar monedas de platino prensando, sinterizando y forjando los polvos.

El desarrollo de la pulvimetalurgia ha ido creciendo muy rápido es así que se han elaborado materiales refractarios y esto no solo se lo hace con polvos metálicos sino que esta técnica para el desarrollo de materiales a partir de polvos es utilizado para fabricar materiales cerámicos y compuestos cerámico – metal [2].

En Santiago de Cali 2011, se ha realizado la obtención y caracterización por vía pulvimetalúrgica de la matriz de aluminio reforzada con partículas intermetálicos de CuAl_2 y Cu, este trabajo investigativo busca obtener un material compuesto [3].

Los trabajos investigativos que están en auge en los últimos años mediante el desarrollo de materiales a base de titanio son: el diseño de aleaciones de titanio pulvimetalúrgicas con adicción de Fe, Cr y Ni en Leganés (2013), con la finalidad de obtener una aleación más económica y con mejores propiedades para su utilización en la industria. Otro trabajo realizado es el Desarrollo de intermetálicos TiAl mediante técnicas pulvimetalúrgicas convencionales y de alta densificación (Spark Plasma Sintering) en Valencia 2013, que se enfoca en evaluar la capacidad tecnológica de la pulvimetalurgia convencional para desarrollar intermetálicos [4].

2.2. Fundamentación teórica

2.2.1. Definición de pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia es un proceso que consta de varias operaciones para el conformado del polvo metálico, cerámico o compuesto dándole una forma manejable, mediante la aplicación de temperatura en un ambiente con atmósfera controlada en un tiempo determinado y así lograr un elemento sinterizado compacto al enfriarse. El mismo que puede ser sometido a operaciones de acabado como: tratamientos térmicos, prensado del elemento sinterizado, etc [5].

La pulvimetalurgia es una tecnología utilizada en la fabricación de materiales mediante la consolidación de polvos de diferente naturaleza a través de la aplicación de presión y temperatura por debajo del punto de fusión del material en el componente de forma y propiedades determinadas inicialmente en el proceso [6].

2.2.2. Etapas del proceso de pulvimetalurgia

Los procesos pulvimetalúrgicos tienen un gran interés debido a sus múltiples aplicaciones en la industria, debido a las ventajas que ofrece esta tecnología en el procesado frente a los métodos convencionales.

2.2.2.1.Obtención del polvo metálico

Las propiedades de los productos pulvimetalúrgicos están determinadas por las características de los polvos que se obtienen entre las que podemos nombrar son: composición, tamaño, distribución, textura y su forma. Las cuales son importantes para obtener excelentes productos en las distintas aplicaciones industriales.

La obtención de polvos es un trabajo difícil debido a que en la naturaleza los metales se encuentran en estado sólido continuo y para la obtención del polvo de estos metales existen algunos métodos como:

- **Métodos químicos**

Existen varios métodos químicos, entre los cuales tenemos:

- 1. Reducción de óxidos**

La técnica más importante para obtención de polvos metálicos de manera química es la reducción de óxidos, se utiliza gases como hidrógeno y monóxido de carbono como agentes reductores. Se obtienen escorias de los óxidos metálicos al calentar la atmósfera reductora. Para el caso del hierro luego se realiza una reducción y separación magnética [7].

Los polvos que se obtienen mediante este método resultan ser esponjosos y porosos y de tamaño uniforme.

- 2. Deposición electrolítica**

Se utilizan soluciones acuosas o sales fundidas. Los polvos que se obtienen mediante este método son los más puros.

3. Descomposición de carbonilos

El material del cual se parte es la chatarra seleccionada, esponjas. Los carbonilos metálicos como el carbonilo de hierro y el de níquel. Los productos de reacción son descompuestos a hierro y a níquel produciendo partículas pequeñas, densas y esféricas de alta pureza.

4. Otros métodos

El método de precipitación que es poco utilizado y se basa en una solución química que produce finos filamentos mediante un mecanizado y condensación del vapor.

- **Métodos mecánicos**

Para la obtención de nuevos materiales se destaca el método que consiste en la trituración y molienda de las materias primas para lo cual se utiliza un molino de bola mediante ruptura frágil o menos dúctil [8].

Para la obtención de polvos aleados se utiliza otro método que consiste en la mezcla de polvo de metales en el molino de bola los cuales son impactados por bolas duras y mediante un proceso de difusión los polvos se fracturan y se unen unos con otros formando la aleación.

2.2.2.2. Mezclada y homogenización

Esta etapa consiste en la preparación y acondicionamiento de los polvos para lo cual se requiere un polvo con características necesarias para un buen compactado y que por sí solo el polvo no posee y para lo cual se debe tomar algunas consideraciones [9]:

- Para que el material este distribuido de manera uniforme es necesario realizar una mezcla de polvos debido a que poseen distintos tamaños y así obtener una uniformidad. Por tanto al obtener un producto de alta densidad se consigue mayor resistencia mecánica y a la fatiga.
- Para lograr propiedades físicas y mecánicas adecuadas es necesario la mezcla de polvos metálicos y los de otros materiales.
- Debe existir un lubricante en la mezcla de los polvos para mejorar su movimiento y así reducir la fricción de las partículas. Los lubricantes típicos son: el ácido esteárico o el estearato de zinc en proporciones del 5% en peso.
- La mezcla debe llevarse a cabo bajo condiciones controladas para evitar contaminación u oxidación de los polvos.

2.2.2.3. Compactación

Considerada la etapa más crítica del proceso que consiste en el prensado de los polvos en matrices de formas, acorde a su aplicación usando pistones hidráulicos o mecánicos. Por lo general, el prensado se lo realiza a temperatura ambiente aunque también se lo puede llevar a cabo a altas temperaturas, para lo cual los polvos debe tener facilidad de movimiento dentro de la matriz.

Factores a considerar al momento de llevar a cabo la compactación:

- Velocidad de flujo del polvo.
- Temperatura del polvo y molde de compactación.
- Dirección de la presión.
- Densidad final (Presión de compactación)
- Continuidad del proceso

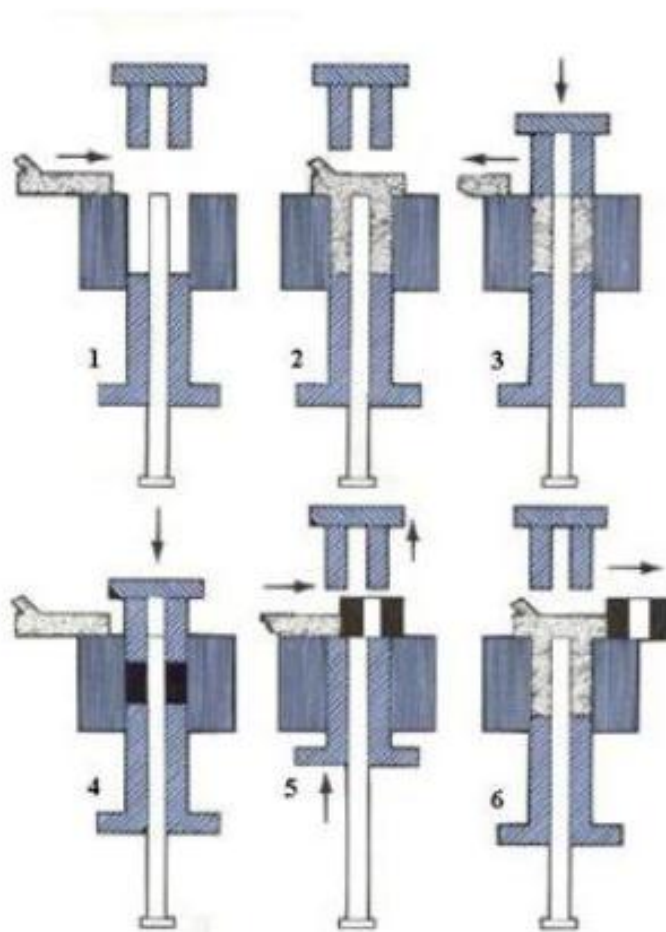


Figura 1. Esquema de los pasos en la compactación de polvos

Fuente: Navarro. Gonzalo, (2011) *Obtención de aceros sinterizados de baja aleación.*

Técnicas de compactación

- **Compactación en caliente**

Utilizada para aumentar densidad y resistencia en verde de aceros, al aumentar su densidad se aumenta la maquinabilidad en verde. El método de compactación es el más convencional y utilizado para la producción de hierro, acero, cobre, aluminio, etc. Para piezas como engranajes, poleas, ruedas y poleas.

- **Compactación en frío**

Consiste en la densificación de polvos en una matriz de acero templado aplicando una presión a un punzón la misma que puede ser uniaxial, biaxial e isostática. Para reducir la resistencia a la compactación se debe utilizar lubricantes sólidos especiales [10].

Limitaciones para productos pulvimetalúrgicos:

- Área máxima de compactación de 160 cm².
- Espesor máximo de 75 mm.
- Peso máximo de 2.2 Kg.

Las presiones varían entre 70 y 1000 MPa, los polvo entran a la matriz por lo general por gravedad y está determinada por el volumen, otra posibilidad es controlar por el peso del polvo

- **Forjado de polvos(FP)**

Se utilizan técnicas convencionales para ser tratados en caliente en matrices pequeñas, para eliminar la porosidad mediante la deformación del material. La desventaja es que el mantenimiento de las herramientas es muy costoso por lo que el método está siendo eliminado.

- **Moldeo por inyección del metal (MIN)**

Utilizado para elaborar piezas complejas mediante inyección, se utilizan polvos homogéneos muy pequeños de forma esférica que varían de 10 a 20 μm de diámetro, son procesos más caros que los convencionales pero con mejores propiedades [11].

- **Presión isostática en caliente**

Utilizado para producir aceros para herramientas, superlaciones. En este método se requiere alta pureza de los polvos y que sean de forma esférica.

Consiste en introducir los polvos a un vibrado en el interior de contenedores que son sellados y los cuales son sometidos a una presión isostática en un medio gaseoso a la temperatura, la combinación de calor y presión dan la forma de la pieza en verde es un proceso costoso [12].

2.2.2.4.Sinterización

La definición del término sinterización según la norma ISO dice: ‘Tratamiento térmico de un polvo o compacto a temperatura inferior de la del punto de fusión del constituyente mayoritario, con el propósito de aumentar su resistencia mediante la unión de las partículas.

En el sinterizado los polvos se enlazan ya que se lo hace en un horno de atmosfera controlada que se encuentra a una temperatura menor al punto de fusión del material, por lo general entre un 70 y 80% de su punto de fusión. Esta temperatura es mayor que la de los tratamientos térmicos, como es el caso del hierro y los aceros a 1120 °C. El sinterizado depende de la temperatura, el tiempo, flujo, composición de la atmósfera y circulación [13].

Este proceso es el más importante y más complejo a la vez ya que con este proceso el material adquiere sus propiedades y dimensiones finales.

Tabla 1. Temperaturas típicas de sinterización y tiempo

Material	Temperature		Time, min
	°C	°F	
Bronze	760-870	1400-1600	10-20
Copper	840-900	1550-1650	12-45
Brass	840-900	1550-1650	10-45
Iron, iron-graphite, etc.	1010-1150	1850-2100	30-45
Nickel	1010-1150	1850-2100	30-45

Fuente: Metal Handbook. *Powder metal technologies and applications ASM*. Volumen 7.

2.2.2.5. Mecanizado final

Muchos de los productos obtenidos requieren un tratamiento final que puede ser precisar sus dimensiones o dotarlos de características especiales. Para restituir la precisión dimensional se puede realizar un segundo prensado.

La permeabilidad de los productos con porosidad abre más opciones como: la impregnación y la infiltración. La primera se basa en que un aceite penetre la red porosa y la infiltración metálica trata de forzar el ingreso de un metal fundido en la red porosa mediante presión o por capilaridad. Las partes sinterizadas también pueden someterse a tratamientos convencionales como mecanizados, tratamientos térmicos [14].

2.2.3. Propiedades de los polvos metálicos

Esto depende del método de obtención entre las propiedades más importantes tenemos su forma, composición, tamaño, distribución, porosidad y microestructura. También se pueden encontrar propiedades secundarias entre las que sobresalen la densidad, velocidad de derrame, superficie específica, compresibilidad, plasticidad y capacidad de endurecimiento.

2.3. Moldeo de polvos

2.3.1. Tipos de moldeo

Moldeo por inyección de polvos: se mezclan polvos metálicos muy finos menos a 10 μ m con 25% a 45% de un polímero como aglutinante o a base de cera. Los metales adecuados en este método son los que sobrepasan los 1000 °C como es el caso de los aceros al carbono e inoxidable, el bronce y el titanio.

Laminado: se lo hace mediante molino de laminación y es compactado en bandas a una velocidad máxima de 0.5 m/s. Se lo realiza a temperatura ambiente [15].

Extrusión: el polvo se introduce en un contenedor metálico y se extruye en caliente.

Compactado sin presión: la matriz es llenada de polvo metálico por gravedad y es sinterizado en la matriz, utilizado en filtros.

2.3.2. Consideraciones para el diseño

Principios de diseño a considerar:

- Forma simple y uniforme
- Precauciones al extraer el compactado en crudo de la matriz
- Las piezas deben tener tolerancias altas
- El espesor de las paredes de la pieza no debe ser menor a 1.5mm.

2.3.3. Materiales para punzones y matrices

Se debe considerar en la selección cuan abrasivo es el material, los materiales comunes para matrices son los aceros para herramientas endurecibles al aire o aceite (D2 o D3) con un rango de dureza de 60 a 64 HRC y los punzones son en materiales similares.

2.4 Presiones de compactado

Las presiones para el prensado de polvos metálicos van desde 70 MPa (10 ksi) (para el aluminio) a 800 MPa (120 ksi) (para piezas de hierro de alta densidad). Las capacidades de prensado van desde 1.6 a 2.7 MN (200 A 300 toneladas), la mayoría de aplicaciones requieren menos de 100 toneladas. Un inconveniente con la velocidad de prensado es que no debe ser muy alta para evitar atrapar aire en la cavidad de la matriz. A continuación se presenta una tabla de valores de presiones de acuerdo al material [16].

Tabla 2. Prensado isostático en frío

Polvo	Rango de presión	
	MPa	Ksi
Aluminio	55-140	8-20
Cobre	140-375	20-40
Hierro	310-415	45-60
Aceros para herramientas de alta velocidad	240-345	35-50
Acero inoxidable	310-415	45-60
Titanio	310-415	45-60
Tungsteno	240-415	35-60

Fuente: Metal Handbook, (1998) *Powder metal technologies and applications*.
Volumen 7.

Tabla 3. Prensiones típicas de compactación y relaciones de compresión de tipos de cobre

P/M Partes	Presión de compactación		Índice de compresión
	MPa	Ksi	
Piezas de latón	414-689	30-50	2.4-2.6 a 1
Rodamientos de bronce	193-275	14-20	2.5-2.7 a 1
Cepillos de cobre y grafito	345-414	25-30	2.0-3-0 a 1
Latón de cobre puro	206-248	15-18	2.6-2.8 a 1

Fuente: Metal Handbook, (1998) *Powder metal technologies and applications*.
Volumen 7.

2.4.1. Fundamentos teóricos de cálculo

Debido a la fricción que existe entre las paredes de la matriz y el la circunferencia del compactado, la presión axial se reduce exponencialmente con la distancia al punzón en movimiento.

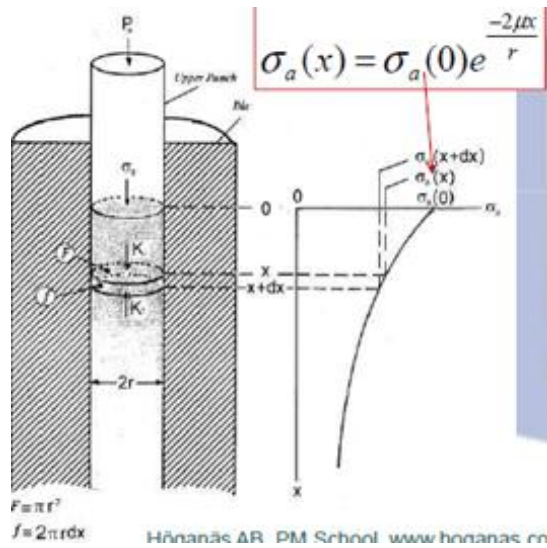


Figura 2. Esquema de esfuerzos provocados por el prensado.

Fuente: ocw.uc3mes./ciencia-e-oin/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/4.La_compactacion_uniaxialx.pdf

2.4.2. Tolerancias

Tabla 4. Compactación uniaxial

Dirección perpendicular a la dirección del prensado:	IT9(IT8 Excepcionalmente)
Distancia entre centros de agujeros paralelos a la dirección del prensado:	IT8 + 0,03
Planitud:	0,0015 x D (D=máxima dimensión)
Paralelismo:	0,002 x D (D=máxima dimensión)
Perpendicularidad:	0,002 x D (D=máxima dimensión)
Redondez:	(IT8-10)/2

Fuente: ocw.uc3m.es

2.4. Teorías para el diseño

Diseño de miembros a tensión o compresión directa.

La fórmula para el esfuerzo directo es la siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

σ = esfuerzo normal directo a tensión o compresión

F = fuerza a tensión o compresión

A = área de la sección transversal sometido a una fuerza

Para asegurar que un elemento sometido a una carga no falle se debe considerar un factor de diseño el cual está basado en la resistencia del material para lo cual se tiene la ecuación 2 [17]:

$$n = \frac{S_y}{\sigma} \quad \text{Ec. 2.2}$$

n = Factor de diseño

S_y = resistencia a la cedencia del material

σ = esfuerzo de diseño al que esta sometido el elemento

Elementos sometidos a compresión general (Pandeo)

Las columnas se clasifican en:

1. Columnas largas con carga centrada
2. Columnas de longitud intermedia con carga centrada
3. Columnas con carga excéntrica
4. Puntales o columnas cortas con carga excéntrica

Para determinar la fuerza crítica de pandeo en columnas largas se utiliza la fórmula de Euler.

$$P_{cr} = \frac{C\pi^2 EI}{l^2} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

La constante C depende de las condiciones de los extremos como se muestra en la figura 3.

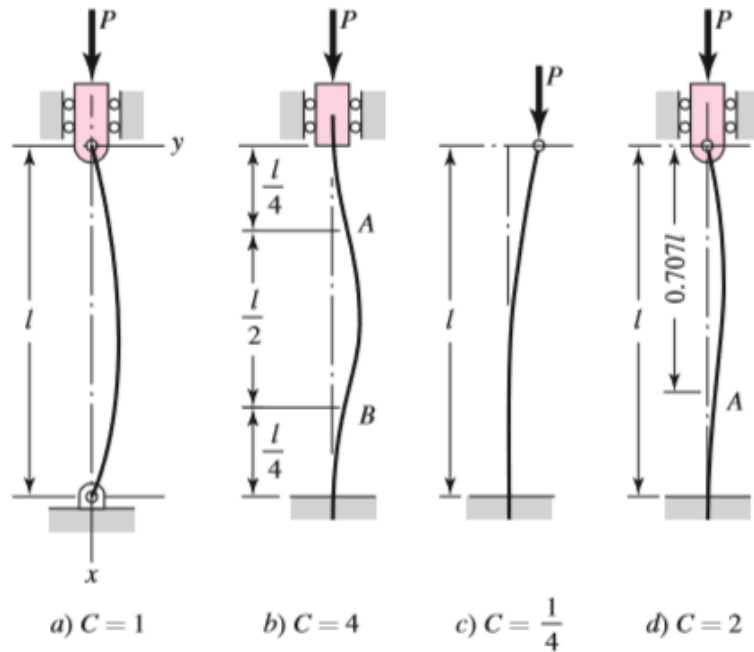


Figura 3. a) Ambos extremos articulados, b) ambos extremos empotrados, c) un extremo libre, un extremo empotrado, d) un extremo redondo y articulado, y un extremo empotrado

Fuente: Budynas, R y Nisbett, J. (2008), *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

Para factores de seguridad amplios y que se conozca la carga aplicada con exactitud se aplican las siguientes condiciones de extremos que se muestran en la tabla 5

Tabla 5. Constantes de condiciones finales de las columnas de Euler.

Condiciones de extremos de columnas	Constante C de condición de extremo		
	Valor Teórico	Valor conservador	Valor recomendado*
Empotrado-libre	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
Articulado. Articulado	1	1	1
Empotrado-articulado	2	1	1.2
Empotrado-empotrado	4	1	1.2

Fuente: Budynas, R y Nisbett, J. (2008), *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

Otra consideración que se debe tomar en cuenta es la relación de esbeltez para el diseño de columnas para evitar fallas repentinas. Las vigas tienden a curvarse, lo cual es señal que está sobrecargada, por tal motivo para el diseño no deben utilizarse métodos de compresión simple ni la ecuación de la columna de Euler cuando la relación de esbeltez sea casi igual a (l/k) . Se utiliza la ecuación de Euler solo cuando la relación de esbeltez real sea mayor que $(l/k)_1$. Donde:

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \left(\frac{2\pi^2 CE}{S_y}\right)^{0.5} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Se utiliza la ecuación solo cuando $\frac{l}{k} > \left(\frac{l}{k}\right)_1$

Mientras que para columnas intermedias se utiliza la ecuación 5 basado en la Figura 4:

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \left(\frac{S_y l}{2\pi k}\right)^2 \frac{1}{CE} \quad \text{Ec. 2.5}$$

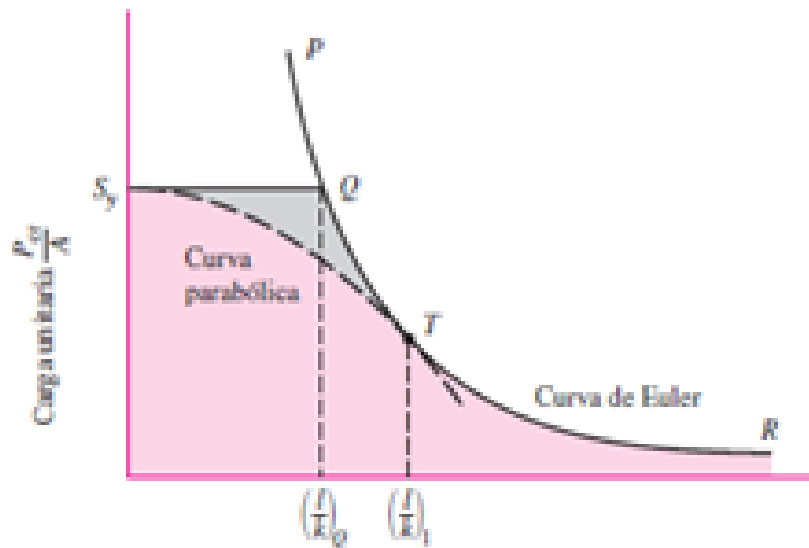


Figura 4. Gráfica de la curva de Euler con $C=1$

Fuente: Budynas, R y Nisbett, J. (2008), *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL PROYECTO

3.1 Selección de alternativas

Las alternativas que se considerarán en el diseño de este molde, se tomarán de acuerdo a los inconvenientes que se han suscitado con anterioridad en investigaciones y estos son: la dificultad de extracción de la probeta luego de haber compactado los polvos metálicos, debido a que se adhieren a las paredes del molde y por tal motivo se ha pensado en un diseño del molde, el cual facilite su extracción, por tanto se va a mejorar el molde, se tiene la siguiente alternativa para evitar estos inconvenientes que se tiene en la fase de compactación, así:

- Se ha pensado en un diseño práctico, el cual es un molde que sea desmontable de sección circular, es decir este molde tendrá dos partes las mismas que estarán unidas mediante pernos de sujeción para facilitar la extracción de la probeta obtenida.
- Como otra alternativa se tiene la realización de un molde de sección rectangular en el cual la presión será aplicada longitudinalmente para la obtención de la probeta y con el cual se pueden obtener probetas de sección circular y de caras planas, solo se debe cambiar el tipo de punzón.

Para la obtención de las probetas se ha pensado en realizar los ensayos de dos maneras con la finalidad de obtener una probeta más compacta y mejorar el enlace de los polvos metálicos, por tanto la fase de compactación se lo realizará aplicando presión en el extremo del punzón mientras que a la vez se desplaza también el otro punzón, primero a nivel transversal y la otra alternativa es aplicar presión longitudinalmente en las caras

del punzón y comparar las probetas obtenidas, para conocer con que alternativa se obtiene la mejor compactación de los polvos metálicos.

Los polvos metálicos a utilizar y obtener probetas de las mismas son aluminio, bronce y acero de las 2 maneras antes mencionadas en la fase de compactación. Las probetas que se necesitan obtener tendrán las dimensiones establecidas en la norma para ensayar probetas de tracción; es decir de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro y de 6 pulgadas de longitud, pero en el caso del diámetro se aumentará a 1 pulgada para facilitar su obtención y debido también a que en este método de obtención la fase final se realizan procesos como maquinado o tratamientos térmicos razón por la cual se puede reducir su diámetro.

La obtención de los polvos metálicos se lo realizará por un proceso de mecanizado por el cual se pretende reducir el material a virutas las cuales posteriormente se procederá hacerles polvo.

El molde y los punzones serán de un mismo material basándose en las medidas antes mencionadas y con un sistema de fácil extracción de la probeta. La forma de compactación de las probetas será uniaxial mediante la aplicación de presión en el punzón, en la máquina de compresión de concreto. El proceso se concluye al obtener las tres probetas aplicando su respectiva presión de compactación en los 2 tipos de moldes.

3.2 Cálculos y selección de materiales

3.2.1. Cálculo del molde

Molde 1. Para compactación transversal.

Se determina la fuerza máxima a aplicar con la presión de compactación más alta, en este caso la del bronce que tiene una presión de compactación de 689 MPa y una sección circular de diámetro 25,3 mm.

Por la tanto se determina el área de la sección circular con la ecuación 3.1.

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

A = área de la sección circular

D = diámetro de la sección

$$A = \pi \times \frac{(0,0253 \text{ m})^2}{4}$$
$$A = 5,03 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Para determinar la fuerza de compactación máxima en el molde circular utilizamos la ecuación 2.1.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$F = \sigma \times A$$
$$F = 689 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 5,03 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$
$$F = 346,378 \text{ kN}$$

Molde 2. Para compactación longitudinal.

Se determina la fuerza máxima a aplicar con la presión de compactación más alta, en este caso la del bronce que tiene una presión de compactación de 689 MPa y las dimensiones del punzón son 149,5 mm de largo x 25,3 mm de ancho. Y por lo tanto se determina el área de la sección con la ecuación 3.2.

$$A = l \times a \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

l = largo del punzón

a = ancho del punzón

$$A = 0,1495 \text{ m} \times 0,0253 \text{ m}$$
$$A = 3,782 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Para determinar la fuerza de compactación máxima en el molde rectangular utilizamos la ecuación 2.1.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$F = \sigma \times A$$
$$F = 689 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \times 3,782 \times 10^{-3} m^2$$
$$F = 2605,789 \text{ kN}$$

3.2.1. Cálculo analítico del molde

3.2.1.1. Molde circular

- **Análisis estático del punzón superior**

Material: Acero AISI H13

$S_y = 1706 \text{ MPa}$. Ver anexo B

$d = 25,3 \text{ mm}$

$F = 346,378 \text{ KN}$



Figura 5. Punzón superior

Fuente: El autor

Determinamos el esfuerzo máximo por compresión al que está sometido el punzón con la ecuación 2.1.

$$\sigma_x = \frac{F}{A}$$
$$\sigma_x = \frac{346,378 \text{ kN}}{5,03 \times 10^{-4}}$$
$$\sigma_x = 689 \text{ MPa}$$

Se calcula el factor de seguridad del punzón con la ecuación 2.2.

$$n = \frac{S_y}{\sigma_x}$$
$$n = \frac{1706}{689}$$
$$n = 2.47$$

- **Análisis de pandeo del punzón**

Datos:

$$l = 154 \text{ mm}$$

$$d = 25.3 \text{ mm}$$

$$F = 346.378 \text{ KN}$$

Factor de seguridad de 2

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Se determina la inercia del punzón de sección circular con la ecuación 3.3.

$$I = \frac{\pi \times D^4}{64} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

I = inercia de la sección circular

D = diámetro del punzón

$$I = \frac{\pi \times (0.0253 \text{ m})^4}{64}$$
$$I = 2.01 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

Para determinar el radio de giro utilizamos la ecuación 3.4 según Budynas y Nisbett.

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde:

k = radio de giro

I = inercia de la sección

A = área de la sección

$$k = \sqrt{\frac{2.01 \times 10^{-8}}{5.03 \times 10^{-4}}}$$
$$k = 6.32 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Para determinar qué tipo de columna es, calculamos la relación esbeltez real del punzón:

$$\frac{l}{k} = \frac{0.154}{6.32 \times 10^{-3}} = 24,36$$

Para lo cual utilizamos las siguientes condiciones de extremos de la columna.

Articulado – Articulado, entonces:

C=1. Ver tabla 5 en la página 18 del documento.

Determinamos la relación de esbeltez en un punto T con la ecuación 2.4.

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \left(\frac{2 \times \pi^2 \times C \times X \times E}{S_y}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \left(\frac{2 \times \pi^2 \times 1 \times 210 \times 10^9}{1706 \times 10^6}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = 49,29$$

Se comparan los valores de la relación de esbeltez real y la relación de esbeltez en un punto T.

$$\frac{l}{k} < \left(\frac{l}{k}\right)_1$$

$$24,36 < 49,29$$

Comparando los valores tenemos que el punzón está dentro del tipo de columna intermedia, por tanto el esfuerzo crítico se determina con la ecuación 2.5.

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \left(\frac{S_y l}{2\pi k}\right)^2 \frac{1}{CE}$$

$$\frac{P_{cr}}{A} = 1706 \times 10^6 - \left(\frac{1706 \times 10^6 \times 0.154}{2\pi \times 6.32 \times 10^{-3}}\right)^2 \frac{1}{1 \times 210 \times 10^9}$$

$$\frac{P_{cr}}{A} = 1497,56 \text{ MPa}$$

Con lo cual podemos determinar la fuerza de trabajo, que se puede aplicar con un factor de seguridad de 2 la presión de compactación mediante ecuación 2.1.

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{cr}}{A}$$
$$F_{cr} = 1497,56 \times 10^6 \frac{N}{m^2} \times 5,03 \times 10^{-4} m^2$$
$$F_{cr} = 753,27 \text{ kN}$$
$$F_w = \frac{753,27 \text{ kN}}{2}$$
$$F_w = 376,64 \text{ kN}$$

La fuerza de trabajo F_w con un factor de seguridad de 2 para el punzón superior es de 376,64 kN.

- **Punzón para compactación**

Datos:

Material: Acero AISI H13

$S_y = 1706 \text{ MPa}$

$D = 25,3 \text{ mm}$

$F = 346,378 \text{ KN}$



Figura 6. Punzón superior para compactación

Fuente: El autor

- **Análisis de pandeo del punzón para compactación**

Datos:

$$L = 201\text{mm}$$

$$F = 346,378 \text{ kN}$$

Factor de seguridad de 2

Se determina la inercia del punzón de sección circular con la ecuación 3.3.

$$I = \frac{\pi \times D^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi \times (0.0253 \text{ m})^4}{64}$$

$$I = 2.01 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

Para determinar el radio de giro utilizamos la ecuación 3.4 según Budynas y Nisbett.

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$k = \sqrt{\frac{2.01 \times 10^{-8}}{5,03 \times 10^{-4}}}$$

$$k = 6.32 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Para determinar qué tipo de columna es, calculamos la relación esbeltez real del punzón:

$$\frac{l}{k} = \frac{0,201}{6.32 \times 10^{-3}} = 31,79$$

Para lo cual utilizamos las siguientes condiciones de extremos de la columna.

Empotrado – articulado, entonces:

C=1.2, Ver tabla 5 en la página 18 del documento.

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \left(\frac{2 \times \pi^2 \times C \times E}{S_y}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \left(\frac{2 \times \pi^2 \times 1.2 \times 210 \times 10^9}{1706 \times 10^6}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = 54$$

Se comparan los valores de la relación de esbeltez real y la relación de esbeltez en un punto T.

$$\frac{l}{k} < \left(\frac{l}{k}\right)_1$$

$$31,79 < 54$$

Comparando los valores tenemos que el punzón está dentro del tipo de columna intermedia, por tanto el esfuerzo crítico se determina con la ecuación 2.5.

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \left(\frac{S_y l}{2\pi k}\right)^2 \frac{1}{CE}$$

$$\frac{P_{cr}}{A} = 1706 \times 10^6 - \left(\frac{1706 \times 10^6}{2\pi} \frac{0,201}{6,32 \times 10^{-3}}\right)^2 \frac{1}{1,2 \times 210 \times 10^9}$$

$$\frac{P_{cr}}{A} = \mathbf{1410,09 MPa}$$

Con lo cual podemos determinar la fuerza de trabajo, que se puede aplicar con un factor de seguridad de 2 la presión de compactación mediante ecuación 2.1.

$$P_{cr} = \frac{F}{A}$$

$$F_{cr} = 1410,09 \times 10^6 \times 5,03 \times 10^{-4}$$

$$F_{cr} = \mathbf{709,275 kN}$$

$$F_w = \frac{709,275 \text{ kN}}{2}$$

$$F_w = \mathbf{354,63 kN}$$

La fuerza de trabajo F_w con un factor de seguridad de 2 para el punzón superior es de 354,63 kN

3.2.2. Selección del material

3.2.2.1. Análisis de resistencia del molde y componentes

Molde circular

Para verificar la resistencia de los materiales se realizó un análisis estático del molde con todos sus componentes y considerando una presión máxima de 800 MPa

- **Análisis estático**

Para el análisis de este molde se tomó la cuarta parte del molde, tomando en consideración que tiene una simetría.

Mallado

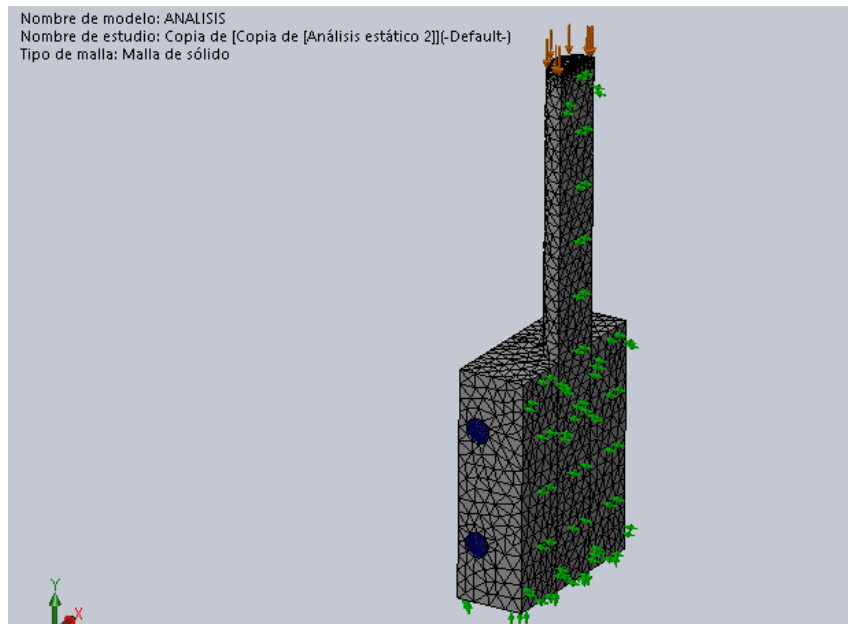


Figura 7. Mallado de la cuarta parte del molde circular

Fuente: El autor

Los resultados obtenidos en el análisis estático son los siguientes:

Tensiones (Von Mises)

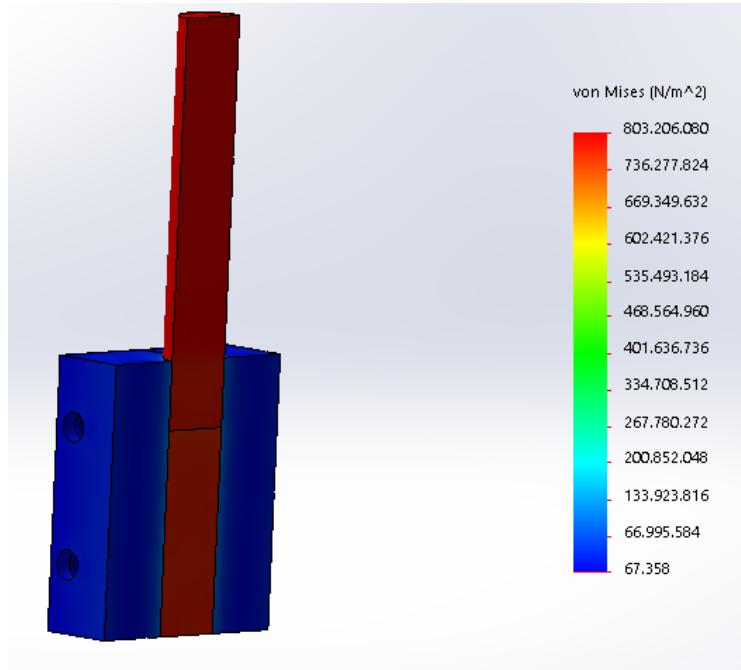


Figura 8. Esfuerzo de Von Mises del molde circular

Fuente: El autor

Desplazamiento resultante

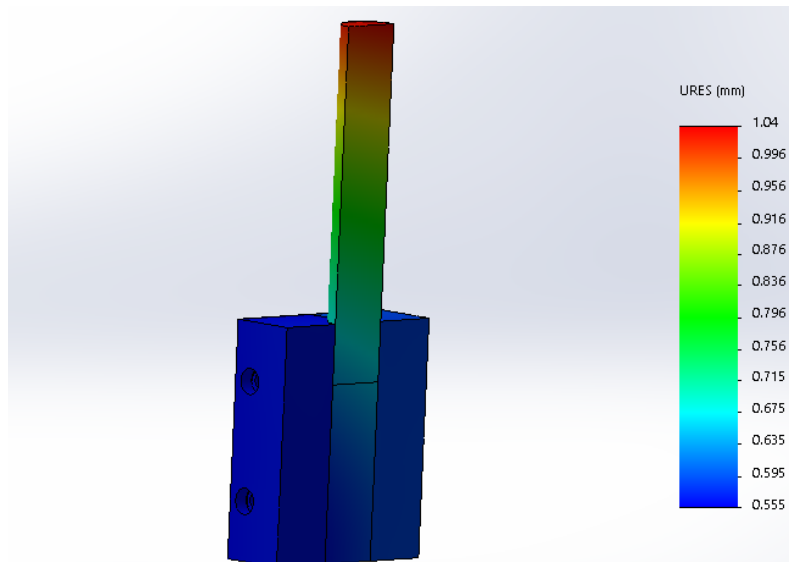


Figura 9. Desplazamiento del molde circular

Fuente: El autor

Deformaciones unitarias

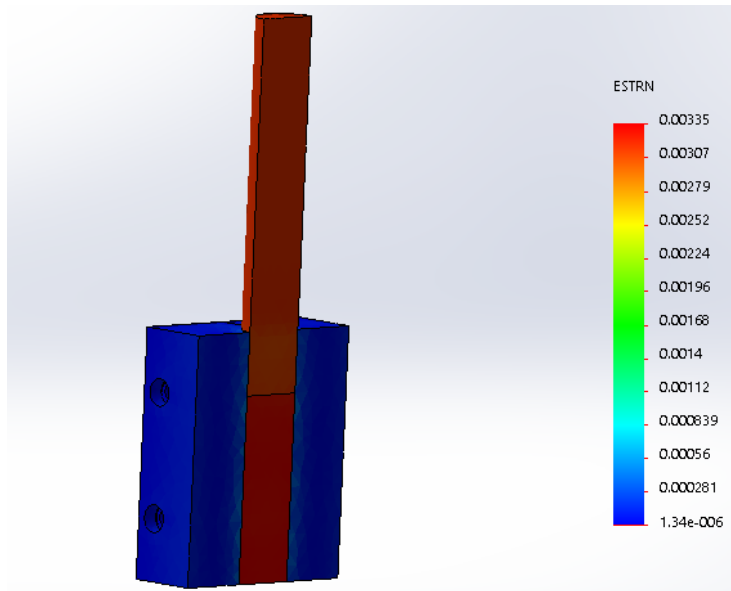


Figura 10. Deformación equivalente del molde circular

Fuente: El autor

Presión de contacto

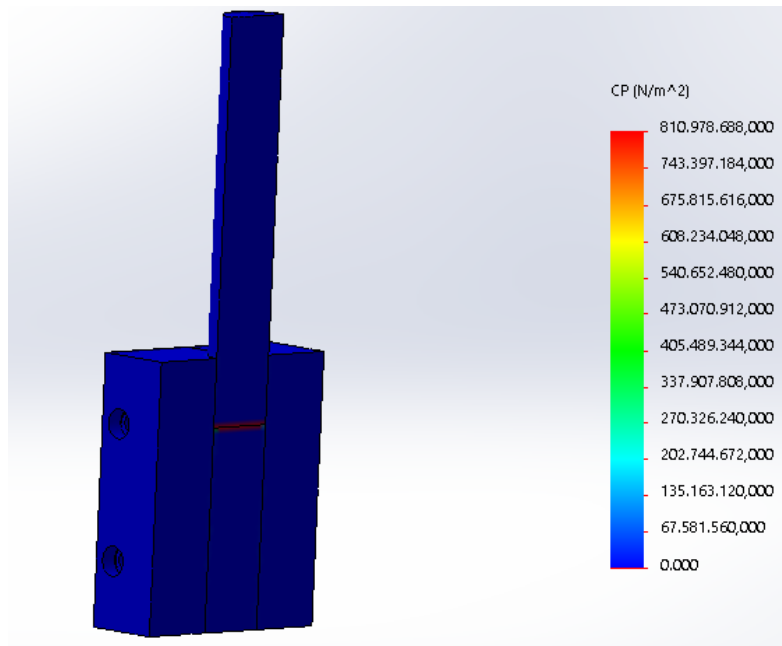


Figura 11. Presión de contacto entre el punzón y la probeta

Fuente: El autor

Factor de seguridad del punzón

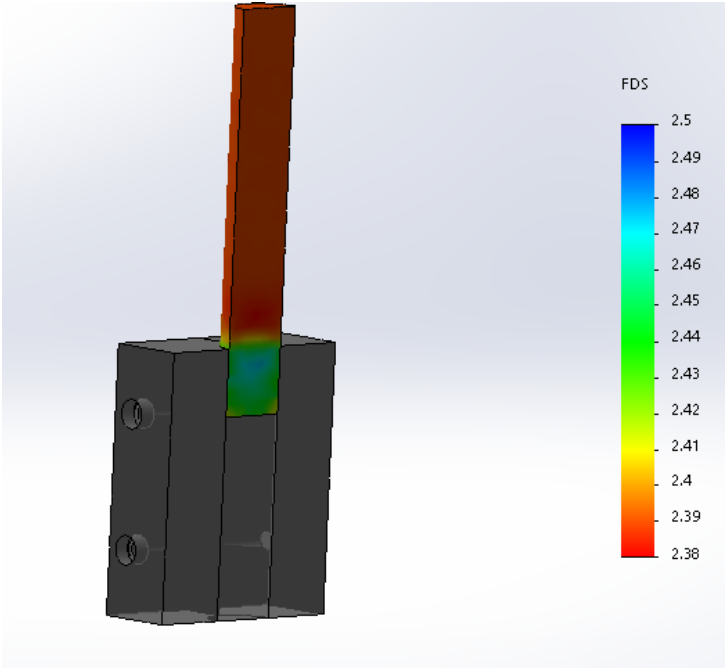


Figura 12. Factor de seguridad del punzón superior

Fuente: El autor

Factor de seguridad de la tapa superior

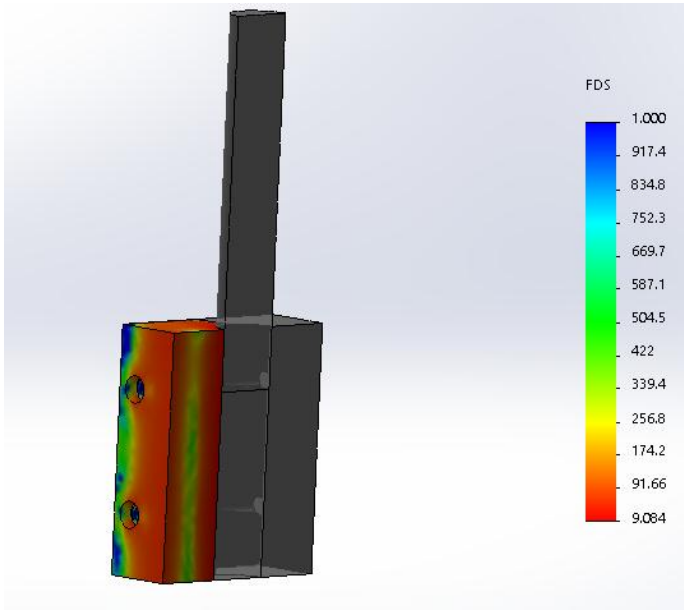


Figura 13. Factor de seguridad de la tapa superior

Fuente: El autor

Factor de seguridad de la tapa inferior

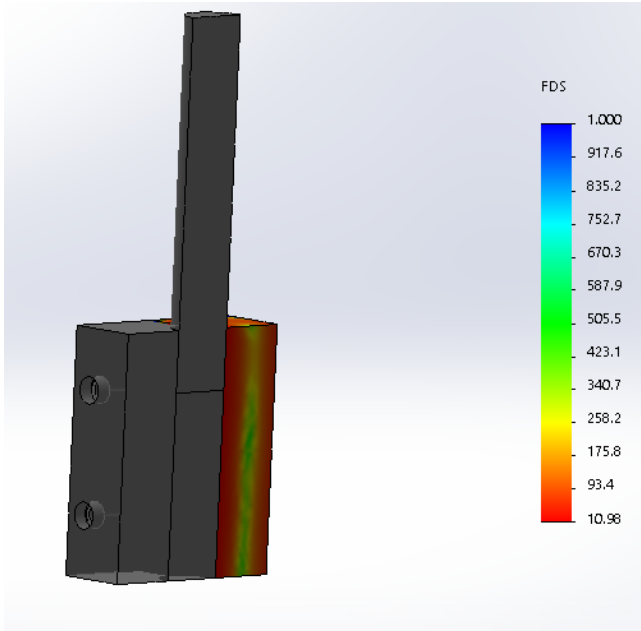


Figura 14. Factor de seguridad de la tapa inferior

Fuente: El autor

Comprobación de los pernos

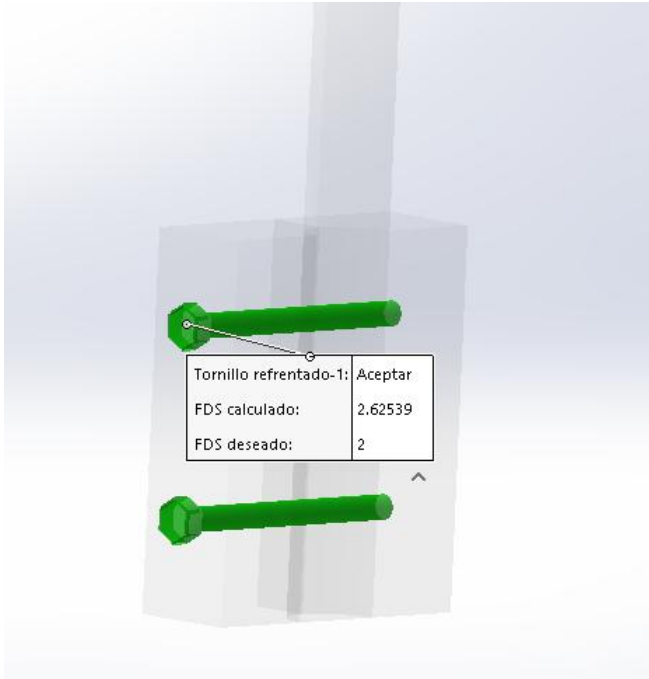


Figura 15. Factor de seguridad del perno 1

Fuente: El autor

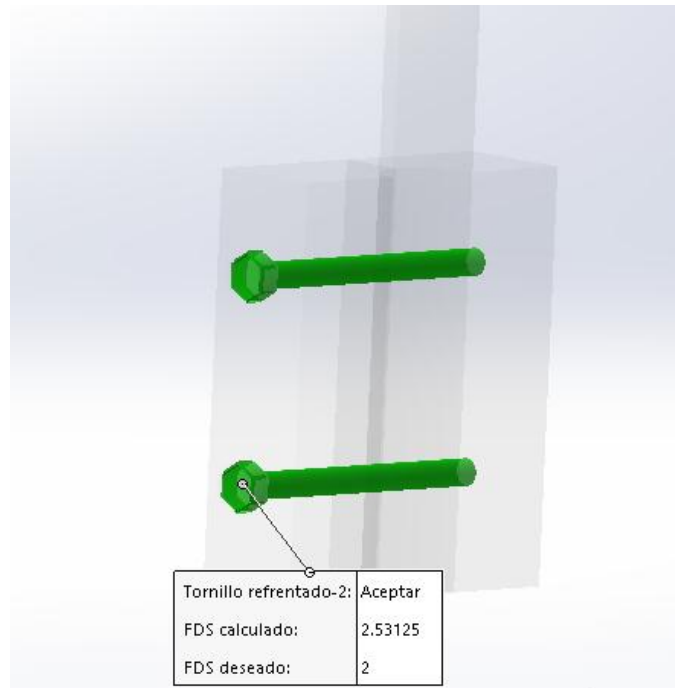


Figura 16. Factor de seguridad del perno 2

Fuente: El autor

Punzón superior

Se realizó un análisis estático del punzón para ver la resistencia del material que va estar sometido a presiones de compactación elevadas para la obtención de probetas a partir de los polvos. La presión de aplicación sobre el punzón es de 800 MPa, el material escogido para el ensayo es el AISI H13 (DIN: X40CrMoV5-1).

También se realizó un análisis de pandeo en el punzón para conocer si está dentro del rango de factor de seguridad en cuanto a pandeo.

- **Análisis estático**

El mallado del punzón tiene un número total de nodos de 9735 y un total de elementos de 6176 cada uno con un tamaño de 4.19 mm.

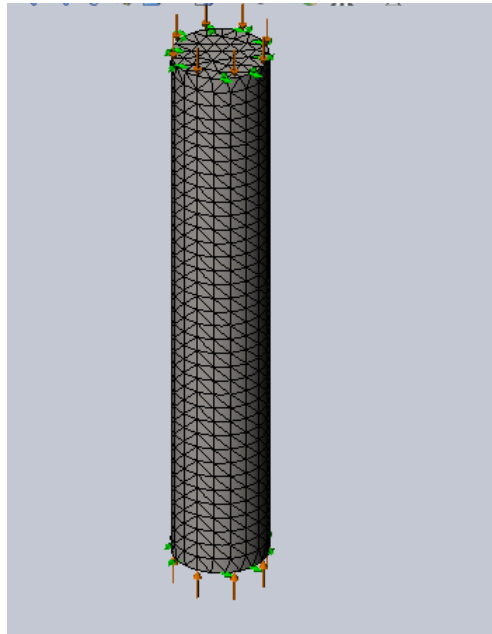


Figura 17. Mallado del punzón superior

Fuente: El autor

Los resultados obtenidos en el análisis estático son los siguientes:

Las tensiones de Von Mises máximas generadas en el análisis estático son de $902.259.840 \text{ N/ m}^2$, cuyo valor no supera el límite elástico del material que es 1910 MPa .

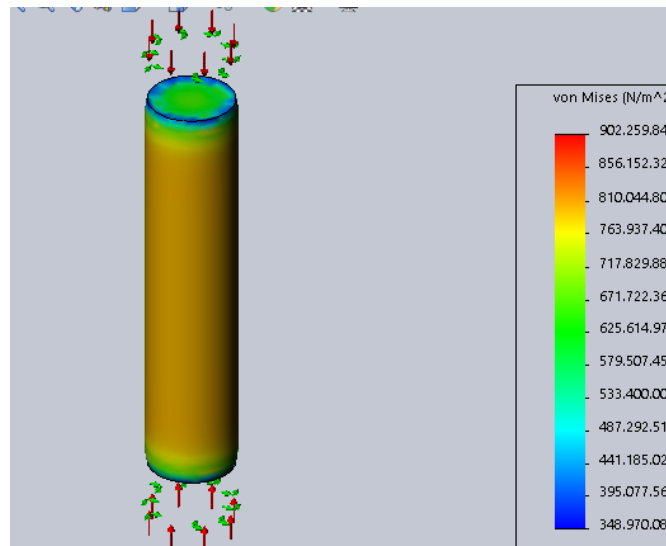


Figura 18. Esfuerzo de Von Mises de punzón superior

Fuente: El autor

Los desplazamientos máximos son de 2.821×10^{-1} mm

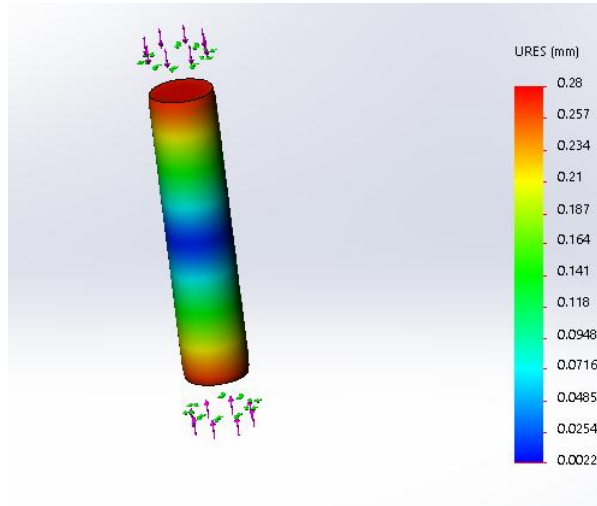


Figura 19. Desplazamientos en el punzón superior

Fuente: El autor

La deformación que sufre el punzón al aplicar la presión de 800 MPa es de 3.32×10^{-3} como se observa en la figura 20.

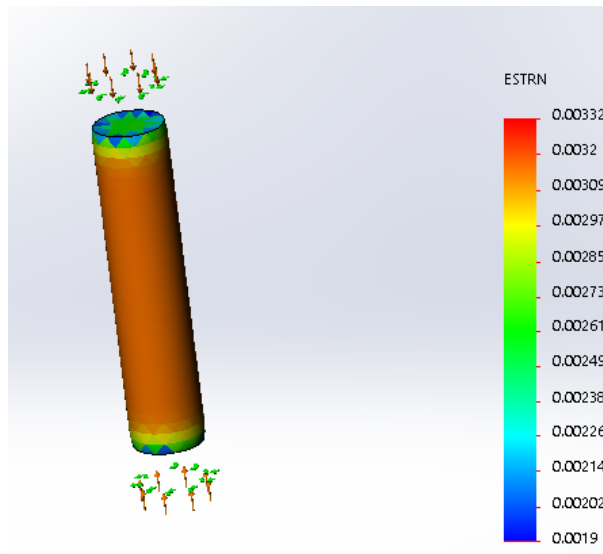


Figura 20. Deformación equivalente del punzón superior

Fuente: El autor

El factor de seguridad máximo que se obtuvo en el análisis es de 5.43 en los extremos de punzón como se puede observar en la figura y el factor mínimo de seguridad es de 2.16 que se distribuye a lo largo del punzón y que se visualiza en color rojo.

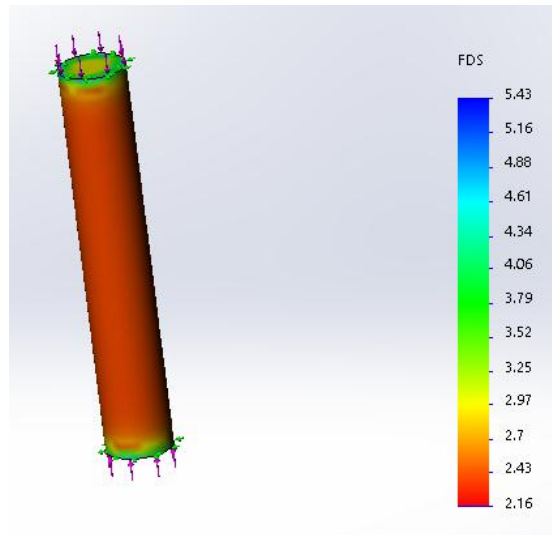


Figura 21. Factor de seguridad en el análisis estático del punzón superior

Fuente: El autor

- **Análisis de pandeo**

El mallado para el análisis de pandeo es el mismo que en el análisis estático posee la misma cantidad de nodos, elementos y el mismo tamaño.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

El desplazamiento máximo que sufre el punzón es de 2.712×10^{-1} mm como se observa en la figura 22.

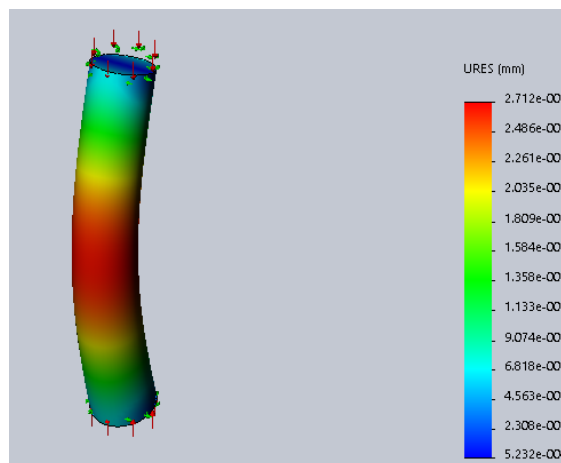


Figura 22. Desplazamientos en el análisis de pandeo del punzón superior

Fuente: El autor

El factor de seguridad de pandeo es de 4.425.

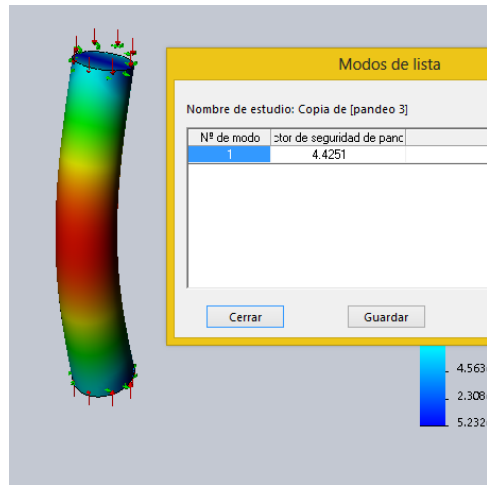


Figura 23. Factor de seguridad del punzón

Fuente: El autor

Punzón con reducción de diámetro para compactación

Para el análisis de este se punzón, que va hacer utilizado para compactación por golpes se consideró el mismo material y la misma presión con su equivalencia en fuerza. En el cual se determinaron los mismos parámetros que en el punzón superior.

- **Análisis estático**

El mallado de este punzón posee 11418 nodos, 7249 elementos con un tamaño de malla de 4.61 mm como se observa en la figura 24.

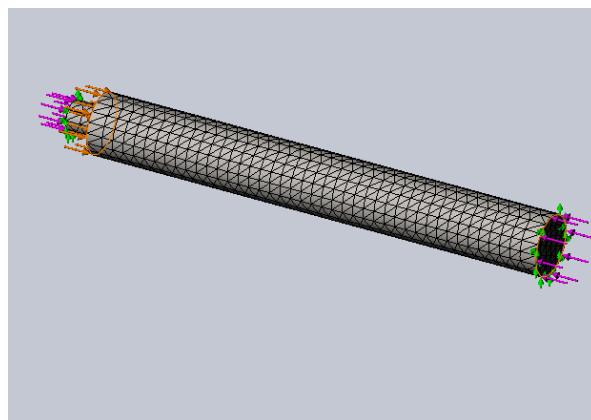


Figura 24. Mallado del punzón para compactación

Fuente: El autor

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Las tensiones de Von Mises máximas generadas en el análisis estático son de 913.456.704 N/ m², cuyo valor no supera el límite elástico del material que es 1910 MPa.

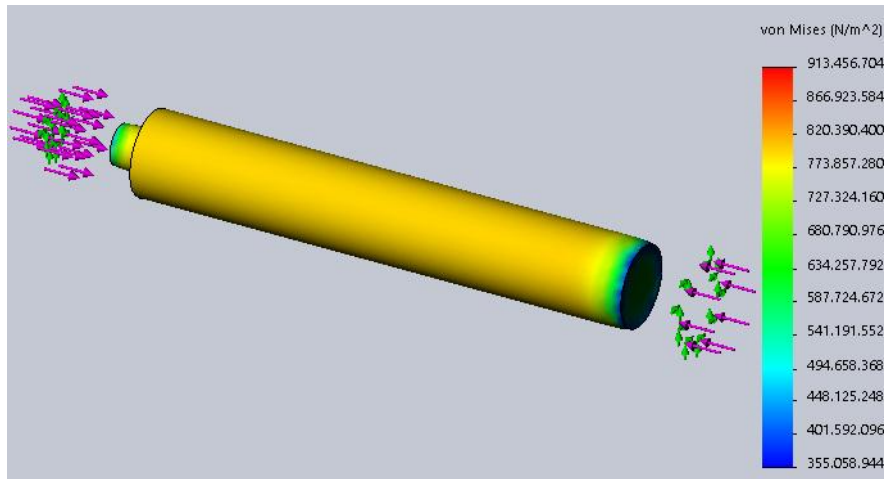


Figura 25. Esfuerzo de Von Mises del punzón para compactación

Fuente: El autor

El desplazamiento máximo generado en el análisis es de 4.07×10^{-1} mm como se observa en la figura 26.

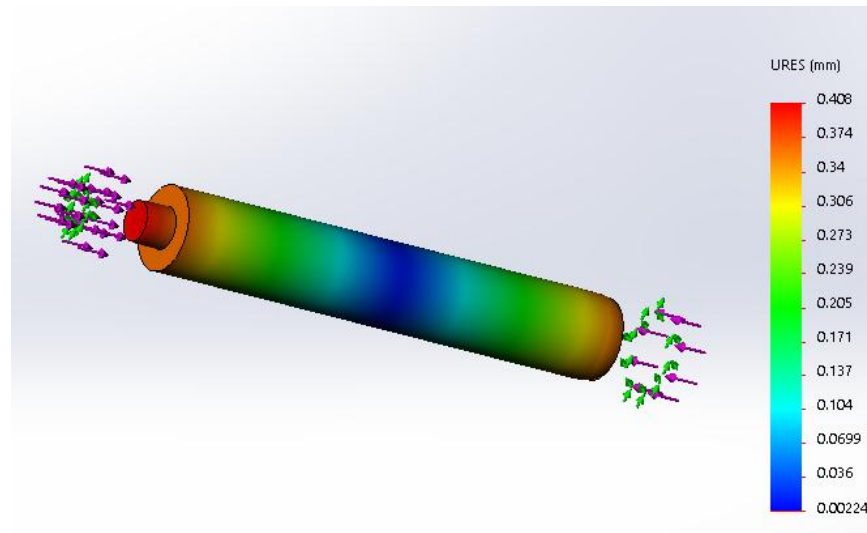


Figura 26. Desplazamiento en el punzón para compactación

Fuente: El autor

La deformación unitaria que sufre el punzón es de 3.37×10^{-3} como se observa en la figura 27.

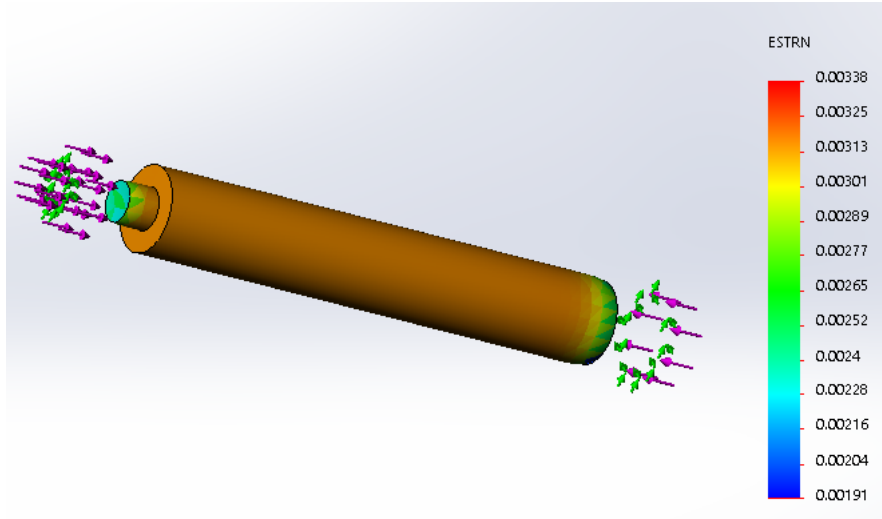


Figura 27. Deformación unitaria equivalente del punzón para compactación

Fuente: El autor

El factor de seguridad máximo que se obtuvo en el análisis es de 5.37 en los extremos de punzón como se puede observar en la figura y el factor mínimo de seguridad es de 2.09 que se distribuye a lo largo del punzón y que se visualiza en color rojo.

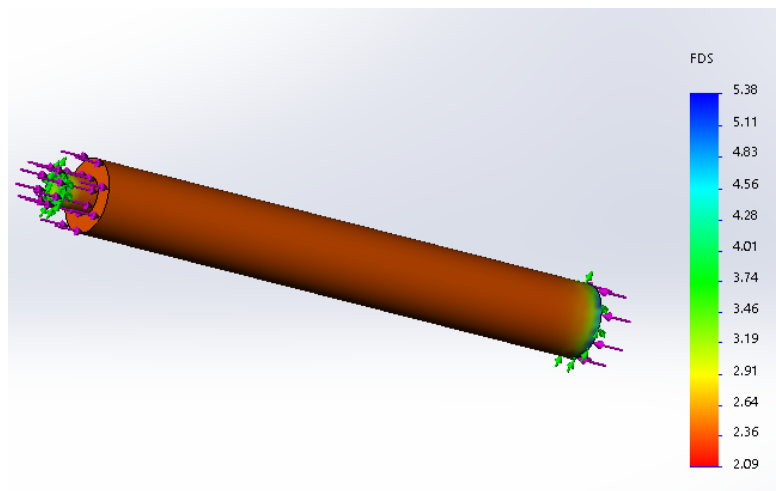


Figura 28. Factor de seguridad del punzón para golpeo

Fuente: Autor

- **Análisis de pandeo**

Los resultados obtenidos son los siguientes:

El desplazamiento máximo resultante es de 3.14×10^{-4} mm.

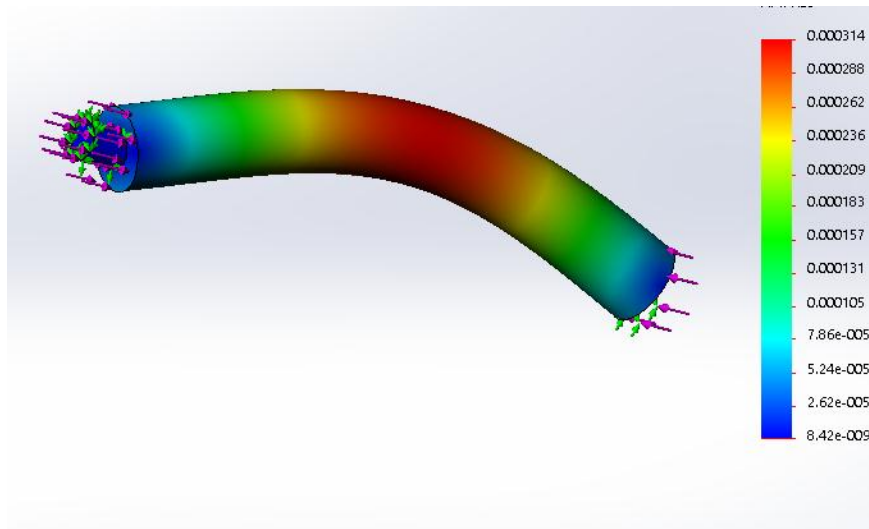


Figura 29. Desplazamiento resultante del análisis de pandeo

Fuente: El autor

El factor de seguridad obtenido en el análisis es de 5.022 como se observa en la figura 30.

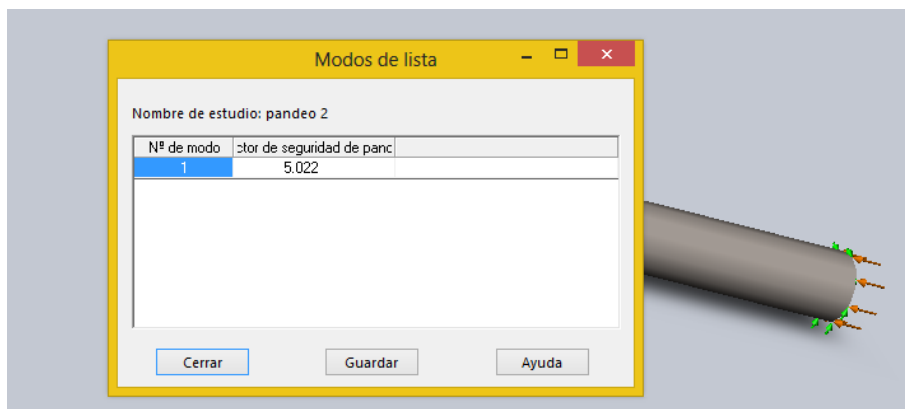


Figura 30. Factor de seguridad del punzón para golpeo

Fuente: El autor

Resultados de los análisis

Tabla 6. Análisis de molde circular y sus componentes

Molde circular					
Tensiones de Von Mises	Desplaz. Resultante	Deformación equivalente	Presión de contacto	Factor de seguridad	Factor de seg. del tornillo
803,2 MPa	1,04 mm	0,00335	810,98 MPa	Punzón 2,38 Tapa superior 9,08 Tapa inferior 10,98	Torn. 1 2,62 Torn. 2 2,53
Punzón superior – Análisis estático					
Tensión Von Mises	Desplazamiento resultante		Deformación equivalente	Factor de seguridad	
902,26 MPa	0,28 mm		0,0033	2,16	
Punzón superior –Pandeo					
Desplazamiento			Factor de seguridad		
0,27 mm			4,42		
Punzón para compactación – Análisis estático					
Tensión Von Mises	Desplazamiento resultante	Deformación equivalente	Factor de seguridad		
913,45 MPa	0,411 mm	0,0033	2,09		
Punzón para compactación –Pandeo					
Desplazamiento			Factor de seguridad		
0,00031 mm			5,02		

Fuente: El autor

3.2.2.2. Análisis del molde rectangular

- **Análisis estático (con punzón circular)**

Para este análisis se tomó la octava parte del molde con una probeta de acero que será compactada aplicando una presión de 689 MPa.

Mallado

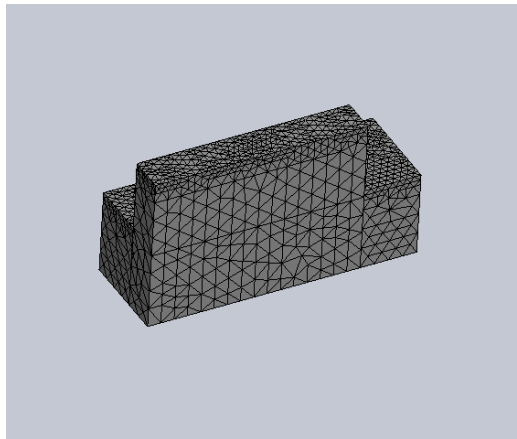


Figura 31. Mallado de molde rectangular con punzón circular

Fuente: El autor

Tensiones

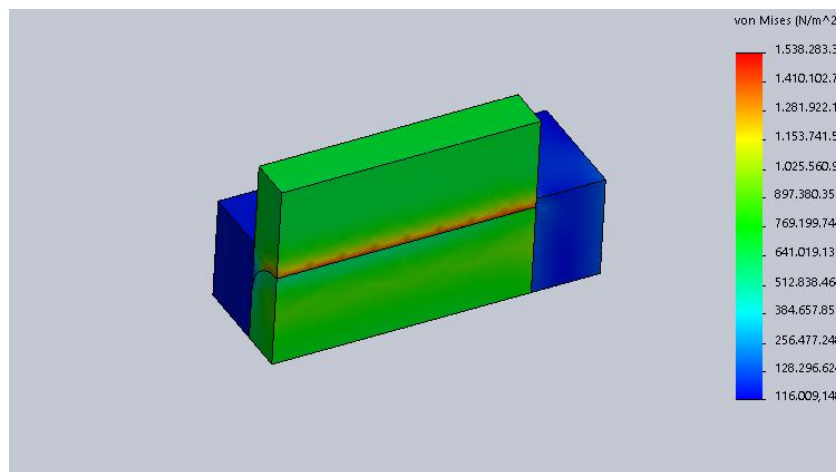


Figura 32. Esfuerzo de Von Mises del molde rectangular

Fuente: El autor

Desplazamientos

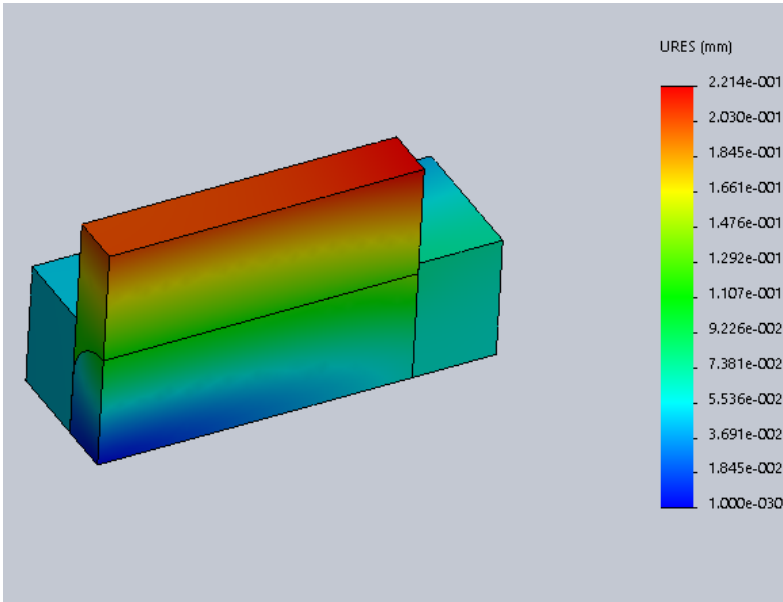


Figura 33. Desplazamiento del molde rectangular

Fuente: El autor

Deformación unitaria

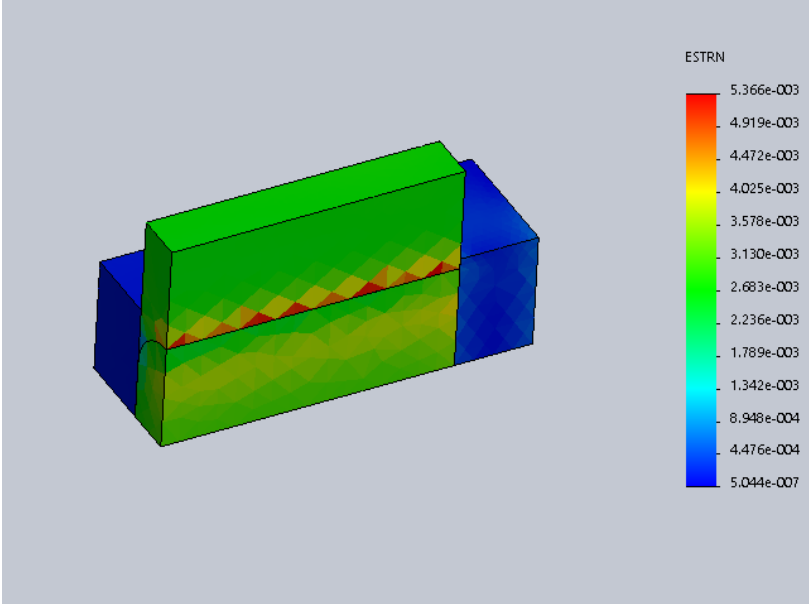


Figura 34. Deformación unitaria equivalente

Fuente: El autor

Presión de contacto

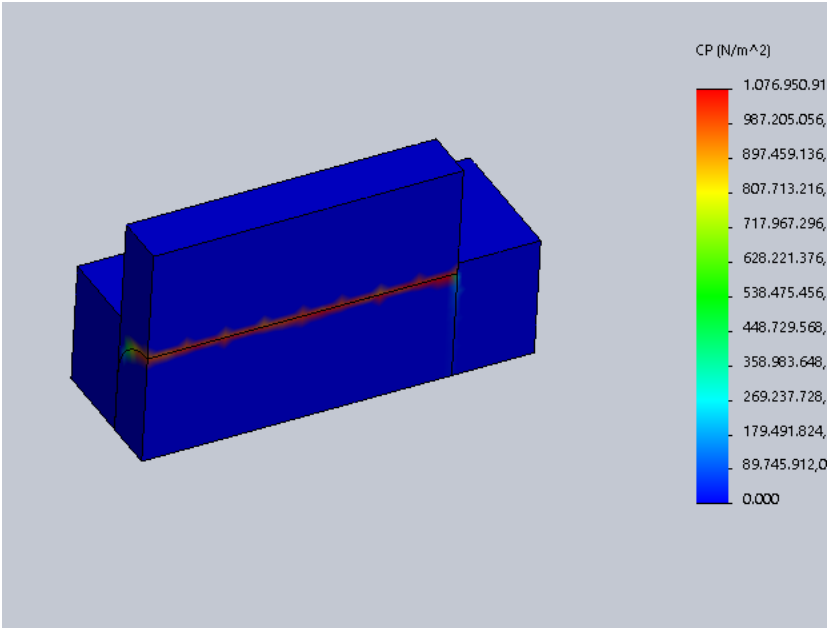


Figura 35. Presión de contacto entre el punzón y la probeta

Fuente: El autor

Factor de seguridad del punzón

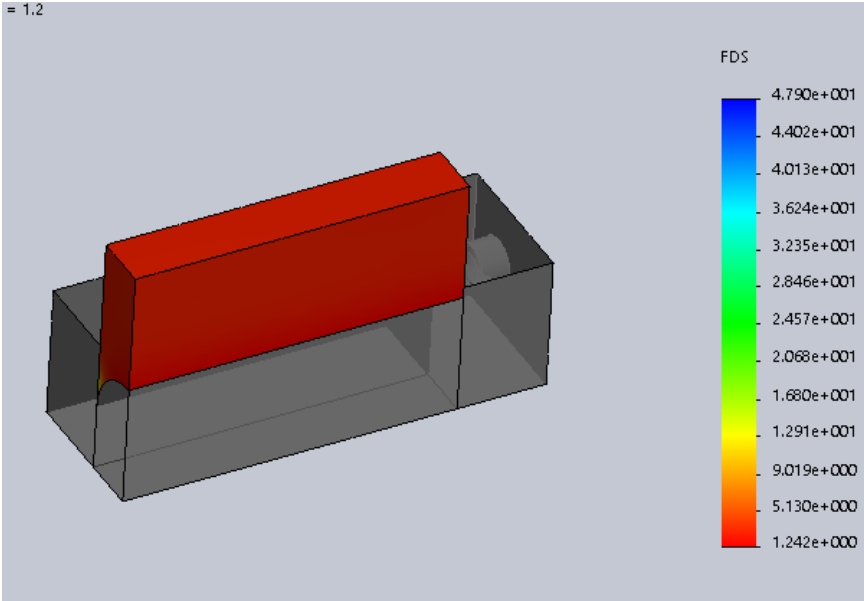


Figura 36. Factor de seguridad del punzón circular

Fuente: El autor

Factor de seguridad de la tapa frontal

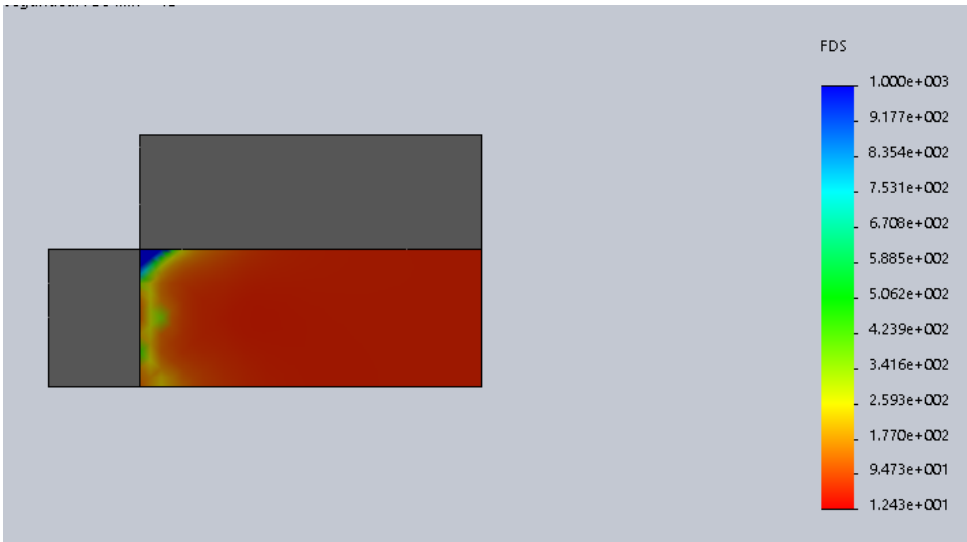


Figura 37. Factor de seguridad de la tapa frontal

Fuente: El autor

Factor de seguridad de la tapa lateral

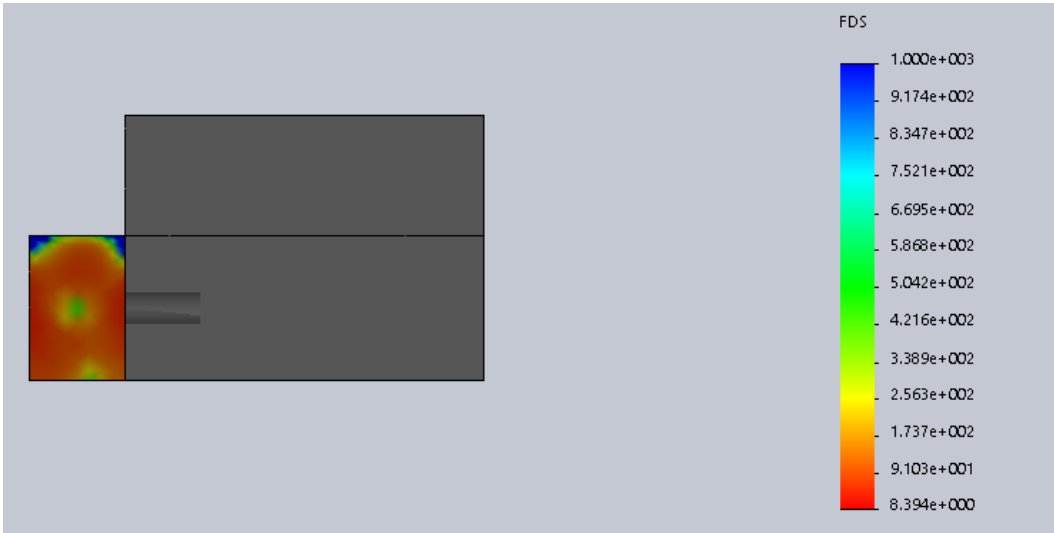


Figura 38. Factor de seguridad de la tapa lateral

Fuente: El autor

Comprobación del perno

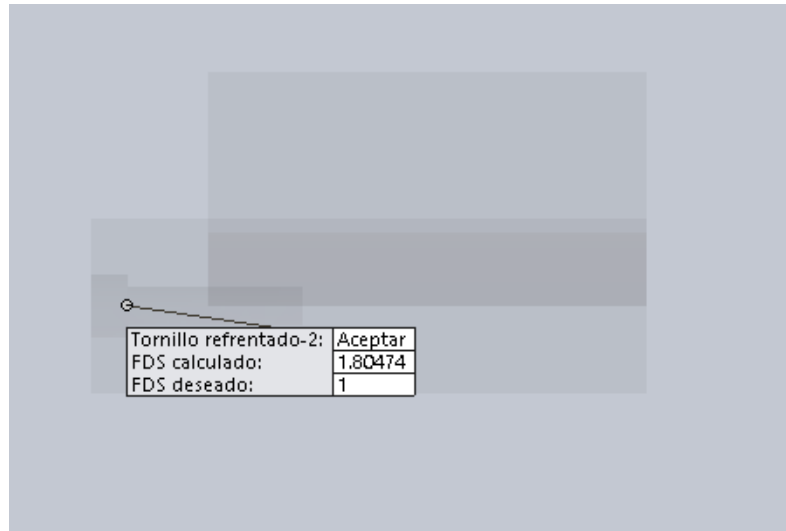


Figura 39. Factor de seguridad del perno

Fuente: El autor

- **Análisis estático (con punzón de cara plana)**

Mallado

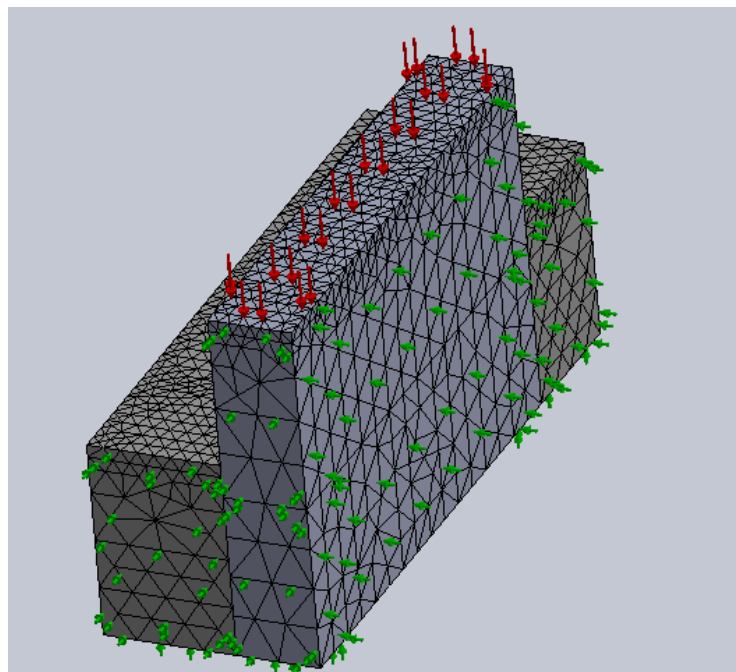


Figura 40. Mallado del molde rectangular con punzón de caras planas

Fuente: El autor

Tensiones Von Mises

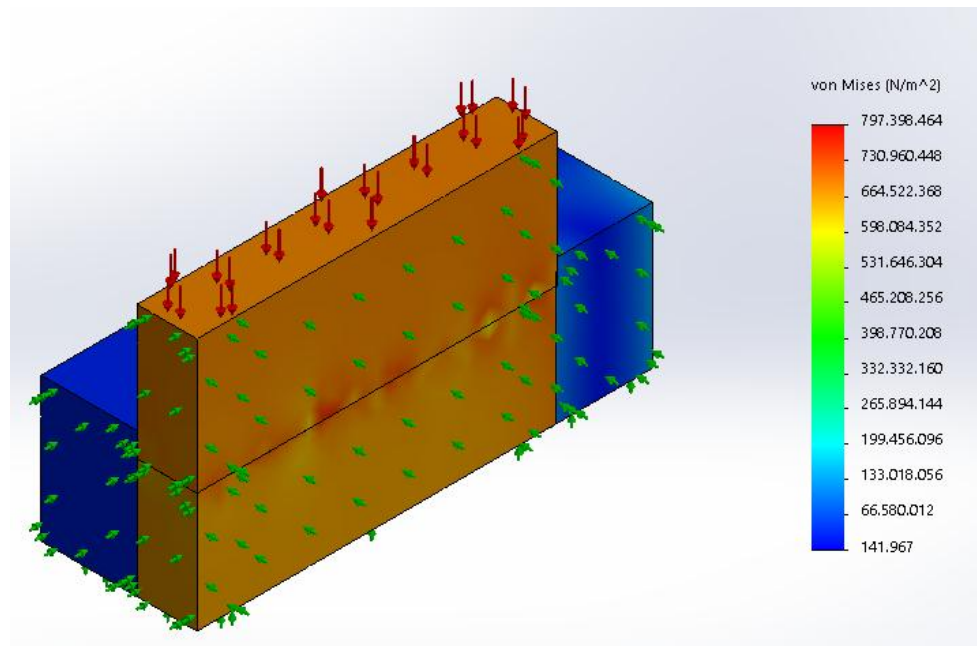


Figura 41. Esfuerzo de Von Mises del molde rectangular con punzón de caras planas

Fuente: El autor

Desplazamientos

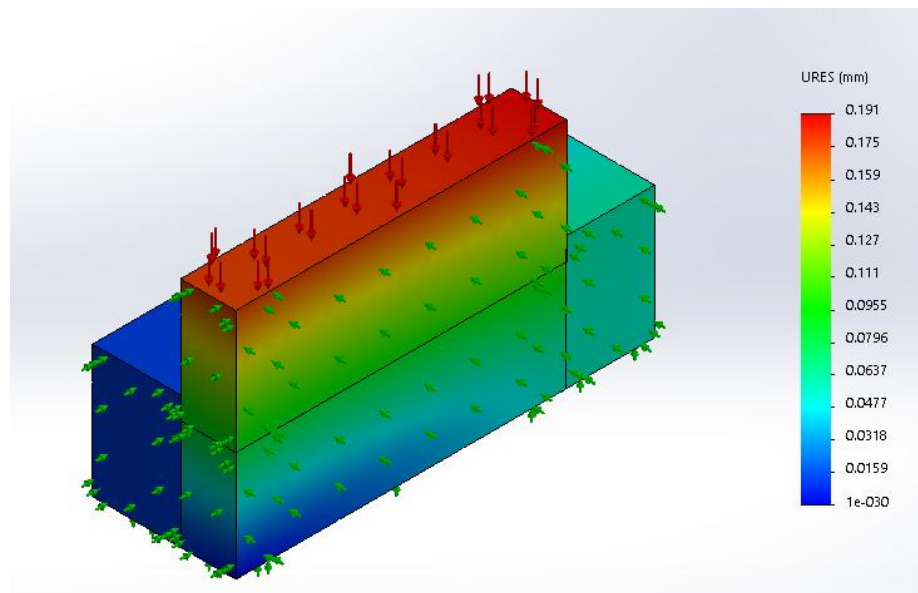


Figura 42. Desplazamiento del molde rectangular

Fuente: El autor

Deformación unitaria

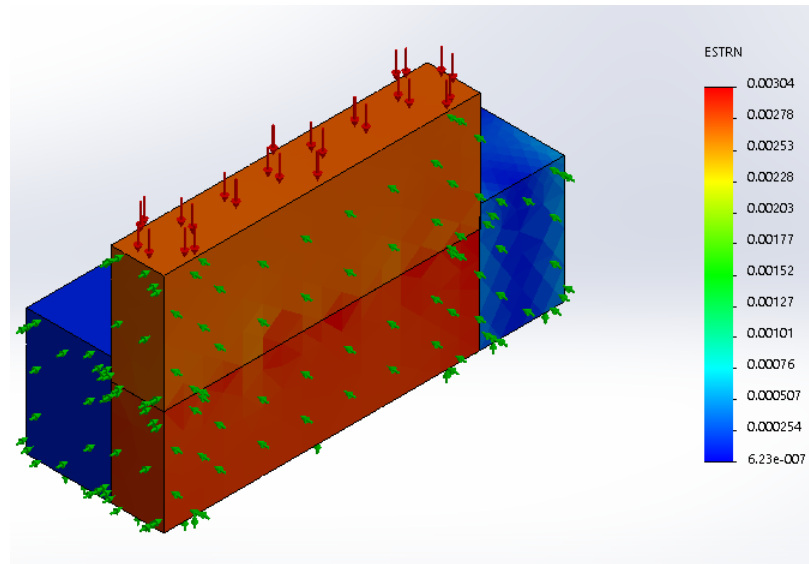


Figura 43. Deformación unitaria equivalente del molde rectangular

Fuente: El autor

Presiones de contacto

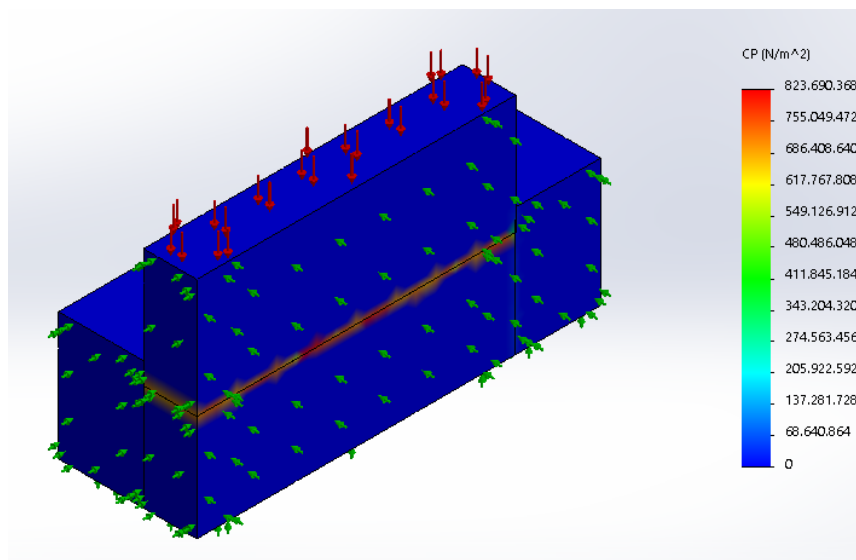


Figura 44. Presión de contacto entre el punzón de caras planas y la probeta

Fuente: El autor

Factor de seguridad del punzón

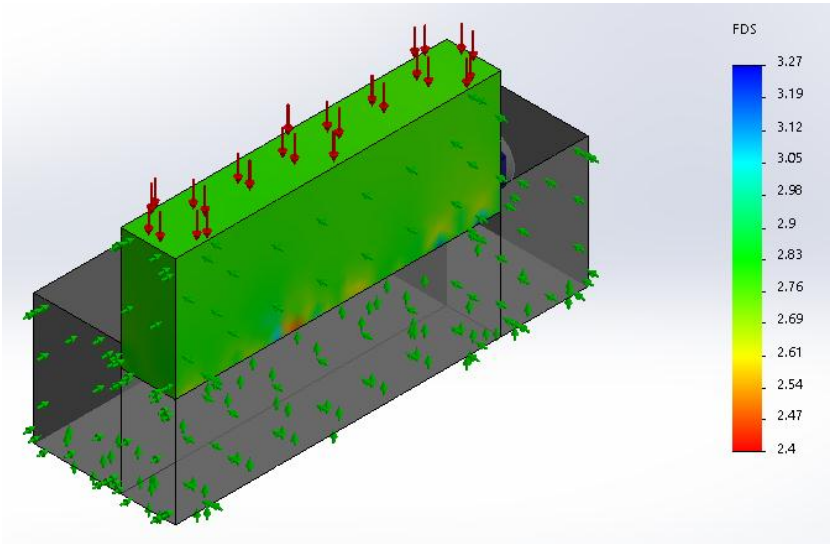


Figura 45. Factor de seguridad del punzón de caras planas

Fuente: El autor

Factor de seguridad de la tapa frontal

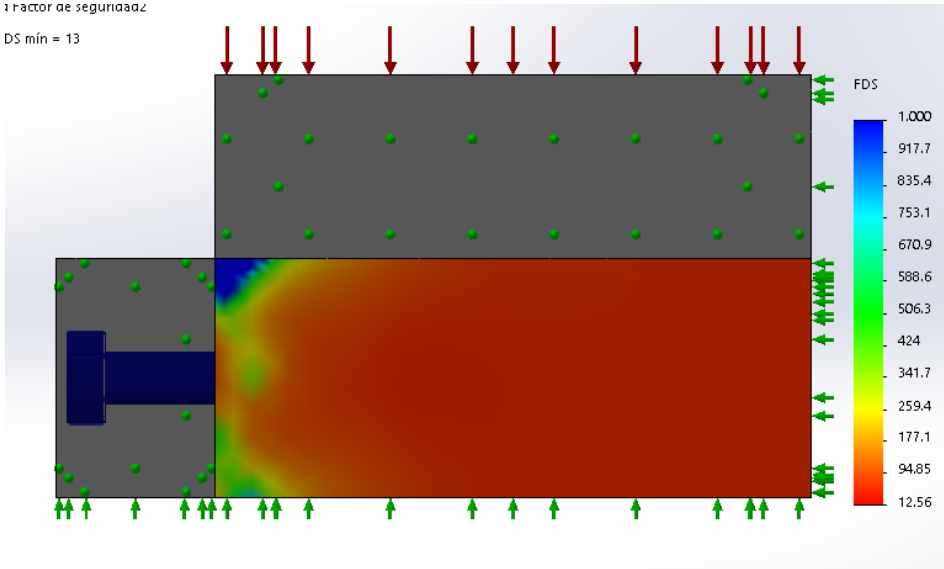


Figura 46. Factor de seguridad de la tapa frontal

Fuente: El autor

Factor de seguridad de la tapa lateral

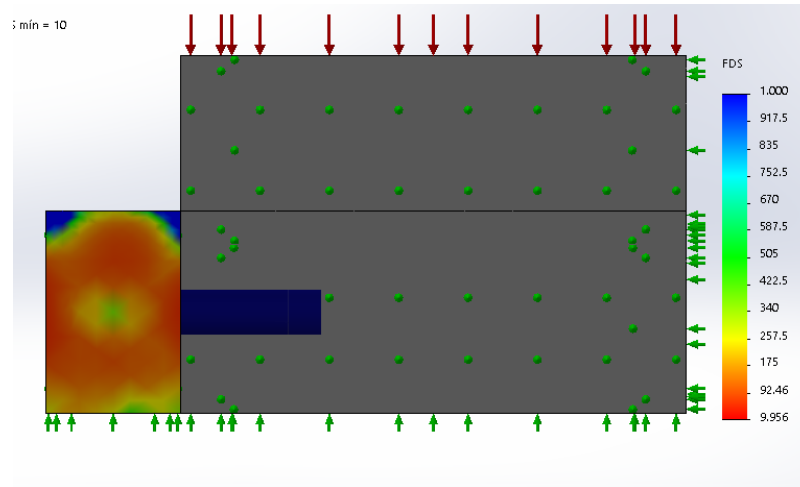


Figura 47. Factor de seguridad de la tapa lateral

Fuente: El autor

Resultados de los análisis

Tabla 7. Análisis de molde rectangular

Molde rectangular con punzón circular- Análisis estático					
Tensiones Von Mises	Desplaz. Resultante	Deformación equivalente	Presión de contacto	Factor de seguridad	F. de seg. tornillo
1538,2 MPa	0,22 mm	0,0053	1076,95 MPa	Punzón 1,24 Tapa frontal 12,4 Tapa lateral 8,39	Torn. 1 1,8
Molde rectangular con punzón de caras planas- Análisis estático					
Tensiones Von Mises	Desplaz. Resultante	Deformación equivalente	Presión de contacto	Factor de seguridad	F. de seg. tornillo
797.39 MPa	0,19 mm	0,003	823.69MPa	Punzón 2,4 Tapa frontal 12,56 Tapa lateral 9,95	Torn. 1 1,8

Fuente: El autor

3.2.3. Construcción del molde

3.2.3.1 Cálculo de velocidades de maquinado

Datos:

Material AISI H13

$V_c = 49$ m/min Ver anexo F

Diámetro de la fresa = 12 mm

Z (Número de dientes de la fresa) = 4

$f = 0.1$ mm/rev. Ver anexo G

Para la velocidad de corte se toma valores de corte para el desbastado de $V_c = 49$ m/min. Con un diámetro de fresa de 12 mm para el desbaste.

Para encontrar el factor de avance f se ingresa a la tabla del Anexo G con la $V_c = 49$ m/min seleccionada, una profundidad de corte de 2mm, el material es un acero endurecido y con la vida del filo de la herramienta de 1h.

Velocidad de giro del husillo (S)

Se calcula con la ecuación 3.5 según Catálogo Dormer.

$$S = \frac{V_c * 1000}{\pi * \emptyset * Z} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Donde:

S = velocidad de giro

V_c = velocidad de corte

\emptyset = diámetro de la herramienta

Z = número de dientes

$$S = \frac{49 * 1000}{\pi * 12 * 4}$$

$$S = 324,94 \frac{rev}{min}$$

Para el avance de la mesa (tasa de avance) de la fresa se tomó un valor de Z igual a 1 debido a que para el cálculo de S se tomó un valor de Z igual a 4.

Tasa de avance

Se calcula con la ecuación 3.6 según Catálogo Dormer

$$F = f * S * z \qquad \text{Ec. 3.6}$$

Donde

F = tasa de avance

f = factor de avance mm/rev

S = velocidad de giro de la herramienta rev/min

Z = núm de dientes

$$F = 0,1 * 324,94 \text{ rpm} * 1$$

$$F = 32,49 \text{ mm/min}$$

3.2.3.2. Cálculo de tolerancias

Para la calidad de tolerancias de acuerdo a la norma UNE 4-040-81 (ISO 286 (1)-62) tenemos que:

- Calidad de 4 a 11 para ejes y 5 a 11 en agujeros. Piezas que van a ser sometidas a ajustes.

En la tabla 8 se selecciona la calidad de tolerancias de acuerdo para un diámetro de 25 mm

Tabla 8. Calidades de tolerancias

Grupos de Diámetros (mm)	CALIDADES μm																	
	IT 01	IT 0	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16
$d \leq 3$	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
$3 < d \leq 6$	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
$6 < d \leq 10$	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
$10 < d \leq 18$	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
$18 < d \leq 30$	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
$30 < d \leq 50$	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
$50 < d \leq 80$	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
$80 < d \leq 120$	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
$120 < d \leq 180$	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
$180 < d \leq 250$	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
$250 < d \leq 315$	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
$315 < d \leq 400$	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
$400 < d \leq 500$	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000
	Ultrapre- cisión		Calibre y piezas de gran precisión			Piezas o elementos destinados a ajustar						Piezas o elementos que no han de ajustar						

Fuente: OCW tolerancias DIN

Para el diámetro de 25 mm se selecciona una calidad de IT13 debido a que es una pieza que debe desplazarse con facilidad a través del canal del molde, la cual nos da una tolerancia de 330 μm .

Para corroborar si las tolerancias seleccionadas están dentro del rango de acuerdo al mecanizado se tiene la siguiente tabla

Tabla 9. Calidad de tolerancias para mecanizado

CALIDADES USUALES INDICADAS PARA LOS PRINCIPALES PROCESOS DE MECANIZADO																
IT (calidad)	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
OXICORTE SERRADO																
LIJADO-CEPILLADO TALADRADO FRESADO																
TALADRADO+ESCA. ESCAREADO BROCHADO TORNEADO																
RECTIFICADO AFINADO SUPERFIC. SUPERDEFINICIÓN																

Fuente: OCW tolerancias DIN

3.2.3.3. Selección del perno

Para la selección del perno se tomó en consideración los siguientes parámetros los cuales fueron utilizados en el software.

Molde circular

Por la dificultad de encontrar la fuerza cortante al que están sometidos los pernos debido a los distintos esfuerzos que se presentan en la compactación de polvos, al aplicar la fuerza sobre el punzón y su distribución en la matriz desmontable, se partió asumiendo una medida inicial del perno de $\frac{1}{4}$ de pulgada para el análisis en el software; pero no satisfacía las condiciones obteniéndose un factor de seguridad de 0,89. Por lo tanto se aumenta el diámetro del perno a $\frac{5}{16}$ pulgadas obteniéndose un factor de seguridad adecuado de 2,62, entonces:

La medida seleccionada del perno es de $\frac{5}{16}$ pulgadas x $1\frac{1}{2}$ pulgadas con lo cual se procede a obtener los parámetros de ensayo del mismo según tablas, así:

- El tipo de perno utilizado es un SAE 8 de cabeza hueca hexagonal cuyo material es de acero aleado de medio carbono, de rosca basta UNC. Además que para el análisis se le considero un ajuste exacto entre las 2 tapas del molde.
- El número de hilos del perno es de 20 hilos/pulgada. **Ver anexo C.**
- Para su resistencia se considera la resistencia mínima a la prueba de 120 kpsi (830 MPa). **Ver anexo D.**
- El torque aplicado al perno en la simulación es de 30.4 N-m. **Ver anexo E**

Molde rectangular

De la misma manera que el caso anterior, se partió asumiendo una medida inicial del perno de $\frac{1}{8}$ de pulgada para el análisis en el software; pero no satisfacía las condiciones obteniéndose un factor de seguridad de 0,65. Por lo tanto se aumentó el diámetro del perno a $\frac{1}{4}$ pulgadas obteniéndose un factor de seguridad adecuado de 1,8, validando la medida del perno, entonces tenemos:

La medida del perno seleccionada es de ¼ pulgadas x 1 pulgada con lo cual se procede a obtener los parámetros de ensayo del mismo según tablas, así:

- El tipo de perno utilizado es un SAE 8 de cabeza hueca hexagonal cuyo material es de acero aleado de medio carbono, de rosca basta UNC. Además que para el análisis se le considero un ajuste exacto entre las 2 tapas del molde.
- El número de hilos del perno es de 20 hilos/pulgada. **Ver anexo C.**
- Para su resistencia se considera la resistencia mínima a la prueba de 120 kpsi (830 MPa). **Ver anexo D.**
- El torque aplicado al perno en la simulación es de 13,7 N-m. **Ver anexo E**

3.2.4. Tratamiento térmico de los moldes

Con la finalidad de aumentar la dureza de los elementos del molde se realizó un temple para lo cual se elevó la temperatura de las partes a una temperatura de 950 °C según recomendación del fabricante (Catálogo de Iván Bohman) por un tiempo aproximado de 40 minutos y el enfriamiento fue en aceite con lo cual se llegó a obtener una dureza de 50 HRC (490 HB) con las condiciones recomendadas.

3.2.5. Cálculo de la cantidad de polvo para obtención de las probetas

Molde 1. Compactación transversal

Aluminio

La presión de compactación máxima del aluminio es de 140 MPa según la tabla 2 del documento tomada del Metal Handbook Volumen 7.

La cantidad de polvo de aluminio se determina mediante lo siguiente:

Densidad aparente 1,116 g/cm³ según ECKART (<http://bibing.us.es>)

Relación de compresión de 2 tomado del Metal Handbook Volumen 7.

Se calcula con la ecuación 3.7 para el cálculo del volumen del cilindro

$$V = \pi \times \frac{D^2}{4} \times H \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde:

D = diámetro de la probeta cilíndrica

H = altura de la probeta

V = volumen

$$V = \pi \times \frac{(2,53 \text{ cm})^2}{4} \times 15 \text{ cm}$$

$$V = 75,41 \text{ cm}^3 \times 2$$

$$V = 150,82 \text{ cm}^3$$

La masa se calcula despejando de la ecuación 3.8 de la fórmula de la densidad.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Donde:

m = masa

ρ = densidad

V = volumen

$$m = \rho \times V$$

$$m = 1,116 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 150,82 \text{ cm}^3$$

$$m = 168,32 \text{ g}$$

Bronce

La presión de compactación máxima del bronce es de 689 MPa según la tabla 2 del documento tomada del Metal Handbook Volumen 7.

Densidad aparente 5,2 g /cm³ (para granulometría de 630-800 um) según N. Krivij.

Relación de compresión de 2,2 tomado del Metal Handbook Volumen 7.

$$V = 75,41 \text{ cm}^3 \times 2,2$$

$$V = 165,90 \text{ cm}^3$$

$$m = \rho x V$$

$$m = 5,2 \frac{g}{cm^3} x 165,9 cm^3$$

$$m = 862,68 g$$

Acero

La presión de compactación máxima del acero es de 414 MPa según la tabla 2 del documento tomada del Metal Handbook Volumen 7.

Densidad aparente 2.8736 g/cm³ (acero inox) según ECKART (<http://bibing.us.es>)

$$V = 75,41 cm^3 x 1,6$$

$$V = 120,65 cm^3$$

$$m = \rho x V$$

$$m = 2,8736 \frac{g}{cm^3} x 120,65 cm^3$$

$$m = 346,7 g$$

Molde 2. Para compactación longitudinal con punzón circular

Aluminio

La cantidad de polvo de aluminio se determina mediante lo siguiente:

Se calcula el volumen de la probeta que se obtiene en el molde rectangular con la ecuación 3.9 para el cálculo del volumen del cilindro

$$V = \pi x r^2 x h \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde:

r = radio de la probeta cilíndrica

h = altura de la probeta

V = volumen

$$V = \pi x 1.265^2 x 15$$

$$V = 75,4 cm^3 x 2$$

$$V = 150,81 cm^3$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho x V$$

$$m = 1,116 \frac{g}{cm^3} x 150,81$$

$$m = 168,31g$$

Bronce

$$V = 75,4 cm^3 x 2,2$$

$$V = 165,88 cm^3$$

$$m = \rho x V$$

$$m = 5,2 \frac{g}{cm^3} x 165,88 cm^3$$

$$m = 862.58g$$

Acero

$$V = 75,4 cm^3 x 1,6$$

$$V = 120,64 cm^3$$

$$m = \rho x V$$

$$m = 2,8736 \frac{g}{cm^3} x 120,64$$

$$m = 346,67 g$$

Para compactación longitudinal con punzón de caras planas

Aluminio

La cantidad de polvo de aluminio se determina mediante lo siguiente:

Se calcula el volumen de la probeta con la ecuación 3.10 para el cálculo del volumen del prisma rectangular.

$$V = l x a x h$$

Ec.3.10

Donde:

l = largo de la probeta

a = ancho de la probeta

h = alto de la probeta

$$V = 15 \times 2,5 \times 2,5$$

$$V = 93,75 \text{ cm}^3 \times 2$$

$$V = 187,5 \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = 1,116 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 187,5$$

$$m = 209,25 \text{ g}$$

Bronce

$$V = 93,75 \text{ cm}^3 \times 2,2$$

$$V = 206,25 \text{ cm}^3$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = 5,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 206,25 \text{ cm}^3$$

$$m = 1072,5 \text{ g}$$

Acero

$$V = 93,75 \text{ cm}^3 \times 1,6$$

$$V = 150 \text{ cm}^3$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = 2,8736 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 150$$

$$m = 431,04 \text{ g}$$

3.2.6. Obtención de los polvos metálicos

Para la obtención de los polvos metálicos de aluminio, bronce y acero, se procedió a torneear ejes de los materiales mencionados y se obtuvo una viruta fina de cada material. Esta viruta se le trituro en un molino manual hasta obtener partículas más pequeñas y con paso final se procedió a tamizar estas partículas, de esta manera se obtuvo los polvos de cada material que fueron utilizadas para la compactación en los moldes fabricados.



Figura 48. Polvo de aluminio (tamaño 800 um)

Fuente: El autor



Figura 49. Polvo de bronce (tamaño 800 um)

Fuente: El autor



Figura 50. Viruta de acero (tamaño 2000um)

Fuente: El autor

3.3. Ensayos para obtención de las probetas

La máxima fuerza en el molde rectangular que se requiere aplicar en la compactación es de 2605,78 kN (molde rectangular, compactación longitudinal), mientras que para el molde circular es de 346,38 kN

Obtención de probetas

La máxima presión que se aplicó para obtener las probetas en el molde circular fue de 433 MPa, mientras que el rectangular la máxima presión que se aplicó fue de 396 kN.

En los ensayos se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 10. Resultados de obtención de las probetas

Compactación de las probetas						
Molde Circular						
Material	Fuerza de compactación	Tamaño del polvo	N de ensayos por golpes	Diámetro	Altura	Masa
Aluminio	70,2 kN	800um	1	25,3 mm	3,4 cm	158 g
	78,5 Kn		2		2,9 cm	
	70,8 kN		3		2,7 cm	
	70,6 kN		4		2,3 cm	
	132,95 kN		5		3,3 cm	
				Alt. total	14,6 cm	
Bronce	194,8 kN	800 um	1	25,3 mm	2,7	438 g
	181,5 kN		2		2,9	
	182,6 kN		3		2,2	
	184,4 kN		4		2,8	
	179,6 kN		5		2	
	187 kN		6		2,1	
				Alt. total	14,7 cm	
Acero	165,6 kN	2000 um	1	25,3 mm	2	338 g
	211,15 kN		2		2,1	
	174,5 kN		3		1,7	
	182,5 kN		4		3,8	
	217,8 kN		5		1,2	
	199,4 kN		6		1,3	
	174,6 kN		7		2,3	
				Altura total	14,4 cm	
Molde Rectangular con punzón de caras planas						
Material	Presión de compactación	Tamaño del polvo	Ensayo N-	Ancho	Altura	Masa en verde
Aluminio	759 kN	800 um	1	25,3 mm	23	197 g
Bronce	1500 kN	800 um	1	25,3 mm	24	618 g
Acero	1200 kN	2000 um	1	25,3 mm	22	336 g

Fuente: El autor

3.4. Presupuesto

Tabla 11. Presupuesto

MOLDE RECTANGULAR	
Costo de materiales	115 \$
Mecanizado CNC	100 \$
Mecanizado convencional (rectificado y mano de obra)	90 \$
Tratamiento térmico	50 \$
Rectificado de los punzones	35 \$
Costo Total:	390 \$

Fuente: El autor

Tabla 12. Presupuesto molde 2

Costo total MOLDE CIRCULAR	
Costo de materiales	120 \$
Mecanizado CNC	110 \$
Mecanizado convencional (rectificado y mano de obra)	75 \$
Tratamiento térmico	50 \$
Punzones	40 \$
Total:	395 \$

Fuente: El autor

Tabla 13. Costos de polvos metálicos

Costo de polvos metálicos	
Obtención del aluminio (material y torneado)	20 \$
Obtención del bronce (material y torneado)	40 \$
Obtención del acero (material y torneado)	25 \$
Imprevistos	40 \$
Costo total	125 \$

Fuente: El autor

El costo total del proyecto

$$CT = C. \text{molde rectangular} + C. \text{molde circular} + C. \text{polvos metálicos}$$

$$CT = 390 \$ + 395\$ + 125 \$$$

$$CT = 910 \$$$

3.5 Especificaciones técnicas

3.5.1. Dimensiones y material del molde

El molde circular consta de dos tapas de acero AISI H13, las cuales son la base del molde por donde recorren los punzones, se les realizó un mecanizado en forma semicircular cuyo radio es de 12,75 mm y tienen una longitud de 200 mm, las 2 partes del molde están unidas mediante 6 pernos de sujeción de cabeza hueca hexagonal. Posee también tres punzones el punzón superior que tiene 150 mm de longitud y un diámetro de 25,3 mm, un punzón inferior en cual tiene el mismo diámetro que el superior y una longitud de 60 mm y también posee un punzón superior con reducción de diámetro el cual tiene una longitud de 210 mm el mismo que sirve para compactar por golpes, además también posea una tapa inferior de 25,3 cm de diámetro con una altura de 1 cm que se utiliza para aumentar el espacio de desplazamiento en el interior del molde y de esta manera se compacto el polvo cada 3 cm aproximadamente. Además de poseer unas guías para facilitar su extracción todos los elementos del molde están templados para obtener un endurecimiento de los mismos.

El molde rectangular consta de cuatro tapas las cuales están sujetas con pernos de cabeza hueca hexagonal formando un prisma rectangular, además posee dos punzones en forma semicircular por uno de sus extremos las cuales al compactarse forma un cilindro de 25 mm de diámetro, la longitud de la probeta obtenida es de 150 mm de longitud los materiales de este molde son de acero AISI H13. También se ensayó con punzones de caras planas que tiene una dimensión de 25 x150 x 30 mm, de igual manera todos estos elementos están templados.

3.5.2. Presiones aplicadas en la compactación

Las presiones aplicadas para la compactación de los polvos metálicos se aplica en forma uniaxial sobre el punzón superior y son de:

Molde circular

Para el polvo de aluminio la presión de compactación aplicada fue de 140 MPa.

Para el polvo de bronce la presión de compactación aplicada fue de 400 MPa.

Para el polvo de acero la presión de compactación aplicada fue de 370 MPa.

Molde rectangular

Para el polvo de aluminio la presión de compactación aplicada fue de 180 MPa.

Para el polvo de bronce la presión de compactación aplicada fue de 550 MPa.

Para el polvo de acero la presión de compactación aplicada fue de 350 MPa.

3.5.3. Cantidad de polvo para compactar en el molde

Las cantidades de polvo para cada molde son de:

Molde Circular:

Tabla 14. Masa en polvo para compactación transversal

MATERIAL	Molde circular (g)
Aluminio	168,32
Bronce	862,68
Acero	346,7

Fuente: El autor

Molde Rectangular:

Tabla 15. Masa en polvo para compactación longitudinal

MATERIAL	Con punzón circular	Con punzón de caras planas
Aluminio	168,31 g	209,25 g
Bronce	862.58g	1072.5 g
Acero	347,67 g	431,04 g

Fuente: El autor

3.5.4. Procedimiento

Para la obtención de las probetas tenemos el siguiente procedimiento:

Molde circular

1. Se coloca en la parte inferior del molde el punzón de 60 mm o a su vez la tapa de 10 mm de alto las cuales nos sirve para contener el polvo que es ingresado por la parte superior del molde.



Figura 51. Partes del molde

Fuente: El autor

2. Se llena por la parte superior una altura de 50 mm de polvo metálico y luego se ingresa el punzón superior para cerrar completamente el molde.



Figura 52. Molde lleno de polvo metálico

Fuente: El autor

3. Ingresar el molde a la máquina de compresión el molde verticalmente y centrado para que la carga se aplique uniformemente tanto en el punzón inferior como en el punzón superior.



Figura 53. Molde compactado en la máquina de compresión

Fuente: El autor

4. Esperar que se aplique la fuerza necesaria para su compactación total de acuerdo al material que se esté ensayando.



Figura 54. Aplicación de la carga

Fuente: El autor

5. Seguidamente se obtiene el primer golpe compactado y se procede a retirar el punzón superior para realizar el llenado de 50 mm de polvo metálico aflojando los tornillos. Así, sucesivamente se realiza el mismo proceso hasta obtener la altura deseada de la probeta

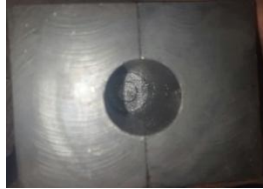


Figura 55. Primer golpe para compactación del polvo

Fuente: El autor

6. Para la extracción de la probeta final se debe retirar completamente los pernos y levantar con mucho cuidado la tapa superior del molde, para esto posee el molde unas guías que facilita el proceso de retirar la tapa. Una vez retirado todo esto se puede observar la probeta final.



Figura 56. Probeta compactada

Fuente: El autor

7. Para extraer completamente la probeta del molde se debe realizar un pequeño golpe por uno de sus extremos para que sea más fácil su extracción sin que se pueda romper el producto.



Figura 57. Probeta final

Fuente: El autor

- Finalmente se procedió a obtener sus medidas finales y su peso final.



Figura 58. Medición de la probeta

Fuente: El autor

Molde rectangular.

- Se coloca el punzón inferior en el extremo del molde para proceder a llenar la cantidad necesaria del polvo metálico para obtener la probeta deseada.



Figura 59. Llenado del polvo en el molde

Fuente: El autor

2. Se coloca el otro punzón en la parte superior del molde para sellarlo completamente y que pueda ingresar en la máquina de compresión. Para lo cual debe estar completamente nivelado para que el punzón pueda desplazarse uniformemente.



Figura 60. Molde lleno del polvo metálico

Fuente: El autor

3. Ingresar a la máquina de compresión el molde para aplicar la respectiva carga dependiendo del material y esperar que se compacte completamente el polvo metálico.



Figura 61. Compactación del molde

Fuente: El autor

4. Para la extracción de la probeta final es necesario retirar los tornillos de las tapas laterales lo que facilita el proceso de extracción.



Figura 62. Extracción de la probeta

Fuente: El autor

5. Se obtiene la probeta final compactada para posteriormente verificar las medidas y pesar la misma.

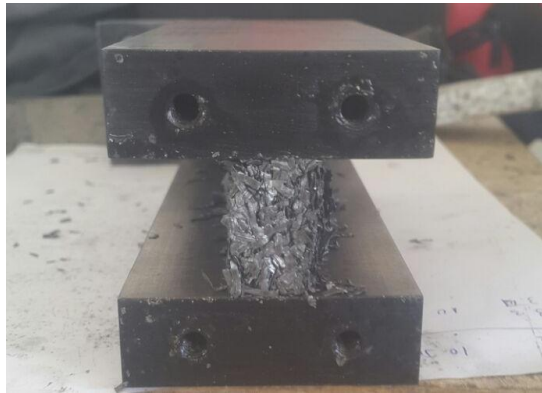


Figura 63. Probeta final

Fuente: El autor

3.5.5. Dimensiones de la probeta obtenida y modo de extracción.

En el molde circular la probeta obtenida tiene las siguientes dimensiones:

Un diámetro de 25,3 mm, una longitud de 150 mm de alto en aluminio, acero y bronce. Se realizó una compactación transversal por golpeo, es decir de 3, 6, 9 cm aproximadamente y así sucesivamente.

En el molde rectangular la probeta obtenida posee las siguientes dimensiones:

Un diámetro de 25,3 mm, una longitud de 150 mm en los 3 materiales. Se realizó una compactación longitudinal.

En el molde rectangular de caras planas la probeta tiene un ancho de 25,3, un alto de 25 y una longitud de 150 mm

CAPÍTULO IV.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Para el diseño del molde se consideró 2 parámetros fundamentales que sea de fácil extracción y como obtener la mejor compactación de los polvos, por tanto se elaboró dos tipos de moldes para compactación longitudinal y transversal en los 2 casos moldes desmontables. El mejor diseño del molde resultante fue el molde circular de compactación transversal, que es también de fácil extracción.
- Los materiales seleccionados para la elaboración de los moldes y de los punzones son de acero AISI H13 que es un material para trabajos en caliente, posee alta resistencia mecánica, también por la facilidad en el mecanizado y su alta dureza a realizar un tratamiento térmico en este caso de un temple enfriado en aceite.
- La obtención de las probetas para el molde circular se lo realizó en varios golpes, para el aluminio se logró obtener la longitud deseada en 5 golpes es decir se compacto aproximadamente 3 cm en cada golpe. Para el caso del bronce se logró obtener en 6 golpes aproximadamente 2,5 cm compactados en cada golpe. Para el caso del acero el cual no se pudo obtener polvo metálico, por lo cual se ensayó con virutas lo más finas posibles, la longitud deseada se logró obtener en 7 golpes aproximadamente 2,2 cm compactados en cada golpe como se puede observar en la tabla 10.
- Las relaciones de compresión que se pudo obtener en los ensayos de compactación de polvos fueron de 2 para el aluminio, de 2,2 para el bronce y de 1,6 para el acero las cuales están cercanos a los valores de la tabla seleccionada de metal handbook, estos resultados se obtuvieron aplicando las presiones que se puede encontrar en la tabla de resultados número 10.

- La probeta que mejor compactación fue la de la acero aplicando la presión que recomienda la tabla 1 del documento tomado del metal handbook para compactación isostática en frío, esta probeta fue la que mejor resistencia se pudo observar debido a que el tamaño de las partículas dio una mejor unión, la segunda con mayor resistencia fue la probeta de aluminio y por último la probeta de bronce.
- Las cantidades de polvo calculadas inicialmente pueden variar al momento de obtener las probetas, debido a la presión que se le aplique en la compactación de polvos metálicos ya que si mayor es la presión mayor cantidad de polvo se necesitará para obtener la probeta de 15 cm de longitud y por lo contrario si menor es la presión se necesita menor cantidad de polvo para obtener la misma longitud
- Para el análisis estático en el simulador de los moldes se debe aplicar un mallado de curvatura de 6 mm el cual se ajustado de mejor manera para las partes del molde y en las partes críticas se puede aplicar un refinado de malla de 2 mm, es decir para los agujeros de los tornillos, caras donde se aplica la presión.

4.2 Recomendaciones

Para la compactación

- Se recomienda aplicar uniformemente la carga sobre los punzones para evitar cargar de esfuerzos innecesarios en otras direcciones al molde y de ser posible realizar los ensayos en una prensa adecuada para este método de compactación de polvos. Con lo cual se puede lograr mejor compactación de los mismos.
- Se recomienda ajustar completamente los tornillos de los moldes para evitar que se puedan cargar demasiado y su posterior rotura, además de evitar el pandeo de los punzones los cuales no se desplazarían uniformemente.

Para la extracción de probetas:

- Se recomienda tener mucho cuidado ya que las probetas obtenidas resultantes son muy frágiles, en su extracción se recomienda realizar un leve golpe en uno de sus extremos o también colocar algún tipo de lubricante previamente en los canales del molde.

1. Bibliografía

- [1] C. Gónzales, «Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria,» 2010. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/47988078/Unidad-13-Pulvimetalurgia>.
- [2] J. C. Cante, *Simulación numérica de de procesos de compactación de pulvimateriales. Aplicación de técnicas de cálculo paralelo*, Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña, Escuela Superior Técnica de Ingenieros de Camins, 1995.
- [3] L. Osorio Valencia, «Obtención y caracterización por vía pulvimetalúrgica de la matriz de aluminio reforzada con particulas intermetálicas de CuAl₂ y Cu,» Ingeniero en materiales, Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería en Materiales, Cali, 2011.
- [4] F.R. Morral, E. Jimeno, P. Molera, «Metalurgia General. tomo II,» de *Metalurgia de los polvos*, Barcelona, Bogotá, Buenos Aires, Reverté S. A., Julio de 2004, p. 978.
- [5] Almudena Manzanares, «Estudio de la viabilidad de aceros sinterizados reforzados con malla de acero inoxidable,» Ingeniera Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Leganés, 2011.
- [6] G. Navarro Vallejo, «Obtención de aceros sinterizados de baja aleación a partir de partículas de tamaños inferiores al convencional,» Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Madrid, 2011.
- [7] S. Gil Gómez, «Comportamiento tribológico de materiales porosos para la fabricación de prótesis,» Ingeniero Industrial, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales, Valladolid, 2012.
- [8] Ó. Perrote, «Diseño y puesta a punto de un sistema de vacío para sinterización de probetas pulvimetalúrgicas de acero inoxidable,» Ingeniero Industrial, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales, Valladolid, 2013.
- [9] D. Borkosky, *Tecnologías y procesos de producción - Metalurgia de Polvos*, Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,

2012.

- [10] Ing. Raúl Olivares Renny, MSc. Jesús Alfonso García, Dr.C. Marcelino Rivas Santana, Ing. José Rafael Pérez Carrasquel, «Diseño de moldes para bujes de pulvimetalurgia usando el método de elementos finitos,» Univerisdad de Matanzas Camilo Cien Fuegos, Venezuela y Cuba, 2014.
- [11] J. Miguel, *Diseño de aleaciones de titanio pulvimetalúrgicas con adición de Fe, Cr Y Ni*, Lérganes: Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiles e Ingeniería Química, 2013.
- [12] Z. Luis, «Fabricación de polvos metálicos para la industria manufacturera,» Ingeniero en Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería Mecánica , Guayaquil, 1992.
- [13] H. Monserrart, «Desarrollo de intermetalicos TiAl mediante técnicas pulvimetalúrgicas convencionales y de alta densificación (Spark Plasma Sintering),» Máster en Ingeniería Mecánica y de Materieles, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2013.
- [14] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, «Manufactura, ingeniería y tecnología,» de *Procesamiento de los polvos metálicos*, México, Pearson Educación, pp. 493, , Internet. <https://es.scribd.com/doc/175440913/Kalpakjian-5-Manufactura-Ingenieria-y-Tecnologia>.
- [15] E. R.-N. ,. E. G. P.G. Esteban, *Introducción al procesado pulvimetalúrgico del titani*, Revista de Metalurgia, 2011.
- [16] A. Hanbook, *Powder metal technologies and aplicaciones*, Volumen 7, 1998.
- [17] R. y. N. J. Budynas, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, México : McGraw-Hill, 2008.

2. Anexos

Anexo A. Propiedades físicas del acero AISI H13 (DIN X40CrMoV5-1)

Tipo de aleación:	C 0.39	Si 1.00	Mn 0.40	Cr 5.10	Mo 1.30	V 0.95	%
Color de identificación:	Rojo - Amarillo						
Estado de suministro:	Recocido 205 HB (máx.)						
Acabado:	IBO ECOMAX						

Equivalencia	AISI: H13
	DIN: X40CrMoV5-1
	No. Mat. 1.2344

Templado y revenido a 45 HRC. Características a la temperatura ambiente y a altas temperaturas.

Temperatura	20 °C	400 °C	600 °C
Densidad kg/m ³	7800	7 700	7 600
Módulo de elasticidad N/mm ²	210 000	180 000	140 000
Coefficiente de dilatación térmica por °C a partir de 20 °C	---	12,6 x 10 ⁻⁶	13,2 x 10 ⁻⁶
Conductibilidad térmica W/m °C	16	29	30

Fuente: Catalogo Ivan Bohman C.A. III edición.

Anexo B. Propiedades mecánicas del acero AISI H13

Resistencia a la tracción, aproximada, a la temperatura ambiente.

Dureza	52 HRC	45 HRC
Resistencia a la tracción R _m N/mm ² kp/mm ²	1820 185	1420 145
Límite aparente de elasticidad R _{p0,2} N/mm ² kp/mm ²	1520 155	1280 130

Fuente: Catalogo Ivan Bohman C.A. III edición.

Anexo C. Dimensiones de roscas unificadas

Tamaño	Diámetro mayor (nominal) d (in)	ROSCA BASTA (UNC)			ROSCA FINA (UNF)			Ancho aproximado entre caras A_T (in)	
		Número de hilos por pulgada	Diámetro menor d_r (in)	Área de esfuerzo a tracción A_t (in ²)	Número de hilos por pulgada	Diámetro menor d_r (in)	Área de esfuerzo a tracción A_t (in ²)	Cabeza	Tuerca
0	0.0600	-	-	-	80	0.0438	0.0018		
1	0.0730	64	0.0527	0.0026	72	0.0550	0.0028		
2	0.0860	56	0.0628	0.0037	64	0.0657	0.0039		
3	0.0990	48	0.0719	0.0049	56	0.0758	0.0052		
4	0.1120	40	0.0795	0.0060	48	0.0849	0.0066		
5	0.1250	40	0.0925	0.0080	44	0.0955	0.0083		
6	0.1380	32	0.0974	0.0091	40	0.1055	0.0101		
8	0.1640	32	0.1234	0.0140	36	0.1279	0.0147		
10	0.1900	24	0.1359	0.0175	32	0.1494	0.0200		
12	0.2160	24	0.1619	0.0242	28	0.1696	0.0258		
¼	0.2500	20	0.1850	0.0318	28	0.2036	0.0364	7/16	7/16
5/16	0.3125	18	0.2403	0.0524	24	0.2584	0.0581	½	½
3/8	0.3750	16	0.2938	0.0775	24	0.3209	0.0878	9/16	9/16
7/16	0.4375	14	0.3447	0.1063	20	0.3725	0.1187	5/8	11/16
½	0.5000	13	0.4001	0.1419	20	0.4350	0.1600	¾	¾
9/16	0.5625	12	0.4542	0.1819	18	0.4903	0.2030	13/16	7/8
5/8	0.6250	11	0.5069	0.2260	18	0.5528	0.2560	15/16	15/16
¾	0.7500	10	0.6201	0.3345	16	0.6688	0.3730	1 1/8	1 1/8
7/8	0.8750	9	0.7307	0.4617	14	0.7822	0.5095	1 5/16	1 5/16
1	1.0000	8	0.8376	0.6057	12	0.8917	0.6630	1 ½	1 ½
1 1/8	1.1250	7	0.9394	0.7633	12	1.0167	0.8557	1 11/16	1 11/16
1 ¼	1.2500	7	1.0644	0.9691	12	1.1417	1.0729	1 7/8	1 7/8
1 3/8	1.3750	6	1.1585	1.1549	12	1.2667	1.3147	2 1/16	2 1/16
1 ½	1.5000	6	1.2835	1.4053	12	1.3917	1.5810	2 ¼	2 ¼
1 ¾	1.7500	5	1.4902	1.8995				2 5/8	2 5/8
2	2.0000	4.5	1.7113	2.4982				3	3
2 ¼	2.2500	4.5	1.9613	3.2477				3 3/8	3 3/8
2 ½	2.5000	4	2.1752	3.9988				3 ¾	3 ¾
2 ¾	2.7500	4	2.4252	4.9340				4 1/8	4 1/8
3	3.0000	4	2.6752	5.9674				4 ½	4 ½
3 ¼	3.2500	4	2.9252	7.0989				4 7/8	
3 ½	3.5000	4	3.1752	8.3286				5 ¼	
3 ¾	3.7500	4	3.4252	9.6565				5 5/8	
4	4.0000	4	3.6752	11.083				6	











La longitud roscada de los tornillos UNS está dada por $L_r = 2d + 0.25$ in, si la longitud total, L_{Tb} , es menor o igual a 6 in, y por $L_r = 2d + 0.50$ in, si L_{Tb} es mayor de 6 in.

Fuente: NORTON, Robert. Diseño de Máquinas. México: editorial Prentice-Hall (Pearson)

Anexo D. Especificaciones SAE para pernos de acero

Tabla 8-9

Especificaciones SAE para pernos de acero

Grado de SAE nóm.	Intervalo de tamaños, inclusivo, pulg.	Resistencia de prueba mínima,* kpsi	Resistencia mínima a la tensión,* kpsi	Resistencia mínima a la fluencia,* kpsi	Material	Marca en la cabeza
1	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	33	60	36	Acero de bajo o medio carbono	
2	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	55	74	57	Acero de bajo o medio carbono	
4	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	65	115	100	Acero de medio carbono, estrado en frío	
5	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	85	120	92	Acero de medio carbono, T y R	
5.2	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	74	105	81	Acero de medio carbono, T y R	
7	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	85	120	92	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
8	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	105	133	115	Acero de aleación de medio carbono, T y R	
8	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	120	150	130	Acero de aleación de medio carbono T y R	
8.2	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	105	133	115	Acero de aleación de medio carbono, T y R	
8.2	$\frac{1}{8}$ - $\frac{1}{2}$	120	150	130	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	

*La resistencia mínima es resistencia que excede 99% de los especímenes.

Fuente: Budynas, R y Nisbett, J. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*.

Anexo E. Torques de ajuste para tornillos de fijación de cabeza hexagonal hueca.

TORQUE DE AJUSTE			
Unidad: N-cm (LB-in)			
Tamaño de tornillo x paso	Acero	Hierro fundido	Aluminio
M2x0.4	58.8 (5.2)	39.2 (3.5)	29.4 (2.6)
M2.3x0.4	78.4 (6.9)	53.9 (4.8)	39.2 (3.5)
M2.6x0.45	118 (10.5)	78.4 (6.9)	58.8 (5.2)
M3x0.5	196 (17.4)	127 (11.3)	98.0 (8.7)
M4x0.7	412 (36.5)	274 (24.3)	206 (18.3)
M5x0.8	882 (78.1)	588 (52.1)	441 (39.1)
M6x1	1370 (121)	921 (81.6)	686 (60.8)
M8x1.25	3040 (269)	2010 (178)	1470 (130)
Tamaño de tornillo x paso	Acero	Hierro fundido	Aluminio
M10x1.5	6760 (599)	4510 (400)	3330 (295)
M12x1.75	11800 (1045)	7840 (695)	5880 (521)
M14x2	15700 (1391)	10500 (930)	7840 (695)
M16x2	19600 (1736)	13100 (1161)	9800 (868)
M20x2.5	38200 (3385)	25500 (2259)	19100 (1692)
M22x2.5	51900 (4598)	34800 (3083)	26000 (2304)
M24x3	65700 (5821)	44100 (3907)	32800 (2906)
M30x3.5	130000 (11518)	87200 (7726)	65200 (5777)

Nota: Los torques de ajuste arriba mencionados son para tornillos de fijación de cabeza hueca hexagonal solamente.

Fuente: Catalogo THK

Anexo F. Tabla de velocidades de corte de acuerdo al material para fresado.

TABLA 61-1 Velocidades de corte de la máquina fresadora				
Material	Fresa de acero de alta velocidad		Fresa de carburo	
	Pie/min	m/min	Pie/min	m/min
Acero aleado	40-70	12-20	150-250	45-75
Aluminio	500-1000	150-300	1000-2000	300-600
Bronce	65-120	20-35	200-400	60-120
Hierro fundido	50-80	15-25	125-200	40-60
Acero de maquinado libre	100-150	30-45	400-600	120-180
Acero para maquinaria	70-100	21-30	150-250	45-75
Acero inoxidable	30-80	10-25	100-300	30-90
Acero para herramienta	60-70	18-20	125-200	40-60

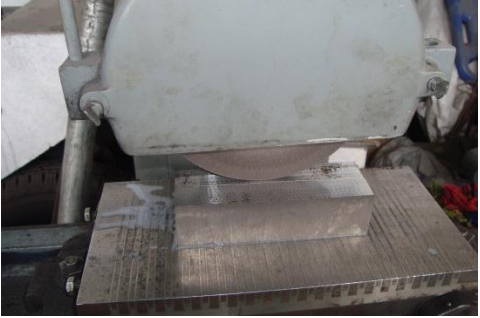


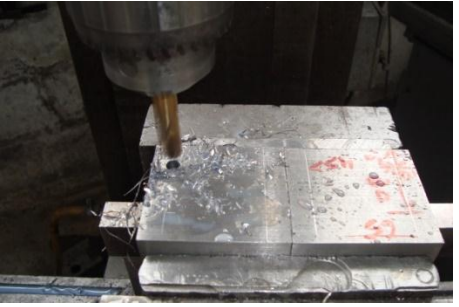
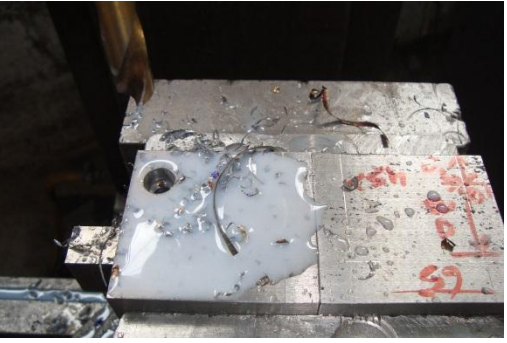

Fuente: <http://clasehn.net/>

Anexo G. Tabla de avance en mm/rev. Para diferentes materiales

Profundidad de corte	Avance	Hierro fundido suave < 250 HB	Hierro fundido duro > 250 HB	Latón duro	Bronce Latón y Cobre	Aluminio y Magnesio	Profundidad de corte	Avance	Acero blando <175 HB			Acero 175-250 HB			Acero endurecido >250 HB		
									Vida del filo de la herramienta (horas)								
Velocidad de corte (m/min) para 1 hora de vida del filo de la herramienta									1	4	8	1	4	8	1	4	8
mm	mm/rev.	Velocidad de corte (m/min)															
1	0.1	94	40	73	113	145	1	0.1	132	119	103	88	74	68	62	53	50
	0.2	84	36	66	102	132		0.2	120	107	98	77	66	62	55	48	44
	0.3	66	31	48	73	95		0.3	88	77	73	55	48	44	41	36	32
2	0.1	78	36	65	101	132	2	0.1	109	96	90	74	65	61	49	44	40
	0.2	70	32	59	91	118		0.2	98	88	80	66	59	55	44	40	36
	0.3	55	25	36	59	73		0.3	73	66	62	41	36	32	29	25	25
4	0.1	65	28	53	80	104	4	0.1	92	80	77	61	54	50	40	37	31
	0.2	59	25	48	73	95		0.2	84	73	70	55	48	44	36	34	29
	0.3	48	24	32	52	66		0.3	62	55	52	36	32	29	29	28	25
8	0.1	58	24	44	68	90	8	0.1	80	74	67	54	46	46	36	31	28
	0.2	52	22	40	62	80		0.2	73	66	62	48	41	41	32	29	25
	0.3	40	17	29	48	59		0.3	55	48	44	32	29	25	22	20	18
	0.6	32	14	25	36	48		0.6	41	36	32	25	24	22	18	17	14







Fuente: ASSAB 17. Herramientas de corte

Anexo H. Elaboración de los moldes

	
<p>1. Rectificado de placas</p>	<p>2. Refrentado de caras de las tapa lateral del molde</p>
	
<p>3. Rectificado de caras de la tapa frontal.</p>	<p>4. Taladrado de los agujeros para los tornillos</p>
	
<p>5. Agujero para tornillo de cabeza hueca hexagonal.</p>	<p>6. Tapa lateral del molde rectangular.</p>

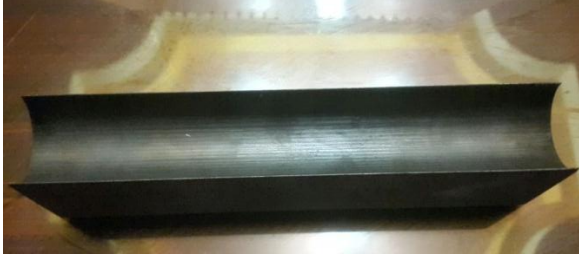
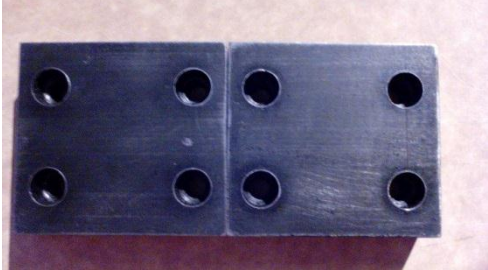


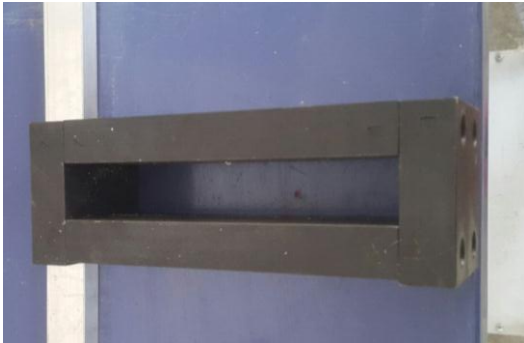

Fuente: El autor

Anexo I. Elementos del molde circular

	
<p>1. Punzón inferior</p>	<p>2. Punzón superior para compactación por golpes</p>
	
<p>3. Punzón superior</p>	<p>4. Tapa inferior</p>
	
<p>5. Caja armada del molde</p>	<p>6. Componentes del molde circular</p>

Fuente: El autor

Anexo J. Elementos del molde rectangular

 A long, dark metal cylindrical punch with a slightly tapered end.	 Two dark metal rectangular covers, each with four circular holes arranged in a 2x2 grid.
<p>1. Punzón circular</p>	<p>2. Tapas laterales</p>
 Two dark metal rectangular covers, each with two circular holes arranged vertically.	 Two dark metal rectangular covers, each with a textured surface and a central slot.
<p>3. Tapas frontales</p>	<p>4. Punzones de caras planas</p>
 A dark metal rectangular mold box with a central opening and four circular holes on the side.	 A complete dark metal rectangular mold assembly, including the box, covers, and punches.
<p>5. Caja del molde armada</p>	<p>6. Molde completo</p>



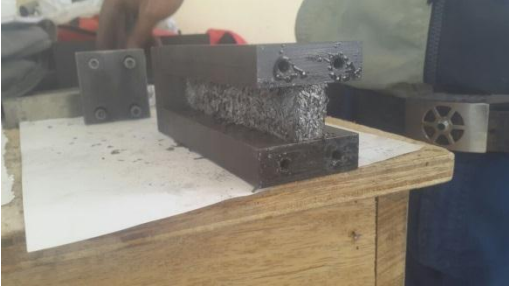



Fuente: El autor

Anexo K. Obtención de polvos metálicos

	
<p>1. Polvo de bronce</p>	<p>2. Polvo de aluminio</p>
	
<p>3. Viruta de acero 1018</p>	<p>4. Polvos metálicos</p>
	
<p>5. Tamizado de los polvos metálicos</p>	<p>6. Tamiz N- 20</p>







Fuente: El autor

Anexo L. Obtención de las probetas.

	
1. Probeta de bronce rectangular	2. Probeta rectangular de aluminio
	
3. Probeta rectangular de acero	4. Probetas de aluminio y bronce
	
5. Probeta circular de acero	6. Probeta de aluminio compactada longitudinalmente

Fuente: El autor

Anexo M. Proceso de compactación

	
<p>1. Llenado del polvo en el molde</p>	<p>2. Compactado de polvos en el molde circular</p>
	
<p>3. Compactación de polvos en el molde rectangular</p>	<p>4. Aplicación de carga en la compactación de polvos</p>
	
<p>5. Extracción de probeta del molde circular</p>	<p>6. Extracción de probeta del molde rectangular</p>

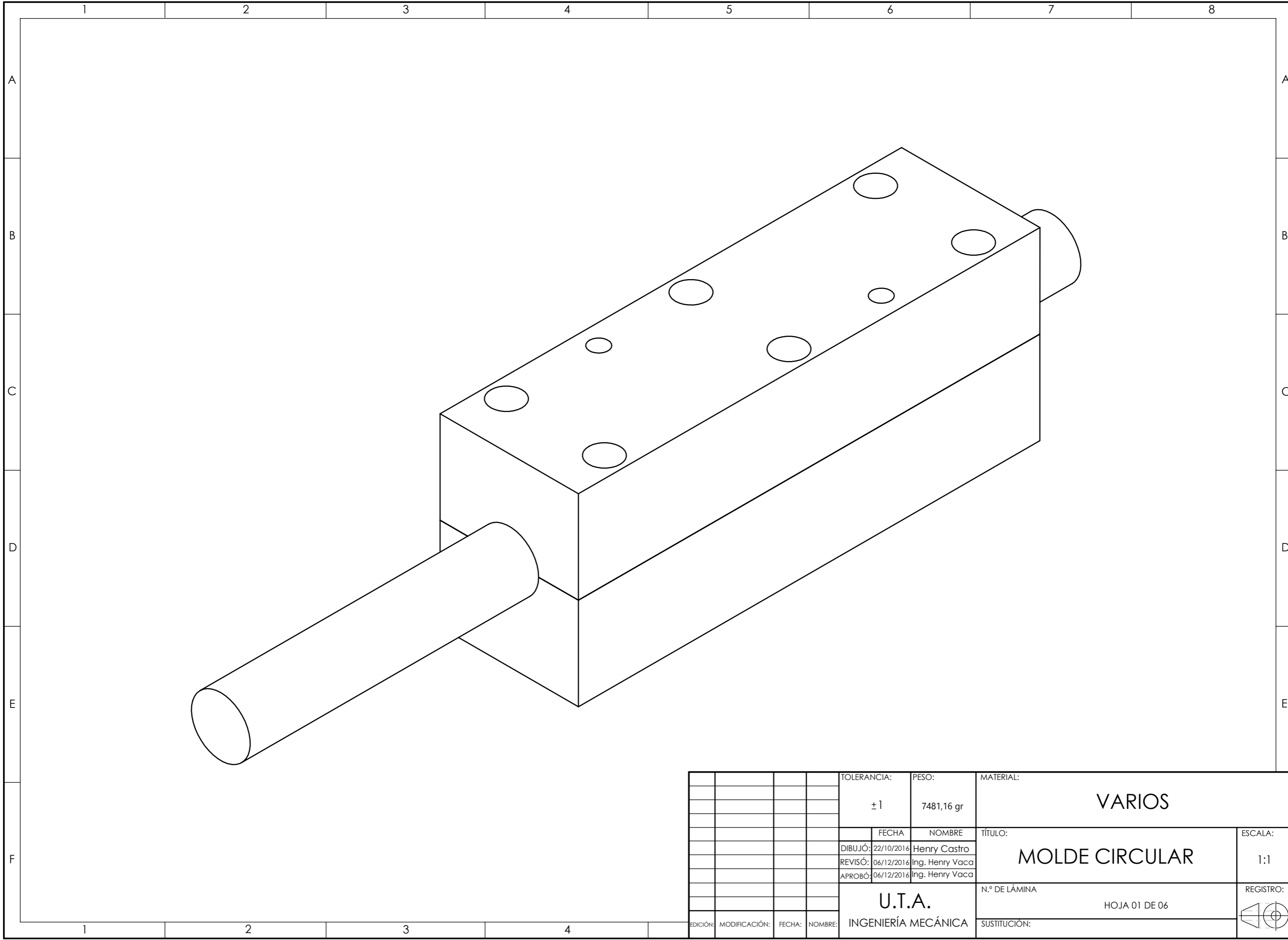
Fuente: El autor

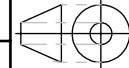
Anexo N. Medición de las probetas finales

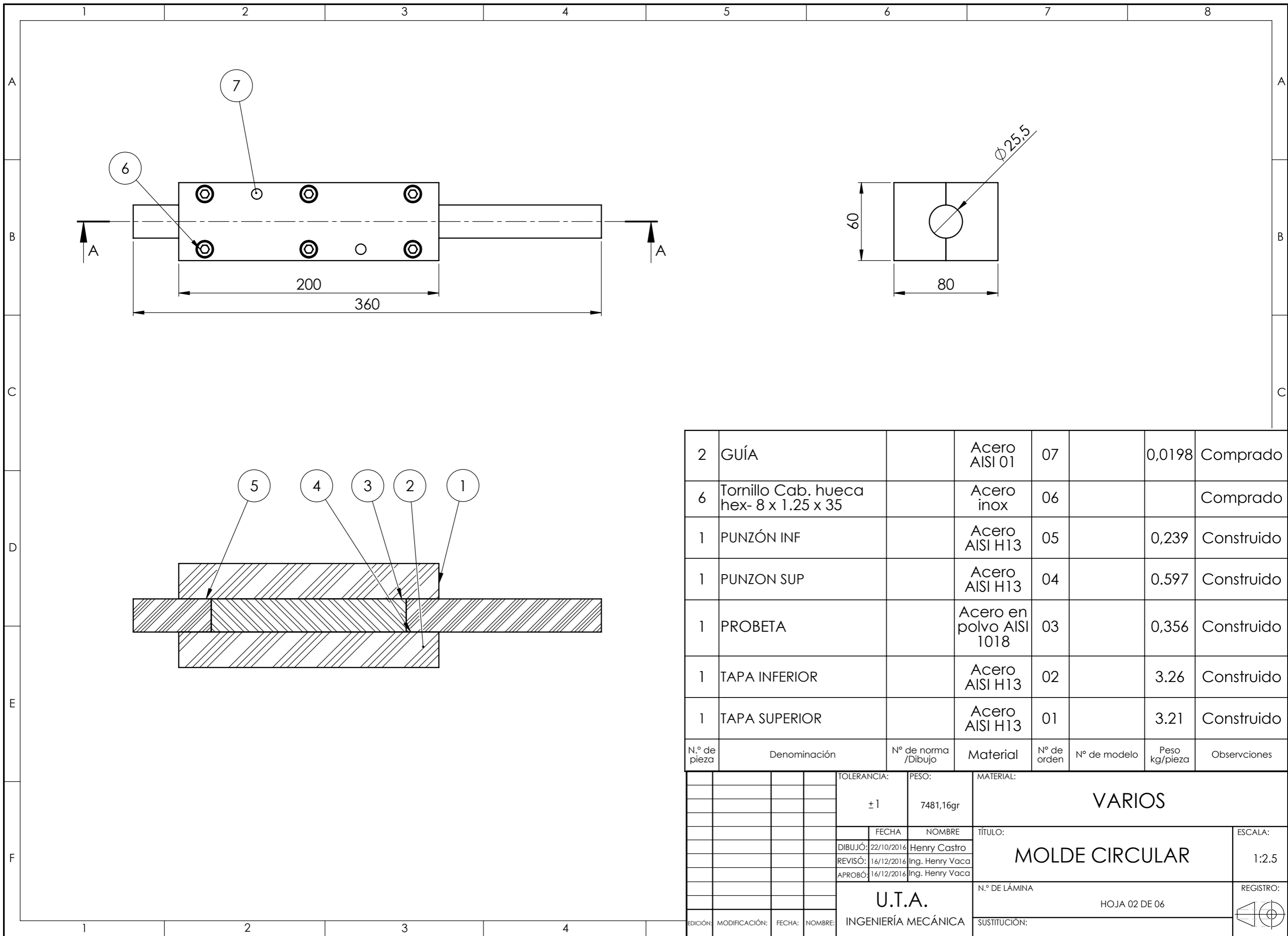
	
<p>1. Medición de la longitud de la probeta de aluminio</p>	<p>2. Medición con calibrador de la probeta de aluminio.</p>
	
<p>3. Medición de la probeta de bronce con calibrador</p>	<p>4. Medición de la probeta de acero</p>
	
<p>5. Masa de la probeta de aluminio</p>	<p>6. Masa de la probeta de bronce</p>

Fuente: El autor

3. Planos

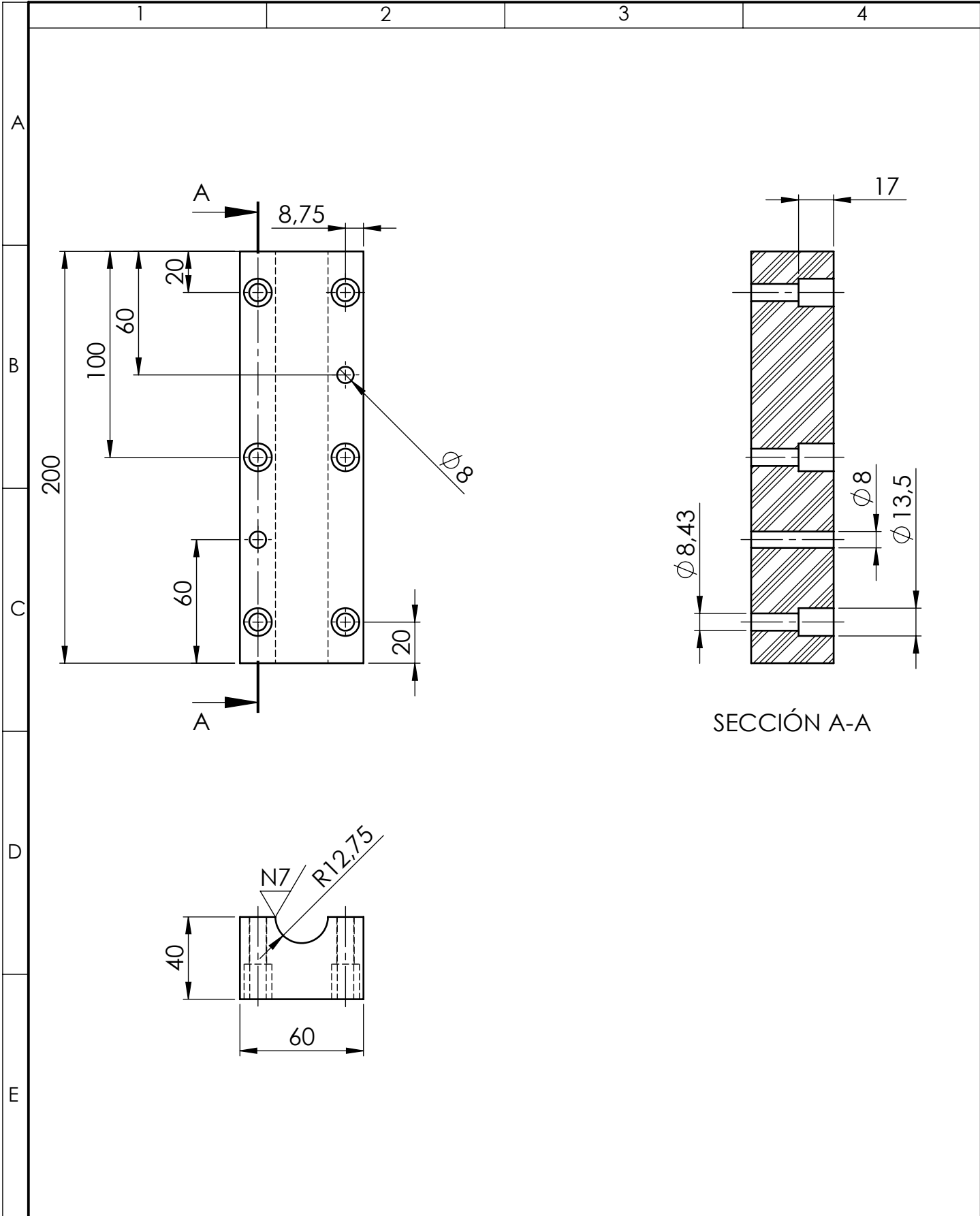


				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:			
				±1	7481,16 gr	VARIOS			
					FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		ESCALA:
				DIBUJÓ:	22/10/2016	Henry Castro	MOLDE CIRCULAR		1:1
				REVISÓ:	06/12/2016	Ing. Henry Vaca			
				APROBÓ:	06/12/2016	Ing. Henry Vaca			
				U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA			N.º DE LÁMINA	REGISTRO:	
							SUSTITUCIÓN:		
EDICIÓN:	MODIFICACIÓN:	FECHA:	NOMBRE:						



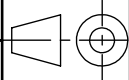
2	GUÍA		Acero AISI 01	07		0,0198	Comprado
6	Tornillo Cab. hueca hex- 8 x 1.25 x 35		Acero inox	06			Comprado
1	PUNZÓN INF		Acero AISI H13	05		0,239	Construido
1	PUNZON SUP		Acero AISI H13	04		0.597	Construido
1	PROBETA		Acero en polvo AISI 1018	03		0,356	Construido
1	TAPA INFERIOR		Acero AISI H13	02		3.26	Construido
1	TAPA SUPERIOR		Acero AISI H13	01		3.21	Construido
N.º de pieza	Denominación	Nº de norma /Dibujo	Material	Nº de orden	Nº de modelo	Peso kg/pieza	Observaciones

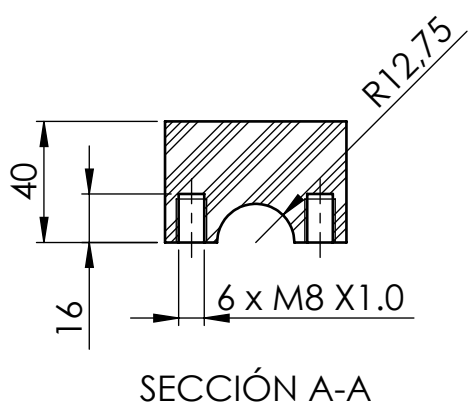
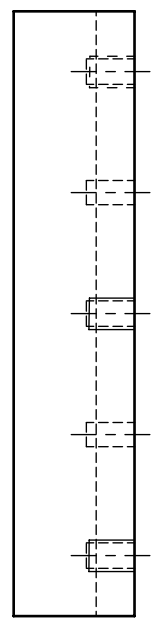
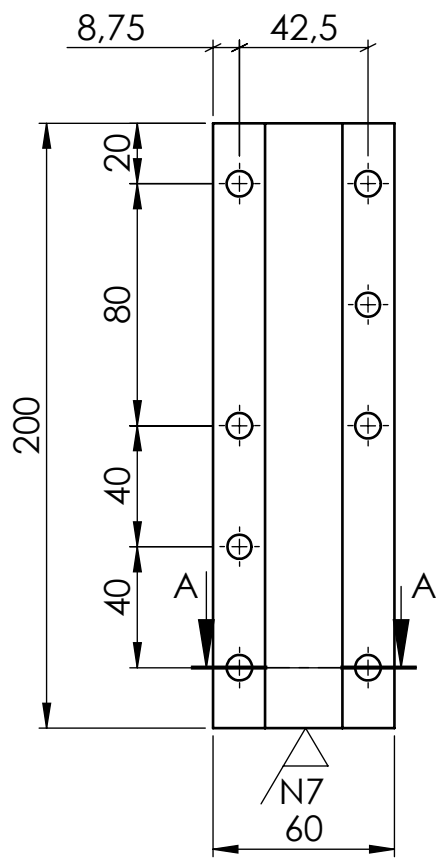
TOLERANCIA:		PESO:		MATERIAL:			
± 1		7481,16gr		VARIOS			
FECHA:		NOMBRE:		TÍTULO:			ESCALA:
DIBUJÓ: 22/10/2016		Henry Castro		MOLDE CIRCULAR			1:2.5
REVISÓ: 16/12/2016		Ing. Henry Vacca					
APROBÓ: 16/12/2016		Ing. Henry Vacca					
U.T.A.				N.º DE LÁMINA		REGISTRO:	
INGENIERÍA MECÁNICA				HOJA 02 DE 06			
EDICIÓN:	MODIFICACIÓN:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCIÓN:			



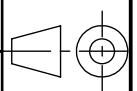
SECCIÓN A-A

				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 3210.44 gr	MATERIAL: ACERO AISI H13		
						TÍTULO: TAPA SUPERIOR	ESCALA: 1:2.5	
				FECHA	NOMBRE			
				DIBUJÓ: 23/10/2016	Henry Castro			
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca			
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca			
				U.T.A INGENIERÍA MECÁNICA		N.º DE LÁMINA HOJA 03 DE 06	REGISTRO:	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			SUSTITUCIÓN:		





				TOLERANCIA: ±1	PESO: 3262.93 gr	MATERIAL: ACERO AISI H13	
						TÍTULO: TAPA INFERIOR	ESCALA: 1:2.5
				DIBUJÓ: 23/10/2016	Henry Castro		
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	SUSTITUCIÓN:			



1

2

3

4

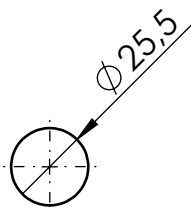
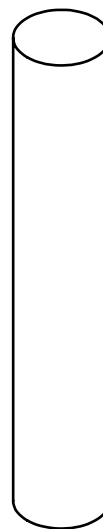
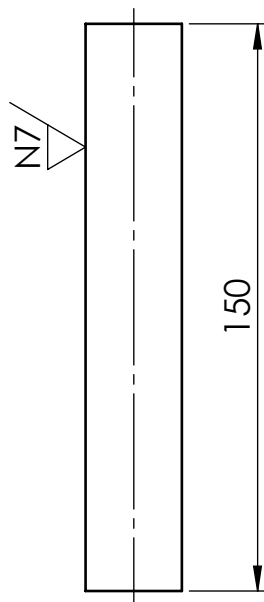
A

B

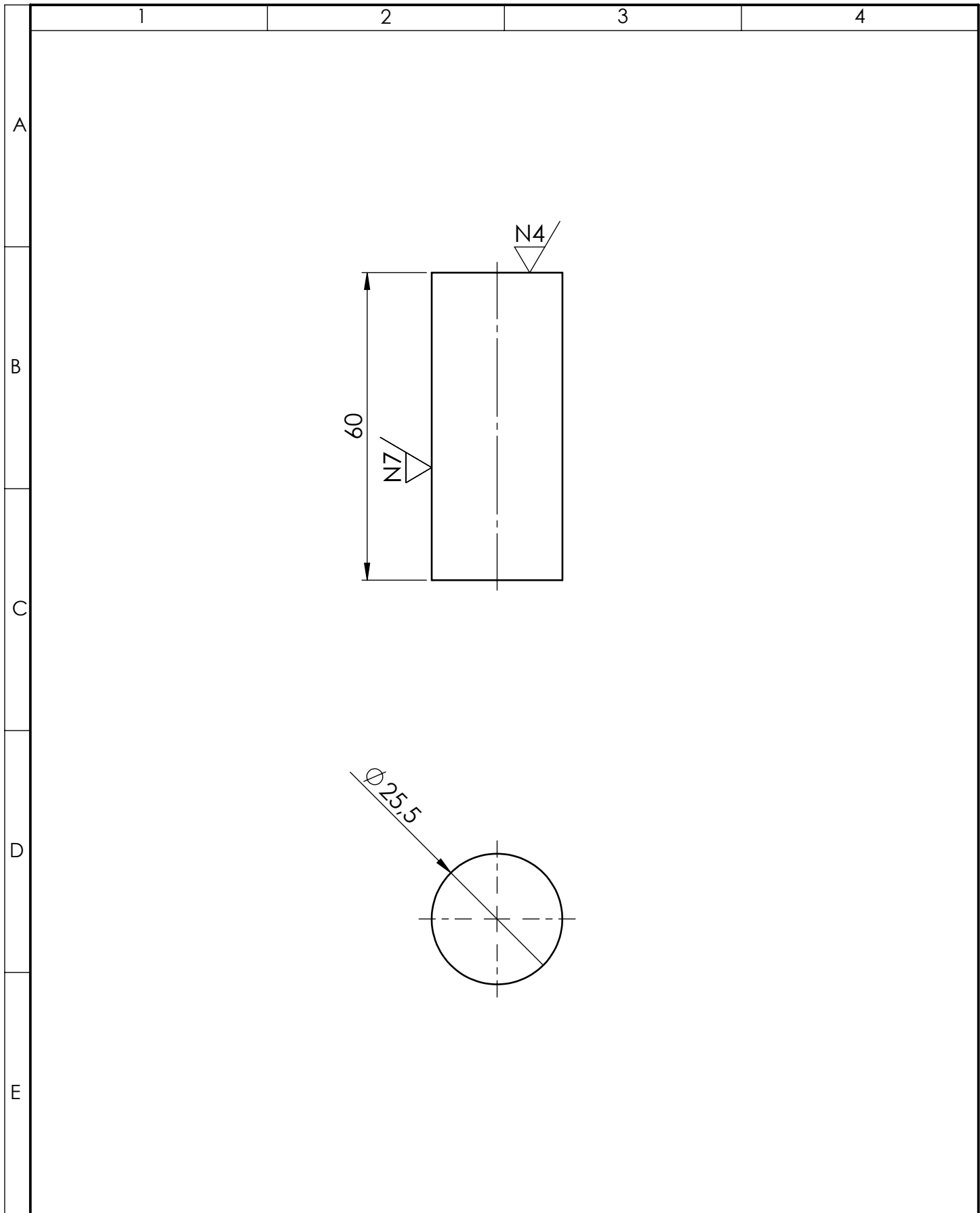
C

D

E



				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 597,53 gr	MATERIAL: ACERO AISI H13	
						TÍTULO: PUNZÓN SUP	ESCALA: 1:2.5
				FECHA	NOMBRE		
				DIBUJÓ: 23/10/2016	Henry Castro		
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	SUSTITUCIÓN:			



				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 239.01 gr	MATERIAL: ACERO AISI H13	
						TÍTULO: PUNZÓN INF	ESCALA: 1:1
				DIBUJÓ: 23/10/2016	Henry Castro		
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA HOJA 06 DE 06	REGISTRO:
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			INGENIERÍA MECÁNICA	SUSTITUCIÓN:

1

2

3

4

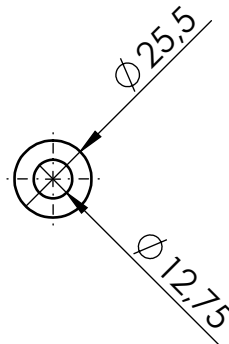
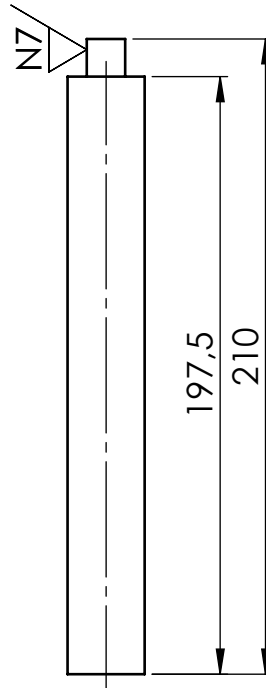
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				± 1	799.19gr	ACERO AISI H13	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJÓ: 23/10/2016	Henry Castro	PUNZÓN SUP GOLPEO	1:2.5
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	SUSTITUCIÓN:			

1

2

3

4

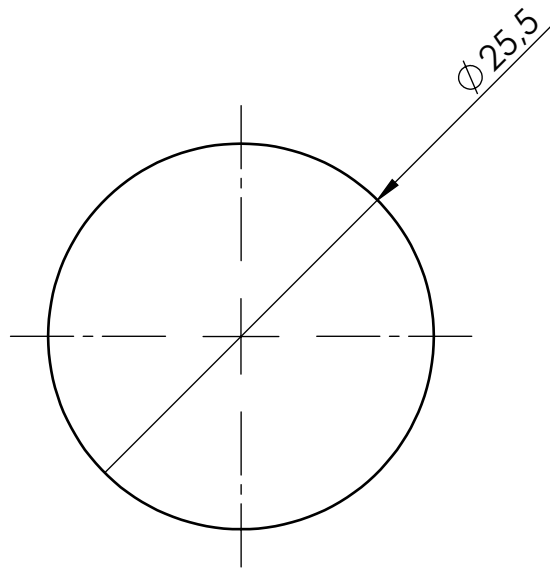
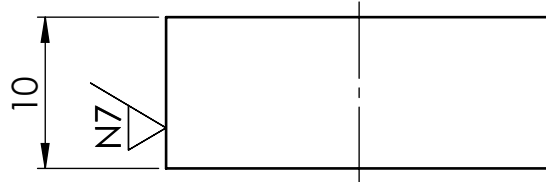
A

B

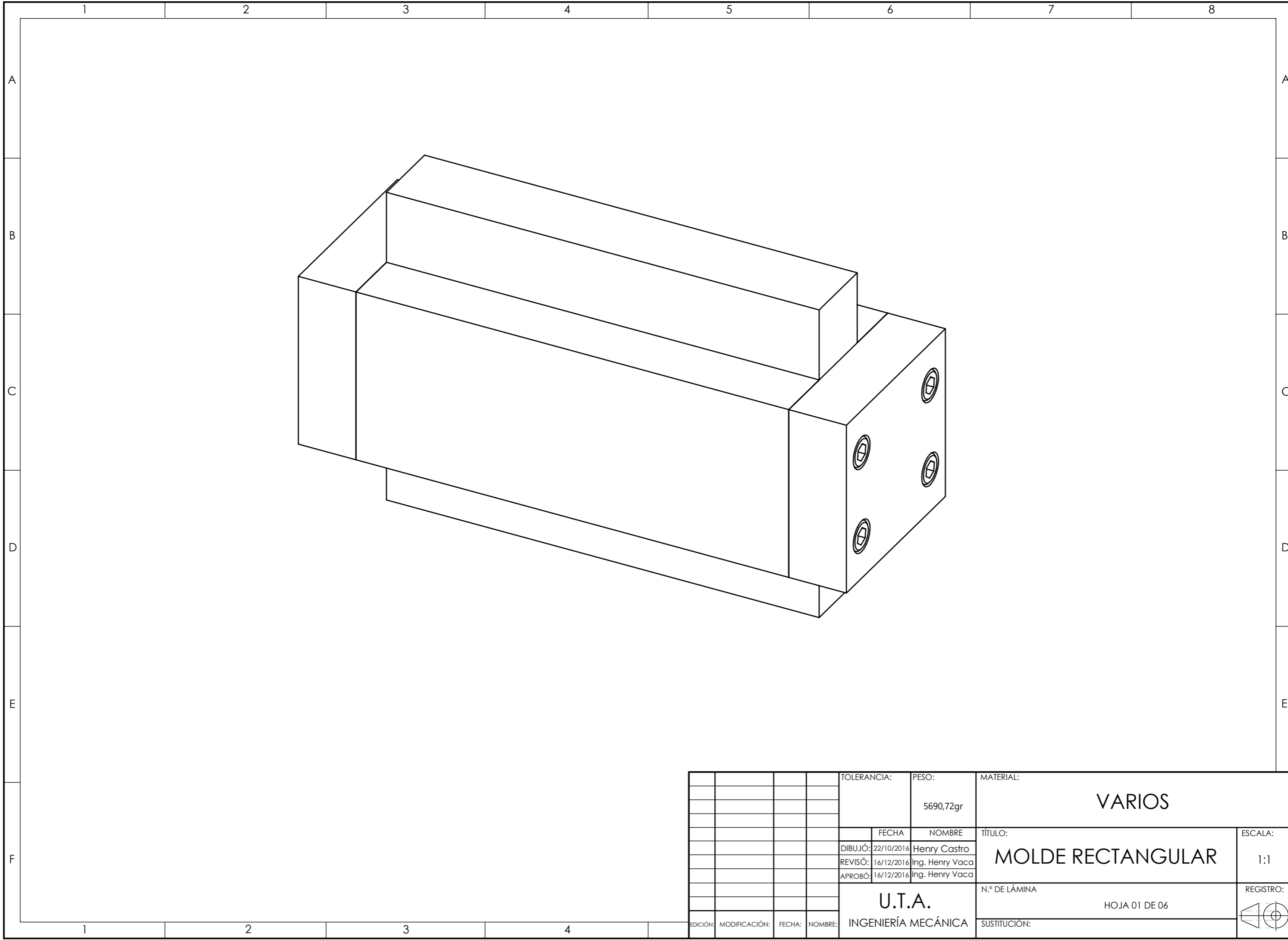
C

D

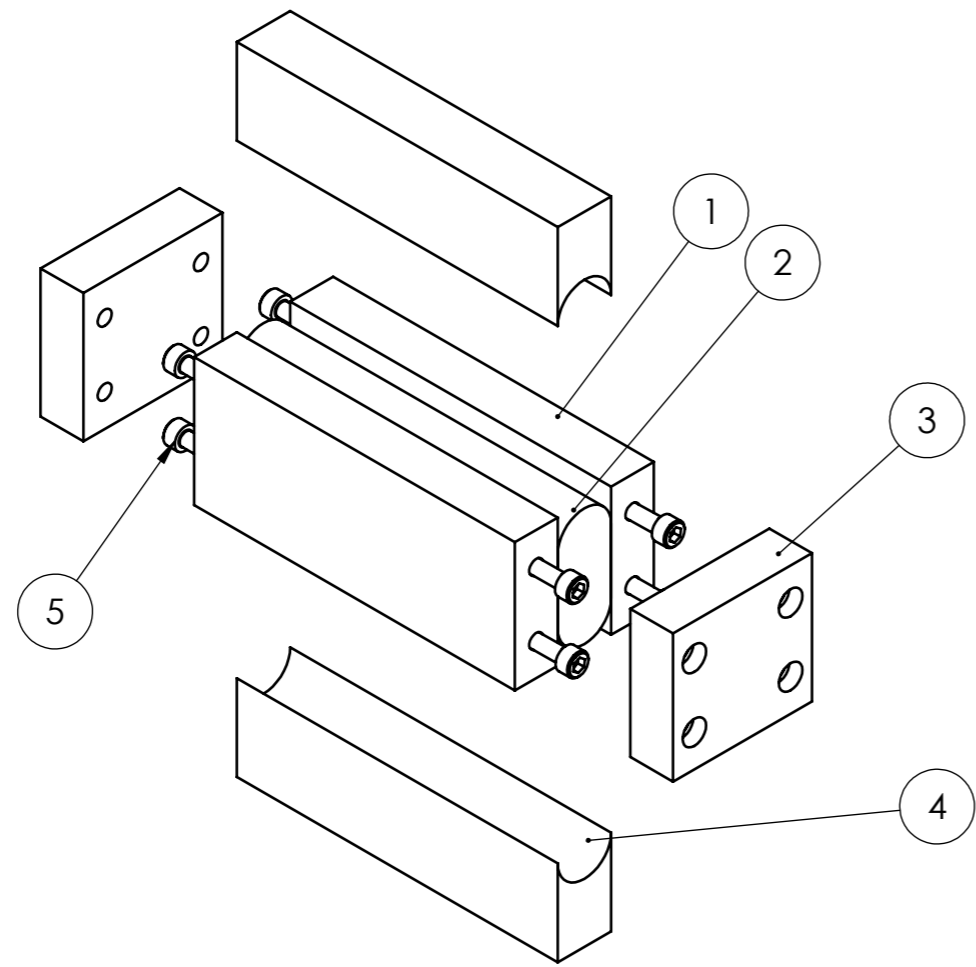
E



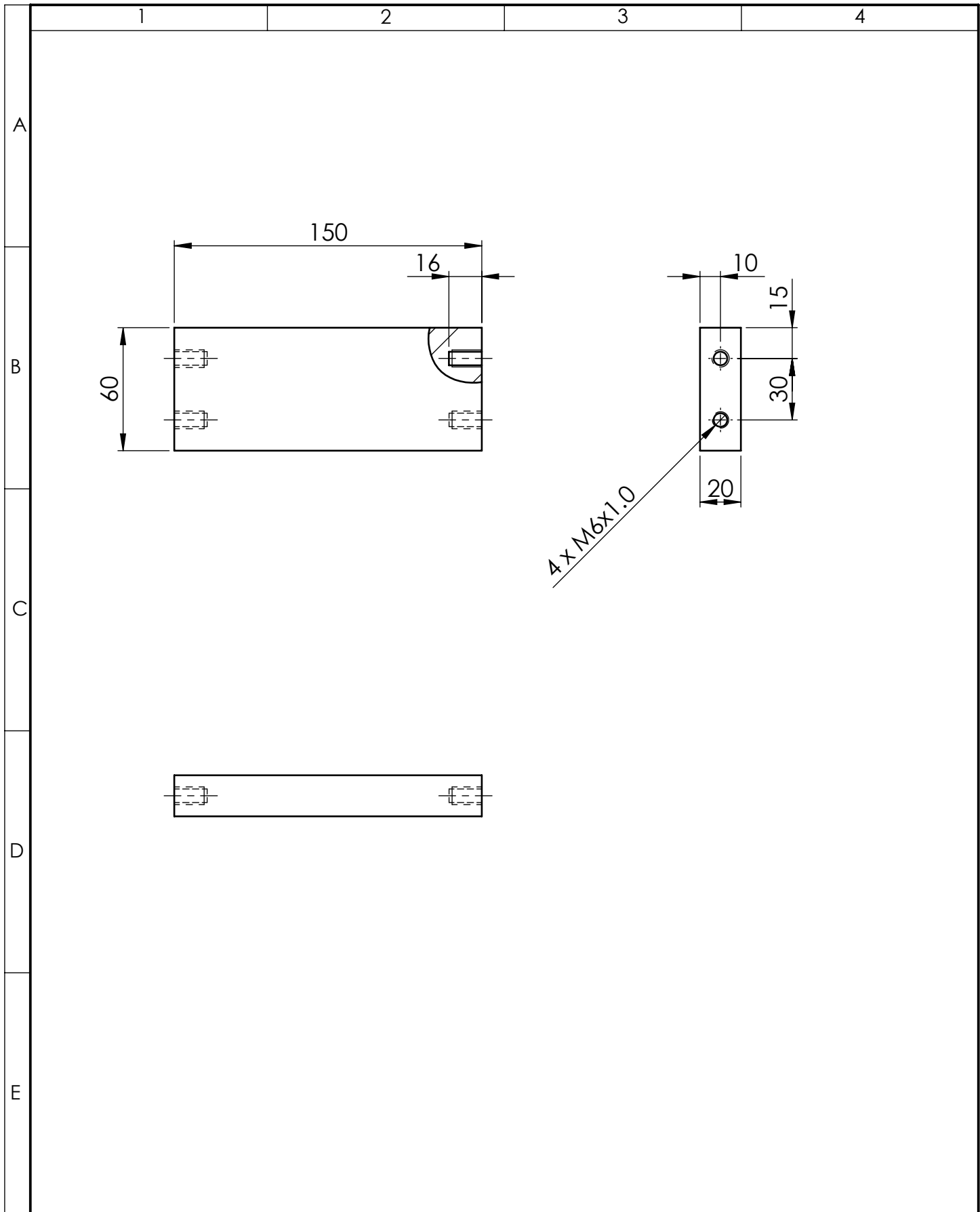
				TOLERANCIA: ± 1	PESO: 39,84gr	MATERIAL: ACERO AISI H13	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO: TAPA	ESCALA: 2:1
				DIBUJÓ: 23/10/2016	Henry Castro		
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	SUSTITUCIÓN:			



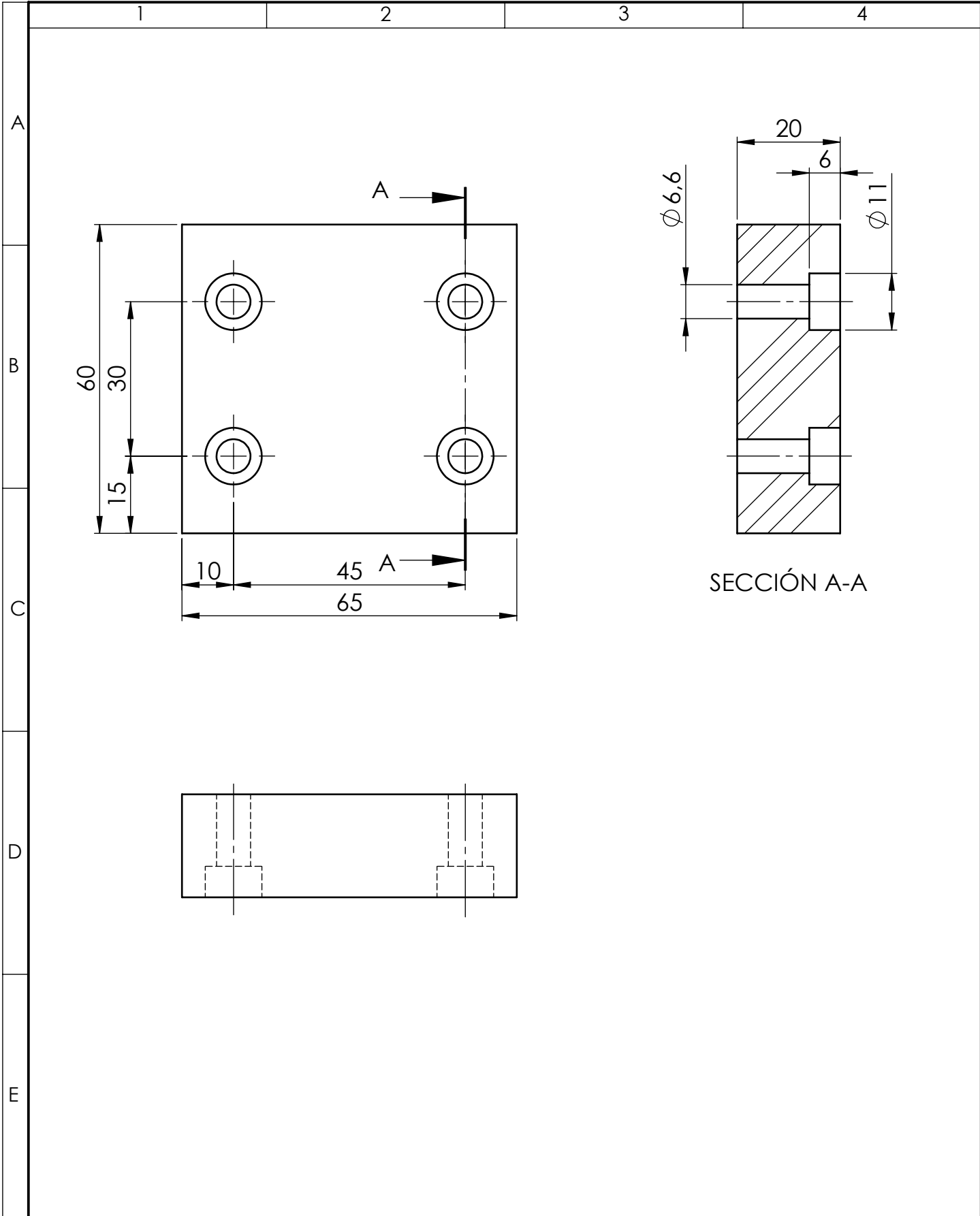
				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
					5690,72gr	VARIOS	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJÓ: 22/10/2016	Henry Castro	MOLDE RECTANGULAR	1:1
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A.		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
				INGENIERÍA MECÁNICA		HOJA 01 DE 06	
EDICIÓN:	MODIFICACIÓN:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCIÓN:			



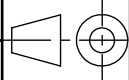
N.º de pieza	Denominación	Nº de norma /Dibujo	Material	Nº de orden	Nº de modelo	Peso kg/pieza	Observaciones
8	Tornillo cabeza hueca - 6 x 1.0 x 30		Acero inox.	05		0,009	Comprado
2	PUNZON		Acero AISI H13	04		0,882	Construido
2	TAPA LATERAL		Acero AISI H13	03		0,575	Construido
1	PROBETA SIN COMPACTAR		Polvo de acero AISI 1018	02			Construido
2	TAPA FRONTAL		Acero AISI H13	01		1,386	Construido
		TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:			
			5690,72gr	VARIOS			
		FECHA	NOMBRE	TÍTULO:			ESCALA:
		DIBUJÓ: 22/10/2016	Henry Castro	MOLDE RECTANGULAR			1:2.5
		REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca				
		APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca				
		U.T.A.		N.º DE LÁMINA		REGISTRO:	
		INGENIERÍA MECÁNICA		HOJA 02 DE 06			
EDICIÓN:	MODIFICACIÓN:	FECHA:	NOMBRE:	SUSTITUCIÓN:			

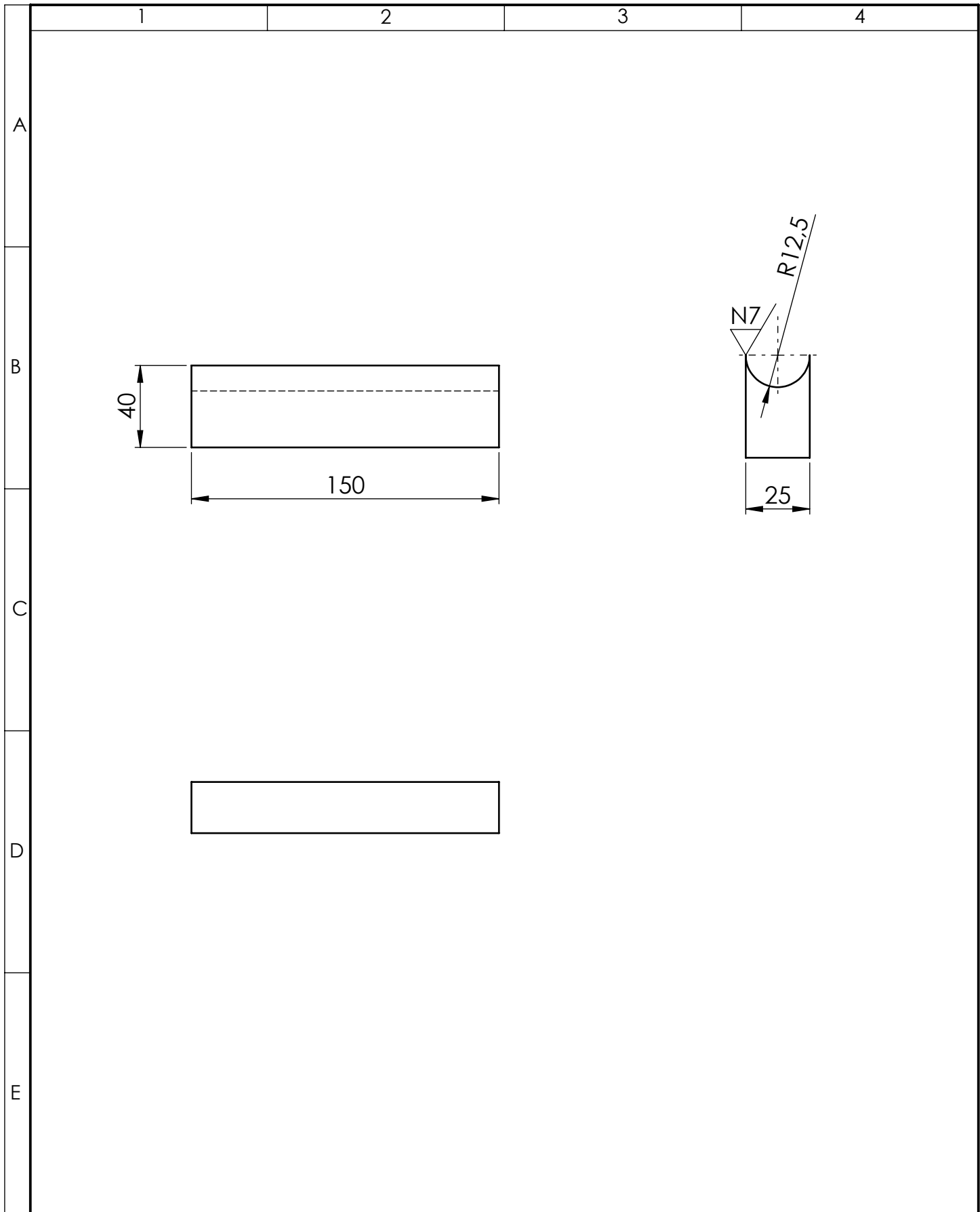


				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±1	1386,92 gr	ACERO AISI H13	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJÓ: 22/10/2016	Henry Castro	TAPA FRONTAL	1:2.5
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	SUSTITUCIÓN:			

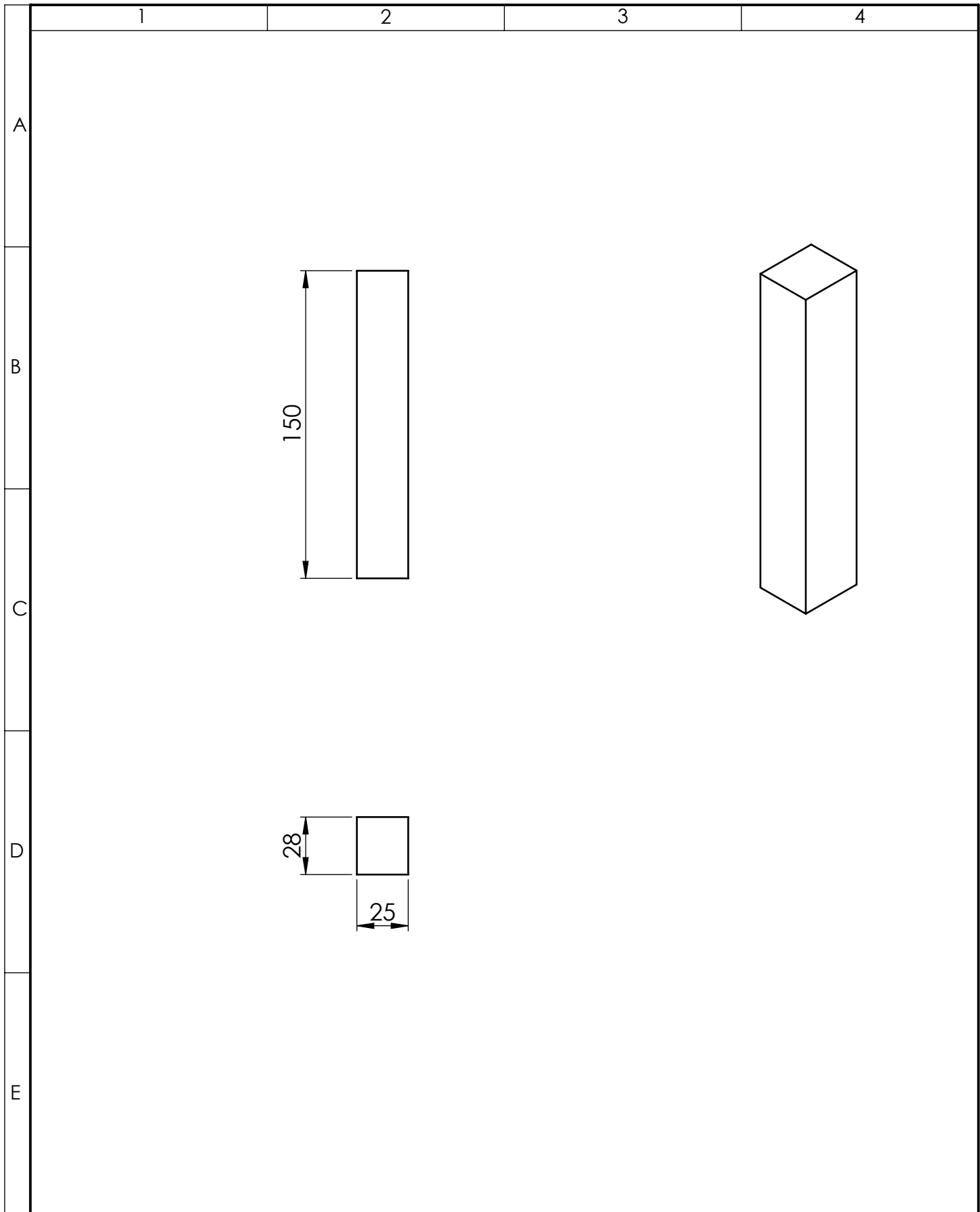


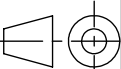
				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±1	575.67gr	ACERO AISI H13	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJÓ: 22/10/2016	Henry Castro	TAPA LATERAL	1:1
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
						HOJA 04 DE 06	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:	





				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				± 1	882, 84 gr	ACERO AISI H13	
				FECHA	NOMBRE	TÍTULO:	ESCALA:
				DIBUJÓ: 22/10/2016	Henry Castro	PUNZÓN	1:2.5
				REVISÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBÓ: 16/12/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A		N.º DE LÁMINA	REGISTRO:
						INGENIERÍA MECÁNICA	
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	SUSTITUCIÓN:			



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:			
				± 1	819 gr	ACERO AISI H13			
					FECHA	NOMBRE	TÍTULO:		ESCALA:
				DIBUJÓ:	20/10/2016	Henry Castro	PUNZÓN DE CARAS PLANAS		1:2.5
				REVISÓ:	16/12/2016	Ing. Henry Vaca			
				APROBÓ:	16/12/2016	Ing. Henry Vaca			
				U.T.A			N.º DE LÁMINA		REGISTRO:
				INGENIERÍA MECÁNICA			HOJA 06 DE 06		
EDICIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE				SUSTITUCIÓN:		