

Licenciatura en Ingeniería Mecánica
Trimestre 24-O

Modalidad: Proyecto Tecnológico

Diseño y construcción de una máquina compactadora de viruta de aluminio para su reutilización por fundición.

Alumnado:

Evangelista Luna Luis Roberto

2192000698

González Rodríguez Noel Alejandro

2182005001

Asesores:

Ing. Romy Pérez Moreno

Dr. Israel Barragán Santiago

DECLARATORIA

Yo, Ing. Romy Pérez Moreno, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Ing. Romy Pérez Moreno

compactadora

DECLARATORIA

Yo, Dr. Israel Barragán Santiago, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dr. Israel Barragán Santiago

DECLARATORIA

Yo, Evangelista Luna Luis Roberto, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Evangelista Luna Luis Roberto

DECLARATORIA

Yo, González Rodríguez Noel Alejandro, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



González Rodríguez Noel Alejandro


PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta: Fecha: PI-A-MEC


DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Matrícula:
 Correo personal:  Firma

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa:
 No. económico: Adscripción/Departamento/Sección:
 Área de investigación:
 Correo institucional:  Firma

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal:
 No. económico/Teléfono: Adscripción/Puesto:
 Área de investigación/Departamento:
 Correo electrónico:  Firma

MODALIDAD DEL PROYECTO

Proyecto tecnológico Proyecto de investigación Estancia profesional Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: No Sí Clave (?):

OBJETIVO GENERAL

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	<input type="text" value="SI"/>	<input type="text" value="Inicio"/>
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II	<input type="text"/>	<input type="text" value="24-P"/>
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica	<input type="text"/>	<input type="text" value="24-O"/>

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

 Ing. Romy Pérez Moreno


 Sello de la Coordinación de Estudios

PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta: Fecha: PI-A-MEC

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Matricula:

Correo personal:

Firma

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa:

No. económico: Adscripción/Departamento/Sección:

Área de investigación:

Correo institucional:

Firma

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal:

No. económico/Teléfono: Adscripción/Puesto:

Área de investigación/Departamento:

Correo electrónico:

Firma

MODALIDAD DEL PROYECTO

Proyecto tecnológico Proyecto de investigación Estancia profesional Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Diseño y construcción de una máquina compactadora de viruta de aluminio para su reutilización por fundición.

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: No Sí Clave (?):

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una máquina compactadora de viruta de aluminio, con el propósito de que los residuos generados en el taller de mecánica sean reutilizados en el taller de fundición.

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	<input type="text" value="SI"/>	<input type="text" value="Inicio"/>
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II	<input type="text"/>	<input type="text" value="24-P"/>
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica	<input type="text"/>	<input type="text" value="24-O"/>

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

Ing. Romy Pérez Moreno



Sello de la Coordinación de Estudios

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño y construcción de una máquina compactadora de viruta de aluminio, con la finalidad de reutilizar los residuos generados en el taller de mecánica de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Una vez compactada, la viruta de aluminio será trasladada al taller de fundición de la misma Universidad, donde podrá ser utilizada en futuros proyectos que lo requieran. Esta iniciativa busca no solo reducir el desperdicio de material, sino también optimizar su aprovechamiento en nuevos procesos productivos.

Para asegurar una mejor compactación de la viruta, se llevará a cabo un proceso previo de lavado, con el fin de eliminar la mayor parte de los residuos de fluido de corte que se adhieren durante los procesos de mecanizado. Para la elección del detergente adecuado, se realizó una investigación sobre los fluidos de corte utilizados con mayor frecuencia en los talleres de la Universidad. Con base en esta información, se seleccionó el detergente que resultara más efectivo para eliminar dichos residuos. Se detallan además todos los pasos y materiales que deben considerarse para llevar a cabo una limpieza adecuada de la viruta, garantizando así una compactación más eficiente.

En cuanto al diseño de la máquina compactadora, ésta tendrá la estructura de una prensa hidráulica tipo H, debido a su facilidad de manejo manual. El desplazamiento se realizará en el eje Y mediante rieles, los cuales estarán instalados en las dos columnas con perfil de canal C.P.S. Este movimiento permitirá una compactación vertical eficiente de la viruta de aluminio. La fuerza de compactación será generada manualmente a través de un pistón hidráulico. Adicionalmente, se incorporarán dos resortes que facilitarán el retorno del pistón a su posición original tras cada operación.

El diseño estructural de la máquina está compuesto en su mayoría por elementos de acero, seleccionados por su resistencia y adecuación para la aplicación requerida. La elección de estos materiales fue fundamentada en cálculos rigurosos de análisis de cargas, esfuerzos, flexión, deflexión, deformación y factores de seguridad. Los resultados obtenidos de los análisis teóricos confirmaron que tanto los materiales como las dimensiones de la estructura son adecuados para cumplir con las exigencias del proyecto.

Para complementar y validar los cálculos realizados, se llevaron a cabo simulaciones mediante el método de elementos finitos. Estas simulaciones permitieron observar el comportamiento estructural de los componentes más críticos de la prensa

hidráulica, garantizando que la máquina pueda operar de manera segura y eficiente bajo las condiciones previstas.

Este proyecto no solo proporciona una solución técnica viable para la reutilización de viruta de aluminio, sino que también contribuye a la sostenibilidad de los procesos productivos del taller, al igual que a la optimización de recursos dentro de la universidad y minimizando el impacto ambiental.

Índice

1. Introducción.....	18
2. Antecedentes.....	20
3. Justificación.....	21
4. Objetivos.....	22
4.1. Objetivo general.....	22
4.2. Objetivos particulares.....	22
5. Marco teórico.....	23
5.1. Generalidades de la viruta de aluminio.....	23
5.1.1. Naturaleza y características de la viruta de aluminio.....	23
5.1.2. Importancia de la compactación de la viruta.....	24
5.1.3. Reciclabilidad y sostenibilidad del aluminio.....	24
5.1.4. Desafíos ambientales y económicos del manejo de virutas.....	24
5.1.5. Aplicaciones del aluminio reciclado.	25
5.2. Principios de compactación de materiales.....	25
5.2.1. Densificación y compactación.....	25
5.2.2. Factores que afectan la compactación (material, presión, diseño del molde).....	26
5.2.3. Relación entre presión aplicada y densidad alcanzada.....	28
5.3. Prensas hidráulicas.....	29
5.3.1. Definición y tipo de prensas hidráulicas.....	29
5.3.2. Funcionamiento de una prensa hidráulica tipo H.....	31
5.3.3. Ventajas de utilizar prensas hidráulicas en aplicaciones industriales.....	32
5.4. Componentes principales de la máquina compactadora.....	33
5.4.1. Gato hidráulico de botella (principios de funcionamiento, capacidad de carga y mantenimiento).....	33
5.4.2. Diseño estructural del marco tipo H (materiales, resistencia y estabilidad)...	35

5.4.3.	Vasos y moldes de compactación (materiales y diseño para soportar altas presiones)	36
5.5.	Materiales utilizados en la construcción.....	36
5.5.1.	Selección de materiales para componentes clave (acero para el marco estructural, vasos y resortes).....	36
5.5.2.	Propiedades del acero 4140 y su tratamiento térmico para mejorar su resistencia.....	38
5.5.3.	Resistencia y durabilidad de materiales bajo cargas dinámicas y estáticas.....	39
5.6.	Cálculos y diseño mecánico.....	41
5.6.1.	Cálculo de esfuerzos en el marco estructural y componentes del molde de compactación (esfuerzo cortante y compresión)	41
5.6.2.	Selección de factor de seguridad para la estructura y el molde de compactación.....	42
5.6.3.	Dimensionamiento de los resortes de retorno en la prensa.....	43
5.7.	Normas y estándares aplicables.....	44
5.7.1.	Normas relacionadas con el diseño y uso de prensas hidráulicas.....	44
5.7.2.	Normas para recipientes sometidos a presión.....	45
5.7.3.	Estándares de seguridad para equipos industriales.....	46
5.8.	Mecanismos auxiliares.....	47
5.8.1.	Sistemas de retorno (uso de resortes en la prensa).....	47
5.8.2.	Métodos de sujeción y posicionamiento del material a compactar.....	48
5.9.	Impacto ambiental y económico.....	50
5.9.1.	Contribución al reciclaje de aluminio.....	50
5.10.	Análisis de fallas y mantenimiento.....	51
5.10.1.	Posibles modos de falla en la máquina compactadora.....	51
5.10.2.	Métodos para prevenir fallas en el gato hidráulico y el marco estructural.....	52

5.10.3. Estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo.....	53
6. Desarrollo del proyecto.....	55
6.1. Funcionamiento.....	55
6.2. Geometría y volumen de la briqueta.....	56
6.2.1. Relación de compactación.....	56
6.2.2. Volumen de viruta a compactar.....	58
6.3. Fuerza y presión de compactación.....	58
6.4. Estructura de la compactadora.....	60
6.5. Diseño de los componentes de la máquina compactadora.....	61
6.5.1. Molde de compactación.....	61
6.5.1.1. Simulación para el molde de compactación.....	65
6.5.2. Placa de apoyo.....	68
6.5.2.1. Simulaciones para la placa de apoyo.....	71
6.5.3. Barra de compactación.....	74
6.5.3.1. Simulación para la barra de compactación.....	78
6.5.4. Pernos para sujetar las bases de compactación.....	80
6.5.4.1. Simulación para la barra de compactación.....	85
6.5.5. Resortes de extensión.....	87
6.6. Manufactura de los componentes de la compactadora.....	95
6.6.1. Estructura lateral.....	96
6.6.2. Estructura superior.....	98
6.6.3. Molde de compactación.....	98
6.6.4. Barra de compactación.....	100
6.6.5. Base del actuador.....	102
6.6.6. Bases de compactación.....	103
6.6.7. Pernos.....	104
6.6.8. Placa de apoyo.....	105
6.6.9. Soportes.....	106

6.6.10. Ensamble.....	107
6.7. Lavado de viruta.....	111
6.7.1. Materiales.....	112
6.7.2. Procedimiento de lavado.....	114
6.7.3. Procedimiento de compactación.....	117
7. Resultados.....	120
7.1. Pruebas de compactación.....	120
7.2. Pruebas de fundición.....	121
8. Análisis y discusión de resultados.....	125
9. Conclusiones.....	126
10. Referencias bibliográficas.....	127
11. Entregables comprometidos en la propuesta.....	128
12. Apéndices.....	129

Índice de figuras

Figura 1. Viruta de aluminio del Taller Mecánico [Imagen propia].....	19
Figura 2. Briqueta obtenida en prueba de laboratorio [2].....	19
Figura 3. Viruta de aluminio resultante de un proceso de mecanizado [7].....	23
Figura 4. Relación densidad-presión de compactación [11].....	28
Figura 5. Prensa hidráulica tipo H [13].....	30
Figura 6. Prensa hidráulica tipo C [13].....	30
Figura 7. Prensa hidráulica de cuatro columnas [13].....	31
Figura 8. Principio de funcionamiento del gato hidráulico de botella [14].....	34
Figura 9. Modelo de la máquina compactadora [Imagen propia].....	55
Figura 10. Principio de funcionamiento [Imagen propia].....	56
Figura 11. Diagrama del perfil CPS [30].....	60
Figura 12. Diagrama del perfil de un ángulo [31].....	60
Figura 13. Dimensiones de la estructura [Imagen propia].....	61
Figura 14. Distribución de esfuerzos en un recipiente cilíndrico de pared gruesa sometido a presión interna [17].....	63
Figura 15. Molde de compactación [Imagen propia].....	66
Figura 16. Condición de fijación para el molde [Imagen propia].....	66
Figura 17. Presión aplicada al molde [Imagen propia].....	67
Figura 18. Esfuerzos en el molde [Imagen propia].....	67
Figura 19. Factor de seguridad en el molde [Imagen propia].....	68
Figura 20. Posición de la placa de apoyo [Imagen propia].....	68
Figura 21. Placa de apoyo [Imagen propia].....	72
Figura 22. Condiciones de fijación en la placa [Imagen propia].....	72
Figura 23. Fuerza ejercida sobre la placa [Imagen propia].....	73
Figura 24. Distribución de esfuerzos en la placa [Imagen propia].....	73
Figura 25. Factor de seguridad en la placa de apoyo [Imagen propia].....	74
Figura 26. Funcionamiento de la barra de compactación [Imagen propia].....	75

Figura 27. Modelo de la barra de compactación [Imagen propia].....	79
Figura 28. Restricción de la barra de compactación [Imagen propia].....	79
Figura 29. Fuerza en la barra de compactación [Imagen propia].....	79
Figura 30. Distribución de esfuerzos en la barra de compactación [Imagen propia]....	80
Figura 31. Factor de seguridad en la barra de compactación [Imagen propia].....	80
Figura 32. Posición de los pernos [Imagen propia].....	81
Figura 33. Fuerzas en los pernos [Imagen propia].....	81
Figura 34. Modelo del perno [Imagen propia].....	85
Figura 35. Restricciones en los pernos [Imagen propia].....	85
Figura 36. Fuerza en el perno [Imagen propia].....	86
Figura 37. Distribución de esfuerzos en el perno [Imagen propia].....	86
Figura 38. Factor de seguridad en el perno [Imagen propia].....	87
Figura 39. Ejemplo de resortes de extensión [32].....	87
Figura 40. Dimensiones clave de un resorte de extensión [33]	88
Figura 41. Alturas del gato hidráulico [34]	89
Figura 42. Elementos fabricados en el taller [Imagen propia].....	96
Figura 43. Perforación de las estructuras laterales [Imagen propia].....	97
Figura 44. Corte del patín en los canales CPS [Imagen propia].....	97
Figura 45. Estructura superior [Imagen propia]	98
Figura 46. Materia prima para el molde de compactación [Imagen propia]	98
Figura 47. Eliminación de imperfecciones a la materia prima del molde de compactación [Imagen propia].....	99
Figura 48. Perforación del molde con brocas [Imagen propia].....	99
Figura 49. Perforación del molde con barra de interiores [Imagen propia].....	99
Figura 50. Molde de compactación fabricado [Imagen propia].....	100
Figura 51. Materia prima para la barra de compactación [Imagen propia].....	100
Figura 52. Inserción del machuelo en la barra de compactación [Imagen propia]....	101
Figura 53. Barra de compactación fabricada [Imagen propia].....	101

Figura 54. Fijación del actuador hidráulico [Imagen propia].....	102
Figura 55. Guías para la base del actuador [Imagen propia].....	102
Figura 56. Tornillo de acoplamiento de la barra de compactación [Imagen propia] ...	103
Figura 57. Bases de compactación fabricadas [Imagen propia].....	103
Figura 58. Materia prima para los pernos compactación [Imagen propia].....	104
Figura 59. Perno fabricado [Imagen propia].....	104
Figura 60. Placa de apoyo fabricada [Imagen propia].....	105
Figura 61. Posición de la placa de apoyo secundaria [Imagen propia].....	106
Figura 62. Soportes perforados [Imagen propia].....	106
Figura 63. Estructura principal unida por soldadura [Imagen propia].....	107
Figura 64. Ensamble de los soportes [Imagen propia].....	107
Figura 65. Ensamble de las armellas [Imagen propia].....	108
Figura 66. Ensamble de las bases de compactación [Imagen propia].....	108
Figura 67. Ensamble de los seguros en R [Imagen propia].....	109
Figura 68. Ensamble de la base del actuador [Imagen propia].....	109
Figura 69. Ensamble de la barra de compactación [Imagen propia].....	110
Figura 70. Ensamble de las soleras [Imagen propia].....	110
Figura 71. Ensamble del gato hidráulico [Imagen propia].....	111
Figura 72. Detergente para el lavado [Referencia].....	112
Figura 73. Recipiente de acero inoxidable [Referencia].....	112
Figura 74. Cuchara de plástico [Referencia].....	113
Figura 75. Colador de acero inoxidable [Referencia].....	113
Figura 76. Rejilla para drenado [Referencia].....	113
Figura 77. Pistola de calor [Referencia].....	114
Figura 78. Preparación del detergente con el agua [Imagen propia].....	114
Figura 79. Vaciado de la viruta en la solución preparada [Imagen propia].....	115
Figura 80. Agitación de la viruta dentro de la solución preparada [Imagen propia]....	115
Figura 81. Enjuague de la viruta [Imagen propia].....	116

Figura 82. Viruta colocada en la rejilla para su secado [Imagen propia]	116
Figura 83. Agua residual desechada [Imagen propia].....	117
Figura 84. Llenado del molde de compactación con viruta de aluminio [Imagen propia].....	117
Figura 85. Funcionamiento de compactación [Imagen propia]	118
Figura 86. Extracción de la briqueta [Imagen propia].....	119
Figura 87. Briqueta obtenida de la prueba de compactación por partes [Imagen propia].....	120
Figura 88. Briqueta obtenida de las pruebas de compactación [Imagen propia].....	121
Figura 89. Inicio del proceso de fundición [Imagen propia].....	122
Figura 90. Briquetas después de 30 minutos en el horno de fundición [Imagen propia].....	122
Figura 91. Lingote agregado al crisol [Imagen propia].....	123
Figura 92. Briqueta convertida en escoria [Imagen propia].....	123
Figura 93. Briqueta quemada [Imagen propia].....	124

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de los resultados obtenidos con tres materiales diferentes.....65

Tabla 2. Resultados para las diferentes propiedades de cada material.....84

1. Introducción.

Las máquinas destinadas a compactar viruta metálica son dispositivos desarrollados con el fin de disminuir el volumen de los residuos generados durante los procesos de mecanizado. Estos equipos tienen la capacidad de manejar grandes volúmenes de viruta, transformándolos en bloques compactos de menor tamaño, lo que simplifica su manejo, almacenamiento y transporte, además de facilitar su reciclaje.

En la mayoría de los casos, las virutas producidas en procesos de mecanizado tienen un ancho promedio de 6.28 mm (ver figura 1) y una densidad que varía entre 0.20 y 0.50 kg/dm³ [1]. Esta baja densidad provoca que la viruta flote en lugar de fundirse. Además, la naturaleza de la viruta implica que no se puede fundir directamente sin tratamiento previo.

Un aspecto relevante es que, durante el proceso de mecanizado, la viruta se ve contaminada con fluidos de corte, lo cuales afectan directamente sus propiedades para el reciclaje. En el ámbito industrial, muchas compactadoras están equipadas con sistemas que permiten extraer estos fluidos. No obstante, cuando los equipos no disponen de esta capacidad, es necesario realizar un proceso de limpieza previo a la compactación de la viruta para mejorar su calidad y viabilidad para el reciclado.

Este proyecto tuvo como objetivo el diseño y la construcción de una máquina compactadora destinada a la viruta de aluminio generada en el taller de mecánica de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. La finalidad de esta máquina es reutilizar dicha viruta en el taller de fundición de la misma universidad, promoviendo un enfoque más sostenible en el uso de los materiales.

Según la información técnica disponible, la fuerza de compactación óptima para producir briquetas cilíndricas de viruta oscila entre las 10 y las 30 toneladas, lo que resulta en bloques con dimensiones aproximadas de 60 mm de diámetro y 27 mm de altura (ver figura 2) [2]. Estas dimensiones son ideales para su posterior manejo en los procesos fundición.

En base a lo anterior, se llevó a cabo el diseño del contenedor encargado de compactar la viruta, seleccionando cuidadosamente el actuador hidráulico capaz de generar la fuerza necesaria para lograr una compactación eficiente. Además, se diseñó y seleccionó el mecanismo de compactación de la viruta, junto con las estructuras adecuadas para el dispositivo de lavado. Finalmente, se realizaron diversas pruebas sobre los bloques compactados para verificar su adecuación y funcionalidad dentro del taller de fundición.



Figura 1. Viruta de aluminio del Taller Mecánico [Imagen propia].



Figura 2. Briqueta obtenida en prueba de laboratorio [2].

2. Antecedentes.

En el año 2005, David Concha Contreras realizó la tesis: “Reciclado de rebaba producida por el área de maquinado de una fábrica de partes de aluminio”. En este trabajo se presenta el desarrollo del diseño de una máquina compactadora de viruta de aluminio que se adapta a las necesidades específicas de la empresa. De esta referencia se tomó en cuenta el diseño para lograr la extracción de la briqueta [2].

Romel Gustavo Cruz Moreno y Lenin Guillermo Santo Remache realizaron el trabajo de titulación que lleva por nombre: “Diseño de un prototipo de máquina compactadora para la recuperación de viruta de aluminio que se genera en la empresa Corporación Ecuatoriana de Aluminio de la ciudad de Latacunga Cedal S.A.”. De este trabajo se tomaron como referencia las pruebas de compactación realizadas, las propiedades obtenidas en la briqueta, así como los cálculos y análisis del diseño de la máquina compactadora [3].

De la tesis: “Diseño de máquina compactadora de viruta metálica con capacidad de 20 kg/h para la empresa INGLEBY SAC-Motupe, Lambayeque”, del alumno Daniel Zúñiga Acosta; se tomaron como referencia los cálculos para el diseño y caracterización del sistema hidráulico [4].

En 2019, la revista Centro Azúcar publicó un artículo titulado: “Alternativa de recuperación de elementos metálicos en residuos sólidos industriales”. En esa publicación se propone una alternativa para la disminución de residuos metálicos mediante el procesamiento aluminotérmico. De este texto se analizó el procedimiento desengrasante del aluminio utilizando agua y vapor [5].

En el sitio web de la empresa CONIEX, se resalta el principio de funcionamiento de sus productos de centrifugado para virutas, así como los químicos utilizados en lavadoras de piezas industriales. De esta página se revisó la información referente a los productos empleados en las máquinas lavadoras. También se utilizó como punto de partida para conocer el funcionamiento de las centrifugadoras [6].

3. Justificación.

En el taller de mecánica, cada trimestre se imparten al menos cuatro grupos correspondientes a la Unidad de Enseñanza-Aprendizaje (UEA) "Taller de Procesos de Manufactura II", donde el material principal de trabajo es el aluminio. Durante este proceso, se genera viruta de aluminio, la cual, debido a su baja densidad, tiende a flotar cuando se coloca en los crisoles durante la fundición. Además, otro problema surge por la presencia de líquidos refrigerantes en la viruta, los cuales complican la adecuada integración de este material residual en el proceso de fundición.

Con el fin de abordar y mitigar estos inconvenientes, se plantea el diseño y construcción de una máquina compactadora específicamente diseñada para compactar virutas de aluminio. A través de este equipo, se podrán producir briquetas cilíndricas de aluminio con las dimensiones y peso necesarios para evitar que floten en los crisoles de fundición. Esto facilitará su integración en el proceso, promoviendo así un reciclaje más eficiente del material.

4. Objetivos.

4.1. Objetivo general.

Diseñar y construir una máquina compactadora de viruta de aluminio, con el propósito de que los residuos generados en el taller de mecánica sean reutilizados en el taller de fundición.

4.2. Objetivos particulares.

Realizar pruebas de compactación de la viruta de aluminio, utilizando la máquina de pruebas universal de la UAM Azcapotzalco para contrastar la información obtenida de la literatura.

Seleccionar e implementar un método adecuado para el lavado de la viruta.

Diseñar el contenedor de viruta a compactar.

Diseñar los componentes de la estructura del dispositivo de compactación.

Diseñar y seleccionar el sistema hidráulico de compactación.

Simular el movimiento del sistema de compactación en un programa de CAD.

Construir el dispositivo de compactación.

Realizar pruebas de compactación.

5. Marco teórico.

5.1. Generalidades de la viruta de aluminio.

5.1.1. Naturaleza y características de la viruta de aluminio.

La viruta de aluminio es un subproducto del mecanizado de piezas en diversas industrias, como la automotriz, de construcción, entre otras. Estas virutas suelen formarse cuando herramientas de corte, como fresas o tornos, remueven material de una pieza base para darle una forma deseada.

Su forma y tamaño dependen del tipo de mecanizado y las condiciones del proceso, como la velocidad de corte, el avance y el uso de lubricantes. En general, las virutas pueden clasificarse en largas, cortas y en polvo, cada una con desafíos particulares para su manejo.

Otra característica importante de la viruta es su contaminación por aceites y lubricantes utilizados durante el mecanizado, lo que hace necesario un proceso de limpieza previo al reciclaje, asegurando así que el aluminio recuperado sea de alta calidad y adecuado para nuevos procesos industriales.

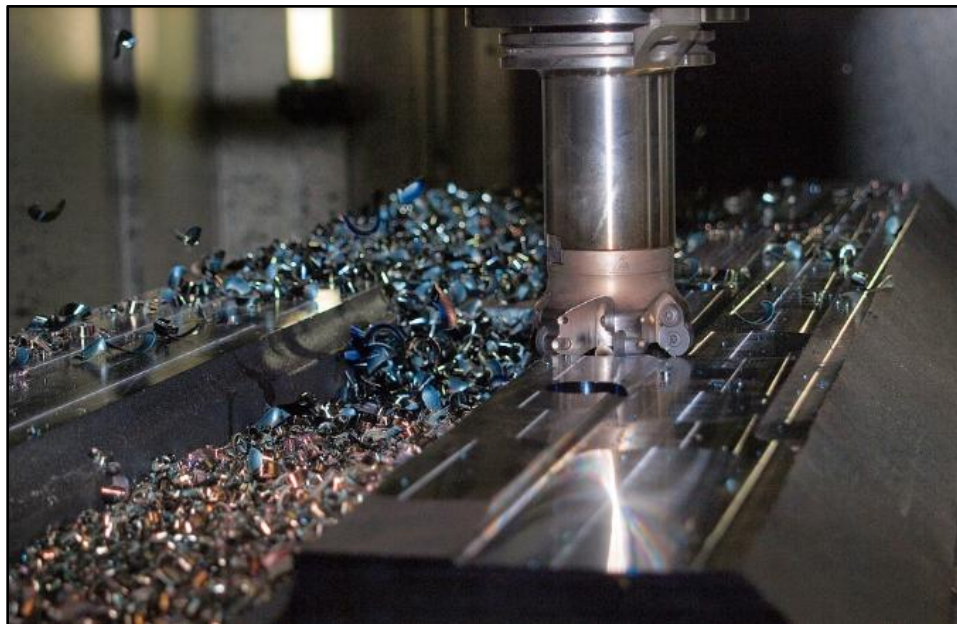


Figura 3. Viruta de aluminio resultante de un proceso de mecanizado [7].

5.1.2. Importancia de la compactación de la viruta

La compactación de virutas de aluminio es crucial para optimizar los procesos de reciclaje y manejo del material. Una de las principales ventajas es la reducción de volumen, que puede llegar al 90%, dependiendo de la densidad alcanzada. Esto permite disminuir significativamente los costos de transporte y almacenamiento. Además, durante la compactación, se pueden recuperar aceites y líquidos de corte que pueden ser reutilizados, reduciendo costos y el impacto ambiental.

La densificación también mejora la manipulación del material. Las virutas no compactadas son difíciles de apilar y mover debido a su forma irregular y baja densidad. Al convertirlas en briquetas, se simplifica su manejo en las plantas de reciclaje y se mejora la eficiencia en los hornos de fundición, donde el aluminio compacto funde más rápido y con menores pérdidas.

5.1.3. Reciclabilidad y sostenibilidad del aluminio

El aluminio es reconocido como uno de los materiales más reciclables del mundo. Este material destaca por su alta durabilidad, resistencia a la corrosión y ligereza, características que permanecen intactas incluso después de múltiples ciclos de reciclaje.

5.1.4. Desafíos ambientales y económicos del manejo de virutas

Las virutas de aluminio representan un desafío en términos ambientales, principalmente debido a su alta contaminación de suelos y aguas cuando no se manejan adecuadamente. Los aceites y lubricantes utilizados durante el mecanizado pueden causar impactos negativos si las virutas no se procesan correctamente.

Por otro lado, la baja densidad de las virutas no compactadas incrementa demasiado los costos de transporte y almacenamiento, haciéndolo ineficiente tanto económica como ambientalmente.

La compactación de virutas no solo reduce estos problemas, sino que también permite a las empresas cumplir con regulaciones ambientales más estrictas. En términos económicos, la venta de briquetas compactadas genera un ingreso adicional para las empresas, dado que las fundidoras y recicladoras prefieren este formato por su mayor densidad y menor contaminación.

5.1.5. Aplicaciones del aluminio reciclado

El aluminio reciclado tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria. En el sector automotriz, se utiliza para fabricar carrocerías, chasis y componentes internos debido a su ligereza y resistencia. En el sector de la construcción, el aluminio reciclado se emplea en ventanas, techos y estructuras arquitectónicas.

Además, la creciente demanda de aluminio en tecnologías emergentes, como paneles solares y vehículos eléctricos, refuerza la necesidad de sistemas eficientes de reciclaje y manejo de subproductos como las virutas.

5.2. Principios de compactación de materiales.

5.2.1. Densificación y compactación.

La *densificación* es un proceso físico mediante el cual se incrementa la densidad de un material al reducir los espacios vacíos o porosidad entre sus partículas constituyentes. Este fenómeno ocurre predominantemente a través del reordenamiento, deformación plástica y, en algunos casos, la unión entre partículas, inducidos por la aplicación de fuerzas externas, como presión mecánica o térmica [8].

En el caso de materiales metálicos, como el aluminio, la densificación resulta fundamental para consolidar materiales en estado particulado, como virutas o polvos, en componentes sólidos y homogéneos. Este proceso no solo mejora las propiedades mecánicas, como la resistencia y la rigidez, sino que también optimiza el manejo, transporte y uso industrial de los productos resultantes, contribuyendo a su funcionalidad y valor agregado.

La densificación puede clasificarse en tres etapas fundamentales:

La compactación inicial: Las partículas se reordenan y redistribuyen para reducir al máximo los espacios vacíos.

La deformación elástica: Se manifiesta bajo la aplicación de una presión moderada y en la cual las partículas experimentan una deformación reversible.

La deformación plástica: Etapa crucial donde las partículas sufren deformación permanente, promoviendo su interconexión y formando enlaces más sólidos entre ellas.

Este último proceso resulta esencial para asegurar que el material consolidado alcance propiedades mecánicas óptimas, como una mayor resistencia y estabilidad estructural.

La *compactación* es un proceso técnico mediante el cual se ejerce presión sobre materiales sueltos con el objetivo de reducir su volumen y aumentar su densidad. Este método tiene aplicaciones fundamentales en la metalurgia, especialmente en la fabricación de briquetas, componentes estructurales y productos obtenidos mediante procesos como la sinterización.

En el caso de materiales metálicos como el aluminio, la compactación facilita la transformación de residuos metálicos en piezas funcionales y reutilizables, contribuyendo al desarrollo de procesos industriales sostenibles y a la promoción del reciclaje en el ámbito manufacturero.

Durante el proceso de compactación, resulta esencial garantizar la uniformidad en la aplicación de presión, así como evaluar las características geométricas del material inicial. Estas variables influyen directamente en la calidad y las propiedades del producto final.

Una compactación eficiente no solo incrementa la densidad del material, sino que también mejora significativamente su resistencia mecánica, cohesión interna y estabilidad estructural, factores clave para aplicaciones de alto rendimiento.

5.2.2 Factores que afectan la compactación (material, presión, diseño del molde).

❖ Material.

Las propiedades intrínsecas del material, tales como dureza, ductilidad, y el tamaño y distribución de partículas, desempeñan un papel determinante en el éxito del proceso de compactación.

Materiales metálicos como el aluminio, debido a su elevada capacidad de deformación plástica, presentan una ventaja significativa para lograr altas densidades bajo presión. No obstante, la presencia de contaminantes como aceites, lubricantes o residuos de mecanizado puede reducir la cohesión entre partículas, comprometiendo la densidad alcanzada y las propiedades finales del producto.

El tamaño y la morfología de las partículas son factores críticos en la compactación. Las partículas de menor tamaño y con geometrías esféricas o casi esféricas suelen compactarse de manera más eficiente, ya que su capacidad para reordenarse permite reducir significativamente los espacios interparticulares.

Esta característica optimiza la densidad alcanzada y favorece la formación de un material más homogéneo y compacto, mejorando las propiedades mecánicas y estructurales del producto final [8].

❖ **Presión aplicada.**

La presión aplicada constituye uno de los factores más determinantes en el proceso de compactación. Existe un rango de presión óptimo que varía según las características específicas del material a compactar. La aplicación de una presión insuficiente puede dar lugar a la formación de vacíos internos, resultando en piezas con baja densidad y propiedades mecánicas comprometidas.

Por el contrario, una presión excesiva puede inducir fracturas internas o deformaciones plásticas no deseadas, que afectan negativamente la integridad del material y su desempeño en aplicaciones posteriores. La correcta selección y control de la presión es, por tanto, esencial para lograr un producto final con las características deseadas en términos de densidad, resistencia y homogeneidad.

Estudios realizados en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina muestran que, para materiales como el aluminio, presiones de 200-300 MPa son suficientes para lograr densidades cercanas al 90% de la densidad teórica del material sólido [9].

❖ **Diseño del molde.**

El diseño del molde juega un papel fundamental en la calidad y eficiencia del proceso de compactación. Moldes con geometrías cuidadosamente optimizadas aseguran una distribución homogénea de la presión aplicada sobre el material, lo cual es esencial para evitar la formación de defectos tales como gradientes de densidad o deformaciones localizadas que puedan comprometer las propiedades finales del producto.

La configuración del molde debe permitir que las partículas se acomoden de manera uniforme, promoviendo una compactación efectiva y evitando áreas de debilidad estructural.

Además de la geometría, el material con el que se fabrica el molde debe ser capaz de resistir las altas presiones aplicadas durante el proceso de compactación sin sufrir deformaciones permanentes.

El uso de materiales con alta resistencia mecánica y estabilidad dimensional es crucial para garantizar que el proceso de compactación sea reproducible y eficiente a lo

largo de múltiples ciclos. El molde debe mantener su integridad estructural incluso bajo condiciones extremas de presión, lo que asegura la calidad constante del producto final y la prolongación de la vida útil del equipo.

5.2.3 Relación entre presión aplicada y densidad alcanzada.

La relación entre la presión aplicada y la densidad alcanzada en el proceso de compactación sigue generalmente una curva logarítmica. Durante las primeras etapas del proceso, pequeños incrementos en la presión generan aumentos significativos en la densidad debido al reordenamiento y acomodo inicial de las partículas. En esta fase, los vacíos inter partculares son relativamente grandes y su reducción bajo presión conduce a una mejora rápida de la densidad del material [10].

Conforme avanza la compactación y los vacíos internos se reducen, el proceso de densificación se vuelve menos eficiente y requiere aplicar mayores niveles de presión para lograr incrementos adicionales en la densidad. A medida que el material alcanza una mayor compactación, las partículas se acercan y la resistencia a la deformación aumenta, lo que implica que la presión adicional es menos efectiva para obtener mejoras sustanciales en la densidad.

Este fenómeno refleja la disminución de la eficiencia de la compactación conforme se acerca al límite de densidad del material.

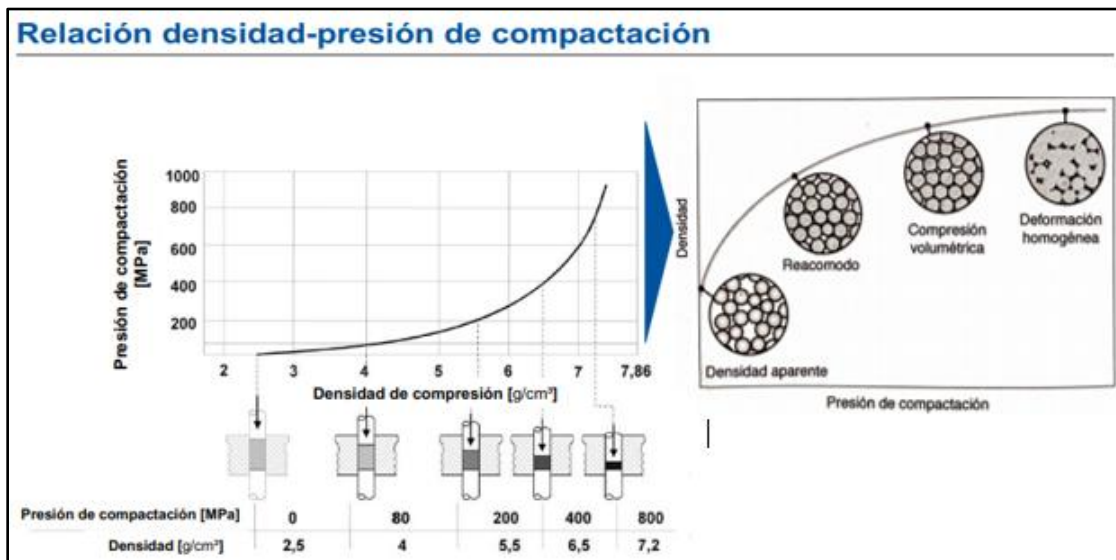


Figura 4. Relación densidad-presión de compactación [11].

En un estudio realizado por Sánchez y Muñoz (2019), se encontró que la densidad alcanzada en materiales metálicos como el aluminio se estabiliza en un punto en el que la presión adicional tiene un impacto marginal. Este fenómeno ocurre cuando las partículas han alcanzado su límite de deformación plástica, lo que significa que prácticamente no quedan vacíos por llenar [8].

Investigaciones en España sobre el compactado de virutas de aluminio muestran que densidades superiores al 90% de la densidad teórica se logran con presiones entre 250 y 300 MPa [12]. No obstante, presiones mayores pueden provocar defectos, como fracturas internas, lo que subraya la importancia de determinar un rango óptimo para cada material.

5.3. Prensas hidráulicas.

5.3.1. Definición y tipo de prensas hidráulicas.

Una prensa hidráulica es un dispositivo mecánico que emplea un sistema hidráulico para generar una fuerza de compresión significativa, lo que facilita la deformación, conformado o compactación de materiales bajo la acción de presión aplicada. Este tipo de prensa es fundamental en diversos procesos industriales, particularmente en aquellas aplicaciones donde se requieren operaciones de conformado, estampado, doblado o prensado de materiales metálicos, plásticos o compuestos, siendo indispensable en la fabricación de componentes de alta precisión y resistencia.

Existen diversos tipos de prensas hidráulicas, entre los cuales se destacan:

❖ Prensas hidráulicas en H.

Las prensas hidráulicas tipo H están diseñadas con una estructura robusta en forma de "H", la cual optimiza la estabilidad de la máquina y favorece una distribución homogénea de la presión aplicada sobre el material.

Esta configuración las convierte en una herramienta ideal para realizar diversas operaciones industriales, tales como conformado, forjado, estampado, doblado, enderezado, punzonado y ensamblaje de metales, garantizando precisión y eficiencia en procesos de fabricación de componentes metálicos y otros materiales.



Figura 5. Prensa hidráulica tipo H [13].

❖ **Prensas hidráulicas en C.**

Las prensas hidráulicas de bastidor en forma de "C" están diseñadas para ofrecer una mayor velocidad de operación, precisión en el control de fuerzas y un rendimiento superior en el guiado de los componentes.

Esta configuración permite una mayor portabilidad, lo que las hace ideales para aplicaciones como el montaje y fijación de piezas, así como para el desmontaje de componentes y la instalación de rodamientos, garantizando así una alta eficiencia en procesos de ensamblaje y mantenimiento industrial.



Figura 6. Prensa hidráulica tipo C [13].

❖ **Prensas de cuatro columnas.**

Equipadas con dos cilindros hidráulicos de alta capacidad y un sistema de control centralizado, estas prensas permiten un ajuste preciso tanto de la presión como de la velocidad de compresión, facilitando operaciones con una función de circulación semiautomática.

Este diseño las hace especialmente adecuadas para aplicaciones industriales que exigen altos niveles de precisión en la manipulación de materiales, así como una considerable fuerza de compresión, garantizando la eficacia y la calidad del proceso en condiciones exigentes.



Figura 7. Prensa hidráulica de cuatro columnas [13].

5.3.2. Funcionamiento de una prensa hidráulica tipo H.

Las prensas hidráulicas de tipo H operan mediante un sistema hidráulico en el que un fluido, generalmente aceite, se utiliza para transmitir la fuerza generada. El fluido es impulsado por una bomba hacia un cilindro hidráulico, donde se induce una presión significativa que actúa sobre un pistón. Esta presión se transmite al material a través de un vástago, lo que facilita la deformación o conformado del mismo.

La estructura en "H" proporciona una base sólida y estable, optimizando la distribución homogénea de la presión aplicada y permitiendo la manipulación eficiente de piezas de grandes dimensiones y peso, sin comprometer la precisión y la integridad del proceso.

5.3.3. Ventajas de utilizar prensas hidráulicas en aplicaciones industriales.

El uso de prensas hidráulicas en aplicaciones industriales ofrece diversas ventajas:

❖ **Alta capacidad de fuerza.**

Las prensas hidráulicas son capaces de generar fuerzas sustanciales, lo que las hace especialmente adecuadas para procesos industriales que demandan altas presiones, como el conformado, estampado y forjado de metales, garantizando un rendimiento óptimo en aplicaciones que requieren una deformación precisa de materiales bajo condiciones de alta carga.

❖ **Control preciso.**

Las prensas hidráulicas proporcionan un control altamente preciso sobre la fuerza aplicada y la velocidad de compresión, lo que resulta esencial para garantizar resultados consistentes y de alta calidad en los procesos de fabricación, permitiendo ajustes finos para optimizar la deformación del material y mantener las tolerancias dimensionales exigidas en aplicaciones industriales de alta precisión.

❖ **Versatilidad.**

Las prensas hidráulicas ofrecen una gran versatilidad, siendo capaces de adaptarse a una extensa variedad de aplicaciones industriales, que incluyen desde el estampado, doblado y conformado de metales hasta la fabricación de componentes de geometrías complejas, lo que las convierte en herramientas esenciales en procesos de producción que requieren flexibilidad y eficiencia en el manejo de diversos materiales y formas.

❖ **Eficiencia energética.**

El sistema hidráulico de las prensas permite una transmisión altamente eficiente de la energía, optimizando el uso del fluido para generar la fuerza necesaria. Esto se traduce en una reducción significativa del consumo energético en comparación con sistemas mecánicos tradicionales, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los costos energéticos asociados al proceso de producción.

❖ **Mantenimiento reducido.**

Las prensas hidráulicas demandan un mantenimiento reducido en comparación con otros tipos de prensas, gracias a su diseño robusto y a la menor cantidad de componentes móviles sujetos a desgaste. Este bajo requerimiento de mantenimiento contribuye a la reducción de los costos operativos y maximiza la disponibilidad operativa de la máquina, asegurando una mayor continuidad en los procesos productivos.

Estas características posicionan a las prensas hidráulicas como una herramienta indispensable en diversas industrias de alto rendimiento, tales como la automotriz, aeronáutica y la fabricación de componentes electrónicos, donde se requieren procesos de conformado y ensamblaje de alta precisión y fuerza, garantizando tanto la eficiencia como la calidad en la producción de piezas complejas y de alto valor añadido.

5.4. Componentes principales de la máquina compactadora.

5.4.1. Gato hidráulico de botella (principios de funcionamiento, capacidad de carga y mantenimiento).

Un gato hidráulico de botella es un equipo mecánico especializado que se utiliza para levantar y mantener cargas pesadas mediante la utilización de presión hidráulica. Su funcionamiento se fundamenta en el principio de Pascal, el cual establece que, en un fluido incompresible contenido en un sistema cerrado, cualquier presión aplicada se transmite de manera uniforme en todas las direcciones.

Este principio permite amplificar una fuerza relativamente pequeña aplicada sobre un pistón de menor área, logrando generar una fuerza considerablemente mayor en un pistón con mayor área.

El mecanismo de este tipo de gato hidráulico incluye componentes esenciales como un cilindro principal, un pistón de bombeo, una válvula de control y un fluido hidráulico, comúnmente aceite.

Cuando se acciona el pistón de bombeo, el fluido hidráulico es empujado hacia el cilindro principal, lo que provoca el movimiento ascendente del pistón principal, levantando la carga en el proceso. Una válvula de retención asegura que el fluido no retroceda, lo que permite que la carga se mantenga en una posición elevada hasta que se decida liberar la presión acumulada.

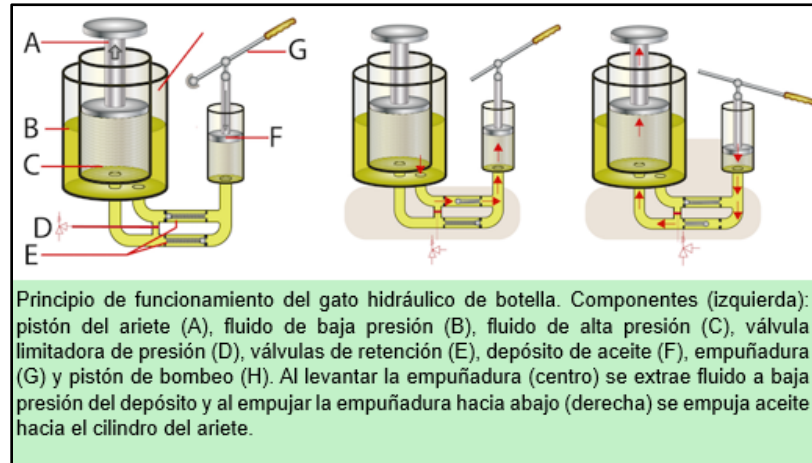


Figura 8. Principio de funcionamiento del gato hidráulico de botella [14].

Los gatos hidráulicos de botella están diseñados para soportar una amplia gama de capacidades de carga, las cuales varían según su configuración estructural y especificaciones técnicas, abarcando desde 2 hasta 50 toneladas o más.

La selección del gato hidráulico adecuado debe basarse en un análisis riguroso de la carga a levantar, asegurando que su capacidad nominal exceda el peso de la aplicación para garantizar un margen de seguridad adecuado.

El uso de un gato hidráulico con una capacidad inferior a la requerida puede comprometer tanto la eficacia de la operación como la seguridad del operador y de los equipos involucrados.

Por ello, es fundamental tener en cuenta no solo el peso máximo que se planea levantar, sino también factores adicionales, como posibles sobrecargas o condiciones extremas de trabajo. Una selección correcta no solo optimiza el rendimiento del dispositivo, sino que también prolonga su vida útil y minimiza riesgos operativos.

El mantenimiento adecuado de un gato hidráulico de botella es esencial para garantizar su rendimiento óptimo y prolongar su vida útil. Este proceso debe incluir inspecciones regulares destinadas a identificar posibles fugas de fluido hidráulico, evaluar el estado físico de las mangueras, conexiones y sellos, y comprobar el correcto funcionamiento de la válvula de liberación de presión.

Cualquier anomalía detectada durante estas revisiones debe ser atendida de inmediato para prevenir fallos operativos o daños mayores.

Asimismo, es fundamental almacenar el gato hidráulico en un ambiente limpio, seco y protegido de la humedad o agentes corrosivos que puedan comprometer sus

componentes internos. Para evitar daños por sobreesfuerzo, nunca se debe exceder la capacidad nominal especificada por el fabricante.

5.4.2. Diseño estructural del marco tipo H (materiales, resistencia y estabilidad).

El marco tipo H constituye una de las estructuras más utilizadas en la construcción de prensas hidráulicas debido a su diseño robusto y eficiente. Este tipo de estructura destaca por su capacidad para proporcionar una base sólida y estable, lo que resulta indispensable para soportar las altas fuerzas generadas durante el proceso de prensado.

El diseño en forma de H permite una distribución uniforme de las cargas y la presión aplicada, minimizando las tensiones localizadas y reduciendo el riesgo de deformaciones estructurales.

Esta característica no solo garantiza la estabilidad del sistema, sino que también contribuye a mejorar la precisión del proceso y la calidad del producto final. Además, su configuración geométrica facilita el acceso y la alineación de los componentes de la prensa, optimizando tanto la operación como el mantenimiento del equipo.

Los materiales empleados en la fabricación del marco tipo H suelen ser aceros de alta resistencia, cuidadosamente seleccionados por sus propiedades mecánicas que permiten soportar cargas significativas y resistir deformaciones bajo condiciones de trabajo intensas.

Entre estos materiales, los aceros estructurales y de aleación se destacan por su combinación de alta resistencia a la tracción, buena ductilidad y excelente capacidad para absorber esfuerzos sin comprometer la integridad estructural.

La correcta selección del material no solo es fundamental para garantizar la durabilidad y el rendimiento del marco, sino también para asegurar la seguridad operativa de la prensa hidráulica.

Factores como la carga máxima esperada, las condiciones de trabajo, y el diseño específico de la estructura deben ser considerados durante el proceso de selección del material, ya que estos influyen directamente en la vida útil del equipo y en su capacidad para operar de manera confiable y eficiente.

5.4.3. Vasos y moldes de compactación (materiales y diseño para soportar altas presiones).

Los vasos y moldes de compactación son elementos fundamentales en procesos industriales que implican la conformación de materiales mediante la aplicación de altas presiones. Estos componentes están diseñados para resistir las fuerzas extremas generadas durante el proceso de compactación, evitando deformaciones plásticas, fisuras o fallos estructurales que puedan comprometer la eficiencia del sistema.

Generalmente, se emplean aceros de alta resistencia a la corrosión y materiales con propiedades mecánicas superiores que permiten soportar esfuerzos cíclicos y condiciones de trabajo severas. Además, su diseño debe considerar aspectos como la distribución uniforme de las cargas, la minimización de concentraciones de esfuerzo y la resistencia al desgaste, a fin de asegurar la durabilidad y confiabilidad en operaciones continuas.

5.5. Materiales utilizados en la construcción.

5.5.1. Selección de materiales para componentes clave (acero para el marco estructural, vasos y resortes).

La selección adecuada de materiales para los componentes críticos de una prensa hidráulica, como el marco, los vasos y los resortes, resulta esencial para garantizar un diseño estructural resistente, confiable y duradero que pueda soportar las exigentes condiciones de trabajo.

En el caso del marco, se suelen emplear aceros estructurales de alta resistencia, como el ASTM A36 o aceros estructurales laminados, debido a su excelente combinación de propiedades mecánicas, como alta resistencia a la tracción, buena ductilidad y óptima soldabilidad.

Estos materiales son especialmente adecuados para soportar tanto fuerzas estáticas como dinámicas, distribuidas de manera uniforme en estructuras como el marco tipo H. Este diseño, comúnmente utilizado en prensas hidráulicas, exige una estabilidad excepcional y una alta capacidad de carga para garantizar un rendimiento eficiente y seguro.

Adicionalmente, la selección del acero debe considerar factores como la resistencia al desgaste, la tolerancia a la fatiga y las condiciones ambientales específicas, a fin de maximizar la vida útil del equipo y minimizar los costos de mantenimiento.

Para los vasos de compactación, se recomienda el uso de materiales como el acero AISI 4140 debido a sus sobresalientes características mecánicas, que incluyen una elevada resistencia a la tracción, una excelente tenacidad y una notable capacidad para soportar altas presiones sin sufrir daños estructurales.

Este acero aleado, conocido por su versatilidad, también permite la aplicación de tratamientos térmicos, como el templado y el revenido, que optimizan sus propiedades, elevando su límite elástico y mejorando su dureza superficial, lo que lo hace aún más adecuado para aplicaciones de alta demanda.

La resistencia al desgaste, la fatiga y la deformación plástica son propiedades críticas en los vasos de compactación, ya que estos elementos están constantemente expuestos a fuerzas compresivas extremas durante el proceso de compactación.

La capacidad del acero AISI 4140 para mantener su integridad estructural bajo estas condiciones, junto con su resistencia a la deformación permanente, lo convierte en una opción ideal para garantizar un funcionamiento confiable y una vida útil prolongada de los vasos en aplicaciones industriales exigentes [15].

En aplicaciones que requieren componentes elásticos de alto rendimiento, como los resortes, el uso de aceros para muelles de alto carbono, tales como el SAE 1070, o aceros de aleación como el cromo-vanadio, resulta una opción ampliamente preferida.

Estos materiales se destacan por su capacidad excepcional para almacenar energía elástica, una alta resistencia a la fatiga y una durabilidad sobresaliente cuando están expuestos a condiciones dinámicas y ciclos de carga repetitivos.

El acero para resortes de cromo-vanadio, en particular, es altamente apreciado en aplicaciones que demandan resiliencia a esfuerzos cíclicos, como ocurre en las prensas hidráulicas, donde los resortes deben soportar continuos ciclos de carga y descarga.

Gracias a sus propiedades mecánicas, este material no solo ofrece una alta capacidad de recuperación elástica, sino también una resistencia mejorada al desgaste y la deformación, asegurando un funcionamiento eficiente y una vida útil prolongada en condiciones de operación exigentes.

La combinación de estas características lo convierte en una opción ideal para garantizar la fiabilidad y el rendimiento en sistemas sometidos a altas cargas dinámicas [16].

5.5.2. Propiedades del acero 4140 y su tratamiento térmico para mejorar su resistencia.

El acero AISI 4140 es una aleación de baja aleación que incorpora cromo (Cr) y molibdeno (Mo) como elementos de aleación primarios, lo que le otorga propiedades excepcionales para diversas aplicaciones industriales.

Este material se caracteriza por su alta resistencia mecánica, excelente tenacidad y notoria resistencia a la fatiga, lo que lo convierte en una elección ideal para componentes sometidos a cargas elevadas y condiciones de trabajo severas, como es el caso de los vasos de compactación.

En su estado normalizado, el acero AISI 4140 presenta un límite elástico aproximado de 415 MPa, lo que lo hace adecuado para soportar esfuerzos significativos sin sufrir deformaciones plásticas. Además, su resistencia a la tracción puede superar los 600 MPa, lo que refuerza su capacidad para manejar tensiones elevadas sin comprometer su integridad estructural [15].

Estas características, junto con su capacidad para ser sometido a tratamientos térmicos como el templado y el revenido, permiten que el acero 4140 sea utilizado de manera efectiva en aplicaciones de alta exigencia donde la fiabilidad y la durabilidad son factores clave.

El tratamiento térmico del acero AISI 4140 es fundamental para optimizar sus propiedades mecánicas y garantizar su desempeño bajo condiciones de carga extremas.

Uno de los procesos más empleados para mejorar sus características es el ciclo de templado y revenido, que permite ajustar de manera precisa la dureza, la tenacidad y la resistencia al desgaste del material, adaptándose a los requerimientos específicos de cada aplicación.

En primer lugar, el proceso de templado implica calentar el acero a temperaturas que oscilan entre 850 y 900 °C, lo que facilita la disolución del carburo de hierro en la matriz de ferrita. A continuación, se realiza un enfriamiento rápido en un medio como el aceite o el agua, lo que provoca una transformación de la microestructura del acero a una fase martensítica, caracterizada por su alta dureza.

Este enfriamiento rápido introduce tensiones internas en el material, que son posteriormente aliviadas durante el proceso de revenido.

El revenido, que se lleva a cabo a temperaturas moderadas que van desde los 200 hasta los 600 °C, permite reducir las tensiones residuales formadas en el templado, mejorando la tenacidad del acero sin sacrificar significativamente su dureza.

Este proceso ajusta la microestructura del acero para proporcionar una combinación equilibrada de dureza superficial, resistencia a la fatiga y tenacidad, lo que resulta en una resistencia mecánica óptima para aplicaciones que requieren tanto alta resistencia al desgaste como capacidad de absorción de impactos y cargas cíclicas.

5.5.3. Resistencia y durabilidad de materiales bajo cargas dinámicas y estáticas.

La resistencia y durabilidad de los materiales empleados en la fabricación de prensas hidráulicas dependen directamente de su capacidad para soportar tanto cargas dinámicas como estáticas sin experimentar fallas estructurales ni deformaciones permanentes.

Las cargas estáticas, como el peso constante ejercido por el marco y otros componentes internos de la prensa, exigen materiales con un límite elástico elevado para prevenir la deformación plástica irreversible.

En este contexto, el acero estructural laminado se presenta como una opción particularmente adecuada debido a su excelente combinación de resistencia mecánica y ductilidad. Este tipo de acero posee una alta capacidad para resistir esfuerzos estáticos sin sufrir deformaciones significativas, lo que garantiza la estabilidad y seguridad de las estructuras que soportan las cargas continuas de la prensa hidráulica.

Además, su ductilidad permite que el material se deforme ligeramente bajo carga sin fracturarse, lo que contribuye a una mayor capacidad de absorción de tensiones y prolonga la vida útil de los componentes sometidos a esfuerzos constantes.

En lo que respecta a las cargas dinámicas, las cuales son generadas durante el proceso de prensado o las operaciones de compresión repetitiva, los materiales deben contar con una excepcional resistencia a la fatiga para garantizar su desempeño a largo plazo.

Las aleaciones de acero para resortes, como el cromo-vanadio, son particularmente efectivas en este tipo de aplicaciones, debido a su alta elasticidad y su capacidad para resistir fracturas bajo ciclos repetitivos de carga.

Este tipo de acero exhibe una notable capacidad para recuperar su forma después de someterse a tensiones cíclicas, lo que lo hace ideal para componentes sometidos a esfuerzos dinámicos constantes.

Para maximizar la vida útil de estos materiales y mejorar aún más su resistencia a la fatiga, es común que sean sometidos a procesos de tratamiento superficial como el shot peening.

Este tratamiento induce tensiones compresivas en la superficie del material, lo que contrarresta las tensiones tensiles generadas durante la carga cíclica, mejorando la resistencia al agrietamiento y la fatiga, y, por lo tanto, aumentando la durabilidad de los componentes que operan bajo condiciones dinámicas exigentes [16].

Es esencial evaluar las propiedades de los materiales en relación con los efectos combinados de presión, temperatura y fricción, ya que estos factores influyen significativamente en el desempeño y la longevidad de los componentes sometidos a condiciones operativas extremas.

En aplicaciones de alta presión, como los vasos de compactación, los materiales deben poseer la capacidad de resistir fuerzas concentradas sin experimentar fallos estructurales, deformaciones permanentes o desgaste prematuro.

Los aceros aleados con cromo y molibdeno, como el AISI 4140, son particularmente adecuados para este tipo de aplicaciones debido a sus excelentes características de resistencia al desgaste, así como su estabilidad dimensional bajo condiciones de alta presión y temperatura.

Estas aleaciones presentan una alta dureza superficial y una buena tenacidad, lo que les permite mantener su integridad estructural y resistir la fatiga bajo la constante acción de fuerzas intensas y fricción.

Además, su comportamiento frente a temperaturas elevadas permite que sigan operando eficientemente sin sufrir pérdidas significativas en sus propiedades mecánicas, lo que los convierte en una opción confiable para componentes que deben operar en ambientes exigentes.

5.6. Cálculos y diseño mecánico.

5.6.1. Cálculo de esfuerzos en el marco estructural y componentes del molde de compactación (esfuerzo cortante y compresión).

El cálculo de los esfuerzos en una prensa hidráulica se enfoca en asegurar que tanto el marco estructural como los componentes del molde de compactación sean capaces de resistir las fuerzas aplicadas sin experimentar deformaciones plásticas o fallas estructurales.

Para evaluar la resistencia del marco tipo H, es necesario considerar los esfuerzos de compresión y cortante generados por la carga transmitida por el gato hidráulico. El esfuerzo de compresión (σ_c) se determina mediante la aplicación de la (Ec. 1) [17]:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (Ec.1)$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada (N).
- A es el área de la sección transversal del marco (mm^2).

Para el esfuerzo cortante (τ), se emplea la (Ec. 2) [17]:

$$\tau = \frac{F}{A_s} \quad (Ec.2)$$

Donde:

- A_s es el área de la sección transversal donde ocurre el cortante (mm^2).

En los componentes del molde de compactación, la fuerza aplicada genera esfuerzos circunferenciales y longitudinales debido a la presión interna. Según la teoría de cilindros sometidos a presión, el esfuerzo circunferencial (σ_h) y el esfuerzo longitudinal (σ_l) se calculan con las (Ec. 3) y (Ec. 4) [17]:

$$\sigma_h = \frac{p \cdot r_i}{t} \quad (Ec.3)$$

$$\sigma_l = \frac{p \cdot r_i}{2t} \quad (Ec.4)$$

Donde:

- p es la presión interna (MPa).
- r_i es el radio interno del vaso (mm).
- t es el espesor de la pared del vaso (mm).

Es crucial que los esfuerzos calculados no superen el límite elástico del material empleado, como el acero AISI 4140, que posee un límite elástico aproximado de 415 MPa en su estado normalizado. Adicionalmente, se debe incorporar un factor de seguridad adecuado para mitigar el riesgo de fallas estructurales.

5.6.2. Selección de factor de seguridad para la estructura y el molde de compactación.

El *factor de seguridad (FS)* es un parámetro crítico en el diseño estructural, ya que proporciona un margen de seguridad frente a las posibles variaciones en las cargas, las propiedades de los materiales y las condiciones operativas.

En componentes como el marco tipo H y los moldes de compactación, la selección del “FS” debe basarse en la relevancia del elemento, las implicaciones de una posible falla y las características del material empleado.

En aplicaciones industriales, como las prensas hidráulicas, los factores de seguridad comúnmente varían entre 1.5 y 3. Para el marco, que soporta principalmente cargas estáticas, un “FS” de 1.5 es adecuado, siempre que los materiales estén debidamente caracterizados y las cargas sean previsibles.

En el caso del molde de compactación, expuesto a presión interna y cargas dinámicas, se recomienda un “FS” de entre 2 y 3, debido a la posibilidad de fluctuaciones de presión y a los efectos del desgaste.

El FS se aplica a las propiedades del material o a las cargas calculadas, según el enfoque de diseño. Por ejemplo, si el esfuerzo permisible (σ_{perm}) se calcula para un diseño basado en esfuerzos, se utiliza la (Ec. 5) [17]:

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad (Ec.5)$$

Donde:

- σ_y es el límite elástico del material (MPa).

Este enfoque asegura que los esfuerzos reales siempre estén por debajo del esfuerzo permisible, garantizando la seguridad del diseño.

5.6.3. Dimensionamiento de los resortes de retorno en la prensa.

Los resortes de retorno en una prensa hidráulica cumplen la función de restablecer el pistón y otros componentes a su posición inicial al finalizar el ciclo de operación. Para determinar sus dimensiones, es crucial considerar factores como la carga máxima a la que estarán sometidos, la elongación máxima permisible y la rigidez del resorte (K).

La fuerza requerida en un resorte (F) se calcula mediante la *Ley de Hooke* [17]:

$$F = K \cdot \Delta x \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

- k es la constante de rigidez del resorte (N/mm).
- Δx es el desplazamiento del resorte desde su posición inicial (mm).

Los resortes deben seleccionarse considerando también el esfuerzo cortante en el alambre del resorte, que se puede calcular utilizando la (Ec. 7) [17]:

$$\tau = \frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

- D es el diámetro medio del resorte (mm).
- d es el diámetro del alambre (mm).

5.7. Normas y estándares aplicables.

5.7.1. Normas relacionadas con el diseño y uso de prensas hidráulicas.

El diseño, operación y mantenimiento de prensas hidráulicas están regidos por diversas normativas internacionales y regionales que garantizan su seguridad, eficiencia y longevidad.

Una de las normas más significativas es la ISO 16092-3:2021, que establece los requisitos de seguridad aplicables a estas máquinas, abarcando desde su construcción hasta los procedimientos operativos y de mantenimiento. Entre sus directrices, se encuentran especificaciones detalladas sobre los sistemas de control, dispositivos de seguridad y protocolos de emergencia.

Esta norma obliga a que las prensas estén equipadas con sistemas de parada de emergencia que sean fácilmente accesibles y completamente funcionales para evitar riesgos durante su uso.

En España y demás países habla hispana se aplica también la Norma UNE-EN 692, que regula las prensas mecánicas, pero que comparte principios fundamentales con las normativas sobre prensas hidráulicas. Entre estos principios se encuentran la evaluación de riesgos y las medidas de protección específicas para salvaguardar al operador [18].

De manera similar, en América Latina, la implementación de estas normativas internacionales se ve complementada con regulaciones locales, que varían según cada país y son dictadas por entidades como los Ministerios de Trabajo o diversas asociaciones de seguridad industrial y laboral, con el fin de adaptar las normativas a las condiciones y riesgos locales, asegurando un entorno de trabajo seguro y conforme a las normativas vigentes.

En términos de diseño estructural, las prensas hidráulicas deben ajustarse a estrictos estándares de calidad para los materiales utilizados, asegurando que sean capaces de soportar las cargas aplicadas sin comprometer su integridad estructural.

En este contexto, el diseño del marco tipo H debe regirse por criterios de resistencia establecidos en normativas como la ASME B30.1, que especifica los requisitos para la construcción, operación, y mantenimiento de equipos hidráulicos y neumáticos [19].

Estas directrices incluyen consideraciones detalladas sobre el proceso de diseño, las pruebas de resistencia y los procedimientos de certificación necesarios para

garantizar que los equipos sean seguros, funcionales y duraderos, minimizando riesgos durante su operación.

5.7.2. Normas para recipientes sometidos a presión.

Los recipientes sometidos a presión, tales como los vasos utilizados en prensas hidráulicas, están sujetos a normativas rigurosas que garantizan su funcionamiento seguro y eficiente.

Una de las normativas de referencia a nivel internacional es la ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), particularmente su Sección VIII, que regula de manera exhaustiva el diseño, fabricación, inspección y ensayo de recipientes a presión [20].

Este estándar establece una serie de requisitos técnicos, entre los cuales se incluye el cálculo del espesor mínimo necesario para los recipientes, tomando en cuenta factores críticos como la presión interna operativa, las características mecánicas del material utilizado y los márgenes de seguridad apropiados.

Además, se incluyen directrices para la evaluación de la integridad estructural bajo condiciones de operación extremas, así como los procedimientos de inspección y prueba para garantizar que los recipientes mantengan su fiabilidad durante todo su ciclo de vida útil.

La fórmula básica para calcular el espesor mínimo del recipiente es:

$$t = \frac{P \cdot R}{(S \cdot E) - 0.6 \cdot P} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

- t es el espesor mínimo (mm).
- P es la presión interna (MPa).
- R es el radio interno (mm).
- S es el esfuerzo permisible del material (MPa).
- E es el coeficiente de eficiencia de la soldadura.

En España, la normativa UNE-EN 13445 establece los requisitos técnicos y criterios de diseño para recipientes a presión sin llama, proporcionando un marco normativo que cubre aspectos clave como los cálculos estructurales, la selección de materiales y los procedimientos de prueba [21]. Esta normativa sigue principios

similares a los establecidos en la norma ASME, pero con una adaptación a las especificaciones y regulaciones europeas.

Por otro lado, en América Latina, países como México se rigen por la NOM-020-STPS-2011, la cual regula de manera integral las condiciones de seguridad para recipientes a presión, abordando aspectos relacionados con su diseño, instalación, operación y mantenimiento, con el fin de garantizar la integridad y seguridad de estos equipos en condiciones de uso industrial [22]. Esta normativa también detalla los requisitos para la verificación y certificación de los recipientes a presión a lo largo de su ciclo de vida útil.

5.7.3. Estándares de seguridad para equipos industriales.

La seguridad en equipos industriales se rige por un conjunto de normativas internacionales que tienen como objetivo principal reducir los riesgos para los operadores y asegurar la fiabilidad de los equipos durante su funcionamiento.

Una de las normas más reconocidas globalmente es la ISO 12100:2010, que establece los principios fundamentales de diseño seguro y proporciona una metodología estructurada para la evaluación de riesgos en máquinas industriales [23].

Esta norma define un enfoque sistemático para la identificación de peligros potenciales, la evaluación cuantitativa y cualitativa de los riesgos asociados, así como la implementación de medidas de mitigación y control adecuadas, que incluyen la eliminación o reducción de riesgos, garantizando así la protección de los usuarios y la operatividad continua de los sistemas industriales.

La norma ISO 13849-1 es otra norma clave que regula los sistemas de control relacionados con la seguridad en equipos industriales. Este estándar establece los criterios para el diseño, la integración y la evaluación de sistemas de control cuya función principal es garantizar la parada segura de las máquinas ante cualquier fallo del sistema [24].

En el contexto de prensas hidráulicas, los sistemas de control de seguridad abordan la implementación de sensores de presión, válvulas de sobrepresión, dispositivos de seguridad y mecanismos automáticos de parada de emergencia, todos ellos con el objetivo de prevenir situaciones de riesgo y asegurar que la operación de la prensa se detenga de manera controlada y fiable en caso de un mal funcionamiento o condiciones peligrosas.

La normativa UNE-EN 60204-1, en España, regula la seguridad eléctrica en equipos industriales, proporcionando directrices detalladas sobre la correcta instalación, conexión, prueba y mantenimiento de los sistemas eléctricos en las máquinas. Esta norma abarca los requisitos para proteger tanto al operador como al equipo de posibles fallos eléctricos, asegurando un funcionamiento seguro y eficiente.

En México, por su parte, la NOM-004-STPS-1999 establece los requisitos específicos para los sistemas de protección y los dispositivos de seguridad en maquinaria, incluyendo las prensas hidráulicas.

Esta normativa impone la instalación de barreras físicas, dispositivos de detección de movimiento y resguardos móviles que impiden el acceso no autorizado a las áreas peligrosas, con el fin de salvaguardar la integridad del operador y minimizar los riesgos asociados con la operación de la maquinaria [25].

5.8. Mecanismos auxiliares.

5.8.1. Sistemas de retorno (uso de resortes en la prensa).

En el diseño y funcionamiento de una prensa hidráulica, los sistemas de retorno son componentes fundamentales para garantizar el restablecimiento preciso de la posición inicial de los elementos móviles una vez finalizado el ciclo de compresión.

Para lograr esta función, se emplean comúnmente resortes debido a sus características mecánicas que permiten almacenar y liberar energía de manera eficiente y controlada. Estos resortes, al estar sujetos a una deformación elástica bajo carga, son capaces de generar la fuerza necesaria para devolver los componentes móviles a su ubicación original tras la liberación de la presión hidráulica.

En particular, los resortes se encargan de restituir el pistón, la placa superior o el vástago a su posición inicial, asegurando un ciclo de operación continuo y sin interrupciones. Esta acción de retorno es esencial para la preparación de la prensa para el siguiente ciclo de compresión, contribuyendo a la eficiencia y productividad del equipo.

La selección adecuada de resortes, considerando su capacidad de carga, elasticidad y durabilidad, es crucial para mantener un rendimiento óptimo y garantizar la fiabilidad de la prensa hidráulica a lo largo de su vida útil.

Los resortes de retorno empleados en prensas hidráulicas pueden clasificarse en resortes de compresión o de extensión, según el tipo de carga y el mecanismo de actuación previsto en el diseño.

En el caso específico de las prensas tipo H, los resortes de extensión son los más comunes, ya que se posicionan en disposición vertical, estableciendo la conexión entre la placa móvil y la estructura fija del marco.

Esta configuración asegura un retorno eficiente de los componentes móviles tras la liberación de la presión hidráulica. Para garantizar un diseño adecuado, se emplea la (Ec. 6) para realizar los cálculos adecuados.

El diseño de los sistemas de retorno en prensas hidráulicas debe ser evaluado con un análisis exhaustivo de fatiga, tomando en cuenta tanto las propiedades mecánicas del material utilizado como la frecuencia de operación del equipo. Este análisis es esencial para asegurar que los resortes no sufran fallas prematuras debido a las cargas cíclicas a las que estarán expuestos durante su ciclo de trabajo.

Las normas técnicas, como la UNE-EN 13906-1, regulan los métodos de cálculo y los requisitos de calidad para los resortes sometidos a esfuerzos dinámicos. Esta norma establece criterios rigurosos para garantizar que los resortes mantengan su integridad estructural y capacidad de operación bajo condiciones de carga continua, asegurando la durabilidad y fiabilidad del sistema a lo largo de su vida útil [26].

5.8.2. Métodos de sujeción y posicionamiento del material a compactar.

La correcta sujeción y posicionamiento del material a compactar en una prensa hidráulica son aspectos clave para asegurar la calidad del producto final y la eficiencia del proceso. Un mal ajuste o desplazamiento del material durante la compresión puede provocar variaciones en la densidad, la forma de la briqueta o incluso dañar el equipo.

Por ello, es fundamental implementar un sistema de sujeción preciso y robusto, que minimice cualquier riesgo de movimiento no deseado y permita un control adecuado durante todo el ciclo de trabajo.

Los métodos de sujeción se seleccionan según las características específicas del material a ser compactado y el diseño particular del molde o recipiente de compactación. Entre los sistemas más comunes se incluyen guías de alineación, abrazaderas ajustables y mordazas, que están diseñadas para mantener el material firmemente en su lugar.

Estos mecanismos deben ser lo suficientemente fuertes y ajustables para adaptarse a diferentes tipos de material y garantizar que el proceso de compresión se realice de manera eficiente, sin que el material se desplace o se deforme de manera no deseada.

Para el adecuado posicionamiento del material a compactar, se utilizan moldes o recipientes especialmente diseñados según las propiedades del material en cuestión.

En aplicaciones de compactación de viruta metálica, como es común en la producción de briquetas, los moldes adoptan generalmente una forma cilíndrica. Estos moldes se fabrican con aceros de alta resistencia, como el AISI 4140, que ofrecen una excelente capacidad para soportar presiones extremas sin experimentar deformaciones permanentes, asegurando así la durabilidad del molde y la calidad del proceso.

Las guías laterales se incorporan en el diseño del molde con el objetivo de asegurar un alineamiento preciso del material durante el proceso de compresión. Estas guías previenen el desplazamiento lateral de la viruta metálica, optimizando la compactación y evitando irregularidades en la forma final de la briketa.

Así mismo, el uso de recubrimientos lubricantes en las superficies internas del molde facilita el desprendimiento de las briquetas una vez completado el ciclo de compactación. Estos lubricantes reducen la fricción entre el material y las paredes del molde, lo que mejora la eficiencia del proceso y prolonga la vida útil del equipo al minimizar el desgaste de las superficies de contacto [27].

Un método alternativo para asegurar la correcta sujeción y distribución del material en una prensa hidráulica es el uso de pistones auxiliares. Estos pistones aplican una fuerza preliminar para pre-compactar el material antes de que intervenga el pistón principal.

Este proceso facilita la alineación y estabilización del material dentro del molde, contribuyendo a una distribución más uniforme de la presión durante la compresión. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también optimiza la calidad del producto final.

De acuerdo con la norma UNE-EN 693, los sistemas de sujeción y posicionamiento deben diseñarse con un enfoque integral que priorice la seguridad del operador y la facilidad de operación.

La norma establece que estos sistemas deben incorporar dispositivos de seguridad adicionales, como bloqueos mecánicos o sensores, que impidan movimientos no deseados o inesperados durante el ciclo de compresión [28]. Estas medidas

previenen posibles fallos operativos, garantizando un entorno seguro y controlado durante el proceso.

Para la validación de estos métodos de sujeción y posicionamiento, es fundamental llevar a cabo simulaciones numéricas mediante herramientas avanzadas de análisis por elementos finitos (FEA).

Estas simulaciones permiten modelar de manera precisa el comportamiento del sistema de sujeción bajo diversas condiciones operativas, lo que facilita la identificación de posibles fallas o áreas de mejora en el diseño.

Además, el uso de “FEA” optimiza el proceso de diseño al permitir ajustar los parámetros del sistema de sujeción, como la distribución de la presión y la geometría del molde, para asegurar una compresión eficiente y homogénea del material.

Estas herramientas también proporcionan información valiosa sobre la respuesta del material a diferentes niveles de carga, lo que permite prever su comportamiento antes de la fabricación y realizar ajustes necesarios para garantizar su durabilidad y desempeño en condiciones reales.

5.9. Impacto ambiental y económico.

5.9.1. Contribución al reciclaje de aluminio.

El reciclaje de aluminio representa una de las actividades más relevantes dentro de la industria moderna, destacándose por su impacto favorable tanto en la economía circular como en la sostenibilidad medioambiental.

Este metal posee la característica única de ser infinitamente reciclable, lo que permite su reprocesamiento sin que pierda sus propiedades mecánicas ni químicas esenciales. Esta capacidad lo convierte en un recurso clave para reducir la dependencia de materias primas vírgenes y fomentar la eficiencia en el uso de recursos naturales.

Desde una perspectiva técnica, el reciclar hasta una tonelada de aluminio conlleva importantes beneficios medioambientales y económicos. En particular, evita la extracción de aproximadamente cuatro toneladas de bauxita, el mineral del cual se deriva el aluminio primario, además de disminuir considerablemente el consumo de energía asociado a los procesos de refinado y fundición.

Este ahorro energético, que puede superar el 90 % en comparación con la producción primaria, también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el cambio climático.

La compactación de viruta de aluminio constituye un proceso fundamental para optimizar su manejo, transporte y posterior procesamiento en plantas recicladoras. Este procedimiento reduce significativamente el volumen del material, mejorando la eficiencia logística y minimizando los costos asociados al transporte y almacenamiento.

Además, la compactación facilita su procesamiento en las etapas subsiguientes de reciclaje, asegurando una mayor uniformidad en la alimentación de los hornos de fundición.

Desde el punto de vista energético, el reciclaje de aluminio presenta una ventaja notable frente a la producción de aluminio primario. Este último implica un consumo energético considerablemente mayor, principalmente debido al proceso de extracción y refinado de la bauxita.

En contraste, el reciclaje de aluminio requiere únicamente alrededor del 5 % de la energía empleada en la producción primaria, lo que se traduce en un ahorro energético significativo. Este menor consumo de energía también resulta en una reducción sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo así a mitigar los efectos del cambio climático.

En este contexto, la compactación y el reciclaje del aluminio no solo representan una solución técnica eficiente para la gestión de residuos metálicos, sino que también se alinean con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Al promover un uso más racional de los recursos naturales y reducir el impacto ambiental de los procesos industriales, estas prácticas desempeñan un papel clave en la transición hacia modelos de producción más responsables y respetuosos con el medio ambiente.

5.10. Análisis de fallas y mantenimiento.

5.10.1. Posibles modos de falla en la máquina compactadora.

Las máquinas compactadoras operan bajo condiciones de alta carga y trabajo continuo, lo que las expone a diversos modos de fallo. Entre los problemas más recurrentes se incluyen los siguientes:

- 1. Fallas en el marco estructural:** El marco estructural de la máquina, particularmente en configuraciones tipo H, puede sufrir deformaciones plásticas o fracturas como resultado de esfuerzos excesivos o fatiga inducida por cargas cíclicas.

Estas fallas suelen ser consecuencia de deficiencias en el diseño, como un factor de seguridad inadecuado, o de la selección de materiales con propiedades mecánicas insuficientes.

- 2. Fugas en el sistema hidráulico:** Las fugas de fluido hidráulico representan una problemática recurrente en gatos hidráulicos y sistemas de conducción, como mangueras.

Estas pueden originarse por sellos deteriorados, juntas desgastadas o conexiones inapropiadamente ajustadas, lo que genera una pérdida de presión que compromete la eficiencia operativa del equipo.

- 3. Desgaste y daño en los moldes de compactación:** Los moldes de compactación empleados en procesos de alta presión están expuestos a desgaste abrasivo y, en casos extremos, a la formación de fisuras debido a tensiones excesivas.

Estos problemas son más frecuentes cuando los materiales utilizados carecen de un tratamiento térmico adecuado para mejorar su resistencia mecánica y durabilidad.

- 4. Fallas en los resortes de retorno:** Los resortes de retorno pueden experimentar fallos debido a fatiga del material, corrosión o deformaciones permanentes, especialmente si no han sido diseñados conforme a las especificaciones técnicas requeridas para soportar la carga aplicada de manera segura y eficiente.

5.10.2. Métodos para prevenir fallas en el gato hidráulico y el marco estructural.

La prevención de fallas exige tanto un diseño estructural optimizado como la implementación de un programa de mantenimiento preventivo. Entre las estrategias efectivas se incluyen:

- **Diseño adecuado del marco estructural:** Es crucial llevar a cabo un análisis exhaustivo de los esfuerzos estructurales y aplicar un factor de seguridad adecuado. El empleo de materiales como el acero 4140 sometido a tratamiento térmico aumenta significativamente la resistencia y la vida útil del marco estructural.
- **Selección y mantenimiento del sistema hidráulico:** Para evitar fugas, es fundamental emplear juntas y sellos de alta calidad, preferentemente fabricados con

materiales resistentes al desgaste y a la degradación, como el poliuretano o el PTFE. Asimismo, se recomienda realizar inspecciones periódicas para identificar posibles fugas o componentes desgastados.

- **Tratamiento de los moldes de compactación:** El empleo de acero de alta resistencia sometido a tratamiento térmico y recubrimientos protectores contribuye a extender la vida útil de los moldes de compactación. Adicionalmente, es recomendable realizar inspecciones periódicas para detectar posibles fracturas o desgaste excesivo.
- **Optimización de los resortes:** Los resortes deben ser diseñados con un factor de seguridad apropiado para la carga que soportarán. La utilización de materiales como acero para resortes, complementados con recubrimientos anticorrosivos, puede prevenir el riesgo de fallas prematuras.

5.10.3. Estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo.

El mantenimiento es crucial para asegurar el funcionamiento óptimo y seguro de una máquina compactadora. Las estrategias más eficaces incluyen:

1. **Mantenimiento preventivo:** Este tipo de mantenimiento consiste en realizar inspecciones periódicas para detectar y resolver posibles problemas antes de que se presenten fallas críticas.

Involucra actividades como la lubricación de mecanismos móviles, el chequeo de sellos y juntas en el sistema hidráulico, y la evaluación de la integridad estructural del marco para identificar fisuras o deformaciones.

2. **Mantenimiento correctivo:** Este tipo de mantenimiento se implementa una vez que se ha producido una falla. En el caso de fugas en el sistema hidráulico, puede requerir la sustitución de juntas o mangueras dañadas. Si se detectan fracturas en el marco, se deben reparar mediante soldadura o proceder con el reemplazo de la pieza afectada, dependiendo de la magnitud del daño.
3. **Monitoreo de condiciones:** La implementación de tecnologías avanzadas, como el análisis de vibraciones, las inspecciones ultrasónicas y el monitoreo de la presión en el sistema hidráulico, puede ofrecer alertas preventivas sobre posibles fallas.

Esto facilita una programación de mantenimiento más eficiente, permitiendo la intervención antes de que se presenten problemas críticos.

- 4. Capacitación del personal:** Es crucial que los operadores de la máquina reciban formación especializada para reconocer indicios tempranos de fallas, tales como ruidos anómalos, caídas de presión o alteraciones visibles en la estructura del marco.

6. Desarrollo del proyecto.

6.1. Funcionamiento.

La máquina compactadora se basará en una prensa tipo H como la que se muestra en la (Figura 9), en esa imagen también se muestran algunos elementos clave para el funcionamiento de la máquina.

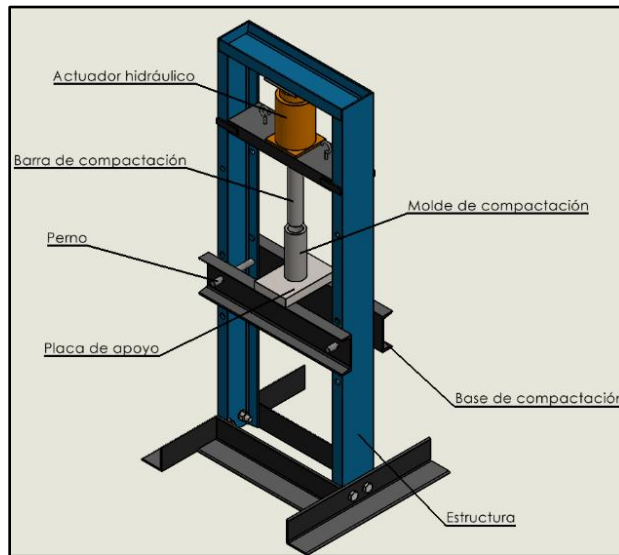


Figura 9. Modelo de la máquina compactadora [Imagen propia].

El principio de funcionamiento se basa en aprovechar el desplazamiento que provoca la activación del actuador hidráulico; la estructura ayudará a que el desplazamiento sea verticalmente hacia abajo.

Otra consideración importante es que con ayuda de los pernos la base de compactación y la placa de apoyo (Figura 10) no presentarán movimiento vertical; esto permite que el desplazamiento del actuador y la fuerza que proporciona compacten la viruta contenida dentro del molde.

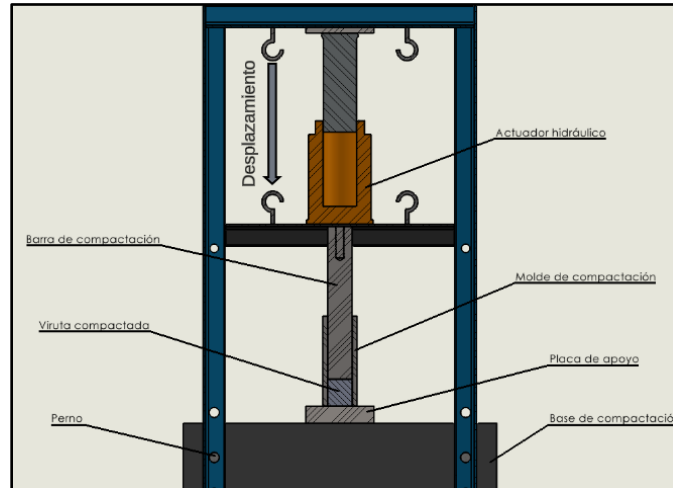


Figura 10. Principio de funcionamiento [Imagen propia].

Partiendo de esta breve explicación, en las siguientes secciones se establecen y se determinan variables indispensables para realizar el diseño de los elementos clave de la compactadora.

6.2. Geometría y volumen de la briqueta.

Se desea producir briquetas cilíndricas con las siguientes dimensiones:

- Altura (h): 60 mm
- Diámetro de sección (\emptyset): 55 mm

6.2.1. Relación de compactación.

Con las dimensiones que se quieren reproducir se calcula el *volumen de una sola briqueta* utilizando la (Ec. 9) [17]:

$$V_{Briqueta} = \pi \cdot \left(\frac{\emptyset}{2}\right)^2 \cdot h \quad (Ec. 9)$$

Donde:

- $\emptyset = 55$ mm (diámetro de la briqueta).
- $h = 60$ mm (altura de la briqueta).

Sustituyendo

$$V_{Briqueta} = \pi \cdot \left(\frac{55 \text{ mm}}{2}\right)^2 \cdot 60$$

$$V_{Briqueta} = 142549.7666 \text{ mm}^3 \approx 142.54 \text{ cm}^3$$

La *relación de compactación* depende de la fuerza aplicada y las propiedades del material. Al compactarla la densidad de la viruta puede aumentar considerablemente en comparación con su estado suelto.

La *relación de compactación (RC)* se estima mediante pruebas experimentales. Sin embargo, se puede asumir una densidad final para el aluminio compactado que depende de la fuerza aplicada.

Mediante investigación se obtuvieron los siguientes datos respecto a la densidad:

- La densidad de la viruta del aluminio $\rho_{viruta} = 0.2 \text{ g/cm}^3$ [29]
- La densidad de la viruta compactada $\rho_{compactada} = 2.0 \text{ g/cm}^3$ [2]

Con estos datos es posible calcular la *relación de compactación*, pues se define por la (Ec. 10) [17]:

$$RC = \frac{\rho_{compactada}}{\rho_{viruta}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Y al sustituir los datos se tienen los siguientes resultados:

$$RC = \frac{2.0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{0.2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$RC = 10$$

6.2.2. Volumen de viruta a compactar.

Una vez calculada la *relación de compactación*, se determina el *volumen de viruta* necesario para producir una briqueta utilizando la (Ec. 11) [17]:

$$V_{viruta} = V_{Briqueta} \times RC \quad (Ec. 11)$$

Llegando al siguiente dato:

$$V_{viruta} = 142.54 \text{ cm}^3 \times 10$$

$$V_{viruta} = 1425.4 \text{ cm}^3 \approx 1425400 \text{ mm}^3$$

Esto son aproximadamente 3.393 kg de viruta por briqueta si se considera la densidad de 2 g/cm³ al estar compactada.

6.3. Fuerza y presión de compactación.

Según la investigación realizada, se determinó que, para lograr un diámetro en las briquetas de 55 mm, es necesario aplicar una carga aproximada de 30 toneladas. De los actuadores hidráulicos dentro del mercado que resultan más accesibles y funcionales se encuentran los gatos hidráulicos de botella; por lo tanto, el cilindro hidráulico que se utilizará en este trabajo será un gato de tipo botella de 32 toneladas (ficha técnica en apéndice “b”).

Si al momento de compactar la viruta se aplica una carga de 32 toneladas, la fuerza de compactación se puede obtener con la (Ec. 12) [17]:

$$F = C * g \quad (Ec. 12)$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada para compactar (N).
- C es la carga aplicada para compactar (kg).
- g es la aceleración de gravedad (m/s²).

Dando como resultado:

$$F = 32000 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 313920 \text{ N} = 313.92 \text{ kN}$$

Con la geometría elegida para las briquetas y la fuerza que proporcionará el cilindro hidráulico se puede obtener la *presión* que se ejerce sobre la viruta para compactarla tal como se muestra en la (Ec. 13) [17]:

$$P = \frac{F}{A_{Bri}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

- P es la presión de compactación (Pa).
- F es la fuerza de compactación (N).
- A_{Bri} es el área de la sección transversal de la briketa (m^2).

Así mismo, el *área de la briketa* al ser cilíndrica se puede calcular con la (Ec. 14) para el *área de un círculo* [17]:

$$A_{Bri} = \frac{\pi}{4} (\emptyset^2) \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

- \emptyset es el diámetro de la sección transversal de la briketa.

Al sustituir los datos se tienen los siguientes resultados:

$$A_{Bri} = \frac{\pi}{4} (0.055 \text{ m})^2 = 2.3758 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$P = \frac{313920 \text{ N}}{2.3758 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$P = 132132334.37 \text{ Pa} \approx 132.13 \text{ MPa}$$

6.4. Estructura de la compactadora.

Con base en una investigación centrada en prensas hidráulica tipo H que se encuentran en el mercado y en prensas fabricadas de forma casera; se establece que, para elaborar la estructura, los materiales ideales serán canales tipo CPS y ángulos de acero estructural.

Estos elementos se distribuyen comúnmente en tramos de 6 m de largo, además cuentan con otras dimensiones las cuales se especifican en las siguientes figuras.

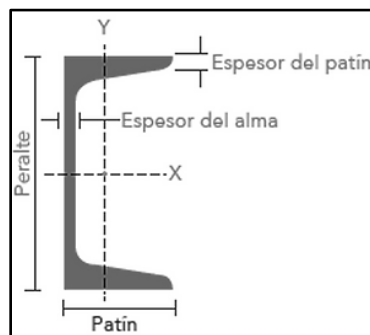


Figura 11. Diagrama del perfil CPS [30].

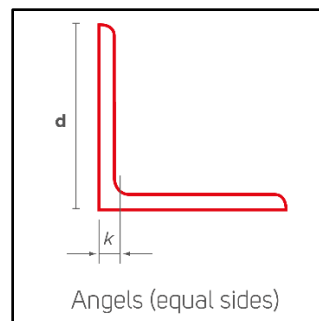


Figura 12. Diagrama del perfil de un ángulo [31].

Considerando el propósito y funcionamiento de la máquina compactadora, así como las especificaciones con las que se pueden adquirir los canales y ángulos se concluye que:

- El canal CPS tendrá un peralte de 6 in, un espesor de patín de 8.71 mm, un espesor de alma con valor de 5.08 mm y un largo de patín de 48.76 mm.
- El ángulo tendrá un espesor de 0.25 in y un ancho con valor de 4 in.
- Con base en la longitud de los tramos en que se puede adquirir la materia prima, las longitudes tentativas de los elementos estructurales que se fabricaran con canal

CPS y ángulo se distribuyen como se muestra en la (Figura 13). Los elementos en azul corresponden al canal CPS y los elementos en negro corresponden al ángulo.

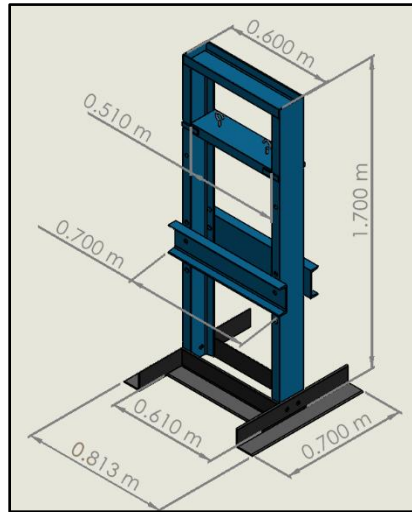


Figura 13. Dimensiones de la estructura [Imagen propia].

En resumen, la estructura tendrá las siguientes especificaciones.

- Material de fabricación: acero estructural (A36)
- Alto: 1.7 m
- Ancho: 0.813 m

- Profundidad: 0.7 m
- Espacio mínimo requerido (área y volumen): $0.569 \text{ m}^2 / 2.569 \text{ m}^3$

6.5. Diseño de los componentes de la máquina compactadora.

Con el diseño de la estructura definido, esta sección estará enfocada en diseñar los elementos de la compactadora mostrados en la (Figura 9); a excepción del actuador hidráulico, las bases de compactación y la estructura.

6.5.1. Molde de compactación.

Para conseguir la geometría deseada en las briquetas se utilizará un molde o recipiente cilíndrico en el cual se llevará a cabo la compactación; pues su adquisición y fabricación resulta más fácil que cualquier otra geometría.

Ya que la presión para producir las briquetas es muy elevada, es necesario diseñar el molde para que pueda resistir tal presión sin deformarse o fracturarse.

El espesor es la dimensión clave en el diseño del molde de compactación. Para poder determinar este valor se trata al molde como un recipiente cilíndrico de pared gruesa sometido a presión. La teoría dice que en este tipo de situaciones el molde presentaría *esfuerzos radiales* y *tangenciales* o *circunferenciales*; los cuales se determinan con las (Ec. 15) y (Ec. 16) respectivamente [17]:

$$\sigma_r = \frac{P_i * r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\sigma_t = \frac{P_i * r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

- σ_t es el esfuerzo tangencial (MPa).
- σ_r es el esfuerzo radial (MPa).
- P_i es la presión en la pared interna del recipiente (MPa).
- r_i es el radio interior del recipiente (m).
- r_0 es el radio exterior (m).
- r es el radio en el punto donde se mide el esfuerzo (m).

Los *esfuerzos tangenciales* son mayores que los *esfuerzos radiales*, por lo tanto, se partirá de la (Ec. 16) para poder determinar el *espesor del molde*. Como se observa en la (Figura 14), el *esfuerzo tangencial* es máximo en la superficie interna del cilindro, es decir; $r = r_i$

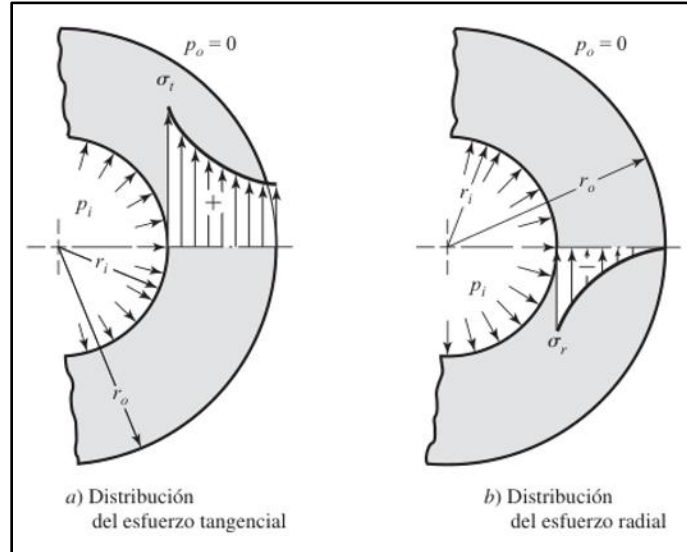


Figura 14. Distribución de esfuerzos en un recipiente cilíndrico de pared gruesa sometido a presión interna [17].

Al sustituir en la ecuación del *esfuerzo tangencial*:

$$\sigma_{tmax} = \frac{P_i * r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r_i^2} \right) = \frac{P_i(r_i^2 + r_o^2)}{r_o^2 - r_i^2}$$

Si se expresa r_o en función del espesor se tiene y se sustituye en la ecuación anterior:

$$\sigma_{tmax} = P_i * \frac{r_i^2 + (r_i + t)^2}{(r_i + t)^2 - r_i^2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

- t es el espesor del recipiente (m)

Para diseñar el molde cilíndrico debe asegurarse que el *máximo esfuerzo* no exceda al *esfuerzo admisible* del material, el cual se encuentra ajustada por un *factor de seguridad*. Para este caso se asume que el *máximo esfuerzo tangencial* será igual al *esfuerzo admisible*.

$$\sigma_{tmax} = \sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad (Ec. 18)$$

Donde:

- σ_y es el esfuerzo de fluencia del material (MPa)
- FS es el factor de seguridad
- σ_{adm} es el esfuerzo admisible (MPa)

Entonces se entiende que:

$$\sigma_{adm} = P_i * \frac{r_i^2 + (r_i + t)^2}{(r_i + t)^2 - r_i^2} \quad (Ec. 19)$$

Partiendo de la (Ec. 19) y al tener en cuenta que $r_1 = \frac{d}{2}$

Donde:

- d es el diámetro interno (m).

El espesor se puede determinar con la siguiente (Ec. 20) [17]:

$$t = \frac{d}{2} \left(\sqrt{\frac{P_i}{\sigma_{adm}} + 1} - 1 \right) \quad (Ec. 20)$$

Como se mencionó con anterioridad, el molde debe soportar una gran presión debido a la compactación de la viruta; por tal motivo el material para su fabricación debe ser uno con propiedades mecánicas suficientemente buenas para su propósito.

Haciendo uso de las ecuaciones presentadas anteriormente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos con tres materiales diferentes, los cuales se eligieron por su gran comercialización. En la (Tabla 1) se encuentran la comparación de los resultados. Cabe mencionar que los datos necesarios a utilizar en las ecuaciones son los siguientes:

- D = 0.055 m
- $P_i = 132.13$ MPa (ya que es muy complicado determinar exactamente la presión que experimenta la pared interna del molde, lo ideal es asumir que la *presión de compactación* es igual a la *presión interna*).
- FS = 1.5

Tabla 1. Comparación de los resultados obtenidos con tres materiales diferentes.

Material	σ_{adm} [MPa]	Espesor “t” [mm]	Diámetro exterior [cm]
Acero A36	250	8.722	7.744
Acero 1018 tratado	600	3.907	6.781
Acero 4140 tratado	655	3.888	6.276

La tabla anterior proporciona dimensiones para el molde que le permiten soportar durante su funcionamiento sin llegar a fallar o deformarse, en función de los diferentes materiales.

La comparación realizada muestra que una opción intermedia es el acero 1018 tratado; y no presenta mucha diferencia con los resultados obtenidos con el material de mejores propiedades. Sin embargo, no es posible adquirir ese material directamente, pues el tratamiento requerido aumentaría el costo de fabricación, por otro lado, el acero 4140 sí es posible adquirirlo de forma directa con las propiedades necesarias así que este se elige para fabricar el molde.

Por último, dado las dimensiones elegidas para la compactadora y el resto de los componentes que ésta debe tener, el molde no puede ser de una altura pronunciada. Entonces, se elige que tenga al menos una altura de 20 cm.

6.5.1.1. Simulación para el molde de compactación.

Una vez definidas las dimensiones del molde y el material de fabricación, se realiza una simulación de las condiciones a las que se someterá el molde para verificar que los esfuerzos que experimenta no sobrepasan el esfuerzo admisible y que tendrá un factor de seguridad mayor a 1. Para el material del molde, el esfuerzo admisible es de 655 MPa.

Esta y el resto de las simulaciones mostradas en esta sección se realizaron en el software ANSYS.

La (Figura 15) muestra la geometría del molde, tratándose de un cilindro hueco.

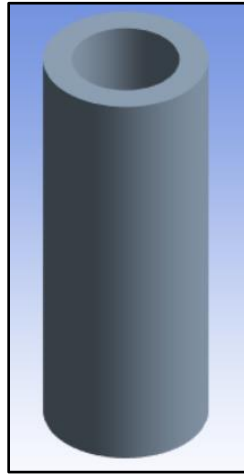


Figura 15. Molde de compactación [Imagen propia].

En seguida se describen las condiciones para la simulación.

Como se ve en las (Figura 9) y (Figura 10) el molde se coloca sobre la placa de apoyo, esto solo restringe su movimiento en la cara inferior; la cual se establece como un apoyo fijo en el software de simulación (Figura 16).

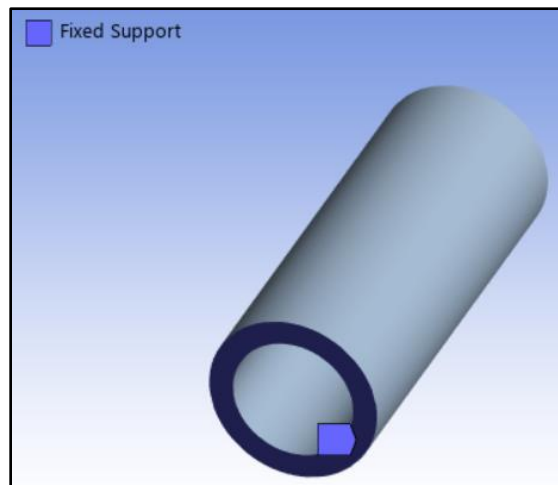


Figura 16. Condición de fijación para el molde [Imagen propia].

El molde experimenta una presión interna con un valor de 132.13 MPa. Para la simulación; dicha presión se aplica sobre la superficie interior del cilindro como se muestra en la (Figura 17).

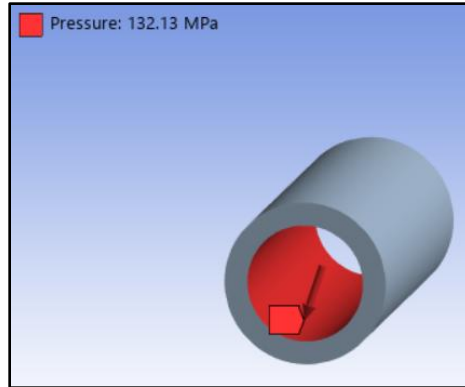


Figura 17. Presión aplicada al molde [Imagen propia].

Como resultado de aplicar las condiciones anteriores se obtienen las siguientes distribuciones de esfuerzos (Figura 18). Lo más importante es que el *máximo esfuerzo* no excede el *esfuerzo admisible* del material y que la mayor parte del molde presenta un esfuerzo muy por debajo del σ_{adm} .

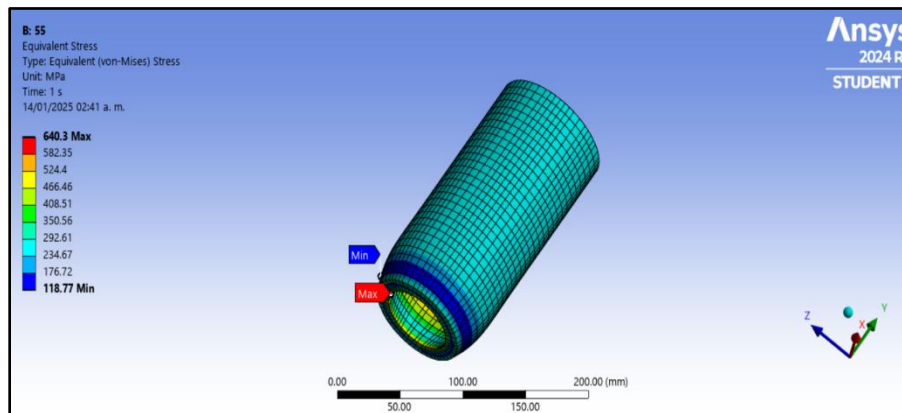


Figura 18. Esfuerzos en el molde [Imagen propia].

La (Figura 19) muestra la distribución del *factor de seguridad* en función del esfuerzo que se experimenta en la figura anterior. En este caso, lo más importante es que el factor mínimo sea mayor a 1, pues esto garantiza que el molde no fallará. También se puede observar que, en la mayor parte del molde, el *factor de seguridad* es superior a 1.

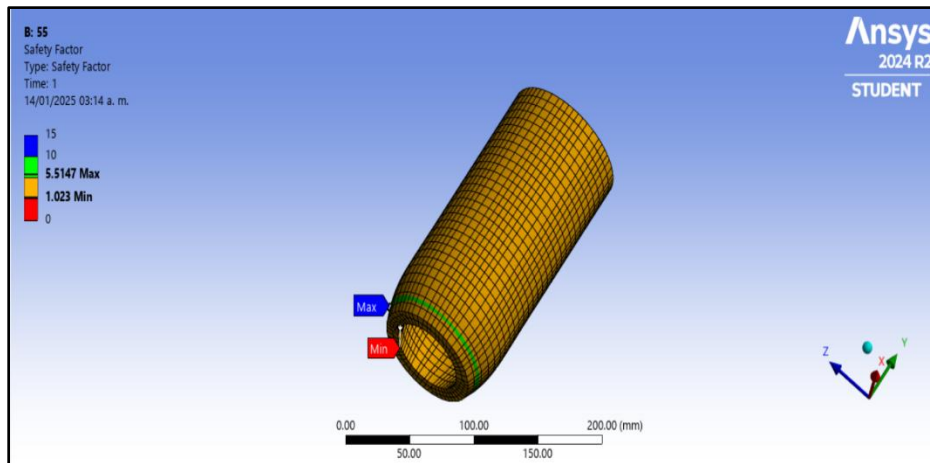


Figura 19. Factor de seguridad en el molde [Imagen propia].

6.5.2. Placa de apoyo.

Esta placa será donde se llevará a cabo la compactación de la viruta, quiere decir que debe ser capaz de soportar las 32 toneladas de capacidad del actuador hidráulico sin deformarse o romperse.

En la (Figura 20) se muestra la posición en que se encontrará dicha placa, como se puede ver, los canales CPS laterales servirán de apoyo mientras verticalmente se le aplica la fuerza de compactación. Esto provoca que la placa se encuentre en flexión.

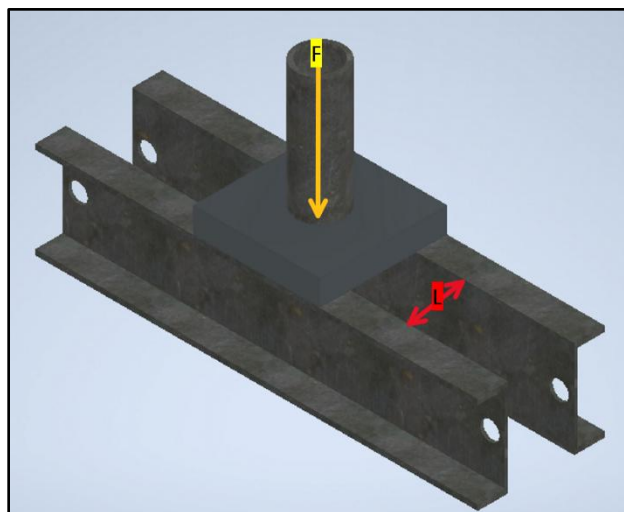


Figura 20. Posición de la placa de apoyo [Imagen propia].

Se determinó que la forma más fácil de fabricar la placa es mediante el uso de soleras de acero. El material más común y económico es el acero 1018 lamina en frío.

Con base en las soleras de este material que se encuentran en el mercado, se eligió usar soleras de 25 cm de alto y 15.24 cm de ancho. Por otro lado, es necesario calcular el espesor que permita a la placa soportar la fuerza de compactación.

Como ya se mencionó, se trata de un caso de flexión; en seguida se encuentran los cálculos para determinar el espesor.

Se comienza por la ecuación del *momento flector máximo* (Ec. 21) [17].

$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad (Ec. 21)$$

Donde:

- P es la carga o fuerza aplicada: 313920 N.
- L es la longitud entre los apoyos (Figura 20) este valor es aproximadamente 0.1524 m

$$M_{max} = \frac{(313920 \text{ N}) \cdot (0.1524 \text{ m})}{4}$$

$$M_{max} = 1196.0352 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Ahora se utiliza la ecuación de la *resistencia a la flexión*, esta variable representa el *máximo esfuerzo* que se producirá en función de la geometría y del *momento flector máximo* [17]:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot C}{I} \quad (Ec. 22)$$

Donde:

- σ_{max} es la tensión máxima.
- M_{max} es el momento flector.
- C es la distancia desde la fibra neutra.
- I es el momento de inercia.

Las variables clave son la distancia desde la *fibra neutra* (C) y el *momento de inercia* (I), pues estas se definen función del espesor. Las expresiones para dichas variables son las siguientes [17]:

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$C = \frac{t}{2} \quad (\text{Ec. 24})$$

Al sustituir las (Ec. 23) y (Ec. 24) en la ecuación de la *resistencia a la flexión* se obtiene que:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot 6}{b \cdot t^2} \quad (\text{Ec. 25})$$

De la (Ec. 25) se obtiene la expresión para determinar el *espesor* [17]:

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot \sigma_{max}}} \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde:

- b es el ancho de la placa rectangular.
- t es el espesor de la placa rectangular.

Para el acero 1018 laminado en frío la *resistencia a la flexión* se tomará igual al *límite elástico* del material, ya que es el máximo esfuerzo que puede presentar antes de deformarse; este tiene un valor de 370 MPa. Además, recordando que el *momento flector máximo* es 1196.352 N·m ahora es posible calcular el valor del *espesor* de la placa utilizando la (Ec. 26).

$$t = \sqrt{\frac{(6) \cdot (1196.352 \text{ N} \cdot \text{m})}{(0.15 \text{ m}) \cdot (370 \times 10^6 \text{ N/m}^2)}}$$

$$t = 0.0359 \text{ m} \approx 35.9 \text{ mm} \approx 3.59 \text{ cm}$$

Los espesores estándar que hay en el mercado para las soleras de acero 1018 indican que el más cercano al espesor calculado es de 3.81 cm (1 ½").

Aunque se presente un cambio en el espesor, el *momento flector máximo* no se modifica, pues este se encuentra en función de variables que no se ven afectadas por el espesor. Por otro lado, la *resistencia a la flexión* si cambia; haciendo uso de la (Ec. 25) se calcula su valor:

$$\sigma_{max} = \frac{11960.352 \text{ Nm} \cdot 6}{(0.1524 \text{ m}) \cdot (0.0381 \text{ m})^2}$$

$$\sigma_{max} = 324.384 \text{ MPa}$$

Con este resultado se calcula el *factor de seguridad* despejándolo de la (Ec. 18):

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{adm}} \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

- σ_y tiene un valor de 370 MPa.
- σ_{adm} en este caso es el valor de la resistencia a la flexión calculado.

$$FS = \frac{370 \text{ MPa}}{324.384 \text{ MPa}} = 1.14$$

El valor de *FS* calculado indica que la placa con las dimensiones propuestas de 25 cm x 15.24 cm x 3.81 cm es capaz de soportar la carga que se le aplicará.

6.5.2.1. Simulaciones para la placa de apoyo.

La simulación de las condiciones en las que se encontrará la placa ayudará de determinar de una forma más precisa si las dimensiones que se establecieron son las indicadas para evitar que se deforme o falle.

La (Figura 21) muestra la geometría de la placa utilizada para la simulación. Las dimensiones establecidas son 25 cm de largo, 15.24 cm de ancho y 3.81 cm de espesor.

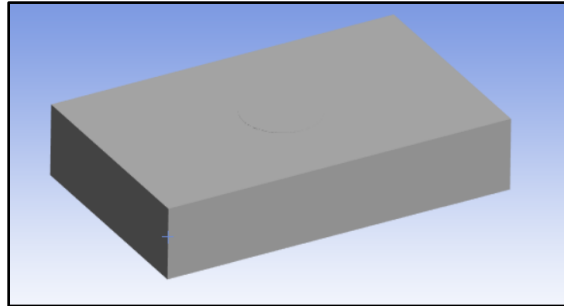


Figura 21. Placa de apoyo [Imagen propia].

De acuerdo con la (Figura 20) los apoyos para la placa serán las superficies de contacto con los canales CPS llamados base de compactación. La (Figura 22) muestra la posición de los apoyos en el modelo de la placa, se trata de apoyos fijos y restringen el movimiento en dichas locaciones; comportamiento muy similar a lo que se espera en la realidad.

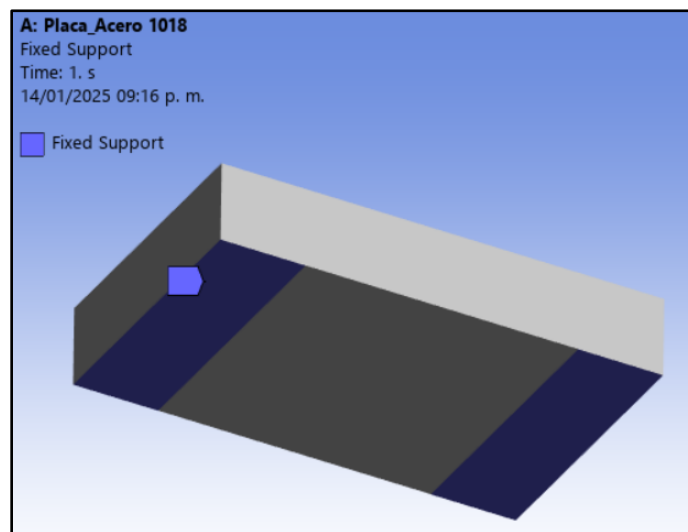


Figura 22. Condiciones de fijación en la placa [Imagen propia].

Como ya se ha mencionado, la fuerza de compactación es la que actuará en la parte superior de la placa, se espera que la fuerza sea aplicada y concentrada en el área correspondiente a la sección transversal del interior del molde de compactación (Figura 23).

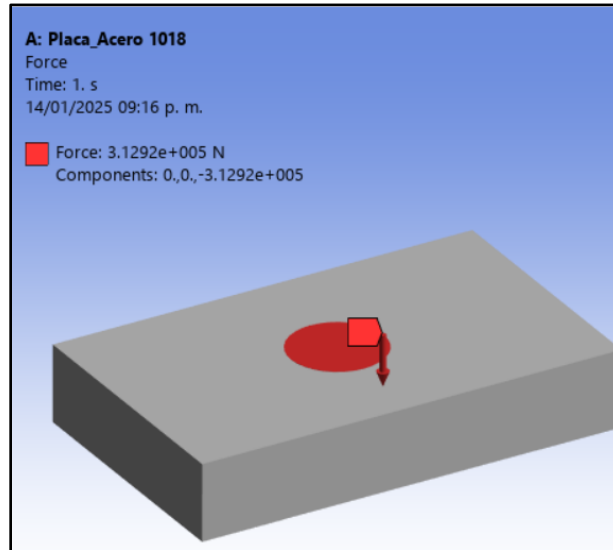


Figura 23. Fuerza ejercida sobre la placa [Imagen propia].

Estas condiciones dan como resultado la distribución de esfuerzos que se muestra en la (Figura 24). En ella se observa que los esfuerzos más grandes se presentan en la parte inferior de la placa justo donde terminan los apoyos, sin embargo, el *esfuerzo máximo* no sobrepasa el *esfuerzo admisible* de 370 MPa y en la mayor parte de la placa los esfuerzos no son significativos.

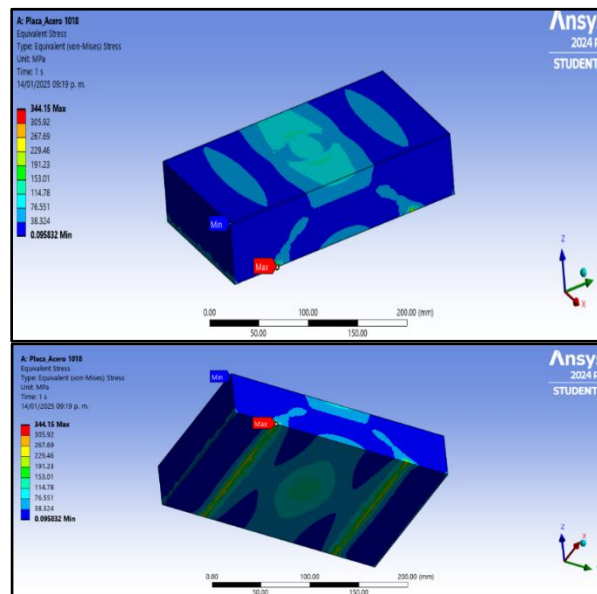


Figura 24. Distribución de esfuerzos en la placa [Imagen propia].

Al observar la (Figura 25) se nota que, al igual que los esfuerzos más grandes, los factores de seguridad críticos se localizan en la parte inferior de la placa. Lo más destacable es que el valor del factor de seguridad mínimo es superior a 1, esto indica que la placa no debería fallar o deformarse bajo las condiciones establecidas

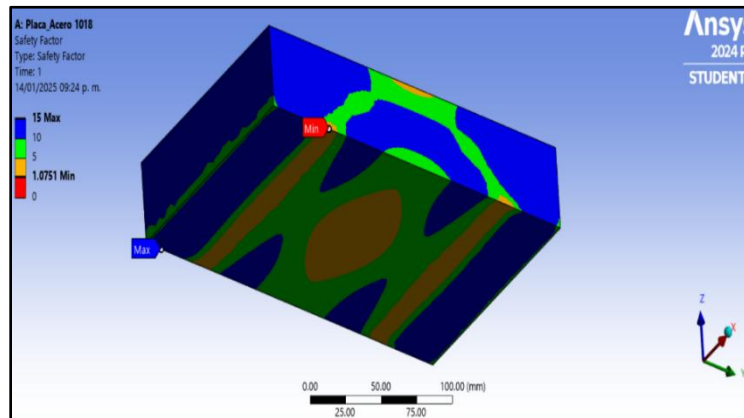


Figura 25. Factor de seguridad en la placa de apoyo [Imagen propia].

6.5.3. Barra de compactación.

Como ya se mencionó, el actuador hidráulico de la máquina compactadora será un gato hidráulico de tipo botella, una desventaja es que su desempeño puede llevarse a cabo hasta una inclinación máxima de 90° ; es decir de forma horizontal. Esto hace imposible utilizar el vástago del mismo gato para compactar la viruta.

Entonces es necesario utilizar otro elemento que pueda cumplir la función de compactar la viruta, por la geometría del molde este elemento debe ser una barra cilíndrica sólida que llevará el nombre de *barra de compactación*. Cabe mencionar que también se utilizará un acero 4140 tratado, pues ya se demostró que ese material es bueno para soportar la fuerza de compactación.

La barra de compactación se encontrará sostenida a un elemento estructural sobre el cual se colocará el actuador hidráulico; de esta forma cuando se produzca el desplazamiento; la barra (debido a la fuerza F) se empujará hacia abajo desde su cara superior. Por otro lado, cuando se realice la compactación, la placa y la viruta se opondrán al movimiento vertical de la barra provocando la fuerza " R " (Figura 26).

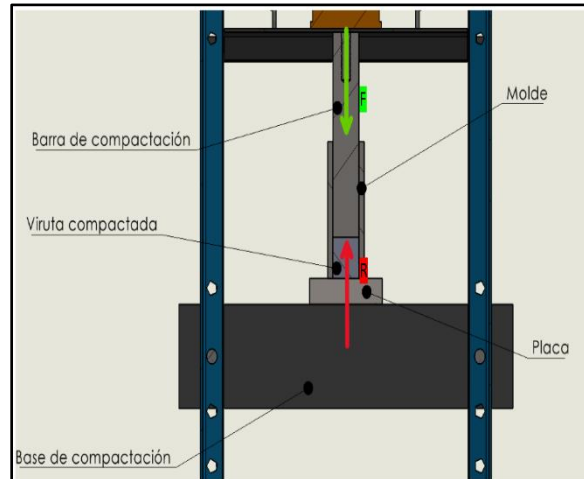


Figura 26. Funcionamiento de la barra de compactación [Imagen propia].

Con el diámetro interior del molde de compactación es fácil determinar un diámetro adecuado para la barra de compactación; se obtiene con el concepto de ajustes.

Considerando un ajuste de tipo holgura (más suelto), comúnmente se utiliza una holgura mínima de aproximadamente 0.25 mm a 0.5 mm, son ajustes utilizados en lugares donde la precisión no es importante; especialmente en aplicaciones donde es crucial evitar el atascamiento.

Diámetro de la barra para un ajuste con holgura:

$$D_{Barrera} = D_{Molde} - \text{holgura} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde:

- D_{Molde} es el diámetro interior del molde de compactación (55 mm).
- Holgura (0.5 mm).

$$D_{Barrera} = 55 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm}$$

$$D_{Barrera} = 54.5 \text{ mm}$$

Como decisión de diseño se establece que la altura o largo de la barra será de 30 cm, pues se entiende que esta barra debe ser capaz de superar la altura del molde de compactación (20 cm) para lograr expulsar la briqueta una vez se allá terminado el proceso de compactación.

El primer dato que puede determinarse con el diámetro de la barra es el *área de su sección transversal*:

$$A_{Barra} = \pi \left(\frac{(0.0545 \text{ m})^2}{4} \right)$$

$$A_{Barra} = 0.0023328 \text{ m}^2 \approx 2.3328 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Criterio de Euler:

El *criterio de Euler* es una fórmula utilizada para calcular la carga crítica de pandeo de una columna esbelta (larga y delgada) bajo compresión axial. El pandeo ocurre cuando una columna se deforma lateralmente debido a una carga compresiva excesiva, lo que lleva al fallo estructural incluso antes de que la columna alcance su límite de fluencia.

Para determinar si es necesario calcular el *criterio de Euler* para una barra de acero con un diámetro de 59.5 mm y una longitud de 300 mm, primero debemos considerar si la barra es susceptible al pandeo, lo que depende principalmente de su esbeltez.

Esbeltez de la Barra (λ):

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

- L es la longitud efectiva de la barra (300 mm).
- r es el *radio de giro de la sección transversal*; para una barra circular, el *radio de giro* se puede simplificar a:

$$r = \frac{d}{4} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$r = \frac{54.5 \text{ mm}}{4}$$

$$r = 13.625 \text{ mm}$$

Ahora el valor de r se sustituye en la (Ec. 29) para obtener la *esbeltez* de la barra.

$$\lambda = \frac{300 \text{ mm}}{13.625 \text{ mm}}$$

$$\lambda = 20.1681 \approx 22.0183$$

Interpretación del Coeficiente de Esbeltez:

Un *coeficiente de esbeltez* bajo, generalmente por debajo de 50, indica que la barra es robusta y que la falla es más probable por aplastamiento (compresión pura) que por pandeo.

Un *coeficiente de esbeltez* alto, generalmente superior a 100, indica que la barra es esbelta y que la falla por pandeo es una preocupación mayor.

Entonces dado que el *coeficiente de esbeltez* calculado $\lambda \approx 22$ es muy bajo, no es necesario aplicar el *criterio de Euler* para esta barra de acero. En este caso, la barra es lo suficientemente robusta como para que el pandeo no sea un modo de falla crítico; sin embargo, hay que calcular las tensiones de compresión para asegurarnos de que no se exceda el límite de fluencia del material.

Esfuerzo Normal/Esfuerzo axial (σ):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde:

- σ es el esfuerzo normal.
- F es la fuerza aplicada, en este caso es igual a la fuerza de compactación (313.920 kN o 313920 N).
- A es el área de la sección transversal del tubo ($2.7805 \times 10^{-3} \text{ m}^2$).

$$\sigma = \frac{313920 \text{ N}}{2.3328 \times 10^{-3} \text{ m}^2}$$

$$\sigma = 134567901.234 \text{ Pa} \approx 134.5679 \text{ MPa}$$

Factor de Seguridad (FS):

Una vez calculado el esfuerzo de compresión que experimentará la barra y sabiendo que el pandeo no es relevante en el uso que se le dará; se prosigue con el cálculo del *factor de seguridad* utilizando la (Ec. 27).

Al tratarse de un acero 4140 tratado su *límite de fluencia* (σ_y) tiene un valor de 655 MPa y el esfuerzo que experimentará la barra es de 134.567 MPa; al sustituir en la ecuación se tiene un factor de:

$$FS = \frac{655 \text{ MPa}}{134.567 \text{ MPa}} = 4.8$$

Este valor indica que la barra soportará sin problemas los esfuerzos que provocará la fuerza para compactar la viruta.

6.5.3.1. Simulación para la barra de compactación.

Las dimensiones determinadas para la barra de compactación son una altura de 30 cm y diámetro de 54.5 cm, resultando en el modelo de la (Figura 27), recordando que el material es acero 4140 con un esfuerzo admisible de 655 MPa.

Los cálculos realizados arrojaron resultados bastante satisfactorias respecto a la resistencia de la barra para el propósito que se le quiere dar, sin embargo, la siguiente simulación servirá como respaldo de los datos calculados.

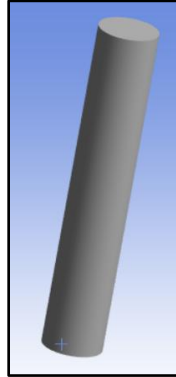


Figura 27. Modelo de la barra de compactación [Imagen propia].

Retomando la (Figura 26) la fuerza “R” se opone al movimiento de la barra, tal como lo haría un soporte fijo en la cara inferior. Entonces esa restricción se coloca en el molde (Figura 28).

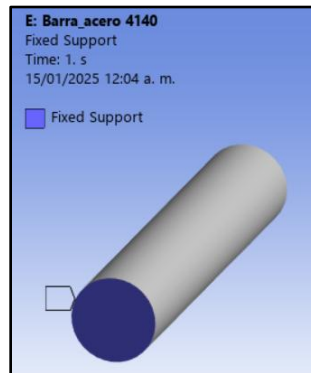


Figura 28. Restricción de la barra de compactación [Imagen propia].

La otra condición para la simulación es establecer el actuar de la fuerza de compactación sobre la cara superior de la barra, como se muestra en la (Figura 29).

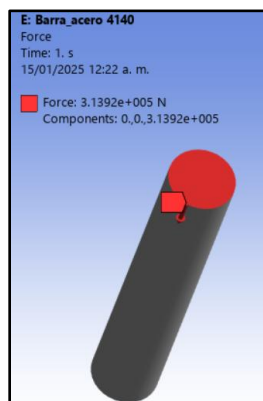


Figura 29. Fuerza en la barra de compactación [Imagen propia].

Con las condiciones previamente establecidas se obtiene la distribución de esfuerzos mostrada en la (Figura 30), ahí se observa que los esfuerzos más grandes se experimentan en el perímetro de la base inferior de la barra, pero analizando los valores de esfuerzo, ninguno es significativo si se compara con el esfuerzo admisible del material (655 MPa).

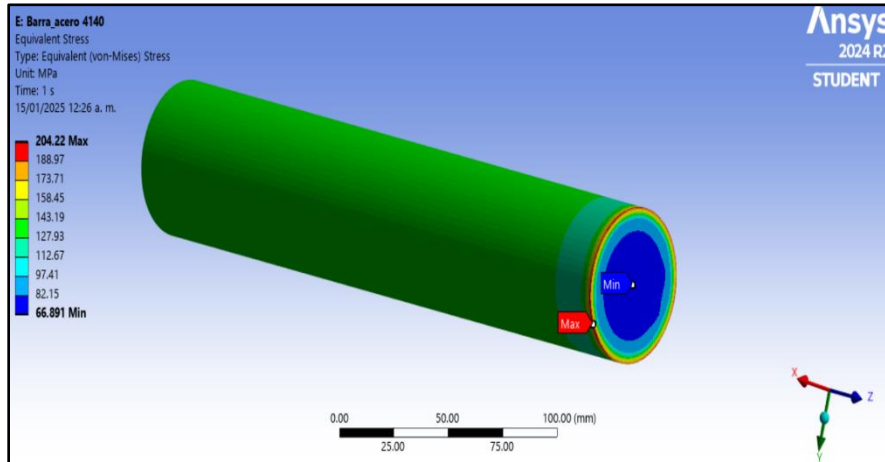


Figura 30. Distribución de esfuerzos en la barra de compactación [Imagen propia].

Ya que los esfuerzos no sobrepasan el esfuerzo admisible, el factor de seguridad (Figura 31) arrojado por la simulación confirma que la barra soportaría sin problemas el uso que se desea darle.

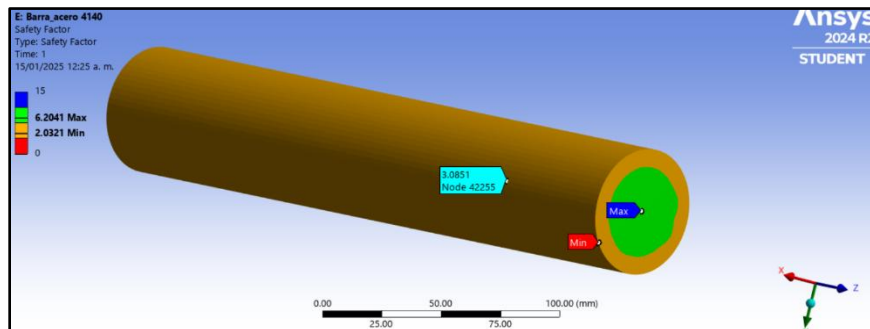


Figura 31. Factor de seguridad en la barra de compactación [Imagen propia].

6.5.4. Pernos para sujetar las bases de compactación.

En la (Figura 32) se muestra la posición que tendrán los pernos en la compactadora. Estos se encargarán de mantener fijos a los elementos estructurales sobre los que se llevará a cabo la compactación de viruta.

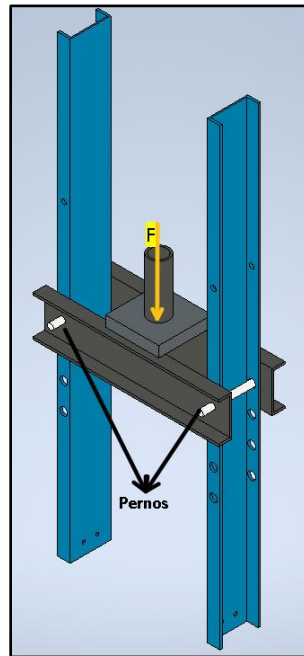


Figura 32. Posición de los pernos [Imagen propia].

En la (Figura 33) se muestran las fuerzas que actúan sobre los pernos según la posición mostrada en la (Figura 32). A partir de ella se pueden deducir las siguientes situaciones:

- Distribución uniforme de la fuerza ejercida al compactar la viruta.
- Los pernos se encuentran en cortante doble.
- Debe tomarse en cuenta el peso de los elementos que cargan pernos antes de aplicar la fuerza de compactación.

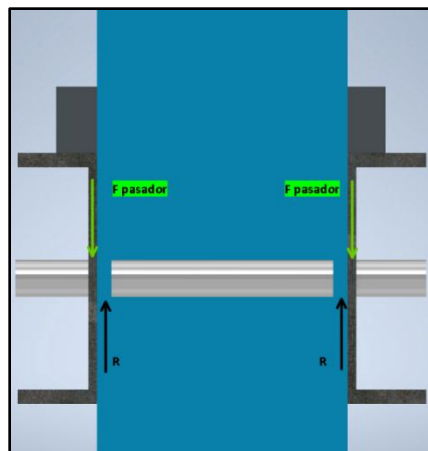


Figura 33. Fuerzas en los pernos [Imagen propia].

La estructura en azul es fija, lo que automáticamente da esa condición a los pernos, esto provoca la fuerza de reacción “R”.

Fórmula para el cálculo del *cortante doble*:

$$\tau = \frac{F_{pasador}}{2A} \quad (Ec. 32)$$

Donde:

- τ es el esfuerzo cortante (MPa).
- $F_{pasador}$ es la fuerza ejercida sobre uno de los pasadores (N).
- A es el área de la sección del pasador (m^2).

Fuerza en el pasador:

Al suponer la distribución uniforme de la fuerza ejercida al compactar y tomando el peso de la base de compactación; cada pasador experimenta una fuerza:

$$F_{pasador} = \frac{F_{comp}}{2} + \frac{W}{2} \quad (Ec. 33)$$

Donde:

- F_{comp} es la fuerza de compactación (N).
- W es el peso de los elementos que cargan los pernos (N).

Si los pernos cargan ambas bases de compactación; la placa y el molde de compactación, el peso se expresa como:

$$W = W_{bases} + W_{molde} + W_{placa} \quad (Ec. 34)$$

Sabiendo que el perfil del que están hechas las bases tiene una masa de 12.2 kg/m, entonces la masa de ambos elementos es de 17.08 kg. El material de la placa tiene una densidad de $7.87g/cm^3$, con las dimensiones calculadas está tendría una masa de 11.43 kg. Por último, el material del molde tiene una densidad de $7.85 g/cm^3$, con las dimensiones propuestas, el molde tiene un peso de 3.59 kg.

Entonces el peso puede calcularse de la siguiente forma:

$$W = (17.08 \text{ kg} + 11.43 \text{ kg} + 3.59 \text{ kg})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$W = 314.901 \text{ N}$$

Sustituyendo datos se calcula la *fuerza en el pasador*:

$$F_{pasador} = \frac{313920 \text{ N}}{2} + \frac{314.901 \text{ N}}{2}$$

$$F_{pasador} = 157117 \text{ N}$$

Esfuerzo cortante máximo y esfuerzo permisible:

La relación entre estos esfuerzos está en función del *factor de seguridad* y se expresa con la (Ec. 35):

$$\tau_{perm} = \frac{\tau_{max}}{FS} \tag{Ec. 35}$$

Donde:

- τ_{perm} es el esfuerzo cortante permisible (MPa).
- τ_{max} es el esfuerzo cortante máximo que soporta el material (MPa).
- FS es el factor de seguridad.

Una regla general que aplica a muchos materiales metálicos es que el *esfuerzo cortante máximo* es aproximadamente entre el 50% y 60% de la *resistencia a la tracción*, es decir:

$$\tau_{max} \approx 0.5 \sigma_T \tag{Ec. 36}$$

Donde:

- σ_T es la resistencia a la tracción (MPa).

Diámetro necesario para el pasador:

Se puede obtener este dato a partir de la ecuación del *esfuerzo cortante*. El *área de la sección del pasador* está dada por la (Ec. 37):

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde:

- d es el diámetro del pasador (m).

Para cumplir con el *factor de seguridad*; la ecuación del *esfuerzo cortante* es:

$$\tau_{perm} = \frac{F_{pasador}}{2A} = \frac{F_{pasador}}{2\left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right)} \quad (\text{Ec. 38})$$

Al despejar el diámetro se llega a la siguiente (Ec. 39):

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{pasador}}{\tau_{perm} \cdot \pi}} \quad (\text{Ec. 39})$$

De nuevo se realiza una comparación entre materiales, en la (Tabla 2) se encuentran los resultados de aplicar las ecuaciones anteriores para las diferentes propiedades de cada material. Se utiliza un factor de seguridad de 1.5 y la fuerza del perno es la misma en los tres casos.

Tabla 2. Resultados para las diferentes propiedades de cada material.

Material	τ_{max} [MPa]	τ_{perm} [MPa]	Diámetro [mm]
Acero A36	125	83.3333	34.64
Acero 1018 tratado	300	200.0000	22.36
Acero 4140 tratado	327.5	218.3333	21.40

Se elige al acero 4140 tratado para fabricar los pernos, es notable que sus propiedades son mejores que las propiedades de los otros dos materiales; esto resulta en que es posible soportar las condiciones a las que se someterán los pernos con un tamaño menor en comparación con los otros dos casos.

Por último, según las dimensiones de la compactadora se elige una longitud de 25 cm para los pernos.

6.5.4.1. Simulación para la barra de compactación.

La geometría de los pernos para la simulación se muestra en la (Figura 34):

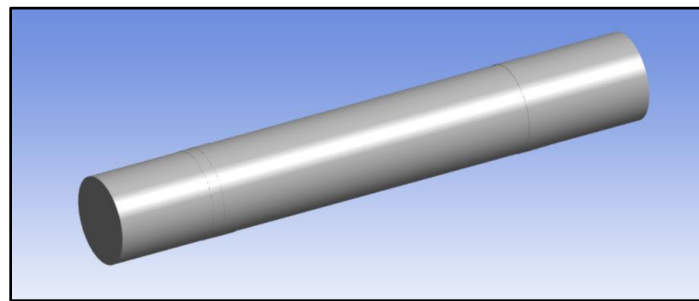


Figura 34. Modelo del perno [Imagen propia].

De acuerdo con la (Figura 33) la superficie de los pernos que está en contacto con las estructuras en color azul, puede interpretarse como un soporte fijo. Entonces esa restricción es la que se utiliza en el software de simulación tal como se ve en la (Figura 35).

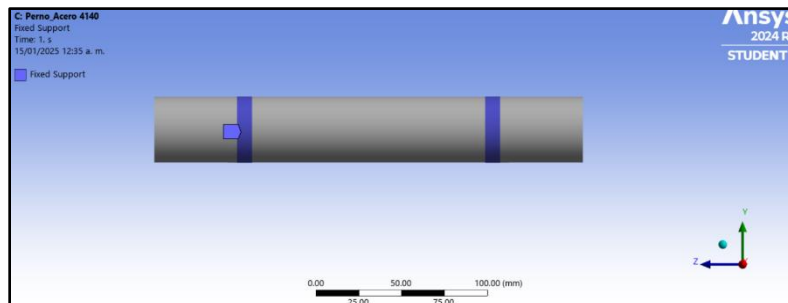


Figura 35. Restricciones en los pernos [Imagen propia].

La fuerza que se aplica en los pernos tiene un valor de 157117 N, al igual que los soportes, esta fuerza se localiza sobre dos superficies de acuerdo con la (Figura 36), dichas superficies son las que están en contacto con las bases de compactación en color gris. La (Figura 36) ilustra esta condición en el modelo del perno.

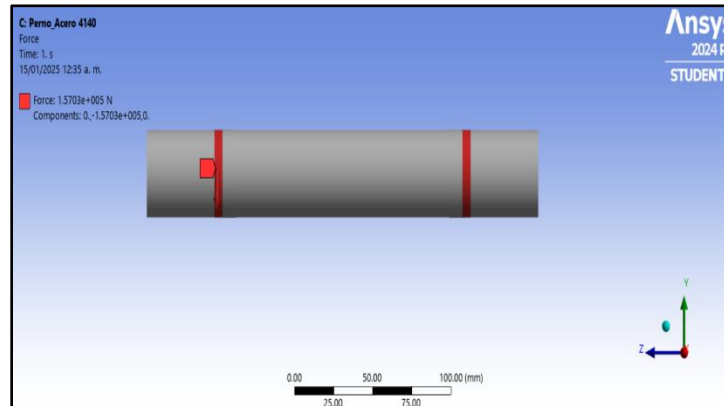


Figura 36. Fuerza en el perno [Imagen propia].

Los resultados de la simulación al aplicar las condiciones anteriores muestran que los esfuerzos más grandes se encuentran en las posiciones en que se aplica la fuerza. La (Figura 37) indica que el mayor valor es de 609.53 MPa y este se encuentra por debajo del esfuerzo admisible del material elegido (655 MPa). En el resto del perno los esfuerzos son casi nulos.

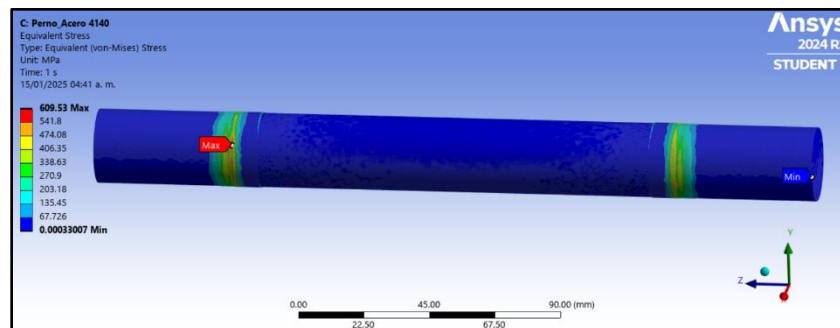


Figura 37. Distribución de esfuerzos en el perno [Imagen propia].

Los valores mínimos para el factor de seguridad también se localizan donde se ubican los esfuerzos más grandes, mientras que en el resto del perno se tienen factores con valores muy altos. El valor mínimo es mayor a 1 (Figura 38), esto indica que el diámetro calculado les permite a los pernos soportar su función sin fallar o deformarse.

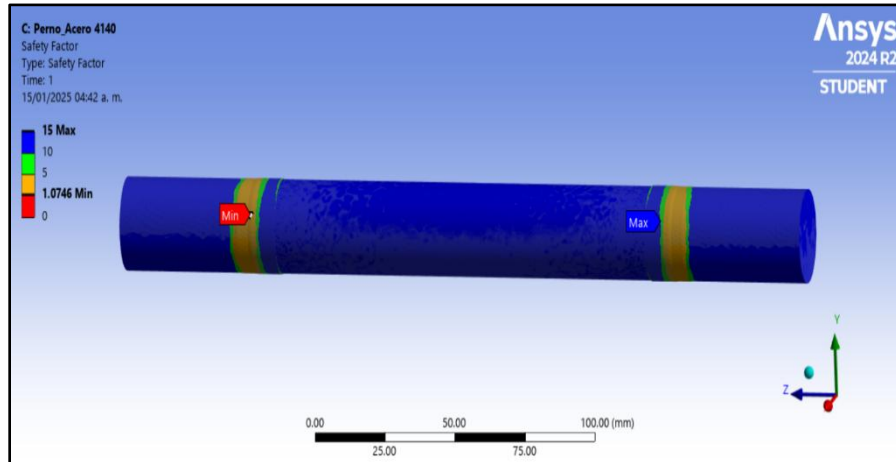


Figura 38. Factor de seguridad en el perno [Imagen propia].

6.5.5. Resortes de extensión.

Estos resortes serán los encargados de regresar el vástago del gato hidráulico a su posición inicial (Figura 39).



Figura 39. Ejemplo de resortes de extensión [32].

Tomando como referencia la (Figura 40), se realizan los cálculos necesarios para obtener las dimensiones necesarias en los resortes que les permitan realizar la función de retroceder el vástago.

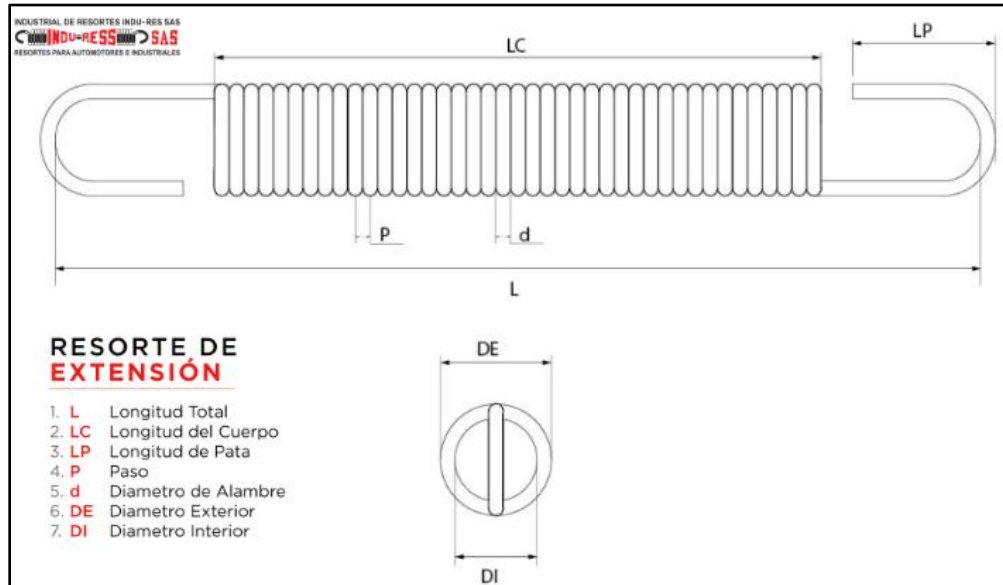


Figura 40. Dimensiones clave de un resorte de extensión [33].

El material más utilizado en la fabricación de resortes es alambre piano, el cual tiene las siguientes propiedades:

- Límite elástico: Alrededor de 1500 MPa.
- Resistencia a la fatiga: Hasta 600-800 MPa.
- Módulo de rigidez: 80 GPa

Realizando pruebas al gato hidráulico se encontró que después de extender por completo el vástago, se necesita una carga aproximada de 50 kg para hacerlo retroceder. Sumado a esto, es necesario considerar la masa del resto de elementos con los que cargarán los resortes, incluyendo al mismo gato. Esas masas se enlistan a continuación:

- Masa del gato 17 kg
- Masa del perfil sobre el que se coloca el gato 7.32 kg
- Masa de la barra de compactación 5.58 kg

Entonces la carga que deben soportar los resortes será aproximadamente de 80 kg. Según lo mencionado anteriormente, la fuerza aplicada a los resortes es de $F_R=784.8 \text{ N}$.

Otras consideraciones:

- De acuerdo con las dimensiones planeadas para la compactadora, se estima que la longitud del cuerpo del resorte sin estar extendido (L_c) debe ser aproximadamente 20 cm.
- El recorrido máximo del vástago en el gato es de 16.5 cm (Figura 41), sin embargo, las dimensiones de la compactadora restringen esa longitud a 12 cm. Si a los 26 cm de altura inicial se le suman los 12 cm de recorrido a los que se restringe el movimiento; se tiene un valor de 38 cm y este representa la máxima longitud L_{max} que tendrá el resorte durante su funcionamiento.

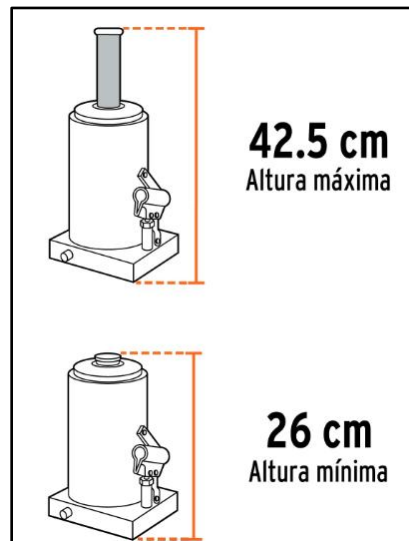


Figura 41. Alturas del gato hidráulico [34].

- Si se tiene una longitud de cuerpo inicial (L_c) de 20 cm, según L_{max} el recorrido del resorte durante su funcionamiento será de 18 cm.
- Según una investigación realizada, se encontraron algunos valores típicos para las dimensiones de los resortes y que pueden ser de utilidad para el propósito que se busca. Para el diámetro de alambre (d) se encontró un valor de 4 mm, para el diámetro medio (D) se obtuvo un valor de 30 mm y para el número de espiras activas ($N_{activas}$) se tiene un valor de 8.

Uno de los valores principales, la *constante de rigidez* del resorte se determina con la (Ec. 40):

$$K = \frac{F}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada al resorte (N).
- Δ_x es el desplazamiento total del resorte desde su posición de equilibrio (m).

Por seguridad, se recomienda que el resorte se extienda solamente entre el 60%-70% de su capacidad (Δ_x). Ya que su extensión es de 18 cm, tomando como referencia el 60% el valor de " Δ_x " es 30 cm. Entonces, la constante del resorte será:

$$k = \frac{784.8N}{0.3 m}$$

$$k = 2616 N/m$$

Esta es la rigidez total requerida de los dos resortes combinados.

Por lo tanto, la constante de cada resorte individual será:

$$k_{individual} = \frac{2616 N/m}{2}$$

$$k_{individual} = 1308 \frac{N}{m}$$

Longitud total del alambre:

La *longitud total del alambre* que forma el resorte se estima como la circunferencia del resorte multiplicada por el número de vueltas activas N:

$$\text{Longitud del alambre} = N \cdot \pi \cdot D \quad (\text{Ec. 41})$$

Donde:

- N es el número de vueltas (espiras) activas: 8.
- D es el diámetro medio del resorte: 0.03 m.

Sustituyendo

$$Longitud\ del\ alambre = (8) \cdot (\pi) \cdot (0.030\ m)$$

$$Longitud\ del\ alambre = 0.75398\ m \approx 75.398\ cm$$

Diámetro externo e interno del resorte:

El *diámetro externo e interno* se relacionan con el *diámetro del alambre* y el *diámetro medio* del resorte.

$$D_{ext} = D + \frac{d}{2} \quad (Ec. 42)$$

$$D_{int} = D - \frac{d}{2} \quad (Ec. 43)$$

Donde:

- D_{medio} es el diámetro medio del resorte: 30 mm.
- d es el diámetro del alambre: 4 mm.

Al sustituir los datos se obtiene los siguientes valores:

$$D_{ext} = 30\ mm + 2\ mm$$

$$D_{ext} = 32\ mm = 3.2\ cm$$

$$D_{int} = 30\ mm - 2\ mm$$

$$D_{int} = 28\ mm = 2.80\ cm$$

Número total de espiras (N_{total}):

El *número total de espiras* incluye las vueltas activas y las vueltas inactivas, que están en los extremos del resorte para formar los ganchos o terminaciones.

Generalmente, los resortes de extensión tienen alrededor de 2 vueltas inactivas en total, ya que las terminaciones no participan en la acción del resorte. Por lo tanto:

$$N_{total} = N_{activas} + N_{inactivas} \quad (Ec. 44)$$

Entonces se tiene un valor total de vueltas igual a:

$$N_{total} = 8 + 2$$

$$N_{total} = 10$$

Longitud mínima de los ganchos ($L_{ganchos}$):

La *longitud mínima de los ganchos* depende de la forma en la que se formen los ganchos en los extremos del resorte. Generalmente, la longitud de los ganchos es alrededor de 1.5 a 2 veces el diámetro medio del resorte. Entonces:

$$L_{ganchos} \approx 1.5 \cdot D \quad (Ec. 45)$$

$$L_{ganchos} \approx 1.5 \cdot 30 \text{ mm}$$

$$L_{ganchos} \approx 45 \text{ mm}$$

Longitud total mínima del resorte (L):

La *longitud total mínima* es la longitud completa del resorte, incluyendo las espiras activas y los ganchos. Se puede calcular usando la (Ec. 46):

$$L = L_c + 2 \cdot L_{ganchos} \quad (Ec. 46)$$

Sustituyendo datos tenemos el siguiente resultado:

$$L = 200 \text{ mm} + 2 \cdot 45 \text{ mm}$$

$$L = 290 \text{ mm} = 29 \text{ cm}$$

Los siguientes cálculos se realizan para determinar si las especificaciones establecidas para los resortes son las adecuadas para evitar su falla. En seguida se muestra un resumen de los datos necesarios.

- Carga en cada resorte: $F=392.4$ N.
- Diámetro medio del resorte (D): 30 mm.
- Diámetro del alambre (d): 4 mm.
- Número de vueltas activas (Nactivas): 8.
- Módulo de rigidez del material (G): 80,000 MPa.

Esfuerzo cortante máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$):

El *esfuerzo cortante* es la fuerza que experimenta el alambre del resorte debido a la carga aplicada. El valor máximo de este esfuerzo puede compararse con el límite de esfuerzo que el material puede soportar sin fallar. Se define por la (Ec. 47):

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot d^3} \cdot K_s \quad (\text{Ec. 47})$$

Primero es necesario calcular el *factor de Wahl* (K_s), este ayuda a corregir el esfuerzo cortante debido a los efectos de concentración de esfuerzos, se utiliza la (Ec. 48):

$$K_s = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde:

- C es Relación de índice del resorte, se determina usando la (Ec. 49).

$$C = \frac{D}{d} \quad (\text{Ec. 49})$$

Al sustituir los datos:

$$C = \frac{30 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 7.5$$

Ahora es posible determinar el *factor* K_s :

$$K_s = \frac{4(7.5) - 1}{4(7.5) - 4} + \frac{0.615}{7.5}$$

$$K_s = 1.1974$$

Dando como resultado un *esfuerzo cortante máximo* de:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{(8) \cdot (392.4 \text{ N}) \cdot (30 \text{ mm})}{\pi \cdot (4 \text{ mm})^3} \cdot (1.1974)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 560.8537 \text{ MPa}$$

Este valor de esfuerzo cortante ya es menor que el límite elástico para el alambre de piano que es de 1500 MPa.

Deflexión máxima ($X_{m\acute{a}x}$):

La *deflexión máxima* es el estiramiento máximo que experimentará el resorte bajo la carga total aplicada. Esto debe compararse con la capacidad máxima de estiramiento del resorte (longitud estirada de 18 cm). La deflexión se calcula con la (Ec. 50):

$$X_{m\acute{a}x} = \frac{8 \cdot F \cdot N_{activas} \cdot D^3}{G \cdot d^4} \quad (\text{Ec. 50})$$

Sustituyendo los datos:

$$X_{m\acute{a}x} = \frac{(8) \cdot (392.4 \text{ N}) \cdot (8) \cdot (30 \text{ mm})^3}{(80,000 \text{ MPa}) \cdot (4 \text{ mm})^4}$$

$$X_{m\acute{a}x} = 33.1087 \text{ mm} \approx 3.3108 \text{ cm} \approx 0.033108 \text{ m}$$

El valor de deflexión calculado es de 3.3108 cm, el cual se encuentra muy por debajo del límite máximo de extensión que es de 18 cm. Esto indica que el resorte trabajara sin deformarse excesivamente.

Factor de seguridad (FS):

$$FS = \frac{\tau_{perm}}{\tau_{m\acute{a}x}}$$

$$FS = \frac{1500 \text{ MPa}}{560.8537 \text{ MPa}}$$

$$FS = 2.67$$

Este *factor de seguridad* es muy bueno y asegura que los resortes no fallarán por esfuerzo cortante bajo las cargas especificadas.

En resumen, los resortes deben tener las siguientes especificaciones que se obtuvieron mediante investigación y cálculos (Figura 40):

- Longitud total mínima (L) = 29 cm
- Longitud mínima del cuerpo (L_c) = 20 cm
- Longitud mínima de los ganchos (L_{ganchos} o LP) = 4.5 cm
- Diámetro mínimo del alambre (d): 0.004 cm
- Diámetro mínimo exterior o externo (D_{ext}) = 3.2 cm
- Diámetro mínimo interior o interno (D_{int}) = 2.8 cm
- Diámetro medio (D_{medio}) = 3.0 cm
- Número mínimo de vueltas o total de espiras (N_{total}) = 10 vueltas o espiras
- Número de vueltas activas (N_{activas}) = 8 vueltas
- Longitud del alambre = 75.398 cm
- Constante elástica (k) = 1308 N/m

6.6. Manufactura de los componentes de la compactadora.

A continuación, se describe el proceso de fabricación y ensamble de los componentes de la máquina compactadora previamente diseñados y establecidos.

Para ver detalladamente las geometrías y dimensiones de los componentes dirigirse a la sección de apéndice “a” y revisar los planos detallados.

Los elementos que se abordan se encuentran en la (Figura 42):

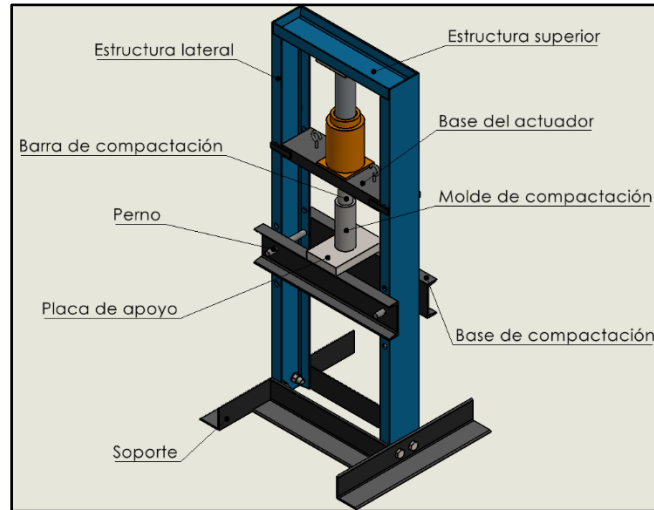


Figura 42. Elementos fabricados en el taller [Imagen propia].

6.6.1. Estructura lateral.

Anteriormente se mencionó que varias partes de la compactadora se fabricarían a partir de un canal tipo CPS, tal como es el caso de la estructura lateral.

Este material fue posible adquirirlo con las longitudes necesarias según la (Figura 13), pero fue necesario realizar varias perforaciones y cortes al material para poder ensamblar ambas estructuras con el resto de los componentes.

La posición de los barrenos se determinó con base en la altura total de la compactadora, la altura del gato hidráulico, la altura del molde y barra de compactación. El propósito de estas perforaciones es introducir los pernos que darán la posición y fijación a las bases de compactación.

Se marcaron las posiciones en ambos patines de cada canal CPS y utilizando un taladrado de piso se hicieron las perforaciones como se muestra en la (Figura 43):



Figura 43. Perforación de las estructuras laterales [Imagen propia].

Se entiende que los diámetros de los barrenos deberían ser equivalentes al diámetro calculado para los pernos, sin embargo, no se contaba con una broca de esa medida. La broca con un diámetro más cercano por encima del valor calculado tiene una medida de $61/64$ in o 24.2 mm. Por lo tanto, esta broca es la que se utilizó para realizar los barrenos.

La posición de las estructuras laterales debe permitir el acoplamiento de la estructura superior como se muestra en la (Figura 42); por ende, con el objetivo de permitir el ensamble, fue necesario cortar los patines de ambos laterales en la parte superior (Figura 44).



Figura 44. Corte del patín en los canales CPS [Imagen propia].

Se determinó que dos soportes deberían ensamblarse con tornillería a las estructuras laterales en la cara del peralte por la parte inferior, los agujeros para dicha tornillería también se realizaron en el taladro con una broca de 53/64 in o 21 mm.

6.6.2. Estructura superior.

Este elemento también es un tramo de canal CPS y solo se hicieron dos perforaciones en donde deben colocarse armellas a las cuales se enganchan los resortes de extensión.

Se marcaron las posiciones de los barrenos y se perforaron en el taladro a un diámetro de 0.25 in. En la (Figura 45) se aprecia la posición de los agujeros.



Figura 45. Estructura superior [Imagen propia].

6.6.3. Molde de compactación.

En la (Figura 46) se muestra el estado en que se pudo conseguir la barra cilíndrica para fabricar el molde. Las dimensiones originales eran 21 cm de alto y un diámetro de 8 cm.



Figura 46. Materia prima para el molde de compactación [Imagen propia].

El maquinado se llevó a cabo en un torno; primero se realizó un refrentado y cilindrado para eliminar las imperfecciones superficiales (Figura 47).



Figura 47. Eliminación de imperfecciones a la materia prima del molde de compactación [Imagen propia].

El siguiente proceso fue perforar la barra hasta generar el diámetro interior de 54.5 mm. Con ayuda de brocas se hizo una perforación de 1 in (25.4 mm) de diámetro (Figura 48).



Figura 48. Perforación del molde con brocas [Imagen propia].

Para llegar al diámetro interior de 54.5 mm, se continuó desbastando el material con una barra de interiores, ya que no se contaba con un tamaño de broca tan grande (Figura 49).

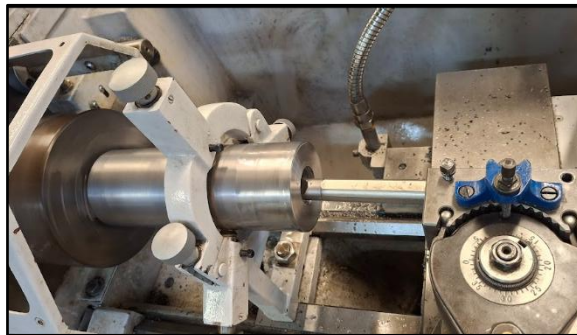


Figura 49. Perforación del molde con barra de interiores [Imagen propia].

Cabe mencionar que a pesar de que el material se consiguió con un diámetro mayor al calculado, no se realizó el cilindrado para llegar a esa medida calculada; pues era un corte de material innecesario y no hacerlo no tenía un efecto negativo en el funcionamiento.

La (Figura 50) muestra el resultado del proceso de mecanizado para fabricar el molde de compactación.



Figura 50. Molde de compactación fabricado [Imagen propia].

6.6.4. Barra de compactación.

La (Figura 51) corresponde al estado en que se consiguió el material para la barra de compactación, con longitud de 30.5 cm, diámetro de 2 ½ in. Se realizó un refrentado para eliminar las imperfecciones en ambas caras de la barra y después se hizo un cilindrado hasta reducir el diámetro de barra a 54.5 mm.



Figura 51. Materia prima para la barra de compactación [Imagen propia].

Esta barra debe ensamblarse a la base del actuador hidráulico; la unión se hará con un tornillo de cabeza hexagonal 1"-14 UNF x 3 ½". El tornillo debe introducirse a la barra de compactación; por lo tanto, se hizo un agujero roscado al centro de una de las caras en la barra.

Este proceso se realizó en el torno utilizando brocas hasta abrir un diámetro de 15/16" y una profundidad de 3 ½". Se continuó introduciendo un machuelo de 1" de 14 hilos por pulgada hasta la misma profundidad (Figura 52).

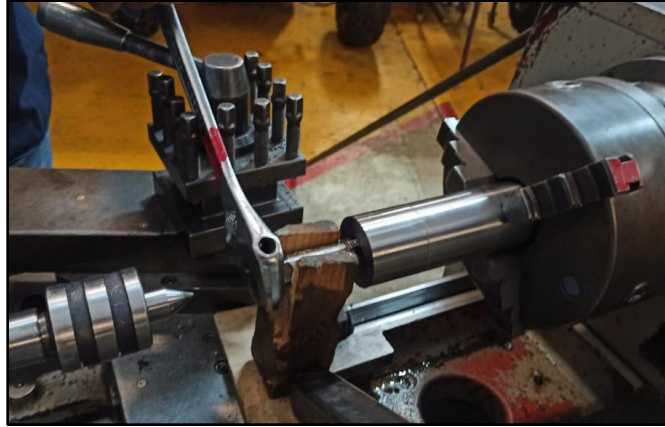


Figura 52. Inserción del machuelo en la barra de compactación [Imagen propia].

La (Figura 53) muestra el resultado final de los procesos aplicados para fabricar la barra de compactación.



Figura 53. Barra de compactación fabricada [Imagen propia].

6.6.5. Base del actuador.

Se trata de otro elemento fabricado por un tramo de canal CPS. El proceso inicial fue el mismo que en la estructura superior, pues también deben colocarse dos armellas para los resortes de extensión.

Sobre esta base se colocará el gato hidráulico, sin embargo, este podría experimentar desplazamientos no deseados a lo largo y ancho del peralte. Para limitar sus grados de libertad se soldaron trozos de ángulo alrededor de la posición del actuador hidráulico como se muestra en la (Figura 54).



Figura 54. Fijación del actuador hidráulico [Imagen propia].

Ya que la base estará en movimiento vertical se deseaba evitar que presente una desviación hacia enfrente o hacia atrás. Por lo tanto, al patín del canal se soldaron cuatro pedazos de metal que se desempeñaran como guía a lo largo del patín de las estructuras laterales y así evitar los desplazamientos indeseados (Figura 55).



Figura 55. Guías para la base del actuador [Imagen propia].

Como se mencionó anteriormente, a esta base debe acoplarse la barra de compactación utilizando un tornillo. Dicho tornillo se centró y soldó en la cara inferior del peralte (Figura 56).



Figura 56. Tornillo de acoplamiento de la barra de compactación [Imagen propia].

6.6.6. Bases de compactación.

Estos dos elementos son los últimos fabricados a partir del canal CPS, se obtuvieron con una longitud de 0.7 m. El único proceso que se les realizó fue la perforación de dos barrenos de 24.2 mm de diámetro; iguales a los hechos en las estructuras laterales ya que en estas bases también deben insertarse los pernos.

El centro de las perforaciones se marcó de acuerdo con la distancia de separación que deberían tener los agujeros de las estructuras laterales al ensamblar la compactadora. Con el taladro de piso y diferentes brocas se perforaron los canales por la parte del peralte hasta llegar al diámetro deseado (Figura 57).



Figura 57. Bases de compactación fabricadas [Imagen propia].

6.6.7. Pernos.

Al igual que el material del molde y la barra de compactación, el material de los dos pernos tenía varias imperfecciones (Figura 58). Por lo tanto, también fue necesario realizar el proceso de refrentado para quitar el material maltratado en las caras de la barra. Las dimensiones originales eran de 25.5 cm de alto y 1-21/64 in de diámetro.



Figura 58. Materia prima para los pernos compactación [Imagen propia].

En el torno también se realizó el proceso de cilindrado para quitar las imperfecciones a lo largo de la barra y llegar hasta el diámetro deseado para los pernos.

Sin embargo, se dejaron aproximadamente 4 cm de longitud en la barra con el diámetro resultante después de eliminar el material maltratado (3 cm), a lo largo de la longitud restante se llegó al diámetro deseado para los pernos.

Ese excedente de material que se dejó en uno de los lados de la barra es para manipular los pernos de forma cómoda al momento de ensamblar o desensamblarlos en la compactadora.

Por último, en el extremo de la barra con el diámetro más pequeño se realizó una perforación con diámetro de 1/4" para introducir un seguro que impida que los pernos se desensamblen de la compactadora (Figura 59).



Figura 59. Perno fabricado [Imagen propia].

6.6.8. Placa de apoyo.

El espesor calculado para la placa fue de 1 ½”, pero solamente fue posible conseguir soleras de ½” de espesor.

Se necesitan tres soleras para llegar al espesor deseado en la placa, sin embargo, estas no se unirán mediante soldadura o tornillería, solo se apilarán una sobre otra con el fin de dar un uso secundario (que se explicará más adelante) a dos de las soleras.

De acuerdo con el funcionamiento de la compactadora, sobre la placa debe colarse el molde de compactación. El problema es que el molde puede desplazarse a lo largo y ancho de la solera. Para evitar estos movimientos se soldaron trozos de ángulo a la solera que fungirá como la superficie superior de la placa. En la (Figura 60) se observa que los ángulos se soldaron alrededor del diámetro exterior del molde marcado en la solera. Esto mantendrá fijo y centrado al molde durante la compactación.



Figura 60. Placa de apoyo fabricada [Imagen propia].

Para evitar que el vástago del gato hidráulico cause daños sobre la estructura superior; se utilizó una cuarta solera de ½” de espesor, la cual se soldó centrada en el peralte de la estructura. Esto con el fin de que el vástago se apoye y ejerza la fuerza sobre la placa y no sobre el peralte del canal CPS, ya que es muy delgado (Figura 61).



Figura 61. Posición de la placa de apoyo secundaria [Imagen propia].

6.6.9. Soportes.

Son cuatro elementos fabricados a partir de ángulo de acero estructural de 4 in x 0.25 in. Estas piezas se consiguieron con las longitudes necesarias, dos tramos de 0.7 m y otros dos de 0.61 m.

Los ángulos más cortos se utilizaron sin hacerles algún proceso extra. Por otro lado, a los tramos de 0.7 m; utilizando el taladro, se les hicieron dos barrenos de 21 mm de diámetro, ambos en el centro de uno de sus lados (Figura 62).



Figura 62. Soportes perforados [Imagen propia].

Los barrenos se realizaron para ensamblar esas dos piezas con las estructuras laterales usando tornillería.

6.6.10. Ensamble.

- Por medio de soldadura se realiza la unión de las estructuras laterales con la estructura superior y los soportes de 0.61 m de largo (Figura 63).



Figura 63. Estructura principal unida por soldadura [Imagen propia].

- Con ayuda de tornillería; ensamblar los soportes perforados con las estructuras laterales (Figura 64).



Figura 64. Ensamble de los soportes [Imagen propia].

- Ensamblar dos armellas de rosca con sus respectivas tuercas en el peralte de la estructura superior, cuidando que queden en el interior de la estructura principal. Realizar lo mismo para ensamblar otras dos armellas, pero ahora en la base del actuador cuidando que estas queden en el exterior del peralte del canal (Figura 65).



Figura 65. Ensamble de las armellas [Imagen propia].

- Con ayuda de los pernos; ensamblar las bases de compactación con las estructuras laterales (una base de compactación por cada lado del “patín” de la estructura lateral), de forma que los pernos atravesarán los orificios que se le hicieron en la parte nombrada como “peralte” a las bases de compactación y los orificios que se le hicieron a la parte nombrada como “patín” a las estructuras laterales (Figura 66).



Figura 66. Ensamble de las bases de compactación [Imagen propia].

- Para asegurar los pernos una vez ensamblados y que no se salgan de los canales, se les van a atravesar unos seguros en “R” entre el orificio que se le realizo a cada perno (Figura 67).

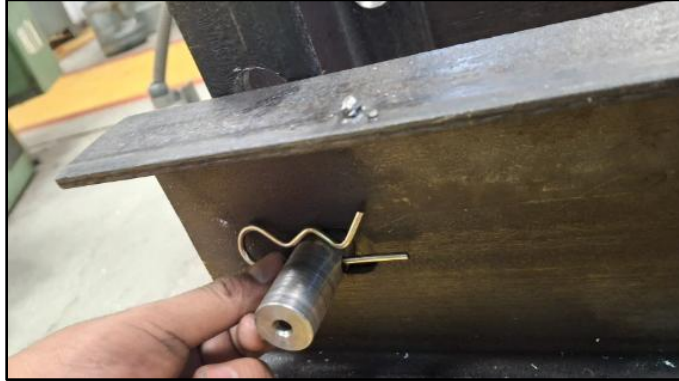


Figura 67. Ensamble de los seguros en R [Imagen propia].

- Con ayuda de los resortes se va a ensamblar la base del actuador, colocando primeramente uno de los ganchos que trae cada resorte en las armellas ensambladas anteriormente en la estructura superior para posteriormente colocar el gancho opuesto del resorte en la armella que se ensambla en la base del actuador (Figura 68).



Figura 68. Ensamble de la base del actuador [Imagen propia].

- Ensamblar la barra de compactación con el tornillo que se soldó en la parte inferior del peralte; enroscando la barra con el tornillo (Figura 69).



Figura 69. Ensamble de la barra de compactación [Imagen propia].

- Posteriormente colocar las soleras sobre las bases de compactación, cuidando que estas queden centradas en la estructura y que la solera a la que se le soldaron pedazos de ángulo quede posicionada arriba de las otras dos soleras para posteriormente colocar el molde de compactación sobre esa última solera (Figura 70).



Figura 70. Ensamble de las soleras [Imagen propia].

- Finalmente posicionar el gato hidráulico de botella sobre la base del actuador (Figura 71).



Figura 71. Ensamble del gato hidráulico [Imagen propia].

6.7. Lavado de viruta.

Concluido el tema del diseño y manufactura de la compactadora es turno de abordar un procedimiento que es necesario realizar antes de llevar a cabo la compactación de viruta.

La viruta que se desea compactar se encuentra bañada en fluido de corte utilizado durante el mecanizado. Eliminar este fluido es indispensable para que la viruta compactada puede ser fundida. En este caso el fluido de corte con el que se tratará es sintético y soluble en agua, con esos datos se establecen los siguientes pasos generales para el lavado de viruta.

- Lavado con solución alcalina o detergente:
- Enjuague con agua
- Filtrado y secado
- Recolección de fluidos

Se realizó una investigación para determinar qué detergente o solución alcalina es mejor para realizar el lavado. Dentro de las opciones del mercado que son de fácil adquisición se encontró que el detergente Simple Green Crystal es un desengrasante multiusos, utilizado principalmente en metales, por lo que es amigable con el aluminio a diferencia de otros químicos que podrían ser abrasivos. Por esas razones este detergente es que se utilizará en el procedimiento de lavado.

A continuación, se describe el procedimiento a seguir en función del detergente elegido.

6.7.1. Materiales.

- Simple Green Crystal



Figura 72. Detergente para el lavado [Imagen propia].

- Recipiente de lavado



Figura 73. Recipiente de acero inoxidable [Imagen propia].

- Agitador



Figura 74. Cuchara de plástico [Imagen propia].

- Colador



Figura 75. Colador de acero inoxidable [Imagen propia].

- Rejilla de drenaje



Figura 76. Rejilla para drenado [Imagen propia].

- Pistola de calor



Figura 77. Pistola de calor [Imagen propia].

6.7.2. Procedimiento de lavado.

- Preparación de la solución de lavado

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, diluir en el recipiente de lavado la cantidad indicada de detergente en agua a temperatura ambiente (Figura 78).



Figura 78. Preparación del detergente con el agua [Imagen propia].

- Inmersión de la viruta

En el recipiente con la solución, sumergir poco a poco la viruta que se desea compactar, cuidando la cantidad de viruta que es posible sumergir sin que se derrame el líquido (Figura 79).



Figura 79. Vaciado de la viruta en la solución preparada [Imagen propia].

- Agitación

Para mejorar la eficiencia del proceso debe realizarse una agitación manual de la solución con la viruta y así remover la mayor cantidad de fluido de corte que sea posible. Realizar la agitación continuamente durante al menos 5 minutos (Figura 80).



Figura 80. Agitación de la viruta dentro de la solución preparada [Imagen propia].

- Enjuague

Con ayuda del colador retirar la viruta de la solución de lavado y dejar escurrir hasta que se haya filtrado la mayor cantidad posible de la solución. Dentro del mismo colador se debe rociar agua a temperatura ambiente hasta que el líquido escurrido se vea libre de los restos del fluido de corte. Finalmente dejar escurrir el agua restante en la viruta (Figura 81).



a) Escurrimiento de la viruta



b) Viruta rociada de agua

Figura 81. Enjuague de la viruta [Imagen propia].

- Secado

La viruta debe colocarse sobre la rejilla de drenado y puede dejarse secar al aire, pero, también es posible acelerar el proceso soplando aire caliente con una pistola de calor. En ambos casos la rejilla servirá para filtrar residuos de agua existentes de la viruta (Figura 82).



Figura 82. Viruta colocada en la rejilla para su secado [Imagen propia].

- Disposición del Agua Residual

La solución de lavado que ya no se pueda reutilizar para eliminar el fluido de corte debe vaciarse en un contenedor para su posterior desecho controlado (Figura 83).



Figura 83. Agua residual desechada [Imagen propia].

6.7.3. Procedimiento de compactación.

- Una vez teniendo las tres soleras colocadas sobre las bases de compactación y que el molde de compactación se encuentra sobre las soleras y todo esté totalmente centrado, lo siguiente es colocar viruta de aluminio (ya lavada con anterioridad) dentro del molde de compactación hasta llenarlo casi por completo (Figura 84).



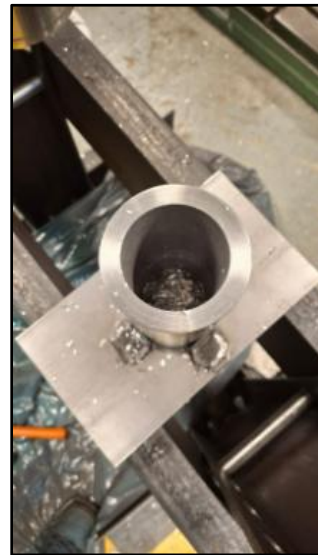
Figura 84. Llenado del molde de compactación con viruta de aluminio [Imagen propia].

- Lo siguiente es activar el gato hidráulico de botella para que el mecanismo baje y la barra de compactación entre dentro del molde de compactación y empiece a comprimir la viruta de aluminio. Aplicar una fuerza de alrededor de 20 toneladas.

Después liberar la presión del gato hidráulico para que el vástago se retraiga y empiece a salir la barra de compactación del molde. A continuación, voltear el vaso y colocarlo sobre la solera nuevamente para realizar el mismo procedimiento de compactación, pero ahora del lado contrario (Figura 85).



a) Mecanismo comprimiendo la viruta de aluminio



b) Viruta compactada

Figura 85. Funcionamiento de compactación [Imagen propia].

- Por último, se extrae la briqueta, para esto debemos quitar la solera que se encuentra hasta la parte de arriba (donde se apoyaba el molde de compactación) y las dos restantes se colocarán sobre las bases de compactación (una a lado de la otra) pero con una ligera separación, la adecuada para que aún se pueda apoyar el molde de compactación entre ambas soleras, el espacio que se le dejó es para que entre esas dos soleras salga la briqueta de aluminio. Se debe activar de nuevo el gato hidráulico para que la barra de compactación entre nuevamente en el molde de compactación y ahora haga la función de expulsar la briqueta por la parte inferior del molde (Figura 86).



Figura 86. Extracción de la briqueta [Imagen propia].

7. Resultados.

7.1. Pruebas de compactación.

Durante la realización de las pruebas, se hicieron exactamente 6 procedimientos de compactación de la viruta, a continuación, se explicarán los más relevantes, las diferencias entre cada uno y los resultados que se obtuvieron por cada procedimiento realizado.

- Se empezó realizando una “compactación por partes”, en la cual consistió llenar el molde de compactación en su totalidad para posteriormente compactar casi por completo la primera tanda de viruta, ya que no se aplicó demasiada fuerza, posteriormente se volvió a rellenar el molde de viruta para realizar una segunda compactación (sin sacar la viruta anterior), esta vez aplicando un poco más de fuerza para que la segunda tanda de viruta se uniera con la primera.

Este procedimiento se replicó hasta tres veces; en la tercera ocasión se aplicó la mayor fuerza de compactación posible para así lograr unir todas las tandas de viruta. Al querer extraer la briqueta nos percatamos que la tanda que se había compactado primero se empezaba a deshacer y se despegaba del resto de la briqueta; al sacar toda la prueba de compactación nos percatamos de que la briqueta se hizo por partes; es decir, salieron 3 trozos de briqueta comprimida, siendo la última parte compactada con la estructura más sólida y la primera resulto ser la menos sólida (Figura 87).



Figura 87. Brique de viruta obtenida de la prueba de compactación por partes [Imagen propia].

Este procedimiento “compactación por partes” se replicó 4 veces más, pero cambiando la fuerza de compactación entre tandas; cabe mencionar que se

volteaba el molde para compactar la briqueta por ambos lados, pero en todas las pruebas dio el mismo resultado, obteniendo así una briqueta en partes separadas.

- En la Figura 88 se puede ver la briqueta que se obtuvo una vez habiendo realizado la compactación de la viruta de aluminio de manera diferente. En esta prueba lo que se hizo fue hacer una sola compactación, es decir, llenar el molde de compactación a su totalidad y compactar toda la viruta con la mayor fuerza posible, dándole también la vuelta al molde de compactación para compactar la briqueta por ambos lados, resultando en una briqueta sólida con dimensiones de 3 cm de altura por 5.5 cm de diámetro.



a) Briqueta de aluminio



b) Dimensión de las briquetas

Figura 88. Briqueta obtenida de las pruebas de compactación [Imagen propia].

7.2. Pruebas de fundición.

En las pruebas de compactación se lograron obtener 3 briquetas sólidas, mismas que se sometieron al proceso de fundición que se describe a continuación.

- Las briquetas se colocaron en el crisol y se encendió el horno a su máxima capacidad (Figura 89).



Figura 89. Inicio del proceso de fundición [Imagen propia].

- Bajo esas condiciones se dejó trabajar el horno durante 30 minutos; tiempo estimado que tarda el horno en empezar a fundir el aluminio. Sin embargo, al revisar el estado de las briquetas se observó que aún estaban sólidas a pesar de su tonalidad rojiza (Figura 90).



Figura 90. Briquetas después de 30 minutos en el horno de fundición [Imagen propia].

- Se registró una temperatura en el crisol superior a los 900 °C (temperatura suficiente para fundir el aluminio), por lo tanto, se tomó la decisión de seguir con el proceso durante 50 minutos más.

- Después de 1 hora con 20 minutos las briquetas seguían sin fundirse, así que se optó por agregar lingotes de aluminio que se fundirían fácilmente y podrían ayudar a fundir las briquetas (Figura 91).



Figura 91. Lingote agregado al crisol [Imagen propia].

- Pasados 30 minutos de haber agregado los lingotes, estos ya se encontraban fundidos en estado líquido. Por otro lado, las briquetas comenzaban a deshacerse, pero aún se encontraban bastante sólidas. A pesar de ello se decidió esperar 15 minutos más para comprobar si transcurrido ese tiempo las briquetas lograban fundirse.
- Transcurridos 15 minutos se observó que las briquetas habían perdido su forma, pero seguían en estado sólido y se convirtieron en escoria (Figura 92). Por tal motivo se sacaron del crisol para poder aprovechar el aluminio líquido de los lingotes que sí era funcional.

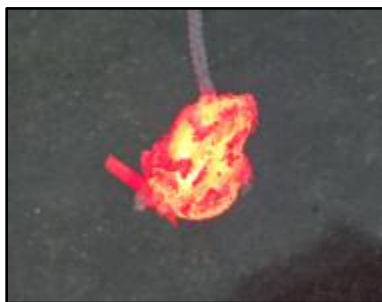


Figura 92. Briqueta convertida en escoria [Imagen propia].

- Después de sacar todos los restos de las briquetas se enfriaron utilizando agua a temperatura ambiente. Cuando el material recupero la tonalidad natural se observó que gran parte de las briquetas se encontraban quemadas (Figura 93).



Figura 93. Briqueta quemada [Imagen propia].

8. Análisis y discusión de resultados.

Respecto a las briquetas se puede decir que una sola compactación es más eficiente que la compactación por partes, pues con la primera se obtuvieron resultados aceptables; sin embargo, es notable que pueden realizarse briquetas mejor compactadas. Para lograrlo será necesario utilizar la mayor capacidad posible del actuador hidráulico, por tal motivo para reducir riesgos de deformación en la estructura de la máquina es necesario reforzarla principalmente en la parte superior. Por otro lado, se notó que es muy importante compactar el material por ambos lados, es decir, volteando el molde como se mencionó en la descripción de las pruebas.

Cabe mencionar que la extracción de las briquetas debe realizarse lentamente para evitar su desmoronamiento, aunque esto ser diferente para briquetas con una mayor compactación.

Contrario a las pruebas de compactación, la prueba de fundición no arrojó los resultados esperados. Como se mencionó en los resultados, las briquetas no lograron fundirse y esto puede deberse a los factores que se mencionan a continuación.

- Es probable que la compactación en la briqueta no haya sido la adecuada, provocando la presencia de capas y espacios entre capas que podrían fungir como disipadores o dispersores del calor.
- Recapitulando el proceso de fundición, es muy probable que no fuera conveniente intentar fundir solo las briquetas seguidas de los lingotes de aluminio.
- Como observación de los técnicos encargados del taller de fundición se piensa que los resultados pueden ser positivos si primero se funden lingotes o pedacería de aluminio y una vez se encuentren en estado líquido agregar las briquetas; con el fin de facilitar su fundición.
- Otro factor pudo ser que las briquetas se sometieron a temperaturas altas (superiores a su temperatura de fundición) durante un periodo prolongado; esto pudo provocar la quema del material como se observa en la (Figura 93). En consecuencia, al agregar los lingotes para ayudar al proceso de fundición, las briquetas se habían convertido en escoria.

Cambiando estos factores se piensa que pueden obtenerse buenos resultados al intentar fundir las briquetas.

9. Conclusiones.

Se logró diseñar y construir una máquina compactadora de viruta de aluminio basada en una prensa hidráulica tipo H. Sus componentes clave fueron validados mediante análisis estructural y simulaciones de elementos finitos, asegurando la funcionalidad de la máquina.

El proceso de lavado implementado resulto ser bastante eficaz para eliminar los restos de fluido de corte impregnado en la viruta. Destacando que no se estropeo el aluminio y tampoco se vieron afectadas sus propiedades; esto ayudó a mejorar la calidad de la briqueta.

Las pruebas demostraron que una compactación única es más efectiva que una compactación por partes. Se evidenció que al compactar la briqueta por ambos lados se logra una mejor compactación en la viruta. Sin embargo, la extracción debe realizarse con precaución para evitar su desmoronamiento, lo que sugiere la necesidad de mejorar el diseño del molde y aumentar la presión de compactación.

Los resultados de las pruebas de fundición no fueron los esperados, ya que las briquetas no lograron fundirse y, en su lugar, se convirtieron en escoria. Esto podría deberse a la presencia de capas de aire dentro de las briquetas, las cuales actúan como disipadores de calor, o a que fueron expuestas a temperaturas demasiado altas durante un tiempo prolongado. Se sugiere modificar el procedimiento de fundición, agregando las briquetas al crisol solo después de que el aluminio en lingotes se haya fundido completamente.

10. Referencias bibliográficas.

- [1] Uriarte, E. (2021). Monográfico: Residuos metálicos de fundición, de <https://www.insertec-store.com/wp/en/wp-content/uploads/sites/2/2021/07/monographic-metal-wastes-from-foundry-enrique-uriarte-insertec.pdf>
- [2] Concha Contreras D., 2005, "Reciclado de rebaba producida por el área de maquinado de una fábrica de partes de aluminio". Tesis de grado licenciatura. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de las Américas Puebla.
- [3] Cruz Moreno R. G. y Santo Remache L. G., 2013, "Diseño de un prototipo de máquina compactadora para la recuperación de viruta de aluminio que se genera en la empresa Corporación Ecuatoriana e Aluminio de la ciudad de Latacunga Cedal S.A.". Tesis de grado licenciatura. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- [4] Zúñiga Acosta D., 2019, "Diseño de máquina compactadora de viruta metálica con capacidad de 20 kg/h para la empresa INGLEBY SAC-Motupe, Lambayeque". Tesis de grado licenciatura. Facultad de Ingeniería Arquitectura y Urbanismo, Universidad Señor de Sipán, Perú.
- [5] Gómez Ríos I., Perdomo González L., Cruz Crespo A., y Quintana Puchol R., 2019, "Alternativa de recuperación de elementos metálicos en residuos sólidos industriales", vol. 46, pp. 35-44.
- [6] CONIEX, sin fecha, de <https://www.coniex.com/>
- [7] Inagensl. (2020, 19 de noviembre). ¿Por qué es importante el reciclaje del aluminio en Barcelona? [Imagen]. Recuperado de <https://inagensl.com/2020/11/19/por-que-es-importante-el-reciclaje-del-aluminio-en-barcelona/>
- [8] Sánchez, C., y Muñoz, E. (2019). Fundamentos de compactación y densificación de materiales metálicos. Ingeniería de Materiales Avanzados, 18(3), 34-48.
- [9] INTI. (2022). Compactación de materiales metálicos: Guía técnica. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Recuperado de <https://www.inti.gov.ar/publicaciones>
- [10] López, A. (2018). Procesos de densificación en metalurgia de polvos. Editorial Científica.
- [11] Instituto Tecnológico de Panamá. (2022, 02 de febrero). Metalurgia de polvos. [Imagen tomada de la diapositiva No. 17]. Recuperado de https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/541/l3_metalurgia_de_povos.pdf
- [12] Ramírez, J., Castro, M., y Fernández, R. (2020). Compactación de virutas metálicas para reciclaje industrial. Revista Latinoamericana de Ingeniería Mecánica, 37(2), 12-25.
- [13] Shen Chong. (2021). Guía definitiva de prensa hidráulica. Recuperado de <https://www.shen-chong.com/es/hydraulic-press-ultimate-guide/>
- [14] Tameson. (s.f.). Gato hidráulico de botella. Recuperado de <https://tameson.es/pages/gato-hidraulico-botella>
- [15] Ríos, J., y Valencia, C. (2021). Propiedades y aplicaciones del acero AISI 4140 en la industria manufacturera. Revista de Ingeniería Industrial, 18(1), 55-63.
- [16] Estrada, P., Martínez, L., y Rojas, A. (2019). Diseño y selección de resortes industriales: Consideraciones prácticas. Revista de Ingeniería Mecánica, 14(2), 45-56.
- [17] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (9.ª ed.). México: McGraw-Hill.

- [18] AENOR. (2020). UNE-EN 692: Máquinas herramienta. Seguridad. Prensas mecánicas. Madrid: AENOR.
- [19] ASME. (2019). ASME B30.1-2019: Safety Standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks, and Slings. New York: ASME International.
- [20] ASME. (2020). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1. New York: ASME International.
- [21] AENOR. (2021). UNE-EN 13445: Recipientes a presión no sometidos a llama. Madrid: AENOR.
- [22] Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2011). NOM-020-STPS-2011: Recipientes sujetos a presión. Ciudad de México: STPS.
- [23] International Organization for Standardization (ISO). (2010). ISO 12100: Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction. Geneva: ISO.
- [24] International Organization for Standardization (ISO). (2015). ISO 13849-1: Safety-related parts of control systems. Geneva: ISO.
- [25] Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (1999). NOM-004-STPS-1999: Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en maquinaria y equipo. Ciudad de México: STPS.
- [26] AENOR. (2020). UNE-EN 13906-1: Cálculo y diseño de muelles. Madrid: AENOR.
- [27] Gere, J. M., y Goodno, B. J. (2021). Mecánica de materiales. Barcelona: McGraw-Hill.
- [28] AENOR. (2019). UNE-EN 693: Máquinas herramienta. Seguridad. Prensas hidráulicas. Madrid: AENOR.
- [29] Zhao, Y., & Ding, W. (2013). Estudio sobre la briquetización de virutas de aluminio y mejora de la calidad. *Advanced Materials Research*, 774, 1009-1013.
- [30] Aceros del Bajío. (s.f.). [Diagrama del perfil CPS]. Aceros del Bajío. Recuperada el 28 de enero de 2025, de <https://www.acerosdelbajio.com/cps>
- [31] Aceromex. (s.f.). [Fotografía de ángulo lados iguales]. Aceromex. Recuperada el 28 de enero de 2025, de <https://aceromex.com/productos/angulo/angulo-lados-iguales/>
- [32] El Gran Tlapalero. (s.f.). [Fotografía de producto, MK083-5]. El Gran Tlapalero. Recuperada el 28 de enero de 2025, de <https://www.elgrantlapalero.com/media/catalog/product/>
- [33] Indu-Res. (s.f.). [Fotografía de resortes de extensión]. Indu-Res. Recuperada el 28 de enero de 2025, de <https://indu-res.com/service/resortes-de-extension/>
- [34] Truper. (s.f.). Gato de botella de 32 toneladas. Truper. Recuperado el 28 de enero de 2025, de https://www.truper.com/ficha_tecnica/Gato-de-botella-32-tons-2333.html?code=14819

11. Entregables comprometidos en la propuesta.

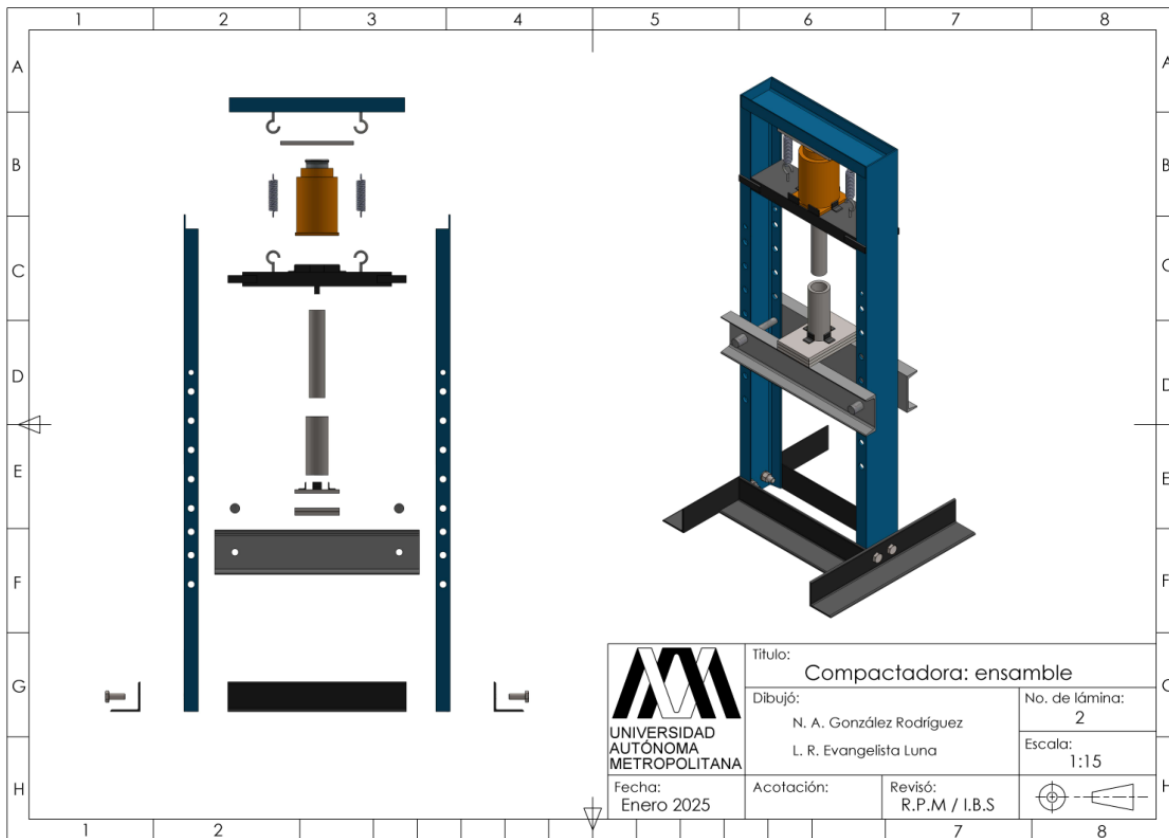
- Máquina funcional compactadora de viruta de aluminio
- Reporte Final del Proyecto de Integración

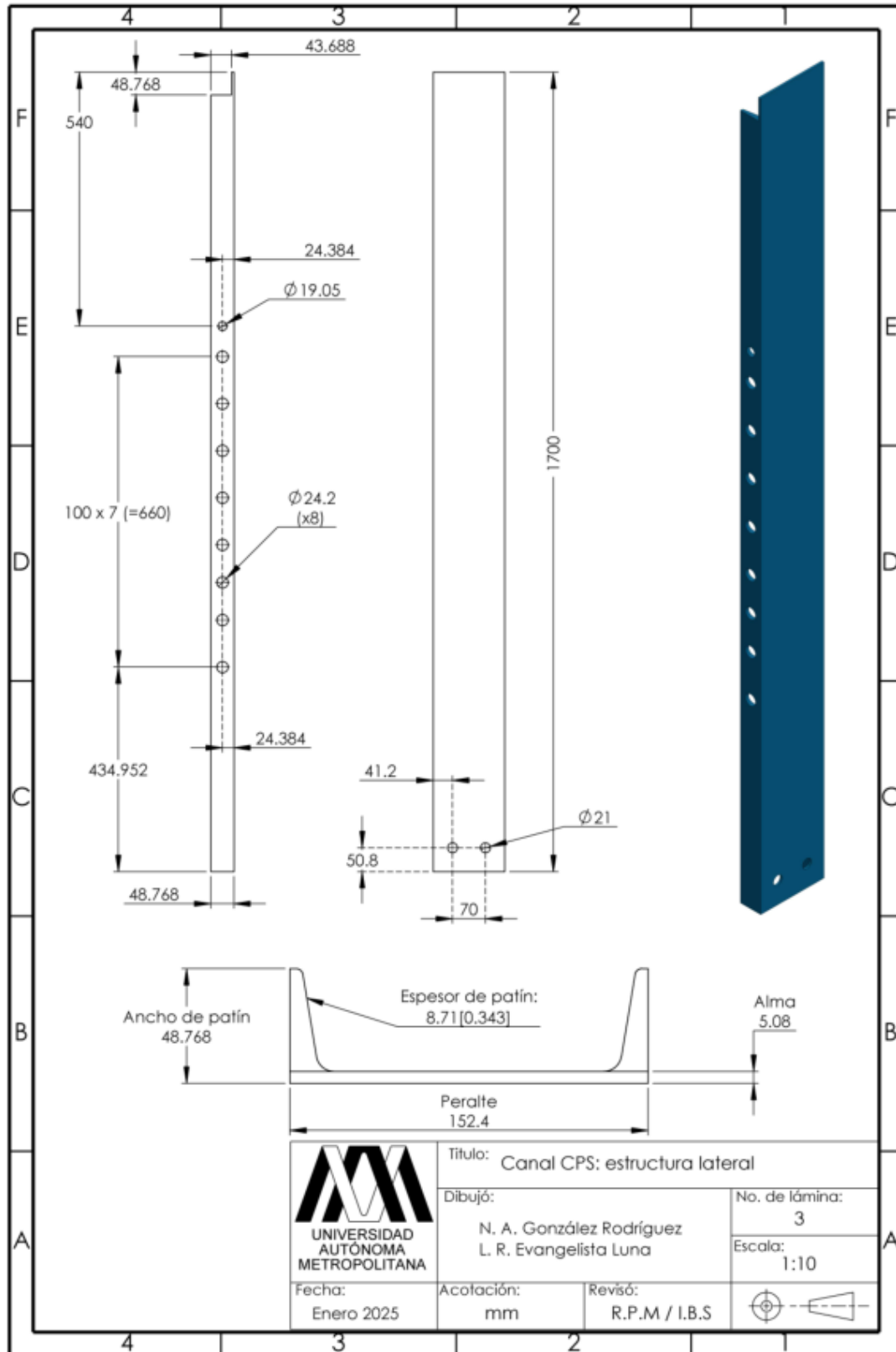
12. Apéndices.

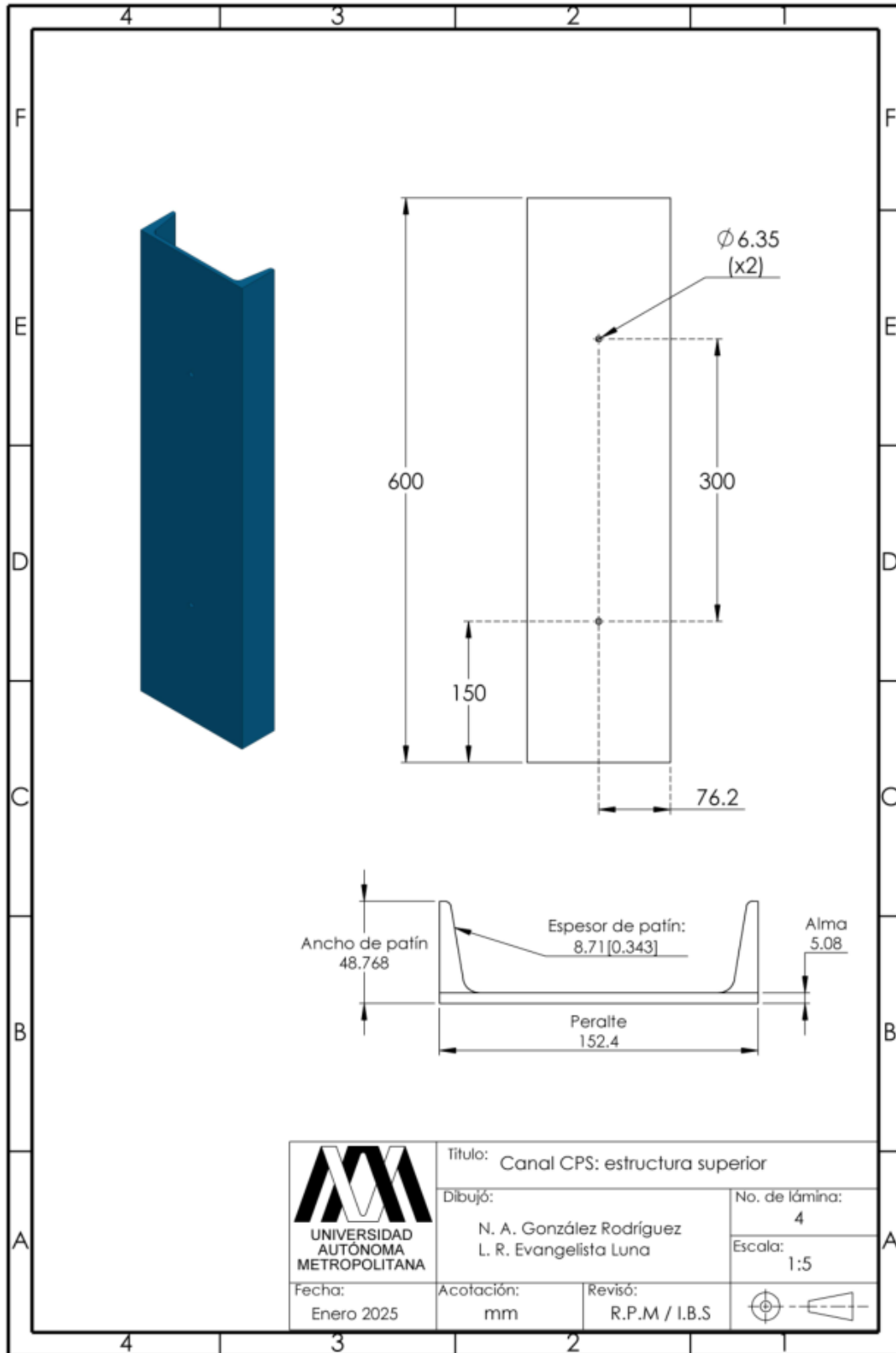
a) Planos.

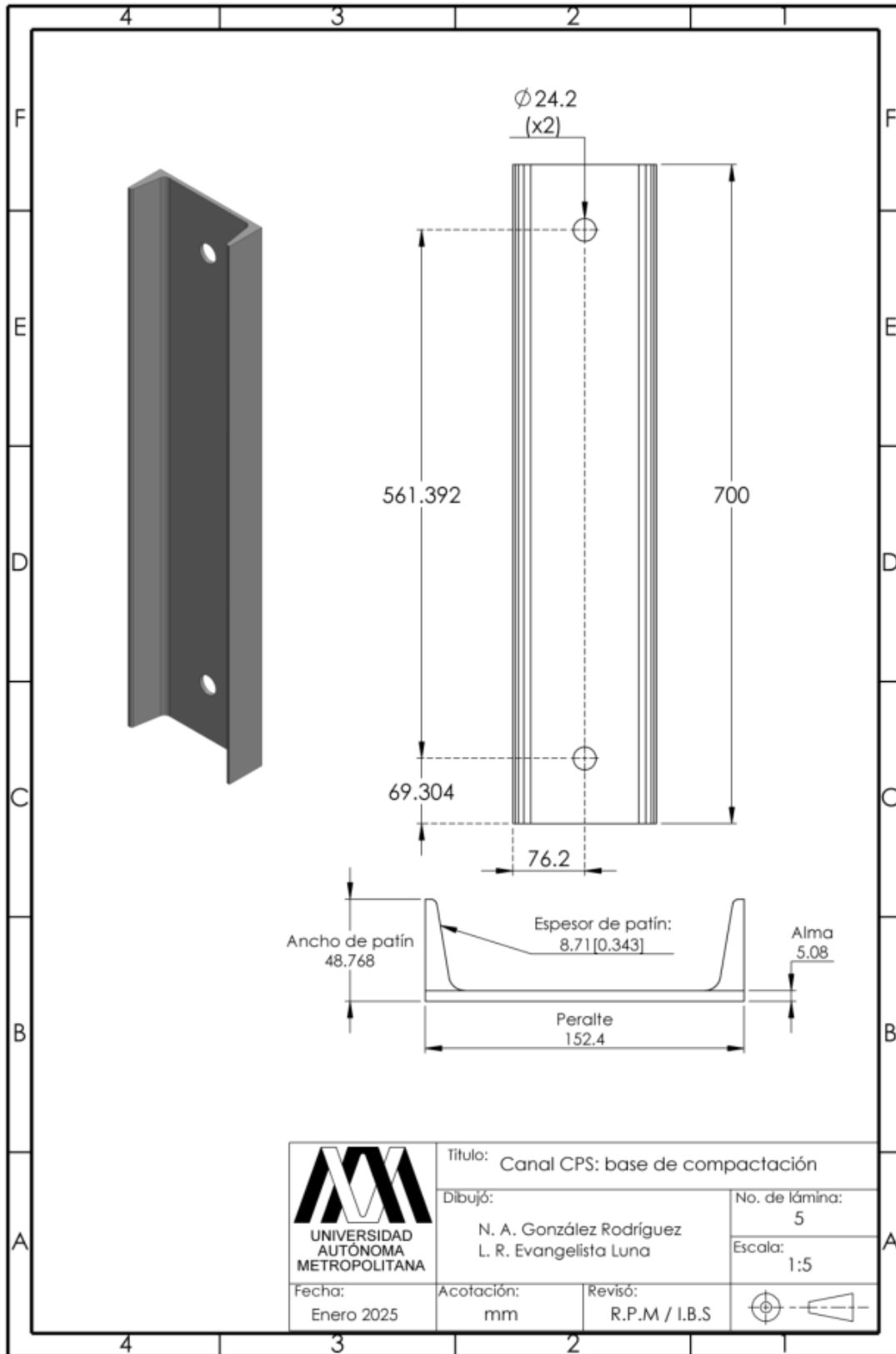
No. de Pieza	Nombre	Cantidad
1	Estructura lateral	2
2	Estructura superior	1
3	Soporte 1	2
4	Soporte 2	2
5	Base de compactación	2
6	Perno	2
7	Placa de apoyo 1	1
8	Base del gato hidráulico	1
9	Barra de compactación	1
10	Gato hidráulico	1
11	Tornillo M20 x 55	4
12	Arandela para tornillo M20	8
13	Tuerca M20 - N	4
14	Placa de apoyo 2	3
15	Fijador	9
16	Molde de compactación	1
17	Armillas de 1/4"	4
18	Resorte de extensión	2

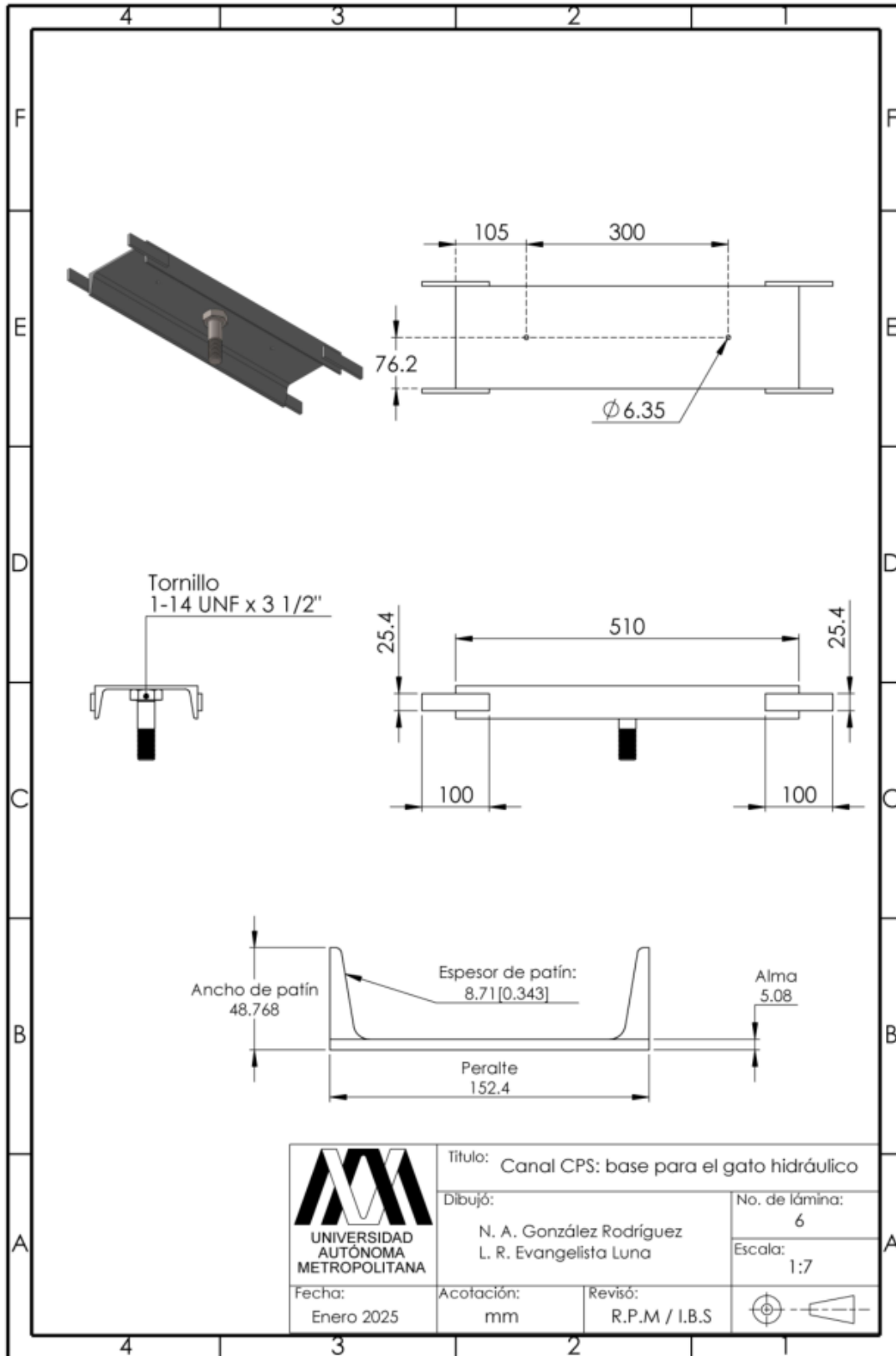
<p>UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA</p>	Título: Compactadora: explosionado	
	Dibujó: N. A. González Rodríguez L. R. Evangelista Luna	No. de lámina: 1
Fecha: Enero 2025	Acotación:	Revisó: R.P.M / I.B.S.
		Escala: 1:15

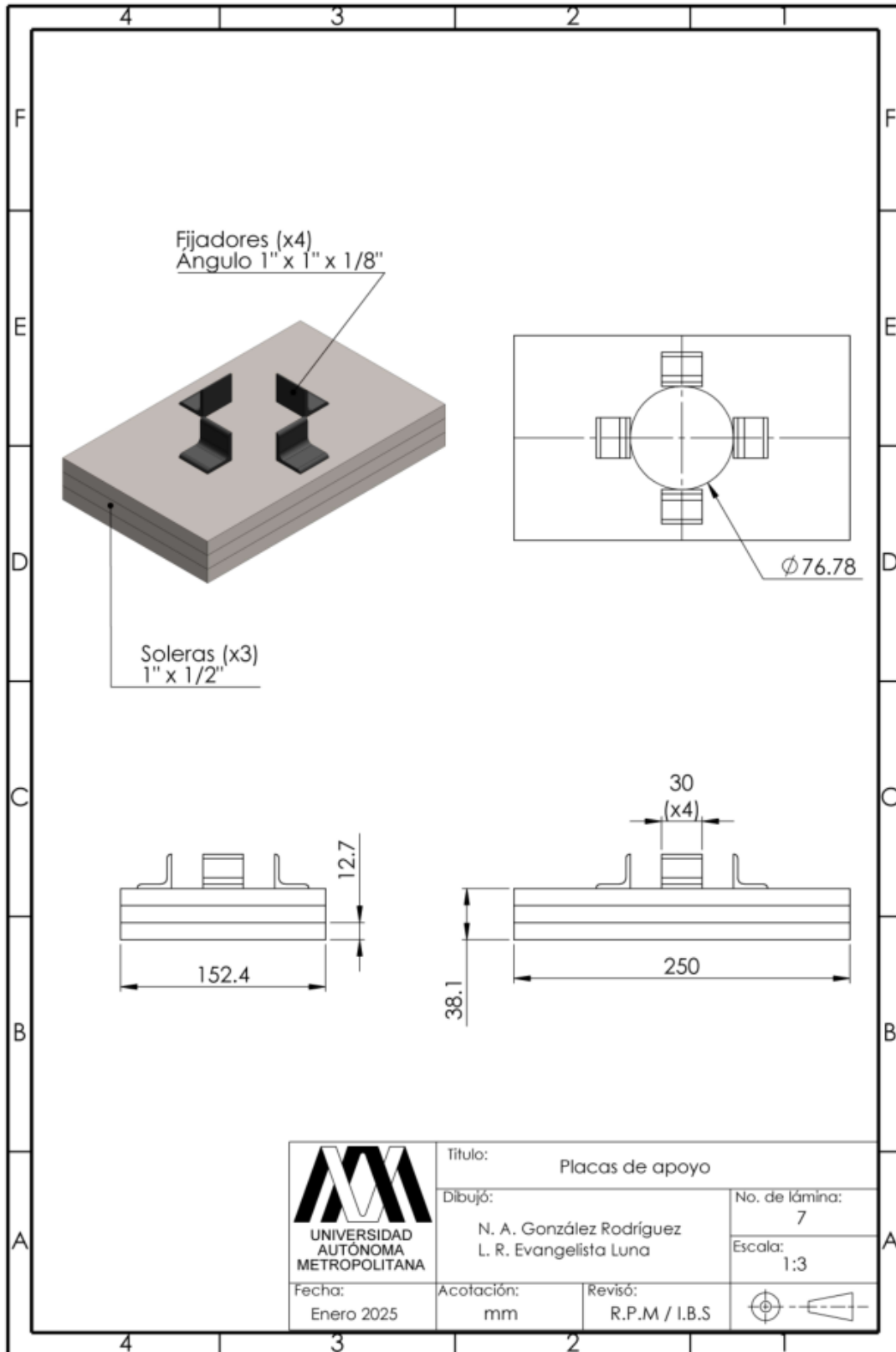


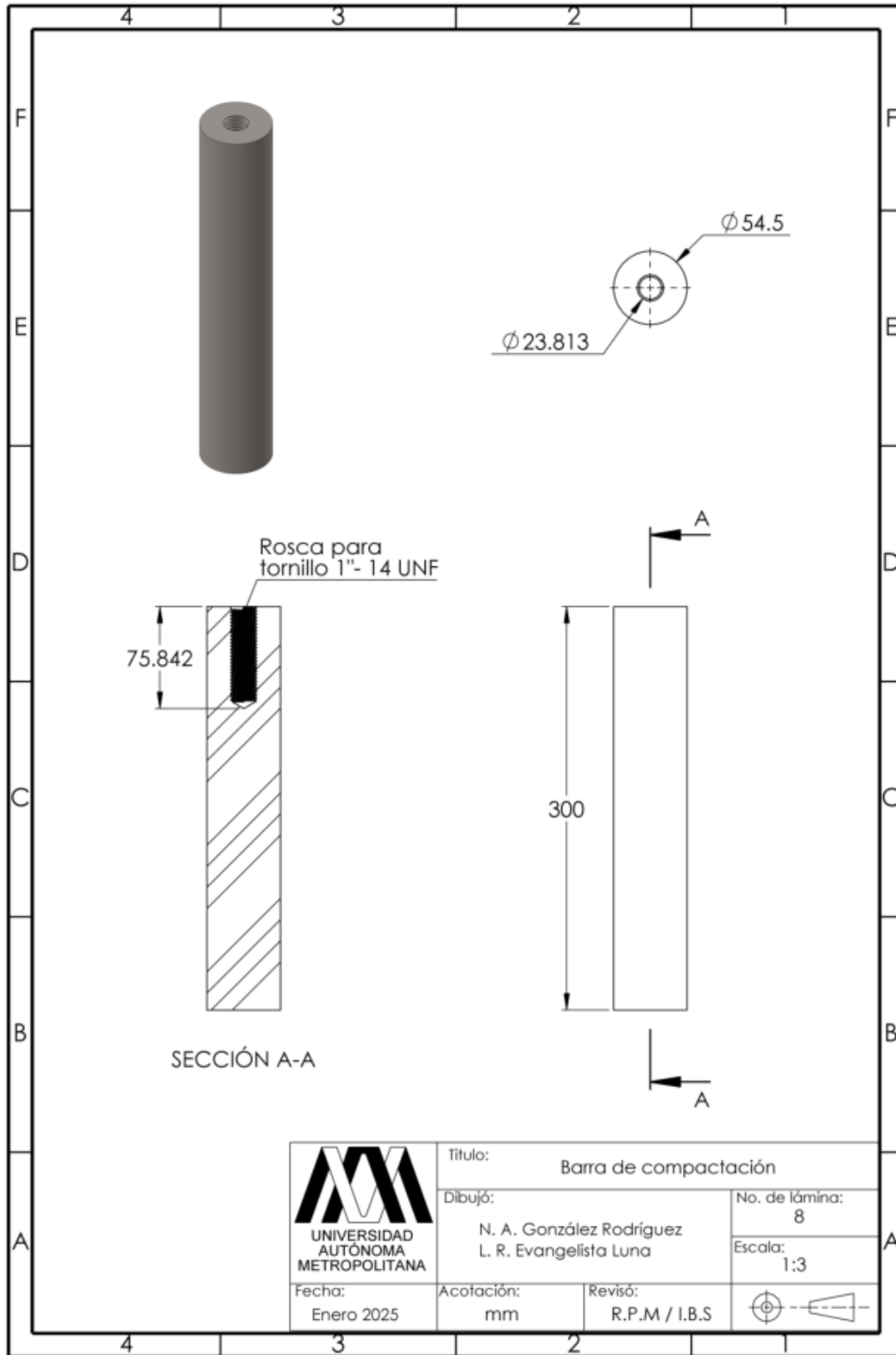


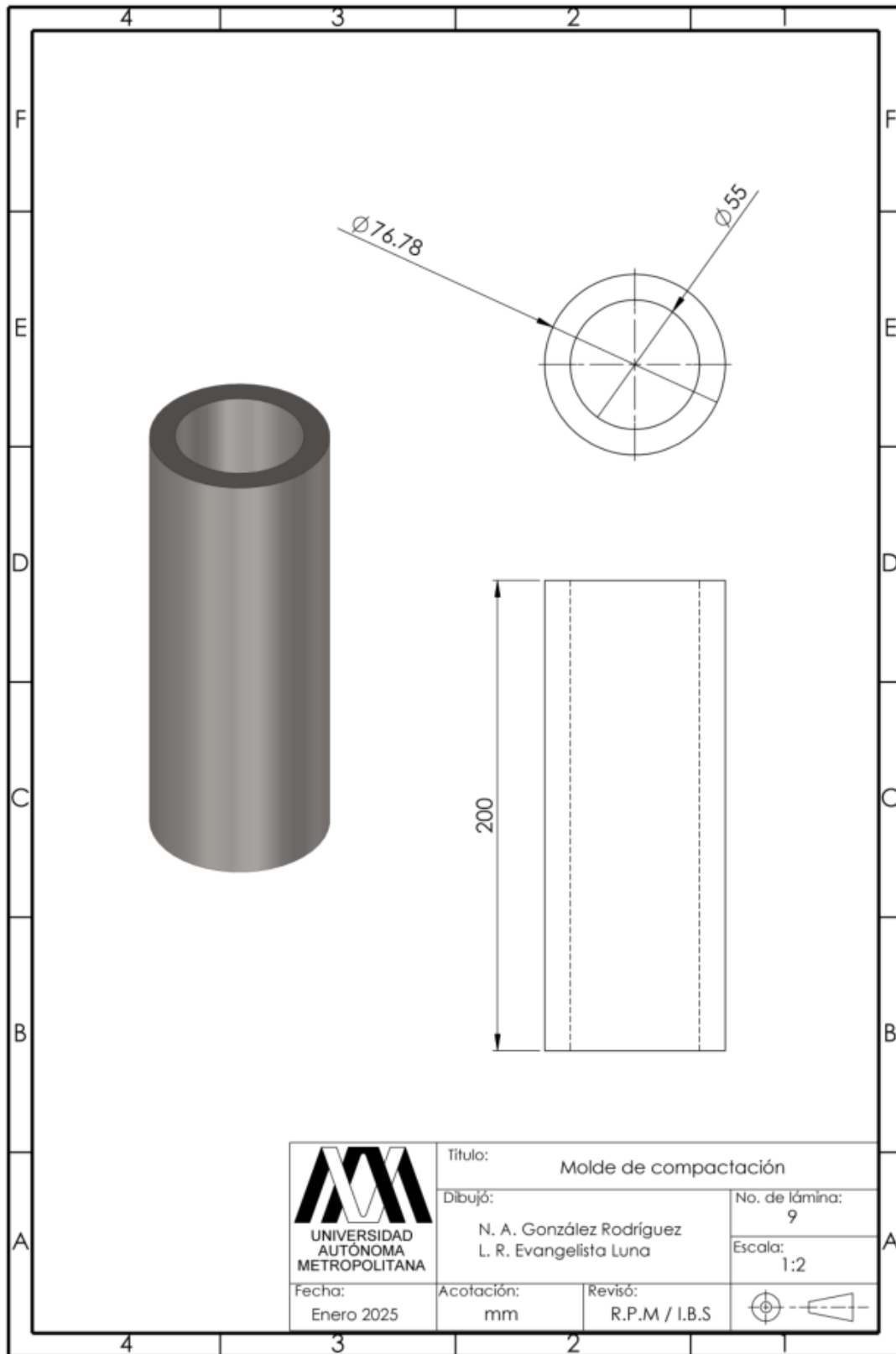


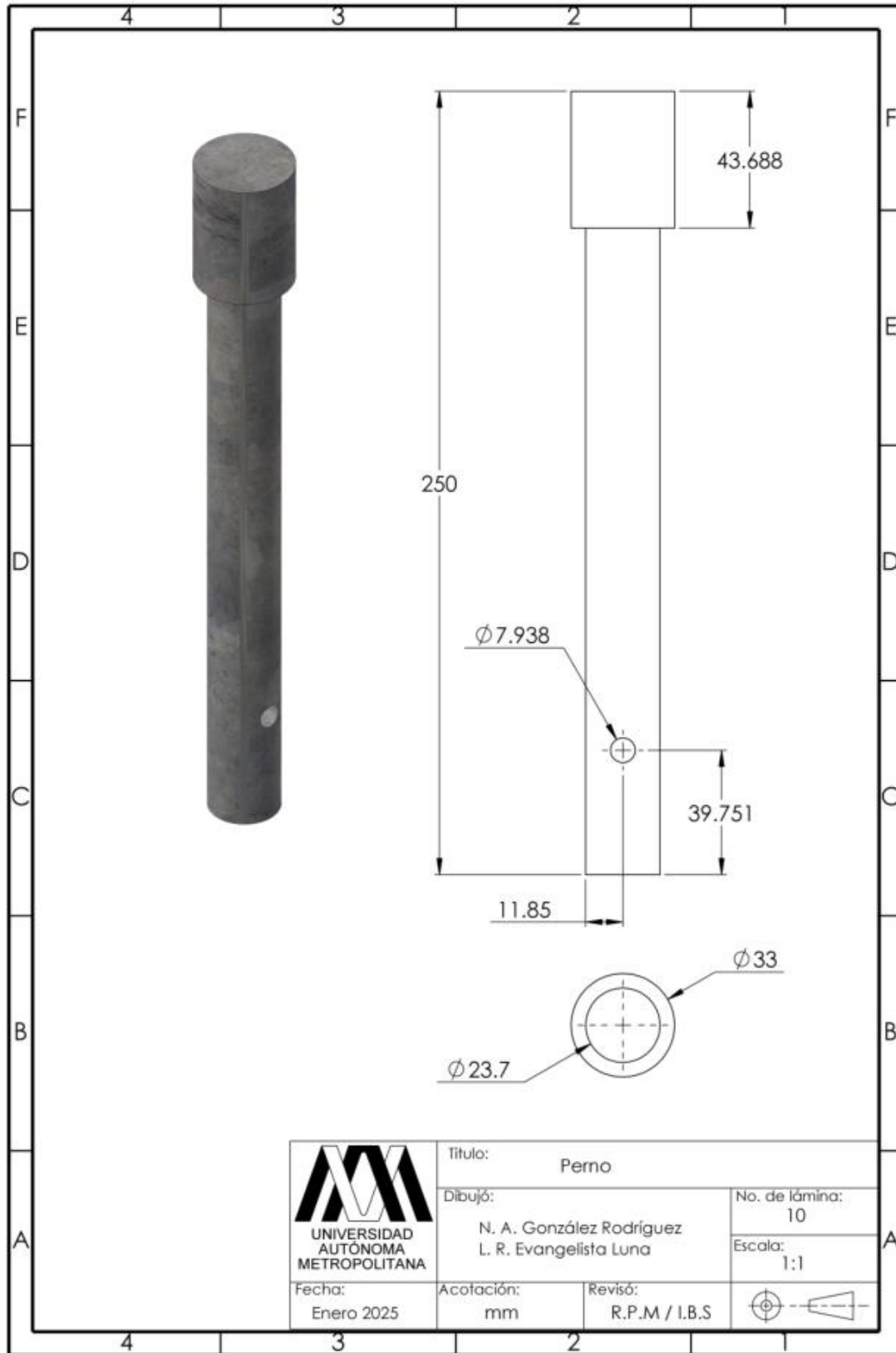


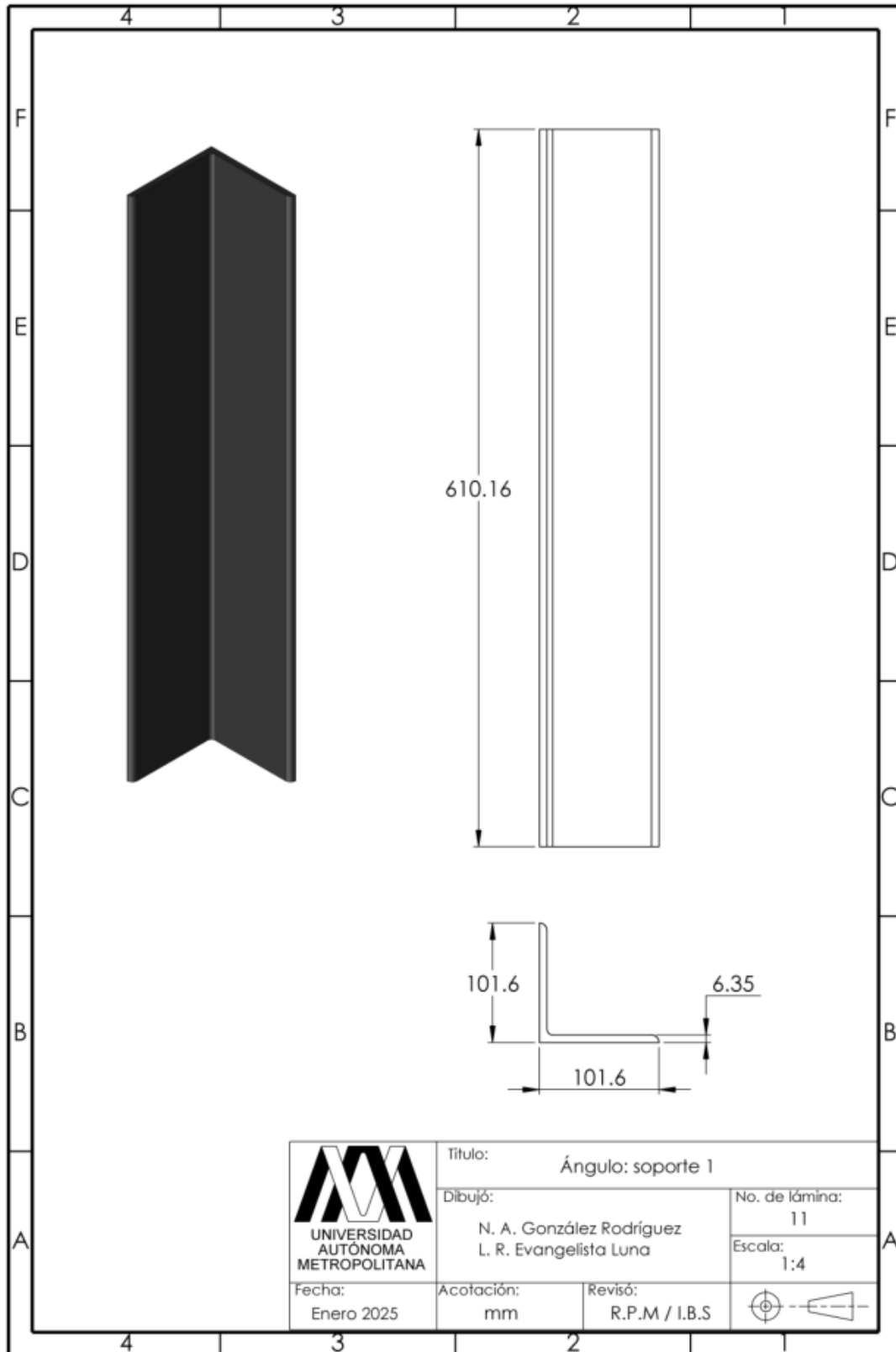


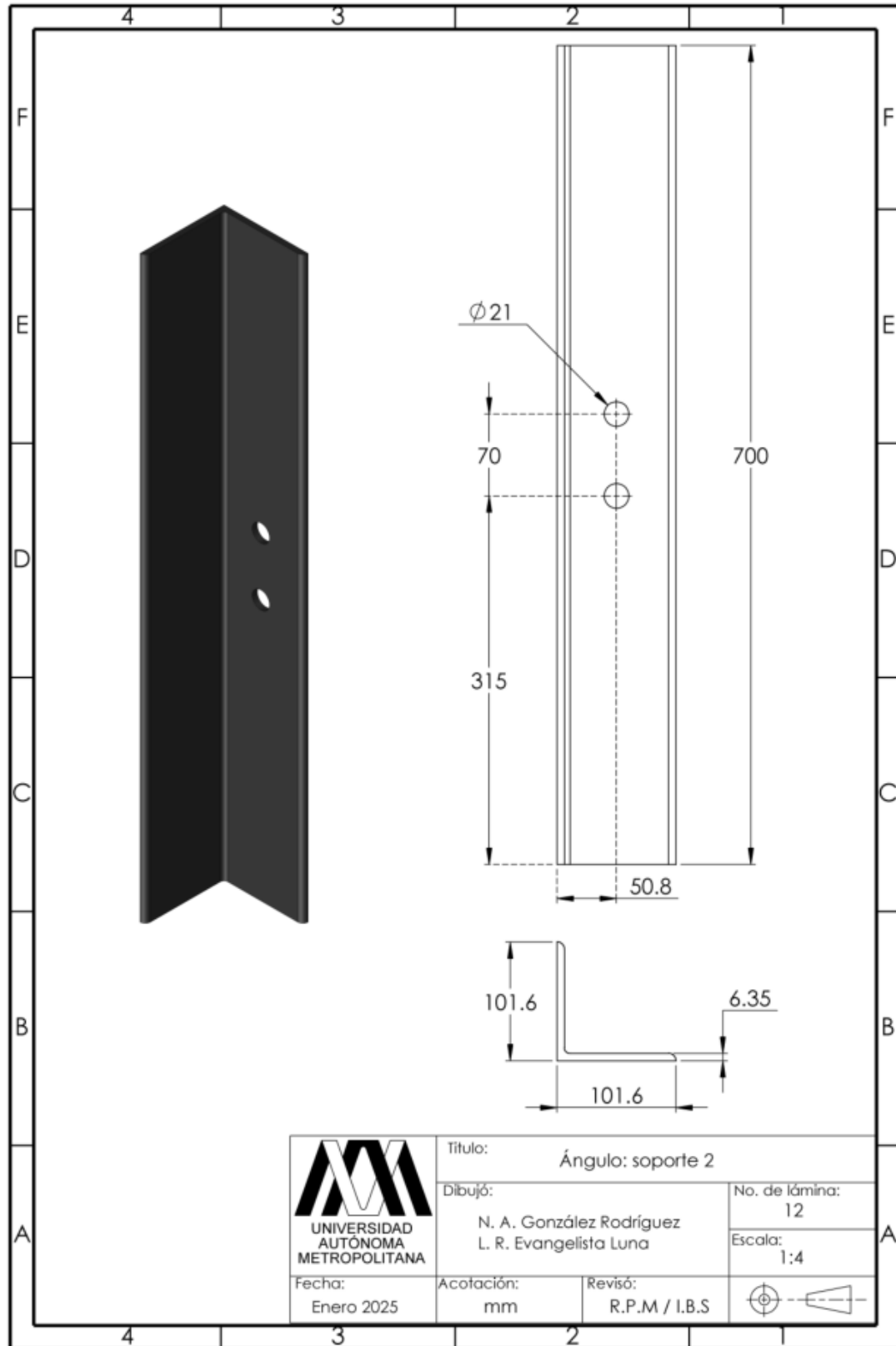












b) Especificaciones del actuador hidráulico.



GATO HIDRÁULICO DE BOTELLA DE 32 TON, TRUPER

TRUPER

CÓDIGO: 14819 CLAVE: GAT-32



CARACTERÍSTICAS

- Cabeza maquinada que reduce el deslizamiento de la carga
- Válvula de liberación de carga
- Práctica asa para transportarlo
- Base de hierro nodular para máxima estabilidad
- Puede utilizarse para empujar elementos de forma horizontal, cuidando que el sistema de bombeo quede hacia abajo



2



Gatos de operación horizontal


ESPECIFICACIONES

Capacidad	32 t
Altura máxima	42.5 cm
Altura mínima	26 cm
Peso	17 kg
Empaque individual	Caja
Inner	1
Pallet	60


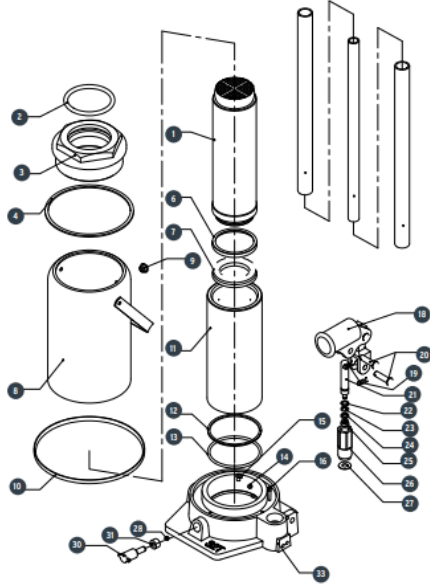
PAÍS DE ORIGEN


Fabricado en China bajo las estrictas especificaciones de GRUPO TRUPER

D.A. © Truper S.A. de C.V. 2025 | Todos los derechos reservados.

Gato hidráulico de botella de 32 Ton, Truper Código: 14819 Clave: GAT-32 

No.	Código	Clave	Descripción
1	921746	R1-GAT-32	Ensamble pistón
2	921747	R2-GAT-32	Junta tórica para tuerca
3	921748	R3-GAT-32	Tuerca superior
4	921749	R4-GAT-32	Sello para tuerca
6	921751	R6-GAT-32	Junta tórica para cabeza de pistón
7	921752	R7-GAT-32	Junta de plástico
8	921753	R8-GAT-32	Depósito gato de botella 32 Ton.
9	921754	R9-GAT-32	Tapón de llenado
10	921755	R10-GAT-32	Junta de hule
11	921756	R11-GAT-32	Cilindro
12	921757	R12-GAT-32	Junta tórica para cilindro
13	921758	R14-GAT-32	Sello para cilindro
14	921759	R14-GAT-32	Balin de acero diam. 6
15	921760	R15-GAT-32	Protector de filtro
16	921761	R16-GAT-32	Filtro
18	921763	R18-GAT-32	Ensamble soporte de palanca
19	921764	R19-GAT-32	Seguros
20	921765	R20-GAT-32	Pernos
21	921766	R21-GAT-32	Pistón
22	921767	R22-GAT-32	Empaque de plástico
23	921768	R23-GAT-32	Empaque de hule
24	921769	R24-GAT-32	Empaque
25	921770	R25-GAT-32	Empaque de sello
26	921771	R26-GAT-32	Bomba de cilindro
27	921807	R28-GAT-50	Arandela de bomba
28	921773	R28-GAT-32	Balin de acero diámetro 8
30	921775	R30-GAT-32	Válvula de liberación
31	921776	R31-GAT-32	Sello para válvula de escape
33	921778	R33-GAT-32	Base
35	954051	R35-GAT-32	Set de empaque para gatos de botellas


 Línea de comunicación directa
 CENTRO DE SERVICIO AUTORIZADO TRUPER
800-018-7873 En México