



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE  
POLVOS PARA COLD SPRAY.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**FERNANDO ANDRÉS ASTUDILLO LANAU**

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
HENRY SALVADOR VALENZUELA  
GABRIEL ARÉVALO GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2021

## **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE POLVOS PARA COLD SPRAY.**

El presente informe da a conocer el trabajo de diseño conceptual, detalle de integridad estructural y desempeño de un equipo de alimentación de polvos metálicos. El alimentador será utilizado en conjunto con otro equipo existente, permitiendo el desarrollo de un proceso de manufactura aditiva, llamado Cold Spray.

Cold Spray es un proceso de deposición de material en estado sólido. Uno de sus principales atractivos de este proceso es que permite realizar recubrimientos en materiales con distintas aleaciones sin necesidad de fundir los materiales involucrados. En los últimos años este proceso de recubrimiento se ha ido desarrollando con el fin de transformarse en un proceso de manufactura aditiva. Para lograr un recubrimiento de material uniforme y libre de imperfecciones, como porosidad o acumulación de material, es necesario un flujo másico continuo y controlado. El flujo másico de material debe ser suministrado por un equipo de alimentación, que, por medio de una correcta configuración en su diseño y operación, suministrara la cantidad adecuada de material para cada tipo de proceso.

Dadas las condiciones de presión y velocidad en un proceso de Cold Spray, se debe procurar contar con un alimentador de polvo que soporte las condiciones de trabajo y desempeño de manera adecuada. En base a lo anterior, se establece el desafío de desarrollar un equipo de alimentación de polvos para ser utilizado en este proceso de manufactura, específicamente para un equipo existente de Cold Spray, que presenta problemas en el mecanismo de alimentación.

Para lograr el objetivo de este trabajo, se definen los parámetros de operación, dirigidos al análisis de materiales y diseño, entre los cuales figura la presión máxima de funcionamiento, flujo másico de polvo, volumen de almacenamiento y granulometría. La metodología de trabajo consistió en una serie de memorias de cálculo para cada subsistema, seguidas del diseño y evaluación numérica de estos, para luego realizar la selección de materiales, componentes con sus respectivos procesos de manufactura y finalmente generar planos de construcción y ensamblaje para el equipo.

El alimentador diseñado poseerá un volumen de almacenamiento variable, de entre 1 y 3 [l] de capacidad. Los polvos utilizados podrán ser de hasta 60 [ $\mu m$ ] de diámetro promedio, y de múltiples materiales metálicos. El equipo sera capas de variar el flujo másico de descarga, por diseño este fluctuara entre 5 y 50 [ $g/min$ ]. Considerando las diferentes velocidades que deben poseer las partículas para lograr un proceso de recubrimiento efectivo, el equipo de Cold Spray debe operar a altas presiones, es por esta razón que el alimentador operara hasta presiones de 500 [ $psi$ ] (3.45 [ $MPa$ ]).



# Agradecimientos

Tantos años de restringir, tabular, evaluar, caracterizar, y aun no logro concebir que tanta emoción pueda ser resumida en un simple agradecimiento, no parece ser un término o concepto que alcance a describir lo mucho que aprecio y valoro a todas las personas que hicieron posible mi llegada a este punto.

Los caminos difíciles a menudo conducen a lugares maravillosos, siendo una persona que disfruta el explorar y conocer las diversas bellezas que la naturaleza tiene para ofrecer, puedo reconocer que esta experiencia ha sido del mismo impacto, he incluso más difícil de recorrer. Estoy agradecido de los altos y bajos, los momentos de alegría, los momentos de tristeza, lo sencillo y lo difícil, lo que he disfrutado y lo que me ha dolido, todo me ha aportado y todo me ha hecho crecer, como persona y como profesional.

Agradezco a mi familia, hermanos, madres, padres, y amigos. Suponen los cimientos de mi desarrollo, todos y cada uno de ustedes, han destinado tiempo y esfuerzo para enseñarme nuevas cosas, brindarme aportes invaluable que servirán para toda mi vida.

Agradezco a quienes me apoyaron y incentivaron a realizar cambios en mi vida y trabajo, cambios que trajeron confianza, motivación y felicidad a mi diario vivir. A quienes me acompañaron en no solo los momentos más difíciles, sino que también celebraron los hitos de mi trabajo universitario, que si bien no se valorar, destacaron la gran importancia que traerán a mi vida.

Te agradezco a tí, por recordarme que la felicidad puede ser un estado constante, por ayudarme en esta compleja etapa, por escucharme con cada uno de mis problemas y por quererme como soy.

Agradezco a mis profesores, que cada día me inspiran y motivan. Me muestran quien aspiro a ser, me muestran el camino correcto hacia una labor bien hecha, me cuestionan y felicitan, me enseñan lo que significa ser una buena persona y profesional.

La educación no es preparación para la vida, la educación es la vida en sí misma. Lo que más he disfrutado en estos años ha sido aprender, enseñar, equivocarme y levantarme. Mi objetivo en la vida es seguir educándome y aprendiendo, no solo en la vida profesional, sino que también en mi vida personal. Esta es solo una etapa, de un largo camino que me queda por recorrer, y que sé que, no recorreré solo.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivo General . . . . .	3
1.3. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.4. Alcances . . . . .	3
<b>2. Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.1. Cold Spray . . . . .	4
2.1.1. Velocidad crítica y presión en Cold Spray . . . . .	5
2.2. Alimentadores de polvos . . . . .	6
2.2.1. Polvos y granulometría . . . . .	8
2.3. Sistemas comerciales y académicos . . . . .	10
2.3.1. Sistemas comerciales . . . . .	10
2.3.2. Sistemas académicos . . . . .	10
2.4. Perfiles de flujo: Flujo másico y central . . . . .	12
2.5. Problemas de flujo . . . . .	14
<b>3. Metodología</b>	<b>16</b>
3.1. Parámetros de diseño . . . . .	16
3.2. Memoria de cálculo . . . . .	17
3.3. Diseño y evaluación del equipo . . . . .	17
3.4. Selección de componentes y procesos de manufactura . . . . .	17
3.5. Planos, cotizaciones y cubicaciones . . . . .	17
<b>4. Memorias de cálculo</b>	<b>19</b>
4.1. Cálculo de tolva de alimentación . . . . .	20
4.1.1. Función de flujo de polvos $\sigma_c(\sigma_1)$ . . . . .	21
4.1.2. Fricción con ángulo de muralla ( $\phi_w$ ) . . . . .	23
4.1.3. Ángulo estático efectivo de fricción interna ( $\delta$ ) . . . . .	23
4.1.4. Cálculo de ángulo de descarga $\Theta$ para flujo másico . . . . .	24
4.1.5. Cálculo del factor de flujo $ff$ . . . . .	25
4.1.6. Cálculo de esfuerzos de fluencia sin confinamiento $\sigma_{c,crit}$ y de consolidación $\sigma_{1,crit}$ críticos. . . . .	27
4.1.7. Cálculo de diámetro de descarga crítico $d_{crit}$ y $D_{crit}$ . . . . .	29
4.2. Cálculo de tornillo alimentador . . . . .	31
4.2.1. Selección de tornillo alimentador . . . . .	31
4.2.1.1. Rendimientos másicos $R_m$ y volumétricos $R_v$ . . . . .	32
4.2.1.2. Cálculo de despeje radial $c$ . . . . .	36

4.2.2.	Cálculo de torque . . . . .	43
4.2.2.1.	Fuerza axial en superficie de corte superior $F_{ua}$ . . . . .	44
4.2.2.2.	Fuerza axial en superficie de eje central $F_{ca}$ . . . . .	45
4.2.2.3.	Fuerza axial en superficie de corte superior $F_{la}$ . . . . .	46
4.2.2.4.	Fuerza axial en superficie de la camisa $F_{ta}$ . . . . .	46
4.2.2.5.	Fuerza axial en superficie de corte superior $F_{da}$ . . . . .	47
4.3.	Cálculo de uniones empernadas . . . . .	49
4.3.1.	Dimensiones del hilo . . . . .	49
4.3.2.	Precarga del sistema . . . . .	49
4.3.2.1.	Valores de precarga . . . . .	50
4.3.2.2.	Obtención del torque de precarga . . . . .	50
4.3.3.	Rigidez de la unión . . . . .	51
4.3.3.1.	Rigidez del perno . . . . .	52
4.3.3.2.	Rigidez de la empuñadura . . . . .	53
4.3.4.	Carga del perno y carga aplicada . . . . .	54
4.3.4.1.	Fuerzas en el perno . . . . .	55
4.3.4.2.	Esfuerzos en el perno . . . . .	55
4.3.5.	Evaluación de pernos . . . . .	56
4.3.5.1.	Evaluación de perno superior (Perno 1) . . . . .	58
4.3.5.2.	Evaluación de perno intermedio (Perno 2) . . . . .	60
4.3.5.3.	Evaluación de perno de unión (Perno 3) . . . . .	62
4.3.5.4.	Evaluación de perno de tapa tornillo (Perno 4) . . . . .	63
4.4.	Evaluación de recipientes presurizados, método de cálculo por (ASME Sección II & VIII, Div 1) . . . . .	65
4.4.1.	Selección de materiales . . . . .	65
4.4.2.	Diseño de carcasa . . . . .	66
4.4.3.	Diseño de tapas . . . . .	68
4.4.4.	Evaluación de estructura . . . . .	68
4.4.4.1.	Tolva de alimentación . . . . .	69
4.4.4.2.	Tornillo alimentador . . . . .	72
4.5.	Evaluación de transporte neumático por método de Stokes . . . . .	74
<b>5.</b>	<b>Diseño y validación del equipo</b> . . . . .	<b>76</b>
5.1.	Componentes mecánicos . . . . .	77
5.1.1.	Tolva de alimentación . . . . .	77
5.1.1.1.	Tapa superior de acceso: . . . . .	78
5.1.1.2.	Cilindro de almacenamiento . . . . .	79
5.1.1.3.	Cono de descarga . . . . .	81
5.1.2.	Anillos para conexión de pivote . . . . .	83
5.1.3.	Eje de fijación . . . . .	85
5.1.4.	Conexiones de seguridad . . . . .	86
5.1.5.	Tornillo alimentador . . . . .	87
5.1.5.1.	Camisa principal . . . . .	87
5.1.6.	Tapa frontal de tornillo y tornillo alimentador . . . . .	89
5.1.7.	Evaluación numérica del tornillo alimentador . . . . .	90
5.1.8.	Sistema de movimiento y acople de stepper . . . . .	91
5.1.9.	Estructura de soporte . . . . .	91

5.2. Componentes electrónicos . . . . .	94
5.2.1. Sistema de control stepper y celda de carga . . . . .	94
<b>6. Selección de componentes</b>	<b>99</b>
6.1. Componentes electrónicos . . . . .	99
6.1.1. Motor paso a paso y drivers . . . . .	99
6.1.2. Celda de carga y amplificador . . . . .	101
6.1.3. Controlador . . . . .	101
6.2. Conexiones y sellos de gas . . . . .	101
6.2.1. Racor de alta presión . . . . .	102
6.2.2. Tee de alta presión . . . . .	102
6.2.3. Válvula de alivio . . . . .	103
6.2.4. Manómetro . . . . .	103
6.2.5. Sellos con o-ring . . . . .	104
6.2.6. Sellos rotatorios para tornillo . . . . .	106
<b>7. Procedimiento de utilización</b>	<b>108</b>
<b>8. Conclusión</b>	<b>110</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>112</b>
8.1. Anexos . . . . .	116
8.1.1. Cotizaciones . . . . .	117
8.1.2. Planos . . . . .	129

# Índice de Tablas

2.1.	Tabla de comparación para alimentadores de polvo comerciales [6]. . . . .	10
3.1.	Parámetros de diseño del equipo . . . . .	16
4.1.	Dimensiones del hilo (interno y externo) . . . . .	49
4.2.	Dimensiones exteriores de hilo . . . . .	49
4.3.	Dimensiones interiores de hilo . . . . .	49
4.4.	Áreas exteriores de hilo . . . . .	49
4.5.	Factor $K_T$ para varias condiciones de un perno . . . . .	51
4.6.	Cargas para uniones separadas y no separadas . . . . .	55
4.7.	Esfuerzos en el perno . . . . .	56
4.8.	Especificaciones de pernos superiores, conexión tapa y cilindro principal . . . .	57
4.9.	Especificaciones de pernos intermedios, conexión cilindro principal y cono de descarga . . . . .	57
4.10.	Especificaciones de pernos de unión, conexión entre cono de descarga y tornillo alimentador . . . . .	58
4.11.	Especificaciones de pernos de tapa para tornillo alimentador . . . . .	58
4.12.	Composición química del acero inoxidable AISI 304L . . . . .	65
4.13.	Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304L . . . . .	66
4.14.	Propiedades del nitrógeno . . . . .	74
5.1.	Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304 [13] . . . . .	78
5.2.	Resultados de simulación para tapa superior de acceso . . . . .	79
5.3.	Resultados de simulación para cilindro de almacenamiento. . . . .	81
5.4.	Resultados de la simulación para el cono de descarga. . . . .	82
5.5.	Propiedades mecánicas acero al carbono ASTM A36 . . . . .	84
5.6.	Resultados de simulación para anillo de conexión. . . . .	85
5.7.	Resultados de simulación eje de fijación. . . . .	86
5.8.	Resultados de la simulación de esfuerzo para el conjunto. . . . .	90
6.1.	Propiedades físicas del nitrógeno diatómico [29] . . . . .	102

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Diagrama de eficiencia de deposición en función de la velocidad de la partícula [2].	5
2.2.	Diagrama de sistema de Cold Spray de alta y baja presión [2]. . . . .	6
2.3.	Sistemas de alimentación volumétricos y gravimétricos [3]. . . . .	7
2.4.	Beneficios de cada sistema de alimentación.[4]. . . . .	8
2.5.	Valores característicos para distribución de tamaños de partículas en polvos metálicos [5]. . . . .	9
2.6.	Morfología de polvos metálicos obtenida por microscopia electrónica [5]. . . . .	9
2.7.	Diagrama de operación y modelo final construido.[7] . . . . .	11
2.8.	Diagrama de los componentes internos del alimentador.[8] . . . . .	11
2.9.	Perfiles de flujo: a. flujo másico; b. flujo central con estancamiento de material en el nivel de llenado (flujo de tubería); c. flujo central con estancamiento de material en el nivel inferior (flujo mixto); d. flujo central con zona de flujo excéntrica (flujo excéntrico) [9]. . . . .	13
2.10.	Distribución de velocidades [9]. . . . .	14
2.11.	Problemáticas de flujo: a. arqueo debido al enclavamiento y acuñaamiento de sólidos a granel de grano grueso; b. arqueado debido a la fuerza cohesiva de un sólido a granel; c. ratholing (tuberías) [9]. . . . .	15
3.1.	Metodología general para el trabajo de título. . . . .	16
4.1.	Sistema de alimentación de polvo simplificado. . . . .	19
4.2.	Celda de corte de Jenike[11] . . . . .	20
4.3.	Gráfico de esfuerzo normal $\sigma$ y corte $\tau$ , obtenido de ensayo Jenike [11] . . . . .	21
4.4.	Funciones de flujo para múltiples polvos.[12] . . . . .	22
4.5.	Ángulos de fricción interno para múltiples polvos.[9] . . . . .	24
4.6.	Diagrama de flujo central y másico para tolva cónica. $\phi_e$ : ángulo estático efectivo de fricción interna, $\phi_x$ : ángulo de fricción de muralla [9] . . . . .	25
4.7.	Factor de flujo, $ff$ , para tolvas cónicas y $\phi_e=40^\circ$ . [13] . . . . .	26
4.8.	Factor de flujo, $ff$ , en función del ángulo de fricción de muralla [14]. . . . .	27
4.9.	Función de flujo $\sigma_c$ , función de factor de flujo $\sigma'_1$ y función de flujo temporal $\sigma_{ct}$ [16]. . . . .	28
4.10.	Función $H(\Theta)$ [16]. . . . .	29
4.11.	Función $f(\phi_i)$ [16]. . . . .	30
4.12.	Rendimiento másico $c/r$ al diámetro del tornillo, entre 1 y 50 [mm]. . . . .	34
4.13.	Rendimiento másico $c/r$ al diámetro del tornillo, entre 1 y 15 [mm]. . . . .	34
4.14.	Velocidad angular con respecto al diámetro del tornillo para obtener 5[g/min].	35
4.15.	Velocidad angular con respecto al diámetro del tornillo para obtener 50[g/min].	35
4.16.	Curva de desempeño de torque con respecto a la velocidad angular [23]. . . . .	36
4.17.	Esfuerzos generados en la parte inferior de la camisa [19]. . . . .	37

4.18.	Ubicación del polvo dentro de un paso. (a) Cinco superficies de contacto; (b) Dos regiones básicas [19]. . . . .	38
4.19.	Esfuerzo axial con respecto al despeje radial. . . . .	40
4.20.	Esfuerzo radial con respecto al despeje radial. . . . .	40
4.21.	Esfuerzo de corte con respecto al despeje radial . . . . .	41
4.22.	Capa de material estático en la camisa [19]. . . . .	41
4.23.	Volumen estático de polvo con respecto al despeje radial. . . . .	42
4.24.	Tiempo de respuesta con respecto al despeje radial. . . . .	43
4.25.	Diagrama de aplicación de fuerza axial $F_{ua}$ [19]. . . . .	44
4.26.	Diagrama de aplicación de fuerza axial $F_{ca}$ [19]. . . . .	45
4.27.	Diagrama de aplicación de fuerza axial $F_{la}$ [19]. . . . .	46
4.28.	Esfuerzo axial con respecto al despeje radial [19] . . . . .	47
4.29.	Torque requerido con respecto al diámetro de tornillo. . . . .	48
4.30.	Torque requerido con respecto al despeje radial de la camisa. . . . .	48
4.31.	Analogía de conjunto de resortes. . . . .	52
4.32.	Diagrama para conos de presión. . . . .	53
4.33.	Diagrama de carga en el perno. . . . .	54
4.34.	Esfuerzos cónicos circunferenciales y radiales [42] . . . . .	68
4.35.	Esfuerzos axiales y circunferenciales en el cilindro . . . . .	69
4.36.	Factor de seguridad para esfuerzos axiales y circunferenciales en el cilindro . . . . .	69
4.37.	Esfuerzos axiales y circunferenciales en el cono . . . . .	70
4.38.	Factor de seguridad para esfuerzos axiales y circunferenciales en el cono . . . . .	71
4.39.	Esfuerzos axiales y circunferenciales en la camisa del tornillo . . . . .	72
4.40.	Factor de seguridad para esfuerzos axiales y circunferenciales en la camisa del tornillo . . . . .	73
5.1.	Diseño general del equipo. . . . .	76
5.2.	Tolva de alimentación con <i>spool</i> . . . . .	77
5.3.	Tapa de acceso superior. . . . .	78
5.4.	Unión con abrazadera de alta presión o pernos. . . . .	78
5.5.	Resultados de simulación para tapa superior de acceso. . . . .	79
5.6.	Cilindro de almacenamiento. . . . .	80
5.7.	Cilindro de almacenamiento modular para incrementar volumen. . . . .	80
5.8.	Resultados de simulación para cilindro de almacenamiento. . . . .	81
5.9.	Cono de descarga de material. . . . .	82
5.10.	Resultados de la simulación para el cono de descarga. . . . .	82
5.11.	Resultados de la simulación de pandeo para el cono de descarga. . . . .	83
5.12.	Anillo para conexión de pivote. . . . .	83
5.13.	Anillo para conexión de pivote ensamblados. . . . .	84
5.14.	Resultados de simulación para anillo de conexión. . . . .	84
5.15.	Resultados de simulación para anillo de conexión. . . . .	85
5.16.	Resultados de simulación para eje de fijación. . . . .	86
5.17.	Conexión de seguridad. . . . .	87
5.18.	Accionamiento de conexión de seguridad. . . . .	87
5.19.	Cilindro principal. . . . .	88
5.20.	Componentes interiores del ensamblaje del cilindro principal. . . . .	88
5.21.	Componentes interiores del ensamblaje del cilindro principal. . . . .	89
5.22.	Tapa frontal del tornillo. . . . .	89

5.23.	Conjunto tornillo y tapa frontal. . . . .	89
5.24.	Resultados de la simulación de esfuerzo para el conjunto. . . . .	90
5.25.	Resultados de la simulación de desplazamiento para el conjunto. . . . .	90
5.26.	Movimiento de stepper a lo largo del riel. . . . .	91
5.27.	Conector de ejes elástico. . . . .	91
5.28.	Estructura principal. . . . .	92
5.29.	Estructura de extrusiones de aluminio y ubicación de celda. . . . .	93
5.30.	Descanso de flange. . . . .	93
5.31.	Contenedor de componentes. . . . .	94
5.32.	Carro de movilidad y almacenamiento. . . . .	94
5.33.	Esquema de circuito para control de flujo másico. . . . .	95
5.34.	Esquema de circuito para control de stepper [28]. . . . .	95
5.35.	Esquema de circuito para control de celda de carga [27]. . . . .	96
5.36.	Esquema de centro de masa y posición de celda de carga. . . . .	97
5.37.	Esquema de centro de masa y posición de celda de carga. . . . .	97
5.38.	Desplazamiento del centro de gravedad con respecto a la carga del sistema. . .	98
6.1.	Plano de acople NEMA 34 [34] . . . . .	99
6.2.	Stepper NEMA 34 [34] . . . . .	100
6.3.	Drivers para control de NEMA 34. . . . .	100
6.4.	Celda de carga de viga flexible. . . . .	101
6.5.	Unión hexagonal macho-macho, marca Hikelok [30] . . . . .	102
6.6.	Unión tee hembra, marca Hikelok [30] . . . . .	103
6.7.	Válvula de alivio RV11, marca Hikelok [30] . . . . .	103
6.8.	Manómetros PG1, marca Hikelok [30] . . . . .	104
6.9.	Rango de presiones admisibles en función del dureza y despeje [26] . . . . .	104
6.10.	Criterios de compresión para sellos o-ring [31] . . . . .	105
6.11.	Criterios de compresión para sellos o-ring [32] . . . . .	105
6.12.	Criterios de compresión para sellos o-ring . . . . .	106
6.13.	Sello rotatorio o-ring VS-RS20B [38]. . . . .	106
8.1.	Componentes de gas Hikelok . . . . .	117
8.2.	Canales de Nylon y PTFE . . . . .	118
8.3.	Acero para cilindros . . . . .	119
8.4.	Acero para cilindros . . . . .	120
8.5.	Rodones para sellos . . . . .	121
8.6.	Celdas de carga . . . . .	122
8.7.	Sellos radiales auger . . . . .	123
8.8.	Sellos radiales auger . . . . .	124
8.9.	Componentes electronicos . . . . .	124
8.10.	Componentes electronicos . . . . .	125
8.11.	Perfiles de aluminio . . . . .	125
8.12.	Componentes electronicos . . . . .	126
8.13.	Barras de acero AISI 304L . . . . .	126
8.14.	Perfiles de acero extructura . . . . .	127



# Nomenclatura

- $\alpha_c$  : Ángulo de inclinación equivalente en el eje interior de la hélice
- $\alpha_d$  : Ángulo de descanso de material estático
- $\alpha_e$  : Ángulo de inclinación del vuelo del tornillo
- $\alpha_h$  : Medio ángulo de inclinación de tolva de alimentación
- $\alpha_o$  : Ángulo inclinación equivalente de la hélice
- $\alpha_r$  : Ángulo del vuelo de la hélice para el radio  $r$
- $\beta_h$  : Ángulo determinado por la ecuación 4.40
- $\delta$  : Ángulo estático efectivo de fricción interna
- $\delta_{max}$  : Ángulo estático efectivo de fricción interna máximo
- $\delta_{min}$  : Ángulo estático efectivo de fricción interna mínimo
- $\eta_v$  : Eficiencia volumétrica
- $\gamma$  : Peso específico del polvo
- $\lambda_s$  : Razón de esfuerzo entre polvo y superficie
- $\mu$  : Coeficiente de fricción estático
- $\mu_f$  : Coeficiente de fricción de muralla entre polvos y superficie de la hélice
- $\mu_w$  : Coeficiente de fricción superficial
- $\phi$  : Ángulo estático de fricción interna
- $\phi_i$  : Ángulo estático efectivo de fricción interna (según diagrama figura 4.11)
- $\phi_s$  : Ángulo de fricción superficial
- $\phi_w$  : Ángulo de fricción de muralla
- $\phi_e$  : Ángulo estático de fricción interna (según diagrama figura 4.6)
- $\phi_{max}$  : Ángulo estático de fricción interna máximo
- $\phi_{min}$  : Ángulo estático de fricción interna mínimo

$\phi_x$  : Ángulo fricción de muralla (según diagrama figura 4.6)  
 $\rho_b$  : Densidad a granel del material  
 $\rho_{b,crit}$  : Densidad a granel critica del material  
 $\sigma'_1(\sigma_1)$  : Función del factor de flujo  
 $\sigma_1$  : Esfuerzo principal  
 $\sigma_c$  : Esfuerzo de fluencia desconfinado  
 $\sigma_o$  : Esfuerzo ejercido por el polvo en la tolva de alimentación  
 $\sigma_w$  : Esfuerzos radiales  
 $\sigma_x$  : Esfuerzos axiales  
 $\sigma_{1,crit}$  : Esfuerzo principal critico  
 $\sigma_{c,crit}$  : Esfuerzo de fluencia desconfinado critico  
 $\sigma_{ct}$  : Función de flujo temporal  
 $\sigma_{sd}$  : Desviación estándar de medición  $\delta$  y  $\phi$   
 $\tau_w$  : Esfuerzos de corte  
 $\Theta$  : Ángulo de inclinación de descarga  
 $\Theta_c$  : Ángulo de inclinación de descarga critico  
 $A$  : Área equivalente del tornillo  
 $A_{mt}$  : Área transversal de material muerto  
 $B$  : Diámetro de descarga de la tolva de alimentación  
 $c$  : Despeje radial entre el tornillo y el canal  
 $c_d$  : Razón entre diámetro del eje interior de tornillo a diámetro de tornillo  
 $c_t$  : Razón entre radio del canal y radio del tornillo  
 $c_{dis}$  : Despeje radial de diseño  
 $D$  : Diámetro del tornillo  
 $D_{crit}$  : Diámetro crítico para evitar *ratholing*  
 $d_{crit}$  : Diámetro crítico para evitar arqueamiento  
 $D_{dis}$  : Diámetro de diseño para el tornillo alimentador  
 $f$  : Función geométrica  $f$   
 $F_{ca}$  : Fuerza axial en superficie de eje central

$F_{da}$  : Fuerza axial en superficie del canal  
 $F_{la}$  : Fuerza axial en superficie de corte superior  
 $F_{ta}$  : Fuerza axial en superficie del canal  
 $F_{ua}$  : Fuerza axial en superficie de corte superior  
 $ff$  : Factor de flujo  
 $g$  : Aceleración gravitacional  
 $H$  : Función geométrica  $H$   
 $k$  : Coeficiente de flujo  
 $K_{\sigma}$  : Factor obtenido de la ecuación 4.52  
 $k_c$  : Factor obtenido de la ecuación 4.48  
 $k_l$  : Factor obtenido de la ecuación 4.50  
 $k_t$  : Factor obtenido de la ecuación 4.52  
 $k_u$  : Factor obtenido de la ecuación 4.46  
 $P$  : Paso del tornillo  
 $q_{f\sigma_1}$  : Factor de recarga adimensional  
 $R_c$  : Radio exterior del tornillo  
 $R_e$  : Rendimiento equivalente del tornillo  
 $R_i$  : Radio del eje interior del tornillo  
 $R_m$  : Rendimiento másico  
 $R_o$  : Radio exterior del tornillo  
 $R_t$  : Radio interior del canal  
 $R_v$  : Rendimiento volumen  
 $T$  : Torque requerido  
 $V_{mt}$  : Volumen de material muerto

# Capítulo 1

## Introducción

Los procesos de manufactura aditiva son cada vez más utilizados en la industria, permiten crear estructuras más livianas y diseños más complejos, que resultan muy difíciles o costosos por medios convencionales. Cold Spray es una tecnología de deposición de recubrimiento de estado sólido que ha sido aplicada recientemente como un proceso de manufactura aditiva, para la fabricación de componentes individuales y reparación de equipos dañados. En este proceso, gases comprimidos a alta temperatura se utilizan como propulsor para acelerar la materia prima en partículas de polvo ( $5 - 50\mu m$ ) a una alta velocidad ( $300 - 1200m/s$ ), provocando la deposición de estos polvos sobre un sustrato.

El proceso de Cold Spray ha sido extensamente estudiado por alumnos del departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, en diferentes trabajos de título anteriores.

Los trabajos han abordado una variedad de fenómenos de gran interés en los procesos de Cold Spray, como los estudios de impacto, deformación, dureza y adhesión de partícula, además de modelamientos fluidodinámicos para distintas secciones del proceso. Por otro lado, se han realizado diseños y construcciones de equipos para desarrollar y estudiar el proceso.

Este trabajo presenta mayor relación con los trabajos de título que han estado involucrados con diseño y construcción de equipos. El objetivo de este trabajo contempla el diseño conceptual y detalle un sistema de alimentación de polvos para un equipo de Cold Spray construido anteriormente en la facultad por Massardo Moretti, Cristóbal Javier [1].

Uno de los aspectos más importantes para obtener un buen recubrimiento de material es contar con un flujo adecuado de polvos, que pueda de ser ajustado para operar con múltiples presiones y velocidades de partícula. El equipo existente de la facultad no presenta un sistema que sea capaz de suministrar polvos para altas presiones, en este contexto se plantea el diseño y evaluación conceptual del alimentador que permita solucionar esta problemática.

## 1.1. Motivación

Las nuevas tecnologías de manufactura aditiva presentan múltiples ventajas en comparación con los métodos de manufactura convencionales, como por ejemplo el ahorro en desperdicios y energía, mediante un uso inteligente de los materiales. Estos procesos permiten realizar prototipos de manera rápida, y además facilitan recrear y optimizar componentes, para mejorar su confiabilidad y propiedades en general.

Cold Spray es considerada como una de estas nuevas tecnologías de manufactura aditiva. Corresponde a un proceso donde se producen recubrimientos de material sin un gran incremento en la temperatura de las partículas proyectadas, a diferencia de otros procesos conocidos de proyección térmica, tales como plasma o arco eléctrico, no se requiere la fusión de las partículas para obtener adhesión de materiales, esta ocurre en estado sólido, por lo que es posible depositar utilizando materiales térmicamente sensibles. Estos materiales deben presentar granulometrías, velocidades de impacto y flujos específicos, para lograr un recubrimiento efectivo en los sustratos.

Considerando lo anterior, resulta de gran interés investigar en mayor profundidad este tipo de procesos. Como se mencionó anteriormente, el departamento de Ingeniería Mecánica de la facultad posee un equipo diseñado para desarrollar el proceso de recubrimiento por Cold Spray, no obstante, este no posee un alimentador de polvos para altas presiones, lo cual limita en gran medida sus aplicaciones. El desafío de este trabajo consistirá el solucionar esta problemática, para lograr que el equipo de Cold Spray opere de manera óptima, y de esta manera promover la investigación experimental de los procesos de Cold Spray en la facultad.

## 1.2. Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo de título consistirá en el diseño conceptual y detalle de integridad estructural y desempeño de un equipo de alimentación de polvos para el proceso de Cold Spray, que pueda opera con múltiples tipos de polvos.

## 1.3. Objetivos Específicos

Para alcanzar este objetivo, se deben completar los siguientes Objetivos Específicos:

- Definir parámetros de flujo, gas, volumen, presión y granulometría de polvos para operar con el equipo de Cold Spray existente.
- Calcular y diseñar geometrías para flujos y volúmenes requeridos del equipo.
- Seleccionar materiales y componentes para las presiones y condiciones de trabajo.
- Evaluación estructural del sistema mediante análisis numérico de los componentes.
- Generar planos para construcción, cotizaciones y cubicaciones.

## 1.4. Alcances

Los alcances de este trabajo de título contemplan el diseño y evaluación numérica de un sistema de alimentación de polvos para un sistema de manufactura aditiva por Cold Spray. Este trabajo no contempla la construcción ni ensamblaje del sistema diseñado, no obstante, si las condiciones del semestre de otoño-primavera del año 2021 son óptimas, se podría realizar. Considerado lo anterior, se dejará como alcance opcional la construcción y ensamblaje del equipo.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Cold Spray

Cold Spray es un proceso de deposición de material en estado sólido, que fue desarrollado originalmente como una tecnología de recubrimiento en la década de 1980. En este proceso, gases comprimidos a alta temperatura (nitrógeno, aire o helio) se utilizan como gas propulsor para acelerar la materia prima en polvo; metales y compuestos de matriz metálica generalmente; a una alta velocidad; normalmente superior a 300 [m/s]; para inducir la deposición cuando los polvos impactan sobre un sustrato, típicamente metales.[2]

En contraste con procesos convencionales de deposición a alta temperatura, la formación de un depósito por Cold Spray depende en gran medida de la energía cinética de las partículas antes de impacto en lugar de la energía térmica. La materia prima utilizada para el Cold Spray permanece en estado sólido durante todo el proceso de deposición. La deposición se logra generalmente por la unión metalúrgica y mecánica entre los materiales, los cuales son causados por deformaciones plásticas localizadas en las interfaces entre partículas y sustrato. Esto permite evitar los defectos que se encuentran comúnmente en la deposición a alta temperatura, tales como oxidación, estrés térmico residual y fase transformación.[2]

Uno de los aspectos más relevantes al evaluar un proceso de Cold Spray son los polvos utilizados, específicamente el tipo de polvo, su tamaño y el flujo de este. El flujo de un polvo es una característica esencial que determina la viabilidad del procesamiento por Cold Spray. Polvos con caudales superiores a 50[g/s] tienden a acumularse y bloquear el flujo de gas en boquillas subsónicas y supersónicas [2]. Las especificaciones de tamaño de partícula para los polvos de Cold Spray varían desde un tamaño nanométrico hasta más de 400 micrones[2]. Un rango de tamaño de partícula de polvo de esta magnitud beneficia el rendimiento de fabricación para la mayoría de los procesos de producción de polvos. Los elementos químicos seleccionados para el procesamiento por Cold Spray tienen en común bajos puntos de fusión y baja resistencia a la deformación. Los metales que cumplen con estas propiedades incluyen cobre puro, plata, zinc, estaño, bismuto, indio y aluminio y sus aleaciones.[2]

### 2.1.1. Velocidad crítica y presión en Cold Spray

El efecto de la velocidad de las partículas previo al impacto contra un sustrato es uno de los factores más influyentes en el resultado que se puede obtener en el proceso de Cold Spray. La energía cinética de la partícula se disipa rápidamente al momento de la colisión. Esta rápida colisión genera deformación plástica, aumentando la superficie de contacto con el sustrato, esta energía de deformación es principalmente traducida en un incremento de temperatura, lo que favorece la formación de enlaces entre la partícula y el sustrato.

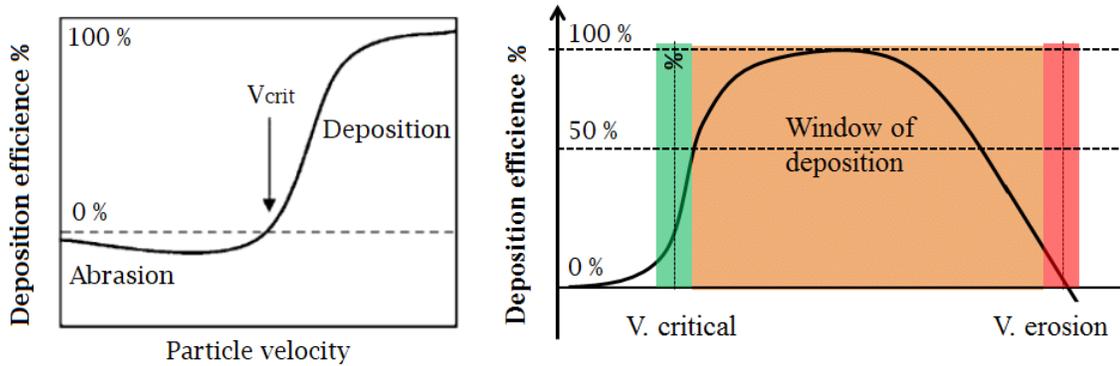


Figura 2.1: Diagrama de eficiencia de deposición en función de la velocidad de la partícula [2].

En la figura 2.1 se puede observar tres fenómenos dependiendo de la velocidad de la partícula  $V_p$ . Existe un valor crítico de la velocidad,  $V_{crit}$ , el cual determina el resultado del impacto partícula-sustrato. El umbral de deposición está determinado por los fenómenos de abrasión y erosión que se producen cuando la velocidad de deposición es insuficiente o excesiva, respectivamente.

- Si  $V_p \ll V_{crit}$  la partícula puede rebotar en impacto.
- Si  $V_p < V_{crit}$  la partícula puede generar abrasión en el sustrato.
- Si  $V_p \geq V_{crit}$  la partícula se deforma plásticamente y se adhiere al sustrato.
- Si  $V_p \gg V_{crit}$  la partícula genera erosión en el sustrato.

Las presiones necesarias para obtener velocidades críticas de deposición de materiales son generalmente altas (hasta  $5[MPa]$  ( $725[psi]$ ) en algunos casos [2]), dependen directamente del tipo de gas que se utilice (helio, nitrógeno o aire [2]) y el material. El proceso de Cold Spray se puede dividir en dos categorías, según la presión del gas propulsor: Cold Spray de alta presión y baja presión [2]. La principal diferencia entre estos dos sistemas es el punto de inyección de los polvos, generalmente los sistemas de alta presión incorporan los polvos al comienzo de la sección de la tobera, de esta manera experimentan una mayor aceleración por parte del gas y aumentan más su temperatura final de deposición. La figura 2.2 (a) muestra un esquema de un sistema de Cold Spray de alta presión. El gas comprimido se divide en dos corrientes al entrar en el sistema de Cold Spray. Una corriente del gas comprimido (denominado gas propulsor) pasa a través un calentador de gas, donde se eleva su temperatura, al mismo

tiempo, la segunda corriente del gas comprimido (denominado gas portador) pasa a través de un alimentador de polvo, donde se carga con las partículas de materia prima.

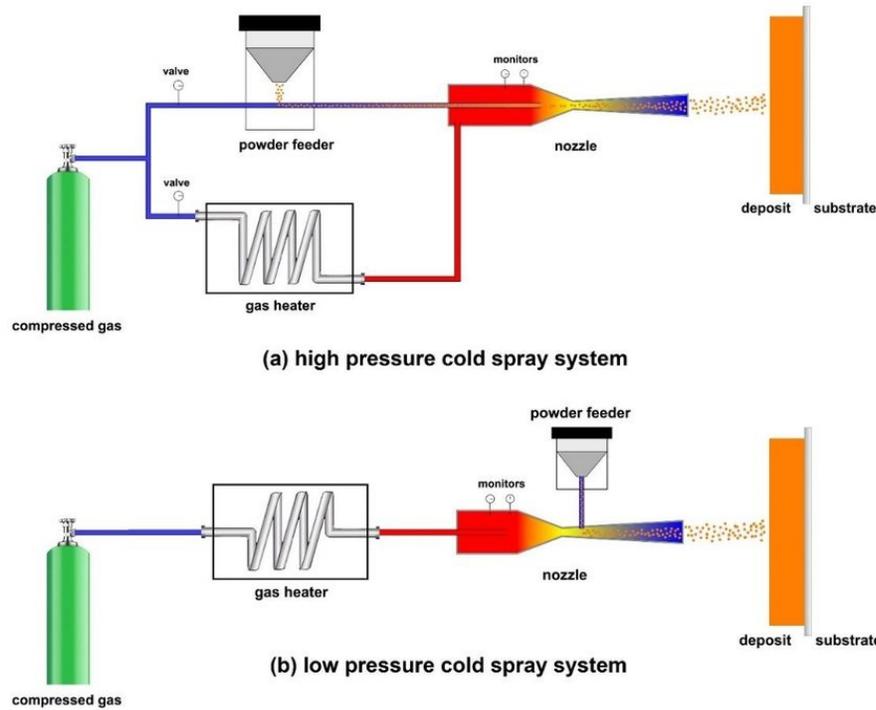


Figura 2.2: Diagrama de sistema de Cold Spray de alta y baja presión [2].

La figura 2.2 (b) muestra un esquema de un sistema de Cold Spray a baja presión. Las principales diferencias entre el sistema de baja presión y alta presión son: el gas comprimido presentara menor presión que en los sistemas de alta presión; el punto de inyección de polvo está en la boquilla divergente de la tobera donde la presión del gas local es suficientemente baja para permitir la liberación de polvos del alimentador de polvo a presión atmosférica.

El alimentador de polvos es de crucial importancia para lograr obtener las velocidades críticas en los procesos de Cold Spray, especialmente para los equipos de alta presión. Los equipos de alimentación deben ser capaces de suministrar material de manera continua y controlada, no debe presenta estancamiento ni devolución de material, fenómenos generalmente producidos por problemas de presurización en el sistema [2].

## 2.2. Alimentadores de polvos

Hay dos secciones separadas involucradas en la alimentación en polvo que ayudan a categorizar qué tipo de alimentador que se está utilizando. La primera se basa en cómo se mide el caudal. Los dos tipos de medición de flujo predominantes en la alimentación de polvo son el flujo gravimétrico y el flujo volumétrico, como se pueden observar en la figura 2.3.

El flujo gravimétrico se basa en medir el cambio de peso a lo largo del tiempo, mientras que el flujo volumétrico se basa en la calibración previa de la máquina y la velocidad del alimentador [3]. Es importante tener esto en cuenta cuando se considera la precisión de las mediciones de flujo. Cada método de medición tiene pros y contras intrínsecos que resultan del método de medición. Un ejemplo de esto es que los alimentadores gravimétricos pueden compensar automáticamente la densidad del material mientras entrega una masa o peso de material cada período de tiempo especificado. El inconveniente de este método en el campo de deposición térmica es que es necesario suministrar cantidades muy precisas de flujo pequeño al gas portador con precisión. Este problema significa que el uso de celdas de carga para medición fina y precisa puede ser costoso o poco práctico.

Por otra parte, los alimentadores volumétricos requieren información del usuario en función de la densidad aparente del polvo que se entrega. Cuando la entrada del usuario contiene datos precisos, es más preciso medir los parámetros de rendimiento de un mecanismo de suministro basado en el flujo volumétrico en lugar de un flujo másico cuando el sistema suministra unos pocos gramos por segundo [3].

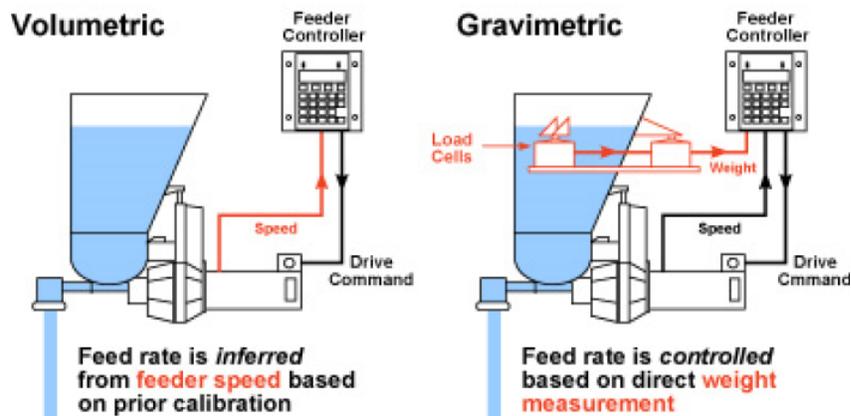


Figura 2.3: Sistemas de alimentación volumétricos y gravimétricos [3].

La otra parte de la alimentación del polvo es el mecanismo mediante el cual se entrega el polvo a su ubicación final o, en el caso de la deposición térmica y Cold Spray, cómo se entrega el polvo a la corriente de gas portador. Los tres tipos más comunes de mecanismos de suministro son el disco giratorio, los sistemas alimentados por tornillo/auger y los alimentadores de polvo con cama fluidizadora.[4]

### Disco giratorio

Los alimentadores de polvo de disco giratorio funcionan con una tolva de polvo colocada de forma estacionaria sobre un disco giratorio. El flujo de polvo se controla mediante una combinación del patrón geométrico del disco, que se puede ser modificado, y la velocidad angular del disco.

### Auger

Los diseños alimentados por tornillo entregan el polvo desde una tolva y sobre un tornillo horizontal que entrega el polvo a la corriente de gas portador. El caudal del polvo está controlado por la geometría del tornillo y la velocidad angular del tornillo.

## Cama fluidizadora

Los alimentadores de polvo con cama de fluidización entregan un polvo por un medio diferente. El polvo se introduce en un volumen de gas a alta presión para que el polvo se fluidice en el flujo de gas. Luego, una boquilla convergente divergente entrega este polvo fluidizado y la mezcla de gas a la corriente de gas portador.

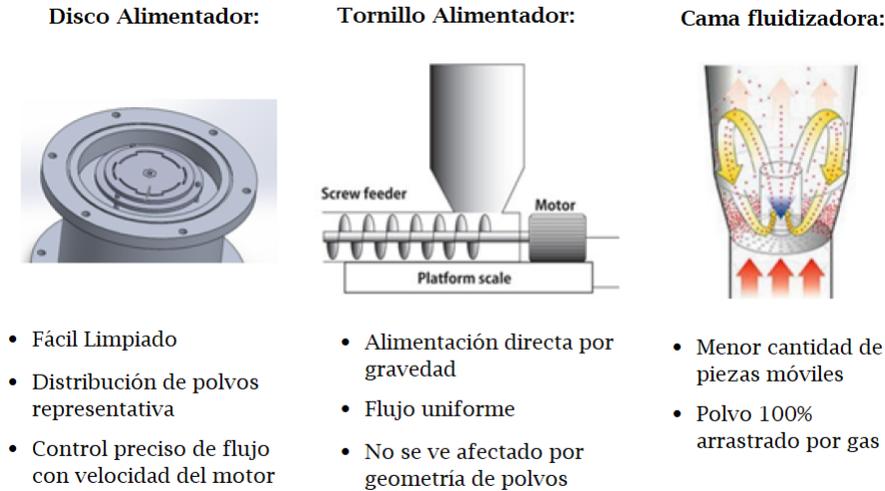


Figura 2.4: Beneficios de cada sistema de alimentación.[4].

### 2.2.1. Polvos y granulometría

Las propiedades de los polvos tienen un efecto significativo en el producto metálico final y también en el proceso tecnológico por el cual se utilizan, por ejemplo, la forma de las partículas, el tamaño de estas, la fluidez y la proporción de la masa del polvo al volumen ocupado, todas estas características deben ser consideradas en el proceso, de lo contrario pueden aparecer problemas de adhesión, aglomeración de material, porosidad o incluso estancamiento en distintos puntos del sistema. Todo esto puede llevar al problema de lograr la densidad, terminación o propiedad deseada en el producto final.[5]

La granulometría de los polvos utilizados en Cold Spray varían en grandes rangos, desde unidades nanométricas y micrométricas. Las fracciones de tamaño de partículas más solicitadas se encuentran típicamente dentro de los rangos de 5–25, 15–45, 63–90, 75–150, y partículas de 200 a 400 micrones de diámetro.[5]

Metal Powders	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}/d_{10}$	$d_{90}/d_{10}$
Stainless Steel 316L	$26.0 \pm 0.8$	$38.8 \pm 0.1$	$58.0 \pm 0.1$	1.5	2.2
Zinc powder	$8.3 \pm 0.1$	$15.8 \pm 0.2$	$24.8 \pm 0.4$	1.9	3.0
Aluminum powder	$29.4 \pm 0.2$	$79.1 \pm 0.4$	$187.3 \pm 5.0$	2.7	6.4
Tin powder	$6.3 \pm 0.3$	$26.9 \pm 0.4$	$59.1 \pm 1.8$	4.3	9.3
Copper powder	$16.1 \pm 0.1$	$35.6 \pm 0.1$	$57.5 \pm 0.2$	2.2	3.6
Manganese powder	$6.1 \pm 0.2$	$32.3 \pm 1.2$	$88.0 \pm 1.6$	5.3	14.5
Bronze powder	$12.1 \pm 0.1$	$29.6 \pm 0.2$	$57.2 \pm 1.4$	2.4	4.7
Iron powder	$72.7 \pm 0.2$	$121.1 \pm 0.5$	$195.1 \pm 0.5$	1.7	2.7
Titanium powder	$80.7 \pm 1.6$	$295.1 \pm 0.5$	$452.1 \pm 0.2$	3.7	5.6
Ferrite powder	$29.2 \pm 0.4$	$54.9 \pm 0.7$	$86.6 \pm 3.0$	1.9	3.0

Figura 2.5: Valores característicos para distribución de tamaños de partículas en polvos metálicos [5].

Otro aspecto importante para considerar para un buen flujo es la morfología de los polvos. Una geometría esférica de partículas es bienvenida en el campo de las tecnologías de manufactura aditiva. La esfericidad es una ventaja significativa para una buena fluidez de los polvos metálicos, no obstante, partículas que presentan ciertas irregularidades pueden ser efectivas, siempre que exista un buen grado de uniformidad en el conjunto.



Figura 2.6: Morfología de polvos metálicos obtenida por microscopía electrónica [5].

La morfología de las partículas depende en gran parte al proceso de producción por el cual fueron obtenidas. La gran mayoría de los polvos metálicos son obtenidos por procesos de atomización, electrolización, descomposición térmica, oxido reducción, precipitación por solución y atomización centrifugada. Para polvos de gran precisión en morfología y tamaño se suele utilizar principalmente el proceso de atomizado, además, este proceso es particularmente efectivo para la producción de polvos metálicos de bronce, aleaciones de acero, cobre, estaño, aluminio y zinc, materiales frecuentemente utilizados para los procesos de Cold Spray [5].

Cabe destacar que dada la gran variedad de propiedades mecánicas que se presentan para múltiples polvos metálicos, es una práctica común basar los criterios de diseño para un alimentador en un solo material [5]. Para este trabajo en particular se hará uso de los polvos de cobre como material de diseño.

## 2.3. Sistemas comerciales y académicos

### 2.3.1. Sistemas comerciales

Existen modelos comerciales que satisfacen los requerimientos técnicos necesarios para el proceso de deposición por Cold Spray. En su gran mayoría esos equipos presentan características similares en los parámetros de flujo másico y tamaños de partícula que pueden trabajar, generalmente en rangos de 5-500 [g/min] y 2-200 [ $\mu\text{m}$ ], respectivamente [2].

Tabla 2.1: Tabla de comparación para alimentadores de polvo comerciales [6].

Modelos	Impact Powder Feeder	Uniquecoat HP-D2 Powder Feeder	AMF M4 Series Powder Feeder	Flame Spray Technologies FST-20 Powder Feeder	Metal Tech & Mgmt.Inc PFD401CB Powder Feeder
Volumen de trabajo [Lt]	3.7	10	1.6	5	4.6
Presión de trabajo [Bar] ([psi])	50 (725)	35 (500)	138 (2000)	11 (150)	1(15)
Tamaño de partícula [ $\mu\text{m}$ ]	5-200	0-200	0.5-200	2.5-200	10-250
Flujo [g/min]	2-500	0-500	10-500	5-500	17-670
Gas [tipo]	Aire, Nitrógeno, Helio	Aire, Nitrógeno, Argón	Aire, Nitrógeno, Helio	Aire, Nitrógeno, Helio	Aire, Nitrógeno, Helio

Los parámetros que presentan mayor variedad en los equipos comerciales son principalmente el volumen y presión de trabajo. La mayoría de los equipos presentan volúmenes entre 2 y 10 [Lt], pero las presiones varían en mayores intervalos. La gran mayoría de los equipos operan a presiones ambiente (1 [Bar]), no obstante, existen algunos equipos que operan a altas presiones; cómo se puede ver en la tabla 3.1; llegando hasta los 2000 [psi].

### 2.3.2. Sistemas académicos

Existen estudios, simulaciones, diseños y construcción de equipos para alimentación de polvos, específicamente para procesos de manufactura aditivas como Cold Spray. Resulta de suma importancia considerar estos como antecedentes para este trabajo de título puesto que proporcionan información sobre consideraciones de diseño y resultados experimentales.

Alves, Gonçalves e Silva y Dutra [7] desarrollaron el diseño, construcción y evaluación de un sistema de alimentación de polvos para ser utilizado en procesos de soldadura por arco de plasma con adición de polvos metálicos, para esto desarrollaron el sistema completo de alimentador, válvula de dosificadora rotatoria, sistema electrónico y mecanismo de fluidificación para poder proporcionar un flujo continuo y controlado de polvo para el sistema de soldadura.

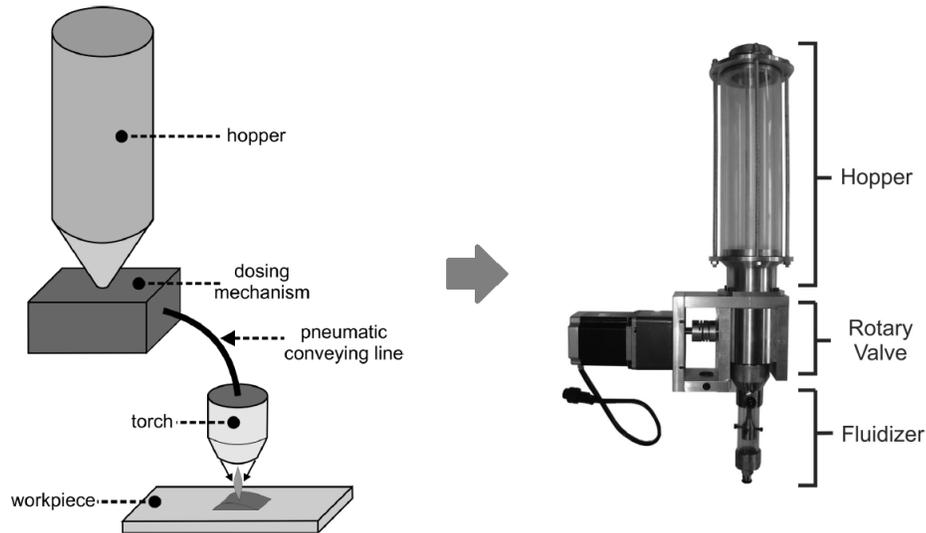


Figura 2.7: Diagrama de operación y modelo final construido.[7]

Uno de los aspectos más llamativos de este alimentador es la simplicidad de su diseño. Un equipo que considere una menor cantidad de componentes y menor complejidad en su diseño de ensamblaje resulta ser más práctico para un uso periódico, las mantenciones suelen ser menos costosas, y además de presentar una menor cantidad de componentes que puedan presentar fallas.

Otro modelo de interés, realizado por Naugler, Jorgensen, Spunar y Rose [8], presenta otros elementos relevantes para efectos de diseño. El modelo realizado buscaba mejorar el desempeño de los alimentadores de polvo utilizados en deposición por Cold Spray de tipo LACS (Laser-Assisted Cold Spray).

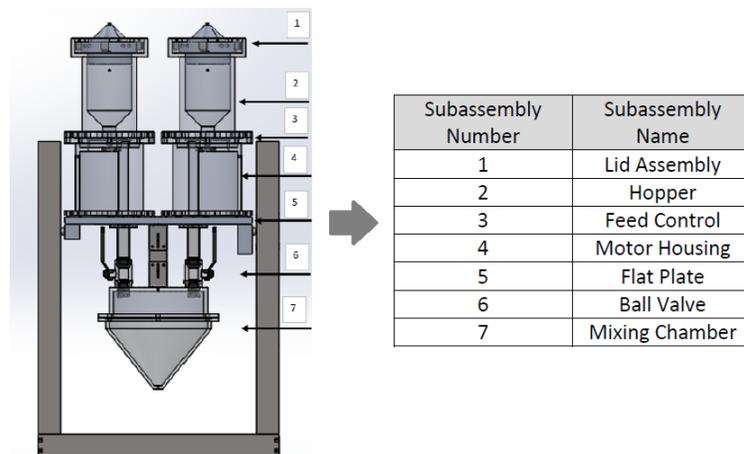


Figura 2.8: Diagrama de los componentes internos del alimentador.[8]

El equipo diseñado presentaba requerimientos de mucho interés para este trabajo. Fue diseñado para soportar una presión de trabajo de 600 [psi], capacidad para operar con múltiples tipos de polvos y operar con flujos máxicos de entre 5-20 [g/min] de manera continua.

Adicionalmente, este equipo fue diseñado con el objetivo de disminuir los mantenimientos preventivos, utilizando mecanismos de fijación de alta resistencia con elementos de prevención de devolución de material.

## 2.4. Perfiles de flujo: Flujo másico y central

Cuando un sólido a granel, en este caso polvos, se descarga por gravedad desde un silo o tolva de alimentación, se debe distinguir entre el flujo másico y el flujo central (también conocido como flujo de núcleo o tapón de flujo), como se puede ver en la figura 2.9. En una tolva de flujo másico, figura 2.9 (a), cada partícula del sólido a granel se mueve cuando existe una salida inferior, siempre que el arqueamiento de material no se produzca.

El flujo másico solo es posible si las paredes de la tolva son empinadas y/o suficientemente bajas en fricción. Si la pared de la tolva es demasiado plana o tiene demasiada fricción, se producirá un flujo de tipo central. En una tolva de flujo central al principio sólo el sólido a granel en una camisa por encima de la abertura fluye, si se presenta alguna descarga. El sólido a granel ubicado en las zonas estancadas (también designadas como zonas muertas), que se desarrollan en la periferia de la tolva a partir de las paredes de la tolva directamente encima de la abertura, solo se puede descargar si la tolva es vaciada por completo.

Las zonas estancadas pueden alcanzar el nivel superior del llenado con el resultado de que se forma un flujo central en la superficie (este tipo de flujo central se denomina flujo de tubería, figura 2.9 (b)). También es posible que las zonas estancadas existan solo en la parte inferior del silo, porque el límite entre el flujo sólido a granel y las zonas estancadas se cruzan con la pared de la tolva debajo del nivel superior del relleno (este tipo de flujo de embudo se llama flujo mixto, figura 2.9 (c)).

Adicionalmente, las zonas estancadas pueden ser asimétricas, incluso si la tolva es simétrica con salida céntrica, provocando así cargas desventajosas en las paredes de la tolva. Un flujo aún más asimétrico puede prevalecer en una tolva con zona de flujo excéntrico (flujo de tubería excéntrica, figura 2.9 (d)) causada, por ejemplo, por una abertura de salida excéntrica en combinación con paredes de la tolva poco profundas.

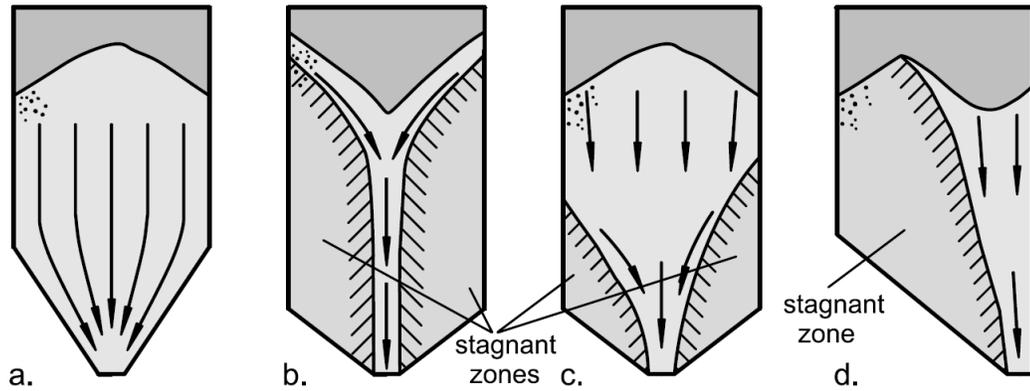


Figura 2.9: Perfiles de flujo: a. flujo másico; b. flujo central con estancamiento de material en el nivel de llenado (flujo de tubería); c. flujo central con estancamiento de material en el nivel inferior (flujo mixto); d. flujo central con zona de flujo excéntrica (flujo excéntrico) [9].

En una tolva de flujo másico, la masa completa de llenado está en movimiento siempre que se descarga el sólido a granel. Sin embargo, la velocidad puede ser, y casi siempre es, diferente en la sección transversal de la tolva. Si se asume una distribución de velocidad uniforme en la abertura, se desarrolla una distribución de velocidad en la tolva con los valores más altos en el eje central de la tolva y los más bajos en las paredes. La figura 10.2 muestra los componentes de la velocidad vertical en un flujo másico.

La velocidad en la pared es menor cuanto mayor es la fricción, y cuanto más plana es la pared de la tolva. Si la pared de la tolva tiene demasiada fricción o es demasiado plana, no hay movimiento de material, por lo tanto, se desarrolla una zona estancada, es decir, un flujo central. La distribución de velocidades en la tolva todavía existe en la parte inferior de sección vertical, pero a medida que se incrementa la distancia desde la esquina superior de la tolva, se obtiene un flujo estancado. La altura de esta zona de transición es típicamente 0,7 a 1,0 veces el diámetro de la sección vertical,  $D$ .

En tolvas de flujo central, donde existen zonas estancadas solo en la parte inferior de la tolva (figura 2.10), las distribuciones de velocidad por encima de las zonas estancadas son similares a las que se encuentran en las tolvas de flujo másico. Consecuentemente, la observación del nivel de llenado no siempre da la indicación correcta del perfil de flujo que podría desarrollarse.

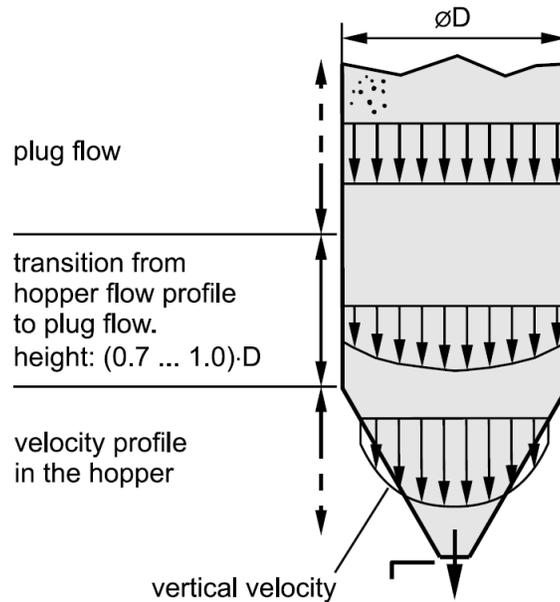


Figura 2.10: Distribución de velocidades [9].

## 2.5. Problemas de flujo

Gran parte de los problemas de flujo que se suelen presentar son resultado de que las tolvas de alimentación presentan flujos de tipo central, situación que no ocurre con flujos de tipo másico. Algunas de las problemáticas más comunes pueden ser solucionadas con un diseño correcto:

- **Ratholing:** Las ratoneras, (también llamadas tuberías) se forman a partir de estancamiento consolidado de material. Por lo tanto, solo son posibles en el flujo central.
- **Tiempo de residencia:** La distribución del tiempo de residencia en una tolva de flujo másico es estrecha ("first in first out"). Los tiempos de residencia largos y desconocidos desfavorables que ocurren en una tolva de flujo central pueden evitarse, puesto que generan estancamiento de material.
- **Inundación de material:** Las inundaciones de material a menudo son el resultado de una desaireación insuficiente de la masa sólida y, por tanto, se produce cuando el tiempo de residencia es demasiado corto. Especialmente en una tolva de flujo central, el tiempo de residencia puede ser muy corto cuando el sólido a granel se descarga durante el llenado. Como resultado del estancamiento, el sólido a granel recién introducido aparece después de muy poco tiempo en la salida de la tolva.
- **Segregación:** La segregación suele ocurrir durante el llenado, donde diferentes fracciones se separan a lo largo de la superficie del relleno de la tolva, tiene una fuerte influencia en la composición transitoria del sólido a granel descargado de los silos de flujo central. En contraste con esto, en una tolva de flujo másico, el sólido a granel es a menudo suficientemente mezclado en la sección de la tolva.

Por lo tanto, en las tolvas de flujo másico solo permanece el problema potencial del arqueamiento de material, donde se forma un arco estable sobre la salida de la tolva para detener la descarga. Los sólidos a granel de grano grueso pueden formar arcos debido al enclavamiento y acuñamiento de partículas (Fig. 10.3.a). Este tipo de arqueamiento se puede evitar si el diámetro de la salida circular de una tolva cónica es de al menos 6 a 10 veces el tamaño máximo de partícula. La distribución estrecha del tamaño de partícula y las partículas de bordes afilados tenderán a aumentar la probabilidad de formación de arco debido al enclavamiento y acuñamiento. Incluso si la salida es lo suficientemente grande para evitar la formación de un arco, puede generarse un flujo discontinuo o pulsante. Con sólidos a granel cohesivos y de grano fino, el motivo del arqueamiento suele ser el resultado de fuerzas cohesivas (resistencia a la compresión) del sólido a granel debido a las fuerzas adhesivas entre partículas individuales. En estos casos, el arco se puede evitar con una apertura de descarga suficientemente grande.

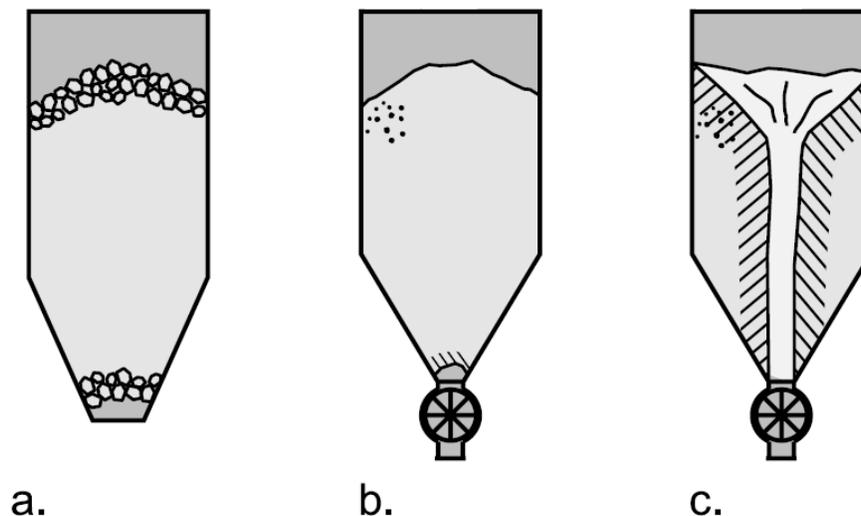


Figura 2.11: Problemáticas de flujo: a. arqueamiento debido al enclavamiento y acuñamiento de sólidos a granel de grano grueso; b. arqueamiento debido a la fuerza cohesiva de un sólido a granel; c. ratholing (tuberías) [9].

El proceso de diseño de la tolva de alimentación debe, idealmente, enfocarse en flujos másicos, puesto que como se menciona anteriormente, permiten evitar la mayor parte de las problemáticas de estancamiento de material. A la hora de realizar el diseño de este componente, se debe tener siempre en cuenta los potenciales fenómenos descritos, y evitar, dentro de lo posible, el desarrollo de un flujo central.

# Capítulo 3

## Metodología

La figura 3.1 se muestra la metodología general a seguir en el trabajo de título. El procedimiento consiste en seleccionar los parámetros de funcionamiento del equipo, para luego pasar a las etapas de diseño. La fase de diseño culmina con las cubricaciones y selección de materiales, para continuar con cotizaciones y planos de construcción.

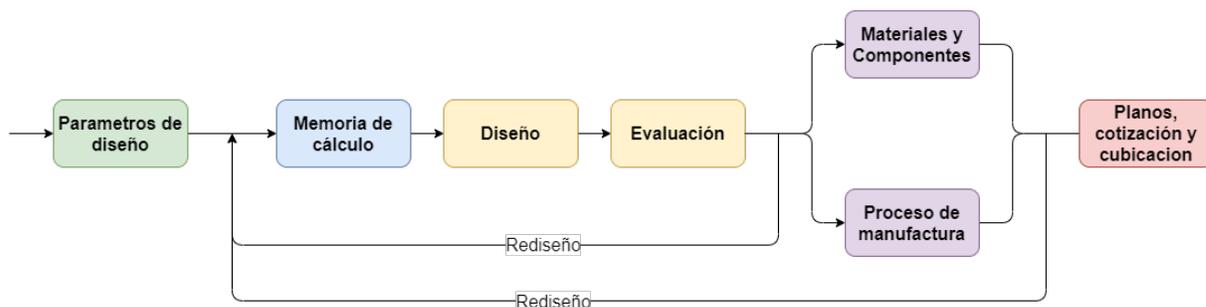


Figura 3.1: Metodología general para el trabajo de título.

### 3.1. Parámetros de diseño

Para el diseño del alimentador de polvos, se determinaron algunos parámetros de diseño, seleccionados a partir de las necesidades a cumplir, la compatibilidad con el equipo pre-existente [1] y de la disponibilidad comercial. La tabla enuncia los parámetros de diseño seleccionados.

Tabla 3.1: Parámetros de diseño del equipo

Parámetro de diseño	Valor	Unidad
Presión máxima de trabajo	3.45	[MPa]
Gas de trabajo	Nitrógeno	-
Diámetro máximo de partícula	60	[ $\mu m$ ]
Flujo másico	5-50	[g/min]
Volumen de almacenamiento	1-3	[lts]
Temperatura	25 (ambiental promedio)	[°C]
Humedad relativa	45 (ambiental promedio)	[%]

## 3.2. Memoria de cálculo

Dentro del proceso de diseño se debe considerar el cálculo y evaluación de todos los componentes a ser fabricados y adquiridos comercialmente. Uno de los principales factores que afecta los criterios de diseño son la granulometría de los polvos y la presión de trabajo. El trabajo con altas presiones conlleva a la consideración de una serie de aspectos de seguridad y contención de materiales. El equipo debe ser capaz de soportar los esfuerzos y cargas aplicadas, logrando desempeñar de manera efectiva su labor de alimentación.

Las memorias de cálculo abordan principalmente los subsistemas de tolva de alimentación y tornillo alimentador. En estas se obtienen los parámetros más importantes para efectos de diseño. Para la tolva de alimentación se obtienen los diámetros de descarga críticos del equipo ( $D_{crit}$  y  $d_{crit}$ ) y ángulo de inclinación de la tolva  $\Theta_c$ , mientras que para el tornillo alimentador se obtiene el diámetro de diseño del tornillo alimentador  $D_{dis}$ , despeje radial de diseño  $c_{dis}$ , rendimiento másico  $R_m$  y torque requerido para la propulsión  $T$ .

## 3.3. Diseño y evaluación del equipo

La finalidad de esta sección es poder materializar los requerimientos del modelo de la manera más lógica y factible posible, para facilitar la construcción y ensamblaje del equipo en el futuro.

El diseño del equipo fue en gran parte guiado por la disponibilidad de componentes comerciales y los resultados de los cálculos realizados. Se modelaron todos los componentes necesarios mediante maqueta CAD y cada componente crítico fue evaluado por medio de simulaciones de elemento finito.

## 3.4. Selección de componentes y procesos de manufactura

Los componentes seleccionados para la fabricación de este equipo deben ser compatibles con todos los requerimientos técnicos de presión, abrasión, temperatura y humedad que estén presentes, se analizaron todas las propiedades mecánicas de cada uno para asegurar su funcionamiento apropiado con el equipo diseñado. Los componentes principales del equipo serán manufacturados, se consideraron los materiales y procesos de manufactura aptos para su producción para obtener de esta manera un estimado de costo y tiempo de producción.

## 3.5. Planos, cotizaciones y cubicaciones

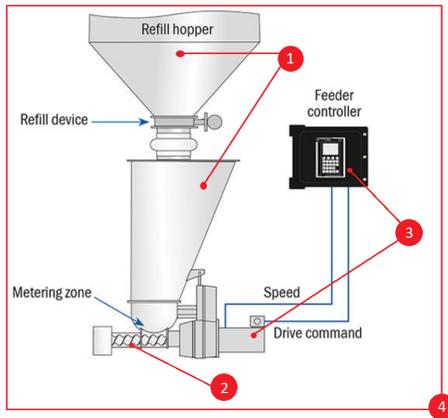
Una vez concluidas las secciones anteriores se procede a la realización de planos de fabricación, especificando cada detalle de terminación superficial, tolerancia dimensional, tipo de perforación, tipo de unión, etc. Cada componente, y materia prima para manufactura, deben

ser considerados y respectivamente cotizados para obtener la cubicación de todos estos, y finalmente un costo aproximado de producción y compra de los componentes necesarios.

# Capítulo 4

## Memorias de cálculo

El desarrollo de las memorias de cálculo contemplo los cuatro subsistemas principales (figura 4.1) del equipo que consideran: el almacenamiento y tolva de descarga, mecanismo de propulsión de polvos, electrónica general para regulación del flujo y sistema de conexiones de presurización.



1. Almacenamiento y tolva de descarga.
2. Mecanismo de propulsión de polvos.
3. Electrónica de regulación y propulsión de flujo.
4. Mecanismos y conexiones de presurización.

Figura 4.1: Sistema de alimentación de polvo simplificado.

Los cálculos asociados al sistema de almacenamiento y tolva de descarga (subsistema 1 en la figura 4.1) abordan principalmente: los diámetros de descarga críticos del equipo ( $D_{crit}$  y  $d_{crit}$ ) y ángulo de inclinación de la tolva  $\Theta_c$ . Estos parámetros son de suma importancia para efectos de diseño, puesto que permiten generar la geometría interior principal que estará en contacto directo con los polvos. En cuanto a los parámetros geométricos restantes, como espesores, sistemas de acoples y geometrías para instalación sellos, estos son detallados en la sección posterior de diseño.

Para obtener las dimensiones apropiadas del mecanismo de propulsión (subsistema 2 en la figura 4.1), que para este trabajo consiste en un tornillo alimentador, se realizaron múltiples procesos de comparación, que permitieron evaluar el desempeño del tornillo en diferentes condiciones de velocidad, flujo, torque, tiempo de respuesta y eficiencia. Mediante estas comparaciones, se lograron obtener los parámetros de mayor relevancia para el equipo: diámetro de diseño del tornillo alimentador  $D_{dis}$ , despeje radial de diseño  $c_{dis}$ , rendimiento másico  $R_m$  y torque requerido para la propulsión  $T$ . El diámetro  $D_{dis}$  del tornillo y despeje  $c_{dis}$  permiten

calcular la geometría de la camisa de alimentación del equipo, que es detallado de mejor manera en la sección de diseño.

La electrónica de regulación y propulsión de flujo de material (subsistema 3 de la figura 4.1) es dimensionada a partir de los parámetros de torque  $T$ , rendimiento másico  $R_m$  y carga del equipo. El funcionamiento de estos componentes es detallado en mayor profundidad en la sección de diseño, al igual que los componentes contemplados para los mecanismos y conexiones de presurización, que están incluidos en el subsistema 4 de la figura 4.1

## 4.1. Cálculo de tolva de alimentación

La tolva de alimentación corresponde al primer componente que presenta contacto con los polvos de deposición. Esta determina el volumen de almacenamiento y el caudal máximo de descarga que podrá tener el equipo de alimentación.

Para comenzar el cálculo de este subsistema se deben conocer los polvos a ser utilizados y las propiedades mecánicas de estos, para poder diseñar las geometrías requeridas. Como se mencionó anteriormente, los polvos para deposición por Cold Spray presentan granulometrías en el rango de 5–25, 15–45, 63–90, 75–150 [10], y partículas de 200 a 400 micrones de diámetro. En particular para este trabajo de título se pretende trabajar con polvos que fluctúen en los rangos no mayores a 50-60  $[\mu m]$  [10]. Como referencia el cobre electrolítico, ampliamente utilizado en estos procesos, posee un tamaño  $d_{90}$  de  $57.5 \pm 0.2 [\mu m]$  [10].

Las propiedades de fluidez de los polvos que permiten obtener los parámetros para calcular y diseñar una tolva de alimentación de polvos pueden ser calculadas utilizando el método de Jenike [9] y se describe en la norma ASTM D 6128 [11]. El polvo se analiza en un probador de celda de corte (figura 4.2) para determinar los coeficientes de fricción, que se utilizan en un modelo matemático y gráfico (figura 4.3 para determinar los parámetros de diseño de la tolva).

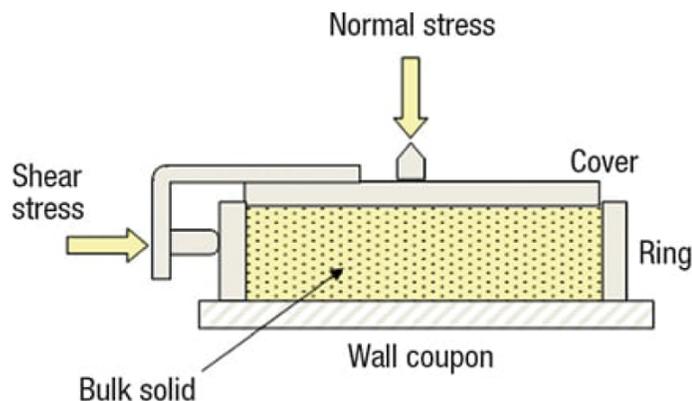


Figura 4.2: Celda de corte de Jenike[11]

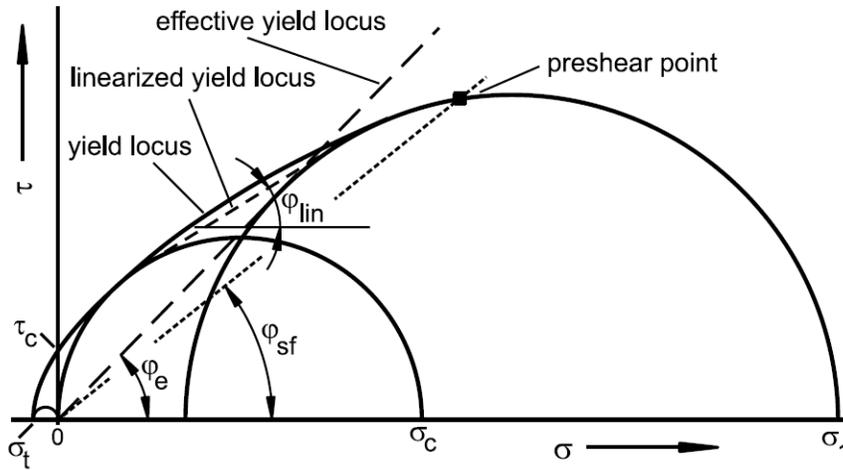


Figura 4.3: Gráfico de esfuerzo normal  $\sigma$  y corte  $\tau$ , obtenido de ensayo Jenike [11]

Los parámetros más importantes que se pueden obtener de este ensayo son la Función de Flujo del polvo, ángulo de fricción de muralla ( $\phi_w$ ), ángulo estático efectivo de fricción interna ( $\delta$ ), factor de flujo ( $ff$ ), ángulo de inclinación de descarga ( $\Theta$ ), esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ), esfuerzo de fluencia desconfinado ( $\sigma_c$ ), entre otros.

El equipo es diseñado para la deposición de polvos de múltiples elementos como aluminio, aleaciones de aluminio, acero y cobre. Dentro de estos materiales se elige al cobre como elemento para los parámetros de diseño, dado que presenta la mayor resistencia al flujo, mayor granulometría y menor esfuerzo de fluencia.

Para comenzar el proceso de diseño de la tolva de alimentación, se deben conocer los siguientes parámetros:

1. Función de flujo del polvo  $\sigma_c(\sigma_1)$
2. Ángulo de fricción de muralla ( $\phi_w$ )
3. Ángulo estático efectivo de fricción interna ( $\delta$ )

#### 4.1.1. Función de flujo de polvos $\sigma_c(\sigma_1)$

Conocer el comportamiento del flujo de polvos es de suma importancia para diseñar de manera apropiada la tolva de alimentación, y una de las mejores maneras de ilustrar el comportamiento de fluidez de los polvos es por medio de la función de flujo. La función de flujos de polvo es obtenida por medio del ensayó con celda de corte de Jenike [11], a partir de la comparación de los esfuerzos de fluencia de polvos desconfinados  $\sigma_c$  en función del esfuerzo máximo de consolidación  $\sigma_1$ . A medida que un polvo aumenta su esfuerzo de consolidación interno por el efecto de la celda de carga, aumenta el esfuerzo de desconfinamiento del material, a partir del aumento de este esfuerzo se puede proyectar el comportamiento del material ante diferentes cargas internas. Un material que no presenta gran cambio en su esfuerzo de desconfinamiento presenta una buena fluidez, como los polvos de hierro, aluminio y titanio

ilustrados en la figura 4.4, mientras que un material con mala fluidez presentara un aumento significativo en los esfuerzos de desconfinamiento a mediada que aumenta el esfuerzo de consolidación, como los polvos de molibdeno, bronce y manganeso, como se puede ver en la figura 4.4.

Para obtener este valor de los polvos que se desean utilizar en este equipo, se recurre a información bibliográfica [12].

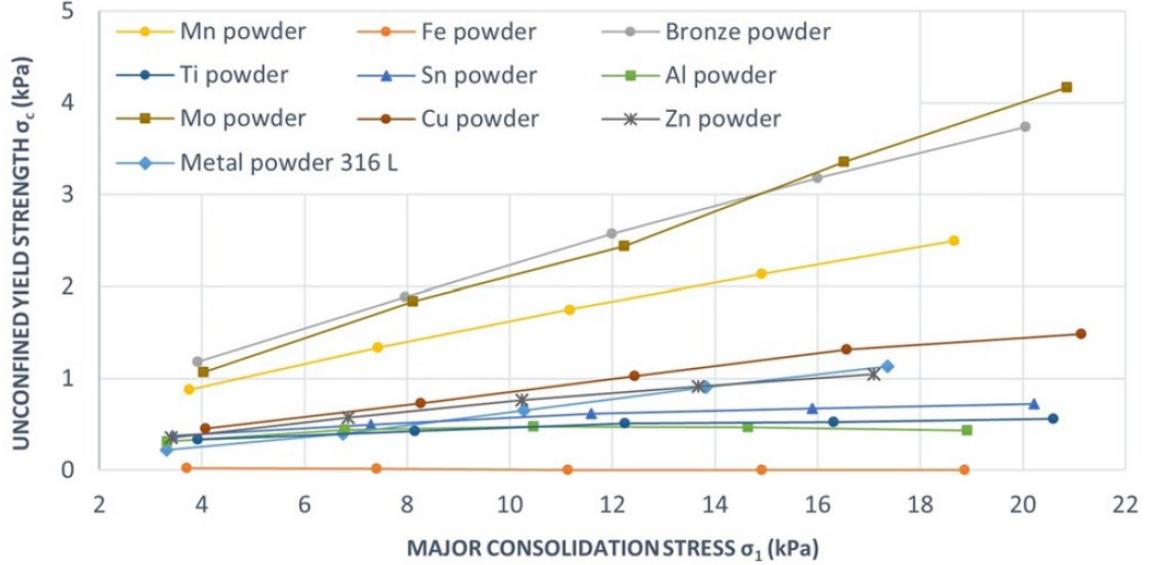


Figura 4.4: Funciones de flujo para múltiples polvos.[12]

Dado que el diseño debe considerar la operación con múltiples tipos de polvos, se debe evaluar la fluidez de polvos con el elemento que presente mayores complicaciones de flujo, en este caso ese material es el cobre. En particular para el cobre se obtiene la siguiente función de flujo, definida por la siguiente ecuación:

$$\sigma_c(\sigma_1) = -0.0002 \cdot \sigma_1^3 + 0.006 \cdot \sigma_1^2 + 0.011 \cdot \sigma_1 + 0.3295 \quad (4.1)$$

Donde:

- $\sigma_c$ : Esfuerzo de desconfinamiento [kPa].
- $\sigma_1$ : Esfuerzo máximo de consolidación [kPa].

La ecuación 4.1 se obtiene de un ajuste polinomial de tercer grado de los datos obtenidos experimentalmente del recurso bibliográfico [12].

### 4.1.2. Fricción con ángulo de muralla ( $\phi_w$ )

Luego de obtenida la función de flujo del polvo de interés se debe conocer el ángulo de fricción de muralla  $\phi_w$  entre el polvo y material del alimentador. El ángulo de fricción corresponde al parámetro angular que permite evaluar el grado de fricción o roce que existe entre el material a granel y el recipiente en el cual se encuentra, el ángulo representa la inclinación crítica que puede presentarse entre los materiales antes de presentarse deslizamiento. En este caso, el material de fabricación para el alimentador será acero inoxidable AISI 304 [13], que presenta un coeficiente de fricción estático  $\mu$  de 0.23 [14] con los polvos de cobre. Como factor de seguridad, y para anteponerse a la disponibilidad de material en el mercado, se decide realizar los cálculos considerando acero convencional al carbono como superficie de deslizamiento, ya que este presenta una mayor resistencia, para este caso, un coeficiente de fricción estático de 0.53 [14] con los polvos.

Considerando el coeficiente de fricción estático de 0.53 se puede determinar el ángulo de fricción de la muralla  $\phi_w$ , utilizando la siguiente ecuación:

$$\phi_w(\mu) = \arctan(\mu) \quad (4.2)$$

Donde:

- $\phi_w$ : Ángulo de fricción de muralla [°].
- $\mu$ : Coeficiente de fricción estático.

De esta manera, el ángulo de fricción de muralla obtenido para el alimentador fabricado con acero al carbono convencional sería:

$$\phi_{w0}(\mu_0) = 27.9^\circ \quad (4.3)$$

Donde  $\phi_{w0}$  es el ángulo de fricción de muralla para el cobre en un alimentador de acero al carbono y  $\mu_0$  corresponde al coeficiente de fricción estático entre estos dos elementos, es decir 0.53.

### 4.1.3. Ángulo estático efectivo de fricción interna ( $\delta$ )

El último parámetro a conocer es el ángulo estático efectivo de fricción interna  $\delta$ , el cual, al igual que la función de flujo de polvos, también es obtenido por medio de información bibliográfica [9], como se puede ver en la tabla de la figura 4.5. El ángulo estático efectivo de fricción interna corresponde al parámetro angular que representa la fricción o roce que esta presente en el estado estático interno de los polvos, a medida que este incrementa, las fuerzas de fricción interna de los polvos es mayor.

Metal Powders	$\delta$ (°)	$\sigma_{sd}$ (°)	$\delta_{min}$ (°)	$\delta_{max}$ (°)	$\phi$ (°)	$\sigma_{sd}$ (°)	$\phi_{min}$ (°)	$\phi_{max}$ (°)
Stainless Steel 316L	28.6	0.5	28.0	39.7	28.5	0.4	27.8	29.3
Zinc powder	29.9	0.3	29.3	30.7	29.6	0.5	28.8	30.7
Aluminum powder	32.9	1.2	31.4	35.2	32.9	1.2	31.4	35.2
Tin powder	37.8	2.8	33.8	42.2	36.1	1.8	33.3	38.8
Copper powder	39.1	0.7	38.2	40.6	38.1	0.5	37.4	39.1
Manganese powder	39.4	0.4	38.9	40.6	38.6	0.6	37.9	40.4
Bronze powder	39.9	0.5	39.0	40.7	38.7	0.7	37.6	40.1
Iron powder	40.0	0.7	39.0	41.6	39.4	0.5	38.7	40.7
Titanium powder	42.9	0.9	41.4	45.1	41.9	0.7	40.6	43.7
Ferrite powder	48.1	1.6	45.8	51.1	39.1	0.6	37.6	40.0

Figura 4.5: Ángulos de fricción interno para múltiples polvos.[9]

De esta manera, se puede utilizar los datos para extraer el ángulo estático efectivo de fricción interna efectivo ( $\delta$ ) con desviación estándar de medición ( $\sigma_{sd}$ ), mínimo ( $\delta_{min}$ ) y valor máximo ( $\delta_{max}$ ) para polvos metálicos individuales. Ángulo de fricción interno ( $\phi$ ) con desviación estándar ( $\sigma_{sd}$ ), valor mínimo ( $\phi_{min}$ ) y máximo ( $\phi_{max}$ ) para polvos metálicos individuales.

En particular analizando para el cobre, según los criterios mencionados en la sección de antecedentes, el ángulo estático efectivo de fricción interno  $\delta_0$  es 39.1 °, lo cual lo posiciona como un material con una fluidez promedio dentro de los otros polvos metálicos analizados.

$$\delta_0 = 39.1^\circ \quad (4.4)$$

#### 4.1.4. Cálculo de ángulo de descarga $\Theta$ para flujo másico

Por lo general, es deseable tener un flujo másico en silos o tolvas. Jenike [15] ha tabulado, para diferentes ángulos de fricción de la pared y ángulos de fricción interna, el ángulo máximo de la tolva para el que podemos obtener un flujo másico. Primero es necesario saber si se prefiere una tolva con forma cónica o si se puede utilizar una tolva en forma de cuña. Para esta aplicación en particular se decide optar por un diseño cónico, principalmente por dos razones: Facilidad de manufactura con una tolva cónica y geometría cilíndrica más apta para aplicaciones de alta presión.

Para calcular el ángulo de inclinación crítico  $\Theta_c$  que debe tener la tolva, que permita evitar problemas de estancamiento o flujo no uniforme, se recurre a la estimación gráfica desarrollada por Schulze [9], utilizada para estimar el ángulo de inclinación apropiado para obtener un flujo efectivo. Esta estimación gráfica requiere como parámetro de diseño el ángulo de fricción de muralla  $\phi_w$  y el ángulo de fricción interna de las partículas del polvo  $\delta$ . Conociendo estos dos parámetros es posible hacer uso del diagrama de la figura 4.6.

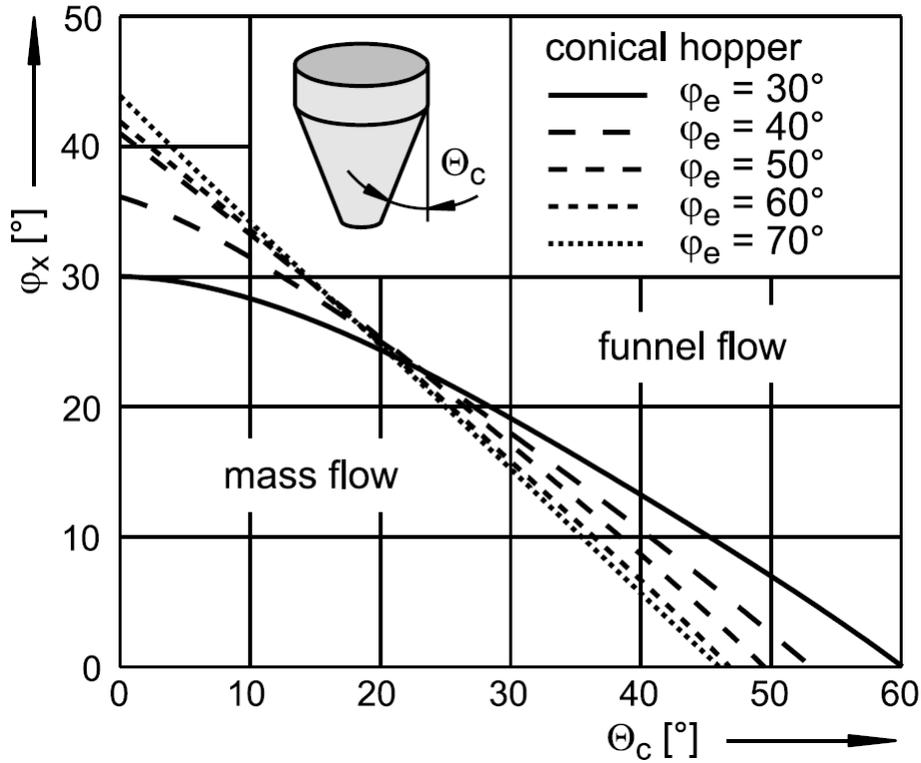


Figura 4.6: Diagrama de flujo central y másico para tolva cónica.  $\phi_e$ : ángulo estático efectivo de fricción interna,  $\phi_x$ : ángulo de fricción de muralla [9]

El diagrama permite calcular el ángulo de inclinación crítico  $\Theta_c$  de la tolva. Utilizando las curvas obtenidas para diferentes valores de ángulos estáticos efectivos de fricción interna  $\delta$ , se intercepta con el ángulo de fricción de muralla  $\phi_w$ , que presenten los materiales.

El ángulo de fricción de muralla obtenido para este alimentador es de  $27.9^\circ$ , y el ángulo de fricción interna de las partículas de los polvos es de  $39.1^\circ$ , se estima que el ángulo de inclinación mínimo que debe tener la tolva para desarrollar un flujo másico es de aproximadamente  $16^\circ$ .

$$\Theta_{c0}(\phi_{w0}, \delta_0) = 16^\circ \quad (4.5)$$

#### 4.1.5. Cálculo del factor de flujo $ff$

El cálculo del factor de flujo se realiza con el ángulo de fricción de muralla  $\phi_w$ . Al igual que el ángulo de inclinación mínimo, el factor de flujo se puede obtener por medio de una estimación gráfica [9]. No obstante, también es posible realizar este cálculo por medio numérico [16].

El método gráfico utiliza el diagrama de la figura 4.7,

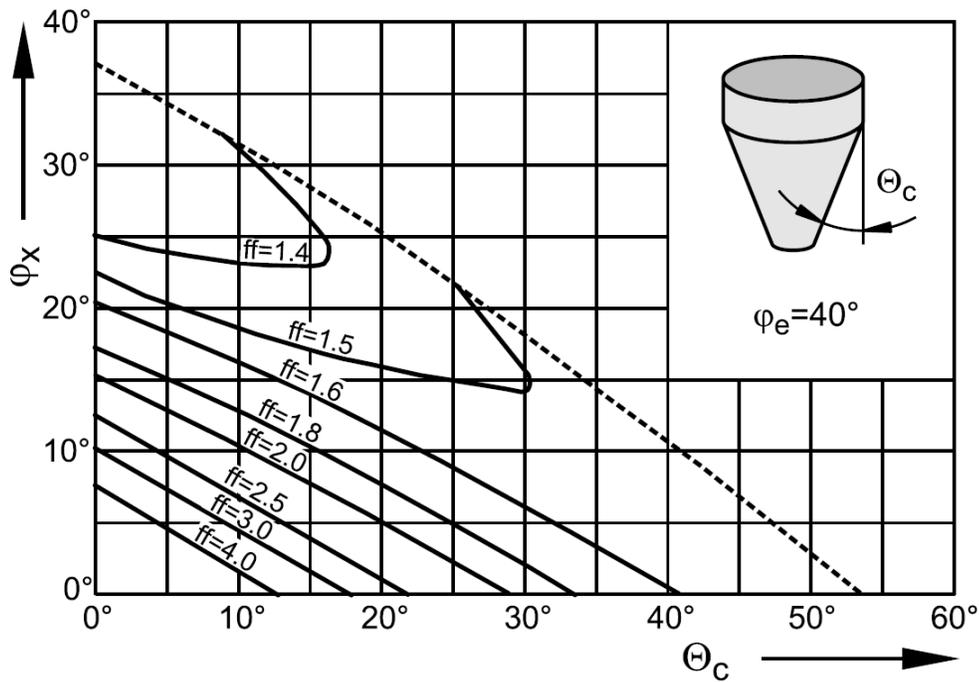


Figura 4.7: Factor de flujo,  $ff$ , para tolvas cónicas y  $\phi_e=40^\circ$ . [13]

Por medio de este diagrama es posible obtener el factor de flujo  $ff$  de la tolva. Como se puede ver en la figura 4.7, el diagrama comprende solo tolvas que presenten materiales con ángulos estáticos efectivos de fricción interna de alrededor de  $40^\circ$ . Para este caso el diagrama es apropiado, puesto que el ángulo de fricción interno de las partículas es  $\delta_0=39.1^\circ$ .

Conociendo el ángulo de descarga de la tolva  $\Theta_c$  y el ángulo de fricción de muralla  $\phi_x$  se puede obtener el valor del factor de flujo  $ff_{01}$  para este equipo. Analizando el diagrama, e interceptando ambos ángulos, se obtiene el siguiente factor de flujo:

$$ff_{01}(\Theta_c, \delta_0, \phi_{w0}) = 1.5 \quad (4.6)$$

Otra manera de obtener este valor es por un método numérico, desarrollado por Oko y Ruona [16]. El método numérico utiliza métodos de interpolación polinomial de Lagrange, con este método se pueden obtener diferentes ecuaciones que permiten obtener el factor de flujo como una función del ángulo de fricción de muralla, como se puede apreciar en la tabla de la figura 4.8.

Hopper type	$i$	Correlation ( $ff_i$ [-])	at $\delta_i$ (°)	$R^2$
Conical	0	$-0.00031\delta_w^2 - 0.0065\delta_w + 2.0707$	30	0.9960
	1	$-0.0001\delta_w^2 - 0.005\delta_w + 1.6251$	40	0.9984
	2	$-0.0004\delta_w^2 - 0.0065\delta_w + 1.4573$	50	0.9975
	3	$-0.00003\delta_w^2 - 0.0056\delta_w + 1.3474$	60	0.9989
Wedge	0	$-0.00009\delta_w^2 - 0.0059\delta_w + 2.0648$	30	0.9984
	1	$0.002\delta_w^2 - 0.0112\delta_w + 1.6083$	40	0.9871
	2	$-0.000002\delta_w^3 + 0.0002\delta_w^2 - 0.009\delta_w + 1.3027$	50	0.9878
	3	$-0.000003\delta_w^3 + 0.0003\delta_w^2 - 0.0104\delta_w + 1.2058$	60	0.9938

Figura 4.8: Factor de flujo,  $ff$ , en función del ángulo de fricción de muralla [14].

Como se puede notar en la tabla de la figura, el valor de factor de flujo depende de dos factores: Tipo de tolva, cónica o de cuña, y ángulo de fricción interna del material ( $\delta_i$  para la tabla). Conociendo ambos factores, se selecciona la primera y segunda ecuación para tolvas cónicas, para luego obtener el valor final por interpolación, tal que el valor del factor de flujo queda como:

$$ff_1(\phi_w) = -0.00031\phi_w^2 - 0.0065\phi_w + 2.0707 \quad (4.7)$$

$$ff_2(\phi_w) = -0.0001\phi_w^2 - 0.005\phi_w + 1.6251 \quad (4.8)$$

Luego, evaluando para el ángulo de fricción de muralla del equipo,  $\phi_{w0}=27.9$  [°]:

$$ff_1(\phi_{w0}) = 1.648 \quad (4.9)$$

$$ff_2(\phi_{w0}) = 1.408 \quad (4.10)$$

Interpolando los valores con respecto a  $\phi_{w0}$ , se obtiene el valor del factor de flujo:

$$ff_{02}(\phi_{w0}) = 1.429 \quad (4.11)$$

Dado que ambos métodos proporcionan valores similares se decide utilizar el promedio de ambos flujos, para obtener el valor final del factor de flujo:

$$ff_0(\phi_{w0}) = 1.465 \quad (4.12)$$

#### 4.1.6. Cálculo de esfuerzos de fluencia sin confinamiento $\sigma_{c,crit}$ y de consolidación $\sigma_{1,crit}$ críticos.

Los esfuerzos de fluencia sin confinamiento  $\sigma_{c,crit}$  y de consolidación críticos  $\sigma_{1,crit}$  permiten conocer la condición de esfuerzos que generan problemas de flujo por arqueamiento y *ratholing*

de material. Para calcular estos esfuerzos se recurre a la función de flujo  $\sigma_c(\sigma_1)$ , ecuación 4.1, y se utiliza la función del factor de flujo  $\sigma_1'(\sigma_1)$ .

La función del factor de flujo  $\sigma_1'(\sigma_1)$  se obtiene con el factor de flujo calculado,  $ff_0$ :

$$\sigma_1'(\sigma_1) = \frac{\sigma_1}{ff} \quad (4.13)$$

La intersección de la función de flujo  $\sigma_c(\sigma_1)$  y función del factor de flujo  $\sigma_1'(\sigma_1)$  determinan el punto crítico donde se experimentan los esfuerzos de fluencia sin confinamiento  $\sigma_{c,crit}$  y de consolidación  $\sigma_{1,crit}$  críticos, esto se puede ver de mejor manera en la figura 4.9.

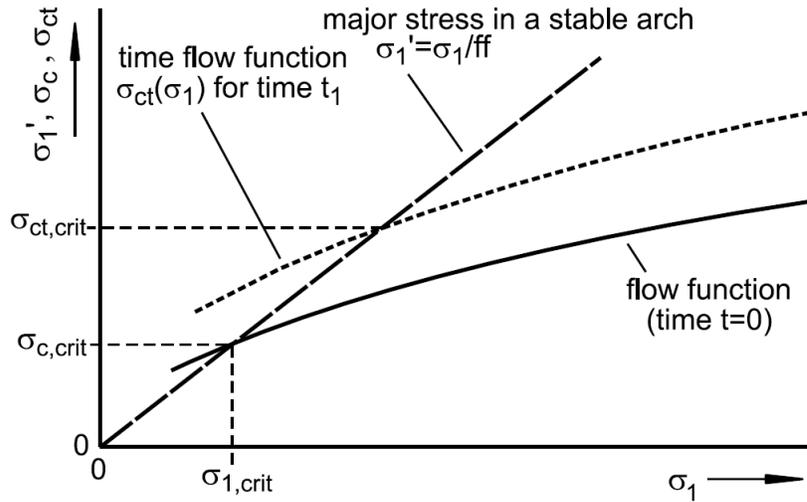


Figura 4.9: Función de flujo  $\sigma_c$ , función de factor de flujo  $\sigma_1'$  y función de flujo temporal  $\sigma_{ct}$  [16].

La función de flujo temporal  $\sigma_{ct}$  ilustra el comportamiento de los esfuerzos para un tiempo  $t_1$ , luego de que empieza el desplazamiento de material. El valor de esfuerzos de mayor interés para el diseño son los obtenidos en el tiempo  $t = 0$ , es decir la función de flujo  $\sigma_c$ . Obteniendo los esfuerzos críticos:

$$\sigma_{c,crit} = 0.336[MPa] \quad (4.14)$$

$$\sigma_{1,crit} = 0.481[MPa] \quad (4.15)$$

Conociendo estos valores es posible calcular el diámetro crítico de descarga que debe presentar el equipo para evitar problemas de descarga.

#### 4.1.7. Cálculo de diámetro de descarga crítico $d_{crit}$ y $D_{crit}$

El diámetro crítico de descarga para el sistema debe ser calculado para evitar dos problemas de estancamiento: Arqueamiento de material, con el diámetro  $d_{crit}$ , y *ratholing*, con el diámetro  $D_{crit}$ . El diámetro crítico para arqueamiento de material puede ser obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$d_{crit} = H(\Theta_c) \left( \frac{\sigma_{c,crit}}{g\rho_{b,crit}} \right) \quad (4.16)$$

La función  $H$  toma en consideración el tipo de geometría de la tolva de alimentación en conjunto con el ángulo de descarga  $\Theta_c$ , para finalmente proporcionar un valor escalar entre 1 y 3, tal como se puede ver en el esquema de la figura 4.10.

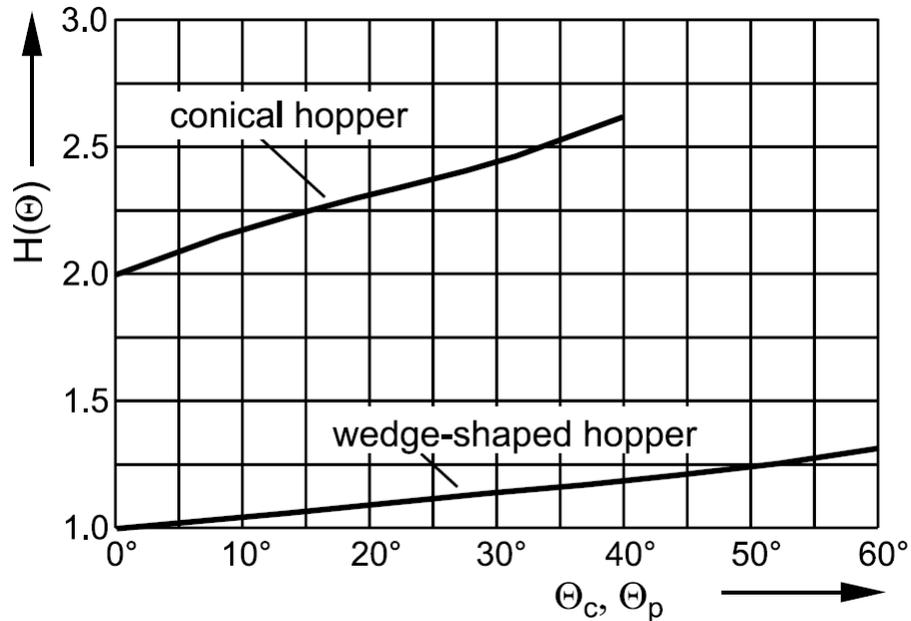


Figura 4.10: Función  $H(\Theta)$  [16].

Con el valor de inclinación de descarga  $\Theta_c$  y tipo de tolva cónica, la función  $H$  proporciona el siguiente valor escalar:

$$H(\Theta_c) = 2.25 \quad (4.17)$$

Luego, conociendo el esfuerzo de fluencia sin confinamiento  $\sigma_{c,crit}$ , y la densidad a granel de los polvos de cobre,  $\rho_{b,crit} = 4.8[g/cm^3]$  [17], se puede calcular el diámetro mínimo para evitar arqueamiento de material:

$$d_{crit} = H(\Theta_c) \left( \frac{\sigma_{c,crit}}{g\rho_{b,crit}} \right) = 2.25 \left( \frac{0.336[MPa]}{9.8[m/s] \cdot 4.8[g/cm^3]} \right) = 0.016[m] \quad (4.18)$$

$$d_{crit} = 16[mm] \quad (4.19)$$

Para calcular el diámetro critico necesario que evite el problema de flujo por *ratholing*, se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{crit} = f(\phi_i) \left( \frac{\sigma_{c,crit}}{g\rho_b,crit} \right) \quad (4.20)$$

La función  $f$  toma en consideración el valor del ángulo estático efectivo fricción interna de los polvos  $\delta$  ( $\phi_i$  en el diagrama de la figura 4.11) para proporcionar un valor escalar entre 2 y 12, tal como se puede ver en el esquema de la figura 4.10.

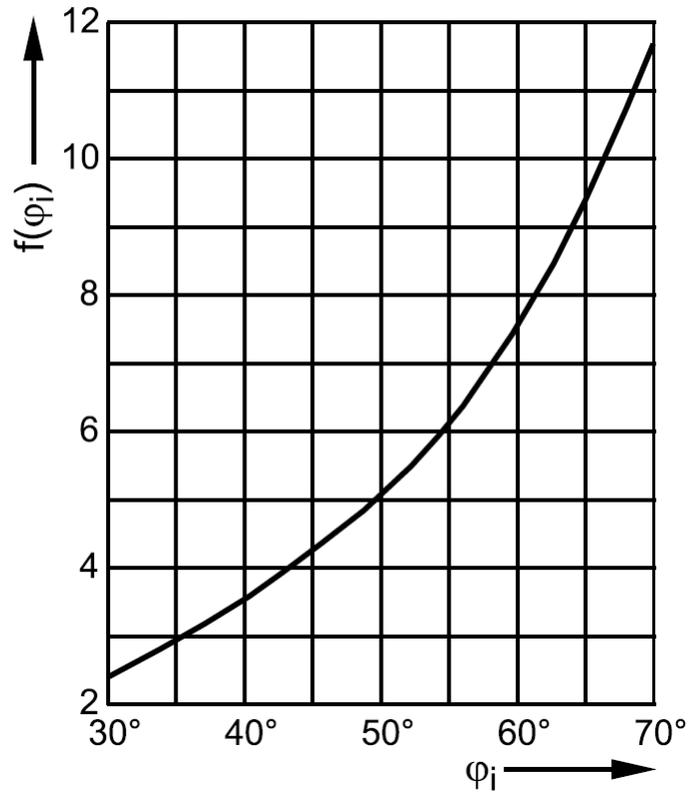


Figura 4.11: Función  $f(\phi_i)$  [16].

Con el valor del ángulo de fricción interna  $\delta_0$  la función  $f$  proporciona el siguiente valor escalar:

$$f(\delta_0) = 3.5 \quad (4.21)$$

Calculando el diámetro critico para evitar *ratholing*:

$$D_{crit} = f(\phi_i) \left( \frac{\sigma_{c,crit}}{g\rho_{b,crit}} \right) = 3.5 \left( \frac{0.336[MPa]}{9.8[m/s] \cdot 4.8[g/cm^3]} \right) = 0.025[m] \quad (4.22)$$

$$D_{crit} = 25[mm] \quad (4.23)$$

Considerando el diámetro de arqueamiento de material  $d_{crit}$  y *ratholing*,  $D_{crit}$ , se decide como parámetro de diseño el diámetro mayor, es decir  $D_{crit} = 25[mm]$ . Considerando como factor de seguridad un aumento de un 20 % del diámetro, el diámetro final de diseño es:

$$D_{dis} = 25 \cdot 0.2 + 25[mm] = 30[mm] \quad (4.24)$$

## 4.2. Cálculo de tornillo alimentador

El tornillo alimentador corresponde al segundo componente que presenta contacto con los polvos de deposición. El tornillo determina el flujo másico final de descarga que presenta el equipo y el componente que presenta el mayor grado de esfuerzo directo con los polvos.

Al igual que con el cálculo de la tolva de alimentación, se deben considerar todos los parámetros de los polvos a ser utilizados, especialmente los esfuerzo de fluencia, ya que el tornillo alimentador es el que proporcionara el impulso al material y se debe considerar la posibilidad de que se presente deformación plástica en el polvo.

Para desarrollar el diseño y evaluación del tornillo alimentador se hizo uso de los estudios y trabajos de Yongqin [18] en el modelamiento teórico y experimental del desempeño de un tornillo alimentador, y de Kawele [19] en el diseño y fabricación de un equipo de alimentación para un reactor de gasificación solar.

### 4.2.1. Selección de tornillo alimentador

Antes comenzar los cálculos de este componente de alimentación se debe comenzar seleccionando el tipo de tornillo que será utilizado para el sistema. Tomando inspiración del sistema desarrollado por Kawale [19], se decide hacer uso de una broca para perforaciones de madera, comúnmente denominada *barrenadora* u *auger*, dado que presenta una gran variedad de tamaños comerciales y dimensiones estandarizadas [20].

Para seleccionar el tamaño de tornillo adecuado se calcularon una serie de parámetros para un rango de tamaños posible, dentro de los cuales figuran:

1. Rendimiento másico  $R_m$  y volumétrico  $R_v$
2. Velocidades angulares para flujos másicos requeridos
3. Despeje radial entre tornillo y camisa
4. Fuerzas y momentos asociados

#### 4.2.1.1. Rendimientos máxicos $R_m$ y volumétricos $R_v$

El rendimiento máxico  $R_m$  y volumétrico  $R_v$  determinan la cantidad de masa y volumen de material que fluye por el tornillo por unidad de revolución. Este parámetro permite obtener el primer intervalo de dimensiones apto para el tornillo alimentador.

$R_m$  y  $R_v$  pueden ser obtenidos utilizando el método de Yongqin [19], como se puede ver en las ecuaciones 4.25 y 4.26:

$$R_v = A\eta_v P \quad (4.25)$$

$$R_m = A\eta_v \rho_b P \quad (4.26)$$

Donde:

- $A$ : Área equivalente del tornillo [ $mm^2$ ]
- $\eta_v$ : Eficiencia volumétrica
- $\rho_b$ : Densidad a granel del polvo [ $g/cm^3$ ]
- $P$ : Paso del tornillo [ $mm^2$ ]

La densidad a granel del polvo  $\rho_b$  es  $4.8[g/cm^3]$  [17], para efectos del polvo de cobre.

Para calcular el área equivalente  $A$  se utiliza la ecuación 4.27:

$$A = \pi[(R_o^2 - R_i^2) + (1 - k)(2cR_o + c^2)] \quad (4.27)$$

Donde:

- $R_o$ : Radio exterior del tornillo [ $mm$ ]
- $R_i$ : Radio del eje interior del tornillo [ $mm$ ]
- $k$ : Coeficiente de flujo
- $c$ : Despeje entre el tornillo y la camisa [ $mm$ ]

El coeficiente de flujo  $k$  corresponde a un coeficiente propuesto por Yongqin [17] que denota el grado de fluidez del material, este varía entre 0 y 1. El coeficiente  $c$  corresponde al despeje radial que existe entre el tornillo y la camisa de flujo de material.

Para calcular la eficiencia volumétrica  $\eta_v$  se utiliza la ecuación 4.28:

$$\eta_v = \frac{1}{\tan(\alpha_e)\tan(\alpha_e + \phi_s) + 1} \quad (4.28)$$

Donde:

- $\alpha_e$ : Ángulo de inclinación de la hélice del tornillo
- $\phi_s$ : Ángulo de fricción superficial

El ángulo de fricción superficial  $\phi_s$  puede ser obtenido utilizando la ecuación 4.2, en este caso considerando el coeficiente de fricción estático presente entre el polvo y la camisa. En este caso se considera una camisa de nylon 6/6 con un coeficiente de fricción estático de 0.4 [12]:

$$\phi_s(0.4) = \arctan(0.4) = 21^\circ \quad (4.29)$$

Para calcular el ángulo de inclinación de la hélice del tornillo  $\alpha_e$  se utiliza la ecuación 4.30:

$$\alpha_e = \arctan\left(\frac{P}{2\pi R_e}\right) \quad (4.30)$$

Donde:

- $R_e$ : Radio equivalente del tornillo [mm]

Para calcular el radio equivalente del tornillo  $R_e$  se utiliza la ecuación 4.31:

$$R_e = \frac{2}{3} \left( \frac{R_o^3 - R_i^3}{R_o^2 - R_i^2} \right) \quad (4.31)$$

Se evaluaron diámetros de tornillo desde 50 a 1 [mm]. A partir de estas dimensiones se analizó el rendimiento másico, volumétrico y velocidades angulares para los requerimientos de flujo másico de 5 a 50 [g/min] según la tabla 3.1. Se obtienen los siguientes resultados para el rendimiento másico:

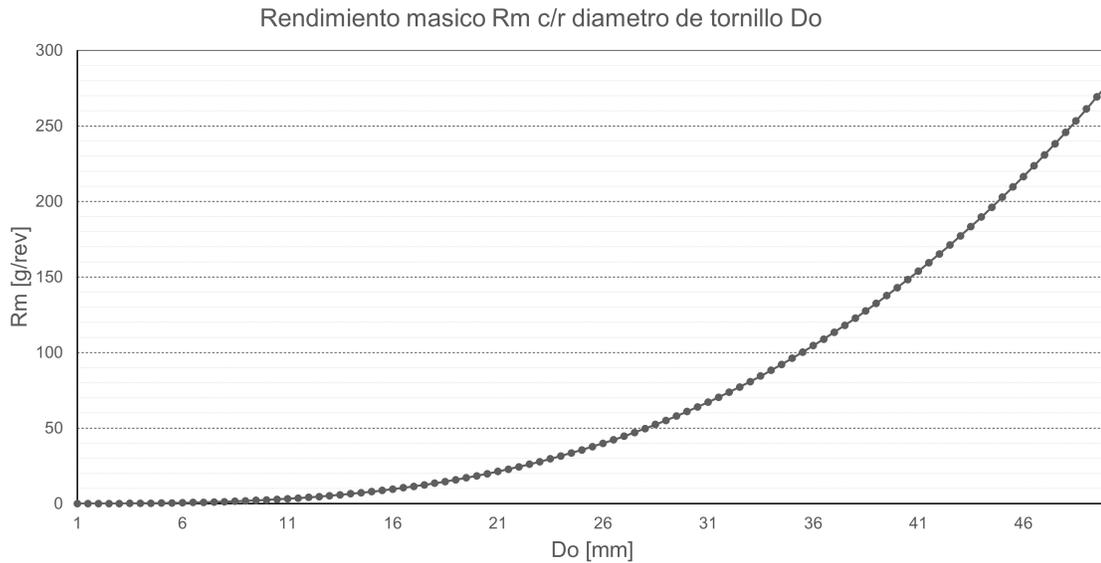


Figura 4.12: Rendimiento másico c/r al diámetro del tornillo, entre 1 y 50 [mm].

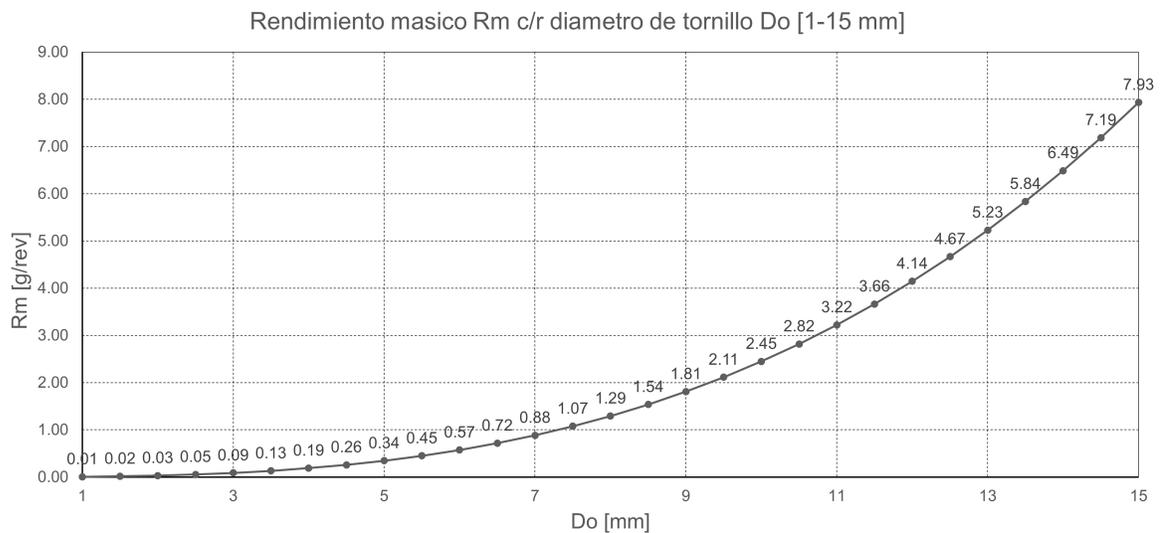


Figura 4.13: Rendimiento másico c/r al diámetro del tornillo, entre 1 y 15 [mm].

Las figuras 4.12 y 4.13 denotan un crecimiento exponencial del rendimiento másico a medida que se incrementa el diámetro del tornillo, lo cual concuerda cuando se analiza la ecuación 4.27. Analizando en mayor detalle el rango más acotado de diámetros con la figura 4.13, se puede notar que el rendimiento oscila entre los 0 y 8 [g/rev]. Para obtener un grado alto de precisión en el equipo, se estima que un rango apropiado de rendimiento debe oscilar entre 1 y 3 [g/rev], considerando que el equipo debe proporcionar como cota mínima un flujo másico de 5 [g/min], por lo tanto, el rango de diámetros apropiados debe situarse entre los 7 y 10 [mm].

A partir de las consideraciones anteriores se analizan las velocidades angulares  $w_r$  necesarias para obtener los flujos máxicos de 5 y 50  $[g/min]$ :

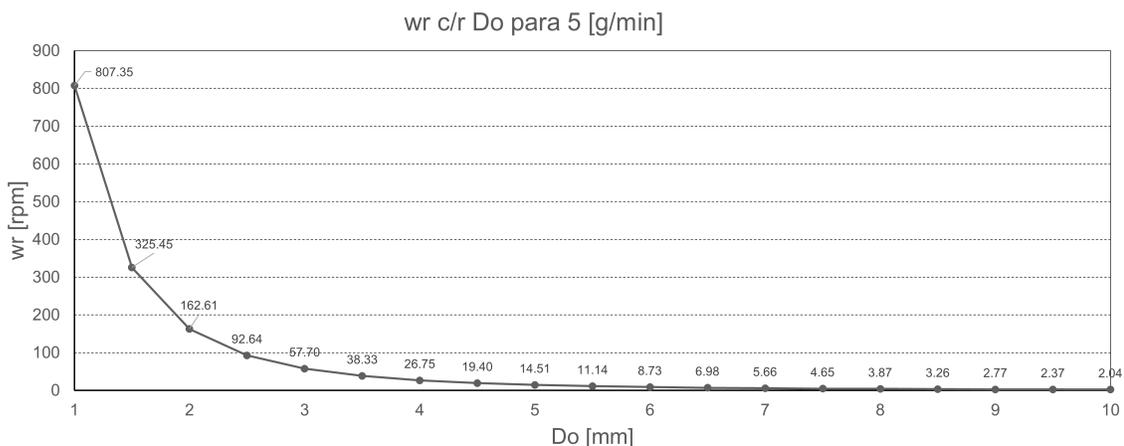


Figura 4.14: Velocidad angular con respecto al diámetro del tornillo para obtener 5  $[g/min]$ .

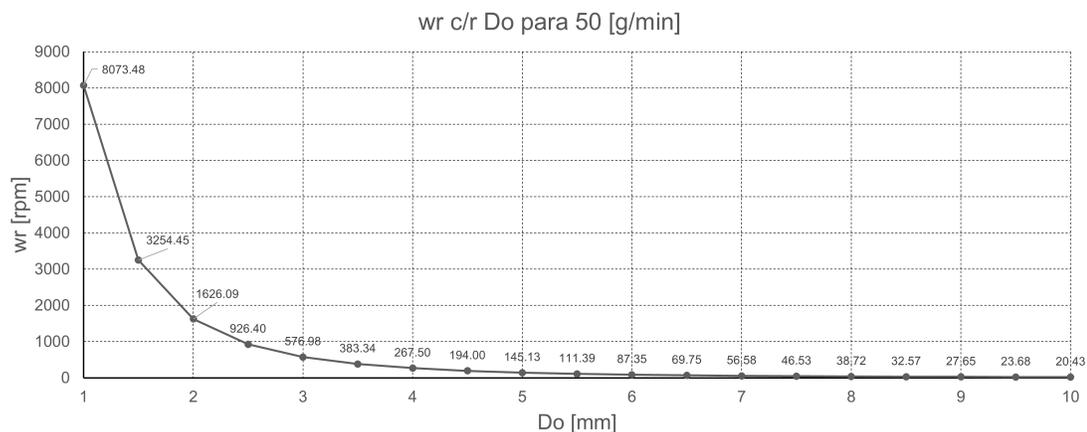


Figura 4.15: Velocidad angular con respecto al diámetro del tornillo para obtener 50  $[g/min]$ .

Las figuras 4.14 y 4.15 permiten discriminar los diámetros por la velocidad angular requerida para suministrar los flujos respectivos. La propulsión del tornillo sera llevada a cabo por el actuar de un motor paso a paso NEMA 34 [23], estos motores presentan un rango de eficiencia de retención de torque limitado para velocidades angulares específicas.

En particular para los motores NEMA 34 de entre 3.0 y 6.0 [A], la eficiencia comienza a decaer significativamente una vez que superan los 100 [rpm], como se puede apreciar en la figura 4.17.

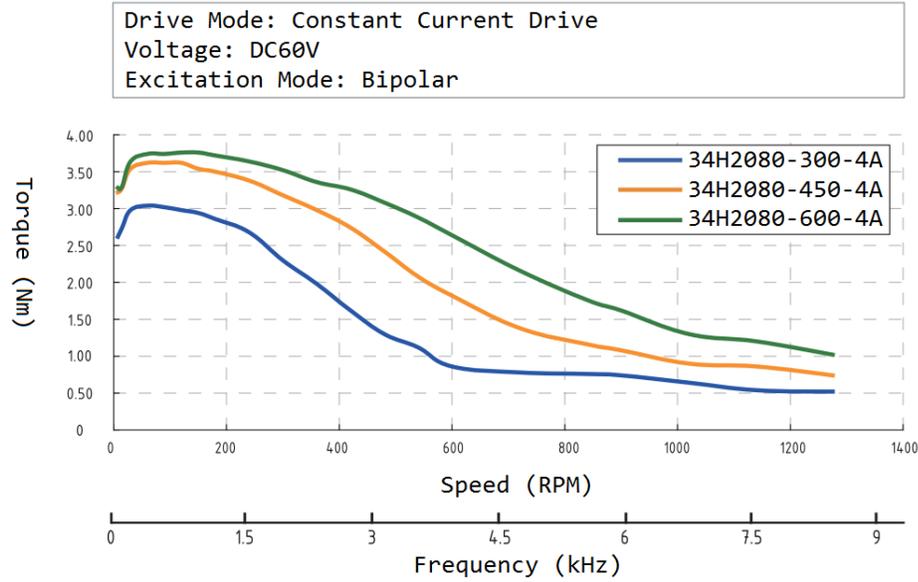


Figura 4.16: Curva de desempeño de torque con respecto a la velocidad angular [23].

De esta manera, analizando la figura 4.15 se puede concluir que se debe procurar utilizar brocas que presenten diámetros superiores a 5.5 [mm], para evitar alcanzar el límite de eficiencia del motor. Dado que en el futuro el equipo podría ser utilizado en mayores tasas de deposición, que requieran flujos máxicos superiores a 50 [g/min], se estima que el diámetro mínimo debería ser de aproximadamente 8 [mm], para mantener un factor de seguridad con el incremento de velocidad.

#### 4.2.1.2. Cálculo de despeje radial $c$

El despeje radial  $c$  constituye una de las consideraciones de diseño más relevantes del sistema de propulsión, ya que determina la capa o película de material que existirá entre la camisa de flujo y el tornillo. Además, esta dimensión determinará el grado de esfuerzo que se generará entre el polvo y el tornillo que propulsa el material.

Para evaluar los esfuerzos presentes en la interacción del tornillo y los polvos se utilizó el modelo Yongqin [19], que permite calcular los esfuerzos axiales  $\sigma_x$ , esfuerzos radiales  $\sigma_w$  y esfuerzos de corte  $\tau_w$ , que son ilustrados en la figura 4.17:

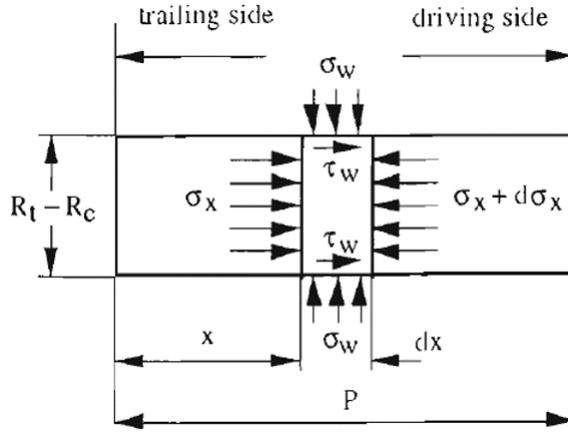


Figura 4.17: Esfuerzos generados en la parte inferior de la camisa [19].

Para calcular estos esfuerzos se recurre a las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_x = \sigma_o \exp\left(\frac{2\mu_w \lambda_s}{R_t - R_c} x\right) \quad (4.32)$$

Donde:

- $\sigma_o$ : Esfuerzo ejercido por el polvo en la tolva de alimentación [MPa]
- $R_t$ : Radio interior de la camisa [mm]
- $R_c$ : Radio exterior del tornillo [mm]
- $\mu_w$ : Coeficiente de fricción superficial
- $\lambda_s$ : Razón de esfuerzo entre polvo y superficie

$$\sigma_w = \sigma_o \frac{R_t - R_c}{2\mu_w P} \left[ \exp\left(\frac{2\mu_w \lambda_s P}{R_t - R_c}\right) - 1 \right] \quad (4.33)$$

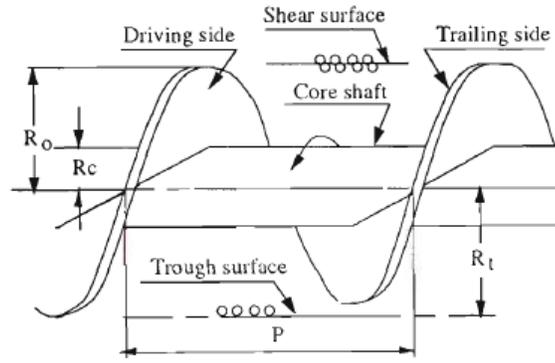
$$\tau_w = \sigma_w \mu_w \quad (4.34)$$

Para calcular la razón de esfuerzo entre polvo y superficie se utiliza la ecuación 4.35:

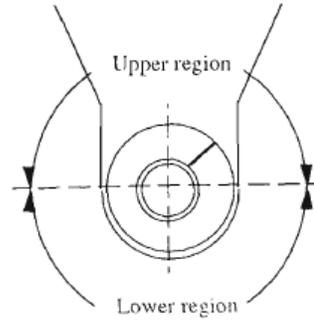
$$\lambda_s = \frac{1}{1 + 2\mu_d^2 + 2\sqrt{(1 + \mu_d^2)(\mu_d^2 - \mu_w^2)}} \quad (4.35)$$

Donde  $\mu_d$  corresponde a la tangente del ángulo de fricción interno de los polvos  $\delta$ .

$\sigma_o$  corresponde al esfuerzo ejercido por los polvos en la parte superior del equipo, como se puede ver en la zona (b) de la figura 4.18.



(a)



(b)

Figura 4.18: Ubicación del polvo dentro de un paso. (a) Cinco superficies de contacto; (b) Dos regiones básicas [19].

Para calcular el esfuerzo  $\sigma_o$  se utiliza la ecuación 4.36

$$\sigma_o = q_{f\sigma_1} \gamma B \quad (4.36)$$

Donde:

- $q_{f\sigma_1}$ : Factor de recarga adimensional
- $\gamma$ : Peso específico del polvo [ $N/m^3$ ]
- $B$ : Diámetro de descarga de la tolva de alimentación [ $mm$ ]

El factor  $q_{f\sigma_1}$  se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$q_{f\sigma_1} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^m \left(\frac{Y(1 + \sin\delta)}{2(X - 1)\sin\alpha_h}\right) \quad (4.37)$$

$$X = \frac{2^m \sin\delta}{1 - \sin\delta} \left[\frac{\sin(2\beta_h + \alpha_h)}{\sin\alpha_h} + 1\right] \quad (4.38)$$

$$Y = \frac{(2[1 - \cos(\beta_h + \alpha_h)])^m (\beta_h + \alpha_h)^{1-m} \sin\alpha_h + \sin\beta_h \sin^{1+m}(\beta_h + \alpha_h)}{(1 - \sin\delta) \sin^{2+m}(\beta_h + \alpha_h)} \quad (4.39)$$

$$\beta_h = \frac{1}{2} \left[ \phi_w + \sin^{-1} \left( \frac{\sin\phi_h}{\sin\delta} \right) \right] \quad (4.40)$$

Donde:

- $\phi_w$ : Ángulo de fricción de muralla
- $\delta$ : Ángulo de fricción interna de los polvos
- $\alpha_h$ : Medio ángulo de inclinación de tolva de alimentación
- $\beta_h$ : Ángulo determinado por la ecuación 4.40

Utilizando las ecuaciones 4.37, 4.38, 4.39 y 4.40 es posible obtener el valor del esfuerzo  $\sigma_o$  para el alimentador diseñado:

$$\sigma_o = 475.7[Pa] = 0.000475[MPa] \quad (4.41)$$

Yongqin estima que el despeje radial debe ser entre 5 y 10 veces el diámetro de partícula promedio del material [18], por lo cual, considerando un tamaño de partícula máximo promedio de 60 [ $\mu m$ ], según la tabla 3.1, el despeje radial  $c$  del equipo es evaluado entre 0.2 y 0.4 [mm]

Dado que el intervalo de análisis fue acotado entre 8 y 10 [mm], se realiza la evaluación de esfuerzos para este intervalo. Los resultados se muestran en las figuras 4.28, 4.20 y 4.21:

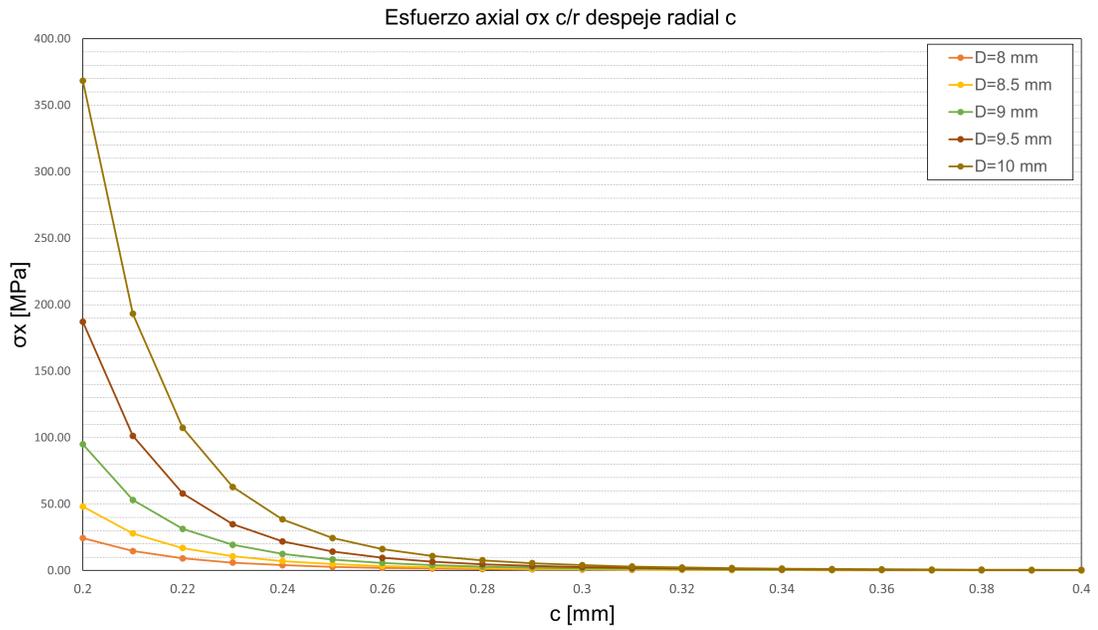


Figura 4.19: Esfuerzo axial con respecto al despeje radial.

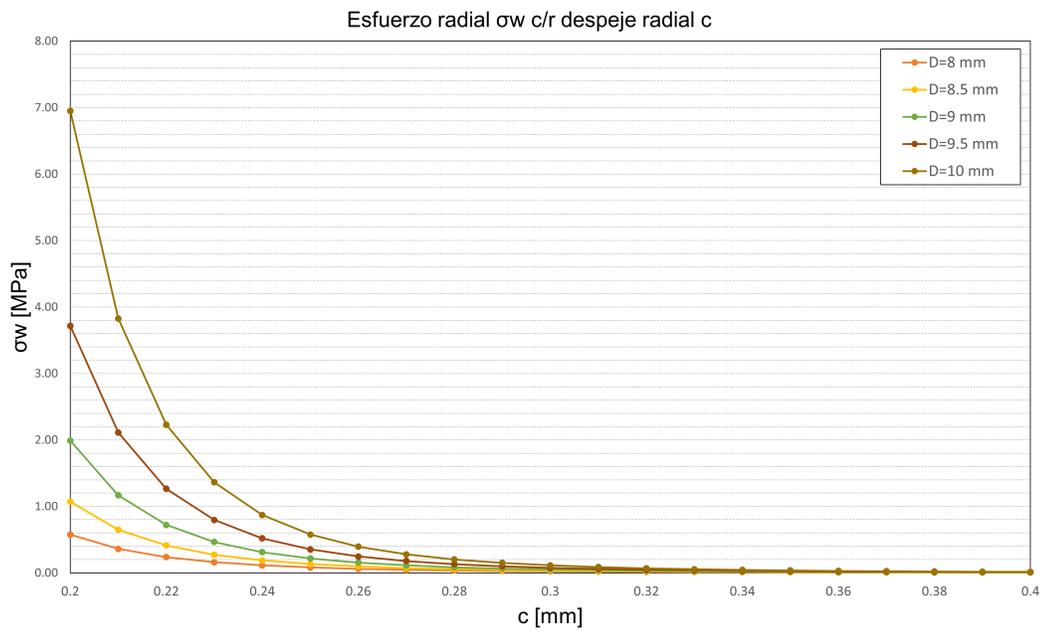


Figura 4.20: Esfuerzo radial con respecto al despeje radial.

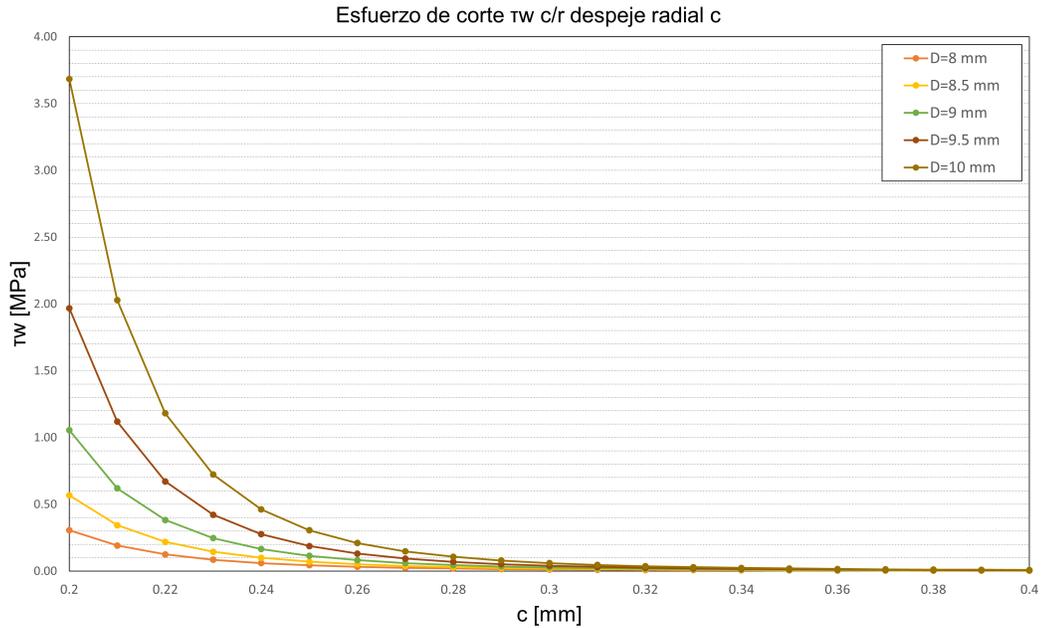


Figura 4.21: Esfuerzo de corte con respecto al despeje radial

De las figuras anteriores es posible notar que los esfuerzos máximos se presentan en la dirección axial del movimiento, es decir  $\sigma_x$ , en la figura 4.28. Dentro de los polvos a ser utilizados en el equipo, el cobre presenta el menor esfuerzo de fluencia (110-128 [MPa]) [24], considerando lo anterior en el diseño se procura utilizar un despeje radial mayor a 0.3 [mm], para evitar problemas de deformación plástica.

El despeje radial  $c$  también influye en el tiempo de respuesta que presentara el equipo. A medida que  $c$  aumenta, la capa inferior de material (llamada *capa muerta* como se puede ver en la figura 4.22) aumenta en volumen, por lo cual el tiempo que demora en entrar en operación la maquina es mayor.

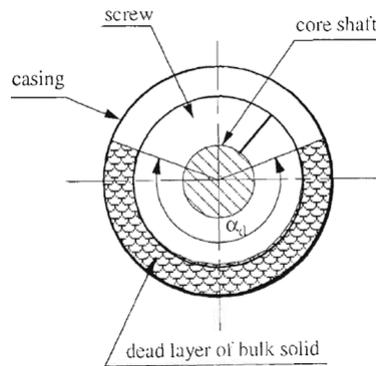


Figura 4.22: Capa de material estático en la camisa [19].

El volumen depositado en la parte inferior de la camisa esta dado por la siguiente ecuación:

$$V_{mt} = A_{mt}L_o \quad (4.42)$$

$$A_{mt} = \frac{1}{2}\alpha_d(R_t^2 - R_o^2) \quad (4.43)$$

Donde:

- $\alpha_d$ : Ángulo de descanso de material estático
- $R_t$ : Radio de la camisa
- $R_o$ : Radio del tornillo
- $L_o$ : Largo efectivo del tornillo

Para evaluar el volumen muerto o estático de material se analizan los diámetros de 8 a 10 [mm], como se puede ver en la figura 4.23.

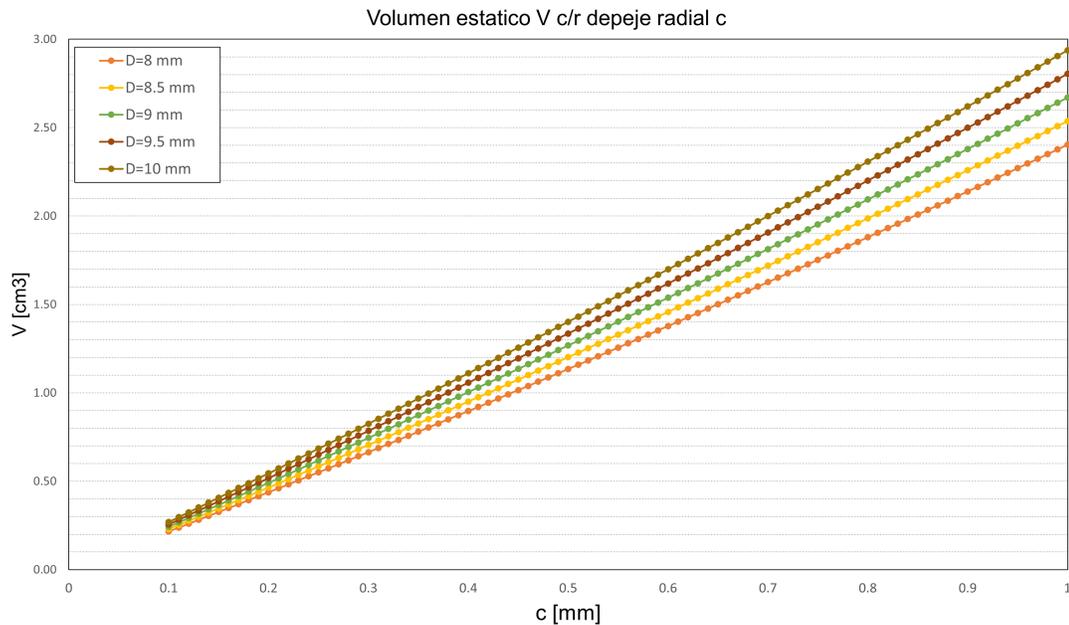


Figura 4.23: Volumen estático de polvo con respecto al despeje radial.

Conociendo el volumen estático, se evalúa en tiempo de respuesta,  $TDR$ , para el rango de diámetros, considerando el menor flujo másico, de 5 [g/min]. Los resultados se pueden ver en el gráfico de la figura 4.24.

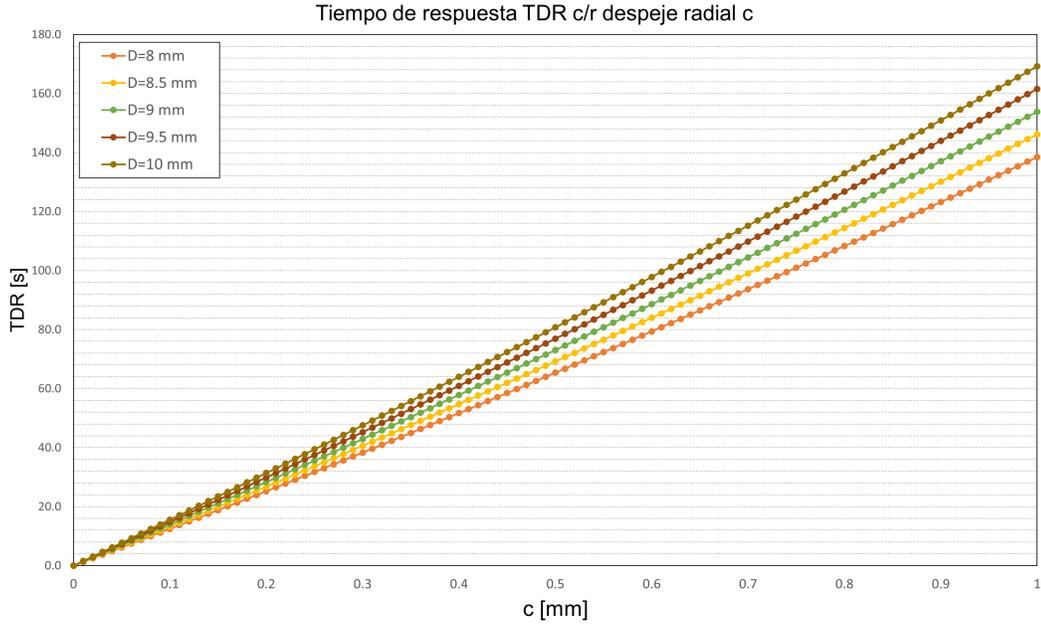


Figura 4.24: Tiempo de respuesta con respecto al despeje radial.

Considerando que los rangos de tiempo de respuesta fluctúan entre 20 y 180 [s], se considera aceptable que el equipo comience el proceso de alimentación a los 2 [min] (120 [s]) como periodo máximo.

Considerando los factores de esfuerzo y tiempo de respuesta del equipo, se opta por un despeje radial de 0.5 [mm], asumiendo un factor de seguridad del 25 %.

$$c_{dis} = 0.5[mm] \quad (4.44)$$

Dado que el intervalo crítico resulta ser entre 8 y 10 [mm] y en función de los análisis anteriores, se decide optar por una broca barrenadora de 9.5 [mm](3/8 [in]) [20] principalmente por la gran disponibilidad de esta dimensión en el mercado.

$$D_{dis} = 9.5[mm] \quad (4.45)$$

## 4.2.2. Cálculo de torque

Para propulsar el material a una velocidad apropiada sin pérdida de eficiencia el motor debe ser capaz generar el torque apropiado, teniendo en consideración todos los factores de roce. Para seleccionar el motor adecuado para la propulsión de polvos se hace uso del modelo de Yongqin [18], que permite calcular las fuerzas ejercidas en el tornillo y determinar el torque requerido.

Las fuerzas actúan en las cinco superficies presentes de la figura (a) 4.18, cada superficie contribuye al roce en el sistema. Las fuerzas respectivas son calculadas con las siguientes ecuaciones.

#### 4.2.2.1. Fuerza axial en superficie de corte superior $F_{ua}$

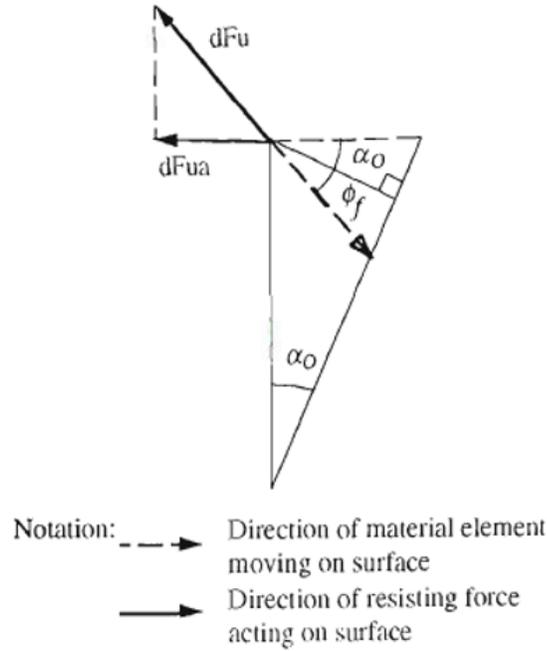


Figura 4.25: Diagrama de aplicación de fuerza axial  $F_{ua}$  [19].

$$F_{ua} = \frac{\pi}{2} \mu_e c_p \cos(\alpha_o + \phi_f) \sigma_o D^2 = k_u \sigma_o D^2 \quad (4.46)$$

$$k_u = \frac{\pi}{2} \mu_e c_p \cos(\alpha_o + \phi_f) \quad (4.47)$$

Donde:

- $\alpha_o$ : Ángulo inclinación equivalente de la hélice
- $\phi_f$ : Ángulo de fricción de muralla de los polvos con la hélice
- $\mu_e$ : Coeficiente de fricción equivalente de los polvos
- $c_p$ : Razón entre el largo de paso y el diámetro del tornillo.
- $D$ : Diámetro de tornillo

#### 4.2.2.2. Fuerza axial en superficie de eje central $F_{ca}$

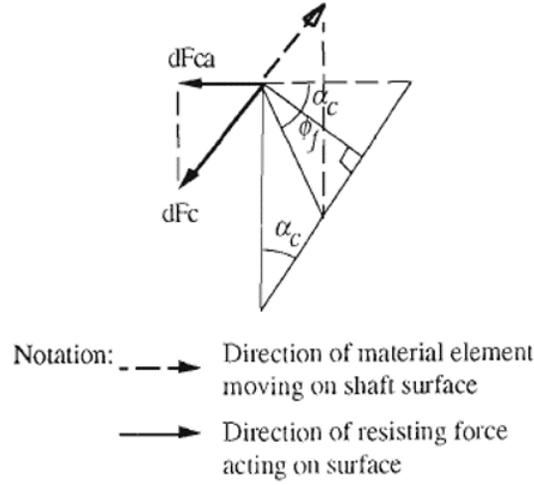


Figura 4.26: Diagrama de aplicación de fuerza axial  $F_{ca}$  [19].

$$F_{ca} = \frac{\pi c_d (c_t - c_d)}{4} \sin \alpha_c \left[ \exp \left( \frac{4 \mu_w \lambda_s c_p}{c_t - c_d} \right) - 1 \right] \sigma_o D^2 = k_c \sigma_o D^2 \quad (4.48)$$

$$k_c = \frac{\pi c_d (c_t - c_d)}{4} \sin \alpha_c \left[ \exp \left( \frac{4 \mu_w \lambda_s c_p}{c_t - c_d} \right) - 1 \right] \quad (4.49)$$

Donde:

- $\alpha_c$ : Ángulo inclinación equivalente en el eje interior la hélice
- $\mu_w$ : Coeficiente de fricción de muralla entre los polvos y superficie de la camisa
- $c_t$ : Razón entre radio de la camisa y radio del tornillo
- $c_d$ : Razón entre diámetro del eje interior de tornillo a diámetro de tornillo

#### 4.2.2.3. Fuerza axial en superficie de corte superior $F_{la}$

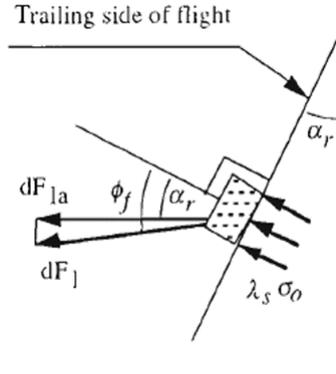


Figura 4.27: Diagrama de aplicación de fuerza axial  $F_{la}$  [19].

$$F_{la} = \lambda_s \left[ \frac{\pi}{4}(1 - c_d^2) + \frac{\mu_f c_p}{2}(1 - c_d) \right] \sigma_o D^2 = k_l \sigma_o D^2 \quad (4.50)$$

$$k_l = \lambda_s \left[ \frac{\pi}{4}(1 - c_d^2) + \frac{\mu_f c_p}{2}(1 - c_d) \right] \quad (4.51)$$

Donde  $\mu_f$  coeficiente de fricción de muralla entre los polvos y superficie de la hélice

#### 4.2.2.4. Fuerza axial en superficie de la camisa $F_{ta}$

$$F_{ta} = \frac{\pi}{8} c_t (c_t - c_d) \cos(\alpha_o + \phi_f) \left[ \exp\left(\frac{4\mu_w \lambda_s c_p}{c_t - c_d}\right) - 1 \right] \sigma_o D^2 = k_t \sigma_o D^2 \quad (4.52)$$

$$k_t = \frac{\pi}{8} c_t (c_t - c_d) \cos(\alpha_o + \phi_f) \left[ \exp\left(\frac{4\mu_w \lambda_s c_p}{c_t - c_d}\right) - 1 \right] \quad (4.53)$$

#### 4.2.2.5. Fuerza axial en superficie de corte superior $F_{da}$

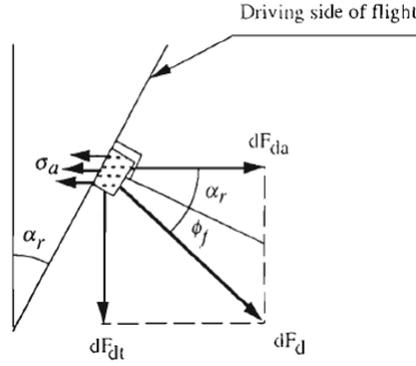


Figura 4.28: Esfuerzo axial con respecto al despeje radial [19]

$$F_{da} = \frac{4(k_u + k_c + k_l + k_t)(R_o^2 - R_c^2)}{(1 - c_d^2)} \sigma_o \quad (4.54)$$

$$\sigma_a = \frac{F_{da}}{\pi(R_o^2 - R_c^2)} \quad (4.55)$$

$$K_\sigma = \frac{4(k_u + k_c + k_l + k_t)(R_o^2 - R_c^2)}{(1 - c_d^2)} \sigma_o \quad (4.56)$$

Finalmente, utilizando la ecuación 4.55 es posible obtener el torque necesario utilizando la ecuación 4.57:

$$T = 2\pi\sigma_a \int_{R_o}^{R_c} r^2 \tan(\alpha_r \phi_f) dr \quad (4.57)$$

Donde  $r$  es el radio que fluctúa entre  $R_c$  y  $R_o$ ,  $\alpha_r$  corresponde al ángulo de la hélice para el radio  $r$ .

A partir de la ecuación 4.57 es posible determinar el torque requerido con respecto al diámetro del tornillo  $D_o$  y el despeje radial de la camisa  $c$ :

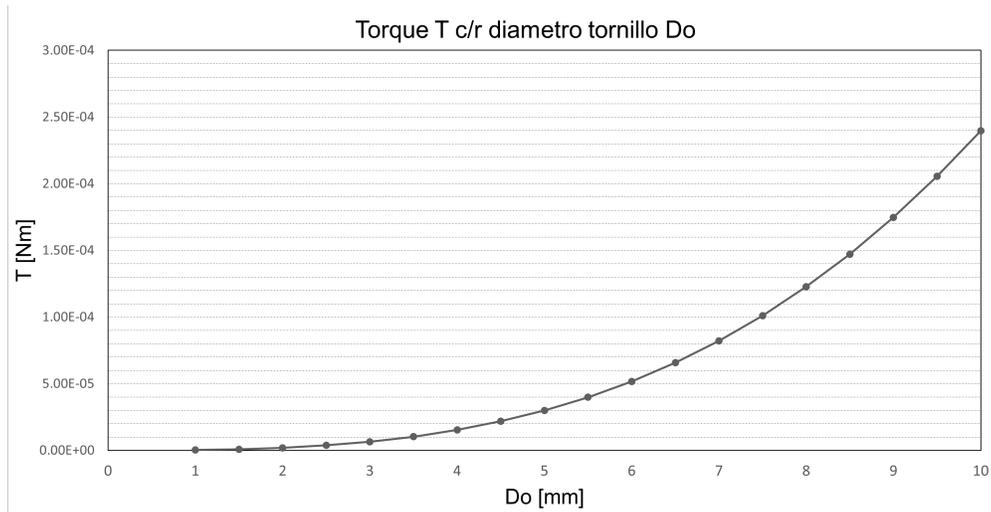


Figura 4.29: Torque requerido con respecto al diámetro de tornillo.

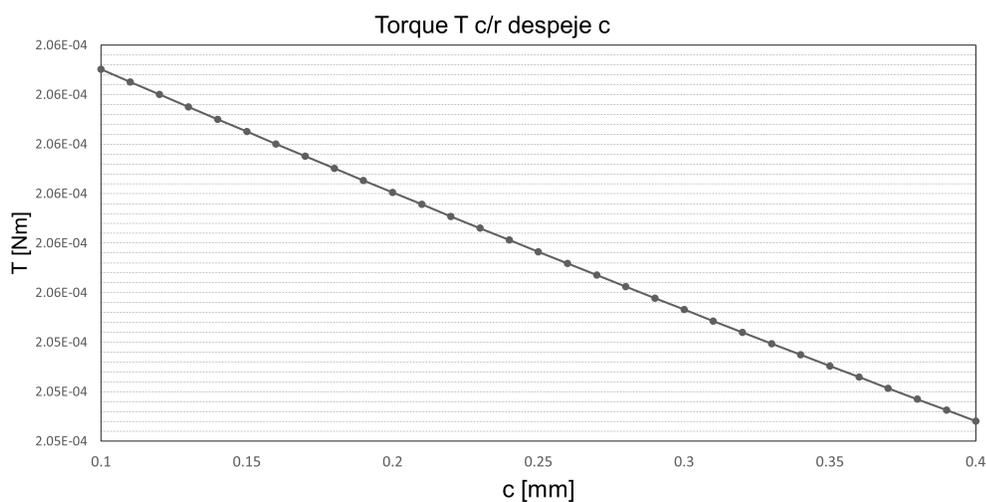


Figura 4.30: Torque requerido con respecto al despeje radial de la camisa.

Analizando los gráficos de las figuras 4.29 y 4.21 es posible notar que los torques requeridos para el intervalo de 1 a 10 [mm] de diámetro y para despeje radial de 0.1 a 0.4 [mm] son bastante bajos, del orden de  $10^{-4}$  [Nm]. Considerando que existirán otras fuentes de roce más significativas, como el sello radial y la contra punta para el tornillo, se decide optar por un motor NEMA 34 [23] que suministra torques desde 4.8 [Nm] hasta 12 [Nm], lo cual permite tener un amplio rango para ajustar el equipo en caso de ser necesario mayor o menor torque.

### 4.3. Cálculo de uniones empernadas

Teniendo en consideración las presiones de trabajo del equipo, se realizan los cálculos correspondientes para las empernaduras que permiten la conexión por flange de los distintos componentes de la tolva de alimentación y el tornillo alimentador. Para comenzar los cálculos se requirieron las siguientes dimensiones [39]:

#### 4.3.1. Dimensiones del hilo

Tabla 4.1: Dimensiones del hilo (interno y externo)

	Símbolo	Unidades imperiales	Unidades SI
Diámetro Nominal (Mayor)	$d_{nom}$	in	mm
Hilos por pulgada	$TPI$	in	—
Paso	$P_b$	in	mm

En el caso de hilos métricos, el perfil del hilo se basa en un parámetro  $H$ , la altura del triángulo fundamental. El valor de  $H$  está relacionado con el paso de rosca,  $P_b$  por:

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P_b \quad (4.58)$$

Tabla 4.2: Dimensiones exteriores de hilo

Diámetro menor	$d_{m.ext} = d_{nom} - 1.226869 \cdot P_b$
Diámetro del paso	$d_{p.ext} = d_{nom} - 0.64951905 \cdot P_b$

Tabla 4.3: Dimensiones interiores de hilo

Diámetro menor	$d_{m.int} = d_{nom} - 1.08253175 \cdot P_b$
Diámetro del paso	$d_{p.int} = d_{nom} - 0.64951905 \cdot P_b$

Tabla 4.4: Áreas exteriores de hilo

Área nominal	$A_{nom} = \frac{\pi}{4} d_{nom}^2$
Área de esfuerzo de tracción	$A_t = \frac{\pi}{4} (d_{nom} - 0.9382P)^2$
Área de esfuerzo de corte	$A_m = \frac{\pi}{4} d_{m.ext}^2$

#### 4.3.2. Precarga del sistema

Los pernos se instalan con una precarga que asegura que los miembros de la unión permanezcan sujetos y en compresión durante toda la vida de la unión. La precarga también es importante para uniones con una carga aplicada cíclicamente. La precarga aumentará la tensión media, pero reducirá la tensión alterna.

### 4.3.2.1. Valores de precarga

La precarga se especifica comúnmente como un porcentaje del límite elástico a la tracción del material del perno,  $S_{ty}$ . Para calcular la fuerza de precarga como porcentaje del límite elástico, se utiliza la siguiente ecuación [39]:

$$F_{PL} = \%_{yld} S_{ty} A_t \quad (4.59)$$

Donde:

- $\%_{yld}$ : Porcentaje de precarga de la fluencia
- $S_{ty}$ : Esfuerzo de fluencia del perno [ $MPa$ ]
- $A_t$ : Área de esfuerzo de tracción [ $mm^2$ ]

Debido a que la fuerza de tracción que se aplicará a la unión dicta la precarga requerida, entonces la máxima utilidad se obtiene de un perno precargándolo al valor más alto posible. La ductilidad del material del perno determina qué tan cerca del límite elástico se puede precargar el perno [39].

$$F_{PL} = \begin{cases} 0.75 F_{proof} & \text{para uniones no permanentes} \\ 0.90 F_{proof} & \text{para uniones permanentes} \end{cases} \quad (4.60)$$

Donde  $F_{proof}$  es la carga de prueba del sujetador. La relación entre la carga de prueba y la resistencia de prueba,  $S_{proof}$ , es:

$$F_{proof} = S_{proof} A_t \quad (4.61)$$

La resistencia a la deformación es aproximadamente igual al 85% del límite de fluencia,  $S_{ty}$ . Basado en  $S_{proof} = 0.85 S_{ty}$ , la fuerza de precarga recomendada en función del límite elástico es:

$$F_{PL} = \begin{cases} 0.64 S_{ty} A_t & \text{para uniones no permanentes} \\ 0.77 S_{ty} A_t & \text{para uniones permanentes} \end{cases} \quad (4.62)$$

Teniendo en cuenta que los valores anteriores son conservadores, una regla general es precargar el sujetador a 2/3 del límite elástico.

### 4.3.2.2. Obtención del torque de precarga

Muchos de los métodos de ajuste comunes logran la fuerza de precarga aplicando un par de torsión a la tuerca o a la cabeza del perno. Al apretar un sujetador con una llave dinamométrica, que es uno de los métodos más fáciles y comunes, se considera que el sujetador está correctamente apretado una vez que se alcanza el torque especificado. En este caso, es

necesario determinar el valor de par necesario para lograr la fuerza de precarga deseada en el perno. Este par se calcula utilizando:

$$T = K_T d_{nom} F_{PL} \quad (4.63)$$

Donde  $d_{nom}$  es el diámetro nominal del perno y  $F_{PL}$  es la fuerza de precarga del perno.  $K_T$  es el coeficiente de par y se calcula mediante:

$$K_T = \left( \frac{r_t}{d_{nom}} \right) \left( \frac{\tan\lambda + f_t \sec\alpha}{1 - f_t \tan\lambda \sec\alpha} \right) + \frac{f_c r_c}{d_{nom}} \quad (4.64)$$

Donde:

$$r_t = \frac{(d_{nom} - d_{minor})/2}{2} = \frac{d_{nom} + d_{minor}}{4} \quad (4.65)$$

$$r_c = \frac{(d_{nom} - 1.5d_{nom})/2}{2} = 0.625d_{nom} \quad (4.66)$$

$$\tan\lambda = \frac{1}{2\pi r_t (TPI)} \quad (4.67)$$

Shigley [39] proporciona una tabla de coeficientes de torque basados en la condición del perno, que se ha adaptado como se muestra en la tabla a continuación. Cuando se desconoce la condición del perno, se recomienda un valor de 0,2 para  $K_T$ .

Tabla 4.5: Factor  $K_T$  para varias condiciones de un perno

Condición del perno	$K_T$
Acabado negro, no plateado	0.30
Cincado	0.20
Lubricado	0.18
Con anti-agarre	0.12

### 4.3.3. Rigidez de la unión

La unión empernada se puede considerar como un conjunto de resortes. Las partes dentro de la empuñadura actúan como un conjunto de resortes en serie, y la empuñadura y el perno actúan como resortes en paralelo. La unión se puede modelar como se muestra a continuación en la figura 4.31.

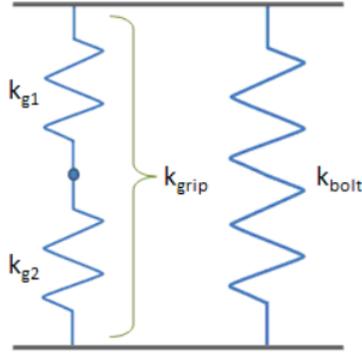


Figura 4.31: Analogía de conjunto de resortes.

Cada resorte de la figura anterior tiene una rigidez de:

$$k = \frac{A_m E}{L} \quad (4.68)$$

Donde:

- $A_m$ : Área transversal del material [ $mm^2$ ]
- $E$ : Modulo de elasticidad del material [ $GPa$ ]
- $L$ : Largo del material [ $mm$ ]

#### 4.3.3.1. Rigidez del perno

Cuando una unión se ensambla correctamente, toda la caña del perno estará en la empuñadura junto con un poco de longitud de hilo. La rigidez de la caña viene dada por:

$$k_{caña} = \frac{A_{nom} E_{perno}}{L_{caña}} \quad (4.69)$$

Donde:

- $A_{nom}$ : Área nominal del perno [ $mm^2$ ]
- $E_{perno}$ : Modulo de elasticidad del perno [ $GPa$ ]
- $L_{caña}$ : Largo de la caña [ $mm$ ]

La rigidez de la parte hilada de la empuñadura viene dada por:

$$k_{hilo} = \frac{A_t E_{perno}}{L_{hilo.a}} \quad (4.70)$$

Donde:

- $A_t$ : Área de esfuerzo de tracción [ $mm^2$ ]

- $L_{hilo.a}$ : Largo de la sección hilada [mm]

La caña y la parte roscada del perno actuarán como resortes en serie, de modo que la rigidez efectiva de la parte del perno dentro de la empuñadura viene dada por:

$$k_{perno} = \frac{k_{caña}k_{hilo}}{k_{caña} + k_{hilo}} \quad (4.71)$$

La longitud de la caña del perno se puede calcular mediante:

$$L_{caña} = L - L_{hilo} \quad (4.72)$$

La longitud del hilo en la empuñadura se calcula mediante:

$$L_{hilo.a} = L_g - L_{caña} \quad (4.73)$$

Donde  $L_g$  corresponde al largo de la empuñadura.

#### 4.3.3.2. Rigidez de la empuñadura

La rigidez del agarre se calcula con base en un método de cono de presión simplificado presentado por Shigley [39]. Este método predice la distribución de la presión en todo el grosor de la empuñadura. El cono de presión para una articulación se puede visualizar en el siguiente diagrama.

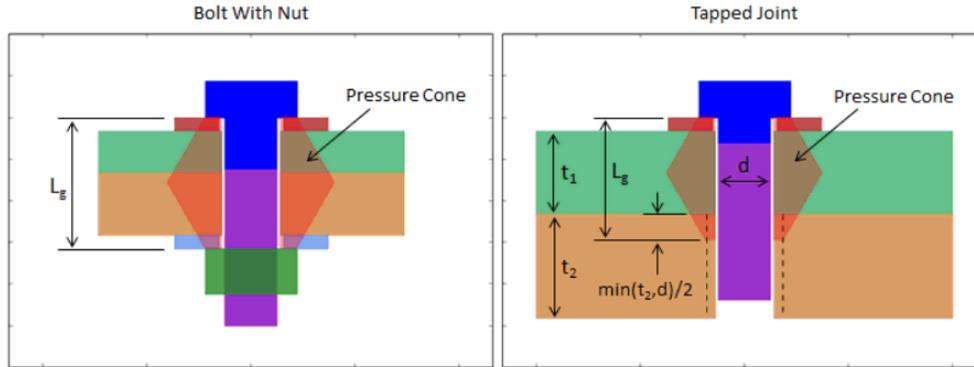


Figura 4.32: Diagrama para conos de presión.

Se puede encontrar una ecuación simplificada para la rigidez de agarre si se supone que el diámetro de la cabeza del perno es 50 % mayor que el diámetro nominal del perno:

$$k_{agarre} = \frac{\pi E d_{nom} \tan \alpha}{2 \ln \left[ 5 \frac{(L_g \tan \alpha + 0.5 d_{nom})}{L_g \tan \alpha + 2.5 d_{nom}} \right]} \quad (4.74)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo troncocónico ( $30^\circ$ ).

#### 4.3.4. Carga del perno y carga aplicada

La precarga alarga el perno y comprime las partes unidas. Cuando se aplica una carga de tracción a la unión, una parte de la carga aplicada actúa para aliviar la compresión en las partes sujetadas y la otra parte alarga más el perno. La parte de la carga aplicada que soporta el perno depende de la rigidez relativa del perno y las partes sujetadas. Esta rigidez relativa se conoce como la constante de articulación,  $C$ :

$$C = \frac{k_{perno}}{k_{perno} + k_{agarre}} \quad (4.75)$$

El siguiente es un diagrama representativo de la carga del perno en función de la carga de la unión aplicada:

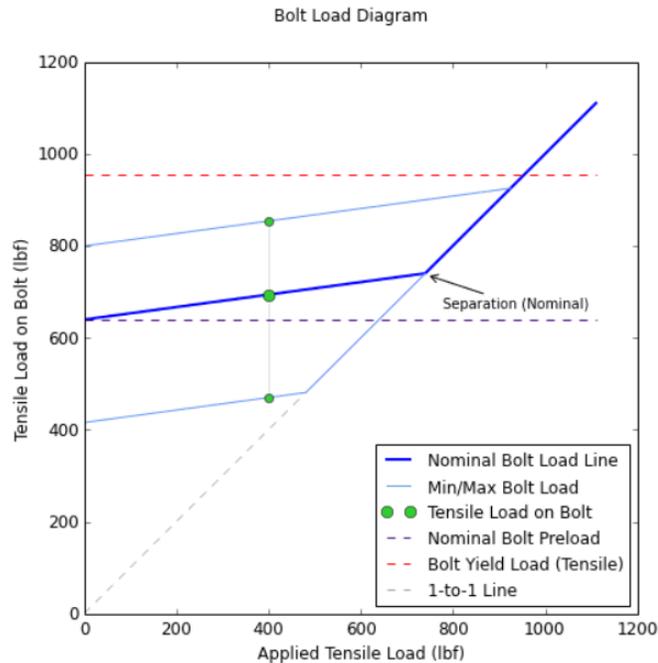


Figura 4.33: Diagrama de carga en el perno.

En la figura anterior, el eje x es la carga de tracción aplicada a la unión y el eje y es la carga de tracción que existe en el perno. Cuando la carga aplicada es cero, la carga de tracción en el perno es igual a la fuerza de precarga. A medida que se aplica carga a la unión, parte de la carga aplicada actúa para aliviar la compresión en las partes sujetadas y parte de la carga aplicada actúa para aumentar la tensión en el perno. La línea de carga del perno tiene una pendiente constante igual a la constante de la unión,  $C$ .

Considerando la sección donde se presenta la separación, la carga aplicada en esta sección es suficiente para separar las partes de la unión (se ha liberado toda la compresión en las

partes sujetadas), y después de este punto, cualquier carga aplicada a la unión es absorbida completamente por el perno. La fuerza que resultará en la separación de la articulación se encuentra por:

$$F_{sep} = \frac{F_{PL}}{1 - C} \quad (4.76)$$

La separación de la unión es un criterio de falla, y una unión debe diseñarse de manera que no se separe durante el servicio. El factor de seguridad en la separación se calcula mediante:

$$FS_{sep} = \frac{F_{sep}}{F_{t.app}} \quad (4.77)$$

Donde  $F_{t.app}$  corresponde a la fuerza aplicada en el perno.

#### 4.3.4.1. Fuerzas en el perno

Tabla 4.6: Cargas para uniones separadas y no separadas

	Unión no separada	Unión separada
Tracción en el perno por precarga, $F_{b.PL}$ :	$F_{PL}$	0
Tracción en el perno por carga aplicada, $F_{b.t.app}$ :	$CF_{t.app}$	$F_{t.app}$

La fuerza de tracción total sobre el perno es la suma de la tensión debida a la precarga y la tensión debida a la carga aplicada, como se determina en la tabla anterior:

$$F_{b.t} = F_{b.PL} + F_{b.t.app} \quad (4.78)$$

La fuerza de corte en el perno es igual a la carga de corte aplicada a la unión:

$$FS_{b.s} = F_{s.app} \quad (4.79)$$

Podría existir un momento de flexión en el perno si hay un espacio entre las placas (por ejemplo, debido a una empaquetadura) o si se usan espaciadores largos en la unión:

$$M_b = \frac{F_{b.s}a}{2} \quad (4.80)$$

Donde  $a$  es el brazo de momento.

#### 4.3.4.2. Esfuerzos en el perno

Las tensiones en el perno se calculan según las ecuaciones que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.7: Esfuerzos en el perno

Esfuerzo de precarga	Esfuerzo de tracción	Esfuerzo de corte	Esfuerzo de flexión
$\sigma_{PL} = \frac{F_{b,PL}}{A_t}$	$\sigma_t = \frac{F_{b,t.app}}{A_t}$	$\tau_{sh} = \frac{F_{b,s}}{A_s}$	$\sigma_{bnd} = \frac{32M_b}{\pi d^3}$

Donde  $A_t$  es el área de esfuerzo de tracción y  $A_s$  es el área de corte (ya sea el área nominal si el plano de corte está en la caña o el área menor si el plano de corte está en los hilos).

El esfuerzo de flexión depende del diámetro,  $d$ , que es el diámetro nominal si el momento máximo está en la caña o el diámetro menor si el momento máximo está en los hilos. Si consideramos que el perno es una viga guiada fija, entonces vemos que el momento máximo ocurrirá en las condiciones de contorno del perno que se encuentran debajo de la cabeza y al comienzo de los hilos internos. Debido a que el momento máximo ocurre en las roscas, el diámetro menor del perno debe usarse para calcular el esfuerzo de flexión.

El esfuerzo de von Mises se calcula mediante:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{[\sigma_{PL} + n(\sigma_t + \sigma_{bnd})]^2 + 3(n\tau_{sh})^2} \quad (4.81)$$

En la ecuación anterior,  $n$  es un factor de carga que se aplica al esfuerzo de tracción, flexión y corte, pero no se aplica al esfuerzo de precarga. El factor de carga está relacionado con el factor de seguridad, con la diferencia de que es un factor que se aplica a las cargas o tensiones para garantizar que la tensión del perno permanezca por debajo de la tensión permisible.

El factor de seguridad se puede resolver de forma iterativa encontrando el valor del factor de carga en el que la tensión de von Mises es igual a la tensión permisible:

$$FS = [\text{valor de } n \text{ que resulta en } \sigma_{VM} = \sigma_{perm}] \quad (4.82)$$

Donde  $\sigma_{perm}$  corresponde al esfuerzo permisible para el perno, suele considerarse el 85 % del esfuerzo de fluencia.

### 4.3.5. Evaluación de pernos

Para evaluar los pernos de la estructura se debe comenzar con las especificaciones de cada uno:

Tabla 4.8: Especificaciones de pernos superiores, conexión tapa y cilindro principal

<b>Especificaciones perno superior (Perno 1)</b>	
Tipo	Parker
Sistema	Métrico
Tamaño de hilo	M 14
Paso	2 [mm]
Largo	55 [mm]
Hilado	Completo
Largo del hilo	-
Diámetro de la cabeza	21 [mm]
Altura de la cabeza	14 [mm]
Tamaño de llave	12 [mm]
Clase	12.9
Esfuerzo de fluencia	1100 [MPa]
Módulo de elasticidad	211 [GPa]
Material	Acero aleado oxido negro

Tabla 4.9: Especificaciones de pernos intermedios, conexión cilindro principal y cono de descarga

<b>Especificaciones perno intermedio (Perno 2)</b>	
Tipo	Parker
Sistema	Métrico
Tamaño de hilo	M 14
Paso	2 [mm]
Largo	65 [mm]
Hilado	Completo
Largo del hilo	-
Diámetro de la cabeza	21 [mm]
Altura de la cabeza	14 [mm]
Tamaño de llave	12 [mm]
Clase	12.9
Esfuerzo de fluencia	1100 [MPa]
Módulo de elasticidad	211 [GPa]
Material	Acero aleado oxido negro

Tabla 4.10: Especificaciones de pernos de unión, conexión entre cono de descarga y tornillo alimentador

<b>Especificaciones perno de unión (Perno 3)</b>	
Tipo	Parker
Sistema	Métrico
Tamaño de hilo	M 8
Paso	1.25 [mm]
Largo	30 [mm]
Hilado	Completo
Largo del hilo	-
Diámetro de la cabeza	13 [mm]
Altura de la cabeza	8 [mm]
Tamaño de llave	6 [mm]
Clase	12.9
Esfuerzo de fluencia	1100 [MPa]
Módulo de elasticidad	211 [GPa]
Material	Acero aleado cincado

Tabla 4.11: Especificaciones de pernos de tapa para tornillo alimentador

<b>Especificaciones perno de tapa tornillo (Perno 4)</b>	
Tipo	Parker
Sistema	Métrico
Tamaño de hilo	M 8
Paso	1.25 [mm]
Largo	20 [mm]
Hilado	Completo
Largo del hilo	-
Diámetro de la cabeza	13 [mm]
Altura de la cabeza	8 [mm]
Tamaño de llave	6 [mm]
Clase	12.9
Esfuerzo de fluencia	1100 [MPa]
Módulo de elasticidad	211 [GPa]
Material	Acero aleado cincado

#### 4.3.5.1. Evaluación de perno superior (Perno 1)

Dimensiones:

$$d_{nom.1} = 14[mm] \quad (4.83)$$

$$P_{nom.1} = 2[mm] \quad (4.84)$$

$$H_1 = \frac{\sqrt{3}P_{b1}}{2} = 1.7[mm] \quad (4.85)$$

$$d_{m.ext.1} = 11.5[mm] \quad (4.86)$$

$$d_{p.ext.1} = 12.7[mm] \quad (4.87)$$

$$d_{m.int.1} = 11.8[mm] \quad (4.88)$$

$$d_{p.int.1} = 12.7[mm] \quad (4.89)$$

$$A_{nom.1} = 154[mm^2] \quad (4.90)$$

$$A_{t.1} = 115[mm^2] \quad (4.91)$$

$$A_{m.1} = 105[mm^2] \quad (4.92)$$

Cargas:

$$F_{PL1} = 81269[N] = 81[kN] \quad (4.93)$$

$$K_{T1} = 0.3 \quad (4.94)$$

$$T_1 = 341220[Nmm] = 341[Nm] \quad (4.95)$$

$$k_{caña.1} = 738[GPa \cdot mm] \quad (4.96)$$

$$k_{hilo.1} = 2214[GPa \cdot mm] \quad (4.97)$$

$$k_{perno.1} = 554[GPa \cdot mm] \quad (4.98)$$

$$k_{agarre.1} = 2715[GPa \cdot mm] \quad (4.99)$$

$$C_1 = 0.17 \quad (4.100)$$

$$F_{sep.1} = 97840[N] = 98[kN] \quad (4.101)$$

$$F_{t.app.1} = 20000[N] = 20[kN] \quad (4.102)$$

$$FS_{sep.1} = 5[N] \quad (4.103)$$

$$F_{b.PL.1} = 81269[N] = 81[kN] \quad (4.104)$$

$$F_{b.t.app.1} = 3387[N] \quad (4.105)$$

$$F_{b.t.1} = 84656[N] = 85[kN] \quad (4.106)$$

Esfuerzos:

$$\sigma_{PL.1} = 704[MPa] \quad (4.107)$$

$$\sigma_{t.1} = 29[MPa] \quad (4.108)$$

$$\sigma_{VM.1} = 935.8[MPa] \quad (4.109)$$

$$FS_{VM.1} = 7.9 \quad (4.110)$$

#### 4.3.5.2. Evaluación de perno intermedio (Perno 2)

Dimensiones:

$$d_{nom.2} = 14[mm] \quad (4.111)$$

$$P_{nom.2} = 2[mm] \quad (4.112)$$

$$H_2 = \frac{\sqrt{3}P_{b2}}{2} = 1.7[mm] \quad (4.113)$$

$$d_{m.ext.2} = 11.5[mm] \quad (4.114)$$

$$d_{p.ext.2} = 12.7[mm] \quad (4.115)$$

$$d_{m.int.2} = 11.8[mm] \quad (4.116)$$

$$d_{p.int.2} = 12.7[mm] \quad (4.117)$$

$$A_{nom.2} = 154[mm^2] \quad (4.118)$$

$$A_{t.2} = 115[mm^2] \quad (4.119)$$

$$A_{m.2} = 105[mm^2] \quad (4.120)$$

Cargas:

$$F_{PL.2} = 81269[N] = 81[kN] \quad (4.121)$$

$$K_{T_2} = 0.3 \quad (4.122)$$

$$T_2 = 341220[Nmm] = 341[Nm] \quad (4.123)$$

$$k_{cañã.2} = 601[GPa \cdot mm] \quad (4.124)$$

$$k_{hilo.2} = 2214[GPa \cdot mm] \quad (4.125)$$

$$k_{perno.2} = 473[GPa \cdot mm] \quad (4.126)$$

$$k_{agarre.2} = 2528[GPa \cdot mm] \quad (4.127)$$

$$C_2 = 0.16 \quad (4.128)$$

$$F_{sep.2} = 96469[N] = 97[kN] \quad (4.129)$$

$$F_{t.app.2} = 12000[N] = 12[kN] \quad (4.130)$$

$$FS_{sep.2} = 8[N] \quad (4.131)$$

$$F_{b.PL.2} = 81269[N] = 81[kN] \quad (4.132)$$

$$F_{b.t.app.2} = 1890[N] \quad (4.133)$$

$$F_{b.t.2} = 83159[N] = 83[kN] \quad (4.134)$$

Esfuerzos:

$$\sigma_{PL.2} = 704[MPa] \quad (4.135)$$

$$\sigma_{t.2} = 16[MPa] \quad (4.136)$$

$$\sigma_{VM.2} = 934.9[MPa] \quad (4.137)$$

$$FS_{VM.2} = 14.1 \quad (4.138)$$

### 4.3.5.3. Evaluación de perno de unión (Perno 3)

Dimensiones:

$$d_{nom.3} = 8[mm] \quad (4.139)$$

$$P_{nom.3} = 1.25[mm] \quad (4.140)$$

$$H_3 = \frac{\sqrt{3}P_{b3}}{2} = 1.1[mm] \quad (4.141)$$

$$d_{m.ext.3} = 6.5[mm] \quad (4.142)$$

$$d_{p.ext.3} = 7.2[mm] \quad (4.143)$$

$$d_{m.int.3} = 6.7[mm] \quad (4.144)$$

$$d_{p.int.3} = 7.2[mm] \quad (4.145)$$

$$A_{nom.3} = 50[mm^2] \quad (4.146)$$

$$A_{t.3} = 37[mm^2] \quad (4.147)$$

$$A_{m.3} = 33[mm^2] \quad (4.148)$$

Cargas:

$$F_{PL3} = 25772[N] = 26[kN] \quad (4.149)$$

$$K_{T3} = 0.2 \quad (4.150)$$

$$T_3 = 41235[Nmm] = 41[Nm] \quad (4.151)$$

$$k_{caña.3} = 372[GPa \cdot mm] \quad (4.152)$$

$$k_{hilo.3} = 1188[GPa \cdot mm] \quad (4.153)$$

$$k_{perno.3} = 283[GPa \cdot mm] \quad (4.154)$$

$$k_{agarre.3} = 1484[GPa \cdot mm] \quad (4.155)$$

$$C_3 = 0.16 \quad (4.156)$$

$$F_{sep.3} = 30694[N] = 31[kN] \quad (4.157)$$

$$F_{t.app.3} = 5000[N] = 5[kN] \quad (4.158)$$

$$FS_{sep.3} = 6[N] \quad (4.159)$$

$$F_{b.PL.3} = 25772[N] = 26[kN] \quad (4.160)$$

$$F_{b.t.app.3} = 802[N] \quad (4.161)$$

$$F_{b.t.3} = 26574[N] = 27[kN] \quad (4.162)$$

Esfuerzos:

$$\sigma_{PL.3} = 704[MPa] \quad (4.163)$$

$$\sigma_{t.3} = 22[MPa] \quad (4.164)$$

$$\sigma_{VM.3} = 933.9[MPa] \quad (4.165)$$

$$FS_{VM.3} = 10.5 \quad (4.166)$$

#### 4.3.5.4. Evaluación de perno de tapa tornillo (Perno 4)

Dimensiones:

$$d_{nom.4} = 8[mm] \quad (4.167)$$

$$P_{nom.4} = 1.25[mm] \quad (4.168)$$

$$H_4 = \frac{\sqrt{3}P_{b4}}{2} = 1.1[mm] \quad (4.169)$$

$$d_{m.ext.4} = 6.5[mm] \quad (4.170)$$

$$d_{p.ext.4} = 7.2[mm] \quad (4.171)$$

$$d_{m.int.4} = 6.7[mm] \quad (4.172)$$

$$d_{p.int.4} = 7.2[mm] \quad (4.173)$$

$$A_{nom.4} = 50[mm^2] \quad (4.174)$$

$$A_{t.4} = 37[mm^2] \quad (4.175)$$

$$A_{m.4} = 33[mm^2] \quad (4.176)$$

Cargas:

$$F_{PL4} = 25772[N] = 26[kN] \quad (4.177)$$

$$K_{T4} = 0.2 \quad (4.178)$$

$$T_4 = 41235[Nmm] = 41[Nm] \quad (4.179)$$

$$k_{caña.4} = 883[GPa \cdot mm] \quad (4.180)$$

$$k_{hilo.4} = 965[GPa \cdot mm] \quad (4.181)$$

$$k_{perno.4} = 461[GPa \cdot mm] \quad (4.182)$$

$$k_{agarre.4} = 2163[GPa \cdot mm] \quad (4.183)$$

$$C_4 = 0.18 \quad (4.184)$$

$$F_{sep.4} = 31269[N] = 31[kN] \quad (4.185)$$

$$F_{t.app.4} = 3500[N] = 3.5[kN] \quad (4.186)$$

$$FS_{sep.4} = 9[N] \quad (4.187)$$

$$F_{b.PL.4} = 25772[N] = 26[kN] \quad (4.188)$$

$$F_{b.t.app.4} = 615[N] \quad (4.189)$$

$$F_{b.t.4} = 26387[N] = 27[kN] \quad (4.190)$$

Esfuerzos:

$$\sigma_{PL.4} = 704[MPa] \quad (4.191)$$

$$\sigma_{t.4} = 16.8[MPa] \quad (4.192)$$

$$\sigma_{VM.4} = 934.3[MPa] \quad (4.193)$$

$$FS_{VM.4} = 13.7 \quad (4.194)$$

Considerando que para equipos de alta presión que involucran contacto directo con operarios los factores de seguridad deben ser entre 4 y 5 [39], se puede concluir que con las empernaduras utilizadas el equipo no debería presentar fallas.

## 4.4. Evaluación de recipientes presurizados, método de cálculo por (ASME Sección II & VIII, Div 1)

### 4.4.1. Selección de materiales

La (Sección II: A, D) [40] se usa para determinar materiales seleccionados con descripción completa, permite usar códigos para componentes con diferentes construcciones. El componente principal de cualquier recipiente son las carcasas de metal con diferentes dimensiones en el fondo, la parte superior y la pared. Todas estas dimensiones deben ser adecuadas con códigos bajo la autoridad del propio diseñador. Para este proyecto el material utilizado será acero inoxidable AISI 304L.

Tabla 4.12: Composición química del acero inoxidable AISI 304L

Elemento Wt. %	
C	Max 0.03
Cr	18 - 20
Mn	Max 2
Ni	8 - 12
P	Max 0.045
S	Max 0.03
Si	Max 1

Tabla 4.13: Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304L

Propiedad Física	Métrico	Imperial	Comentario
Densidad	8 [g/cm <sup>3</sup> ]	0.289 [lb/in <sup>3</sup> ]	
<b>Propiedades Mecánicas</b>			
Dureza, Knoop	158	158	Convertido desde el valor de dureza Rockwell B
Dureza, Rockwell B	82	82	
Dureza, Rockwell C	15	15	10 % trabajo en frío
Dureza, Vickers	159	159	Convertido desde el valor de dureza Rockwell B
Esfuerzo de tracción, UTS	564 [MPa]	81800 [psi]	0 % trabajo en frío
Esfuerzo de fluencia	210 [MPa]	30500 [psi]	0 % trabajo en frío
Elongación en fractura	58 %	58 %	En 50 [mm] (2 [in])
Módulo de elasticidad	193 - 200 [GPa]	28000 - 29000 [ksi]	
Impacto Charpy	16 [J]	159 [ft-lb]	

#### 4.4.2. Diseño de carcasa

Los códigos ASME [41] presentan reglas básicas al diseñar carcasas. Está claro que el espesor de estas carcasas es la consideración principal, al igual que las operaciones de soldadura en los recipientes. Las ecuaciones utilizadas son:

En el caso de los esfuerzos circunferenciales (soldadura longitudinal):

$$(p < 0.385 S_{max} E_{sol}); \quad t_s = \frac{P_{dis} R_{int}}{S_{max} E_{sol} - 0.6 P_{dis}}; \quad P_{max_{dis}} = \frac{S_{max} E_{sol} t_s}{R_{int} + 0.6 t_s} \quad (4.195)$$

En el caso de los esfuerzos longitudinales (soldadura circunferencial):

$$(p < 1.25 S_{max} E_{sol}); \quad t_s = \frac{P_{dis} R_{int}}{2 S_{max} E_{sol} + 0.6 P_{dis}}; \quad P_{max_{dis}} = \frac{S_{max} E_{sol} t_s}{R_{int} - 0.4 t_s} \quad (4.196)$$

Donde:

- $t_s$ : Espesor de carcasa [in]
- $P_{dis}$ : Presión de diseño [psi]
- $P_{max_{dis}}$ : Presión máxima de diseño [psi]
- $R_{int}$ : Radio interno [in]
- $S_{max}$ : Esfuerzo admisible máximo [psi]
- $E_{sol}$ : Coeficientes conexión por soldadura

Los esfuerzos en un recipiente cilíndrico pueden ser divididos en tres tipos [41]:

- Esfuerzo cilíndrico en la dirección axial  $\sigma_{ax.cl}$

$$\sigma_{ax.cl} = \frac{(p_i r_i^2 - p_o r_o^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.197)$$

- Esfuerzo cilíndrico en la dirección circunferencial  $\sigma_{cir.cl}$

$$\sigma_{cir.cl} = \left[ \frac{(p_i r_i^2 - p_o r_o^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} \right] - \left[ \frac{r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i)}{(r^2 (r_o^2 - r_i^2))} \right] \quad (4.198)$$

- Esfuerzo cilíndrico en la dirección radial  $\sigma_{rad.cl}$

$$\sigma_{rad.cl} = \left[ \frac{(p_i r_i^2 - p_o r_o^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} \right] + \left[ \frac{r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i)}{(r^2 (r_o^2 - r_i^2))} \right] \quad (4.199)$$

Donde:

- $p_i$ : Presión interna del cilindro [MPa, psi]
- $p_o$ : Presión externa del cilindro [MPa, psi]
- $r_i$ : Radio interno del cilindro [mm, in]
- $r_o$ : Radio externo del cilindro [mm, in]

Los esfuerzos en un recipiente cónico también pueden ser divididos en tres tipos; axiales, circunferenciales y radiales; no obstante, los esfuerzos circunferenciales y radiales son más complejos de calcular, por lo cual se hace uso de aproximaciones gráficas [42].

Esfuerzo cónico en la dirección axial  $\sigma_{ax.cn}$

$$\sigma_{ax.cn} = \frac{p_i (r_i l \sin 2\alpha - l^2 \cos \alpha^2)}{\sin \alpha^2 (r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.200)$$

Donde:

- $\alpha$ : Ángulo de inclinación del cono
- $l$ : Altura del cono [mm, in]

El esfuerzo cónico circunferencial  $\sigma_{cir.cn}$  y radial  $\sigma_{rad.cn}$  puede ser obtenidos por medio del siguiente gráfico, utilizando el ángulo de inclinación  $\alpha$ , presión interna  $p_i$ , radio del cono  $r$ .

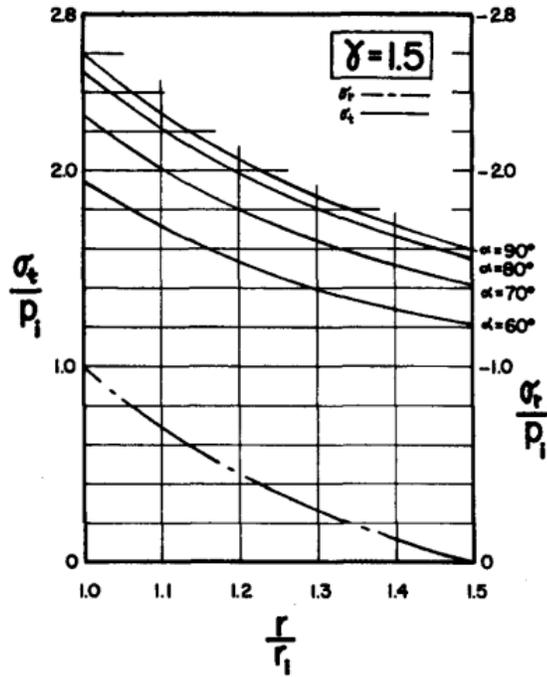


Figura 4.34: Esfuerzos cónicos circunferenciales y radiales [42]

#### 4.4.3. Diseño de tapas

De la Sección VIII [41], el espesor mínimo requerido de las cabezas circulares planas empernadas no debe ser inferior a:

$$t_{tapa.crit} = d_{tapa} \left( \frac{C_{fij} P_{op}}{S_{max} E_{sol}} + \frac{1.9W h_g}{S_{max} E_{sol} d_{tapa}} \right)^{1/2} \quad (4.201)$$

Donde:

- $C_{fij}$ : Factor de fijación
- $P_{op}$ : Presión de operación [psi]
- $S_{max}$ : Esfuerzo admisible [psi]
- $E_{sol}$ : Coeficientes conexión por soldadura
- $d_{tapa}$ : Diámetro de la tapa [in]
- $W$ : Carga total en pernos [lb]
- $h_g$ : Brazo de momento en empaquetadura [lb ft]

#### 4.4.4. Evaluación de estructura

#### 4.4.4.1. Tolva de alimentación

La tolva de alimentación se compone de la tapa superior, cilindro de almacenamiento y cono de descarga. Para evaluar estos se comienza analizando los esfuerzos axiales, circunferenciales y radiales. En el caso del cilindro principal se evaluaron los esfuerzos pertinentes, axiales y circunferenciales, para un rango de espesores 1-20 [mm]:

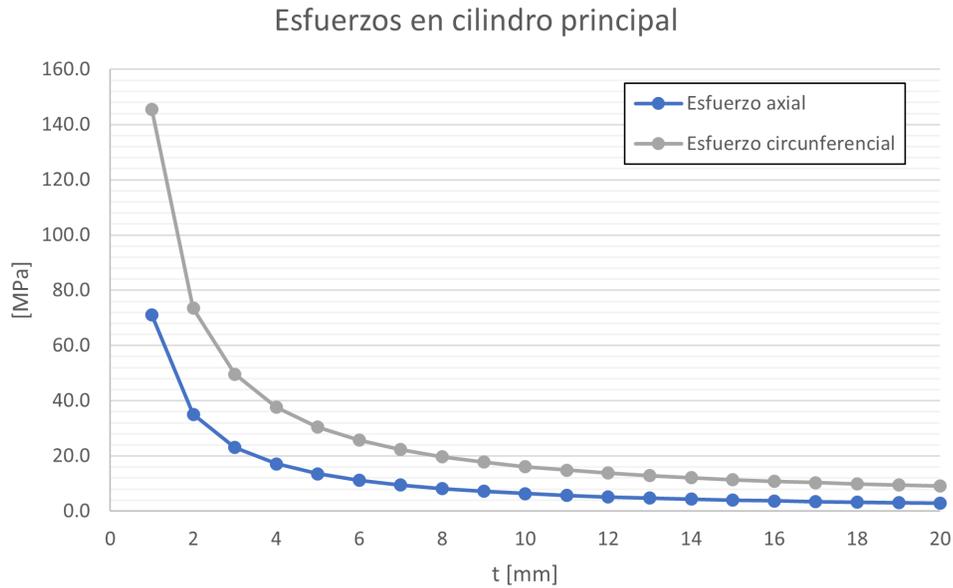


Figura 4.35: Esfuerzos axiales y circunferenciales en el cilindro

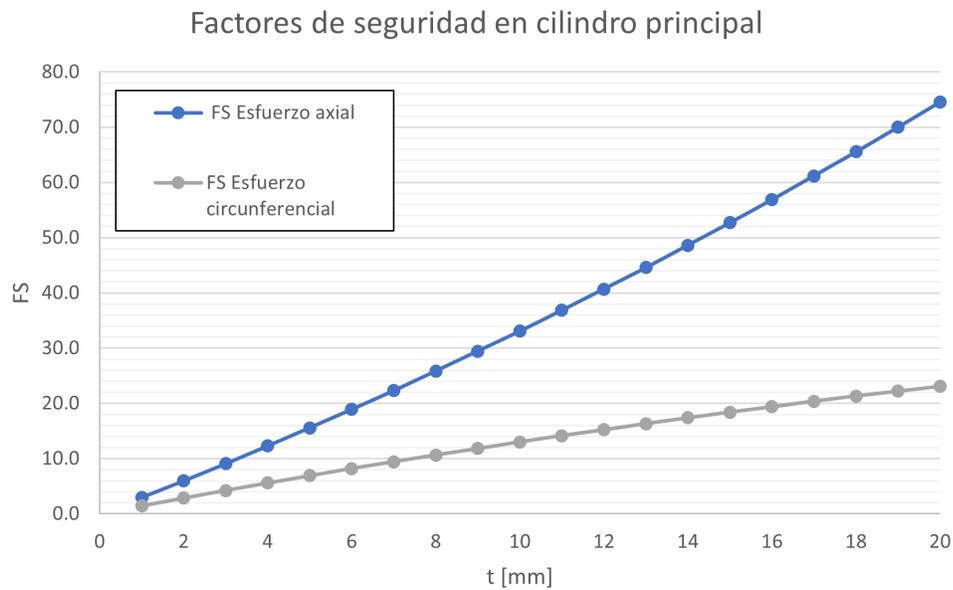


Figura 4.36: Factor de seguridad para esfuerzos axiales y circunferenciales en el cilindro

Evaluando igualmente el espesor y presión máxima para esfuerzos circunferenciales y longitudinales:

$$t_{s.cir} = \frac{500[psi] \cdot 1.7[in]}{30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1 - 0.6 \cdot 500[psi]} = 0.033[in] = 0.83[mm] \quad (4.202)$$

$$t_{s.log} = \frac{500[psi] \cdot 1.7[in]}{2 \cdot 30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1 + 0.6 \cdot 500[psi]} = 0.016[in] = 0.42[mm] \quad (4.203)$$

$$P_{max.cir} = \frac{30500[psi] \cdot 1 \cdot 0.033}{1.7 + 0.6 \cdot 0.033} = 582[psi] = 4.01[MPa] \quad (4.204)$$

$$P_{max.long} = \frac{30500[psi] \cdot 1 \cdot 0.016}{1.7 - 0.4 \cdot 0.016} = 288[psi] = 1.98[MPa] \quad (4.205)$$

Considerando los cálculos anteriores, el cilindro es diseñado para obtener un alto factor de seguridad, es este caso superior a 8. El espesor de diseño resulta ser 14 [mm], proporcionando un factor de seguridad de 17.

Para el cono de descarga se obtienen los siguientes esfuerzos axiales para distintos espesores pared:

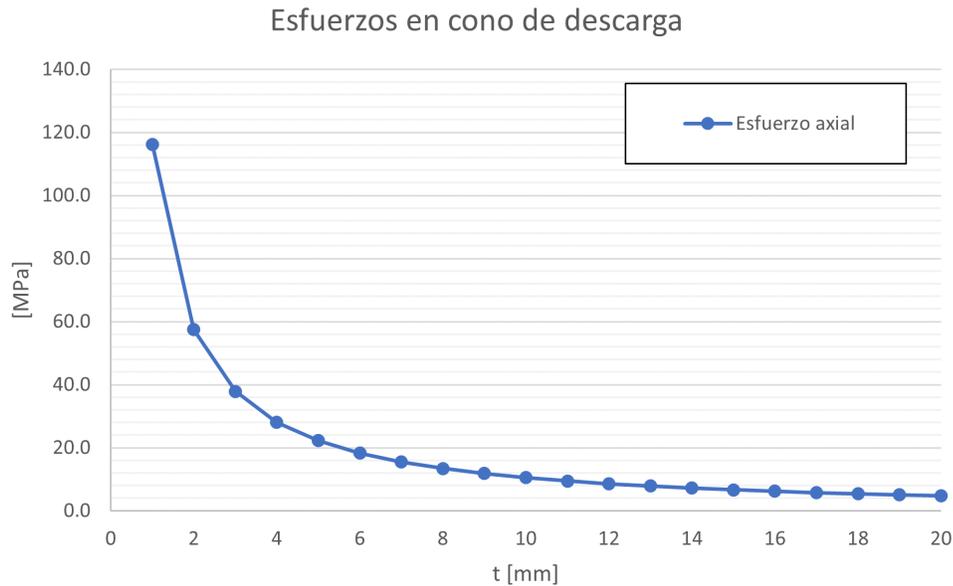


Figura 4.37: Esfuerzos axiales y circunferenciales en el cono

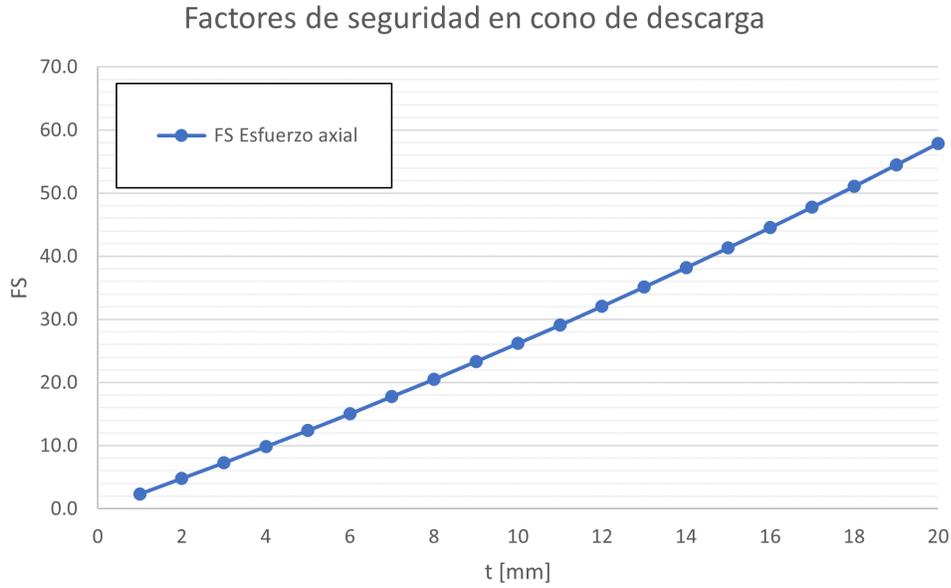


Figura 4.38: Factor de seguridad para esfuerzos axiales y circunferenciales en el cono

Considerando que el cono de descarga posee un diámetro superior de entrada del cono es de 43 [mm], espesor de 10 [mm], el complemento del ángulo de inclinación es 74 °y la presión de trabajo es de 3.45 [MPa], se procede a analizar el diagrama de la figura 4.34. De esta se puede extraer que el rango de  $r/r_i$  se encuentra entre 1.0 y 1.2, por lo cual, la relación para  $\sigma_t/p_i$  y  $\sigma_r/p_i$  varía entre 1.9 y 2.3, por lo tanto, los esfuerzos son:

$$\sigma_{t.con} = 1.9 \cdot 3.45[MPa] - 2.3 \cdot 3.45[MPa] = 6.56[MPa] - 7.94[MPa] \quad (4.206)$$

$$\sigma_{r.con} = 1.9 \cdot 3.45[MPa] - 2.3 \cdot 3.45[MPa] = 6.56[MPa] - 7.94[MPa] \quad (4.207)$$

Por lo tanto, el cono diseñado con un espesor de 10 [mm] presentara un factor de seguridad superior a 22.

Con respecto a la tapa de superior del equipo, se hace uso de la ecuación anteriormente mencionada:

$$t_{tapa.crit} = d_{tapa} \left( \frac{C_{fij} P_{op}}{S_{max} E_{sol}} + \frac{1.9 W h_g}{S_{max} E_{sol} d_{tapa}} \right)^{1/2} \quad (4.208)$$

Evaluando con  $C_{fij} = 0.25$  y  $h_g = 0$ :

$$t_{tapa.crit.01} = 3.4[in] \left( \frac{0.25 \cdot 500[psi]}{30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1} + \frac{1.9 \cdot 4500[lb] \cdot 0}{30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1 \cdot 3.4[in]} \right)^{1/2} \quad (4.209)$$

$$t_{tapa.crit.01} = 0.35[in] = 8.9[mm] \quad (4.210)$$

La tapa diseñada presenta un espesor de 20 [mm], lo cual le proporciona un factor de seguridad superior a 2.2, según la normativa.

#### 4.4.4.2. Tornillo alimentador

Para el subconjunto del tornillo alimentador se procede a realizar estudios para la camisa que contiene al tornillo mismo y la tapa de sellado. El análisis de la camisa proporciona los siguientes gráficos:

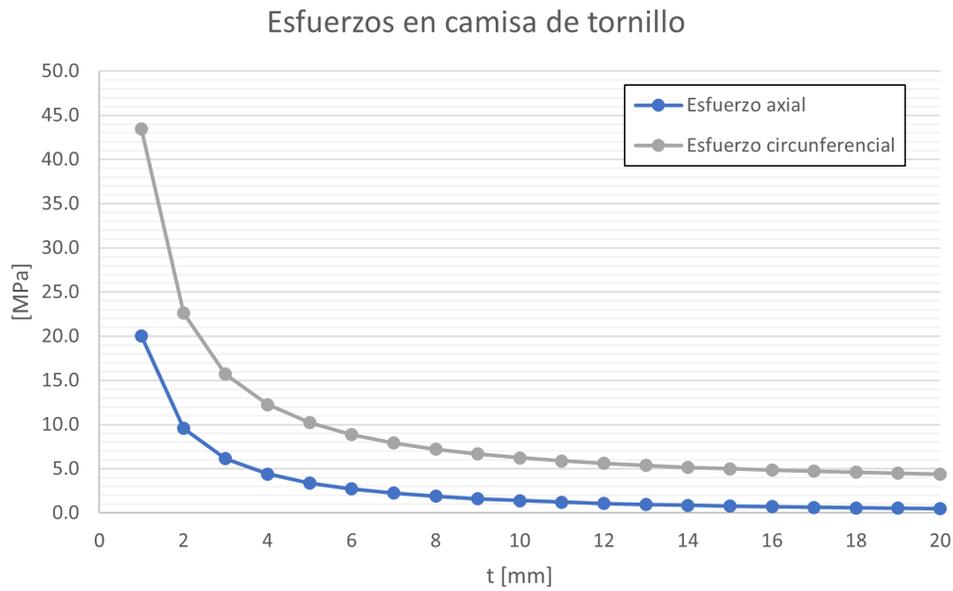


Figura 4.39: Esfuerzos axiales y circunferenciales en la camisa del tornillo

### Factores de seguridad en camisa de tornillo

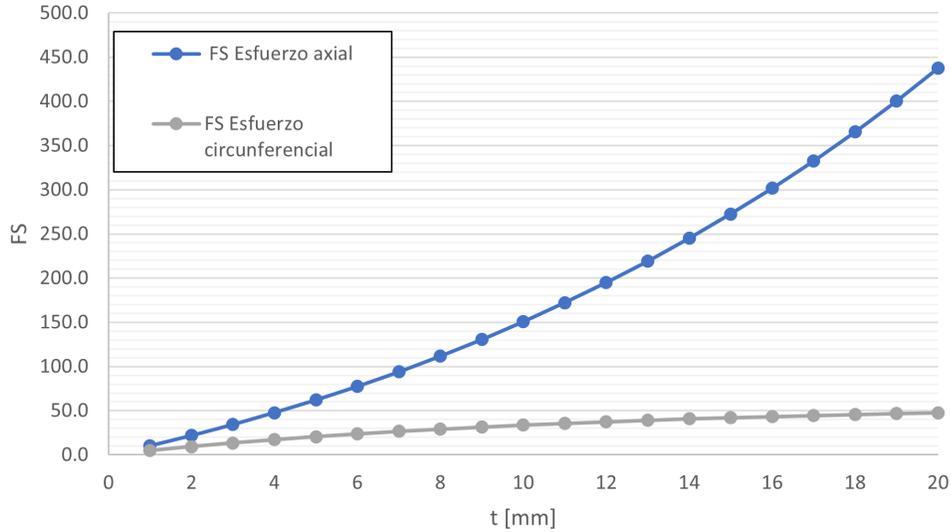


Figura 4.40: Factor de seguridad para esfuerzos axiales y circunferenciales en la camisa del tornillo

Evaluando igualmente el espesor y presión máxima para esfuerzos circunferenciales y longitudinales:

$$t_{s.cir.2} = \frac{500[psi] \cdot 0.5[in]}{30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1 - 0.6 \cdot 500[psi]} = 0.01[in] = 0.25[mm] \quad (4.211)$$

$$t_{s.log.2} = \frac{500[psi] \cdot 0.5[in]}{2 \cdot 30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1 + 0.6 \cdot 500[psi]} = 0.005[in] = 0.13[mm] \quad (4.212)$$

$$P_{max.cir.2} = \frac{30500[psi] \cdot 1 \cdot 0.01}{0.5 + 0.6 \cdot 0.01} = 603[psi] = 4.2[MPa] \quad (4.213)$$

$$P_{max.log.2} = \frac{30500[psi] \cdot 1 \cdot 0.005}{0.5 - 0.4 \cdot 0.005} = 306[psi] = 2.1[MPa] \quad (4.214)$$

Considerando los cálculos anteriores, la camisa es diseñado para obtener un alto factor de seguridad, considerando que presenta secciones soldadas y acoples emperrados. El espesor de diseño resulta ser 25 [mm], proporcionando un factor de seguridad de por sobre 30.

En lo que respecta al cálculo de la tapa frontal de la camisa, se utiliza la misma ecuación que para la tova de alimentación, y evaluando para está tapa en particular:

$$t_{tapa.crit.02} = 1.5[in] \left( \frac{0.25 \cdot 500[psi]}{30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1} + \frac{1.9 \cdot 5800[lb] \cdot 0}{30500[psi] \cdot 0.85 \cdot 1 \cdot 1.5[in]} \right)^{1/2} \quad (4.215)$$

$$t_{tapa.crit.02} = 0.1[in] = 2.54[mm] \quad (4.216)$$

La tapa diseñada presenta un espesor de 12 [mm], lo cual le proporciona un factor de seguridad superior a 4.8, según la normativa.

## 4.5. Evaluación de transporte neumático por método de Stokes

Un punto relevante por considerar en la alimentación de polvos en el equipo diseñado consiste en el transporte neumático que debe existir entre el alimentador y el equipo de Cold Spray, este será llevado a cabo por medio de una manguera de alta presión. Esta manguera debe presentar una serie de características y propiedades, en este análisis se pretende obtener el largo crítico necesario para permitir el flujo efectivo de las partículas metálicas [42].

Para comenzar los cálculos, se deben conocer las propiedades del gas portador y las partículas. El gas portador será nitrógeno di atómico y las partículas para modelar serán de cobre. Las propiedades se pueden conocer en la siguiente tabla:

Tabla 4.14: Propiedades del nitrógeno

<b>Propiedades del nitrógeno</b>	
Masa atómica	14.0067[g/mol]
Densidad	$1.25 \times 10^{-3}$ [g/cm <sup>3</sup> ] a 20 °C
Temperatura de ebullición	-195.8 °C
Temperatura de fusión	-210 °C
Viscosidad dinámica	$17.58 \times 10^{-6}$ [Ns/m <sup>2</sup> ] a 20 °C

Las partículas de cobre utilizadas presentan un diámetro nominal de partícula de  $d_{nom.par} = 60[\mu m]$  y una densidad de  $\rho_{par} = 8.96[g/cm^3]$ . Luego se puede calcular el tiempo de relajación de la partícula, por medio de la siguiente ecuación:

$$t_{0,part} = \frac{\rho_{par} d_{nom.par}^2}{18\mu_g} \quad (4.217)$$

Donde  $\mu_g$  corresponde a la viscosidad dinámica del gas portador. Luego, evaluando:

$$t_{0,part} = \frac{8960[kg/m^3](60 \cdot 10^{-6}[m])^2}{18 \cdot 17.58 \cdot 10^{-6}[Ns/m^2]} = 0.102[s] \quad (4.218)$$

Conociendo  $t_{0,part}$  se puede calcular el número de Stokes de la partícula en movimiento, mediante la siguiente ecuación:

$$Stk = \frac{t_{0.part}\mu_0}{l_0} \quad (4.219)$$

Donde  $l_0$  es la dimensión característica del cuerpo o partícula, para este caso corresponde al diámetro nominal  $d_{nom.par} = 60[\mu m] = l_0$ .  $\mu_0$  corresponde a la velocidad desarrollada del gas, alejado de las partículas. En este caso se puede considerar un fluido incompresible y se puede calcular la velocidad  $\mu_0$  de manera aproximada con la ecuación:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{gas}}} \quad (4.220)$$

Donde  $\Delta P$  corresponde a la diferencia de presión en la manguera, 70 [psi] (0.48 [MPa]) en este caso [1], y  $\rho_{gas}$  es la densidad del gas portador, en esta caso,  $1.25 \cdot 10^{-3}[g/cm^3]$ . Luego, evaluando:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.48 \cdot 10^6 [Pa]}{1.25 [kg/m^3]}} = 894 [m/s] \quad (4.221)$$

Finalmente, el largo crítico  $l_{crit}$  de la manguera para obtener estabilización de las partículas es:

$$l_{crit} = \frac{\mu_0}{t_{0.part}} = \frac{894 [m/s]}{0.102 [s]} = 8775 [m] \quad (4.222)$$

Y el número de Stokes para este elemento en el gas es [42]:

$$Stk_1 = \frac{t_{0.part}\mu_0}{l_0} = \frac{0.102 [s] \cdot 894 [m/s]}{60 \cdot 10^{-6} [m]} = 1,519,800 \quad (4.223)$$

# Capítulo 5

## Diseño y validación del equipo

El diseño del equipo explica la metodología de montaje para cada componente. Se muestra el avance de los diseños, evaluaciones numéricas y toma de decisiones. La figura 5.1 ilustra la disposición general del equipo.



Figura 5.1: Diseño general del equipo.

## 5.1. Componentes mecánicos

### 5.1.1. Tolva de alimentación

El primer diseño llevado a cabo en función de las memorias de cálculo fue la tolva de alimentación. Se consideraron múltiples diseños, puesto que la facilidad de manufactura, integridad estructural del componente y costos, fueron factores de suma importancia a la hora de tomar decisiones de diseño. Uno de los modelos considerados por simplicidad de costo y diseño fue creando un *Spool* [25], por medio de la unión de flanges y cañerías, como se puede ver en la figura 5.2.

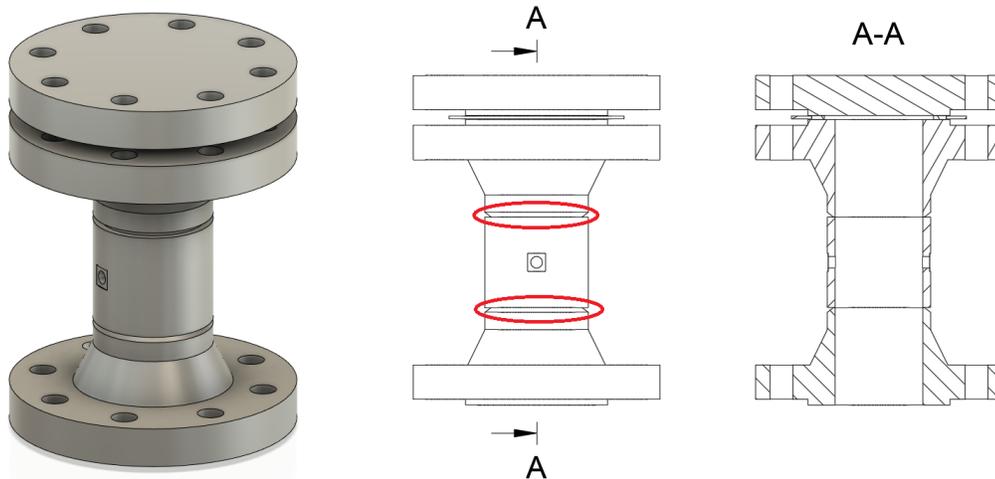


Figura 5.2: Tolva de alimentación con *spool*

El componente sería fabricado a partir de cañerías de 4" SCH 80, que presenta espesor de 8.56 [mm] y un diámetro exterior de 114.3 [mm], en conjunto con flanges welding neck clase 600 para cañerías de 4", con espesor de 38.1 [mm] y diámetro exterior de 273 [mm]. Este diseño presenta la ventaja de que todos los componentes no son manufacturados y por tanto presenta menos costos de material. No obstante, este presenta una serie de desventajas, tales como la presencia de soldadura en áreas críticas de sellado, como se puede notar en las zonas demarcadas con rojo en la figura 5.2.

El formato con también presenta un peso excesivo, dada las dimensiones de los flanges clase 600, que permiten soportar 600 [lb] de carga, equivalente a 1400 [psi] a 100 °F. El método de entre flanges tampoco es óptimo, ya que se debe recurrir a empaquetadoras de flange, que resultan ser costosas y escasas. Este modelo es reemplazado finalmente por un diseño propio a partir de una barra sólida de material, que permite evitar las zonas críticas de soldadura y disminuir el peso de la estructura.

La tolva de almacenamiento presenta 3 secciones: Tapa superior de acceso, cilindro de almacenamiento y cono de descarga. Adicionalmente se considera el conjunto de aperturas, sellos de presurización, anillos de soporte para montaje y sellos de seguridad.

### 5.1.1.1. Tapa superior de acceso:

Para acceder al alimentador y recargar el sistema de polvos, o realizar limpieza de este, se diseña una tapa superior que puede ser desmontada, figura 5.3. La tapa, fabricada de acero AISI 304 5.1, presenta conexiones apernadas y biseles radiales, que permiten incorporar abrazaderas de alta presión en caso de ser elegido, opciones que se ven en la figura 5.4 .

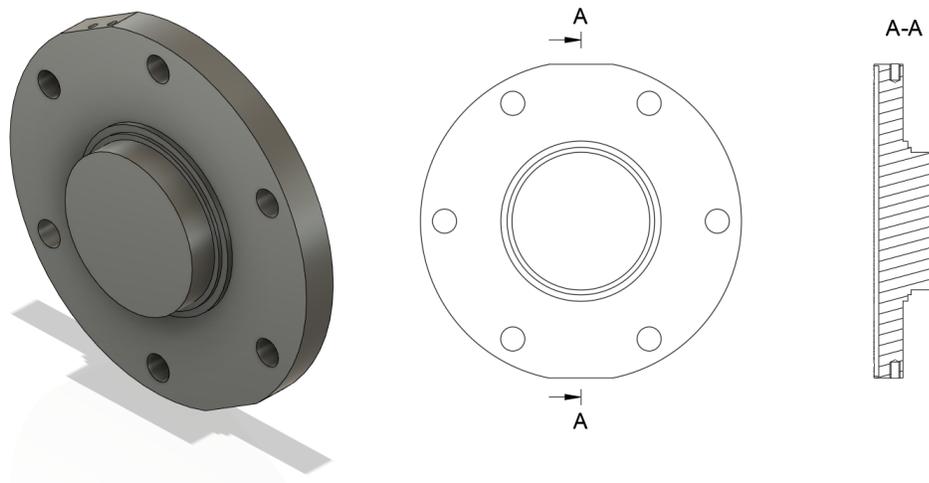


Figura 5.3: Tapa de acceso superior.

Tabla 5.1: Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304 [13]

Densidad [ $g/cm^3$ ]	Módulo de Young [GPa]	Límite de fluencia [MPa]	UTS [MPa]
8	193-200	210	564

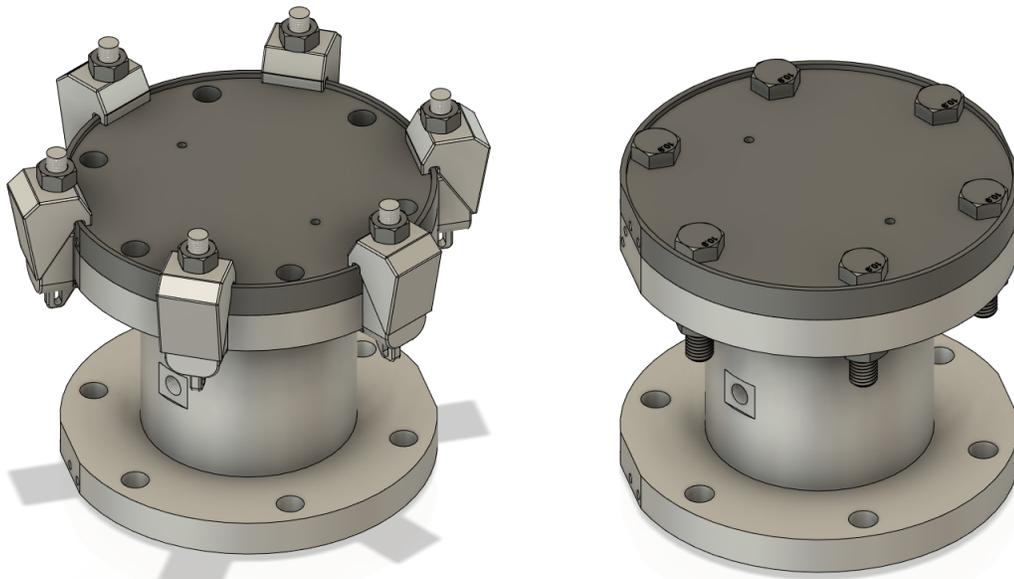


Figura 5.4: Unión con abrazadera de alta presión o pernos.

Para evaluar este componente se utiliza el ambiente Nastran de Autodesk Inventor, en este

se aplicaron las presiones de trabajo para el equipo, en este caso el doble de la presión admittida,  $3.45 [MPa]$ , es decir  $6.9 [MPa]$  ( $1000 [psi]$ ). La presión se aplica de manera uniforme y se simula considerando las uniones con perno entre la tapa y el cilindro de almacenamiento.

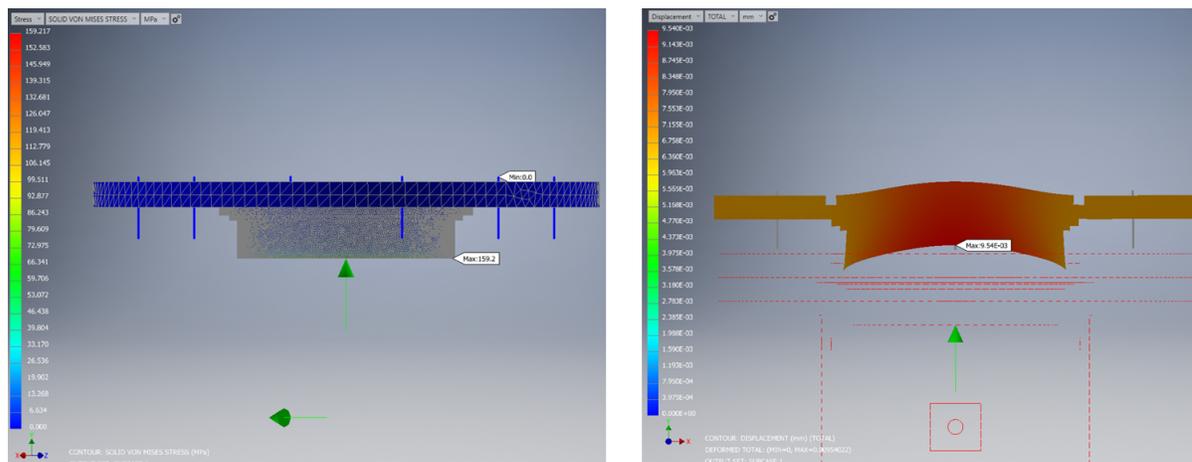


Figura 5.5: Resultados de simulación para tapa superior de acceso.

Tabla 5.2: Resultados de simulación para tapa superior de acceso

Material	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo de Von Mises Max [MPa]	Desplazamiento Max [mm]	Factor de seguridad
AISI 304	210	159	0.00954	1.32

La tapa presenta una gran concentración de esfuerzos en el bisel de la zona inferior de la tapa, llegando hasta un esfuerzo equivalente de Von Mises de  $159 [MPa]$ , con un desplazamiento máximo de aproximadamente  $9.54E-03 [mm]$ , como se puede ver en la figura 5.5. El factor de seguridad para este componente es de 1.32, considerando el doble de carga, por lo cual se considera apto para la aplicación.

### 5.1.1.2. Cilindro de almacenamiento

El cilindro de almacenamiento final contiene gran parte de los polvos de deposición, presentando un volumen de almacenamiento de aproximadamente  $900 [cm^3]$ . Presenta dos perforaciones que permiten utilizar conexiones de racores de alta presión, para incorporar manómetros, válvulas de alivio e interconexiones con otros componentes, como se puede ver en la figura 5.7. Este cilindro, al igual que la tapa superior de acceso, está fabricado de acero AISI 304, posee 6 perforaciones, en su conexión inferior y superior, para utilizar unión apertada o abrazaderas de alta presión.

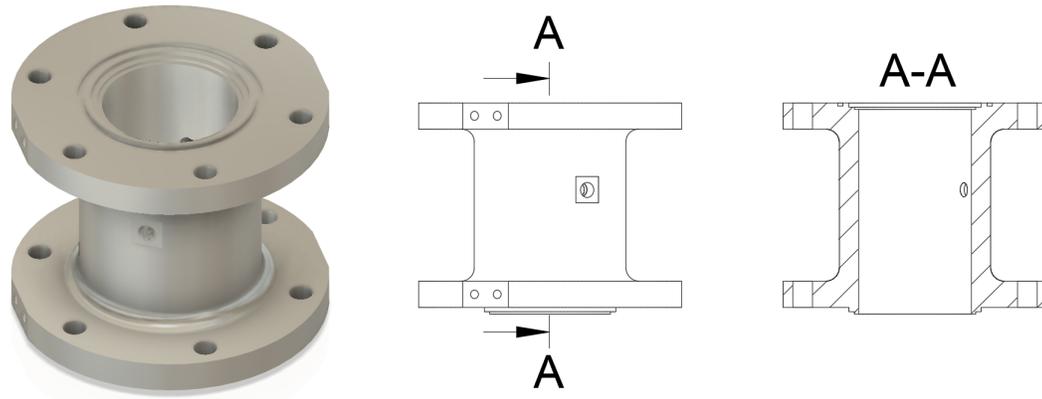


Figura 5.6: Cilindro de almacenamiento.

El cilindro fue diseñado de manera modular, de tal manera que se puedan sobre poner uno sobre otro e incrementar el volumen del equipo de manera rápida y sencilla. Ambos cilindros serán idéntico e intercambiables, la unión será de tipo apernada.

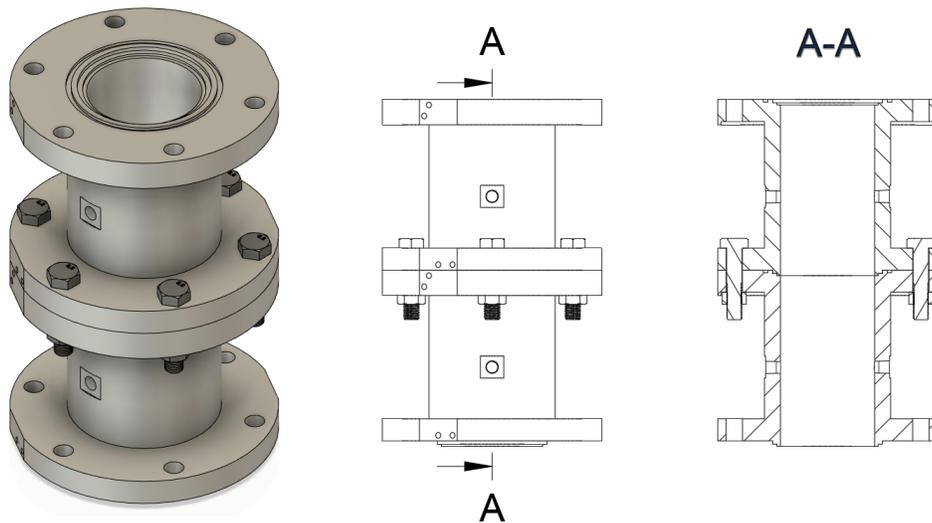


Figura 5.7: Cilindro de almacenamiento modular para incrementar volumen.

Para evaluar este componente se aplicaron las presiones de trabajo para el equipo, en este caso el doble de la presión admitida,  $3.45 [MPa]$ , es decir  $6.9 [MPa]$  ( $1000 [psi]$ ), al igual que los otros componentes. La presión se aplica de manera uniforme incluyendo las perforaciones para conexiones de racores, considerando las uniones por perno.

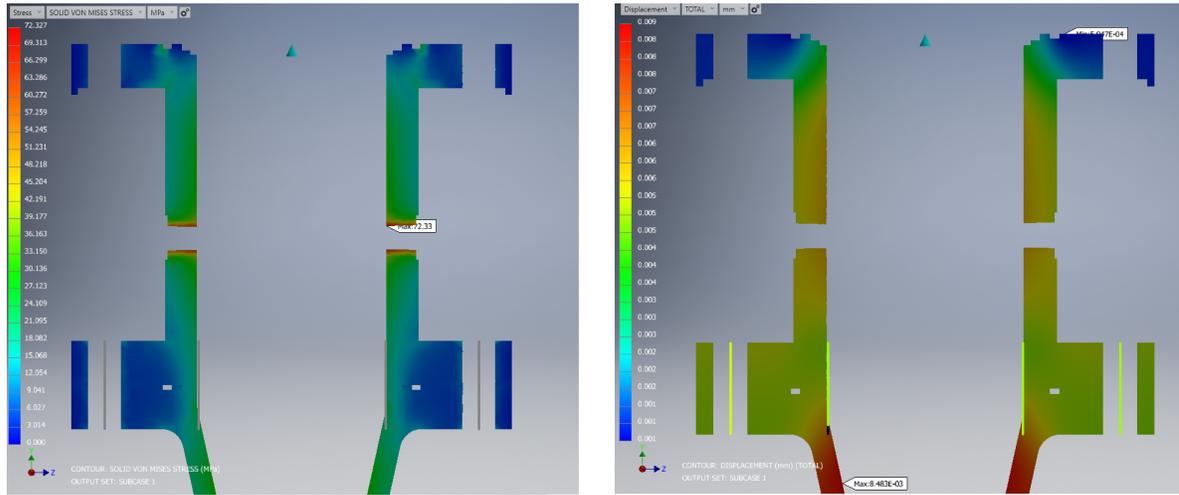


Figura 5.8: Resultados de simulación para cilindro de almacenamiento.

Tabla 5.3: Resultados de simulación para cilindro de almacenamiento.

Material	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo de Von Mises Max [MPa]	Desplazamiento Max [mm]	Factor de seguridad
AISI 304	210	72	0.007	2.91

Es posible notar a partir de las simulaciones, como se muestra en la figura 5.9 que las zonas que presentan mayor esfuerzo son las de unión con los racores de alta presión. Las perforaciones son para conexión NPT de 1/4", los esfuerzos llega a aproximadamente 72 [MPa], lo cual proporciona un factores de seguridad de 2.91, considerando que la presión de simulación es de 1000 [psi]. El desplazamiento máximo registrado para la zona del cilindro es de aproximadamente 0.007 [mm], lo cual se encuentra dentro de los límites de tolerancia del equipo.

### 5.1.1.3. Cono de descarga

El cono de descarga constituye la parte final de la tolva de alimentación. El cono, fabricado de acero AISI 304, presenta el ángulo de inclinación  $\Theta_c$ , de la ecuación 4.5, y diámetro de apertura  $D_{dis}$ , de la ecuación 4.45, su geometría es la más compleja de los componentes del equipo de alimentación. El cono presenta uniones apernadas para la parte superior e inferior de su montaje, para poder conectarse a los cilindros de almacenamiento y conexión con el tornillo de alimentación.

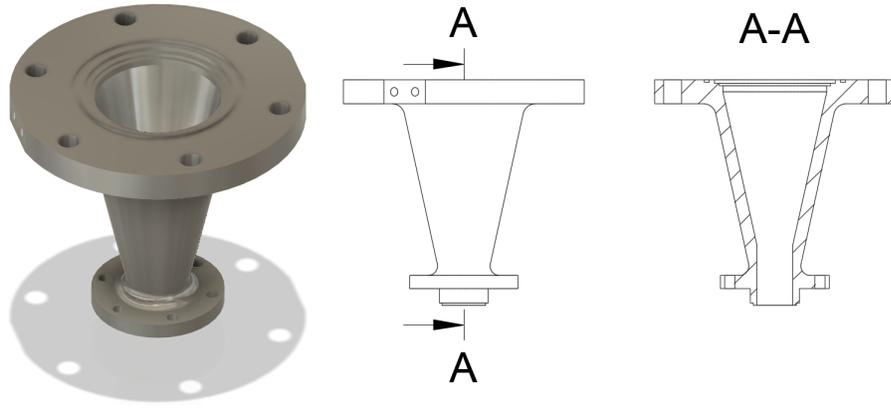


Figura 5.9: Cono de descarga de material.

La evaluación numérica, descrita en la figura 5.10 del cono de descarga presenta esfuerzos moderados, que no superan los 40 [MPa], proporcionando un factor de seguridad superior a 5.25, con una presión de 1000 [psi]. El desplazamiento es más significativo, alcanzando valores de hasta 0.009 [mm].

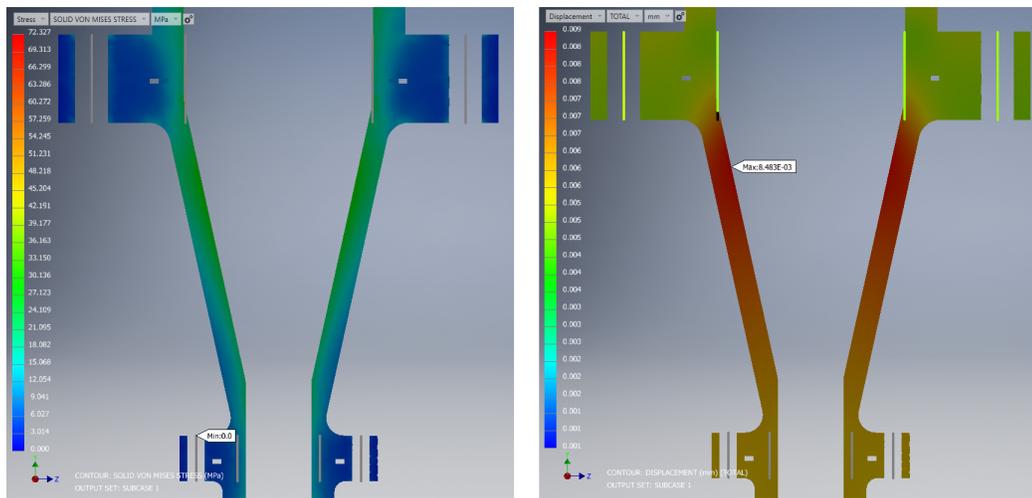


Figura 5.10: Resultados de la simulación para el cono de descarga.

Tabla 5.4: Resultados de la simulación para el cono de descarga.

Material	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo de Von Mises Max [MPa]	Desplazamiento Max [mm]	Factor de seguridad
AISI 304	210	40	0.009	5.25

Considerando que el desplazamiento máximo en el cono de descarga podría provocar una potencial zona de falla por pandeo, se realiza una simulación lineal para analizar el fenómeno. Se analizan 10 modos de falla por pandeo, considerando una presión de 1 [MPa], se obtiene que la carga crítica de pandeo es de 140 [MPa], de presión negativa, en la zona inferior de conexión que presenta el cono, detallada de la figura 5.11.

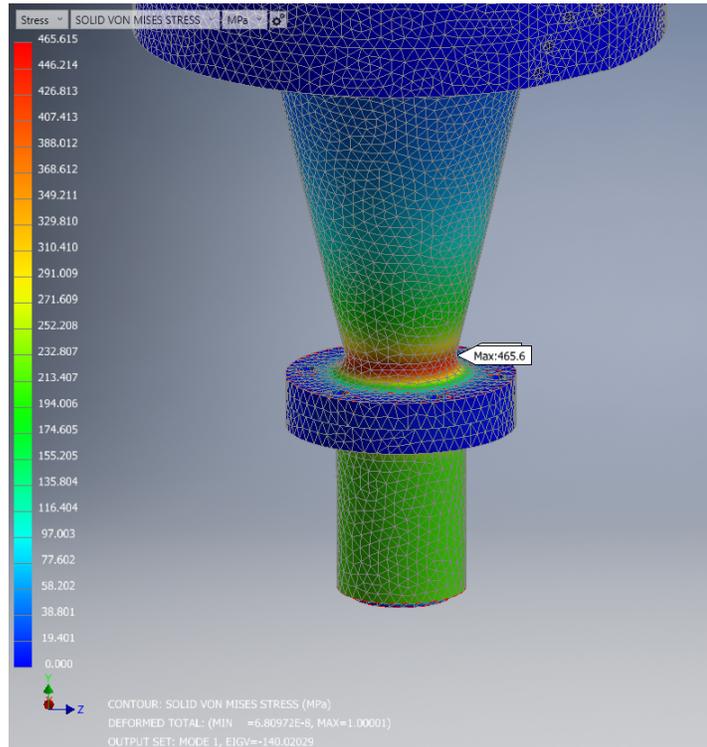


Figura 5.11: Resultados de la simulación de pandeo para el cono de descarga.

La presión necesaria para provocar la falla por pandeo es excesiva, el equipo falla por fluencia en primera instancia. Conociendo los factores anteriores, el equipo se considera apto para la aplicación.

### 5.1.2. Anillos para conexión de pivote

Para conectar el sistema de alimentación completo, tornillo y tolva de alimentación, a la estructura de soporte se debe utilizar un método de fácil acople y que permita pivotar el equipo completo.

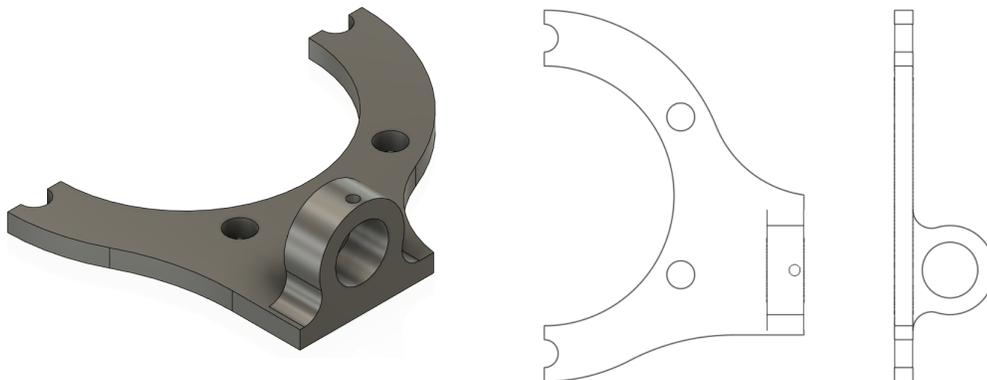


Figura 5.12: Anillo para conexión de pivote.

La figura 5.12 muestra la geometría general de la mitad del anillo de soporte. El anillo, fabricado de acero ASTM A36, posee perforaciones de para coincidir con el paso de los pernos de montaje entre los cilindros de almacenamiento y el cono de descarga, como se puede notar en la figura 5.13.

Tabla 5.5: Propiedades mecánicas acero al carbono ASTM A36

Densidad [ $g/cm^3$ ]	Módulo de Young [GPa]	Límite de fluencia [MPa]	UTS [MPa]
7.85	200	250	550

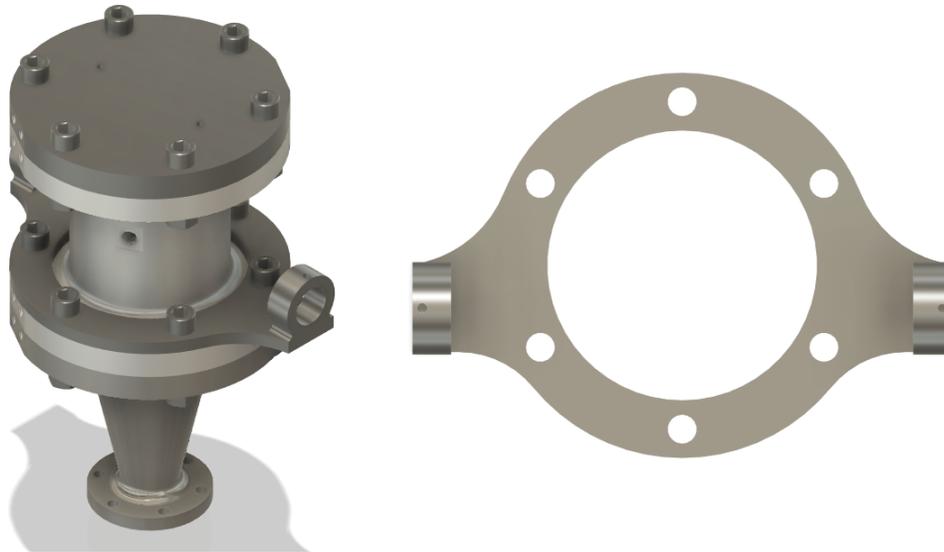


Figura 5.13: Anillo para conexión de pivote ensamblados.

Este componente fue evaluado numéricamente para analizar la deformación que presentaría con la carga del equipo completo, aproximadamente  $70 [kg]$  considerando la carga de los polvos. La dimensión de mayor interés fue el espesor de la placa con la cual se fabricaría la pieza.

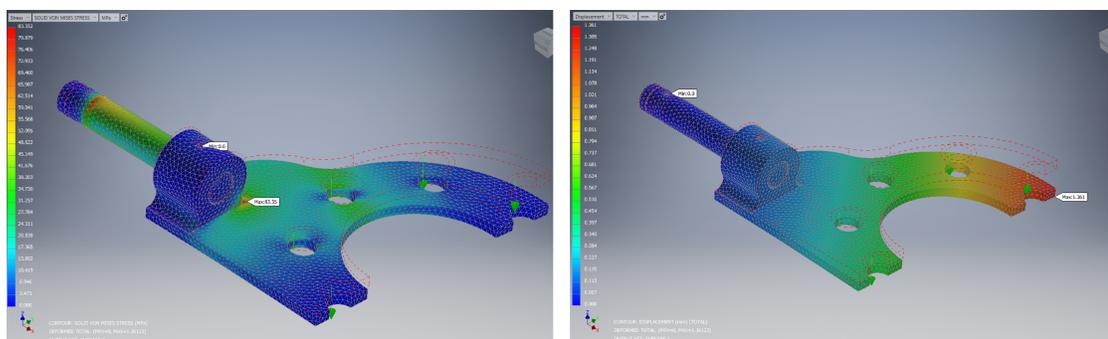


Figura 5.14: Resultados de simulación para anillo de conexión.

Tabla 5.6: Resultados de simulación para anillo de conexión.

Material	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo de Von Mises Max [MPa]	Desplazamiento Max [mm]	Factor de seguridad
ASTM A 36	250	83	1.361	3.01

Las simulaciones realizadas para este componente consistieron en iterar el espesor de la lámina hasta encontrar un factor de seguridad adecuado. La figura 5.14 muestra que el esfuerzo máximo se sitúa en la zona de unión entre la lámina y el buje de conexión, que será realizada por medio de soldadura. Este esfuerzo es de aproximadamente  $83 [MPa]$ , lo cual proporciona un factor de seguridad de 3.01 aproximadamente, considerando que el componente es simulado con el doble de la carga real, es decir  $140 [kg]$ . El desplazamiento para esta carga en la zona más alejada de la unión llega a  $1.361 [mm]$ , lo cual se estima razonable considerando que esta zona puede presentar cierto grado de flexión sin influir negativamente en el funcionamiento del equipo.

### 5.1.3. Eje de fijación

La unión entre el conjunto compuesto por la tolva y tornillo alimentador hacia la estructura de soporte se realiza por medio de ejes de fijación pivotantes. Estos ejes presenta una conexión con descansos de flanje y los anillo de conexión, como se puede ver en la figura 5.15.

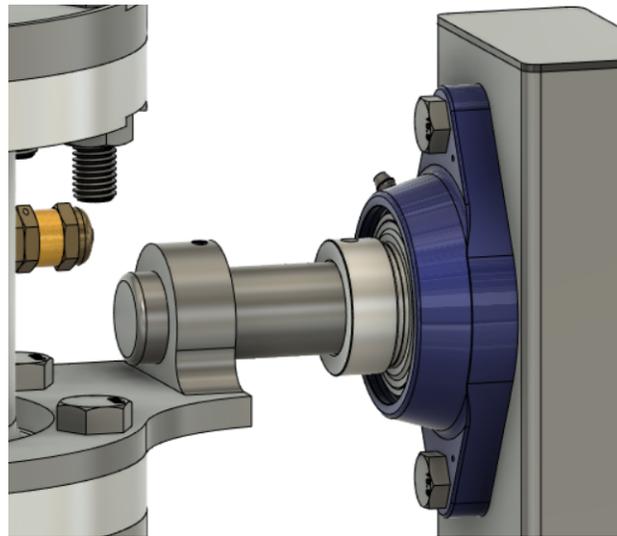


Figura 5.15: Resultados de simulación para anillo de conexión.

Considerando que estos ejes son de suma importancia para lograr el pivote del equipo y permitir una medición precisa de la carga en tiempo real, la deflexión de estos no debe influir en ninguno de estos eventos. Analizando la simulación de carga estática de  $120 [kg]$  por eje, se obtienen los resultados de la figura 5.16.

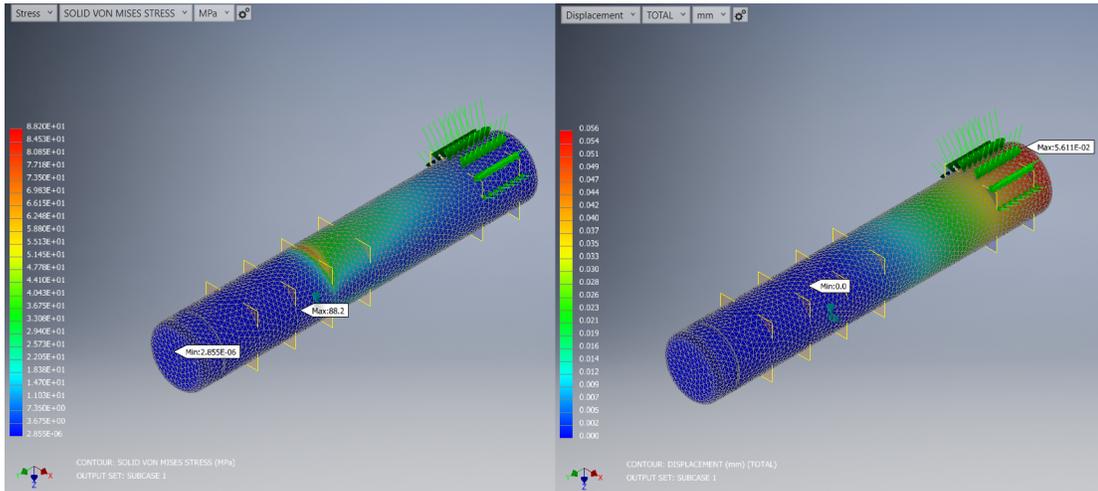


Figura 5.16: Resultados de simulación para eje de fijación.

Tabla 5.7: Resultados de simulación eje de fijación.

Material	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo de Von Mises Max [MPa]	Desplazamiento Max [mm]	Factor de seguridad
AISI 304	210	88.2	0.052	2.3

Como se puede ver en la tabla 5.7 el factor de seguridad es superior a 2, considerando el doble de la carga estimada para cada eje. No obstante, el factor de mayor interés para esta simulación considera el desplazamiento máximo del eje, que en este caso es de aproximadamente 0.052 [mm]. Se consideraron múltiples distancias entre puntos de apoyo, para minimizar la flecha de deflexión del eje, de acuerdo con las recomendaciones CEMA [26], llegando a un distanciamiento óptima de 80 [mm], que permite una pendiente de deflexión de 0.000225 [mm] por milímetro entre puntos de apoyo, lo cual es menor a 0.0023 [mm], que corresponde a la cota crítica según CEMA [26].

#### 5.1.4. Conexiones de seguridad

Como medida preventiva de seguridad se decide incorporar en el diseño conexiones rotativas de seguridad que deben ser acopladas antes de colocar las uniones apernadas o de abrazadera, como se puede ver en la figura 5.17. Su función es impedir la expulsión a alta velocidad de alguno de los componentes de cilindro de almacenamiento, tapa superior o cono de descarga.

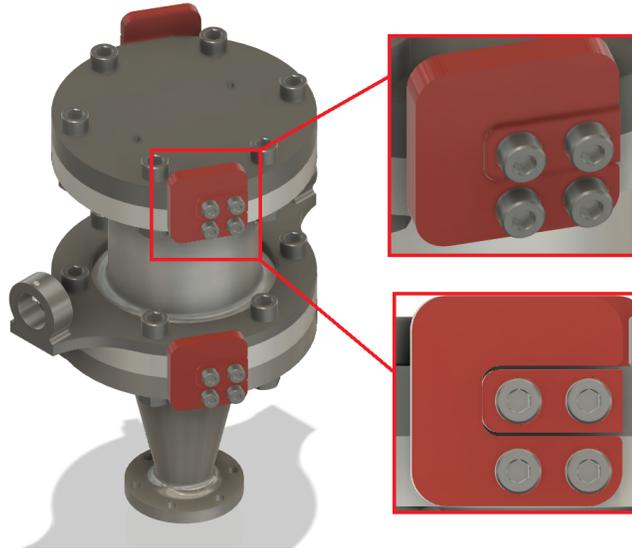


Figura 5.17: Conexión de seguridad.

Para aplicar la conexión de seguridad solo de debe incorporar un componente sobre otro y girar hasta que la solapa inferior intersece con la solapa superior, cada una conectada a cada componente, como se puede ver en la figura 5.18.

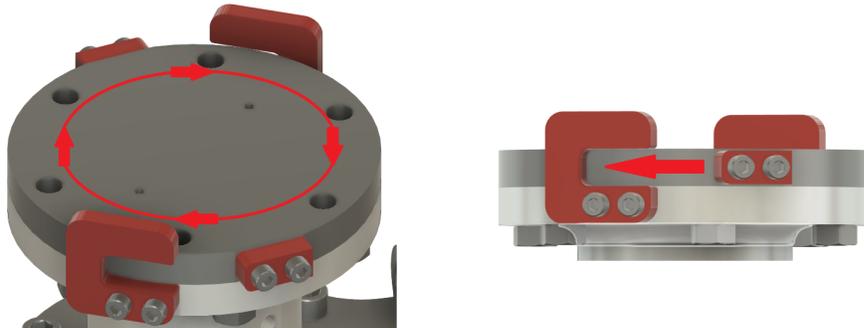


Figura 5.18: Accionamiento de conexión de seguridad.

Las conexiones de seguridad fueron diseñadas para operar con uniones emperñadas, específicamente con pernos  $M8$  clase 12.9, estos pernos presentan un factor de seguridad de 8.7 con un esfuerzo máximo de  $934.6[MPa]$ .

## 5.1.5. Tornillo alimentador

### 5.1.5.1. Camisa principal

El componente principal del tornillo alimentador corresponde al camisa principal. El camisa esta compuesto de una barra circular con múltiples perforaciones (como se puede ver en la figura 5.19), que permiten el acceso y descarga de material, además que permite el acceso de gas para la presurización del sistema. Adicionalmente, contiene el cilindro interior de nylon/PTFE que contiene el tornillo alimentador:

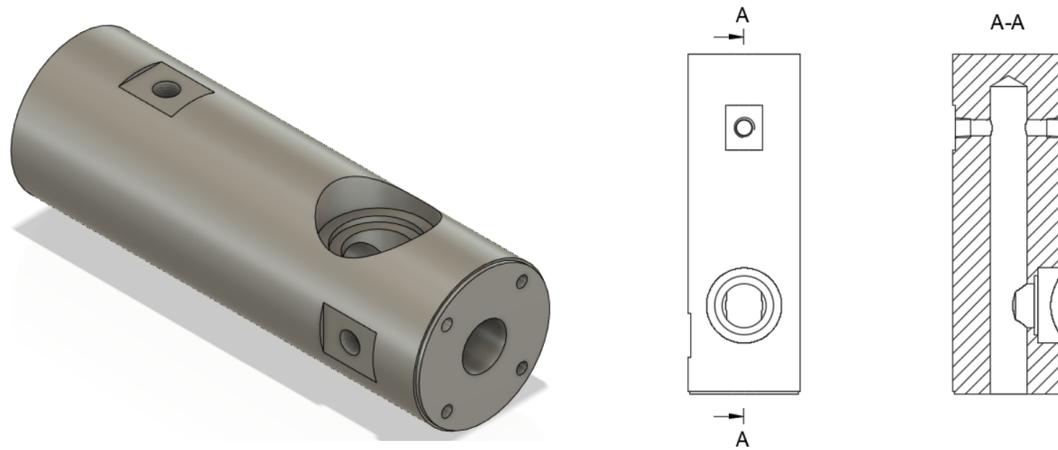


Figura 5.19: Cilindro principal.

El cilindro es fabricado a partir de acero inoxidable AISI 304. Para contener el conjunto de tornillo, buje y camisa interior se realiza una perforación interior donde se coloca el conjunto final, como se puede ver en la figura 5.20.

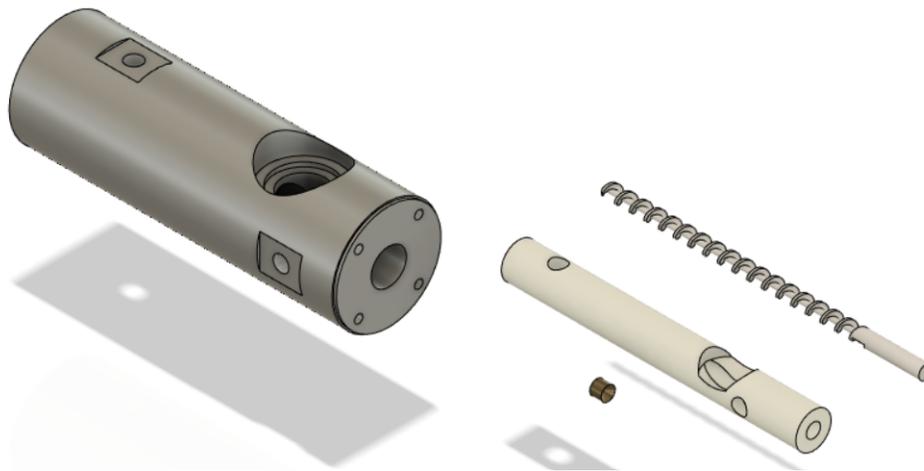


Figura 5.20: Componentes interiores del ensamblaje del cilindro principal.

Para sellar el sistema se utiliza una tapa frontal, que presenta un sello de anillo radial para las interfaces entre metales y un sello rotatorio para el tornillo. El conjunto completo es unido por medio de uniones apernadas, como se muestra en la figura 5.21.

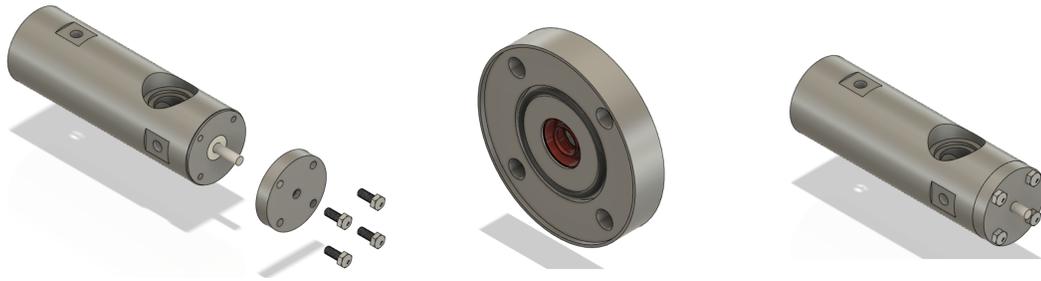


Figura 5.21: Componentes interiores del ensamblaje del cilindro principal.

### 5.1.6. Tapa frontal de tornillo y tornillo alimentador

Para contener la presión de la sección del tornillo alimentador se utilizará un conjunto de sello radial de ródon de acrílo nitrilo y un sello rotatorio. Este componente presenta dos cavidades para incorporar los dos sellos, como se puede ver en la figura.

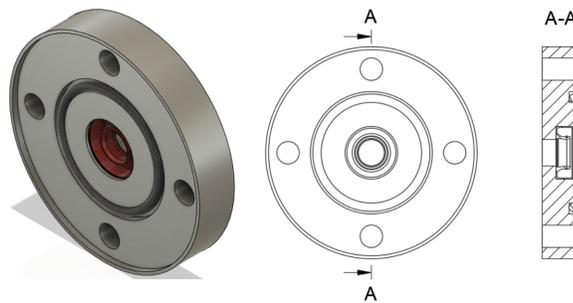


Figura 5.22: Tapa frontal del tornillo.

Cuando se remueve este componente los sellos quedan en sus cavidades, para evitar cualquier daño que pueda ocurrir le a estos. El tornillo alimentador sera colocado y fijado en todo momento en el sello rotatorio, como se puede ver en la figura, de esta manera se evitará que se presenten daños al sello por su remoción reiterada.

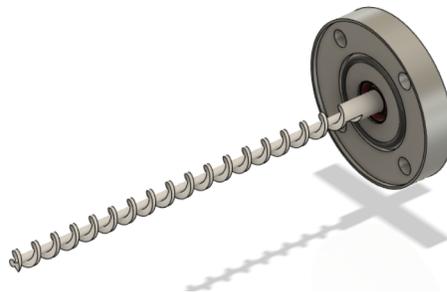


Figura 5.23: Conjunto tornillo y tapa frontal.

### 5.1.7. Evaluación numérica del tornillo alimentador

El conjunto del tornillo alimentador fue evaluado para analizar su comportamiento con una carga de presión de 1000 [psi]. Las figuras 5.24 y 5.25 muestran el esfuerzo de Von Mises equivalente y desplazamiento máximo, respectivamente, además de los puntos críticos y distribución de estos.

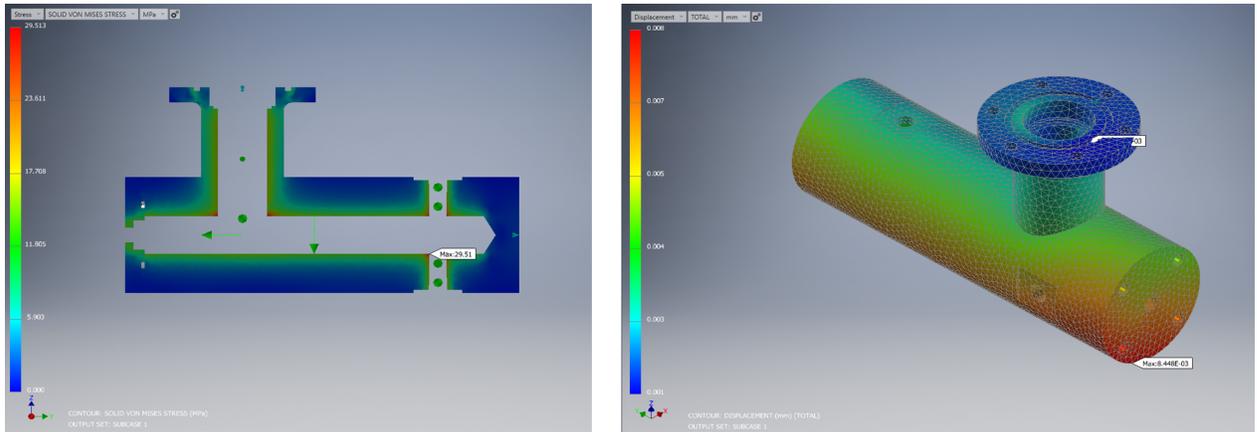


Figura 5.24: Resultados de la simulación de esfuerzo para el conjunto.

Tabla 5.8: Resultados de la simulación de esfuerzo para el conjunto.

Material	Esfuerzo de Fluencia [MPa]	Esfuerzo de Von Mises Max [MPa]	Desplazamiento Max [mm]	Factor de seguridad
AISI 304 L	210	21.51	0.00833	7.12

El esfuerzo máximo de Von Mises para este caso fue de aproximadamente 29.51 [MPa], lo cual indica que la estructura poseerá un factor de seguridad de 7.12, considerando el material de fabricación de AISI 304L.

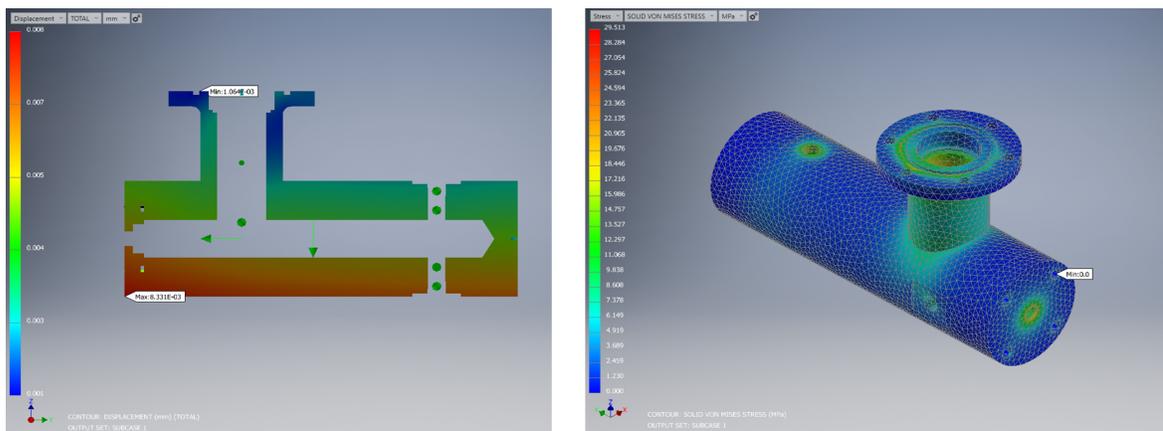


Figura 5.25: Resultados de la simulación de desplazamiento para el conjunto.

El desplazamiento máximo del sistema ser de aproximadamente 8.33E-03 [mm] de despla-

zamiento, lo cual no afecta significativamente la integridad del sistema. Consecuentemente, el subsistema se considera apto para la aplicación.

### 5.1.8. Sistema de movimiento y acople de stepper

Para permitir el acople y desacople sencillo del sistema del motor stepper se hace uso de un mecanismo de deslizamiento con ruedas a través de perfil de aluminio, como se puede ver en la figura 5.26. La conexión es llevada a cabo por conectores de eje con unión elástica de tipo estrella, como se puede ver en la figura 5.27.

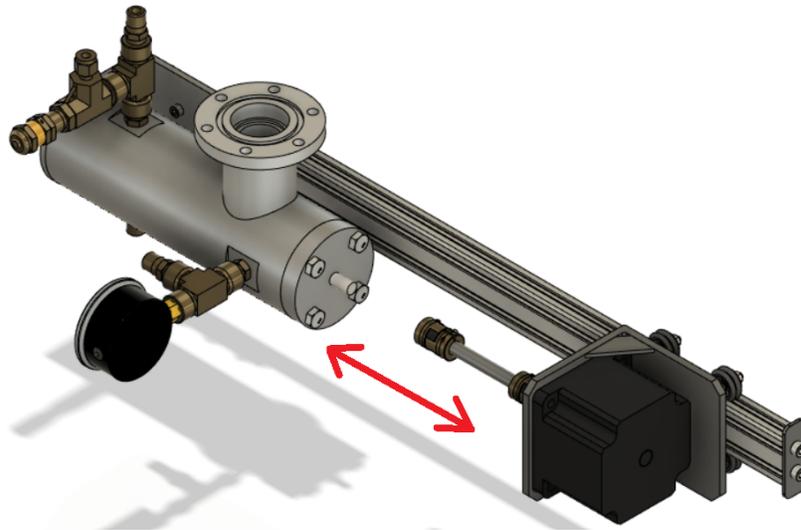


Figura 5.26: Movimiento de stepper a lo largo del riel.



Figura 5.27: Conector de ejes elástico.

### 5.1.9. Estructura de soporte

La estructura de soporte cumple la función de sostener al equipo completo de alimentación, además de mantener el sistema de pivoté en contacto con la celda de carga del sistema. La

estructura principal, figura 5.28, está compuesta de perfiles de acero de  $100 \times 50 \times 3$  [mm], que serán soldados a una base de conexión, que por medio de aperturas será conectado a un carro móvil, que poseerá compartimientos de almacenamiento.

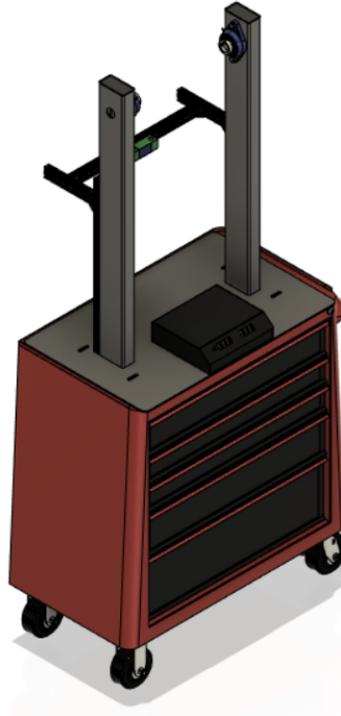


Figura 5.28: Estructura principal.

El conjunto superior está compuesto por los perfiles principales y una base inferior, que será aperturada al carro de transporte. En la parte trasera presentará una estructura de perfiles de aluminio, que proporcionarán el soporte para el sistema de celda de carga. Adicionalmente, se puede ver la adición de un compartimiento para alojar todos los componentes electrónicos y mantenerlos protegidos, todo esto como se puede ver en la figura 5.29.

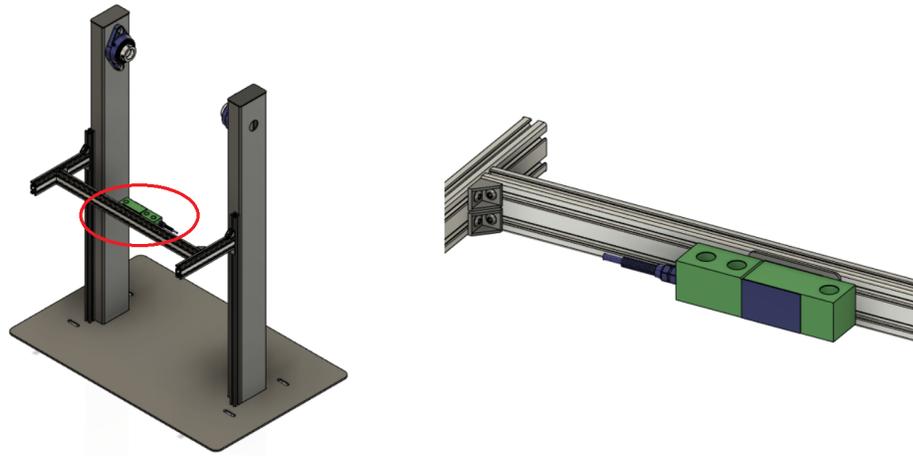


Figura 5.29: Estructura de extrusiones de aluminio y ubicación de celda.

Para el montaje del equipo se hará uso de descansos de flange, que presentaran rodamientos para facilitar el pivote del sistema, esto se puede ver la figura 5.30.

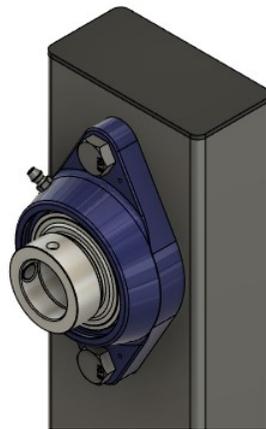


Figura 5.30: Descanso de flange.

Adicionalmente, el conjunto de componentes electrónicos deben ser protegidos de las condiciones ambientales, como polvos y humedad. Para solucionar este problema se decide utilizar un contenedor inferior sellado, como se ve en la figura 5.31, generado partir de chapas de aluminio plegado.



Figura 5.31: Contenedor de componentes.

Finalmente, como se mencionó anteriormente se incorporará un carro de movilidad para el sistema, que permitirá maniobrar de fácil manera el equipo, además de proporcionar un lugar donde colocar herramienta y componentes para el uso y mantención del equipo, figura 5.32.



Figura 5.32: Carro de movilidad y almacenamiento.

## 5.2. Componentes electrónicos

### 5.2.1. Sistema de control stepper y celda de carga

Para controlar el flujo de material del equipo se utilizará un sistema de control automático, que determine el flujo másico de material en función de la masa equivalente del sistema en tiempo real. Para este caso de deberán interconectar en conjunto la celda de carga y stepper mediante un mismo controlador para lograr obtener el control simultaneo. El esquema de conexión se puede ver en la figura

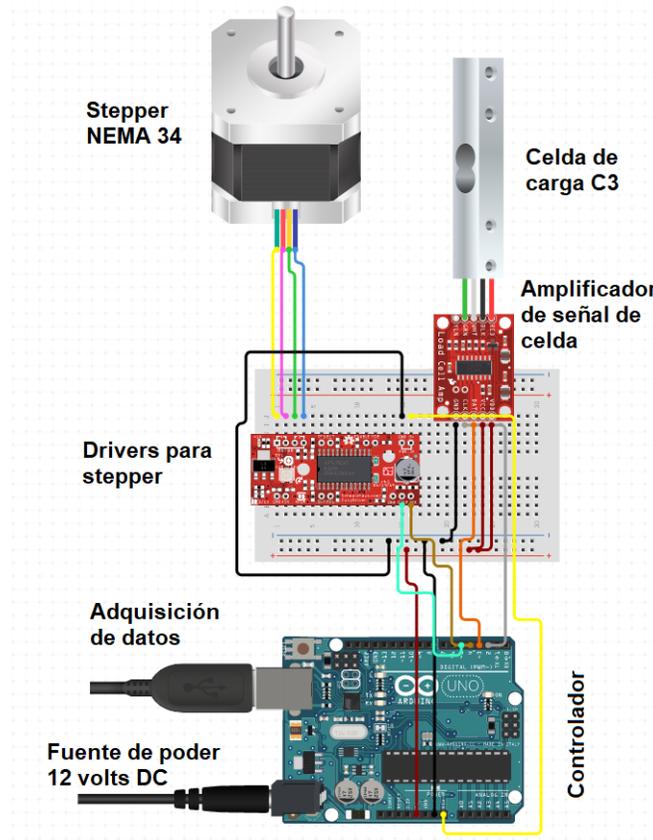


Figura 5.33: Esquema de circuito para control de flujo másico.

El motor stepper a ser utilizado será de tipo unipolar, por lo cual su control podrá ser realizado mediante un código sencillo. En este se podrán regular la RPM (para un rango óptimo de entre 0-100 RPM), que consecuentemente regularán el flujo másico del equipo. La conexión de componentes es detallada en la figura 5.34.

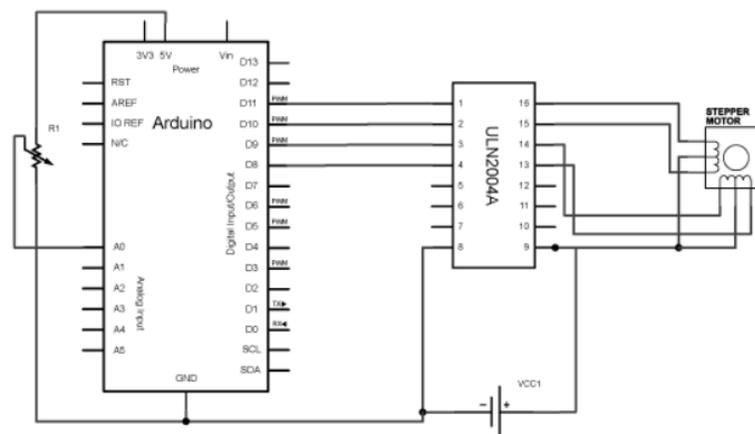


Figura 5.34: Esquema de circuito para control de stepper [28].

Para controlar el flujo másico en función de la carga en tiempo real se decide hacer uso

de una celda de carga para registrar el cambio de la masa en el sistema. Considerando que el flujo másico del sistema debe fluctuar entre  $5 [g/min]$  y  $50 [g/min]$ , el sistema debe lograr detectar el cambio de al menos  $1 [g]$ , de manera que el sistema pueda registrar el cambio de  $5 [g]$  en un minuto. El esquema de conexión para el sistema de celda se puede apreciar en la figura

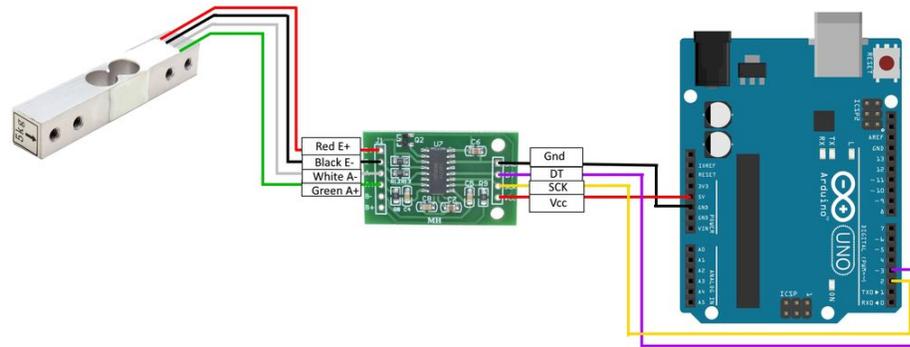


Figura 5.35: Esquema de circuito para control de celda de carga [27].

El equipo completo con tolva y tornillo de alimentación pesa aproximadamente  $60 [kg]$ , sin carga, por lo cual la celda de carga debería ser capaz de registrar el cambio de  $1 [g]$  en esta masa. Dado que las celdas de carga para obtener este grado de precisión son muy escasas y costosas, se decide redirigir la carga del equipo mediante el sistema de pivote, de esta forma es posible redireccionar el torque producido por el centro de masa del sistema para ser medido en otro sentido. El sistema permite desplazar la fuerza a la sección inferior del tornillo alimentador, donde se situará la celda de carga, que corresponde al indicador azul en la figura 5.36 y aparece de color verde en la figura 5.37

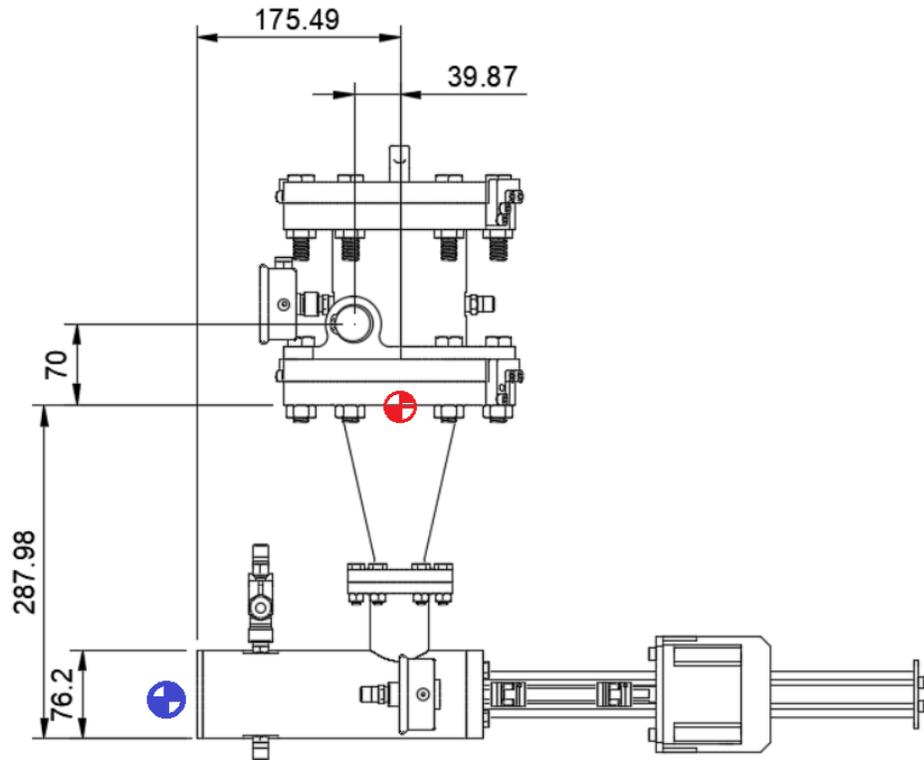


Figura 5.36: Esquema de centro de masa y posición de celda de carga.

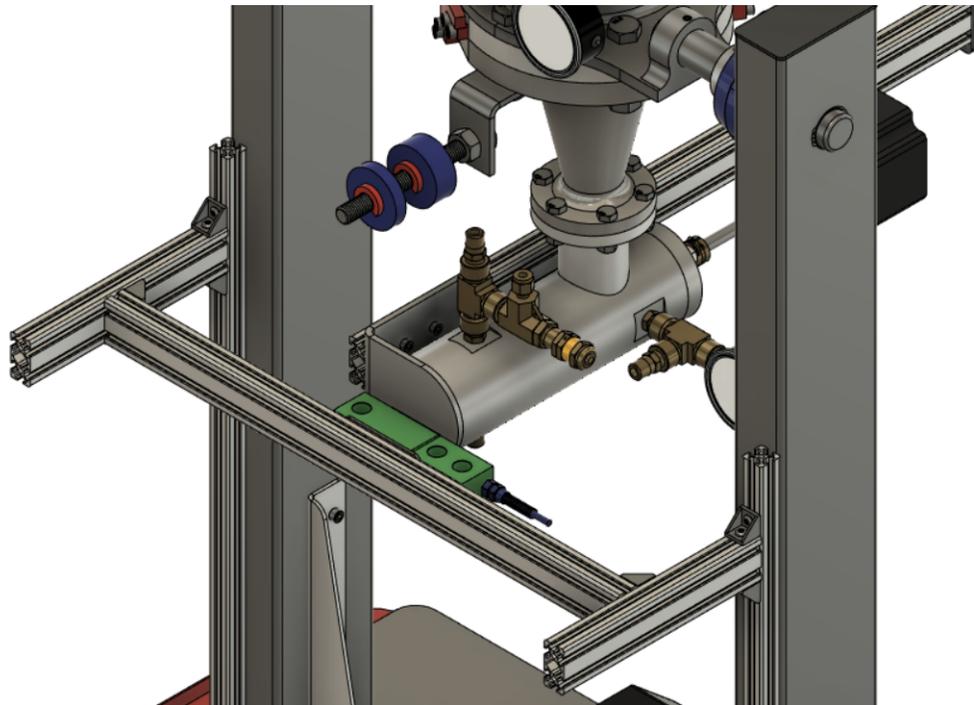


Figura 5.37: Esquema de centro de masa y posición de celda de carga.

Considerando que el desplazamiento del centro de gravedad desde el punto de pivote es de aproximadamente  $39.87 [mm]$  y el brazo de distancia hasta el punto de instalación de la

celda es de aproximadamente  $287.98 [mm]$ , lo cual significa que la carga efectiva que se aplica en el punto inferior es de aproximadamente  $10.3 [kg]$ .

$$C_{Efectiva} = 10.3[kg] \quad (5.1)$$

Considerando la carga anterior, para duplicar la precisión del sistema se decide utilizar dos celdas de carga para  $10 [kg]$  clase C3, que proporcionan una precisión del  $0,023 \%$  [28]. De esta manera el registro mínimo del sistema sería de aproximadamente  $1.15 [g]$ .

$$C_{Precisión} = 1.15[g] \quad (5.2)$$

El desplazamiento de material en el alimentador genera un cambio de ubicación del centro de masa del sistema, conforme este disminuya a medida que se deposita. Considerando que la cantidad de material en el tornillo alimentador es despreciable, se considera que el cambio de masa del sistema es exclusivamente en la tolva de alimentación. Tomando como referencia la zona de ubicación del centro de gravedad del sistema, se realiza una simulación de descarga en sistema para analizar como varía la posición del centro de gravedad respecto al centro de gravedad inicial. Lo anterior se puede apreciar en la figura 5.38.

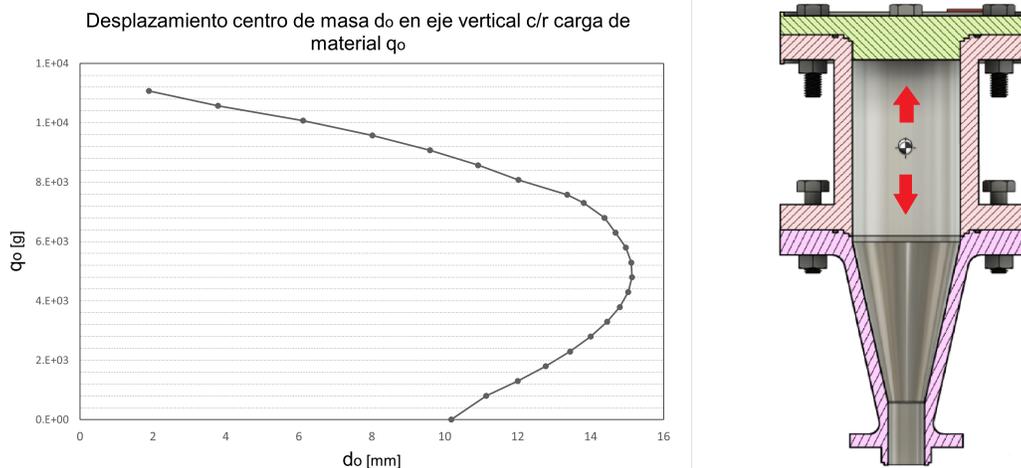


Figura 5.38: Desplazamiento del centro de gravedad con respecto a la carga del sistema.

Considerando que el desplazamiento del centro de gravedad no fluctúa más de  $15 [mm]$  en la dirección vertical del sistema, se estima que este no afectara significativamente la medición del equipo.



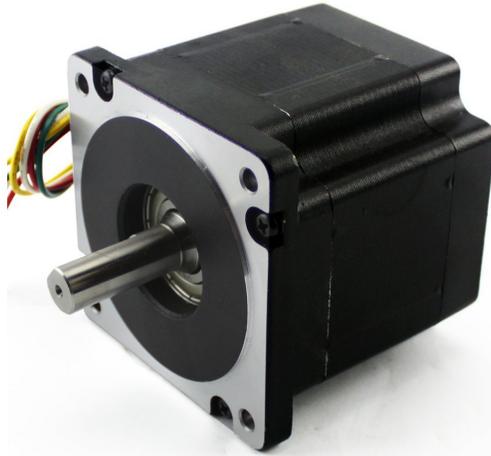


Figura 6.2: Stepper NEMA 34 [34]

Dentro de las ventajas que posee un stepper NEMA 34 se encuentra la posibilidad de encontrar múltiples valores de torque de retención (desde 4 a 12  $[Nm]$ ), por lo cual resulta muy conveniente a la hora que necesitar incrementar la potencia del sistema, aprovechando que la montura presenta dimensiones estándar para todo NEMA 34.

El motor NEMA 34 utilizado requiere una corriente de 4.2  $[A]$ . Par poder suministrar esta corriente a 12  $[V]$  DC se debe hacer uso del driver TB6600 [30].



Figura 6.3: Drivers para control de NEMA 34.

### 6.1.2. Celda de carga y amplificador

Para este sistema se utilizarán dos celdas de carga de 10 [kg] de capacidad, para incrementar la precisión del sistema. Estas celdas serán de tipo viga flexible, como se puede ver en la figura:



Figura 6.4: Celda de carga de viga flexible.

Estas celdas deben ser de clase C3, las cuales presentan un grado de precisión de 0.023% [28]. De esta manera, el sistema tendrá la precisión para poder detectar cambios de carga para unidades de masa reducida.

Adicionalmente, se debe incorporar un amplificador operacional ADC para la celda de carga, en particular se hará uso de un controlador HX711 [36]. Este componente amplificará la señal de la celda y adicionalmente convertirá la señal de análogo a digital.

### 6.1.3. Controlador

Para relacionar el funcionamiento de todos los componentes se hace uso de un controlador Arduino Uno [37]. Este controlador permitirá relacionar de manera sencilla el funcionamiento del sistema completo de motor paso a paso y celda de carga.

## 6.2. Conexiones y sellos de gas

Considerando que el equipo de Cold Spray preexistente [1] utiliza como gas de presurización nitrógeno, las conexiones y sellos de este equipo serán diseñadas para operar con este gas. El nitrógeno corresponde a un gas diatómico, inodoro, incoloro y no inflamable. Sus propiedades pueden verse en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Propiedades físicas del nitrógeno diatómico [29]

Propiedad	Condición	Valor	Unidad
Gravedad específica	(0°C, 1 atm)	0.967	[ $kg/m^3$ ]
Densidad del líquido	(1 atm)	0.8086	[ $kg/l$ ]
Densidad del gas	(15 °C, 1 atm)	1.185	[ $kg/m^3$ ]
Densidad del gas	(0°C, 1 atm)	1.2505	[ $kg/m^3$ ]
Temperatura de ebullición	(1 atm)	-195.803	[ $^{\circ}C$ ]
Presión crítica		33.999	[ $bar$ ]
Temperatura crítica		-146.95	[ $^{\circ}C$ ]
Peso molecular		28.0134	[ $g/mol$ ]

### 6.2.1. Racor de alta presión

Para permitir la unión a cilindros de almacenamiento y camisa de tornillo, se seleccionó una medida estandarizada de conexión, la cual corresponde a NPT 1/4" hembra, por lo que es necesario una serie de uniones de 1/4" macho-macho, como la que aparece en la figura 6.5, que permite fácil instalación con inserto hexagonal. Estas conexiones/racores son de acero inoxidable 316, con una presión máxima de trabajo de 10.000 [ $psi$ ][30].



Figura 6.5: Unión hexagonal macho-macho, marca Hikelok [30]

### 6.2.2. Tee de alta presión

Una vez instaladas las conexiones macho-macho al equipo, se deben incorporar conexiones de salida múltiple, o tee, que permitan conectar adicionalmente válvulas de alivio y manómetros para controlar la presión presente en todo momento. Al igual que las conexiones anteriores, estas tee son de acero inoxidable 316, con una presión máxima de trabajo de 10.000 [ $psi$ ][30].



Figura 6.6: Unión tee hembra, marca Hikelok [30]

### 6.2.3. Válvula de alivio

Si bien el equipo fue diseñado para soportar presiones superiores a las de operación normal de 3.45 [MPa] (500 [psi]), por seguridad del usuario y del sistema, el equipo no puede sobrepasar esta presión. Para evitar esto el equipo sera instalado con válvulas de alivio ajustables que pueden operar entre 50-6000 [psi], con una presión de salida máxima de 1500 [psi], con el formato como se puede ver en la figura 6.7. La válvula puede ser ajustada para el rango de presión deseado por medio de un ajuste roscado, y puede ser incorporado al sistema de conexiones de alta presión, puesto que presenta unión de tipo NPT 1/4".



Figura 6.7: Válvula de alivio RV11, marca Hikelok [30]

### 6.2.4. Manómetro

En el sistema se utilizan 2 manómetros, el primero para la parte superior del sistema en la tolva de alimentación, con un rango de 0 a 4.14 [MPa] (0 a 600 [psi]) y el segundo para el sistema del tornillo alimentador, con el mismo rango que el manómetro anterior. Ambos presentan una conexión de tipo NPT 1/4", por lo cual pueden ser fácilmente adicionados a las conexiones por tee.



Figura 6.8: Manómetros PG1, marca Hikelok [30]

### 6.2.5. Sellos con o-ring

El sellado de los componentes de la tolva de almacenamiento y tornillo alimentador, como tapa de acceso, cilindro de almacenamiento, cono de descarga y tapa de tornillo, sera realizado por medio de o-rings generados por rodones de acrílo nitrilo. Una de las grandes ventajas de utilizar este tipo de sellos es su gran resistencia a altas presiones, si las tolerancias son apropiadas puede llegar a soportar presiones de hasta 1500 [psi] [31].

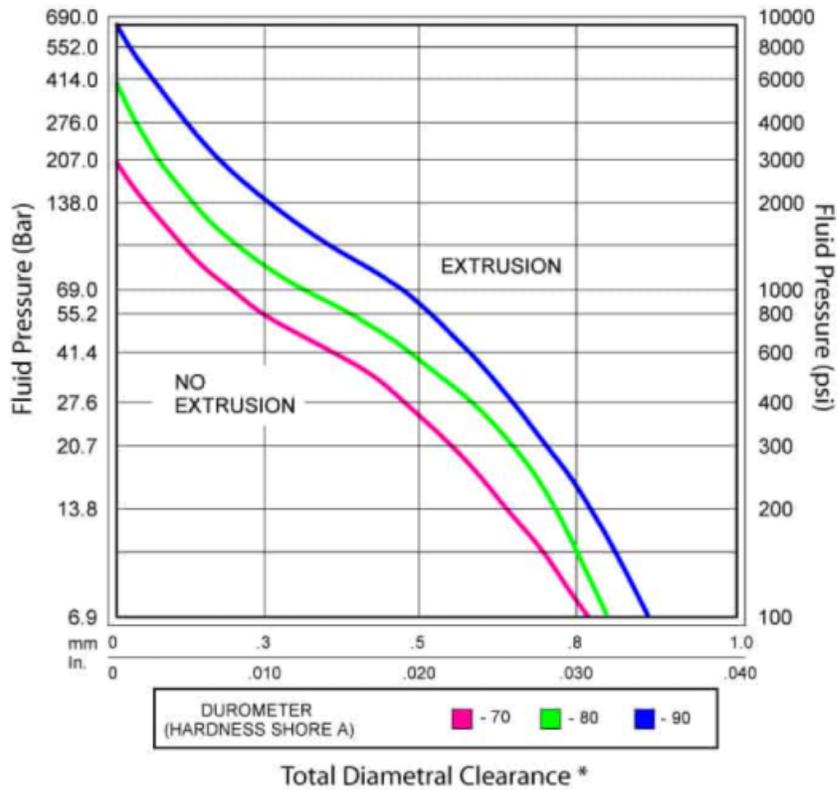


Figura 6.9: Rango de presiones admisibles en función del dureza y despeje [26]

Dependiendo de la aplicación del sello se deben calcular diferentes rangos de compresión del sello y de cavidades. Un exceso de compresión puede producir daños al sello y holguras muy grandes pueden generar fallas de confinamiento del fluido.

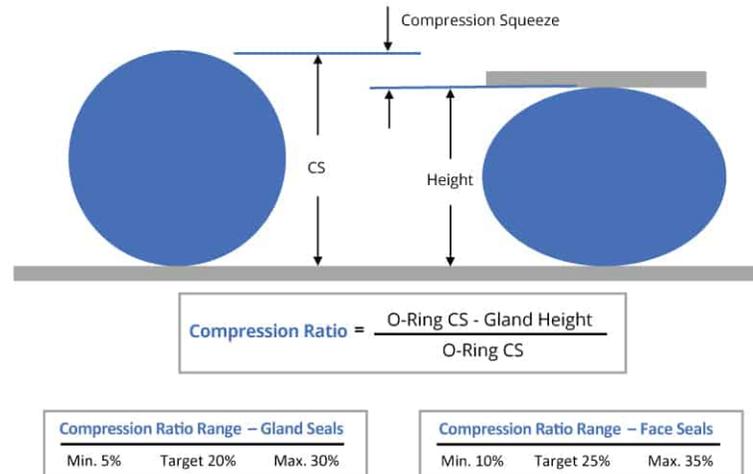


Figura 6.10: Criterios de compresión para sellos o-ring [31]

Para calcular el despeje interior y rango de compresión adecuado se hizo uso del método utilizado por COG [27], donde se calcula el despeje en función del diámetro del rodón y la presión de debe soportar.

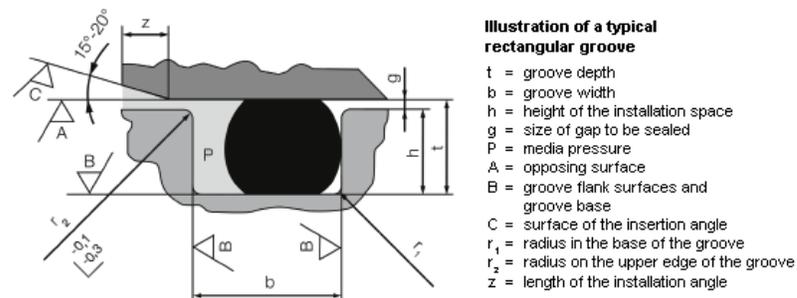


Figura 6.11: Criterios de compresión para sellos o-ring [32]

Los sellos utilizados en la tolva y tornillo de alimentación serán fabricados a partir de un rodón de 3 [mm]. De esta manera se podrán reemplazar fácilmente en caso de ser dañados. La ranura presentara la geometría de la figura

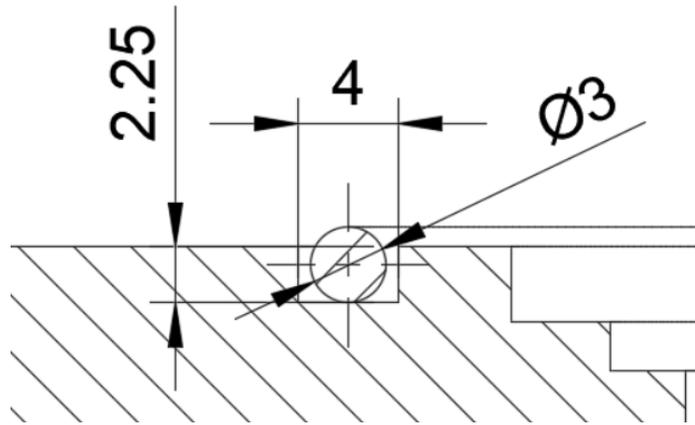


Figura 6.12: Criterios de compresión para sellos o-ring

Todos los surcos realizados serán de un espesor de 4 [mm] y una profundidad de 2.25 [mm], como se puede ver la figura 6.13. Este entandar permite una compresión menor al 75 %, consistente para soportar una presión superior a 1000 [psi].

### 6.2.6. Sellos rotatorios para tornillo

El sello más crítico de este sistema corresponde al sello rotacional que contiene la presión entre el tornillo y la tapa de unión. Este sello debe contener hasta 500 [psi], mientras rota hasta 100 [RPM], como velocidad angular máxima. El sello también debe presentar cierto grado resistencia a la corrosión, considerando los polvos presenten en sistema.

El sello apropiado para esta aplicación corresponde a un sello de PTFE con resorte de retención en "V", adicionalmente presenta un o-ring radial que sella en la cavidad de instalación. La figura 6.13 muestra la sección de un sello de este tipo.



Figura 6.13: Sello rotatorio o-ring VS-RS20B [38].

Estos sellos son altamente especializados, y las tolerancias para la cavidad de la instalación

deben ser bien calculadas. El sello sera incorporado al tornillo y solo debe ser removido para recambio, para evitar algún daño a este.

# Capítulo 7

## Procedimiento de utilización

El equipo diseñado presentara riegos con respecto a la proyección de componentes o fragmentos en caso de despresurización acelerada, además de posibles daños generados por los polvos metálicos y ruidos. Para anteponerse a estos efectos se considera hacer uso de elementos de protección personal (EPPs) para proteger la integridad del operador.

A continuación, se detalla el procedimiento para el uso adecuado del equipo diseñado, para prevenir posibles daños al operario de este. Este procedimiento contempla el uso desde la carga hasta descarga del equipo.

Donde:

1. Comenzar revisando los manómetros de la tolva y tornillo de alimentación, procurar que la presión se encuentre en un rango seguro, idealmente bajo 100 [psi], para prevenir daños.
2. Se procede a desconectar las conexiones de alta presión para despresurizar todo el sistema.
3. Desconectar y apagar todo sistema eléctrico que controle el mecanismo del motor paso a paso y celda de carga.
4. Desconecta la extensión del tornillo con las conexiones de eje, de esta manera se puede deslizar el conjunto del motor paso a paso hasta el terminal de carrera del perfil
5. Desatornillar los cuatro pernos que aseguran la tapa de la camisa del tornillo alimentador.
6. Remover el conjunto de tapa con sello y tornillo alimentador.
7. Desatornillar los seis pernos o abrazaderas de la parte superior.
8. Rotar el conjunto para desacoplar el seguro rotatorio.
9. Remover conjunto de tapa superior del equipo.
10. Desconectar sistema de celda de carga.

11. Pivotar sistema para retirar material restante en el interior.
12. Realizar limpieza y mantenimiento de piezas y componentes.
13. Comprobar buen estado de sellos y superficies de cierre.
14. Retornan equipo a la posición de pivote original.
15. Volver a conectar sistema de celda de carga.
16. Colocar tapa superior de la tolva y tapa de cilindro del tornillo alimentador.
17. Rotar el conjunto para acoplar el seguro rotatorio.
18. Atornillar las tapas correspondientes.
19. Acoplar sistema de extensión de tornillo.
20. Conectar todos los sistemas electrónicos.
21. Comprobar que las válvulas de alivio se encuentren en la graduación correcta para 500 [psi]
22. Presurizar el sistema comenzando con la sección inferior del sistema, correspondiente al tornillo alimentador, y luego la parte superior de la tolva de alimentación.

# Capítulo 8

## Conclusión

En este trabajo de título se ha logrado diseñar, planear la construcción y evaluar un sistema de alimentación de polvos, destinado para el uso en conjunto con un equipo de Cold Spray preexistente en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

El proyecto consistió en múltiples etapas de diseño, evaluación y análisis de componentes, desde la revisión inicial bibliográfica de múltiples equipos y modelos académicos, hasta la última cotización y plano realizado. Según las estimaciones de cotización y procesos de manufactura, el equipo a ser fabricado costaría aproximadamente \$ 1.250.000 [CLP], haciendo factible la construcción y ensamblaje del equipo.

Uno de los aspectos más novedosos de este trabajo fue el poder familiarizarse y conocer en más detalle el funcionamiento de los alimentadores de material y sus componentes intrínsecos. Existe una gran cantidad de consideraciones en el proceso de diseño de estos equipos, ya sea proporcionar el flujo continuo y controlado, mantener un grado de esfuerzos adecuado para evitar apelmazamiento de material, entre otros.

Desafortunadamente, considerando el contexto de pandemia, la construcción del equipo diseñado no es posible, principalmente por problemáticas de movilidad y acceso a dependencias de la universidad. No obstante, cabe destacar que para este trabajo se consideraron todos los aspectos relevantes para poder llevar a cabo la construcción del equipo, incorporando procesos de manufactura, cotización y cubicación de componentes fabricados y comerciales.

Se logro profundizar el conocimiento en áreas de cálculo estructural para sistemas presurizados, uso de simulaciones de elemento finito para evaluación de los equipos y simulaciones para comprender el actuar de diferentes componentes. Además, se logra familiarizar de gran manera con uno de los equipos mas relevantes que toman parte en los procesos de manufactura aditiva, particularmente Cold Spray.

Cabe destacar que en gran medida se logro llevar a cabo los objetivos propuestos para este trabajo, dentro del marco de los alcances propuestos para este.

Se logro definir los parámetros de flujo, gas, volumen, presión y granulometría de polvos para el equipo completo, estos permitieron generar una serie de ideas y diseños que permitieron llegar al modelo final.

Conforme se realizaron los calculos y obtuvieron las tolerancias del sistema, fue posible desarrollar los modelos CAD y geometrías necesarias para lograr obtener un modelo apropiado para las aplicaciones. Estos calculos proporcionaron la información necesaria para poder seleccionar los materiales y componentes necesarios.

La evaluación estructural del equipo fue llevada a cabo exitosamente por medio de análisis de elemento finito, los softwares de evaluación resultaron ser de gran importancia para guiar las tolerancias del modelo, para poder asegurar la integridad y seguridad del equipo y de los operarios que lo utilizan.

Finalmente, se lograron realizar los planos de construcción para cada componente y conjunto requerido, además de las cotizaciones y cubriciones de cada uno de estos. Esto fue posible en gran parte a la ayuda de distintos distribuidores y contactos, para lograr obtener los valores correctos.

# Bibliografía

- [1] Massardo Moretti, Cristóbal Javier y Fernández Urrutia, Rubén Marcos, *Diseño y construcción de un sistema de cold spray*, Repositorio Académico de la Universidad de Chile, Link:<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/171782>
- [2] Yin, Shuo, Lupoi, Rocco, *Cold Spray Additive Manufacturing*, Springer Tracts in Additive Manufacturing, Link:<https://www.springer.com/gp/book/9783030733667>
- [3] Plastics Technology, *Basics of Gravimetric and Volumetric Feeding: Plastics Technology*, Cincinnati, OH Plastics Technology, Link:<http://www.ptonline.com/knowledgecenter/Plastics-Feeding/feed-rate-basics>
- [4] Nanette Visagie and Charl Albertus Smal, *Hopper design for metallic powders used in additive manufacturing processes*, Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, South Africa, DOI:<http://hdl.handle.net/10204/7214>
- [5] Jiri Zegzulka, Daniel Gelnar, Lucie Jezerska, Alvaro Ramirez-Gomez, Jan Necas and Jiri Rozbroj, *Internal Friction Angle of Metal Powders*, MDPI Journal, DOI:<https://doi.org/10.3390/met8040255>
- [6] Equipos de Cold Spray comerciales,  
*Impact Powder Feeder*,  
Link:<https://impact-innovations.com/en/portfolio-item/impact-powder-feeder-5-11/>  
*Uniquecoat HP-D2 Powder Feeder*,  
Link:<http://www.uniquecoat.com/powder-feeder-d2.html>  
*AMF M4 Series Powder Feeder*,  
Link:<https://polycontrols.com/wp-content/uploads/2020/10/powderfeeder-coldspray.pdf>  
*Flame Spray Technologies FST-20 Powder Feeder*,  
Link:<https://www.fst.nl/thermal-spray-equipment/auxiliary-equipment/powder-feeders.html>  
*Metal Tech & Mgmt .Inc PFD401CB Powder Feeder*,  
Link:<https://www.metaltechmgmt.com/power-feeders/>
- [7] Jônathas Alexandre Alves, Régis Henrique Gonçalves e Silva, Jair Carlos Dutra, *Development of a Powder-feed Device and Procedures for the Application of an Experimental Alloy in Overhead PTA-P Welding*, Soldagem & Inspeção. 2015, DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2004.08>
- [8] Kurt Naugler, Eric Jorgensen, Nicholas Spunar and Colin Rose, *Powder Feeder Redesign for Laser-Assisted Cold Spray*, IPG Photonics, Link:[https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032316-152646/unrestricted/LACS\\_MQP\\_Report.pdf](https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032316-152646/unrestricted/LACS_MQP_Report.pdf)

- [9] Schulze Dietmar , *Powders and Bulk Solids, Behavior, Characterization, Storage and Flow*, Springer, Link:<https://www.springer.com/gp/book/9783540737674>
- [10] Jiri Zegzulka, Daniel Gelnar, Lucie Jezerska, Rostislav Prokes & Jiri Rozbroj, *Characterization and flowability methods for metal powders*, Scientific Reports, Nature Research, DOI:<https://doi.org/10.1038/s41598-020-77974-3>
- [11] ASTM D6128 - 16, *Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Tester*, ASTM International, Link:<https://www.astm.org/Standards/D6128.html>
- [12] Coeficientes de fricción de materiales, *Coefficient of Friction Table*, Link:[https://www.teachengineering.org/content/nyu\\_/activities/nyu\\_heavy/nyu\\_heavy\\_activity1\\_coftable.pdf](https://www.teachengineering.org/content/nyu_/activities/nyu_heavy/nyu_heavy_activity1_coftable.pdf)
- [13] AISI 304 Stainless Steel Mechanical Properties, *Grade 304 Stainless Steel: Properties, Fabrication and Applications*, Link:<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2867>
- [14] Jiri Zegzulka, Daniel Gelnar, Lucie Jezerska, Alvaro Ramirez-Gomez, Jan Necas and Jiri Rozbroj, *Internal Friction Angle of Metal Powders*, MDPI Journal, DOI:<https://doi.org/10.3390/met8040255>
- [15] Greg Mehos and Dave Morgan, Jenike & Johanson, *Hopper Design Principles, Solid Handling*, Chemical Engineering, Link:<https://www.chemengonline.com/hopper-design-principles/?printmode=1>
- [16] Chika Oko and Ogheneruona Diemuodeke , *Design of Hoppers Using Spreadsheet*, Journal of Agricultural Engineering Research, DOI:<https://doi.org/10.17221/30/2009-RAE>
- [17] KME Copper Powder, *Copper Powder Data Sheet*, KME, Engineering copper solutions, Link:<https://www.kme.com/en/specialdivision/extruded-drawn/kme-copper-powder>
- [18] Yongqin Yu, *Theoretical modelling and experimental investigation of the performance of screw feeders*, University of Wollongong, Link:<https://ro.uow.edu.au/theses/1601/>
- [19] Kawale, Amey, *Design and fabrication of a feedstock delivery system for a 3 kW solar gasification reactor*, University of Minnesota M.S. thesis, Link:<https://conservancy.umn.edu/handle/11299/160150>
- [20] Wood Drilling and Auger Bits, *Wood Drilling*, IRWIN, Link:[https://www.irwin.com/uploads/documents/52\\_2013\\_wooddrilling\\_ebook.pdf](https://www.irwin.com/uploads/documents/52_2013_wooddrilling_ebook.pdf)
- [21] Screw Conveyor For Bulk Material, *ANSI/CEMA Standard No. 350 Fifth Edition*, Screw Conveyor Engineering Committee of the Engineering Conference Conveyor Equipment Manufacturers Association, Link:<https://cemanet.org/wp-content/uploads/2019/06/ANSI-CEMA-350-FinalReview.pdf>
- [22] Screw Conveyors, *Engineering Guide*, KWS, Link:<https://www.kwsmfg.com/engineering-guides/screw-conveyor/types-of-screw-feeders/>
- [23] Nema 34 Rotary, *Nema 34 (86 MM) Hybrid Stepper Motor Specification*, Dings Motion USA, Link:<https://dingsmotionusa.com/nema-34-rotary>
- [24] Copper Powders Mechanical Properties, *American Elements*, Link:<https://www.americanelements.com/copper-powder-7440-50-8>

- [25] Pipe Spool Production, *Yena Engineering*, Link:<https://yenaengineering.nl/pipe-spool-production/>
- [26] Shaft deflexion, *Mining Engineering, PPI Global*, Link:[https://www.ppi-global.com/userdocs/literature/ppi/documents/pulley\\_idler\\_shaft\\_f9265c65b8f87.pdf](https://www.ppi-global.com/userdocs/literature/ppi/documents/pulley_idler_shaft_f9265c65b8f87.pdf)
- [27] Stepper Arduino Control, *Arduino cc*, Link:<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/LibraryExamples/StepperSpeedControl>
- [28] Load cell precision, *Variohm*, Link:<https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/load-cell-accuracy>
- [29] Propiedades Fisicas del Nitrogeno, *Indura*, Link:[https://www.indura.com.ar/content/storage/ar/producto/ID4418\\_file\\_975\\_nitrogeno\\_ficha\\_tecnica.pdf](https://www.indura.com.ar/content/storage/ar/producto/ID4418_file_975_nitrogeno_ficha_tecnica.pdf)
- [30] High preasure fittings, *Hikelok*, Link:<https://www.hikelok.com/>
- [31] O-ring preasure rating and groove design, *Gloval O-Ring and Seal*, Link:<https://www.globaloring.com/o-ring-pressure-ratings/>
- [32] O-ring groove calculation, *C. Otto Gehrckens GmbH & Co. KG Seal Technology*, Link:<https://www.cog.de/en/products/all-about-o-rings/housing-for-o-ring-seals/tabularly>
- [33] Load cell precision, *Variohm*, Link:<https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/load-cell-accuracy>
- [34] Motor NEMA 34, *AFEL*, Link:<https://afel.cl/producto/driver-motor-paso-a-paso-tb6600-0-2-5a-12-48vdc/>
- [35] Drivers de control para motor Nema 34, *AFEL*, Link:<https://afel.cl/producto/motor-paso-a-paso-nema-34-modelo-hs8040-4a/>
- [36] Amplificador operacional para celda de carga, *MCI electronics*, Link:<https://www.mcielectronics.cl/shop/product/amplificador-para-celda-de-carga-hx711-sparkfun-21782>
- [37] Arduino Uno, *Arduino cc*, Link:<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- [38] Rotary Seal, *AHPS American High Performance Seals*, Link:<https://www.ahpseals.com/product/vs-rs20b-2/>
- [39] Shigley's Mechanical Engineering Design, *McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering*, Link:[http://mech.sharif.edu/~mechengdesign/Shigley's%20Mechanical%20Engineering%20Design\\_TextBook.pdf](http://mech.sharif.edu/~mechengdesign/Shigley's%20Mechanical%20Engineering%20Design_TextBook.pdf)
- [40] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, *SECTION II Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 1*, Link:<https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-iid-bpvc-section-ii-materials-part-d-properties>
- [41] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, *SECTION II MATERIALS, Part D Properties (Metric)*, Link:<https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-viii-1-bpvc-section-viii-rules-construction-pressure-vessels-division-1>
- [42] George F. HAUSENBAUER and George C. LEE, *STRESSES IN THICK-WALLED CONICAL SHELLS*, NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN 3 (1966) 394-401. NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMP.. AMSTERDAM, Link:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0029549366901300>

[43] Stokes number, *Stokes number and applications*, Link:<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stokes-number>

## 8.1. Anexos

## 8.1.1. Cotizaciones



### Sailuoke Fluid Equipment Inc.

No.156 Tongxin road,  
Chongzhou Economic Zone, Chengdu, 611230, China  
Tel: ( +86 28 82761499 ) Fax: ( +86 28 82761499 )  
Web: [www.hikelok.com](http://www.hikelok.com) Email: sales4@hikelok.com

### QUOTATION SHEET

To: **Fernando Astudillo**

Ref. No.: **A210727002**

Add: **Chile**

Date: **July 27th, 2021**

Sr.No.	Product	Specification	Hikelok Part No.	QTY	Unit Price	Total Price
1	Hex Nipple	1/4" NPT Male-Male Nipple fitting 316 ss	NPT4-THN-NPT4-316	8	\$3.00	\$24.00
2	Male Street Tee	1/4" NPT Female-Female-Female Tee 316 ss Port 1 type: FNPT Port 2 type: NPT Port 3 type: FNPT 	FNPT4-TMST-NPT4-FNPT4-316	3	\$12.00	\$36.00
3	Relief Valve	1/4" NPT relief valve for 500 psi Inlet and Outlet type: Female NPT Orifice size: 0.14 inch (3.6 mm) Seal Material: Fluorocarbon FKM Spring Kit Color: Orange 300-700 psig Body material: 316 S.S. 	RV1-FNPT4-03V-O-316	2	\$71.00	\$142.00
Estimate freight fee from China to Chile by UPS express (tax exclusive price) Total weight of goods and package: 2.5KG						\$92.00
<b>Total price</b>						<b>\$294.00</b>

Remarks:

Figura 8.1: Componentes de gas Hikelok

Cotización 314695

Sucursal (Lugar de entrega) : Casa Matriz  
 Fecha : 26/07/2021  
 RUT del Cliente : 19.475.664-K  
 Razón Social : FERNANDO ASTUDILLO LANAU  
 Nombre del contacto : FERNANDO ASTUDILLO LANAU  
 E-mail : f.astudillo.1@ug.uchile.cl  
 Teléfono : +56998705407  
 FAX :  
 Vendedor : Andrés Vargas

Cantidad	Producto	Detalle	Precio	Total
1.00	NYLPA000100015NA	NYLON PA BARRA NATURAL 15x1000mm	\$ 1.171	\$ 1.171
1.00	PTFET000100020NA	PTFE BARRA NATURAL 20x1000mm	\$ 12.157	\$ 12.157
			<b>Neto</b>	\$ 13.328
			<b>IVA</b>	\$ 2.532
			<b>Total</b>	\$ 15.860

Comentarios adicionales :

Validez de la oferta : 5 días

Plazo de entrega : Inmediata, según disponibilidad de stock.

Forma de pago :

Términos de venta: Ver términos de venta, crédito, limitación de responsabilidad y devolución de materiales en documento TVCRD-2016DIC adjunto en página 2 de esta cotización.

Nota : Orden de compra emitirla a nombre de **Polymershapes Chile S.A.** RUT : **96.823.070-0**

Toda venta con cheque deberá ser verificados por Orsan; O deberá ser sometida a evaluación de crédito que debe ser solicitada 15 días antes de efectuar la compra. Los cheques deben ser emitidos a nombre de **Polymershapes Chile S.A.**

En el caso de las ventas con crédito sólo se entregara la cuarta copia cedible de la factura una vez estén efectivamente acreditado los fondos en la cuenta corriente de Polymershapes Chile.

Atento a sus consultas le saluda

**Andrés Vargas**  
Desarrollador de Cuentas de PPI

Polymerland  
 Román Spech 3213  
 Quinta Normal  
 Santiago, Chile CP8530048  
 T: +56 22797 1443  
 C: +56 95217 7649  
 F: +56 22797 1416  
 avargas@polymerland.cl  
 www.polymerland.cl

1 de 2 paginas

Figura 8.2: Canales de Nylon y PTFE



Casa Matriz: Poeta Pedro Prado 1617 - Fonos 5845200-5845203 - Fax (56)(2) 5864176 - Santiago Qta. Normal.  
 Sucursales: Portugal 1141- Fonos (56)(2) 5847680, 5847682 - Fax (56)(2) 5517138 - Santiago  
 Sucursales: Bulnes 1639 - Fonos (56)(41) 2907224, 2907226 - Concepción

**R.U.T.: 87.717.600-2**

**COTIZACION  
 N° 300304**

<b>RUT</b>	0-0	<b>COR.</b>	0	<b>FECHA</b>	20-07-2021
<b>NOMBRE</b>	COTIZACION	<b>TELEFONOS</b>	0-0	<b>FAX</b>	0
<b>DIRECCION</b>	1	<b>CONDICION</b>	1 CONTADO	<b>E-MAIL</b>	SINCORREO@ACER
<b>COMUNA</b>	1	<b>VENDEDOR T</b>	OFICINA PPP	<b>VENDEDOR M</b>	JUAN OLIVARES
<b>CIUDAD</b>	1	<b>ATENCION Sr.(ita).</b>	0		
<b>GIRO</b>	0				

CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION	DETALLE	PRECIO	%	TOTAL
36.00	KG	ACERO 304 RED BARRA 3.0"	1 MTR	\$ 5,340	0	\$ 192,240
64.00	KG	ACERO 304 RED BARRA 4.0 "	1 MTR	\$ 5,340	0	\$ 341,760

OBSERVACION

INFORMACION IMPORTANTE: La fecha de entrega de los trabajos contratados es estimada, y se basa en la fecha de esta cotización y carga de trabajo existente. Si la fecha de aceptación y pago varía, ésta puede modificar la fecha original de entrega informada, la cual quedará sujeta a la actual carga de trabajo y nueva fecha de aceptación de la cotización, la cual es conocida por el cliente.

**Precios y descuentos entregados corresponden sólo para las cantidades y descripciones de material indicados en esta cotización**

Validez cotización : 3 días hábiles

Salvo venta previa

Plazo de entrega : INMEDIATA

agradecidos de su consulta, quedamos de Uds. sus Attos.y Ss. Ss.

**Aceros y Metales Soc. Ltda.**

<b>SUB-TOTAL</b>	\$ 534,000
<b>% DESCUENTO</b>	0
<b>\$ DESCUENTO</b>	\$ 0
<b>NETO</b>	\$ 534,000
<b>IVA</b>	\$ 101,460
<b>TOTAL</b>	\$ 635,460

**COTIZACION VALIDA SOLO POR EL  
 TOTAL COTIZADO**

Figura 8.3: Acero para cilindros

<b>K KUPFER</b>	<b>COPIAPO</b> RUTA 5 LONGITUDINAL NORTE LOTE A SECTOR EL CARMEN SIN NUMERO (ROL AVALUO 038-056) - AL LADO UNIVERSIDAD SANTO THOMAS	<b>SANTIAGO</b> LIBERTAD 58 FONO: (51) 3515200 FAX: (51) 3515010	<b>CONCEPCION</b> ALONSO DE RIVERA 2452 (EX. AV. GENERAL BONILLA) FONO: 790100-FAX: 259282	<b>PUERTO MONTT</b> AV. PARQUE INDUSTRIAL 1008 PARQUE INDUSTRIAL RECONDIDO FONOS: 255536-255561 FAX: 257891
	<b>PUNTA ARENAS</b> AV. ESPAÑA 9421 FONO: 213095-FAX: 212943 BODEGA: MARDONES 192	<b>COQUIMBO</b> RUTA D-43 N° 948 B-2 ST 60 BARRO INDUSTRIAL FONO: 51-241760	<b>SANTA ROSA</b> SANTA ROSA 4320 LA GRANJA FONO: 223815445	<b>LOS ANGELES</b> AV. LAS INDUSTRIAS 7310 INTERIOR GALPON N°4 FONO: (43) 365797 FAX: (43) 346575
<b>IQUIQUE</b> SOTOMAYOR 2092 BARRO INDUSTRIAL ACPIA FONO: 413822 - FAX: 426613	<b>ANTOFAGASTA</b> P.A. CERDA 13600 FONOS: 211198-211700 211290-FAX: 211790	<b>CALAMA</b> AV. CIRCUNVALACION 1032 MANZANA "SITIO B" FONO: 338127	<b>VIÑA DEL MAR</b> LIMACHE N° 3343 BODEGA 16 FONOS: 32-2677681	<b>RANCAGUA</b> LONGITUDINAL 5 SUR 480 FONO: 72-216976 FAX: 72-218182
				<b>VALDIVIA</b> FICARTE 2342 FONOS: 291928-291929 FAX: 291927

**Srs.:**  
**Ecommerce Kupfer**  
Rut: 44444444-4  
Libertad 58 SANTIAGO SANTIAGO Chile  
**Atencion Sr(a).: Sres Presentes!**

**COTIZACION Nro. 23463000**

**Fecha: 19.07.2021**  
**Nro. Pedido Cliente:**

**Moneda: CLP**

Nos es grato cotizar lo siguiente:

Item	Cod.	Descripcion	Cant.	Un. Med.	Total	Plazo de Entrega
10	10828	BARRA REDO AISI 304L 076,2MM (3") Largo de venta de barra mm : 6.000 mm	1	UN	635.207	2 Dias
20	10830	BARRA REDO AISI 304L 101,6MM (4") Largo de venta de barra mm : 1.000 mm	1	UN	188.836	2 Dias
<b>Neto Cotizado</b>					<b>824.043</b>	
<b>IVA</b>					<b>156.568</b>	
<b>Total Cotizado</b>					<b>980.611</b>	

Ofertas que tenemos para usted
 Lentes de Seguridad Elvex G6 40C GRIS <b>\$5.990 c/ IVA</b> Cod.SAP: 63010
 Tensores HG-228 1/4" a 1-1/2" desde <b>\$5.500 c/ IVA</b> Cod.SAP: A61
 Eslinga Ratchet 9mt 3 ton. <b>\$10.900 c/ IVA</b>
 KIT CADENA DE AMARRE CARGA GR-70 6MT 3/8"

**Observaciones**

- \* Validez Oferta: Desde el 19.07.2021 hasta el 22.07.2021
- \* Condiciones de Pago: Contado
- \* Todos los materiales estan sujetos a venta previa
- \* Valores unitarios son netos y no incluyen I.V.A.

**Atentamente,**

Susana Villodres  
Ejecutiva de Ventas E-Commerce  
[svillodres@kupfer.cl](mailto:svillodres@kupfer.cl)  
Teléfono: 23515381

La orden de compra debe ser emitida a nombre de Kupfer Hnos.S.A. Rut: 90.844.000-5.

La Cotización, que ya fuere aprobada y firmada, tendrá igual valor que una Orden de Compra para el aceptante, produciendolos efectos propios de esta.

Libertad # 58 Fono: 23515381 Fax: (56-2)3515001 SantiagoChile

Sucursales: Iquique - Antofagasta - Calama - Copiap - La Serena - Vina del Mar - Santiago - Diez de Julio - Rancagua - Talca - Concepcin - Los ngeles - Temuco - Valdivia - Puerto Montt - Castro - Punta Arenas.

Figura 8.4: Acero para cilindros



**GOMAS TECNICAS CHILE LIMITADA**  
78.090.770-3

TUCAPEL # 2894, Esq. San Alfonso, Stgo  
☎ 226894289 / 226891655 / 226830943

📞 +569-91544922 // +569-75347111

✉ [VENTAS@GOMASCHILE.CL](mailto:VENTAS@GOMASCHILE.CL)  
[WWW.GOMASCHILE.CL](http://WWW.GOMASCHILE.CL)

**O'RING**

COTIZACIÓN N°  
**28395**

FECHA: 27-07-2021

CÓDIGO VENDEDOR: 2

EMPRESA:	FERNANDO ANDRES ASTUDILLO LANAU
RUT.	19.475.664-K
CONTACTO:	FERNANDO ANDRES ASTUDILLO LANAU

ITEMS	CANT	CÓDIGO O MEDIDAS	DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	UNI. MED.	PRECIO UNIT.	NETO
1	1	008-1-003	RODON ACRILO NITRILO 3mm		\$ 1.100	\$ 1.100
2	1	037-1-003	RODON NEOPRENO 3mm		\$ 11.206	\$ 11.206
						\$ -
						\$ -

**CONDICIONES COMERCIALES**

Validez Oferta: **30 DIAS**

Condicion pago: **CONTADO**

Plazo Entrega: **INMEDIATA**

Observaciones:

Transferencias: **BCO. BCI - CTA CTE #12373362**

	SUBTOTAL	\$ 12.306
DC		\$ -
	NETO:	\$ 12.306
	IVA:	\$ 2.338
	TOTAL:	\$ 14.644

**LUIS JIMENEZ C**  
VENDEDOR 1 SENIOR

**MARIO GUZMÁN ULLOA**  
SOCIO-DIRECTOR

**MARIO ULLOA CASTILLO**  
VENDEDOR 2 SENIOR

*30 años junto a usted*

Figura 8.5: Rodones para sellos



## Proforma Invoice

To: Mr. Fernando Astudillo  
Company: Universidad de Chile  
Address: Chile  
Contact: Mr. Fernando Astudillo  
Tel.: +56-9-98705407  
Email: [f.astudillo.lanau@gmail.com](mailto:f.astudillo.lanau@gmail.com)

Quotation No: SAIQUO20210811  
Date: 2021.8.11

**FROM :**

Company: Zhengzhou sinoder indutech machinery CO.,LTD  
Add.: Room 1101, Building A, Csmall Plaza, No.198 West Jianshe Road, Zhengzhou City, Henan Province, China.  
Contact: Wendy  
Tel. +86 15515863749

Quotation No.	Item Name	Model	Qty(pcs)	Unit Price	Total Price
				USD	USD
SAIQUO20210811		W1605 Load cell 20kg	2	45	90
Freight					70
	load cell customs tariff no.	8409999990	Country of origin	CN	
<b>Total amount</b>					<b>160</b>

**GENERAL TERMS:**

Prices in USD  
Payment term 100% Payment in advance  
Shipping Mark: Sinoder  
Shipment by : to be advised by customer  
Port of Loading and destination: Zhengzhou to customer receiving address

**Bank Details** Bank Of China Henan Branch, No. 3-1, Shangwu Waihuan Road, Zhengdong New District, Zhengzhou  
SWIFT Code: BKCHCNBJ530  
Account number: 255930286553

2021/8/11/14:04

Figura 8.6: Celdas de carga



## DONGGUAN DLSEALS CO. LTD

No.28, 2 Road of Yuwu Industrial Districts, Dongcheng, Dongguan, Guangdong, CN.  
Tel: 86-0769-2263 5670 E-mail:sales2@dlseals.com www.dlseals.com

### Quotation

Company: Universidad de Chile	Quotation No: DL2108133
Attn: Fernando Astudillo	Attn: Miles Wong
Country: Chile	Date: August 10, 2021
E-mail: f.astudillo.1@ug.uchile.cl	Valid date: 7 days

Item Name	Material	Size (Inch)	Unit (USD)	Qty (PCS)	Amount (USD)
 PTAS Spring Energized Seals	PTFE+ Carbon Fiber +V spring	ID 1/8	7.00	10	70.00
Alibaba Cost					1.40
Shipping Cost					61.00
<b>Total</b>					<b>132.40</b>

**Note:**

- \* Above price is based on EXW.
- \* Production time: 8 workdays.
- \* Payment: 100% advance before production.
- \* Extra cost should be pay in need of certificate of origin.

Figura 8.7: Sellos radiales auger

NINGBO QUANTUM SEAL CO.,LTD

Quotation 2021/08/04

PART NO	Material	QTY	UNIT PRICE	Amount
SWL-P 9.5*22*7	Jacket: 15%Glass and 5%Moly filled PTFE	10	4.00	US\$40.00
	Spring: SS304			
	O-RING: FKM 70			
	Freight cost			US\$50.00
	<b>Total</b>			<b>US\$90.00</b>

Figura 8.8: Sellos radiales auger

OBISPO DONOSO 4 OF 302 CONTACTO@AFEL.CL 10 A 14 Y 15 A 19HRS 22 75 95 862



Busca aquí tu producto

HOME CNC Y LASER DRONE ELECTRÓNICA GENERAL IMPRESION 3D MICROCONTROLADORES MÓDULOS MOTORES SENSORES

PRODUCTO	PRECIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
 Motor Paso A Paso Nema 34 modelo HS8040 4A	\$69.990	- 1 +	\$69.990
 Soporte L Motor Nema 34	\$12.990	- 1 +	\$12.990
 Driver Motor Paso a Paso - TB6600 - 0.2-5A / 12-48VDC	\$22.000	- 1 +	\$22.000
 Display 7 segmentos 8 Dígitos MAX7219	\$3.500	- 1 +	\$3.500

**TOTAL DEL CARRITO**

Subtotal **\$108.480**

Total **\$108.480**

[Finalizar compra](#)

**Cupón**

Código de cupón

[Aplicar cupón](#)

Figura 8.9: Componentes electronicos

### Carrito

Producto	Precio	Cantidad	Subtotal
 Arduino UNO	\$19,990	- 1 +	\$19,990

Código de cupón  Aplicar cupón Actualizar carrito

#### Total del carrito

<b>Subtotal</b>	\$19,990
<b>Envío</b>	Precio fijo: \$3,500 Las opciones de envío se actualizarán durante el pago.
<b>Total</b>	\$23,490

Finalizar compra

Figura 8.10: Componentes electronicos

Buscar... Cimech3D  ACCEDER / REGISTRARSE CARRITO / \$34,060 

TIENDA ▾ AYUDA ▾ BLOG

CARRITO DE COMPRA > DETALLES DE PAGO Y ENVÍO > ORDEN COMPLETADA

PRODUCTO	PRECIO	CANTIDAD	SUBTOTAL	TOTAL DEL CARRITO						
 Riel lineal / Perfil aluminio (V-slot) 20x20 - Plateado - 500mm	\$9,200	- 1 +	\$9,200	<table> <tr> <td>Subtotal</td> <td style="text-align: right;"><b>\$34,060</b></td> </tr> <tr> <td>Shipping</td> <td style="text-align: right;"><small>Calcular envío</small></td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td style="text-align: right;"><b>\$34,060</b> (Includes \$5,438 IVA estimated for Chile)</td> </tr> </table> <p style="text-align: center; background-color: #007bff; color: white; padding: 5px;"><b>FINALIZAR COMPRA</b></p> <p><small>Cupón</small></p> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-top: 5px;"> <p>Código de cupón <input type="text"/></p> <p style="text-align: center;"><span>Aplicar cupón</span></p> </div>	Subtotal	<b>\$34,060</b>	Shipping	<small>Calcular envío</small>	<b>Total</b>	<b>\$34,060</b> (Includes \$5,438 IVA estimated for Chile)
Subtotal	<b>\$34,060</b>									
Shipping	<small>Calcular envío</small>									
<b>Total</b>	<b>\$34,060</b> (Includes \$5,438 IVA estimated for Chile)									
 Riel lineal / Perfil aluminio (V-slot) 20x40 - Plateado - 250mm	\$7,250	- 1 +	\$7,250							
 Riel lineal / Perfil aluminio (V-slot) 20x40 - Plateado - 750mm	\$17,610	- 1 +	\$17,610							

← SEGUIR COMPRANDO

Figura 8.11: Perfiles de aluminio

## Carro de compras

Inicio / Carro de compras

[1 Revisar Orden](#)
[Envío y facturación](#)
[Pago](#)
[Confirmación](#)

Producto	Precio	Cantidad	Eliminar
<b>Amplificador para Celda de carga - HX711 (Sparkfun)</b>	\$ 9.990	- 1 +	

**Productos sugeridos:**

<b>[MCI00786] Celda de Carga</b>	\$ 4.990	<a href="#">Añadir al Carro</a>
----------------------------------	----------	---------------------------------

**Código de descuento**

¿Tiene un código de descuento? Rellénelo en este campo y aplíquelo.



**Total: \$ 9.990**

IVA (19%): \$ 1.595  
 Envío: \$ 0

Figura 8.12: Componentes electronicos

SERVIPER ACEROS OTERO

ACEROS

PERNOS Y FIJACIONES

SOLDADURA Y CORTE

CANALIZACION

HERRAMIENTAS Y FERRETERIA

MAQUINAS Y EQUIPOS

INGRESAR

CARRITO 5

Articulo	Precio	Cant.	Total parcial
<p>BARRA DE ACERO INOXIDABLE AISI 304</p> <p><b>FORMA:</b> REDONDO <b>MEDIDAS:</b> 3" <b>LONGITUD:</b> 230mm</p>	\$ 43.213	<input type="text" value="1"/>	\$ 43.213
<p>BARRA DE ACERO INOXIDABLE AISI 304</p> <p><b>FORMA:</b> REDONDO <b>MEDIDAS:</b> 3" <b>LONGITUD:</b> 200mm</p>	\$ 37.577	<input type="text" value="1"/>	\$ 37.577

¿Tienes código de Descuento?

**Resumen**

Subtotal	\$ 721.285
Envío (Tipo de retiro - Retiro en tienda)	\$ 0
<b>Total del pedido</b>	<b>\$ 721.285</b>

Figura 8.13: Barras de acero AISI 304L

**SODIMAC** ¿Qué estás buscando?

CONSTRUCCIÓN Y FERRETERÍA   PISOS, PINTURAS Y TERMINACIONES   HERRAMIENTAS Y MAQUINARIAS   BAÑO, COCINA Y LIMPIEZA   ELECTROHOGAR Y CLIMATIZACIÓN   MUEBLES Y ORGANIZACIÓN   DECORACIÓN, MENAJE E ILUMINACIÓN   AIRE LIBRE, JARDÍN Y MASCOTAS

Carro   Entrega

**Carro de compras** 1 [Agregar productos por código](#)

¡Recibe **\$10.000** de regalo en tu compra al obtener tu **CMR 100%** online! [PÍDELA AQUÍ >](#)  
[Ver términos & condiciones](#)

	<p>Genérico  <b>100x50x3mm x6m Perfil tubular rect...</b>  <small>Código 16654-3</small></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Despacho a domicilio  <input type="checkbox"/> Retiro en tienda</p>	<p>- 1 +</p> <p><a href="#">Eliminar</a>  <a href="#">Guardar para después</a></p>	\$62.060 C/U
<b>Total producto:</b>			\$62.060

Figura 8.14: Perfiles de acero estructura

**Componentes comerciales**

Total \$ 1,430,317.00

**1. Componentes Auger**

Subtotal 1: \$ 239,856.00

N°	Descripción	Material	Formato	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor/Diam. (mm)(in)	Cantidad	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	Detalles	Precio	Link
Componentes principales												
1.01	Canal principal (Barra AISI 304L 2")	Acero AISI 304L	barra	na	230	76.2 (3)	1	7	7	7 largo a pedido	\$ 43,213.00	<a href="https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1">https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1</a>
1.02	Soporte PA plegado	Acero AISI 304L	plancha	76.2	211	5	3	0.615	0.615		\$ 2,250.00	<a href="https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1">https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1</a>
1.04	Tapa cilíndrica auger (Barra AISI 304L 3")	Acero AISI 304L	barra	na	12	76.2 (3)	1	0.39	0.39	largo a pedido	\$ 51,990.00	<a href="https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1">https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1</a>
1.05	Canal de union (Barra AISI 304L 5")	Acero AISI 304L	barra	na	100	127(5)	1	2.303	2.303	largo a pedido	\$ 7,680.00	<a href="https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1">https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html?pg=1</a>
Componentes adicionales												
1.05	Bloca madera auger 3/8"	Acero HSS	na	na	200	9.525 (3/8)	1			Conjunto de brocas 3/8, 1/2 y 5/8"	\$ 12,157.00	<a href="https://www.polymerland.cl/contenido.php?id_articulo=2498&amp;cat=1">https://www.polymerland.cl/contenido.php?id_articulo=2498&amp;cat=1</a>
1.06	Canal plástico para auger	Nylon P66/PFTE (Teflón)	barra	na	1000	15/20	1			Precio barra de PFTE, refloón	\$ 17,610.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.07	Perfil de aluminio 40x20 x600	Aluminio	perfil	40	600	20	1	567	567	PG20 20x40 6 slots sku:1.11.20.020040.06 (Alutipo)	\$ 19,750.00	<a href="https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40">https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40</a>
1.08	Buje de bronce	Bronce	barra	na	8	10	3	0.004	0.004		\$ 19,750.00	<a href="https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40">https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40</a>
1.09	Uniones extrínseca de eje (10-16mm)	Aluminio	na	na	na	na	1	na	na		\$ 19,750.00	<a href="https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40">https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40</a>
1.1	Uniones extrínseca de eje (10-16mm)	Aluminio	na	na	na	na	1	na	na		\$ 2,038.00	<a href="https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40">https://www.amazon.com/B01278-Coupling-Coupler-Prevision-4x4x6x6-6060x24x40</a>
1.12	Eje de extensión	Acero/aluminio	barra	na	80	10	1	0.05	0.05	Barra de acero inox de 1-1/4", largo a pedido	\$ 28,392.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
Componentes de fijación												
1.13	Perno hex M8 X 1.25 mm, 30 mm	Acero	perno	na	30	8	4	0.013	0.052	Hilado completo, Clase 8.8, paquete de 50 (uds)	\$ 1,000.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.14	Tornillo autopercutor para V-slot (10 X 3/4")	Acero	na	na	na	2	2	0.004	0.008	Hilado completo, autopercutor	\$ 2,250.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.15	Perno park M5 X 0.80 mm, 10 mm	Acero	perno	na	10	5	6	0.004	0.024	Hilado completo, paquete de 10 (uds)	\$ 3,000.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.16	Tuerca 1-nut M5	Acero	tuerca	na	9.4	10	6	0.003	0.018	Tuerca correa, paquete de 5 (uds)	\$ 11,000.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.17	Plancha camo para V-slot	Aluminio	na	na	na	na	1	na	na	Placa estándar para varias configuraciones	\$ 9,996.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.18	Rueda V-slot	na	na	na	na	na	4	na	na	Ruedas con 2 rodamientos	\$ 3,050.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.19	Perno park M5 X 0.80 mm, 30 mm	Acero	perno	na	30	5	4	na	na	Cabeza delgada, paquete 10 (uds)	\$ 1,250.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.2	Tuerca M5 X 0.80 mm, 5 mm	Acero	tuerca	na	5	5	4	na	na	Tuerca de seguridad, paquete de 25 (uds)	\$ 2,980.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.21	Espaciador excéntrico	Acero	espaciador	na	10	8.5	5	2	na	Tuerca excéntrica para ajuste	\$ 500.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
1.22	Espaciador	Aluminio	espaciador	na	10	6	5	2	na	Espaciador de aluminio		

**2. Componentes hopper**

Subtotal 2: \$ 742,380.00

N°	Descripción	Material	Formato	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor/Diam. (mm)(in)	Cantidad	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	Detalles	Precio	Link
Componentes principales												
2.01	Cilindro principal	Acero/ Acero Inox	barra	na	160	200(8)	1	136.5	136.5	Barra de acero inox de 8", largo a pedido	\$ 243,998.00	<a href="https://www.multiceros.cl/pub/m/edia/pdf/CARC%20A%20logos-productos-y-servicios-Multiceros-2019.pdf">https://www.multiceros.cl/pub/m/edia/pdf/CARC%20A%20logos-productos-y-servicios-Multiceros-2019.pdf</a>
2.02	Anillos de soporte	Acero/ Acero Inox	plancha	na	na	5	1	na	na	Plancha de acero laminada en caliente	\$ 187,490.00	<a href="https://www.prodiam.cl/producto/2132-UNC/plancha-de-acero-laminado-en-caliente-de-1mm-a-1000mm">https://www.prodiam.cl/producto/2132-UNC/plancha-de-acero-laminado-en-caliente-de-1mm-a-1000mm</a>
2.03	Cilindros para anillo de soporte	Acero/ Acero Inox	barra	na	50	60	2	1.5	3	Barra de acero inox de 1-1/4", largo a pedido	\$ 3,262.00	<a href="https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html">https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html</a>
2.04	Barra para cono de descarga	Acero/ Acero Inox	barra	na	160	200(8)	1	136.5	136.5	Barra de acero inox de 8", largo a pedido	\$ 274,498.00	<a href="https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html">https://oteronindustrial.cl/harra-de-acero-inoxidable-aisi-304-109.html</a>
Componentes de fijación												
2.06	Perno hex M14 X 55 mm, paso de hilo UNC 2, Clase 42-70	Acero inox AISI 404	perno	na	na	na	16	0.689	11.024	Venta por unidad	\$ 28,160.00	<a href="https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-din-933-nov-a2-304-m14-x-55-mm.html">https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-din-933-nov-a2-304-m14-x-55-mm.html</a>
2.07	Tuerca hex M14, paso de hilo UNC 2, Clase 42-70	Acero SAE J995	tuerca	na	na	na	16	0.14	2.24	Venta por unidad	\$ 4,288.00	<a href="https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-aisi-304-nm-14-2-20.html">https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-aisi-304-nm-14-2-20.html</a>
2.08	Perno hex M8 X 30 mm, paso de hilo UNC 1.25, Grado 8.8	Acero SAE J429	perno	na	na	na	4	0.177	0.708	Venta por unidad	\$ 312.00	<a href="https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-clase-8-din-933-m8-1-25-x-30.html">https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-clase-8-din-933-m8-1-25-x-30.html</a>
2.09	Tuerca hex M8, paso de hilo UNC 1.25, Grado 8.8	Acero SAE J995	tuerca	na	na	na	4	0.06	0.24	Venta por unidad	\$ 352.00	<a href="https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-aisi-304-nm-8-1-25.html">https://store.pernostock.cl/productos/suavizadores-pernos/perno-hexagonal/perno-hexagonal-aisi-304-nm-8-1-25.html</a>

**3. Componentes de presurización**

Subtotal 3: \$ 230,223.00

N°	Descripción	Material	Formato	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor/Diam. (mm)(in)	Cantidad	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	Detalles	Precio	Link
Componentes comerciales												
3.01	Manguito roscado hexagonal M-M 1/4" NPT	Latón	na	na	35.56	3.175(1/8)	8	0.028	0.224	Swagelok B-4-HH (Hikelock 1/4 NPT-M)	\$ 18,240.00	<a href="https://products.swagelok.com/es/manguito-hexagonal/vr-4-444">https://products.swagelok.com/es/manguito-hexagonal/vr-4-444</a>
3.02	Te roscada H-H-H 1/4" NPT	Latón	na	59	38	21	3	0.123	0.369	Swagelok B-4-T (Hikelock FHTPA-TT)	\$ 27,360.00	<a href="https://products.swagelok.com/es/h/h/h/vr-4-t">https://products.swagelok.com/es/h/h/h/vr-4-t</a>
3.03	Manómetro 1/4" NPT	na	na	na	na	na	2	na	na	(Rango de medición 600 psi)	\$ 7,201.00	<a href="https://www.yato.com/massmetro-c15550/">https://www.yato.com/massmetro-c15550/</a>
3.04	Valvula de alivio 1/4" NPT	na	na	na	na	na	2	na	na	(Presion de disparo 500 psi) (Hikelock RV1 500 psi)	\$ 107,920.00	<a href="https://www.yato.com/massmetro-c15550/">https://www.yato.com/massmetro-c15550/</a>
3.05	Sello de eje rotativo	PTFE/grafito	na	na	na	na	10	na	na	(Compra de varios sellos para reemplazo) 10 pcs	\$ 68,400.00	<a href="https://www.yato.com/massmetro-c15550/">https://www.yato.com/massmetro-c15550/</a>
3.06	Rodón de goma para o rings	Caucho acrílico nitrilo	rodón	na	na	na	3	1	na	na	\$ 1,100.00	<a href="https://www.yato.com/massmetro-c15550/">https://www.yato.com/massmetro-c15550/</a>

**4. Componentes de electronica**

Subtotal 4: \$ 217,860.00

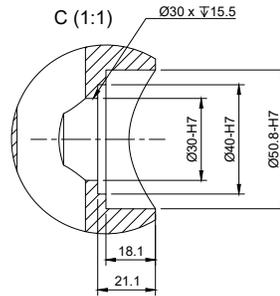
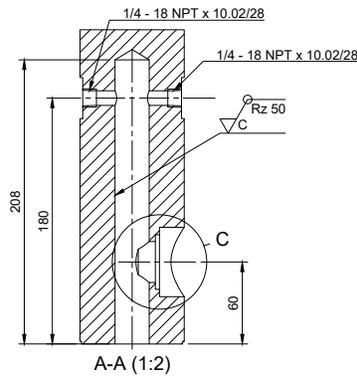
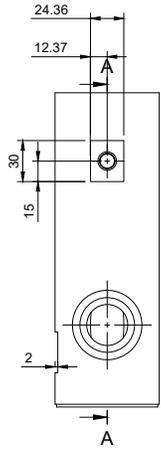
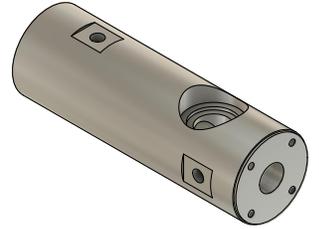
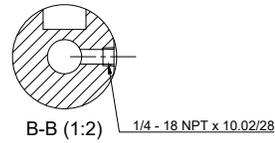
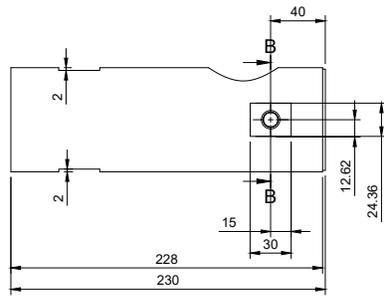
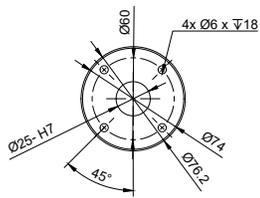
N°	Descripción	Material	Formato	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor/radio (mm)	Cantidad	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	Detalles	Precio	Link
Componentes comerciales												
4.01	Motor Paso A Paso Nema 34 modelo HS8040 4A	na	na	100	100	180	1	2.8	2.8	Phase 2 -Step Angle: 1.8 [deg] -Voltage: 4.2 [V] -Current: 4.0 [A] -Resistance Phase: 1.05 [Ω] -Inductance Phase: 7.2 [mH] -Holding Torque: 4.2 [Nm] -Detent Torque: 6.5 [Ncm] -Shaft Diameter: 14 [mm]	\$ 69,990.00	<a href="https://afel.cl/producto/motor-paso-a-paso-nema-34-modelo-hs8040-4a/">https://afel.cl/producto/motor-paso-a-paso-nema-34-modelo-hs8040-4a/</a>
4.02	Soporte L Motor Nema 34	na	na	100	100	100	1	0.7	0.7		\$ 12,990.00	<a href="https://afel.cl/producto/soporte-l-motor-nema-34/">https://afel.cl/producto/soporte-l-motor-nema-34/</a>
4.03	Driver Motor Paso a Paso - FB6600 - 0-2.5A / 12-48VDC	na	na	100	50	130	1	0.5	0.5	-Módulo seleccionable de micro paso (1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 paso). -Control de corriente (8 pasos de 0.2 [A] a 5 [A]). -Voltage de entrada DC: 8-50 [V] (Voltage operativo: 12 [V] - 42 [V]) -Corriente de entrada de 1 a 5 [A] -Corriente de salida: OUI= 5.0 [A] (Valor nominal máximo absoluto, pico, de 100 [ms]) OUI= 4.5 [A] (rango de operación, valor máximo) -Temperatura de funcionamiento: -10 to 45 [°C]	\$ 22,000.00	<a href="https://afel.cl/producto/driver-motor-paso-a-paso-fb6600-0-2-5a-12-48vdc/">https://afel.cl/producto/driver-motor-paso-a-paso-fb6600-0-2-5a-12-48vdc/</a>
4.04	Fuente de Poder 12V - 10A - 120W	na	na	45	100	200	1	0.5	0.5	-Voltage de Entrada: 100-120 [V] AC / 60[Hz] , 200-240[V] AC / 50[Hz] -Voltage de Salida: 12[V] DC -Corriente Máxima de Salida: 10[A] -Potencia Máxima de Salida: 120[W] -Microcontrolador ATmega328 -Voltage de entrada 7-12 [V] -Pines 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM) -Entradas analógicas 6 -Memoria Flash 32k -Reloj 16MHz de velocidad -Voltage de trabajo 2.7V-5V.	\$ 11,000.00	<a href="https://afel.cl/producto/fuente-de-poder-12v-10a-120w/">https://afel.cl/producto/fuente-de-poder-12v-10a-120w/</a>
4.05	Arduino UNO	na	na	69	54	na	1	0.025	0.025		\$ 19,990.00	<a href="https://arduino.cl/producto/arduino-uno/">https://arduino.cl/producto/arduino-uno/</a>
4.06	AMP Célida HX711	na	na	35	20	3	1	0.005	0.005	-Consumo de corriente: <1.5mA. -Datos de salida seleccionables entre 10SPS o 80SPS. -Rechazo de suministro simultáneo de 50 y 60Hz.	\$ 9,990.00	<a href="https://www.micrel.com/~/media/Products/Amplificadores-paralelos-de-impedancia-hx711-spreadsheet-31792">https://www.micrel.com/~/media/Products/Amplificadores-paralelos-de-impedancia-hx711-spreadsheet-31792</a>
4.07	Célida de carga	na	na	na	na	na	2	na	na	W1005 Load cell [20kg]	\$ 68,400.00	<a href="http://www.sinoder.com/">http://www.sinoder.com/</a>
4.08	Display 7 segmentos 8 Dígitos MAX7219	na	na	82	15	14	1	na	na	-Tensión de Operación: 4.2 a 5.3 VDC -Corriente de Operación: 150mA máxima -Color: Rojo -Interfaz: Serial Similar a SPI de 10 kHz -Control Mediante 3 Pines: Señales: DIN, CS, CLK -Dimensiones: 82 x 15 x 8 mm -Dimensiones del panel LED: 66 x 14 mm	\$ 3,500.00	<a href="https://afel.cl/producto/display-7-segmentos-8-digito-max7219/">https://afel.cl/producto/display-7-segmentos-8-digito-max7219/</a>

**5. Componentes soporte**

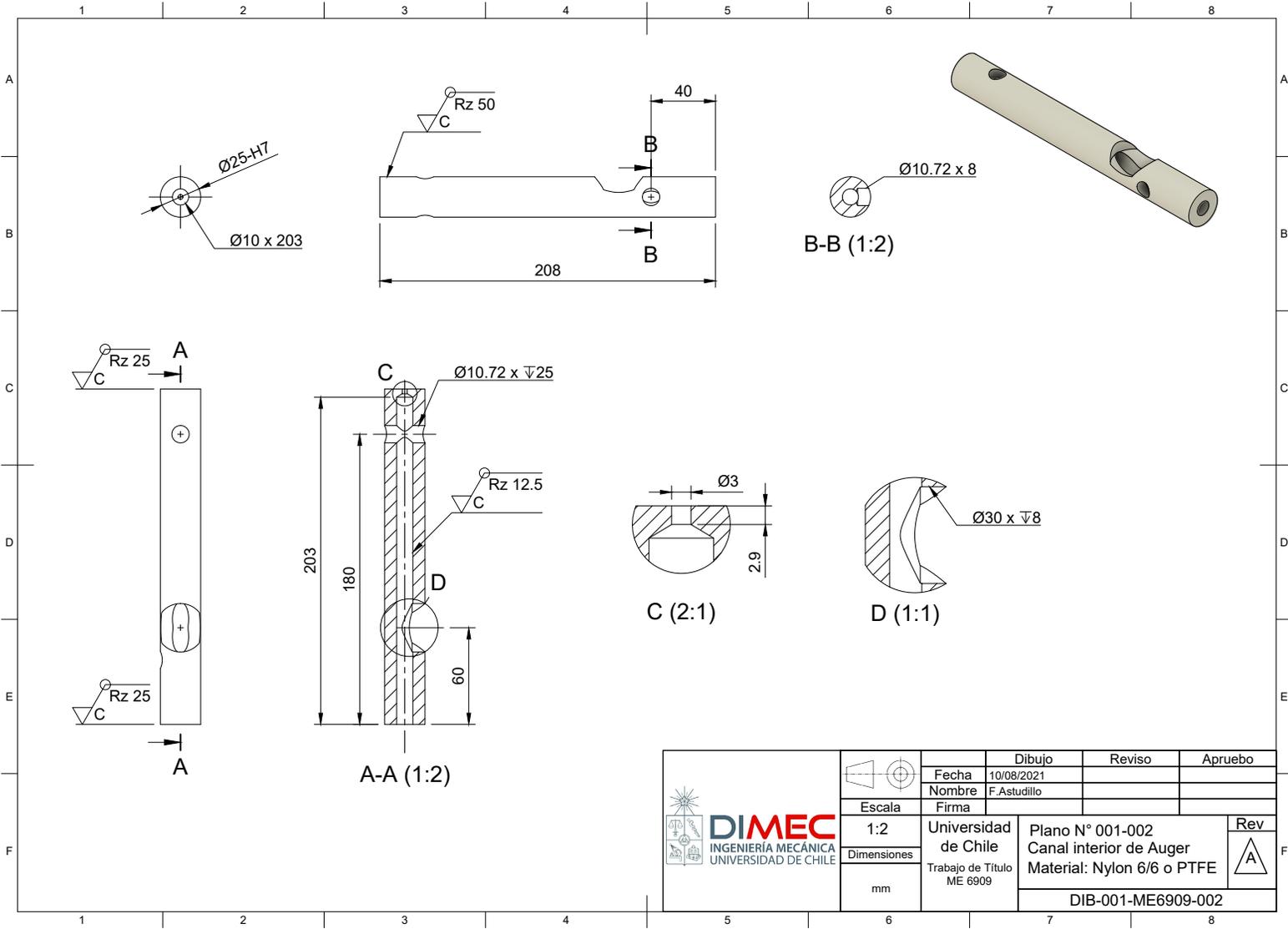
Subtotal 5: \$ 133,510.00

N°	Descripción	Material	Formato	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor/Diam. (mm)(in)	Cantidad	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	Detalles	Precio	Link
Componentes de fijación												
5.01	Perfiles de acero 100x50	Acero	perfil	50x100	6000	3	1	5	5	Perfil de 6 metros	\$ 56,370.00	<a href="https://www.solidac.cl/contenido.php?id_articulo=1766&amp;cat=700&amp;subcat=109">https://www.solidac.cl/contenido.php?id_articulo=1766&amp;cat=700&amp;subcat=109</a>
5.02	Perfil de aluminio 40x20 x600	Aluminio	perfil	40	600	20	1	0.567	0.567	PG20 20x40 6 slots sku:1.11.20.020040.06 (Alutipo) 750 mm	\$ 17,610.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
5.03	Perfil de aluminio 40x20 x60	Aluminio	perfil	40	60	20	1	0.275	0.275	PG20 20x40 6 slots sku:1.11.20.020040.06 (Alutipo) 250 mm	\$ 7,250.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x60-nateador/</a>
5.04	Perfil de aluminio 20x20 x600	Aluminio	perfil	40	500	20	2	0.475	0.95	PG20 20x20 4 slots sku:1.11.20.020020.04 (Alutipo) 500 mm	\$ 9,200.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x20-nateador/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x20-nateador/</a>
5.05	Rodamientos	na	na	na	na	ID:30mm	2	1.5	3	3 Descansos de rodamiento con dos perforaciones de acople	\$ 35,980.00	<a href="https://www.duracast.cl/producto/rodamientos/717-rodamientos-rodos-de-bolas">https://www.duracast.cl/producto/rodamientos/717-rodamientos-rodos-de-bolas</a>
Componentes de fijación												
5.06	Perno park M5 X 10 mm, para perfil de aluminio	Acero	na	na	na	na	12	na	na	Pernos Parker de cabeza plana (10 uds por paquete)	\$ 4,600.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-diferente-nateador-cabeza-delgada-pack-10-un/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-diferente-nateador-cabeza-delgada-pack-10-un/</a>
5.07	Tuerca T-NUT M5, para perfil de aluminio	Acero	na	na	na	na	12	na	na	Tuerca de bloqueo para perfil de aluminio (5 uds por paquete)	\$ 2,500.00	<a href="https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-diferente-nateador-cabeza-delgada-pack-10-un/">https://www.cmech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-diferente-nateador-cabeza-delgada-pack-10-un/</a>

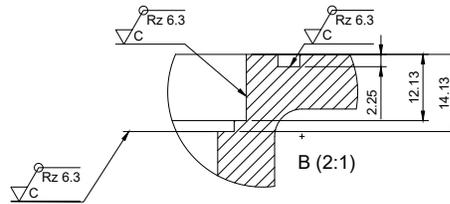
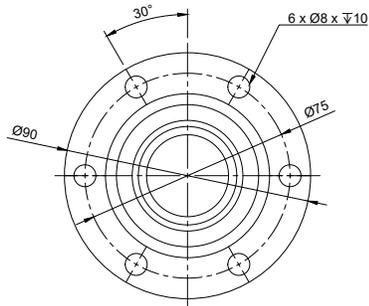
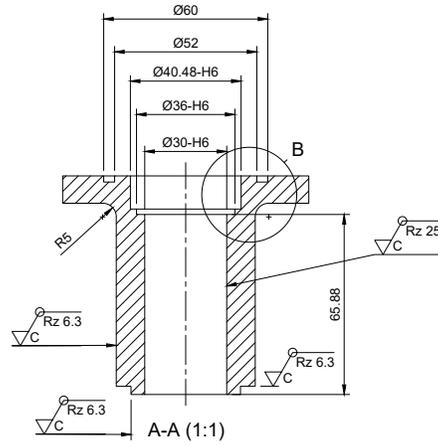
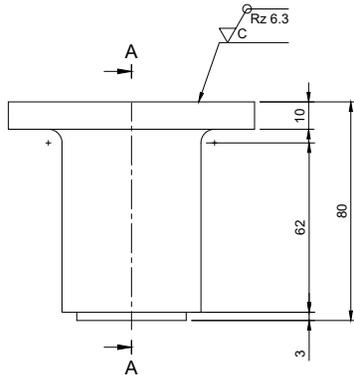
## 8.1.2. Planos



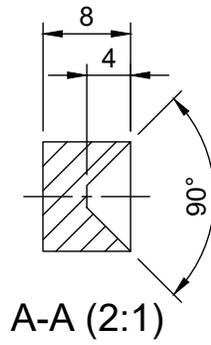
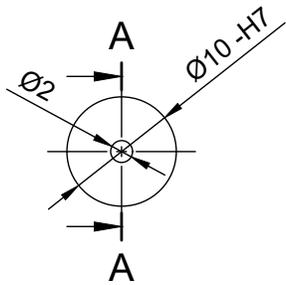
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE	 Escala 1:2	Fecha 10/08/2021	Dibujo Reviso	Apruebo	
	Dimensiones mm	Nombre F. Astudillo	Firma	Rev A	
	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 001-001 Cilindro principal Auger Material: AISI 304L	DIB-001-ME6909-001		
	DIB-001-ME6909-001				

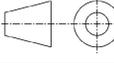


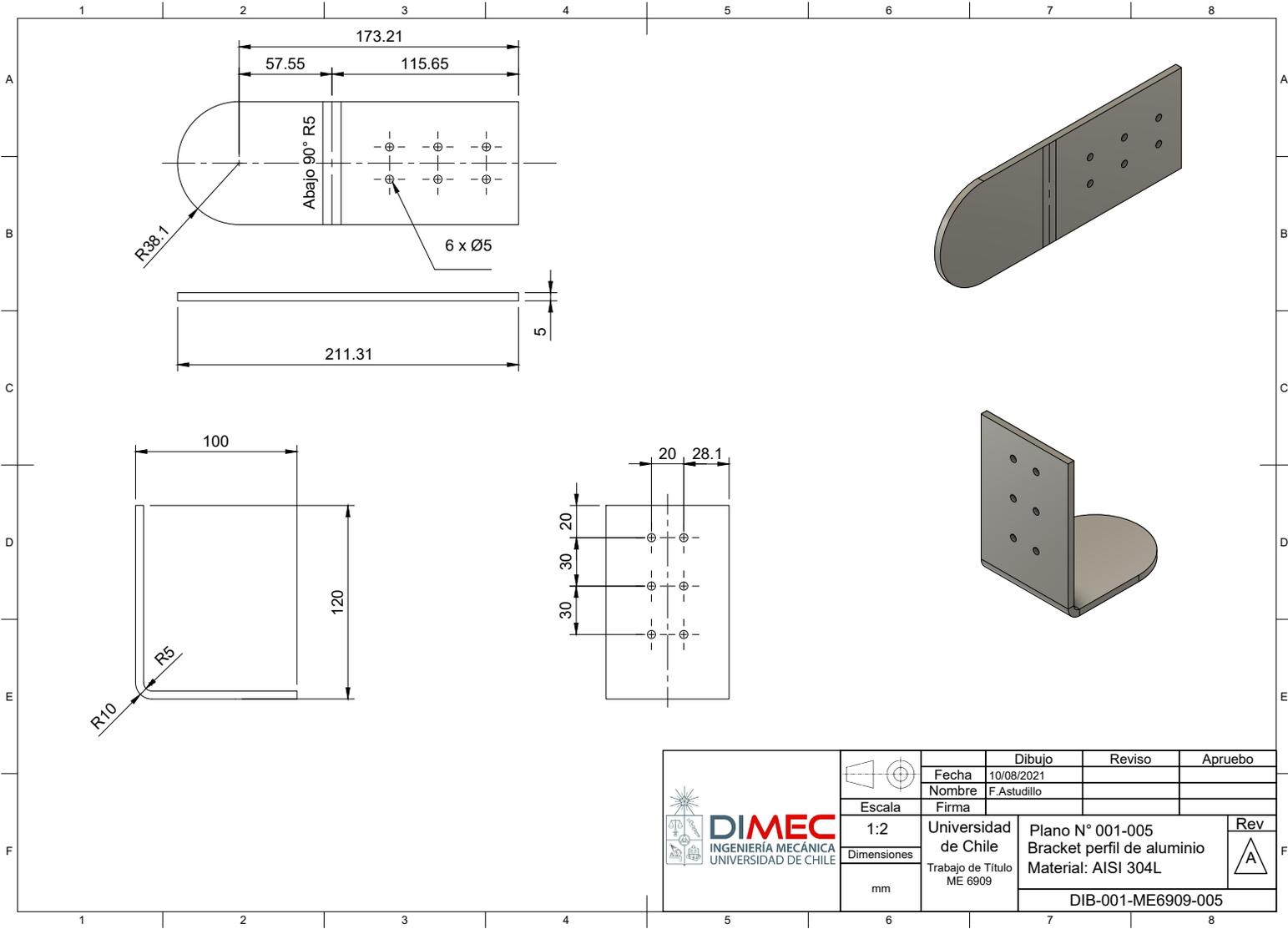
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE		Dibujo	Reviso	Apruebo
	Fecha	10/08/2021		
	Nombre	F. Astudillo		
	Escala	Firma		
Dimensiones	1:2	Universidad de Chile	Plano N° 001-002	Rev
mm		Trabajo de Título ME 6909	Canal interior de Auger Material: Nylon 6/6 o PTFE	
DIB-001-ME6909-002				



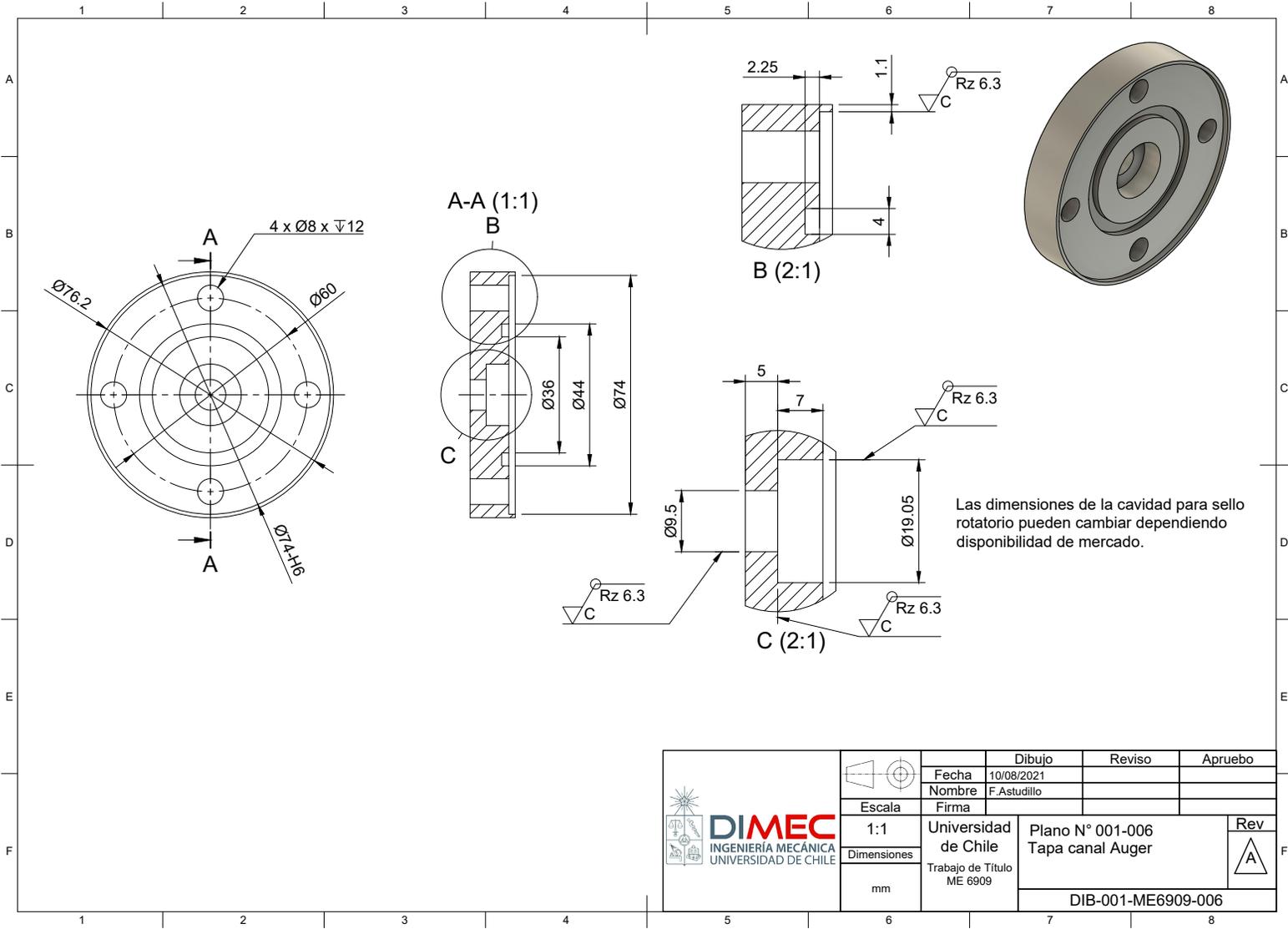
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE	 Escala	Dibujo Fecha: 10/08/2021 Nombre: F. Astudillo Firma:	Reviso	Apruebo
	1:1 Dimensiones	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 001-003 Conexión Auger - Tolva Material: AISI 304I	Rev. 
	mm	DIB-001-ME6909-003		



 <b>DIMEC</b> INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE		Dibujo	Reviso	Apruebo
		Fecha	10/08/2021	
	Nombre	F.Astudillo		
	Escala	Firma		
1:1	Dimensiones mm	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 001-004 Buje de bronce Material: SAE 640	Rev
				
DIB-001-ME6909-004				

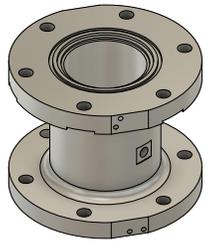
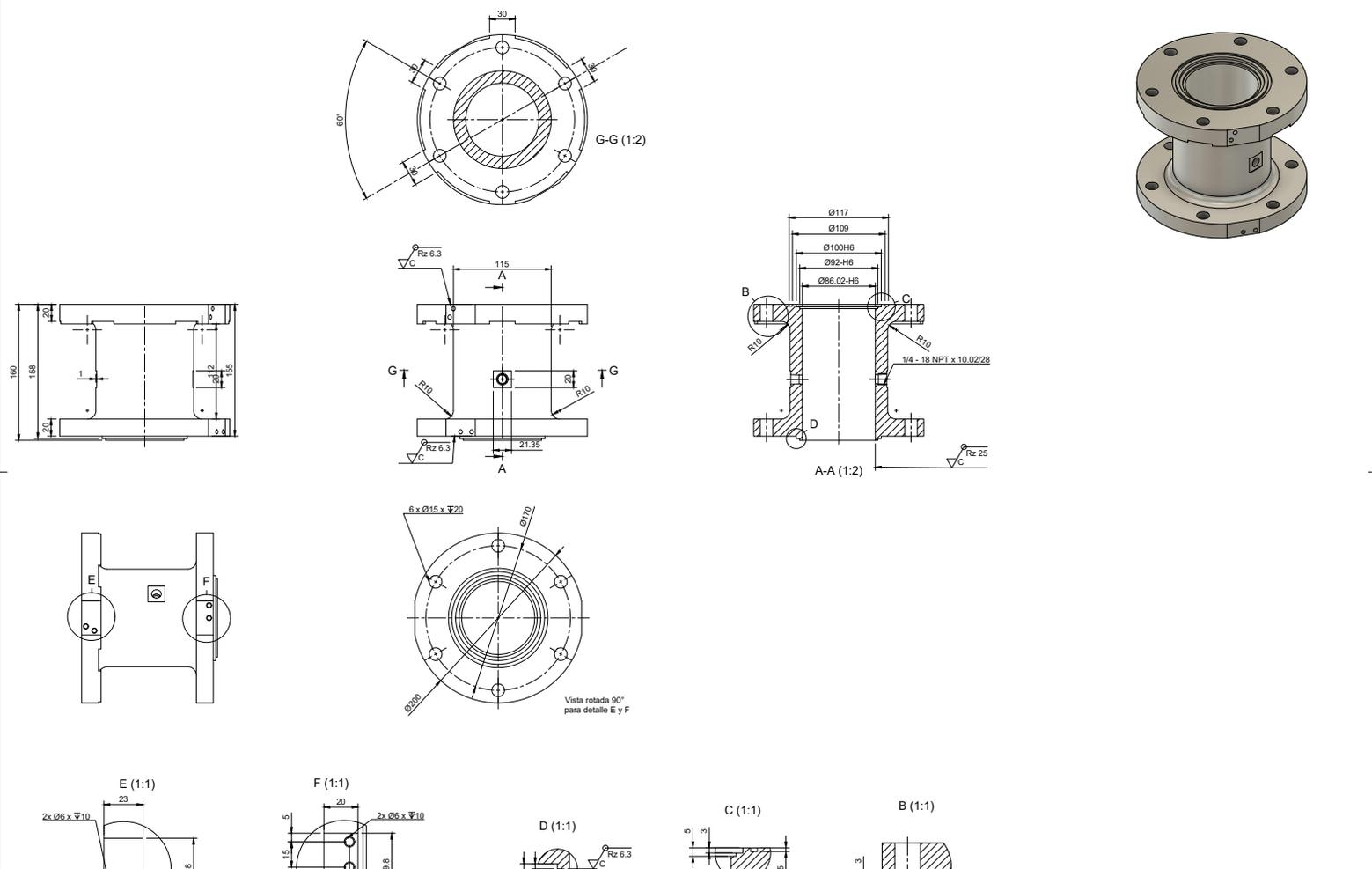


 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE		Dibujo		Reviso	Apruebo
		Fecha	10/08/2021		
	Escala	1:2	Nombre	F. Astudillo	
Dimensiones	mm	Firma			
		Universidad de Chile	Plano N° 001-005	Rev	
		Trabajo de Título ME 6909	Bracket perfil de aluminio	A	
			Material: AISI 304L		
DIB-001-ME6909-005					



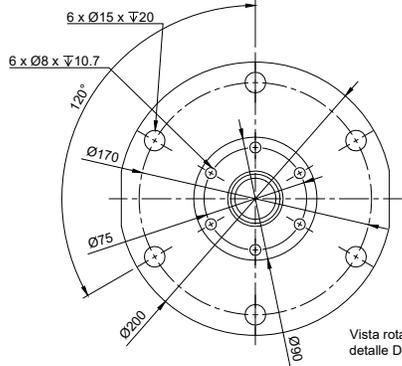
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECANICA UNIVERSIDAD DE CHILE		Dibujo	Reviso	Apruebo
	Fecha	10/08/2021		
	Nombre	F. Astudillo		
	Escala	Firma		
Dimensiones	1:1	Universidad de Chile	Plano N° 001-006	
mm		Trabajo de Título ME 6909	Tapa canal Auger	
			DIB-001-ME6909-006	
			Rev	A

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

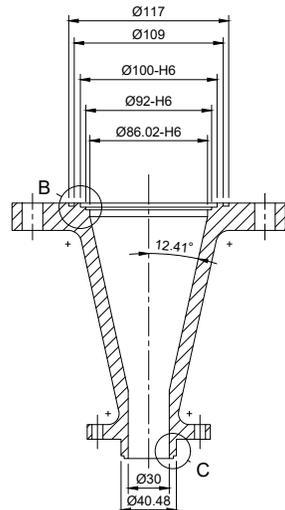
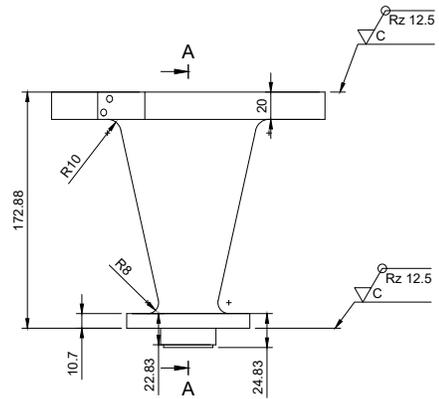
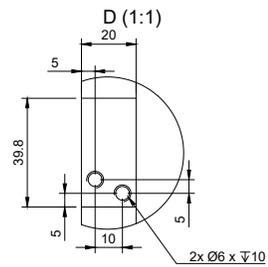
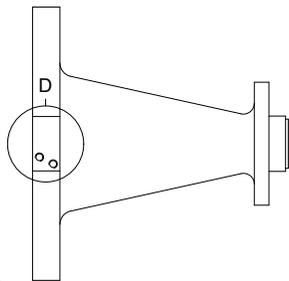


Escala		Fecha		Revisión		Aprobado	
1:2		01/02/2023		F. Asustio			
Dimensiones		Universidad de Chile		Plano N° 001-007		Rev	
mm		Trabajo de Tesis ME 6900		Cilindro de almacenamiento		Material: AISI 304L	
				DIB-001-ME6900-007			

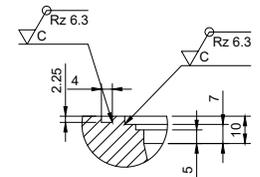
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16



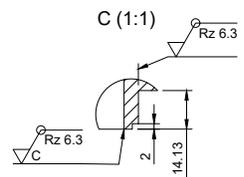
Vista rotada 60° para detalle D



A-A (1:2)

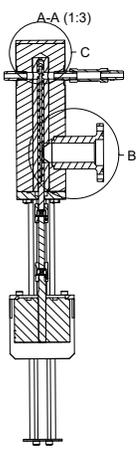
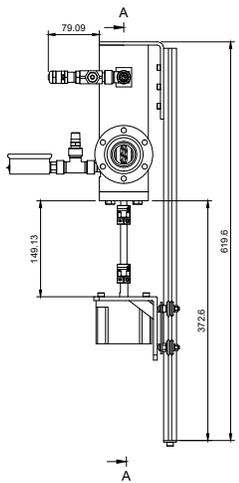
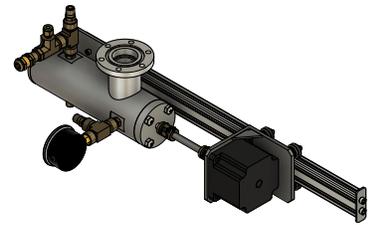
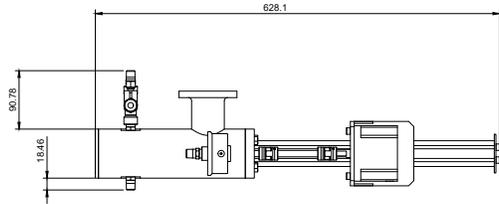
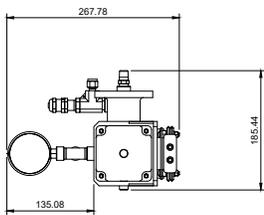


B (1:1)

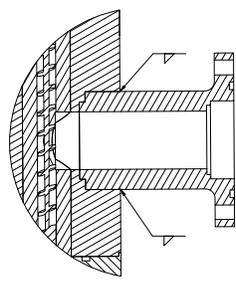


C (1:1)

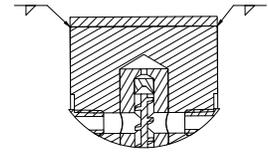
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE	Fecha 10/08/2021	Dibujo	Reviso	Apruebo
	Escala 1:2	Nombre F. Astudillo	Firma	
Dimensiones mm	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 001-008 Cono de descarga Material: AISI 304L		Rev A
				DIB-001-ME6909-008



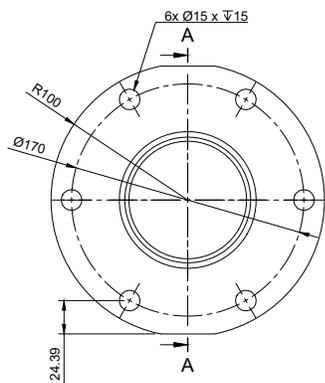
B (1:1)



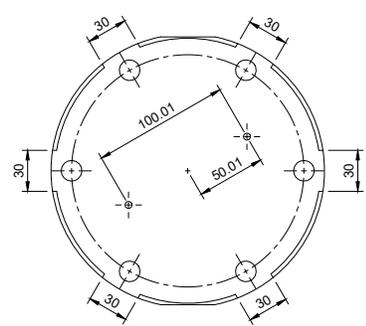
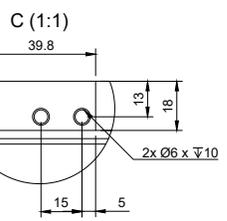
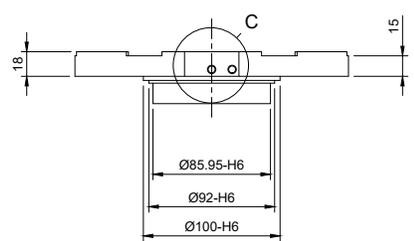
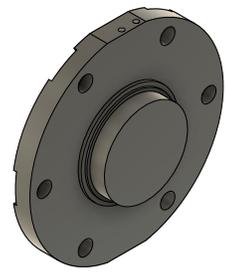
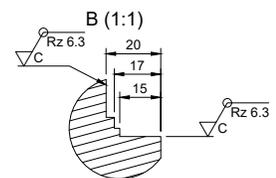
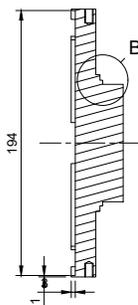
C (1:1)



 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE	Escala 1:3	Fecha 09/06/2023	Dibujo Nombre F. Astudillo	Revisión Aprobado
	Dimensiones mm	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 002-001 Subconjunto Auger Uniones por soldadura	Rev 
DIB-002-ME6909-001				



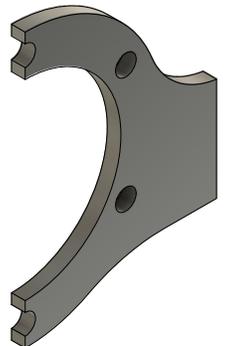
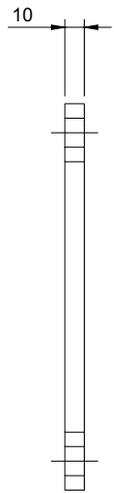
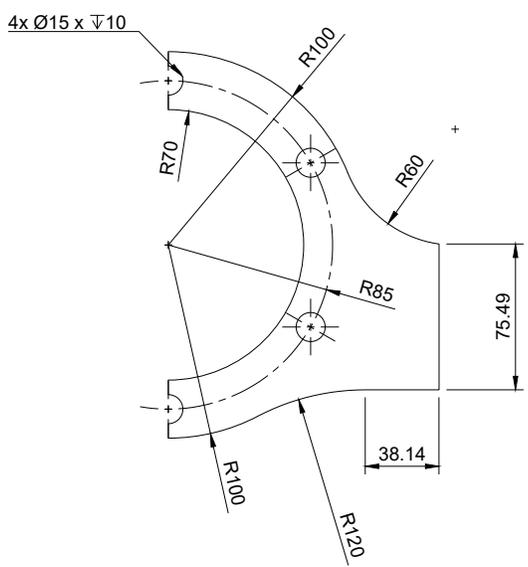
A-A (1:2)



<p><b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE</p>	<p>Fecha 16/08/2021</p>	Dibujo	Reviso	Apruebo	
	<p>Nombre F. Astudillo</p>				
	<p>Escala Firma</p>	<p>1:2</p>	<p>Universidad de Chile</p>	<p>Plano N° 001-009 Tapa de acceso superior Material: AISI 304L</p>	<p>Rev A</p>
	<p>Dimensiones mm</p>	<p>Trabajo de Título ME 6909</p>		<p>DIB-001-ME6909-009</p>	

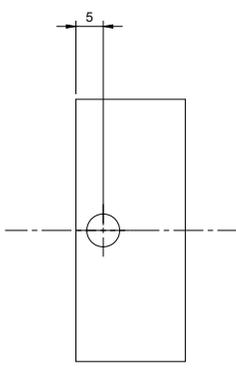
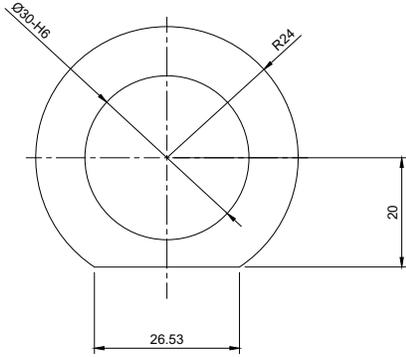
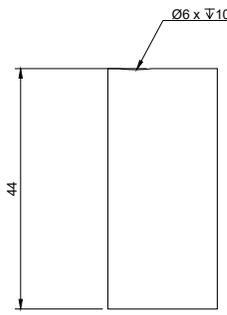
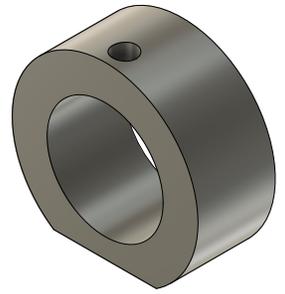
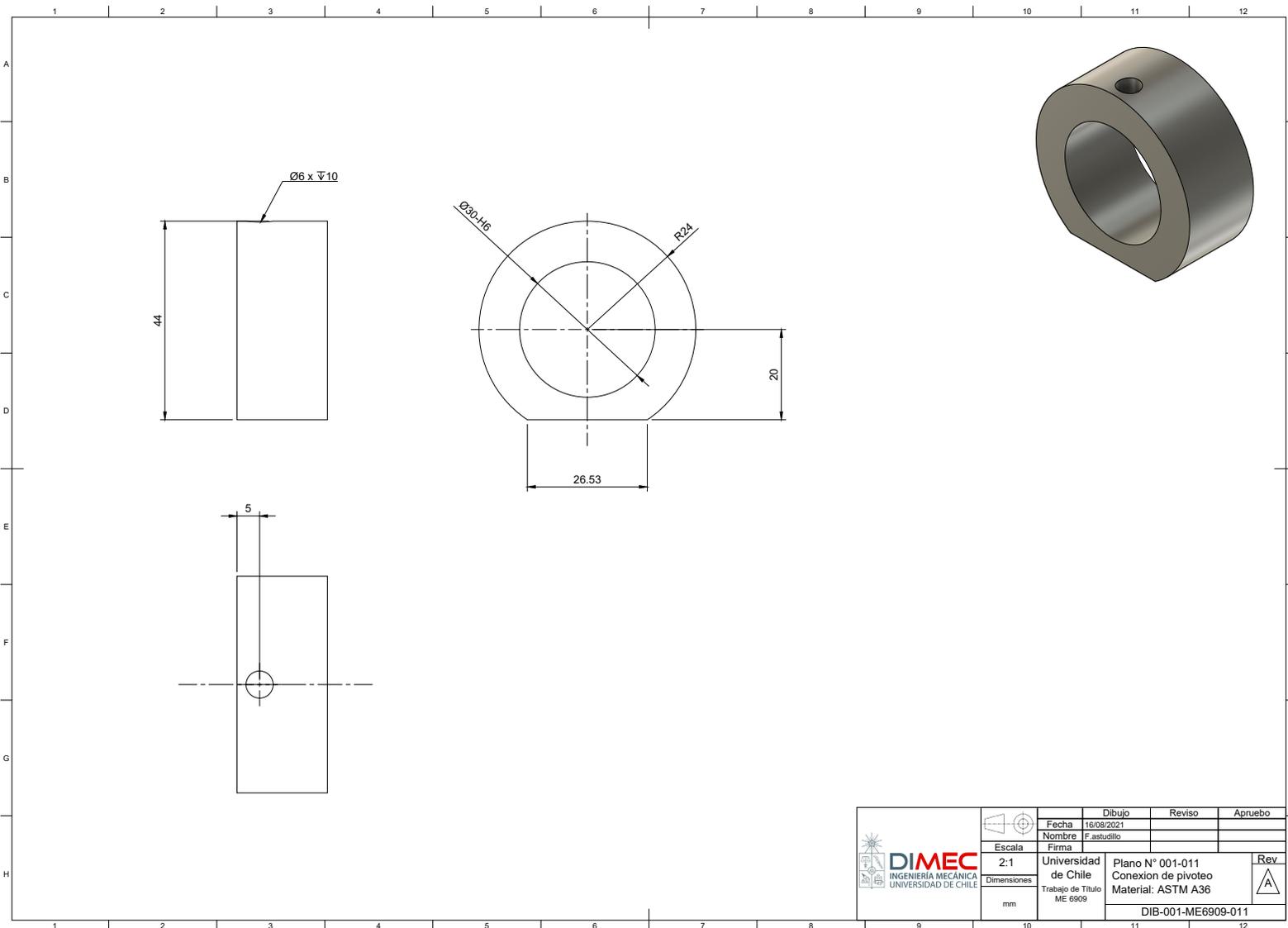
1 2 3 4 5 6 7 8

A  
B  
C  
D  
E  
F

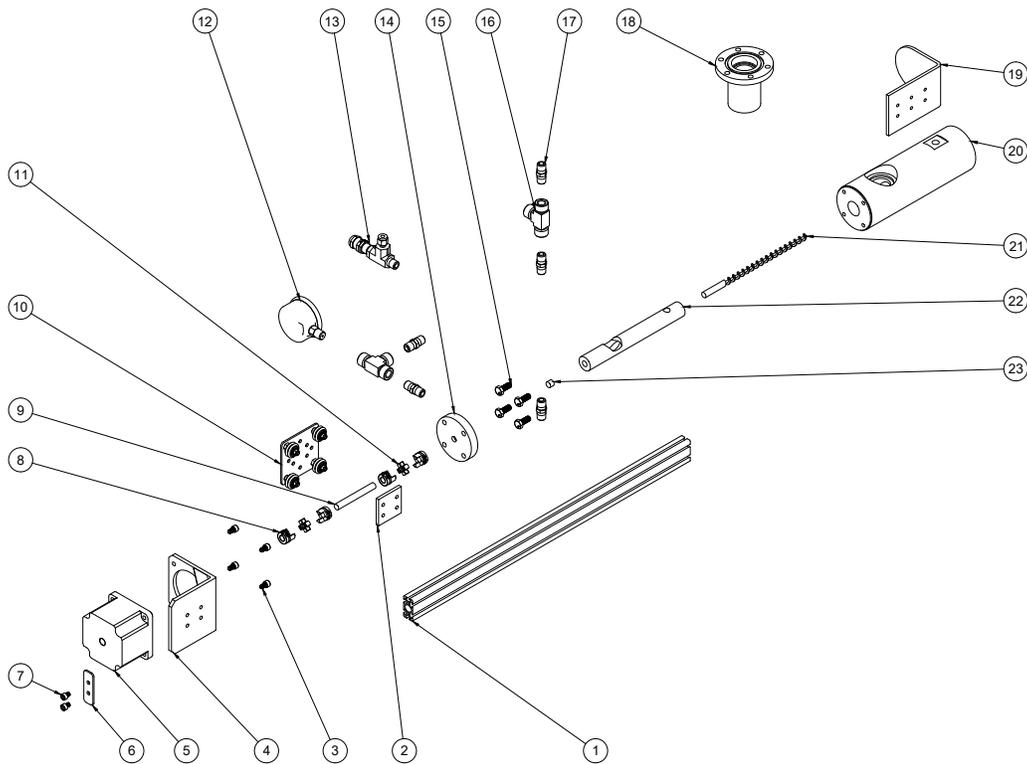


 <p><b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE</p>		Dibujo		Reviso	Apruebo
		Fecha	16/08/2021		
	Nombre	F. Astudillo			
	Escala	Firma			
Dimensiones	1:2	Universidad de Chile	Plano N° 001-010		Rev
mm		Trabajo de Título ME 6909	Anillo de soporte		
			Material: ASTM A36		
DIB-001-ME6909-010					

1 2 3 4 5 6 7 8



 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE		<b>Dibujo</b> Fecha: 16/08/2021 Nombre: F. estudio	<b>Reviso</b>	<b>Apruebo</b>
	Escala: 2:1	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 001-011 Conexión de pivoteo Material: ASTM A36	<b>Rev.</b> A
	mm	DIB-001-ME6909-011		



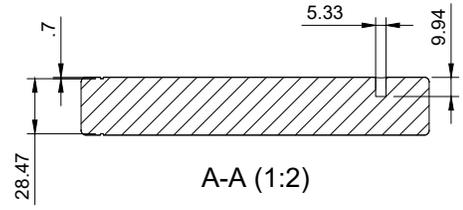
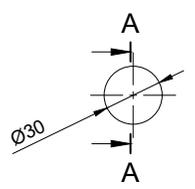
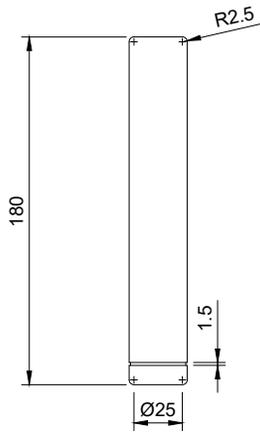
Item	Qty	Part Number	Material
23	1	Buje_Bronce_Tornillo_02	Bronze
22	1	Canal_nylon_PTFE_01	Nylon 6/6
21	1	Tornillo_3/8"_250	Steel AISI 4340 409 QT
20	1	Canal_cilindro_01	Stainless Steel AISI 304
19	1	Perfil_de_montaje_alum_01	Stainless Steel AISI 304
18	1	Conex_tolva_tornillo_01	Stainless Steel AISI 304
17	5	B-4-HN-SwagelokCompany-3D-07-20-2021	Tin-Aluminum-Copper (Sn-Ag-Cu)
16	2	B-4-T-SwagelokCompany-3D-07-20-2021	Tin-Aluminum-Copper (Sn-Ag-Cu)
15	4	91052A101	Steel
14	1	Tapa_frontal_tornillo_01	
13	1	SS-RLM4-S4-SwagelokCompany-3D-08-04-2021	Steel
12	1	Manometro 1.4 NPT 0 - 40 bar	Steel
11	2	2401K84_19000 rpm Hytel Rubber Spider for 51 64 OD Clamping Flexible Shaft Coupling Hub	Steel
10	1	Kit CGV02-05 + EEV01-01 + RWV01-01	
9	1	Extencion_tornillo_01	Steel
8	4	2401K134_Clamping Flexible Shaft Coupling Hub	Steel
7	2	91290A312_Black-Oxide Alloy Steel Socket Head Screw	Steel
6	1	Terminal_carrera_01	Steel
5	1	Motor NEMA 34	
4	1	Nema_34_motor_mount	
3	4	91290A316_Black-Oxide Alloy Steel Socket Head Screw	Steel
2	1	Espaciador_01	Aluminum
1	1	EXT_LG_02	

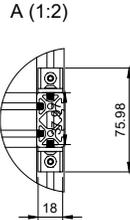
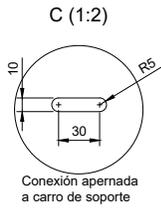
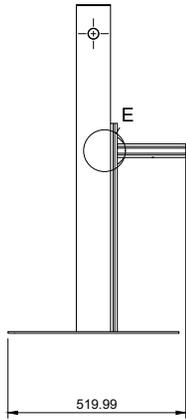
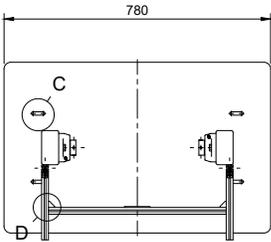
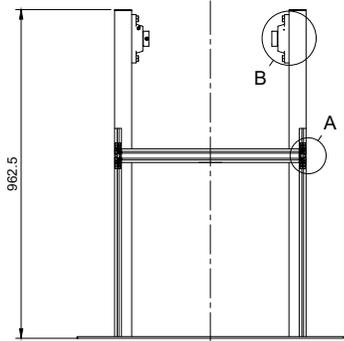
Parts List			
Item	Qty	Part Number	Material
23	1	Buje_Bronce_Tornillo_02	Bronze
22	1	Canal_nylon_PTFE_01	Nylon 6/6
21	1	Tornillo_3/8"_250	Steel AISI 4340 409 QT
20	1	Canal_cilindro_01	Stainless Steel AISI 304
19	1	Perfil_de_montaje_alum_01	Stainless Steel AISI 304
18	1	Conex_tolva_tornillo_01	Stainless Steel AISI 304
17	5	B-4-HN-SwagelokCompany-3D-07-20-2021	Tin-Aluminum-Copper (Sn-Ag-Cu)
16	2	B-4-T-SwagelokCompany-3D-07-20-2021	Tin-Aluminum-Copper (Sn-Ag-Cu)
15	4	91052A101	Steel
14	1	Tapa_frontal_tornillo_01	
13	1	SS-RLM4-S4-SwagelokCompany-3D-08-04-2021	Steel
12	1	Manometro 1.4 NPT 0 - 40 bar	Steel
11	2	2401K84_19000 rpm Hytel Rubber Spider for 51 64 OD Clamping Flexible Shaft Coupling Hub	Steel
10	1	Kit CGV02-05 + EEV01-01 + RWV01-01	
9	1	Extencion_tornillo_01	Steel
8	4	2401K134_Clamping Flexible Shaft Coupling Hub	Steel
7	2	91290A312_Black-Oxide Alloy Steel Socket Head Screw	Steel
6	1	Terminal_carrera_01	Steel
5	1	Motor NEMA 34	
4	1	Nema_34_motor_mount	
3	4	91290A316_Black-Oxide Alloy Steel Socket Head Screw	Steel
2	1	Espaciador_01	Aluminum
1	1	EXT_LG_02	

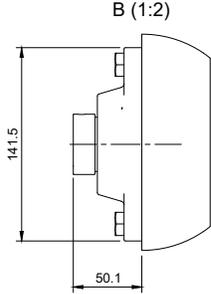
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECANICA UNIVERSIDAD DE CHILE	Fecha: 06/02/2023 Nombre: F. Astudillo Firma:	Dibujo:	Reviso:	Aprobado:
	Escala:	Dimensiones: 1:3	Universidad de Chile Trabajo de Titulo ME 6909	Plano N° 002-002 Subconjunto tornillo Exploracionado



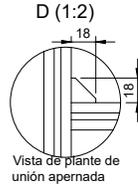
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE	 Escala 1:2	Fecha	16/08/2021	Dibujo		Reviso		Apruebo	
		Nombre	F. Astudillo	Firma					
	Dimensiones	mm	Universidad de Chile	Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 001-012	Eje de pivoteo	Material: AISI 304L	Rev	
	DIN-001-ME6909-012								 A



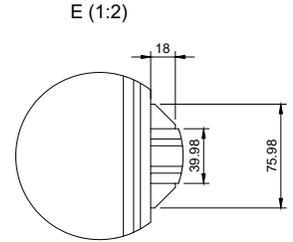
Vista elevación de unión apernada de perfiles



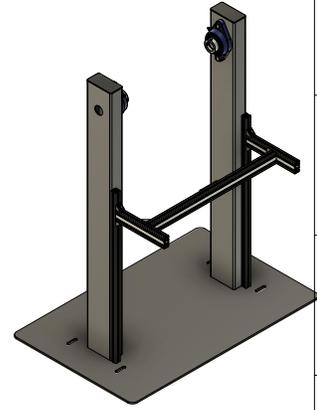
Descanso de flange para incorporar ejes de pivote



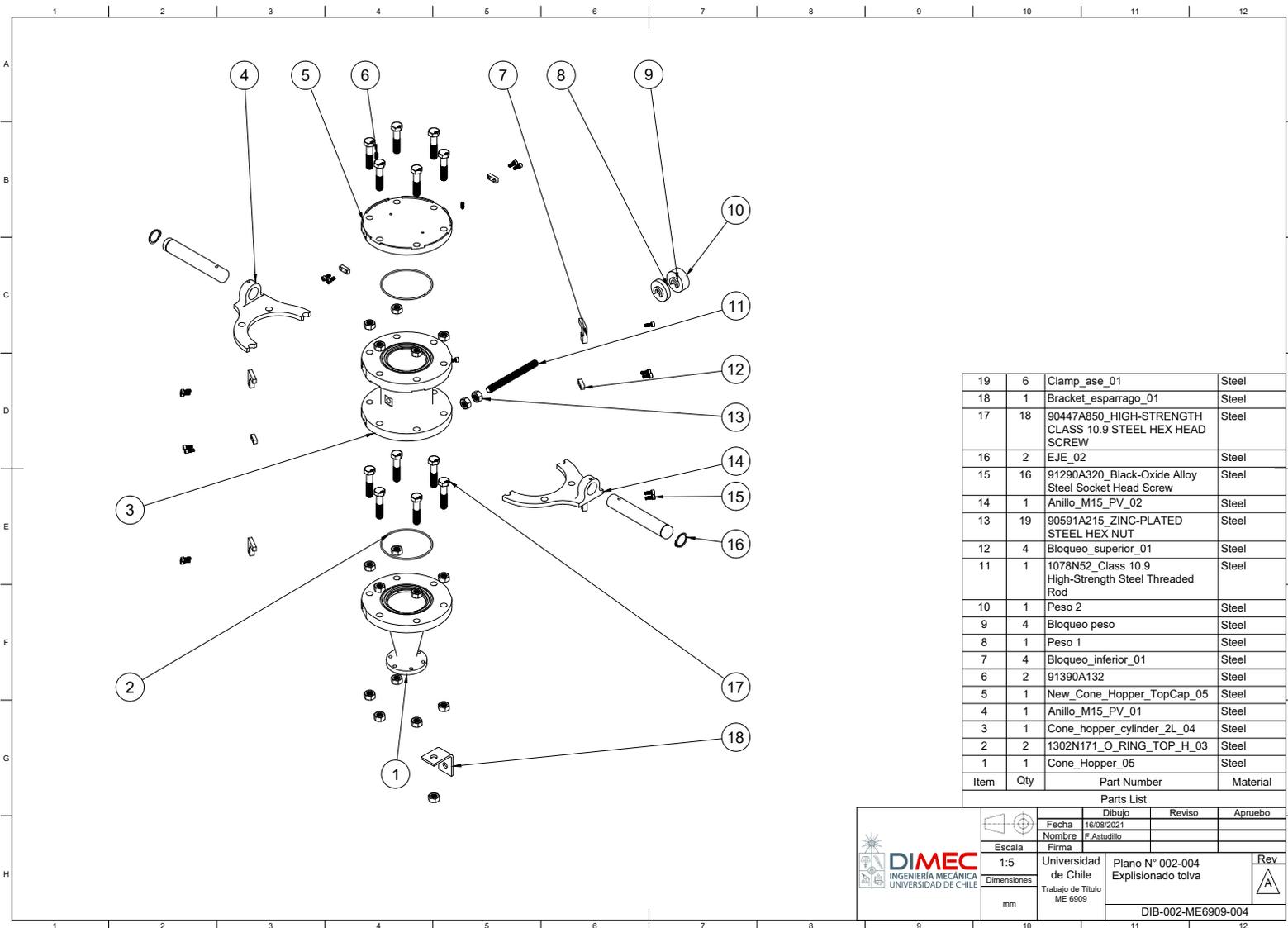
Vista de planta de unión apernada



Vista lateral derecha de unión apernada de perfiles

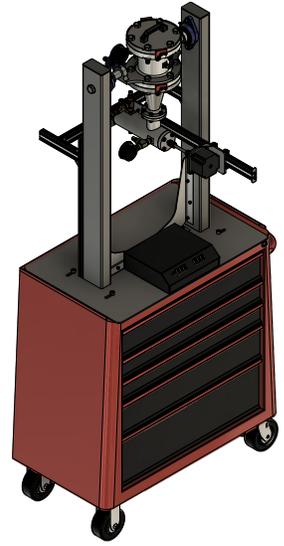
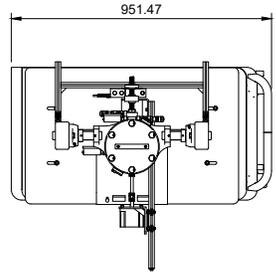
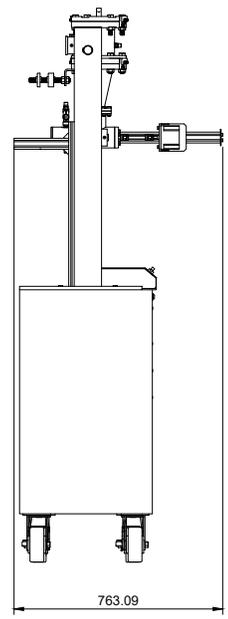
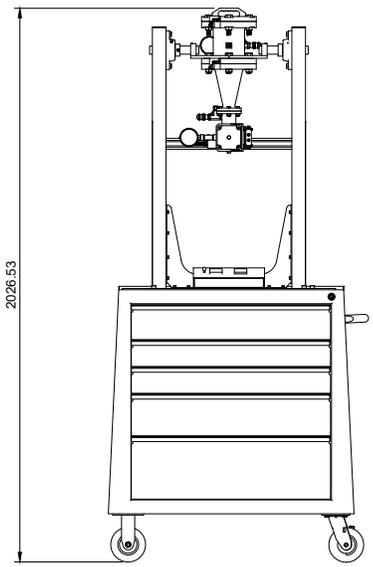


<p><b>DIMEC</b> INGENIERIA MECANICA UNIVERSIDAD DE CHILE</p>	<p>Escala</p>	<p>1:8</p>	<p>Universidad de Chile</p>	<p>Plano N° 002-003</p>	<p>Rev</p>
	<p>mm</p>	<p>Trabajo de Titulo ME 6909</p>	<p>Ensamblaje base soporte</p>	<p>A</p>	
	<p>DIB-002-ME6909-003</p>				
	<p>Fecha: 16/08/2021 Nombre: F. Astudillo</p>				
<p>Dibujo</p>		<p>Reviso</p>		<p>Apruebo</p>	

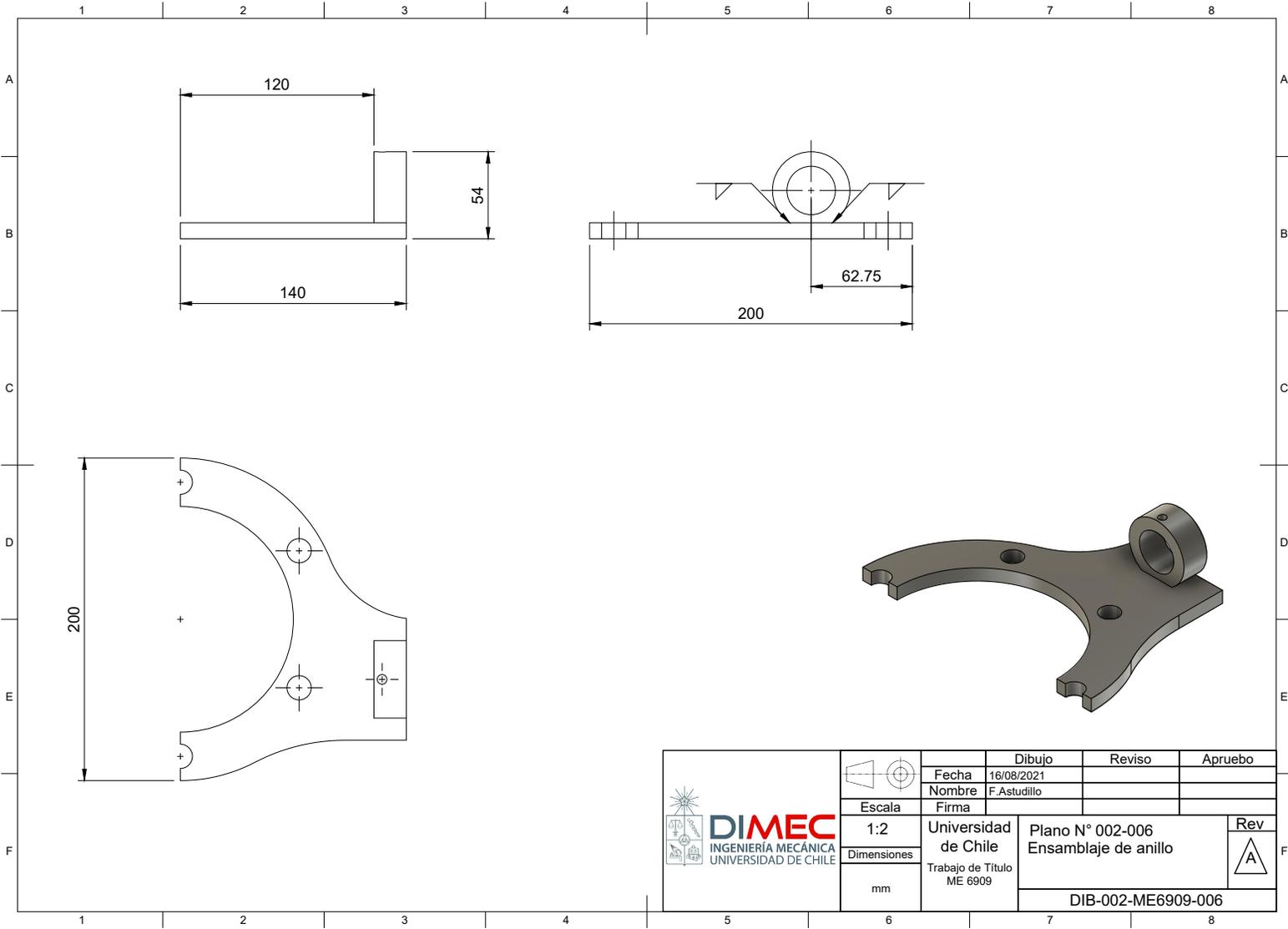


19	6	Clamp_ase_01	Steel
18	1	Bracket_esparrago_01	Steel
17	18	90447A850 HIGH-STRENGTH CLASS 10.9 STEEL HEX HEAD SCREW	Steel
16	2	EJE_02	Steel
15	16	91290A320 Black-Oxide Alloy Steel Socket Head Screw	Steel
14	1	Anillo_M15_PV_02	Steel
13	19	90591A215 ZINC-PLATED STEEL HEX NUT	Steel
12	4	Bloqueo_superior_01	Steel
11	1	1078N52_Class 10.9 High-Strength Steel Threaded Rod	Steel
10	1	Peso 2	Steel
9	4	Bloqueo peso	Steel
8	1	Peso 1	Steel
7	4	Bloqueo_inferior_01	Steel
6	2	91390A132	Steel
5	1	New_Cone_Hopper_TopCap_05	Steel
4	1	Anillo_M15_PV_01	Steel
3	1	Cone_hopper_cylinder_2L_04	Steel
2	2	1302N171_O_RING_TOP_H_03	Steel
1	1	Cone_Hopper_05	Steel
Item	Qty	Part Number	Material

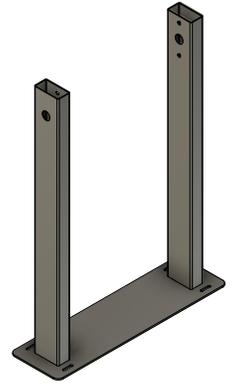
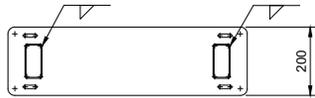
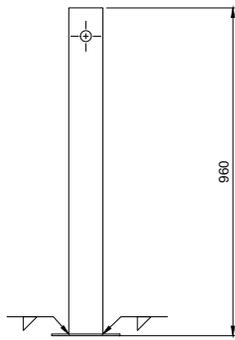
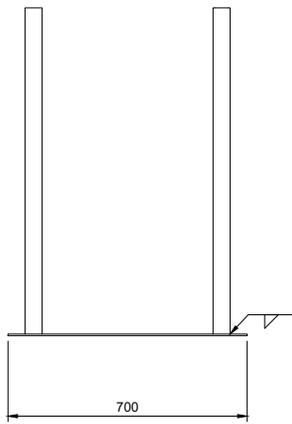
<p><b>DIMEC</b> INGENIERIA MECANICA UNIVERSIDAD DE CHILE</p>	Escala 1:5	Fecha 10/08/2021	Reviso	Apruebo
	Dimensiones mm	Firma	Nombre F. Astudillo	
	Universidad de Chile Trabajo de Titulo ME 6909	Plano N° 002-004 Explosionado tolva	Rev. A	
	DIB-002-ME6909-004			



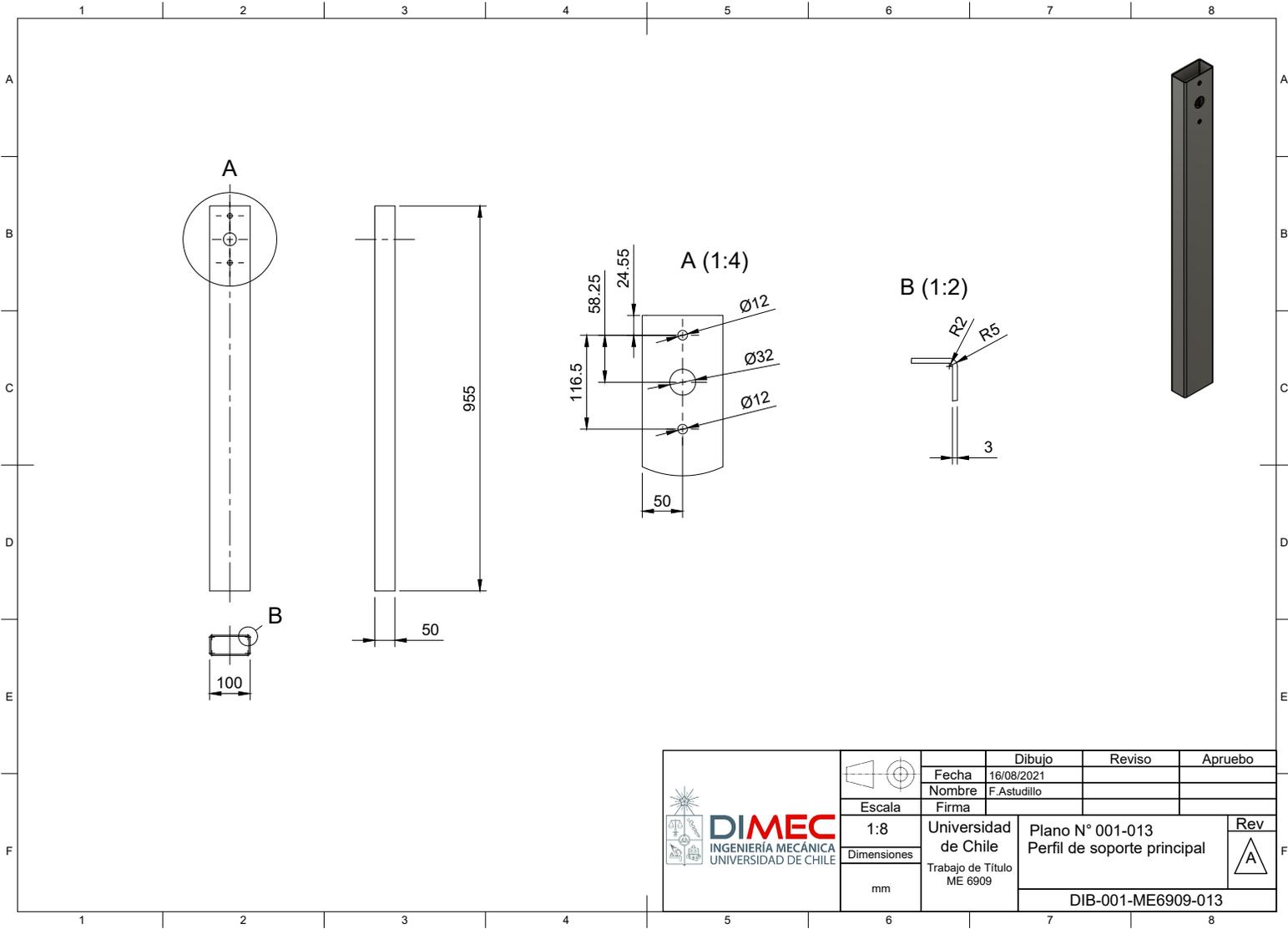
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE		<b>Dibujo</b> Fecha: 16/08/2021 Nombre: F. Astudillo Firma:	<b>Reviso</b>	<b>Apruebo</b>
	<b>1:10</b> Dimensiones	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 002-005 Ensamblaje general	<b>Rev.</b> A
	mm	DIB-002-ME6909-005		



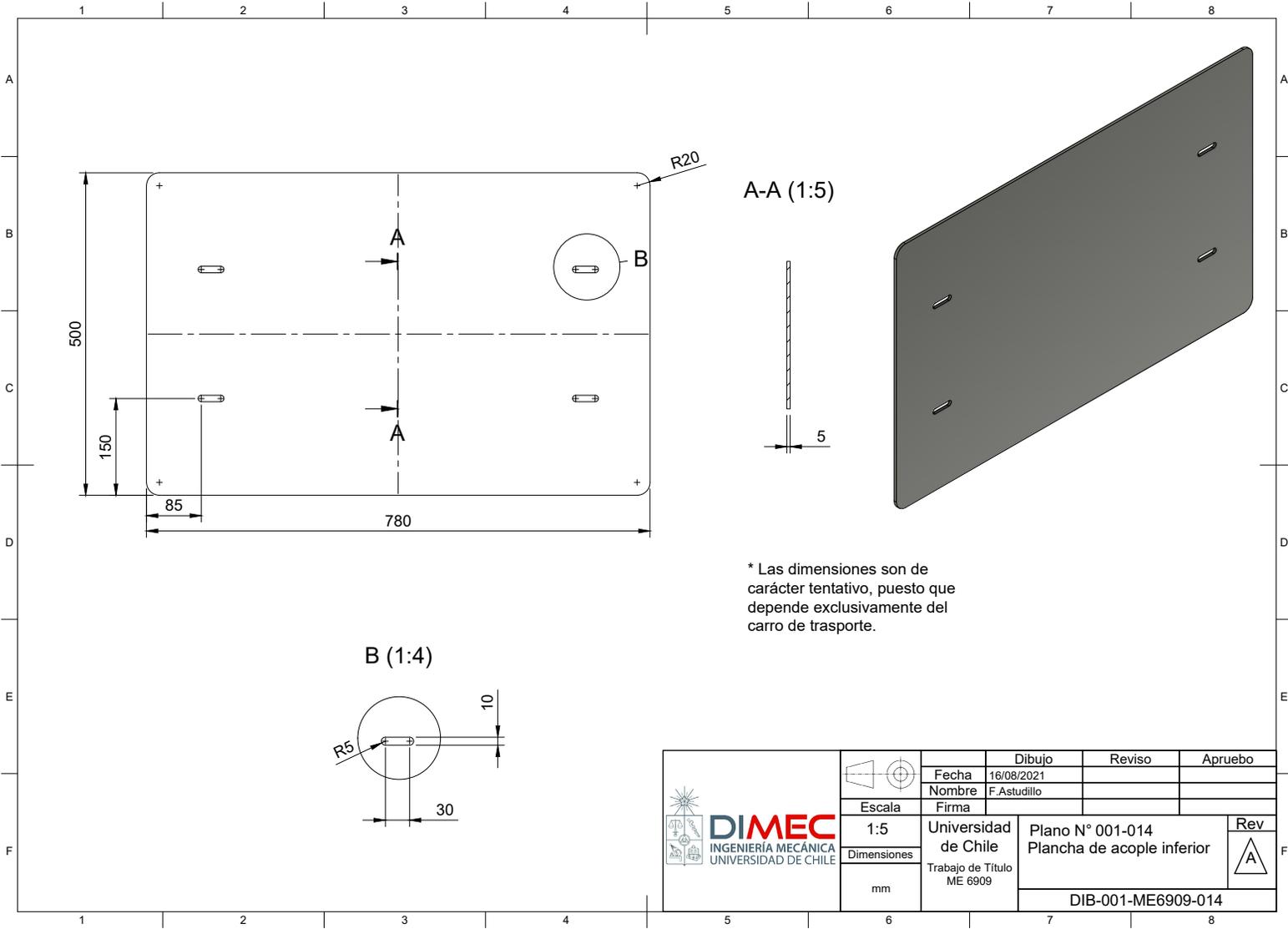
 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE		Dibujo		Reviso	Apruebo
		Fecha	16/08/2021		
	Escala	Nombre	F. Astudillo		
	Dimensiones	Firma			
mm	1:2	Universidad de Chile	Plano N° 002-006		Rev
		Trabajo de Título	Ensamblaje de anillo		A
		ME 6909	DIB-002-ME6909-006		



		Fecha	Dibujo	Reviso	Apruebo
	Escala	Nombre	F. Astudillo		
	Dimensiones	Firma			
	mm	Universidad de Chile Trabajo de Título ME 6909	Plano N° 002-007 Ensamble superior soporte	Rev A	
DIB-002-ME6909-007					



 <b>DIMEC</b> INGENIERIA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE		Dibujo		Reviso	Apruebo
		Fecha	16/08/2021		
	Escala	1:8	Nombre	F. Astudillo	
Dimensiones	mm	Firma			
		Universidad de Chile	Plano N° 001-013		Rev
		Trabajo de Título	Perfil de soporte principal		A
		ME 6909	DIB-001-ME6909-013		



A-A (1:5)

B (1:4)

\* Las dimensiones son de carácter tentativo, puesto que depende exclusivamente del carro de transporte.

		Dibujo	Reviso	Apruebo
	Fecha	16/08/2021		
	Nombre	F. Astudillo		
Escala	Firma			
1:5	Universidad de Chile	Plano N° 001-014		Rev
Dimensiones	Trabajo de Titulo ME 6909	Plancha de acople inferior		A
mm		DIB-001-ME6909-014		