



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE SISTEMA DE COMPONENTES MECÁNICOS PARA PROTOTIPO DE
IMPRESORA 3D, EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA CEMENTOS PROGRESO,
S.A.**

Carlos José Escobar Noriega

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, julio de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE SISTEMA DE COMPONENTES MECÁNICOS PARA PROTOTIPO DE
IMPRESORA 3D, EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA CEMENTOS PROGRESO,
S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS JOSÉ ESCOBAR NORIEGA
ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Bladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz Gonzales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE SISTEMA DE COMPONENTES MECÁNICOS PARA PROTOTIPO DE
IMPRESORA 3D, EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA CEMENTOS PROGRESO,
S.A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la carrera de Ingeniería Mecánica, con fecha 28 de febrero del 2020.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos José Escobar Noriega', with a long horizontal stroke extending to the right.

Carlos José Escobar Noriega



Guatemala, 17 de abril de 2023
REF.EPS.DOC.17.04.2023

Ingeniero
Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ing. Argueta Hernández:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S.) del estudiante universitario de la Carrera de Ingeniería Mecánica, **CARLOS JOSE ESCOBAR NORIEGA, Registro Académico No. 201021217** procedí a revisar el informe final, cuyo título es: **DISEÑO DE SISTEMA DE COMPONENTES MECÁNICOS PARA PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D, EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA CEMENTOS PROGRESO, S.A.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica



CACHC/cch

Universidad de San Carlos de
Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala, 19 de abril de 2023
REF.EPS.D.138.04.2023

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Morales Baiza:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **DISEÑO DE SISTEMA DE COMPONENTES MECÁNICOS PARA PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D, EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA CEMENTOS PROGRESO, S.A.**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Carlos José Escobar Noriega** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Carlos Anibal Chicojay Coloma.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS



OAH/ra



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.025.2023

El Coordinador del Área de Diseño de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **Diseño de sistema de componentes mecánicos para prototipo de impresora 3D, extrusora de tinta cementante para Cementos Progreso, S.A.** desarrollado por el estudiante: **Carlos José Escobar Noriega** con Registro Académico **2010 21217** y CUI **3704 73752 0101** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Esdras Miranda Orozco

COLEGIADO 4637

Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
Coordinador Área de Diseño
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

LNG.DIRECTOR.159.EIM.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE SISTEMA DE COMPONENTES MECÁNICOS PARA PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D, EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA CEMENTOS PROGRESO, S.A.**, presentado por: **Carlos José Escobar Noriega**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, julio de 2023

LNG.DECANATO.OI.557.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE SISTEMA DE COMPONENTES MECÁNICOS PARA PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D, EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA CEMENTOS PROGRESO, S.A.**, presentado por: **Carlos José Escobar Noriega**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, julio de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la sabiduría la capacidad, la fuerza, la salud, la protección y todo lo necesario para cumplir esta meta.
Virgen María	Tutora e intercesora ante Dios en el logro alcanzado y compañía en todo momento.
Mis padres	Por sus esfuerzos, preocupaciones, consejos, apoyo económico y acompañamiento incondicional, para lograr el título alcanzado.
Mis hermanos	Por la ayuda en varias circunstancias de mi carrera.
Mi abuelita	Por todas sus oraciones, preocupaciones y compañía en todo sentido, para alcanzar este título (q. e. p. d.).

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por todo el proceso de enseñanza, aprendizaje, recursos y posibilidades de estudiar la profesión que se acredita en este momento.
Amigos y compañeros	Por haber acompañado y compartido la ilusión de lograr la meta profesional.
Ing. Carlos Aníbal Chicojay	Por haberme asesorado en todo lo requerido en el trabajo de graduación y EPS.
Ing. Roberto Díaz	Por darme todo el apoyo requerido y consejos en el proyecto final de EPS.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXV
OBJETIVOS.....	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. FASE DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. Descripción de la empresa	1
1.1.1. Ubicación de la empresa	1
1.1.2. Historia	2
1.1.3. Políticas de laboratorio	3
1.1.4. Funciones principales	3
1.1.5. Misión	5
1.1.6. Visión.....	5
1.2. Impresión 3D	5
1.2.1. Descripción	5
1.2.2. Modelado por deposición fundida (FDM)	8
1.2.3. Funcionamiento de la impresión 3D	9
1.3. Impresión 3D de concreto.....	11
1.3.1. Antecedentes de la impresión 3D de concreto	11
1.3.2. Requerimientos para el dispositivo extrusor de la impresora	13
1.4. Extrusión.....	14
1.4.1. Extrusión de pasta	17

1.4.1.1.	Tipos de extrusoras consideradas para extrudir pastas.....	18
1.4.1.2.	Extrusoras de desplazamiento positivo	19
1.4.1.2.1.	Extrusión directa	19
1.4.1.2.2.	Extrusión indirecta.....	20
1.4.1.2.3.	Extrusión lateral	21
1.4.1.3.	Extrusoras de fricción viscosa	22
1.5.	Maquinas hidráulicas.....	23
1.5.1.	Definición.....	23
1.5.2.	Clasificación de las máquinas hidráulicas	24
1.6.	Tipos de extrusoras de pasta de alta viscosidad investigadas en laboratorio de UNFOLD para poder adaptar a impresoras 3D	29
1.6.1.	Definición.....	29
1.6.2.	Tipos de extrusoras de pasta existentes	30
1.6.2.1.	Bomba de jeringa accionada por pasos.....	30
1.6.2.2.	Extrusora de presión de aire directo	36
1.6.2.3.	Extrusoras de desplazamiento positivo	40
1.7.	Especificación de prototipo de producto, generación y selección de conceptos.....	51
1.7.1.	Especificaciones del producto	52
1.7.2.	Generación de conceptos.....	53
1.7.2.1.	Forma y tamaño del orificio de la boquilla de impresión	54

	1.7.2.2.	Selección de mecanismo de creación de flujo	54
	1.7.3.	Evaluación y selección del concepto	55
	1.7.3.1.	Sección transversal de la boquilla de impresión	55
	1.7.3.2.	Mecanismo de creación de flujo	56
	1.7.3.3.	Concepto seleccionado	58
1.8.		Máquinas hidráulicas de desplazamiento positivo	58
	1.8.1.	Principio del desplazamiento positivo	59
	1.8.2.	Clasificación de las máquinas de desplazamiento positivo	63
	1.8.3.	Bombas de émbolo	65
	1.8.3.1.	Comparación de las bombas rotodinámicas y las bombas de émbolo	65
	1.8.3.2.	Prototipo realizado en CETEC, con mecanismo de bomba alternativa con émbolo	67
	1.8.4.	Bombas roto-estáticas	72
	1.8.4.1.	Clasificación.....	72
	1.8.4.2.	Máquinas de engranajes externos.	73
	1.8.4.2.1.	Teoría de la bomba o motor de engranes	74
	1.8.4.3.	Ventajas y desventajas de las 3 máquinas roto-estáticas estudiadas para el diseño de la extrusora de este trabajo.....	75
1.9.		Maquina extrusora de tornillo	78
	1.9.1.	Elementos constituyentes.....	79

	1.9.1.1.	Tolva de alimentación	79
	1.9.1.2.	Estator, cilindro o barril.....	80
	1.9.1.3.	Cabezal	81
	1.9.1.4.	Boquilla.....	82
1.10.		Tornillo extrusor	83
	1.10.1.	Tornillo de Arquímedes	83
		1.10.1.1. Definición.....	83
		1.10.1.2. Zonas del tornillo	87
		1.10.1.2.1. Zona de alimentación	88
		1.10.1.2.2. Sección de alimentación – profundidades y longitudes.....	89
		1.10.1.2.3. Zona de compresión	90
		1.10.1.2.4. Zona de dosificación	91
1.11.		Modelamiento matemático en el tornillo extrusor	91
	1.11.1.	Modelamiento matemático del modelo de presión ..	94
	1.11.2.	Flujo de arrastre	95
	1.11.3.	Ley de Newton para fluidos newtonianos (estudio de la viscosidad)	96
	1.11.4.	Velocidad resultante	97
	1.11.5.	Ecuación del cambio de presión en una maquina extrusora de plástico	99
		1.11.5.1. Cálculo del diámetro nominal del tornillo de una extrusora de plástico	105
2.		FASE TÉCNICO PROFESIONAL	109
	2.1.	Selección de diseño para modelado del tornillo extrusor	109

2.2.	Reología de la mezcla	112
2.3.	Modelo del transporté del fluido.....	113
2.4.	Cálculo de cargas sobre el eje	136
2.4.1.	Masa del hormigón	136
2.4.2.	Carga distribuida del peso de la masa sobre el eje	137
2.4.3.	Cálculo del peso del eje.....	137
2.4.4.	Carga distribuida del peso del eje.....	138
2.4.5.	Fuerza distribuida total	138
2.4.6.	Diagrama de cuerpo libre	138
2.5.	Selección de rodamiento para el eje del tornillo de la extrusora	140
2.5.1.	Tipo de rodamiento a elegir	141
2.5.2.	Tamaño del rodamiento	142
2.6.	Material del tornillo extrusor.....	143
2.7.	Máxima tensión cortante estática en tornillo extrusor	143
2.7.1.	Código ASME para designación de ejes de transmisión	144
2.7.2.	Cálculo del momento flector máximo.....	146
2.7.3.	Fuerza axial en el eje de extrusión	148
2.7.4.	Coeficiente de seguridad	150
2.8.	Cilindro de extrusor de pared delgada sometido a presión....	152
2.8.1.	Deducción de las ecuaciones para esfuerzos en recipientes cilíndricos	153
2.9.	Acoplamiento para la unión de eje de extrusora y moto- reductor	159
2.9.1.	Acoplamiento rígido GTR.....	159
2.10.	Componentes	161
2.11.	Montaje.....	172

2.11.1.	Sujeción del motor reductor y extrusor	173
2.12.	Mantenimiento.....	179
3.	FASE DE DOCENCIA.....	187
3.1.	Capacitación	187
3.2.	Objetivo general	187
3.3.	Objetivos específicos	187
3.4.	Programa de capacitación.....	188
3.5.	Listado de asistencia.....	190
3.6.	Presentación de programa de capacitación	191
	CONCLUSIONES.....	195
	RECOMENDACIONES	197
	REFERENCIAS	199
	APÉNDICES.....	203
	ANEXOS.....	213

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de funcionamiento	11
2.	Castillo construido con impresora 3D	12
3.	Especificaciones de Impresión para una prueba de ensayo	14
4.	Extrusora de pasta en impresión 3D	17
5.	Extrusión directa.....	20
6.	Extrusión indirecta.....	21
7.	Extrusión lateral.....	22
8.	Rodete, tornillo de Arquímedes	25
9.	Rodete, tornillo de Moineau.....	25
10.	Clasificación de las máquinas hidráulicas roto-estáticas.....	27
11.	Clasificación de bomba extrusora de tornillo para pastas	28
12.	Frostuder MK1 de Zach Hoeken	30
13.	Extrusora de Jeringa fab home modelo 1	32
14.	Extrusora de pasta Rich Rap.....	33
15.	Dispensador de pasta VDX2	36
16.	Extrusora de soporte RepRap 1.0	37
17.	Sistema de extrusor de desplazamiento positivo	41
18.	Extrusora de pasta Ioan Festeu 2	42
19.	Extrusora claystruder 2	44
20.	Bomba de Moineau	49
21.	Despliegue de Bomba Moineau	51
22.	Proceso iterativo de pruebas.....	52
23.	Posibles formas de la boquilla.....	54

24.	Tipos de mecanismo a seleccionar	54
25.	Concepto seleccionado	58
26.	Explicación del principio de desplazamiento positivo	60
27.	Extrusora de émbolo para prueba CETEC	69
28.	Impresión de hormigón con extrusora de embolo, CETEC	71
29.	Máquina de engranajes externos	74
30.	Tornillo helicoidal	77
31.	Tornillo de cavidades progresivas	78
32.	Componentes de una maquina extrusora de tornillo	79
33.	Cabezal con torpedo	82
34.	Variables a considerar en tornillos extrusores	87
35.	Zonas de un tornillo extrusor	88
36.	Geometría de un tornillo extrusor	92
37.	Desarrollo de una espira de un tornillo	93
38.	Perfil de velocidades para el flujo de arrastre	95
39.	Perfil de velocidades	96
40.	Sistema de coordenadas en el canal del tornillo	99
41.	Perfil de velocidades para el flujo de presión	102
42.	Curva (Esfuerzo cortante – Rps) de compuestos de cerámicas fabricados en arcilla	113
43.	Esquema de flujo laminar en el tornillo extrusor	115
44.	Vista para nomenclatura del tornillo extrusor	115
45.	Vista corte lateral de tornillo extrusor	123
46.	Diferencial de área de la superficie de la hélice (vista frontal)	124
47.	Documentación técnica de motor seleccionado	135
48.	Diagrama de cuerpo libre	139
49.	Diagrama de corte en sección A-B	147
50.	Diagrama de esfuerzos cortantes y presión dentro de la extrusora	149
51.	Esfuerzos en dirección axial y anular	153

52.	Presión ejercida en el cilindro.....	154
53.	Catálogo plancho de acero ASTM A36	158
54.	Acoplamiento rigido GTR	160
55.	Membranas	161
56.	Motor CMP40M	163
57.	Reductor de velocidad R-37	164
58.	Reductores de velocidad R-57	164
59.	Acoplamiento rígido GTR	165
60.	Rodamiento FYK 20 TD	166
61.	Cubo base de alimentación	167
62.	Tornillo helicoidal.....	168
63.	Adaptador de pasador	169
64.	Cámara de compresión	170
65.	Boquilla de extrusión	171
66.	Tolva de alimentación	172
67.	Posición de montaje	173
68.	Dimensionamiento de acople	176
69.	Tornillos S1 de mordaza.....	177
70.	Reductor R-57	181
71.	Reductor R-37	181
72.	Rodamiento	182
73.	Acople rígido	182
74.	Cubo base de alimentación	183
75.	Tornillo helicoidal.....	183
76.	Cámara de compresión	184
77.	Tolva de alimentación	184
78.	Boquilla de extrusión	185
79.	Motor CMP40M	185
80.	Extrusora de tinta cementante.....	186

81.	Listado de asistencia.....	191
82.	Explicación de los componentes de la extrusora	192
83.	Presentación de la extrusora	193
84.	Montaje extrusor	194
85.	Corte extrusor	194

TABLAS

I.	Métodos de impresión 3D	7
II.	Evaluación de la forma de la sección transversal del orificio de la boquilla	56
III.	Evaluación de selección de mecanismo de creación de flujo	56
IV.	Criterio de significancia de componentes de velocidad	116
V.	Resultados del diseño de la extrusora	133
VI.	Constantes según el código ASME	146
VII.	Pares de apriete tornillos de sujeción	174
VIII.	Pares de apriete tornillos de nivel de aceite	175
IX.	Variables de las dimensiones	176
X.	Características técnicas del acople	178
XI.	Holguras para montaje de ejes, normas ISO	178
XII.	Clase de resistencia de tornillos	179
XIII.	Mantenimiento de los componentes	180
XIV.	Programa de capacitación	188

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura
H_A	Altura cresta en zona de alimentación
H_D	Altura cresta en zona de dosificación
b	Altura del diente
H	Altura piezométrica, Altura de cresta
W	Ancho del canal
θ	Ángulo
φ	Ángulo
θ_b	Ángulo de hélice
φ_b	Ángulo de hélice
Φ_b	Ángulo de hélice
φ_m	Ángulo de hélice corregido
Φ_S	Ángulo de paso de raíz de tornillo
A_{cont}	Área transversal
A	Área volumétrica
HP	Caballos de potencia
ΔP	Cambio de presión
q	Carga distribuida
q_{total}	Carga distribuida total
P_r	Carga equivalente a una vida de un millón de ciclos
P_e	Carga radial esperada
Q	Caudal
C_c	Centímetros cúbicos

C_t	Coeficiente aplicado al momento torsor
COF	Coeficiente de fricción
u_B	Coeficiente de fricción cilindro
CS	Coeficiente de seguridad
u_s	Coeficiente fricción tornillo
C_m	Coeficiente para impacto y fatiga
K	Constante
K_3	Constante de canal cónico boquilla de extrusora
C_1	Constante de integración
C_2	Constante de integración
C	Constante general, Clasificación carga básica, carga radial constante estática.
ρ	Densidad
ρ_{eje}	Densidad de eje
∂	Derivada
\emptyset	Diámetro
θ_{eje}	Diámetro de eje
ϕ_b	Diámetro de hélice
ϕ_{HC}	Diámetro de hélice en zona de compresion
D_b	Diámetro del barril
d	Diámetro del canal
θ_{HA}	Diámetro hélice alimentación
θ_{HCD}	Diámetro hélice de compresión y dosificación
D	Diámetro nominal, Diámetro exterior de hélice desplazamiento, volumen desplazado.
dA	Diferencial de área superficial
dF	Diferencial de fuerza
d_r	Diferencial de radio
d_s	Diferencial de superficie

Δ	Diferencial delta, significancia
L	Distancia
X	Distancia en eje X
Y	Distancia en eje Y
l	Distancia, longitud
η_V	Eficiencia volumétrica
C_o	Esfuerzo
S_{AX}	Esfuerzo axial en sección transversal del eje
τ_θ	Esfuerzo cortante
S_S	Esfuerzo cortante
τ	Esfuerzo cortante
$\tau_{r\theta}$	Esfuerzo cortante
σ_{yz}	Esfuerzo cortante dirección plano yz
τ_{YX}	Esfuerzo cortante en función de X
τ_o	Esfuerzo cortante inicial
S_{smax}	Esfuerzo cortante máximo
σ_{yp}	Esfuerzo de fluencia
S_{yp}	Esfuerzo de límite de fluencia
S_{ult}	Esfuerzo de rotura en tracción-compresión
σ_2	Esfuerzo en dirección axial
σ_1	Esfuerzo en dirección circunferencial
σ	Esfuerzo tracción-compresión, Esfuerzo de corte
esp	Espacio desde cresta hasta el cojinete
e	Espesor de filete
δ	Espesor, holgura, separación
F_d	Factor de dimensión
α	Flujo de arrastre
γ	Flujo de filtración

β	Flujo de presión
\dot{V}	Flujo volumétrico
\dot{V}_a	Flujo volumétrico de arrastre
\dot{V}_P	Flujo volumétrico de presión o retroceso
\bar{V}	Flujo volumétrico, velocidad media, Velocidad
N	Frecuencia de rotación, Normal
F	Fuerza
F_{AX}	Fuerza axial en X
V_0	Fuerza cortante en punto 0
V	Fuerza cortante, Flujo volumétrico
F_T	Fuerza distribuida
F_Y	Fuerza en eje Y
F_p	Fuerza generadora de la presión, Constante de corrección de forma del canal.
F_σ	Fuerza generadora del esfuerzo
F_w	Fuerza total del peso
g	Gravedad
∞	Infinito
KN	Kilonewton
L_{eje}	Largo del eje
L_1	Longitud canal cilíndrico (manguera)
L_2	Longitud canal cónico (boquilla en cabezal)
L_3	Longitud canal cónico (boquilla extrusora)
m_{Horm}	Masa de hormigón
σ_{Smax}	Máximo esfuerzo de cortadura
m	Metros
E	Módulo de elasticidad
M	Momento flector

M_A	Momento flector en cojinete
M_0	Momento flector en punto 0
$M_{0.2}$	Momento flector en punto 0.2
M_{max}	Momento flector máximo
Nm	Newton-metro
Z	Número de dientes, dirección Z
n	Número de revoluciones
T	Par torsión, momento torsor
Pa	Pascal
W_{eje}	Peso del eje
P	Presión, Potencia
p	Presión, presión manométrica, potencia
h_c	Profundidad de canal en zona de compresión
R_{HA}	Radio de hélice en zona de alimentación
R_{HCD}	Radio de hélice en zona de compresión y dosificación.
R	Radio del cilindro
R_{eje}	Radio del eje
r_{ext}	Radio exterior
r	Radio, radio interior del cilindro, radial
R_{AX}	Reacción en cojinete (eje x)
R_{AY}	Reacción en cojinete (eje Y)
rw	Revoluciones por segundo
d_y	Sección del cilindro en y
s	Segundos
S	Tensión normal, esfuerzo de tracción- compresión, Paso diametral.
t	Tiempo, espesor de pared
N_r	Un millón de ciclos

v	Velocidad
Ω_{θ}	Velocidad angular
ω	Velocidad angular
v_z	Velocidad axial
$\dot{\gamma}$	Velocidad de cizalladura
V_c	Velocidad del canal
V_a	Velocidad del fluido
V_b	Velocidad del tornillo relativa al barril
V_{bx}	Velocidad del tornillo relativa al barril componente en eje x.
V_{bz}	Velocidad del tornillo relativa al barril componente en eje z.
V_z	Velocidad en eje z
\bar{V}_z	Velocidad media en z
v_r	Velocidad radial del fluido
v_{θ}	Velocidad tangencial del fluido
v	Velocidad, velocidad constante
N_e	Vida de clasificación esperada
η	Viscosidad
μ	Viscosidad
V_{horm}	Volumen de tinta (mezcla)
V_{eje}	Volumen del eje
w	Watts

GLOSARIO

Aditivo	Término que puede utilizarse como adjetivo o como sustantivo. En el primer caso, califica a aquello que se tiene o que se puede agregar o incorporar a otra cosa.
Alabe	Es la paleta curva de una turbomáquina o máquina de fluido rotodinámica. Forma parte del rodete, en su caso, también del difusor o del distribuidor. Los álabes desvían el flujo de corriente, bien para la transformación entre energía cinética y energía de presión por el principio de Bernoulli, o bien para intercambiar cantidad de movimiento del fluido con un momento de fuerza en el eje.
Bar	Unidad de presión muy utilizada en aire comprimido. Su equivalencia más inmediata es a la atmósfera o a kg/cm^2 .
Bomba peristáltica	Tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo usada para bombear una variedad de fluidos. El fluido es contenido dentro de un tubo flexible empotrado dentro de una cubierta circular de la bomba (aunque se han hecho bombas peristálticas lineales). Un rotor con un número de rodillos, zapatas o limpiadores unidos a la circunferencia externa comprimen el tubo flexible.

Brick/backing	Ladrillo / apoyo.
Bricolaje	Es la actividad manual que realiza una persona como aficionada, sin recurrir a los servicios de un profesional, para la creación, mejora, mantenimiento o reparación, en especialidades.
CAD	Bosquejo y diseño asistido por computadora. (computer-aided design and drafting).
Calafateo	Acción de rellenar o cerrar una grieta, fisura o hendidura para evitar que penetre el agua mediante un sellador de extensibilidad baja.
Calar	Dicho de un líquido (penetrar en un cuerpo permeable), dicho de un instrumento (como espada o una barrena) atravesar un cuerpo de una parte a otra.
Circunferencial	Contorno o perímetro de una superficie u otra cosa con formareondeada o esférica.
Cizallamiento	Deformación lateral que se produce por una fuerza externa. También llamado corte, cortadura.
Código ASME B17c-1927	Recomienda que se tomen 560 kg/cm ² como tensión de trabajo $S_{S \max}$ en cortadura para “ejes comerciales” pero sin especificaciones definidas para

las propiedades físicas y químicas del material. La resistencia a la rotura de tales aceros puede variar de 3150 kg/cm² a 4900 kg/cm². Los límites elásticos correspondientes serían de 1580 a 3900 kg/cm². Cuando existe un chavetero en la sección para la que se realizan los cálculos de tensiones, las tensiones de trabajo deben reducirse al 75 % de los valores.

COF	Coeficiente de fricción.
Deflexión	Se conoce como deflexión a la deformación que registra un elemento a partir de la aplicación de una fuerza.
Delrin	Material termoplástico, semi-cristalino de gran dureza y resistencia, excelentes resultados en su mecanización y con múltiples aplicaciones.
Efecto chevron	Se refiere a rayas en diagonal.
Estancas	Que está completamente cerrado o no tiene comunicación con otras cosas.
Estanqueidad	Es una propiedad que se basa en la capacidad para evitar que entren partículas externas al interior de una pieza, circuito o habitáculo, ya sea agua, aire, polvo, entre otros.

Estator	Es la parte fija de una máquina rotativa y uno de los dos elementos fundamentales para la conversión electromecánica de potencia, siendo el rotor su contraparte móvil.
Estéreo	Tecnología láser que emplea una resina líquida sensible a la luz UV. Un rayo láser UV escanea la superficie de la resina y endurece de forma selectiva el material correspondiente a la sección cruzada del producto, de forma que la pieza 3D se crea desde abajo hacia arriba.
Extrusora	Las extrusoras son máquinas industriales que aplican presión sobre medios sólidos y viscosos para forzar su paso a través de la abertura de una boquilla.
Firmware	Es un programa informático que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo, está fuertemente integrado con la electrónica del dispositivo.
G-CODE	En términos generales, G-code es un lenguaje de computadora que dice a la máquina qué hacer y cómo hacerlo. a dónde moverse, cuán rápido moverse y qué trayectoria seguir. Las máquinas típicas que son controladas con G-code son fresadoras, cortadoras, tornos e impresoras 3D.

Geodésica	Ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico. Dentro de esta definición, se incluye también la orientación y posición de la tierra en el espacio.
Hidrostática	Es la rama de la hidráulica que estudia los fenómenos asociados a los fluidos que se encuentran en estado de reposo.
Hormigón	Material de construcción formado por una mezcla de piedras menudas y un tipo de argamasa (cal, cemento, arena y agua).
Iterativo	Que se repite, se refiere al proceso de iteración de una función, es decir, aplicando la función repetidamente, usando la salida de una iteración como la entrada a la siguiente.
Momento flector	Es una sollicitación típica en vigas, pilares y también en ejes ya que todos estos elementos suelen deformarse predominantemente por flexión. El momento flector puede aparecer cuando se someten estos elementos a la acción de un momento (torque) o también de fuerzas puntuales o distribuidas.
Newtoniano	Fluido cuya viscosidad puede considerarse constante. Los fluidos newtonianos son uno de los tipos de fluidos más sencillos de describir. La curva que muestra la

relación entre el esfuerzo o cizalla contra su velocidad de deformación es lineal. El mejor ejemplo de este tipo de fluidos es el agua en contraposición al pegamento, los geles y la sangre, que son ejemplos de fluido no newtoniano.

PLA

Polímero o bio-plástico constituido por elementos similares al ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases, pero que además puede ser biodegradable bajo ciertas condiciones a temperaturas del orden de 60 C. Se puede degradar en agua y óxido de carbono.

Polímero

Abarcan tanto a los plásticos sintéticos que todos conocen, como el polietileno, así como los biopolímeros naturales como el ADN y las proteínas, que son fundamentales para la estructura y funcionamiento biológico.

Poliiolefinas

Las TPO son uno de los materiales más innovadores que se emplean hoy en día para impermeabilizaciones de techos y azoteas. Es, también, uno de los materiales soldables por calor más nuevos para techado.

Probeta

Muestra de material endurecido, por regla general hormigón o roca, de dimensiones determinadas y conservada en condiciones preestablecidas, para posteriormente ser sometida a ensayos.

Reología	Parte de la física que estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia.
Revenido	Tratamiento complementario del templado, que regularmente sigue a este. A la unión de los dos tratamientos también se le llama bonificado. El revenido ayuda al templado a aumentar la tenacidad de la aleación a cambio de dureza y resistencia, disminuyendo su fragilidad. Este tratamiento consiste en aplicar, a una aleación, una temperatura inferior a la del punto crítico y cuanto más se aproxima a esta y mayor es la permanencia del tiempo a dicha temperatura, mayor es la Jdisminución de la dureza (más blando), la resistencia y mejor la tenacidad. El resultado final no depende de la velocidad de enfriamiento.
RPM	Revoluciones por minuto.
RPS	Revoluciones por segundo.
STL	Formato de archivo informático de diseño asistido por computadora (CAD), que define geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD.

Sustractiva	Que pertenece o concierne a la sustracción o al proceso de sustraer, sacar, extraer, poner algo afuera o lejos.
Templadas	Proceso térmico por el cual las aleaciones de acero y el hierro fundido se fortalecen y endurecen. Estos metales constan de metales ferrosos y aleaciones. Esto se realiza calentando el material a una cierta temperatura, dependiendo del material, y luego enfriándolo rápidamente.
Thingiverse	Es un mercado digital dedicado a alojar y compartir archivos imprimibles en 3D, es decir, que se pueden descargar e imprimir como objetos del mundo real.
Tile	Baldosa, losa, teja.
Volumétrico	Perteneciente al volumen como un sistema de medición basado en el sistema internacional de unidades al metro cúbico.

RESUMEN

El presente proyecto de EPS deriva de la investigación del diseño de la impresora 3D de hormigón realizada con el Centro de Tecnología de Cementos Progreso S.A, (CETEC). El informe se centra en la parte extrusora de la impresora en pequeña escala. El principio básico de la impresión 3D, trata de la técnica de fabricación aditiva, al contrario de las técnicas tradicionales de fabricación sustractiva. Los beneficios potenciales de la impresión 3D de hormigón en comparación con las técnicas utilizadas hoy en día, se diferencian en ser un proceso de fabricación más barato, rápido, eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

La metodología utilizada se tomó del diseño y desarrollo de producto de Ulrich & Eppinger. Se requiere imprimir mobiliario urbano a pequeña escala para definir una mezcla de hormigón, diseño de elementos, mecanismos e hidráulica de la máquina; con parámetros de diseño completamente acertados y obtener un diseño para dimensionar a medidas normales e imprimir mobiliario en condiciones que proporcionen su uso urbano.

Para cumplir con la especificación del producto, se consideraron algunas características clave de la extrusora: La forma del orificio, el diseño de la paleta lateral y el mecanismo de creación de flujo, a partir de las matrices de evaluación se decidió que el diseño de la extrusora ira conectada independientemente con una manguera conectada a una boquilla de sección circunferencial para la salida de la tinta y un sinfín giratorio para crear un flujo de hormigón.

Para evaluar la mezcla de hormigón y su impresión, en las primeras pruebas se adaptó a una impresora de PLA una jeringa como extrusora y se observó si era conveniente este tipo de mecanismo y estudiar el comportamiento del flujo controlado por un motor stepper por medio del G CODE de la impresora; así también se determinó si los ejes de desplazamiento y estructura de la impresora presentaron la capacidad de soportar los esfuerzos, al adaptar la bomba dosificadora directamente en el cabezal de salida de extrusión o quitarles carga colocando solo la boquilla de extrusión. El bombeo fuera de la Impresora para crear el flujo logró mejor movilidad del cabezal al no adherirle más carga de la que los ejes de desplazamiento y la estructura están diseñados para soportar.

Se concluye, que el mecanismo de trabajo de la extrusora por medio de tornillo sin fin, resulta más adecuado para esta aplicación, que utilizar bombeo lateral (pistón-cilindro). Sin embargo, es necesario un hormigón especialmente mezclado como el utilizado en el proyecto para que sea tanto extruible como edificable.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de componentes mecánicos de impresora 3D capaz de imprimir piezas de cemento en pequeña escala para ser sometidas a distintos estudios y pruebas de materiales, bajo condiciones controladas para validar su utilización en la construcción.

Específicos

1. Identificar los requerimientos dimensionales de las piezas y las pruebas a realizar de la tinta impresa, para efectos del dimensionamiento del dispositivo extrusor.
2. Realizar memorias de cálculo y planos de construcción para la validación del diseño del dispositivo extrusor, dado un rango de características de tinta impresa admisible.
3. Elegir si es necesario la construcción de la estructura, ejes de desplazamiento y cabezal o adaptarle el sistema de extrusión de hormigón a una impresora de PLA existente en el mercado.
4. Seleccionar el tipo de mecanismo de extrusión más óptimo.
5. Estudiar la reología de la mezcla de impresión.

6. Escoger el dimensionamiento del motor para la extrusión de hormigón.
7. Utilizar el montaje de la bomba dosificadora de extrusión de acuerdo a su peso y esfuerzos ejercidos en las barras de desplazamiento.

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D aplicada al sector de la construcción ofrece muchas ventajas, ya sea en términos de costo, tiempo o durabilidad de los materiales. Los actores que se han embarcado en la fabricación aditiva de concreto son cada vez más numerosos, convencidos de los beneficios que las tecnologías 3D pueden aportar. Con la impresión 3D de cemento es posible diseñar estructuras de manera más eficiente.

Es por ello que el Centro tecnológico de Cementos Progreso, S.A. deciden iniciar el diseño de un prototipo de impresora 3D, empleando como tinta, cemento, capaz de inyectar piezas y proyectos en pequeña escala para estudiar y someter a pruebas, así mismo verificar que el material impreso cumpla con las propiedades adecuadas de construcción. Y dejar un diseño que pueda ser dimensionado de manera que sea capaz de imprimir piezas de hormigón para uso urbano. Para el diseño completo del prototipo se trabajará en conjunto con compañeros del área de diseño del laboratorio de CETEC, la parte del prototipo que se mencionará en el trabajo es enfocado en el área mecánica, y esta trata del diseño de sistemas de los componentes mecánicos del prototipo.

En consecuencia, este proyecto interdisciplinario pretende entregar a CETEC (Centro tecnológico), un dispositivo extrusor de piezas cementantes en pequeña escala, para el ensayo de un rango de concreto bajo condiciones controladas que permita generar pruebas de extrusión y de esta manera determinar un concreto idóneo; para su implementación en la construcción según las normativas nacionales vigentes.

Ayudando a dar uno de los primeros pasos para implementar a la industria de la construcción en el país, la tecnología de imprimir casas por medio de impresoras 3D.

De no contar con un buen diseño de sistema de los componentes mecánicos el flujo, velocidad y presión de la mezcla de cemento serian inadecuados en la salida del extrusor; ocasionando también una mezcla inyectada no homogénea, y la impresora no sería capaz de imprimir la cantidad con la calidad de cemento requerido en el momento indicado, esto haría fallar la precisión de impresión y sería imposible lograr imprimir las distintas capas para formar bien la pieza con las propiedades y resistencia adecuada.

Estas fallas podrían ser ocasionadas por un mal dimensionamiento del motor de suministro, diámetro, longitud y material inadecuado de la manguera de carga, mal diseño del mecanismo del extrusor de tinta, reductor de velocidad inadecuado (RPM de salida del motor), sistema de montaje y soportes no aptos de los componentes incapaces de soportar los distintos esfuerzos y cargas generadas por el prototipo, lo dicho anteriormente podría ocasionar grandes esfuerzos de fatiga, tensión y torsión, esto llevaría al punto de ruptura de alguno de los componentes del prototipo dejándolo inservible.

1. FASE DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la empresa

El Centro de Investigación y Desarrollo, CI+D, tiene como visión ser el Centro Tecnológico de referencia y líder en los campos de investigación y desarrollo a nivel centroamericano. Asimismo, busca proveer a Cementos Progreso las herramientas necesarias para mantener su liderazgo, competitividad y sostenibilidad mediante la innovación de sus productos, procesos y capacitación técnica.

Este es el encargado de brindar asistencia técnica a las áreas de operaciones y comercial de la organización, así como proveedores. A su vez desarrolla nuevos productos y soluciones alineadas con la estrategia del grupo mediante la investigación.

En la actualidad tiene como enfoque el desempeño sostenible, reduciendo las emisiones de CO2 y maximizando el aprovechamiento de clínker y cemento. De igual forma, impulsa el desarrollo tecnológico de la Industria de la Construcción de Guatemala a través de la diseminación del conocimiento dentro de la organización y en el mercado.

1.1.1. Ubicación de la empresa

CETEC se encuentra ubicado dentro del interior de la planta La Pedrera, cementos progreso S.A. en la 15 avenida 18-01 zona 6, interior Finca La Pedrera, Ciudad de Guatemala.

1.1.2. Historia

El Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso, S.A., inició como el Laboratorio de Concreto de Cementos Progreso, el 7 de julio de 1992 como dependencia principal del Departamento de Asesoría y Servicios Técnicos, que desde 1995 se reorganizó como Departamento de Investigación y Asesoría.

Inicialmente su objetivo principal fue ofrecer al sector construcción y al público en general, los servicios de laboratorio y asistencia técnica complementaria, a un costo razonable. También se promovió la realización de estudios e investigaciones sobre el concreto y sus aplicaciones, principalmente a través de las universidades del país.

Al poco tiempo se incorporó como función importante, la colaboración en el control de calidad de los productos las plantas de Cementos Progreso, S. A., especialmente como control de tercera parte para las plantas de la empresa, a través del muestreo y ensayo del producto final que se despacha.

En enero de 2002, el Departamento de Investigación y Asesoría pasó a ser el Centro Tecnológico de Cementos Progreso, S. A., durante 10 años.

En el 2012 el Centro Tecnológico de Cementos Progreso, S.A. forma parte del Departamento de Operaciones. Ahora llamándose Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso, S.A.

El Centro de Investigación y Desarrollo ha evolucionado a través de los años como respuesta a la demanda de soluciones y de la constante dinámica de la industria de la construcción. Industria que requiere aplicar los últimos avances

y la innovación tecnológica en productos y servicios de la más alta calidad mundial.

1.1.3. Políticas de laboratorio

Nos comprometemos a mejorar continuamente y a satisfacer a nuestros clientes brindando un servicio de clase mundial.

En el laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo nos dedicamos a la realización de actividades de investigación y desarrollo en el campo de la construcción y de la industria en general, proporcionando a nuestros clientes servicios de asesoría técnica y de laboratorio para análisis y ensayos de materiales, utilizando tecnología avanzada, normas reconocidas internacionalmente y personal competente comprometido con nuestras políticas para asegurar la calidad, confiabilidad y reproducibilidad de nuestros resultados.

Contamos con un sistema de gestión de calidad que cumple con los requisitos de la norma COGUANOR NTG/ISO/IEC 17 025:2005. Nos comprometemos a mejorar continuamente y a satisfacer a nuestros clientes brindando un servicio de clase mundial. (Granito de Arena, s.f., párr. 1-3)

1.1.4. Funciones principales

- Asesoría técnica orientada a clientes internos y externos
- Investigación y Desarrollo de productos y soluciones hechas a la medida, con un alto desempeño.

- Transferencia de Conocimientos: Promociones, información, capacitación a clientes internos, externos, estudiantes, universitarios, profesionales, técnicos y operarios del sector construcción y otras industrias del sector público y privado.
- Intercambio de conocimientos, tecnología y experiencias.
- Emisión y homologación de Normativos que generen altos estándares en la construcción y otras industrias.
- Innovación tecnológica y promoción de nuevas tecnologías aplicadas a la construcción y otras industrias.
- Asesoría para la acreditación de laboratorios.
- Usos y aplicaciones de nuestros productos que permiten la materialización de soluciones prácticas con alto beneficio a los usuarios finales.
- Soporte técnico a las operaciones de cemento, concreto, cal, pre dosificados, agregados y otras empresas de Cementos Progreso que permitan alta competitividad, manteniendo altos estándares de calidad.
- Ser la unidad de información y conocimiento de Cementos Progreso, clientes internos y externos. (Granito de Arena, s.f., párr. 1-10)

1.1.5. Misión

Desarrollar nuevos productos y soluciones alineadas con la estrategia del grupo mediante la investigación.

Apoyar en la optimización de costos, calidad, funcionalidad de los productos y procesos de Cementos Progreso a través de la prestación de servicios de asistencia técnica tanto a las áreas de Operaciones y Comercial como a terceros, mejorar el desempeño sostenible reduciendo las emisiones de CO₂. Impulsar el desarrollo tecnológico en la industria de la construcción, diseminando el conocimiento tanto a la organización como al mercado. (Granito de Arena, s.f., párr. 1-2)

1.1.6. Visión

Ser el Centro Tecnológico referente y líder en los campos de investigación y desarrollo a nivel Centroamericano. Facilitando las herramientas necesarias a Cementos Progreso para mantener su liderazgo, competitividad y sostenibilidad mediante la innovación de sus productos, sus procesos y la capacitación técnica. (Granito de Arena, s.f., párr. 3)

1.2. Impresión 3D

A continuación, se detalla una descripción, el tipo de modelado por deposición fundida y el funcionamiento de la impresión 3D.

1.2.1. Descripción

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Las impresoras 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, aunque como cualquier proceso industrial, están sometidas a un compromiso entre su precio de adquisición y la tolerancia en las medidas de los objetos producidos.

Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores de un producto la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de ensamble. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos de producto.

Las impresoras 3D son máquinas capaces de crear réplicas de diseños en 3D piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por un programa de diseño asistido por ordenador (CAD) o a partir de datos recogidos por un escáner 3D, las impresoras 3D, tienen un papel muy importante hoy en día para el prototipado rápido.

El inicio de la impresión 3D se remonta a 1984, cuando Charles Hull, el cofundador de 3D Systems, inventa la Estereo-litografía para evitar el tedioso trabajo que conlleva realizar objetos de plástico, crear primero un molde para después inyectar el plástico.

Hoy en día existe un gran abanico de métodos de impresión 3D, y sus principales diferencias se encuentran en la forma que usan las diferentes capas que terminarán formando las piezas y el material a imprimir (Ji Chen, 2017).

Tabla I. **Métodos de impresión 3D**

Tipo	Tecnología	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos por ejemplo PLA, ABS, HDPE, poliuretano termoplástico (TPU), metales eutécticos, materiales comestibles, cerámica
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF)	Casi cualquier aleación
Granulado	Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplástico, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Laminado	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímero
Fotoquímico	Foto polimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímero

Fuente: Ji Chen (2017). *Diseño de un extrusor para imprimir chocolate*. Consultado el 12 de mayo de 2022. Recuperado de <https://docplayer.es/93451581-Disen0-de-un-extrusor-para-imprimir-chocolate.html>.

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas, pero los principales factores a valorar son: la velocidad de impresión, la presión de salida, respuesta de parada, el acabado final de la pieza, el costo de la maquinaria y su fabricación. Una de las cualidades fundamentales es el material que imprimen, en el caso de imprimir materiales con viscosidad muy alta como son los fluidos no newtonianos el tipo de método es por extrusión y su tecnología es llamada modelado por deposición fundida (FDM), en el caso del hormigón o concreto no

es necesario fundir como los plásticos si no la mezcla debe estar en un estado fresco que sea capaz de tener un flujo continuo sin esfuerzos cortantes muy elevados.

1.2.2. Modelado por deposición fundida (FDM)

Inventada en el año 1988 por Scott Crump, este método consiste en depositar capa por capa material sobre una base móvil. EL material inicialmente se encuentra en estado sólido en forma de filamento y es almacenado en rollos, este se introduce dentro de una boquilla, que se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material, se funde y es expulsado por la boquilla en minúsculos hilos que se van solidificando conforme se va depositando sobre la base móvil. Este método es el que se recomienda para imprimir concreto, por ser para imprimir fluidos no newtonianos o pseudoplásticos con cierta viscosidad al ser extruidos.

- Ventajas del método
 - Buena precisión
 - Bajo coste de mantenimiento
 - Producto final funcionales

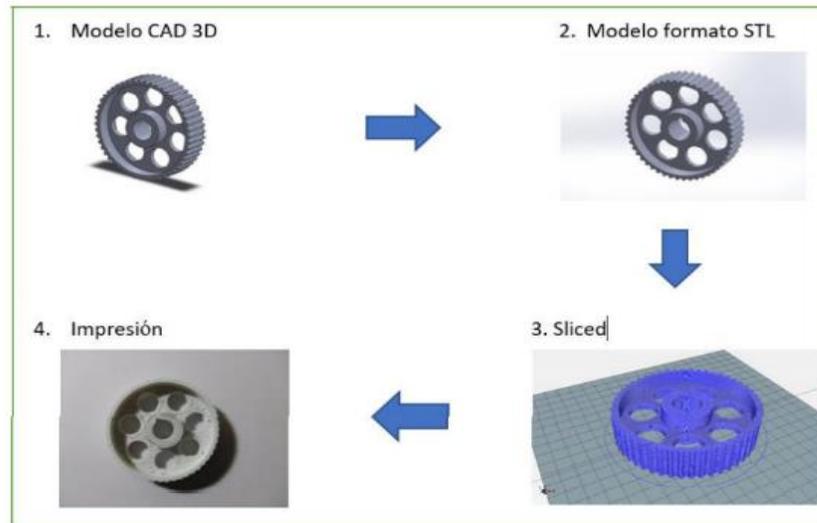
- Desventajas del método
 - Baja productividad
 - No es adecuado para crear piezas de grandes dimensiones
 - Requieren estructuras de soporte para geometrías complejas
 - desperdicio de material

1.2.3. Funcionamiento de la impresión 3D

- Hacer el diseño del 3D a imprimir desde un software CAD o descargar ya listo desde una página web.
 - Tipos de software
 - Inventor
 - AutoCAD
 - Solidworks
 - Fusión 360
 - Rhinoceros
 - 3DS max
 - Otros
 - Páginas web para descargar archivos
 - Thingiverse
 - Grabcad
 - Autodesk 123D
 - YouMagine
 - Cults
- En el caso de ser una pieza diseñada por un programa CAD, convertir el modelo 3D a un modelo STL, que proporciona la información geométrica de la pieza con un conjunto de puntos, líneas y superficies. Esta conversión se puede hacer directamente con el software CAD.

- Después de convertir el modelo 3D al formato STL, hay que rebanar el modelo, de esta manera la pieza se separa en capas según los parámetros de rebanado que se indiquen en el programa de Slicer (rebanado). Una vez rebanada la pieza el mismo programa proporciona los comandos llamados códigos g-code que la impresora necesita para entender y ejecutar.
 - Software de slicer
 - Repetier
 - Cura
 - 123D Catch
 - Preform3D
 - Netfabb Basic Y muchos mas
- Y el último paso es pasar los códigos de ejecución, g-code, obtenidos anteriormente a la impresora, ya sea mediante conexión USB a un pc, por una memoria externa y que sea leído directamente por la propia impresora o por Wifi. Una vez que la impresora reciba los códigos podrá comenzar a imprimir la pieza.

Figura 1. **Esquema de funcionamiento**



Fuente: Ji Chen (2017). *Diseño de un extrusor para imprimir chocolate*. Consultado el 12 de mayo de 2022. Recuperado de <https://docplayer.es/93451581-Diseno-de-un-extrusor-para-imprimir-chocolate.html>.

1.3. **Impresión 3D de concreto**

En estos últimos tres años, existen muchos prototipos de impresoras 3D extrusoras de concreto alrededor del globo y la tendencia actual es conquistar el mercado de la construcción, al menos a una escala domiciliaria gracias a los beneficios que tiene a largo plazo: poca mano de obra, bajas emisiones de contaminación (escombros, ruido, entre otros), rapidez y precisión.

1.3.1. **Antecedentes de la impresión 3D de concreto**

La aplicación de control numérico por computadora para la automatización de máquinas de herramientas ha existido desde al menos la década de los 40. Un concepto más reciente es el de las impresoras 3D de polímeros, estas

adoptaron la forma que hoy se conoce en los años cercanos a 1984, gracias a los avances desarrollados por Chuck Hull. Sin embargo, la aplicación de este tipo de tecnologías en la construcción con concreto no ve la luz hasta la primera mitad del 2014, de la mano de Andrey Rudenko, donde mostró al público la construcción de un castillo fabricado gracias a una impresora extrusora de concreto. (Ver figura 2), esta creación es considerada el ejemplo clásico a la hora de citar las capacidades de construcción de este tipo de tecnologías.

Figura 2. **Castillo construido con impresora 3D**



Fuente: Azarello (2014). *Andrey Rudenko constructs 3D printed concrete castle*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de <https://www.designboom.com/technology/3d-printed-concrete-castle-minnesota-andrey-rudenko-08-28-2014/>.

1.3.2. Requerimientos para el dispositivo extrusor de la impresora

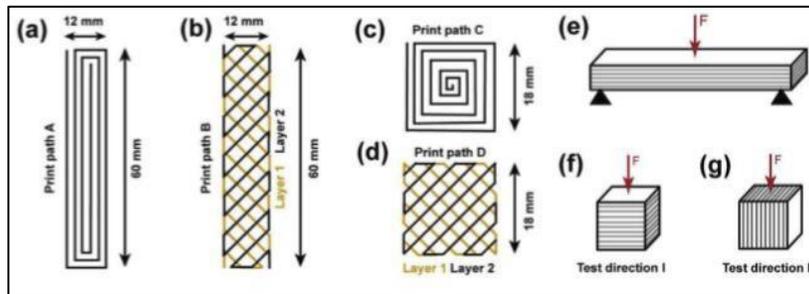
El tipo para imprimir concreto es el de extrusión basado en tecnología FDM, y esta implican los requerimientos para imprimir probetas de ensayo de concreto.

Se enlistará los principales detalles técnicos a considerar, en modo tal de poder replicar dichas plataformas de pruebas y repetir las metodologías experimentales. Se hace un especial énfasis en las características del extrusor.

- Las pruebas típicamente consisten en una inyección lineal de concreto, de un largo de 30 cm. Alternativamente, se realizan inyecciones de capas del mismo largo para el estudio de su resistencia bajo su propio peso, con una capacidad de impresión en altura de hasta 10 capas de 15 mm de espesor.
- Para el estudio de las propiedades mecánicas al orientar los filamentos de reforzamiento, se solicita la construcción de cubos y barras según las medidas y desplazamiento del extrusor como se indica en la figura 3.
- En consecuencia, para este tipo de experimentos, se solicita que la impresora pueda tener desplazamiento en los tres ejes, además de la capacidad de imprimir capas con un espesor de 1.5 mm y un diámetro de 2 mm en el extrusor.
- Los extrusores utilizados tienen un rango de desplazamiento lineal entre los 2 y los 7 [mm/s].

- La boquilla del extrusor posee un amplio rango de geometrías de paso, pueden ser de sección elíptica, o redondas. En general, los diámetros varían desde los 2 mm para el estudio del concreto donde se desea una orientación preferente de los filamentos de reforzamiento. Hasta los 9 mm de diámetro, los que podrían ser aún mayor (del orden de los 20 mm) para un experimento donde se prefiera mayor velocidad.
- La presión de inyección deseable se encuentra entre los 3 bar.

Figura 3. **Especificaciones de Impresión para una prueba de ensayo**



Fuente: Salazar (2018). *Diseño y construcción de un dispositivo extrusor de probetas para estudios de concretos aptos para la impresión 3D.*

1.4. Extrusión

La extrusión es un proceso de conformado que se utiliza para fabricar objetos con una sección transversal definida y fija. Al material de partida, generalmente una preforma cilíndrica, se le fuerza, aplicando una compresión sobre la preforma, a salir a través de un orificio con la forma de la sección transversal deseada. Así la geometría del orificio de salida queda grabada en toda la longitud del producto extruido.

Se puede decir que es un material sólido que sale por la boquilla de una jeringuilla o matriz que se va moviendo. Se podría decir que es una especie de inyección de un material.

La extrusión puede ser continua (produciendo teóricamente de forma indefinida materiales largos) o semi-continua (produciendo muchas partes). El proceso de extrusión puede hacerse con el material caliente o frío.

Hoy día el proceso de extrusión es muy utilizado para obtener piezas de gran longitud con una sección constante como pueden ser barras, perfiles y tubos.

Las principales ventajas del proceso de extrusión son:

- Capacidad para crear secciones transversales bastante complejas
- Se reducen los riesgos de fractura, debido a que el material solamente estará sometido a esfuerzos de compresión y de cizallamiento.
- No se derrocha material.
- El producto extruido adquiere generalmente una muy buena terminación superficial.

Desventajas:

- Quebradura de superficie cuando hay grietas en la superficie de extrusión. Esto se debe a la temperatura de extrusión, fricción, o velocidad muy alta.

Esto puede pasar también a bajas temperaturas, si el producto temporalmente se pega al troquel.

- Defecto de tubo - Se crea una estructura de flujo que arrastra los óxidos de la superficie y las impurezas al centro del producto. Tales patrones que son frecuentemente causados por altas fricciones o enfriamiento de la parte externa de la barra.
- El agrietamiento interior o defecto Chevron se produce cuando el centro de la expulsión desarrolla grietas o vacíos. Estas grietas son atribuidas fuerzas de tensión hidrostática en la línea central en la zona de deformación en el troquel. Aumenta al aumentar el ángulo de la matriz y la concentración de impurezas, y disminuye al aumentar la relación de extrusión y la fricción.

El equipamiento para la extrusión se distingue por estas características:

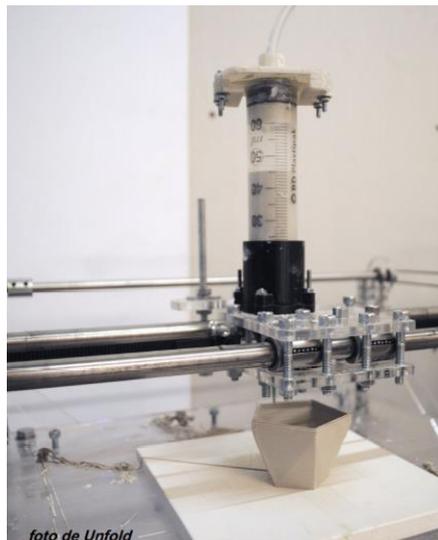
- Movimiento de la extrusión con relación al material que será sometido a extrusión. Si el troquel se sostiene de forma estacionaria y el material de partida se mueve hacia él, se trata de una "extrusión directa". Si el material de partida está estacionario y el troquel se mueve hacia el material de partida, se trata entonces de una "extrusión indirecta".
- La posición de la prensa ya sea vertical u horizontal.
- El tipo de manejo ya sea hidráulico o mecánico.
- El tipo de carga aplicada ya sea convencional (variable) o hidráulica.

Los materiales extruidos comúnmente incluyen metales, polímeros, cerámicas, hormigón y productos alimenticios. No obstante, se centrará en el proceso de extrusión para hormigón y cerámica únicamente.

1.4.1. Extrusión de pasta

Una extrusora de pasta es un tipo de extrusora que inyecta material en forma de pasta en lugar de fundir un filamento de plástico. Normalmente, se trata de un proceso en frío en el que el objeto impreso se solidifica mediante el secado al aire. Ejemplos de materiales de pasta, incluyen arcilla cerámica, silicona, resinas, plastilina, masa para galletas, biomaterial, azúcar glas, entre otros. Incluso se puede imprimir chocolate o cera con una extrusora moderadamente calentada.

Figura 4. Extrusora de pasta en impresión 3D



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

1.4.1.1. Tipos de extrusoras consideradas para extrudir pastas

En todo proceso de extrusión se debe suministrar una presión suficiente al material fundido para hacerlo pasar por la boquilla: este es el principio fundamental, los tipos de extrusoras han ido evolucionando a través del tiempo empezando con extrusoras de desplazamiento positivo en las que la acción del transporte es efectuada ya sea por un sistema de pistones donde la presión es suministrada por energía mecánica o hidráulica, o por un sistema de bombas de engranajes; éstas obligan a pasar una solución de baja viscosidad a través de hileras para la obtención de fibras artificiales y monofilamentos.

Las desventajas de los anteriores sistemas nombrados, señalan que el proceso se vuelve fundamentalmente discontinuo y que el poco suministro de calor podría generar esfuerzos de corte en el seno del material respectivamente.

En otra categoría se encuentran las extrusoras de fricción viscosa. En éstas la acción del transporte se consigue aprovechando las propiedades físicas del polímero y la fricción generada entre éste y las paredes de la máquina. En estas extrusoras se genera un trabajo mecánico sobre el polímero debido a los esfuerzos de cizallamiento que se provocan en el material pastoso y de elevada viscosidad, transformándose en calor por la fricción en el seno del propio polímero.

Se encuentran en esta categoría las extrusoras de rodillo, utilizadas en la transformación de cauchos en la actualidad. De manera sencilla, se trata de dos rodillos en juego, y estos tienen adaptada una caja donde la salida es la boquilla, éstos son alimentados desde la parte superior. Las extrusoras de tambor rotatorio consisten fundamentalmente en un tambor que rota y está rodeado por una

carcasa inmóvil que es calentada o enfriada para controlar la temperatura; entre el tambor y el cuerpo queda una pequeña holgura en la que el polímero fluye. Igualmente, se encuentran componiendo esta categoría las extrusoras de tornillo sin fin.

1.4.1.2. Extrusoras de desplazamiento positivo

Entre las extrusoras de desplazamiento positivo a considerar en este trabajo se encuentran las que tienen acción de transporte por sistema de pistones y presión suministrada por energía mecánica o hidráulica comúnmente conocidas como alternativas del tipo jeringa en el campo de la impresión 3D de cerámica, en ellas su extrusión se clasifica en:

- Extrusión directa
- Extrusión indirecta
- Extrusión lateral

A este grupo pertenecen no solo las alternativas, si no las rotativas llamadas roto-estáticas porque son rotativas, pero en ellas la dinámica de la corriente no juega un papel esencial en la transmisión de la energía, son de contraflujo, su funcionamiento se basa en el principio de desplazamiento positivo, entre este tipo de máquinas se encuentran las extrusoras de fricción viscosa este tipo de extrusoras son las seleccionadas para trabajar en este proyecto, por lo que se mencionan ampliamente estos tipos de extrusoras en la sección (4.1.2), estas son:

- Extrusora de tornillo sin fin o de Arquímedes
- Extrusora de cavidades progresivas o de tornillo Moienau

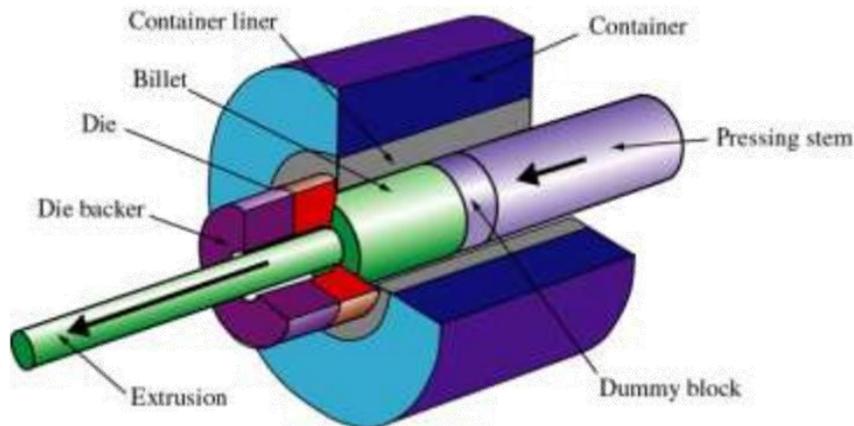
1.4.1.2.1. Extrusión directa

La preforma es presionada por un pistón que la fuerza a deformarse para salir a través de la matriz de extrusión. En la extrusión directa, la salida del material y el movimiento del pistón van en la misma dirección.

Es el tipo de extrusión más fácil de implementar, pero requiere grandes presiones dado el rozamiento entre la preforma y la cámara.

Dicho rozamiento disminuye a medida que va saliendo el material porque es menor la superficie de contacto entre la preforma y el contenedor. Lo más simple para disminuir las presiones requeridas será lubricar la cámara.

Figura 5. **Extrusión directa**



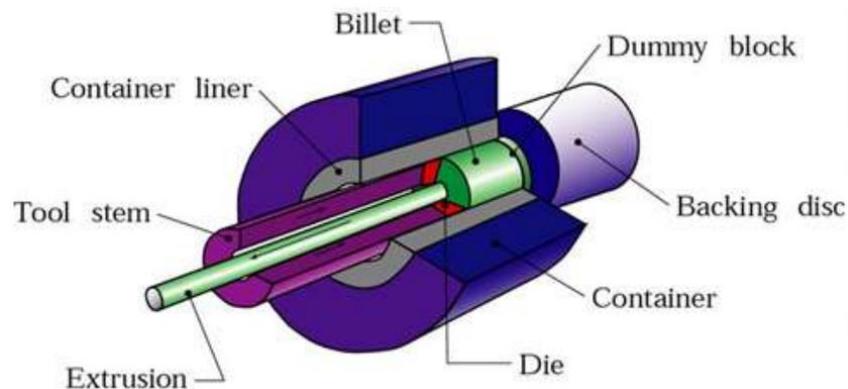
Fuente: Pacheco (2017). *Diseño y construcción de una extrusora lateral y obtención de fuerza*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91076/fichero/Dise%C3%B1o+y+construcci%C3%B3n+de+una+extrusora+lateral.pdf>.

1.4.1.2.2. **Extrusión indirecta**

En este caso el pistón es la propia matriz de extrusión. Cuando se extruden piezas de sección llena, el vástago que empuja a la matriz contra la preforma es hueco para que la pieza salga por dentro del mismo. Si las piezas son huecas el vástago queda por dentro de la pieza.

No hay movimiento relativo entre el material y el contenedor, por lo que no existe fricción entre ambos. Sin embargo, aunque las presiones para extrudir inversamente no son tan grandes, el pistón no puede ser tampoco tan robusto como en la extrusión directa, lo que hace que no se puedan desarrollar fuerzas tan grandes como en la extrusión directa.

Figura 6. **Extrusión indirecta**

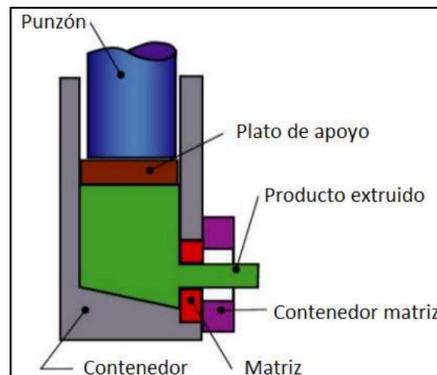


Fuente: Pacheco. (2017). Diseño y construcción de una extrusora lateral y obtención de fuerza. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91076/fichero/Dise%C3%B1o+y+construcci%C3%B3n+de+una+extrusora+lateral.pdf>.

1.4.1.2.3. **Extrusión lateral**

Se trata de una variante de la extrusión directa. La preforma se aloja en un contenedor y un pistón la empuja para forzarla a salir a través de la matriz, la diferencia radica en que la dirección de salida del producto extruido y la dirección del movimiento del pistón son perpendiculares.

Figura 7. **Extrusión lateral**



Fuente: Pacheco. (2017). *Diseño y construcción de una extrusora lateral y obtención de fuerza*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91076/fichero/Dise%C3%B1o+y+construcci%C3%B3n+de+una+extrusora+lateral.pdf>.

1.4.1.3. **Extrusoras de fricción viscosa**

Este tipo de extrusoras son las más recomendadas para extrudir o imprimir materiales de alta viscosidad como lo es la arcilla, hormigón y concreto, material enfocado a imprimir en este trabajo. Este es el tipo de extrusión seleccionado después de estudiar cada uno de los distintos tipos de extrusión, es el más adecuado para adaptar a la impresora debido a las ventajas que posee, por lo cual se mencionara detalladamente este tipo de mecanismo.

En esta categoría se encuentra la extrusora de tornillo sin fin, con las que se trabajó el diseño.

A con continuación se hará mención sobre máquinas de fluidos ya que es su concepto general, este tipo de extrusoras se encuentra en la categoría de bombas para líquidos, y son denominadas como generadoras dentro de los tipos de máquinas de desplazamiento positivo que son del tipo de máquinas hidráulicas y éstas forman parte de la gran variedad de máquinas de fluidos.

1.5. Máquinas hidráulicas

Las máquinas hidráulicas pertenecen a un grupo muy importante de máquinas que se llaman máquinas de fluido. Aunque rara es la máquina en que no intervienen varios fluidos como refrigerantes, lubricantes, entre otros. Eso solo no es suficiente para incluir dicha máquina en el grupo de máquinas de fluido.

1.5.1. Definición

Una máquina absorbe energía de una clase y restituye energía de otra clase (un motor eléctrico, por ejemplo, absorbe energía eléctrica y restituye energía mecánica) o de la misma clase pero transformada.

Máquinas de fluido son aquellas máquinas en que el fluido absorbe energía de una máquina o bien proporciona la energía a la máquina (por ejemplo, el agua que se suministra a una turbina posee una energía preferentemente de presión, proveniente de la energía geodésica que poseía en el embalse y que a su vez la turbina transforma en energía mecánica) o bien aquella en que el fluido es el receptor de energía, al que la máquina restituye la energía mecánica absorbida como en el caso de las extrusoras o bombas hidráulicas.

En toda máquina de fluido hay un intercambio entre energía de fluido y energía mecánica (por ejemplo en este caso, el concreto u hormigón sale de la bomba de extrusión con mas presión que la que tenía a la entrada de la misma, porque la bomba a restituido al concreto la energía mecánica absorbida en el eje).

Las bombas que bombean líquidos distintos de agua (gasolina, ácidos, pastas, lodos, entre otros), también son máquinas hidráulicas. Aunque el líquido bombeado esté caliente la máquina no es una máquina térmica, sino que seguirá siendo hidráulica.

Aunque el nombre de máquina hidráulica, según lo dicho, no sea apropiado, la clasificación misma de las máquinas de fluido en máquinas hidráulicas y térmicas es rigurosa y científica.

Máquina hidráulica es aquella en que el fluido que intercambia su energía, no varía sensiblemente de densidad en su paso a través de la máquina, por lo cual en el diseño y estudio de la misma se hace la hipótesis de que $\rho = \text{cte}$.

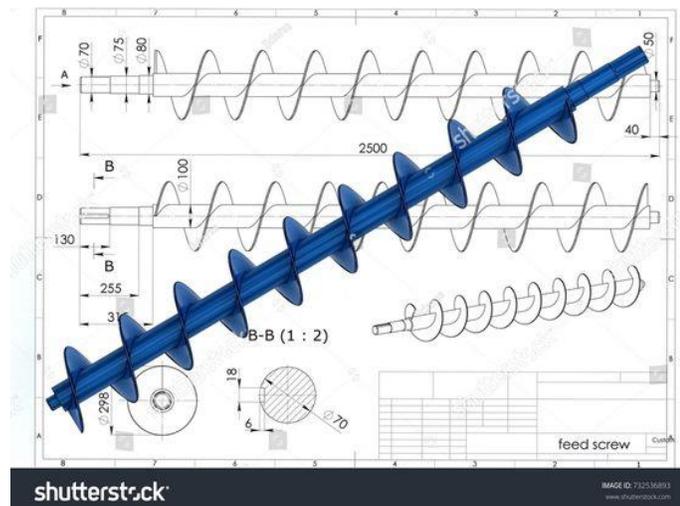
La compresibilidad e incompresibilidad del fluido que se traduce en la variación o invariancia de la densidad o volumen específico es fundamental en el diseño de la máquina.

Todo cuerpo sólido, líquido o gas es compresible, sin embargo, el diseño de una bomba, por ejemplo, se hace suponiendo que el líquido bombeado es incompresible o de densidad constante: la bomba es pues una máquina hidráulica.

1.5.2. Clasificación de las máquinas hidráulicas

Para clasificar las máquinas hidráulicas se atiende al órgano principal de la máquina, o sea al órgano al que se intercambia la energía mecánica en energía de fluido o viceversa. Este órgano, según los casos, se llama rodete, émbolo, entre otros, (en el extrusor diseñado en este proyecto, por ejemplo, el órgano principal llamado rodete es el tornillo de Arquímedes), (fig. 8).

Figura 8. **Rodete, tornillo de Arquímedes**



Fuente: Pinterest (2022). *3d illustration archimedes screw above engineering stock illustration* 732536893. Consultado el 21 de marzo de 2023. Recuperado de <https://www.pinterest.com/pin/1066086543017518911/>.

Figura 9. **Rodete, tornillo de Moineau**



Fuente: Pinterest (2022). *3d illustration archimedes screw above engineering stock illustration* 732536893. Consultado el 21 de marzo de 2023. Recuperado de <https://www.pinterest.com/pin/1066086543017518911/>.

Ahora bien, la clasificación de las máquinas hidráulicas en rotativas y alternativas, según que el órgano intercambiador de energía esté provisto de movimiento de rotación o de movimiento alternativo tiene la ventaja de ser muy clara; pero se suele preferir la que considera 2 grupos también.

Esta clasificación tiene la ventaja que no se basa en algo accidental, como es el tipo del movimiento del émbolo o rodete, sino en el principio fundamental de funcionamiento, que es distinto en los 2 grupos.

Las máquinas hidráulicas se clasifican en turbo-máquinas y máquinas de desplazamiento positivo.

En este trabajo se aplicó el principio de funcionamiento de las máquinas de desplazamiento positivo, para ponerlo a prueba, también llamadas máquinas volumétricas, el órgano intercambiador de energía, cede energía al fluido o el fluido a él, en forma de energía de presión creada por la variación de volumen.

Los cambios en la dirección y valor absoluto de la velocidad del fluido no juegan papel esencial alguno, a comparación de las turbo-máquinas,

denominadas también máquinas de corriente, los cambios en la dirección y valor absoluto de la velocidad del fluido juegan un papel esencial

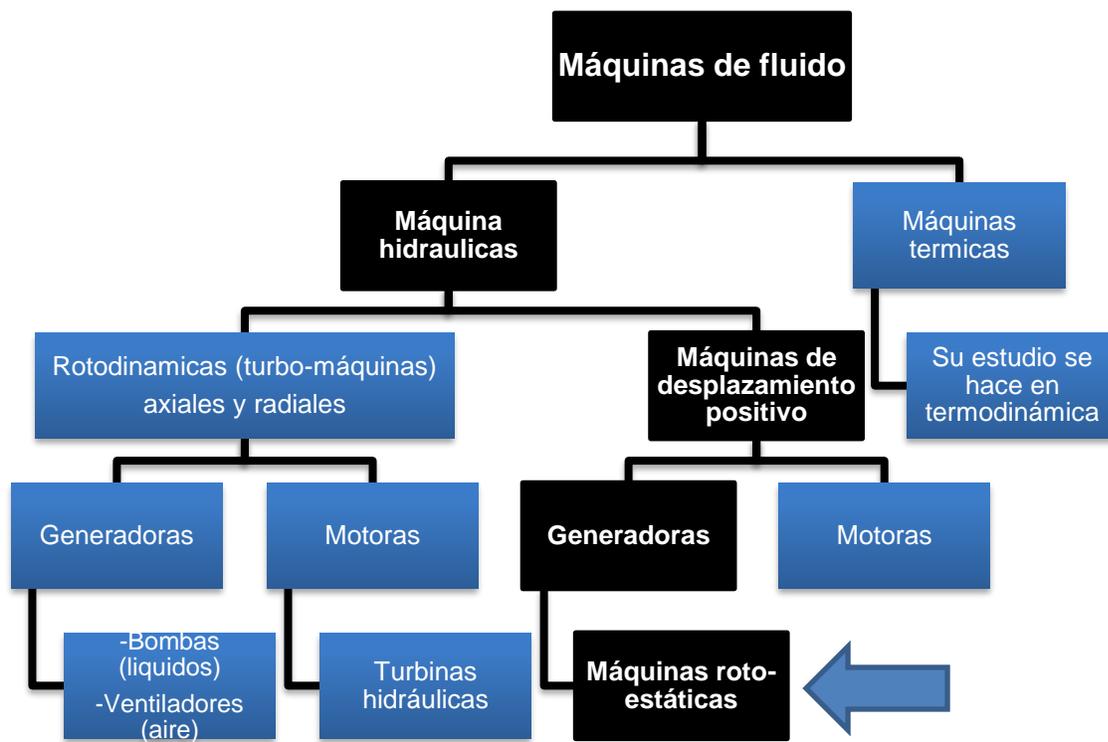
Al grupo de máquinas de desplazamiento positivo pertenece la clase importante de las máquinas alternativas o de émbolo; pero éstas no son las únicas. Así como en las turbo-máquinas el órgano transmisor de la energía (rodete), se mueve siempre con movimiento rotativo, en las máquinas de desplazamiento positivo el órgano transmisor de la energía puede moverse tanto con movimiento alternativo como con movimiento rotativo.

Al grupo de máquinas de desplazamiento positivo pertenece la clase importante de las máquinas empleadas en las transmisiones, controles hidráulicos y neumáticos.

Las turbo-máquinas y máquinas de desplazamiento positivo se subdividen en motoras y generadoras. Las primeras absorben energía del fluido y restituyen energía mecánica, mientras que las segundas absorben energía mecánica y restituyen energía al fluido como es el caso del extrusor diseñado en este trabajo.

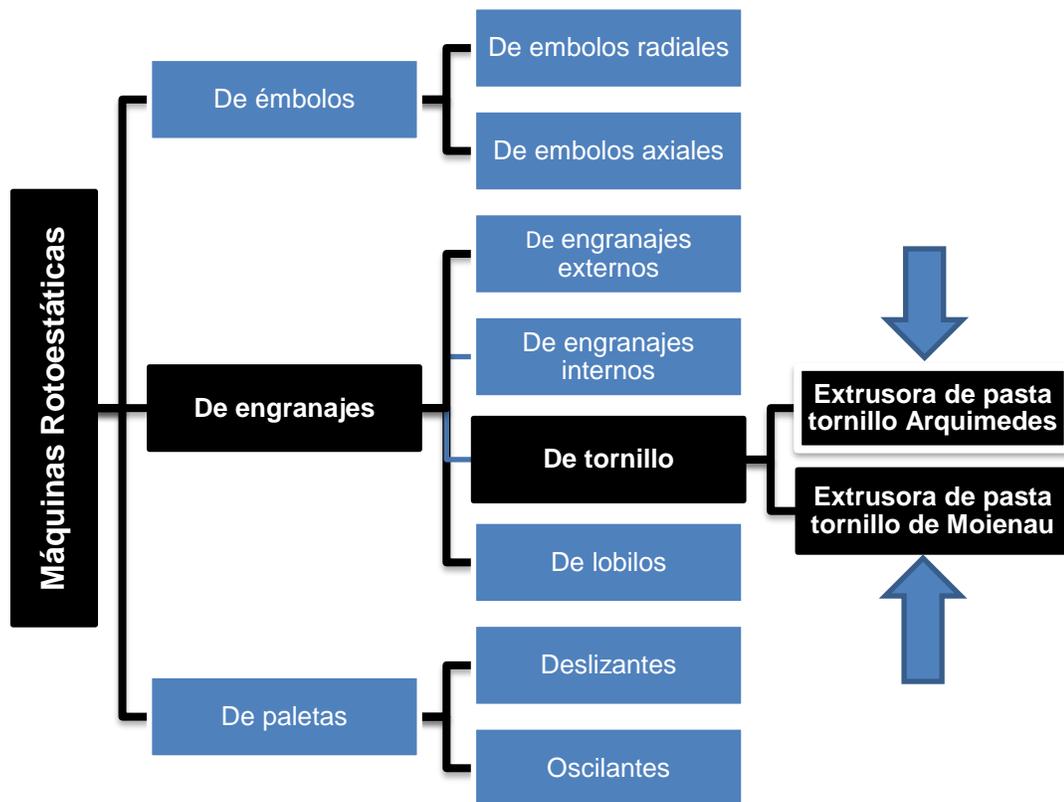
Se describe adelante detalladamente el principio de funcionamiento de las máquinas de desplazamiento positivo, que es el principio de funcionamiento de estas máquinas.

Figura 10. **Clasificación de las máquinas hidráulicas roto-estáticas**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Figura 11. Clasificación de bomba extrusora de tornillo para pastas



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

1.6. Tipos de extrusoras de pasta de alta viscosidad investigadas en laboratorio de UNFOLD para poder adaptar a impresoras 3D

Se inició la investigación en el laboratorio de CETEC, con extrusión mediante mecanismos de máquinas de desplazamiento positivo de tipo alternativo (roto-estática de émbolo) como bomba de jeringa, persiguiendo la idea de imprimir concreto en 3D mediante la extrusión de pequeñas bobinas de concreto, un proceso muy similar a una técnica artesanal tradicional llamada enrollado.

1.6.1. Definición

Es una forma de producción artesanal semi-industrial que proyecta hacia el futuro la historia pasada de las técnicas tradicionales. Debido a su capacidad para producir capas muy finas, y así son posibles nuevas formas.

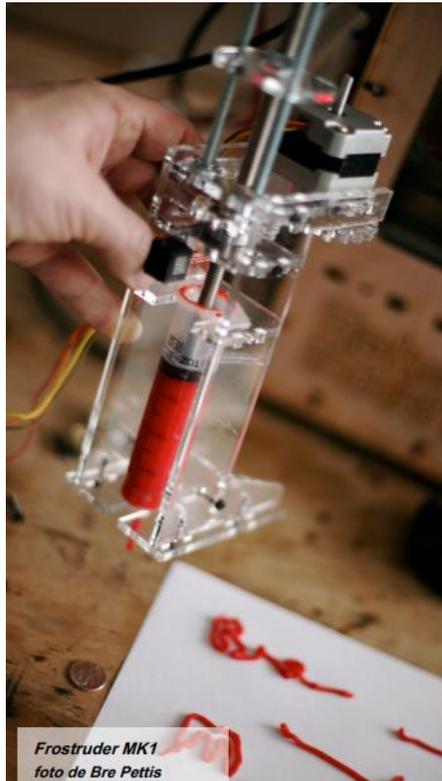
1.6.2. Tipos de extrusoras de pasta existentes

Los tipos de extrusoras de pasta investigadas y desarrolladas por el estudio de diseño de Unfold que dio a conocer en la revista Rep Rap, donde se repasan los principios fundamentales con sus pro y contras, además se muestran ejemplos de cada tipo que se tomó en cuenta para la selección del tipo de máquina extrusora a diseñar en este trabajo.

1.6.2.1. Bomba de jeringa accionada por pasos

Como su nombre lo indica, una bomba de jeringa accionada por pasos (SDSP) utiliza un motor eléctrico para empujar un émbolo por el cañón de la jeringa. Esto a veces se denomina *Direct Drive*. hay varias opciones. La Herramienta de jeringa Fab @ Home Modelo 1 utiliza un costoso paso a paso lineal. Otros modelos actuales usan el paso a paso rotacional más estándar, con algunas mecánicas adicionales como un tren de engranajes. Los primeros ejemplos de este enfoque incluyen la herramienta de jeringa Fab @ Home Model 2, la bomba de jeringa mencionada anteriormente de Adrian Bowyer, el Frostruder MK1 de Zach Hoeken y la herramienta de jeringa de Viktor (VMX). Más recientemente, está la extrusora de pasta de David y la extrusora de pasta universal de RichRap.

Figura 12. **Frostruder MK1 de Zach Hoeken**

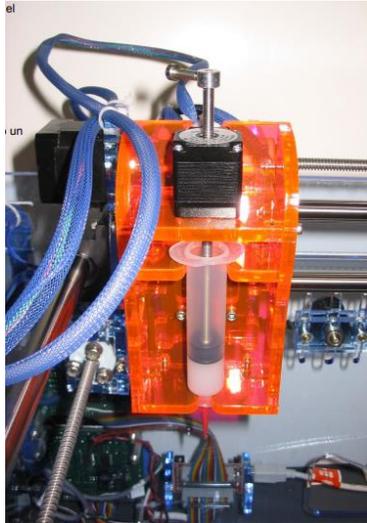


Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

El concepto es bastante simple, como vaciar una jeringa. Se empuja el émbolo hacia abajo con un motor. Esta simplicidad probablemente explica la popularidad de este enfoque. La simplicidad bruta tiene algunos beneficios, pero también hay algunos inconvenientes importantes. El primer inconveniente de los diseños de jeringas es que la extrusora se vuelve muy voluminosa. La altura total de la extrusora debe ser al menos el doble de la longitud de la jeringa para dejar espacio para el émbolo extendido, luego agregar aún más para la mecánica. Una jeringa de 60 cc con el émbolo extendido mide 30 cm de largo.

Al agregar las brocas de impulsión adicionales y la boquilla, la extrusora puede llegar fácilmente a tener 40 cm de altura.

Figura 13. **Extrusora de Jeringa fab home modelo 1**

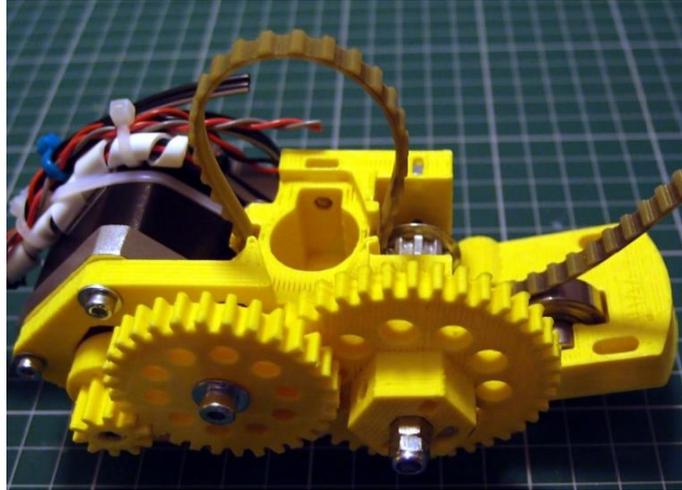


Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

Se utilizaron varios enfoques para adelgazar el diseño. Por ejemplo, la extrusora de pasta universal de RichRap coloca una correa sobre el émbolo con un motor paso a paso con engranajes. Desafortunadamente, su pequeña jeringa de 10 cc es apenas suficiente para imprimir una galleta. Bonsai- Brain ha producido una versión de 20 cc, pero para usar sus propias palabras: ¡La construcción es bastante monstruosa! Requiere tanto torque que se necesita una cuarta marcha. Pero la capacidad de la jeringa es un factor importante. 60 cc es uno de los volúmenes de jeringa estándar más grandes, pero se necesitan 40 cc de arcilla cerámica solo para imprimir una taza de café pequeña. Cualquier cosa más grande requiere una jeringa de mayor capacidad o varias jeringas, es decir, una extrusora mucho más grande y compleja.

Se podría intentar cambiar las jeringas en mitad de la impresión o sacar la jeringa del extrusor por diseño, pero esa no es la solución más viable.

Figura 14. **Extrusora de pasta Rich Rap**



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

Otro problema molesto es que los diseños de jeringas varían mucho según el fabricante. Cualquier diseño que dependa de una jeringa específica probablemente no funcionará con otros tamaños o marcas.

Algunos diseñadores han propuesto usar algo como el enfoque Bowden (primero popularizado por Ultimaker), en el que el filamento se empuja hacia abajo por un tubo de PTFE largo. Siguiendo este enfoque, se sumerge pasta o arcilla en un tubo y se alimenta a la boquilla del cabezal de impresión. Esto permite que la extrusora se monte a un lado, lo que reduce el peso y la complejidad del carro de la boquilla, pero agrega algo de fricción y, por lo tanto, requiere más torque. Sin embargo, con este enfoque, teóricamente es posible utilizar jeringas del tamaño de un cartucho de pistola de calafateo de 310 cc.

Otro inconveniente del diseño de la bomba de jeringa es que realmente no es una buena idea controlar la extrusión empujando todo el volumen de material desde atrás. Este enfoque puede funcionar bien en una jeringa pequeña de 10 cc, pero se vuelve difícil de manejar cuando se intenta escalar hasta 100 cc y más. Esto es similar a empujar todo el rollo de filamento desde el extremo del rollo en lugar de alimentarlo desde la extrusora.

A medida que se escalan a jeringas más grandes, el diámetro del émbolo se hace más grande y se vuelve mucho más difícil extrudir pequeñas cantidades con precisión. Por cada milímetro de recorrido lineal del émbolo, una duplicación del diámetro del émbolo resulta en cuatro veces más cantidad de material extruido o un aumento cuadrático, por lo que las imperfecciones en el mecanismo de accionamiento se multiplican notablemente. Esto también aumenta el tiempo de inicio y finalización.

Se necesita una fuerza considerable para empujar la pasta a través de una jeringa, y cuanto más viscosa es la pasta, más fuerza requiere. Con el filamento puede usar más calor para reducir la viscosidad, pero no se puede hacer esto con pasta. La pasta debe tener suficiente viscosidad a temperatura ambiente para ser estable para un objeto impreso. Dado que tarda más en configurarse, debe poder mantener su forma y no colapsar por su propio peso. Esto es especialmente importante al imprimir objetos más altos. Se experimentó frecuentes fallas mecánicas al probar la extrusora de pasta RichRap con arcilla de metal precioso (un material ideal para la jeringa pequeña), y el propio diseño de 60 cc, que es comparable al Frostruder MK1. Los engranajes se aflojaron, los steppers perdieron pasos, las correas se rompieron y los retenedores de jeringas fallaron bajo presión.

Hay algo positivo que decir sobre la bomba de jeringa accionada por pasos. ¡Actualmente, sí! Ante todo, una bomba de jeringa es perfectamente volumétrica, una característica vital de cualquier diseño de extrusora de pasta.

Volumétrico significa que una cantidad específica de rotaciones del motor conduce a una cantidad predecible y repetible de material extruido. Al igual que en una extrusora de filamentos, puede calcular fácilmente la cantidad de material extruido por paso y controlar su extrusión bastante bien. El uso de un paso a paso en el diseño significa que tiene total compatibilidad con la electrónica y el software existentes. RichRap Universal Paste Extruder es una excelente manera de comenzar con la extrusión de pasta y realizar pequeñas pruebas con varios materiales. Pero como se ha descubierto en las pruebas, para cualquier impresión seria de piezas múltiples o más grandes, se deben buscar un enfoque diferente.

Una forma potencial de mejorar la bomba de jeringa (que nadie ha implementado hasta donde se sabe), es usar una cámara permanente bastante pequeña con un émbolo (como una jeringa), quizás de 5 a 10 cc de volumen, que pueda ser rápidamente relleno, por un lado. Una vez que el émbolo ha empujado todo el material fuera de la cámara, la impresión se detiene, la boquilla se mueve fuera de la impresión, el émbolo se retrae, la cámara se llena desde un recipiente presurizado de gran capacidad y finalmente hace una pequeña extrusión inicial antes de reanudar.

Una válvula en la línea de alimentación cambiaría entre extrusión y relleno. Con algo de inteligencia y dos pistones alternos, incluso podría imprimir de forma continua. Tal enfoque podría mantener el principio volumétrico sencillo mientras se mantiene el tamaño del cabezal de impresión pequeño y la precisión de control alta.

Figura 15. **Dispensador de pasta VDX2**



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

1.6.2.2. Extrusora de presión de aire directo

La extrusora de presión de aire directo (llamada DAPE), es casi exactamente lo contrario de la bomba de jeringa accionada por pasos. En lugar de utilizar un método mecánico para empujar un émbolo, DAPE aplica presión de aire directamente al material. Este diseño de extrusora es radicalmente más sencillo y ligero que el método descrito anteriormente. La parte superior de la jeringa está sellada con una tapa de presión que se conecta mediante un tubo estrecho a un compresor de aire. Luego, el flujo de aire se controla mediante una válvula solenoide (una válvula de fluido o gas controlada por un electroimán), para iniciar y detener la presión.

Con este método, la extrusión se puede iniciar y detener casi instantáneamente. Si bien el diseño de la extrusora es liviano y simple, requiere un suministro de aire comprimido. Lamentablemente, la mayoría de las casas no

están equipadas con presión de aire central, por lo que es necesario colocar un compresor de aire junto a la máquina.

Este enfoque fue propuesto por primera vez por Zach Hoeken para Makerbot Frostruder MK2 y, con toda justicia, Adrian Bowyer diseñó una extrusora de pasta muy cruda que utiliza un globo lleno de material en un PET (botella presurizada con una bomba de bicicleta). Así que ese es el principal beneficio, un extrusor simple y delgado.

Figura 16. **Extrusora de soporte RepRap 1.0**



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

En Unfold se usa DAPE debido a su simplicidad relativamente sencilla. Diseñaron un par de iteraciones del extrusor para los Bits de Bytes “Rapman” que se hizo muy popular entre los experimentadores de extrusión de pasta debido a

que el diseño original se limita al movimiento Z. el diseño hecho por Unfold es llamado Claystruder.

Como era de esperar, las DAPE tienden a tener un desempeño muy deficiente en la capacidad de control y previsibilidad del proceso de extrusión, y en su compatibilidad con la electrónica RepRap y el software de corte. El primer problema presenta muchas variables involucradas en la obtención de un caudal predecible y repetible. Las variables más obvias son la presión del aire y la viscosidad del material, que se combinan para producir un cierto caudal.

Luego debe considerar la fricción del émbolo, el nivel cambiante del material en la jeringa, entre otros.

Tasa de flujo= Viscosidad del material + presión de aire

Por lo tanto, si la viscosidad del material cambia solo ligeramente, se debe compensar aumentando o disminuyendo la presión para mantener un flujo constante. Una entrada estática de presión de aire proporciona una amplia gama de caudales dependiendo del material. Se compara con la velocidad estática de la extrusora accionada por pasos que, independientemente del tipo o viscosidad de la pasta, proporciona un caudal predecible y continuo.

Se consideran muchas ideas para abordar este caótico sistema. El firmware podría actualizarse para trabajar con los parámetros de los sistemas de presión de aire y compensar algunos efectos conocidos. Pero esto puede requerir reemplazar las jeringas con cada impresión sucesiva porque un émbolo actúa de manera diferente en una jeringa usada y, en general, la consistencia nunca será exactamente la misma en cada impresión y durante todo el proceso.

Una posible solución es crear un circuito de control cerrado, con una válvula de presión regulada electrónicamente que supervise el flujo en la boquilla y ajuste la presión para lograr el caudal deseado. Los componentes necesarios para hacer esto no son las piezas más baratas disponibles.

Alternativamente, podría ajustar la velocidad de impresión dinámicamente basándose en la tasa de flujo dentro de un cierto rango "viable", no demasiado rápido / lento.

Desafortunadamente, aún no se han encontrado formas económicas de medir el caudal de un material de alta viscosidad que no obstruya el flujo. La mayoría que imprime cerámica de forma activa usa el extrusor de aire directo muy simple, pero dado que la impresora no tiene forma de saber cuánto sale de la boquilla en un momento dado, se deben cuidar las máquinas y ajustar la presión de aire según corresponda. La atención al proceso hace que esto sea más artesanal que la impresión 3D.

La incompatibilidad con nuevos y emocionantes dispositivos electrónicos, firmware y rebanadores también es un problema existente con las DAPE. No hay paso a paso para controlar, solo válvulas electrónicas y potencialmente válvulas de presión digitales y sensores de flujo. Pero eso no importa, porque el control físico del extrusor para detener y comenzar la presión de aire es muy poco confiable de todos modos. Cada vez que se despresuriza la jeringa y se vuelve rápidamente a la "misma" presión, es probable que el caudal sea diferente, por lo que la repetitividad es baja. Una solución sería mantener un nivel de presión constante y estrangular el flujo de material en la boquilla. Hay varias válvulas industriales que hacen precisamente esto, y éstas podrían ser fáciles de replicar. La herramienta de válvula de F @ H hace esto usando una válvula estándar entre

la jeringa y la boquilla. El antiguo RepRap Support Extruder 1.0 utiliza un método similar.

La mayoría de las personas que usan DAPE (principalmente para cerámica) han dejado de usar válvulas electrónicas por completo y han diseñado en torno al problema objetos que se pueden imprimir en una acción continua sin la necesidad que la extrusora salte de un lugar a otro. La presión se conecta al comienzo de la impresión y se libera al final, de nuevo un enfoque muy práctico. Al igual que con la bomba de jeringa accionada por pasos, los DAPE son una excelente manera de comenzar a explorar la extrusión de pasta, especialmente para imprimir cerámica y otros materiales de gran volumen, controlando manualmente el proceso de extrusión.

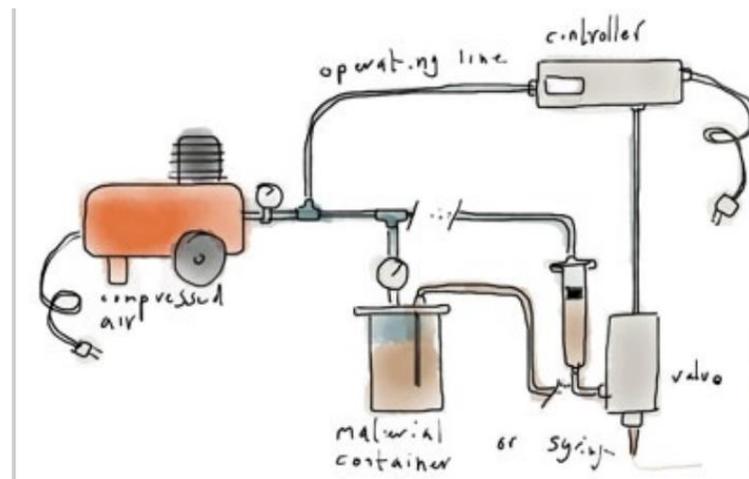
1.6.2.3. Extrusoras de desplazamiento positivo

Entonces, la clave aquí en la definición es la parte de atrapar una cantidad fija. Cada rotación del mecanismo de la bomba atrapa un volumen específico de material y lo envía a la salida de la bomba, la boquilla. Si un motor paso a paso impulsa ésto, se tiene un sistema en el que se sabe que X cantidad de pasos del motor resulta en Y cantidad de volumen extruido. Al colocar la bomba lo más cerca posible de la boquilla, dejando que 'tire' del material de una línea de alimentación exactamente de la misma manera, que la extrusora de filamentos tira del filamento justo antes de la boquilla.

La única diferencia es que no tenga un buen rollo de filamento, Entonces existe la necesidad de un depósito externo. En el caso de un fluido que gotea como un chocolate fundido, se podría usar un sistema de alimentación por gravedad (el material fluye en la bomba por gravedad cuando el depósito está por encima de la extrusora) pero la mayoría de las veces se necesitara presurizar

el depósito. La forma más sencilla es mediante presión de aire. Se aplica presión más que suficiente para conseguir que el material se alimente a la extrusora, que tomará el relevo desde allí y controlará el caudal.

Figura 17. **Sistema de extrusor de desplazamiento positivo**



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

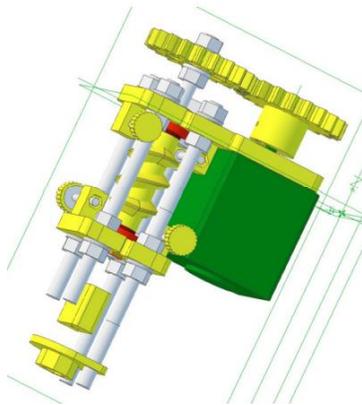
A continuación, un par de principios de bombas de desplazamiento positivo que a menudo se sugieren para un extrusor de pasta.

La bomba peristáltica es un tipo de bomba donde el medio bombeado viaja a través de un tubo y nunca entra en contacto con el mecanismo de la bomba. La bomba consta de un conjunto de rodillos que aprietan el tubo y empujan el medio hacia adelante. Muestra mucha pulsación en la salida en cada punto de contacto entre el rodillo y el tubo. Esto se puede solucionar teniendo varios tubos con ruedas alternas.

Ioan Festeu diseñó una extrusora peristáltica muy elegante y compacta con líneas de alimentación de dos canales.

Desafortunadamente, no se logró que funcionará con pastas más espesas y la literatura le dirá que la bomba peristáltica solo es adecuada para fluidos de baja viscosidad y que también tiene otros problemas.

Figura 18. **Extrusora de pasta Ioan Festeu 2**



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

Otro sistema es la bomba de engranajes, que se encuentra comúnmente como bomba de aceite. Dos engranajes de bloqueo giran en una carcasa sellada y el fluido se bombea en el exterior de los engranajes. Si bien esto podría funcionar bien para ciertos materiales auto lubricantes (como el aceite, ¿pero también puede ser chocolate?), Es terrible cuando se trata de dispensar una arcilla cerámica que está llena de partículas abrasivas, que se introducen fácilmente entre las grandes áreas de contacto, entre las partes estáticas y móviles.

Uno de los sistemas que llamó la atención durante la investigación fue la bomba de tornillo sinfín, una extrusora de tornillo de Arquímedes, que se utiliza a

menudo para dispensar pequeñas dosis de pasta de soldadura en líneas de montaje de PCB.

Se anuncia como capaz de dispensar materiales de alta viscosidad, abrasivos y rellenos de partículas con un control ultra-preciso.

Las bombas de tornillo sinfín funcionan así: el material se alimenta desde un depósito externo presurizado continuamente a la parte superior de la bomba. La bomba consta de un tornillo sinfín que encaja perfectamente en una carcasa cilíndrica que en la parte inferior termina en la boquilla. La presión sobre la jeringa es suficiente para alimentar el material en la bomba donde golpeará la parte superior del sinfín y se detiene allí debido a la mayor fricción causada por el tamaño más estrecho de la ruta del fluido; a lo largo de la rosca del tornillo y finalmente en el extremo de la boquilla aún más estrecho. El tornillo es accionado por un motor y esta rotación empuja el material hacia abajo por la rosca del tornillo, creando una diferencia de presión y el material fluye fuera de la boquilla.

El autor de esta investigación diseñó una primera extrusora utilizando este principio, apodada Claystruder 2, Extrusora de pasta de barrena que se basa en una pequeña extrusora de barrena de plástico desechable de 25 € de un sistema de dispensación industrial. Las primeras pruebas con arcilla fueron fantásticas, esto era exactamente lo que se necesitaba. Se comportó de manera muy parecida a la extrusora de filamentos de plástico estándar. Encender el paso a paso dio como resultado un flujo inmediato de arcilla, proporcional a la velocidad. Detener el paso a paso resultó en una parada inmediata y ningún material pasó por la barrena desde la jeringa continuamente presurizada.

Se realizó una prueba inicial con arcilla, chocolate y puré de papas y todos parecían prometedores. Pero después de algunas pruebas más extensas con

arcilla de porcelana, el sistema se volvió cada vez menos confiable y comenzaron a ocurrir síntomas extraños: el caudal se volvió poco confiable durante una impresión y fue necesario un ajuste, el material se filtró más allá del sinfín cuando el motor no estaba girando. Una inspección más cercana de la barrena confirmó la sospecha de que las barrenas de plástico delrin estaban siendo desgastadas, por el material cerámico y esto sucedió después de unos minutos. Por 125 € se puede conseguir una versión de acero del sinfín, pero aun así la carcasa se degrada rápidamente.

Figura 19. **Extrusora claystruder 2**



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

Incluso con más presupuesto se podría comprar un paquete completo de acero inoxidable 'desechable' o incluso uno de cerámica, pero esos tienen el precio de venta promedio de un kit Mendel. Además, todos parecen estar orientados a la dispensación de pequeños volúmenes de material y no a la

extrusión continua en las cantidades que se necesita, están sub-dimensionados y por lo tanto, superan sus límites.

Hubo otra observación que estaba en contra de lo que se necesita en una extrusora de pasta predecible y confiable.

Se realizó un par de pruebas para observar qué sucede cuando se cambia la presión de aire en la jeringa, que alimenta el material en la barrena y, obviamente, por debajo de cierto punto, la presión bajaría demasiado para alimentar la barrena, pero por encima de ese punto, la salida de un sinfín giratorio de velocidad fija, variaría en relación con la presión de entrada. Definitivamente no tanto como en una extrusora de presión de aire directo, pero aun así es más que suficiente.

Lo que esto significa, un cambio en la viscosidad del material, aún resultaría en una tasa de flujo cambiante en la boquilla. En la primavera de 2013, un estudiante de ingeniería acampó un par de meses en Unfold para trabajar en su tesis de maestría sobre extrusoras de pasta, y quería volver a mirar dentro del sinfín. existían dos razones para que él siguiera adelante: la barrena es el sistema de extrusión más comúnmente utilizado en la industria y su profesor lo obligó a hacerlo. El objetivo principal era sobredimensionar los sinfines para este propósito, de modo que el desgaste se redujera al mínimo, incluso con las piezas impresas en plástico. Los sinfines eran factores más grandes que los desechables y podían girar a velocidades mucho más bajas.

Comenzó usando brocas como primera prueba, algo que un equipo de la Universidad Bauhaus de Weimar también probó hace algún tiempo, pero ambas sin mucho éxito. La rosca de una broca es empinada para una extrusora, el material fluye a través de ella por aire-presión.

Se construyeron alrededor de dos docenas de prototipos con muchas variables diferentes y se probó en un banco de pruebas para trazar la relación entre las RPM, la presión de entrada y el caudal de salida. Se midió esto haciendo funcionar la extrusora durante un minuto y pesando la cantidad resultante de material extruido con una balanza de precisión.

Después de dos meses de investigación y pruebas minuciosas, se logró mejorar la barrena, pero nunca se tuvo una operación con medidor. Siempre hubo una relación entre la viscosidad del material, la presión de entrada y el caudal resultante en las tablas.

Otro problema observado y tal vez específico de la arcilla (que es una suspensión), fue que el caudal disminuyó de manera muy constante con el tiempo. Al desmontar la extrusora, se puede encontrar un trozo de arcilla casi seco en el extremo del sinfín que obstruye la boquilla. Esto sucedió una y otra vez y la conclusión final es que esto se debe al reflujó de agua que sale de la arcilla y vuelve a subir por los lados de la barrena. Si bien la bomba de tornillo sinfín suena simple, su principal mecanismo de funcionamiento es la acumulación de diferencia de presión y es un desafío trabajar con eso.

Se encontraron citas en libros que indicaban que, si bien las extrusoras de tornillo sinfín se utilizan con éxito en la industria, varios aspectos aún no se comprenden completamente. La conclusión fue que probablemente se podría construir una extrusora de pasta de trabajo basada en el sinfín, pero que necesitaría ajustar cuidadosamente todos los parámetros para cada material diferente. No es un enfoque único para todos (o para la mayoría). Aparentemente, esto funciona bien en configuraciones industriales controladas de un solo propósito y, de hecho, se ve en laboratorios de investigación, la impresión 3D con

éxito con dispensadores de tornillo sin fin de 3000 €, pero como base para una extrusora RepRap de bricolaje versátil no es seguro.

Antes del renovado esfuerzo por experimentar con barrenas, se puede decir que el desplazamiento positivo implica que un volumen específico de material se desplace dentro de una actuación mecánica específica. El desplazamiento positivo no se ve influido por cambios de temperatura o viscosidad. La bomba de tornillo de Arquímedes es muy consistente, pero esta consistencia depende de la viscosidad y las características de flujo del material. Los tornillos de Arquímedes se han comercializado como bombas de desplazamiento positivo, pero las bombas dosificadoras de viscosidad son una mejor definición.

Debe producir el mismo flujo a cualquier velocidad dada sin importar la presión de descarga. Y aquí es donde aparece el último sistema, la bomba Moineau. Desde la superficie, esta bomba se parece bastante a una bomba de tornillo sin fin, pero la geometría del tornillo sin fin (el rotor), y la carcasa (el estator), son un poco más complicadas. En un Moineau no hay un camino continuo hacia abajo del rotor, sino varias cavidades selladas entre el rotor y el estator que progresan hacia abajo cuando se gira el rotor, de ahí su otro nombre común: bomba de cavidad progresiva.

Cada cavidad tiene un volumen conocido, por lo que con cada rotación se descarga un volumen específico de una o más cavidades.

La intrincada geometría asegura que las cavidades se alternan para evitar pulsaciones en la extrusión.

La única influencia que tiene la presión de entrada es que debe ser lo suficientemente alta para alimentar el material en la bomba, pero no demasiado alta como para que se filtre más allá del sello del rotor y el estator y este es a menudo un rango amplio. Otras características beneficiosas son que Moineau es muy adecuado para pastas y lodos llenos de partículas. Por lo tanto, está diseñado para aplicaciones extremas como en la industria de la perforación de petróleo, pero también es muy adecuado para aplicaciones menos exigentes.

A principios de 2012 Tomi Salo publicó una extrusora paso a paso Moineau imprimible en Thingiverse diseñada en OpenSCAD y basada en la geometría paramétrica básica de rotor y estator de Emmett Lalish. El diseño de Tomi es un diseño de alimentación por gravedad y no es adecuado para trabajar con materiales bajo presión. Unfold hizo una actualización rápida para sellar todas las piezas y el eje paso a paso y se probó la extrusora actualizada con arcilla. En la prueba inicial la extrusora funcionó de manera muy consistente con arranque y paradas instantáneas.

Figura 20. **Bomba de Moineau**



Fuente: Verbruggen (2014). *The Road to Better Paste Extrusion*. Consultado el 20 de marzo de 2022. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

Sin embargo, el mecanismo de transmisión y los ejes de la extrusora fallaron bastante rápido debido al par sustancial necesario para bombear una lechada de arcilla viscosa. Meses más tarde, nuevamente como parte de la tesis de ingeniería y después del decepcionante trabajo en la barrena, se retomó el diseño de Moineau. La longitud y los parámetros del rotor se cambiaron según el análisis de una bomba industrial Moineau para obtener un mejor sellado. Esto es crucial porque normalmente el rotor es de acero inoxidable y el estator de una goma muy duradera, por lo que los dos sellan muy bien. Esto hace que dispense material de baja viscosidad como agua con la misma facilidad que una arcilla espesa. En una versión de plástico impresa en 3D, nunca se logrará este tipo de sellado, pero tampoco se necesitan las capacidades de baja viscosidad, utilizará pastas de alta viscosidad. Al alargar el rotor se crean más cavidades y sellos.

Otras mejoras tomadas de la literatura, se tomaron en cuenta para reducir la posible pulsación. Se realizaron las mismas pruebas de extrusión de banco de un minuto con esta segunda actualización del Moineau y los resultados fueron mucho más consistentes en comparación con el diseño basado en barrena. En este punto, el Moineau todavía necesita muchas mejoras, pero eso se debe principalmente a la parte mecánica del diseño, el principio de funcionamiento en sí parece capaz de ofrecer lo que se necesita.

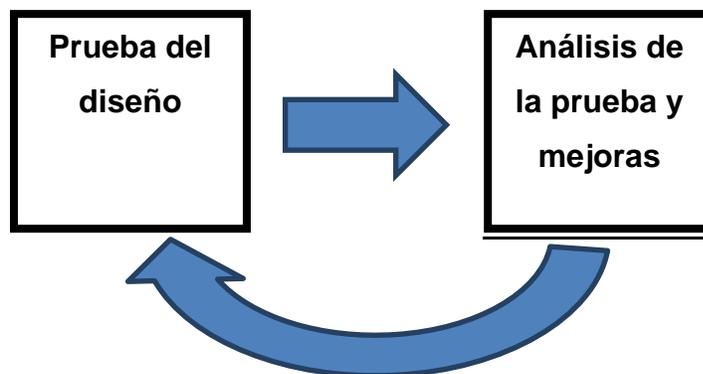
Lo que se necesita mejorar es la resistencia mecánica del acoplamiento entre el rotor y el paso a paso. Debido a que el rotor se mueve de manera excéntrica, es necesario que haya un eje de acoplamiento flexible y este eje atraviesa el material en la cámara de entrada. Este es ahora un acoplamiento de tres clavijas muy básico que tiene la tendencia a oscilar hacia arriba y hacia abajo y se rompe con frecuencia porque el par de torsión es demasiado alto. También relacionado con el par, un motor nema 17 estándar acoplado directamente al eje está realmente en el borde. A veces funciona, a veces no lo hace y el motor stepper saltará mucho. Es necesario incorporar un paso a paso de tamaño superior como el nema 23 o un paso a paso con engranajes.

Básicamente, todo el extrusor debe endurecerse para una operación de alto par, ese es un trabajo que aún debe realizarse.

contribuirá a sacar el máximo partido a la prueba, la prueba incluirá principalmente la identificación de variables y un plan para el análisis de los datos de salida.

La selección del diseño se realiza en esta parte. Mediante el uso de un proceso iterativo, se prueba el diseño, se realiza el análisis de la prueba y se mejora el concepto, se vuelven a realizar las pruebas y así sucesivamente, (ver figura 20)

Figura 22. **Proceso iterativo de pruebas**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

1.7.1. **Especificaciones del producto**

La extrusora podrá ser capaz de producir una línea de hormigón (material imprimible con cemento) de 6-10 mm de diámetro con un flujo constante sin pulsaciones, será volumétrica para poder tener un control de medida de flujo y velocidad de inyección, estos parámetros serán controlados manualmente mediante un variador de velocidad con el cual se controlaran las rpm del motor independiente del g-code (programa de la impresora), la extrusora no se montará

en el cabezal de impresión que va puesto en los carrizos de la impresora así liberar de peso el cabezal de impresión; poderle dar grandes dimensiones a la extrusora y adaptarle un depósito de suministro de gran volumen, el cual pueda alimentarse de material sin pausas por recarga de material en la impresión y así poder tener una impresión continua de escala grande, la pasta debe tener suficiente viscosidad a temperatura ambiente, para ser estable al imprimir un objeto.

No se deberá alterar su viscosidad por las fuerzas de fricción y presión durante su trayectoria al ser extruida, el mecanismo de creación de flujo deberá tener el suficiente torque y la resistencia mecánica para soportar los esfuerzos y desgaste generado en el rotor y estator, al vencer la alta fricción de la pasta en todo su paso por la extrusora, no se deben producir atascamientos, filtraciones del material ni deformaciones en los componentes al trabajar con la máxima carga permisible; se diseña con un buen factor de seguridad, el rotor y estator deberán estar bien alineados con ajustes de holgura óptimos, para evitar juegos excéntricos y fallas.

1.7.2. Generación de conceptos

Existen características que son muy importantes para el cumplimiento de las especificaciones del producto, esto conduce a muchos tipos de diseño, se eligió la mejor característica de acuerdo a lo que se busca en el diseño de la extrusora.

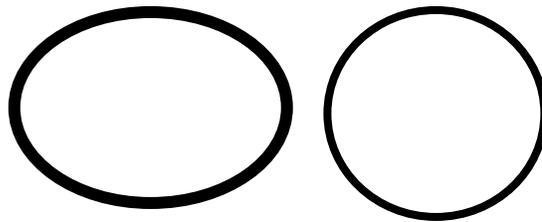
Estas son:

- La forma y el tamaño del orificio de la boquilla de impresión
- El mecanismo de creación de flujo

1.7.2.1. Forma y tamaño del orificio de la boquilla de impresión

El orificio de la boquilla de impresión es fundamental para la forma, dimensionamiento de grosor, presión, flujo y velocidad de la inyección del hormigón. Se consideran algunas geometrías simples, como una elipse y un círculo, (ver fig. 23). La razón por la que solo se tienen en cuenta estas dos geometrías es porque ya han sido evaluadas en el informe Experimentación y análisis del proceso Contour Crafting (CC), utilizando materiales cerámicos sin curar de Hongkyu Kwon.

Figura 23. **Posibles formas de la boquilla**

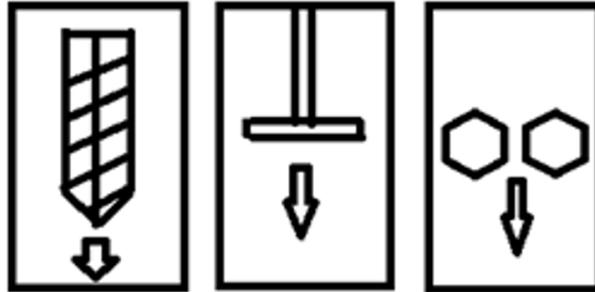


Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

1.7.2.2. Selección de mecanismo de creación de flujo

Para crear el flujo del hormigón se necesita algún tipo de mecanismo para producirlo, como se vio anteriormente en las investigaciones se seleccionó, entre mecanismos de bombas de desplazamiento positivo de máquinas roto-estáticas, para materiales viscosos, estos son mecanismos de cilindro-émbolo, de tornillo sin fin y de engranajes, el diseño de estos mecanismos debe ser para bombeo (ver fig. 24).

Figura 24. **Tipos de mecanismo a seleccionar**



Fuente: A. Lars (2015). *Impresora 3d de hormigón*.

1.7.3. Evaluación y selección del concepto

Las dos características principales se evaluarán por separado. Para este producto, se asumirá que la mejor opción para cada función dará como resultado la mejor solución general. Las opciones se calificarán de 1 a 10 en todos los criterios entre sí, siendo 1 la peor y 10 la mejor. Las opciones con el puntaje total más alto se utilizarán para un mayor desarrollo.

1.7.3.1. Sección transversal de la boquilla de impresión

La característica del orificio se evaluará en función del acabado de la superficie creada en la línea de hormigón y la facilidad de fabricación. (consulte tabla 2).

Tabla II. **Evaluación de la forma de la sección transversal del orificio de la boquilla**

Forma de la sección transversal	Elipse	Circular
Acabado superficial creado	7	10
Facilidad de fabricación	7	10
Conectar manguera	4	10
TOTAL	18	30

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

En el informe Experimentación y análisis del proceso Contour Crafting (CC), utilizando materiales cerámicos no curados de Hongkyu Kwon, queda claro que el acabado de la superficie creado con un orificio cuadrado, para la boquilla de impresión es mejor en comparación con un orificio elipse y circular, pero es necesario un mecanismo de corrección de ángulo en el cabezal donde va la boquilla para mantener el perfil rectangular en todas las direcciones.

1.7.3.2. Mecanismo de creación de flujo

Esta característica se evaluará en base a la especificación de producto que se desea diseñar (consulte tabla 3).

Tabla III. **Evaluación de selección de mecanismo de creación de flujo**

Mecanismo de creación de flujo	Tornillo	Embolo	Engranajes
Presión creada	9	10	9
Flujo constante sin pulsaciones	10	2	5
Control de flujo inyectado	10	5	5
Precisión de inyección	10	5	5

Continuación de la tabla III.

Buena respuesta a altas cargas	10	10	10
No altera la viscosidad del hormigón	9	5	9
Rendimiento Torque-presión de salida de hormigón	10	9	7
Evita sobrecargas	9	7	10
Evita pérdidas de energía hidráulica	10	5	10
Depósito de material de impresión	10	5	10
Alimentación de material sin detener la impresión	10	5	10
Precisión de impresión en arranques y paradas	10	5	5
Desperdicio de material	10	5	8
Atascamiento de material	9	10	10
Liviana	9	9	10
Buena respuesta a distintas velocidades	10	7	10
Facilidad de fabricación	8	10	8
Desgaste	9	5	7
TOTAL	172	119	145

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

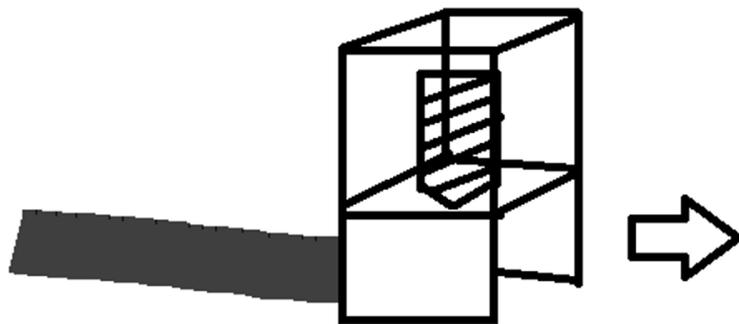
Del estudio y pruebas realizadas con mecanismos de máquinas alternativas (émbolo), y de engranajes se comprobó que estos mecanismos no brindan todas las especificaciones de producto que se deben cumplir, para el diseño que se busca, por lo cual se descartan y se elige el mecanismo de creación de flujo de máquinas de desplazamiento positivo, con movimiento rotativo porque estos mecanismos poseen ciertas ventajas que se requieren de las máquinas roto-dinámicas, estas máquinas son llamadas roto-estáticas, son

volumétricas y brindan ventajas de una maquina roto-dinámica, se trabajará con el tornillo de Arquímedes conocida como bomba dosificadora de viscosidad.

1.7.3.3. Concepto seleccionado

De la evaluación de posibles soluciones, el concepto seleccionado es una extrusora con un orificio redondo y un mecanismo de tornillo de Arquímedes, para crear el flujo de hormigón, (ver fig. 25).

Figura 25. Concepto seleccionado



Fuente: A. Lars (2015). *Impresora 3d de hormigón*.

1.8. Máquinas hidráulicas de desplazamiento positivo

La teoría de estas máquinas es mucho más sencilla que la de las turbomáquinas, se estudiarán brevemente en este capítulo. Esta clase, además del grupo importante de las bombas de émbolo, comprende el grupo compuesto por los cilindros hidráulicos, neumáticos, bombas y motores rotativos, grupo muy numeroso y variadísimo, que constituye hoy en día en los países más desarrollados una industria floreciente, la cual encuentra cada día nuevas

aplicaciones en el campo de las transmisiones, controles hidráulicos, neumáticos y automatismo.

1.8.1. Principio del desplazamiento positivo

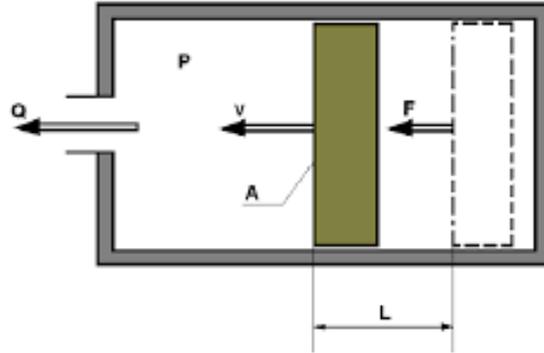
El funcionamiento de las máquinas de desplazamiento positivo no se basa como el de las turbo-máquinas, en la ecuación de Euler, sino en el principio del desplazamiento positivo que se estudia a continuación en el interior del cilindro (ver fig. 26) en éste se mueve un émbolo con movimiento uniforme, velocidad v y un fluido a presión P . Se supone que tanto el cilindro como el émbolo son rígidos o indeformables y que el fluido es incompresible. El movimiento del émbolo se debe a la fuerza aplicada F .

El émbolo al moverse desplaza al fluido a través del orificio de la figura 26. Si el émbolo recorre un espacio l hacia la izquierda, el volumen ocupado por el líquido se reducirá en un valor igual a Al (donde A – área transversal del émbolo). Como el fluido es incomprensible el volumen del fluido que sale por el émbolo será también Al . El tiempo t empleado en recorrer la distancia l es

$$t = l/v \quad (\text{Ec. 1})$$

Como se puede observar en la Fig. 26, al disminuir el volumen a la izquierda del émbolo el fluido se verá obligado a salir sea cual fuere la presión. Siempre que la fuerza F sea suficientemente grande y las paredes del cilindro suficientemente robustas.

Figura 26. **Explicación del principio de desplazamiento positivo**



Fuente: Mataix (1982). *Mecánica de fluidos y maquinas hidraulicas, bombas de embolo.*

El caudal Q , o volumen desplazado en la unidad de tiempo, será teniendo en cuenta la Ecuacion (2)

$$Q = \frac{Al}{t} = Av \quad (\text{Ec. 2})$$

Si no hay rozamiento la potencia comunicada al fluido será:

$$p = Fv$$

Pero $F = pA$; luego

$$p = Fv = pAv = Qp$$

En virtud de la Ecuación. (Ec. 2).

Es evidente que el esquema de la fig. 24 puede funcionar como bomba o como motor, es decir, la máquina puede absorber potencia mecánica, Fv y restituir potencia hidráulica Qp (bomba) o viceversa. Tanto en un caso como el otro queda en evidencia que:

El principio de desplazamiento consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara. Por tanto, en una máquina de desplazamiento positivo:

El órgano intercambiador de energía no tiene necesariamente movimiento alternativo (émbolo), si no que puede tener movimiento rotativo (rotor).

Sin embargo, en las máquinas de desplazamiento positivo tanto alternativas como rotativas, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión de una bomba) y disminuye el volumen (impulsión), por eso estas máquinas se llaman también máquinas volumétricas. Además, si el órgano transmisor de energía tiene movimiento rotativo, la máquina se llama roto-estática, para diferenciarlas de las roto-dinámicas.

Una maquina roto-estática es una máquina de desplazamiento positivo de movimiento rotativo.

El intercambio de energía de fluido se hace siempre en forma de presión, en contraposición a las turbo-máquinas, en que los cambios en la dirección y valor absoluto de la velocidad del fluido juegan un papel esencial.

La curva característica o curva ($H - Q$) de una turbo-máquina, ejemplo una bomba, revela que la bomba solo puede alcanzar una altura (presión), máxima que, según la ecuación de Euler, depende de la forma del rodete, por el contrario

se supone que la fig. 24 represente una bomba de émbolo. Es evidente que, teóricamente, el caudal Q no dependerá de la resistencia en la tubería de impulsión, que se reflejará en un aumento de la presión p que reine en el cilindro, y dada una velocidad v del émbolo, el desplazamiento será el mismo, y el caudal también. Además, si las paredes del émbolo son suficientemente robustas, y el motor de accionamiento es suficientemente potente, la bomba proporcionará toda la presión que se le pide. Teóricamente la curva $H - Q$ de una bomba de desplazamiento positivo será una paralela al eje H .

Las turbo-máquinas basadas en la ecuación de Euler en general no son reversibles, una bomba roto-dinámica al funcionar como turbina empeora su rendimiento, y en algunos casos es incapaz de producir potencia útil alguna. La razón es que los ángulos de los álabes juegan un papel decisivo en la transmisión de la energía, y al funcionar como turbina los álabes no poseen ya los ángulos apropiados.

Por el contrario, el principio de desplazamiento positivo hace que todas las máquinas basadas en él sean fundamentalmente reversibles. El que algunas máquinas prácticamente no lo sean no es en virtud de la hidráulica, sino de la mecánica del aparato. Por ejemplo, ciertas bombas de paletas deslizantes funcionando como motor a pequeñas velocidades, pueden no llegar a desarrollar la fuerza centrífuga necesaria para producir suficiente estanqueidad.

Para ello existen 2 razones:

- En las turbo-máquinas al variar la presión varía el caudal. Si, por ejemplo, se emplease una bomba roto-dinámica para el sistema de presión del accionamiento hidráulico de una excavadora, al encontrar mayor

resistencia en el terreno, no se reducirá la velocidad de trabajo de la misma si se emplea una bomba roto-estática.

- Una bomba roto-dinámica da una presión máxima. Si aumenta la resistencia aumenta la presión necesaria en la bomba, que no puede exceder dicho valor máximo y la máquina se calaría, esto no pasa con una bomba roto-estática.

Es por ello que se requiere de una bomba roto-estática en el proyecto realizado, el límite máximo de presión, depende de la capacidad de esfuerzos de estrés, compresión del diseño del rotor, estator, eje que sea rígido y no se deforme.

1.8.2. Clasificación de las máquinas de desplazamiento positivo

El órgano principal de las máquinas de desplazamiento positivo, se designará con el nombre genérico de desplazador, tiene la misión de intercambiar energía con el líquido, lo que implica un desplazamiento del mismo. Este órgano admite infinidad de diseños. Sin embargo, es fácil clasificar estos diseños atendiendo a dos criterios distintos:

- Primer criterio: según el tipo de movimiento del desplazador las máquinas de desplazamiento positivo se clasifican en:
 - Máquinas alternativas
 - Máquinas rotativas

El principio de desplazamiento positivo en las máquinas alternativas se explicó por medio de la figura 26. Las bombas de tornillo demuestran que el mismo principio se puede realizar en una máquina rotativa, el principio de funcionamiento de esta máquina es el mismo que el de una bomba de émbolo:

Un volumen que aumenta, realiza una succión y luego disminuye realizando la impulsión: de nuevo el principio de desplazamiento positivo.

- Segundo criterio: según la variabilidad del desplazamiento se clasifican en:
 - Máquinas de desplazamiento fijo
 - Máquinas de desplazamiento variable

La variación del desplazamiento en una máquina alternativa es fácil, basta variar la carrera del émbolo. En algunas máquinas rotativas tan bien es fácil, por ejemplo, la de tornillo, para variar el desplazamiento basta variar las dimensiones del rotor y estator.

Desplazamiento, D , es el volumen desplazado en una revolución n . Por tanto el caudal, Q , en las máquinas de desplazamiento positivo será:

$$Q = Dn \quad (\text{Ec. 3})$$

En muchas aplicaciones interesa variar el caudal. Según la Ec. (Ec. 3) esto puede lograrse variando n ; pero no es recomendable y se usa poco.

Lo más ordinario es variar D , como se acaba de explicar.

En resumen, atendiendo a los dos criterios enunciados, las máquinas de desplazamiento positivo se clasifican en cuatro grupos:

- Máquinas alternativas de desplazamiento fijo
- Máquinas alternativas de desplazamiento variable
- Máquinas rotativas de desplazamiento fijo
- Máquinas rotativas de desplazamiento variable

Los grupos 1 y 2 o máquinas alternativas, tienen dos campos de aplicación distintos:

- Primer campo de aplicación: bombeo de líquidos
- Segundo campo de aplicación: transmisiones, controles hidráulicos y neumáticos.

En el primer campo se utilizan constantemente las bombas de émbolo de diferentes tipos.

1.8.3. Bombas de émbolo

Es una bomba hidráulica que genera el movimiento en el mismo mediante el movimiento de un pistón. Las bombas de pistones son del tipo bombas volumétricas y se emplean para el movimiento de fluidos a alta presión.

1.8.3.1. Comparación de las bombas roto-dinámicas y las bombas de émbolo

La comparación se refiere al primer campo de aplicación enunciado: el bombeo de líquidos

- Presiones: las bombas de émbolo prácticamente no tienen límite de presión. Actualmente se construyen para presiones de 1000 bar y aún mayores. Para aumentar la presión basta hacer la bomba más robusta y el motor más potente. El principio de desplazamiento positivo demuestra que teóricamente cualquier presión es alcanzable. Sin embargo, las bombas roto-estáticas, con excepción de las de tornillo, no se adaptan tan bien a presiones mayores de 30 bar.

Las bombas roto-dinámicas, centrifugas (radiales y radio-axiales), y axiales alcanzan grandes presiones, aumentando el número de escalonamientos, pero si este número es excesivo, el rendimiento disminuye mucho. Sin embargo, la tendencia moderna muestra una invasión muy acusada de las bombas roto-dinámicas en el campo de las grandes presiones: se construyen bombas de presión superior a los 350 bar para alimentación de calderas de vapor en las centrales térmicas.

- Caudales: las bombas de émbolo se adaptan solo a caudales limitados, para aumentar el caudal en ellas hay que aumentar el tamaño de la máquina, porque, siendo en estas máquinas el flujo pulsante, los fenómenos de inercia impiden aumentar el caudal mediante el aumento de velocidad. Las bombas roto-dinámicas se adaptan fácilmente a grandes caudales.

En resumen: las bombas de émbolo se adaptan más a grandes presiones y pequeños caudales y las bombas roto-dinámicas (centrifugas y axiales), a

pequeñas presiones y grandes caudales. Las bombas roto-dinámicas son máquinas de mayor número específico de revoluciones (más rápidas que las bombas de émbolo).

Las bombas de émbolo tienen la ventaja de mejor rendimiento, auto-aspiración y mayor altura de aspiración. Sin embargo, la tendencia moderna muestra una invasión de las bombas roto-dinámicas.

Ventajas de las bombas roto-dinámicas sobre las bombas de émbolo:

- Potencia específica mayor (potencia por unidad de peso o por unidad de volumen).
- Carencia de fuerzas de inercia descompensadas, si el rotor está mecánica y dinámicamente equilibrado y por tanto presenta un funcionamiento, menos expuesto a vibraciones.
- Acoplamiento directo a motores eléctricos de número de revoluciones elevado, y por tanto más baratos, sin transmisión reductora como las bombas de émbolo.
- Carencia de sobrepresión de la bomba y en la tubería por cierre en la válvula de impulsión.
- Carencia de válvulas, con lo que se eliminan averías.
- Precio más reducido.

1.8.3.2. Prototipo realizado en CETEC, con mecanismo de bomba alternativa con émbolo

Se imprimieron piezas de hormigón en laboratorio CETEC, utilizando el mecanismo de émbolo, porque su mecanismo no es tan complejo y era lo más accesible para comenzar, (ver fig. 27), las características de la extrusora son:

- Jeringa con cilindro de 60 ml de volumen
- Pistón de 2 pulgadas de diámetro
- Carrera de 4 pulgadas
- Empuje de pistón por tornillo helicoidal de potencia
- Accionado por motor stepper nema 23 (ver anexos para características del motor), con caja reductora de velocidad.
- Motor gobernado por el g-code del programa de impresión 3D.
- Extrusora conectada a un lado de la impresora no sobre el cabezal de impresión.

Figura 27. **Extrusora de émbolo para prueba CETEC**



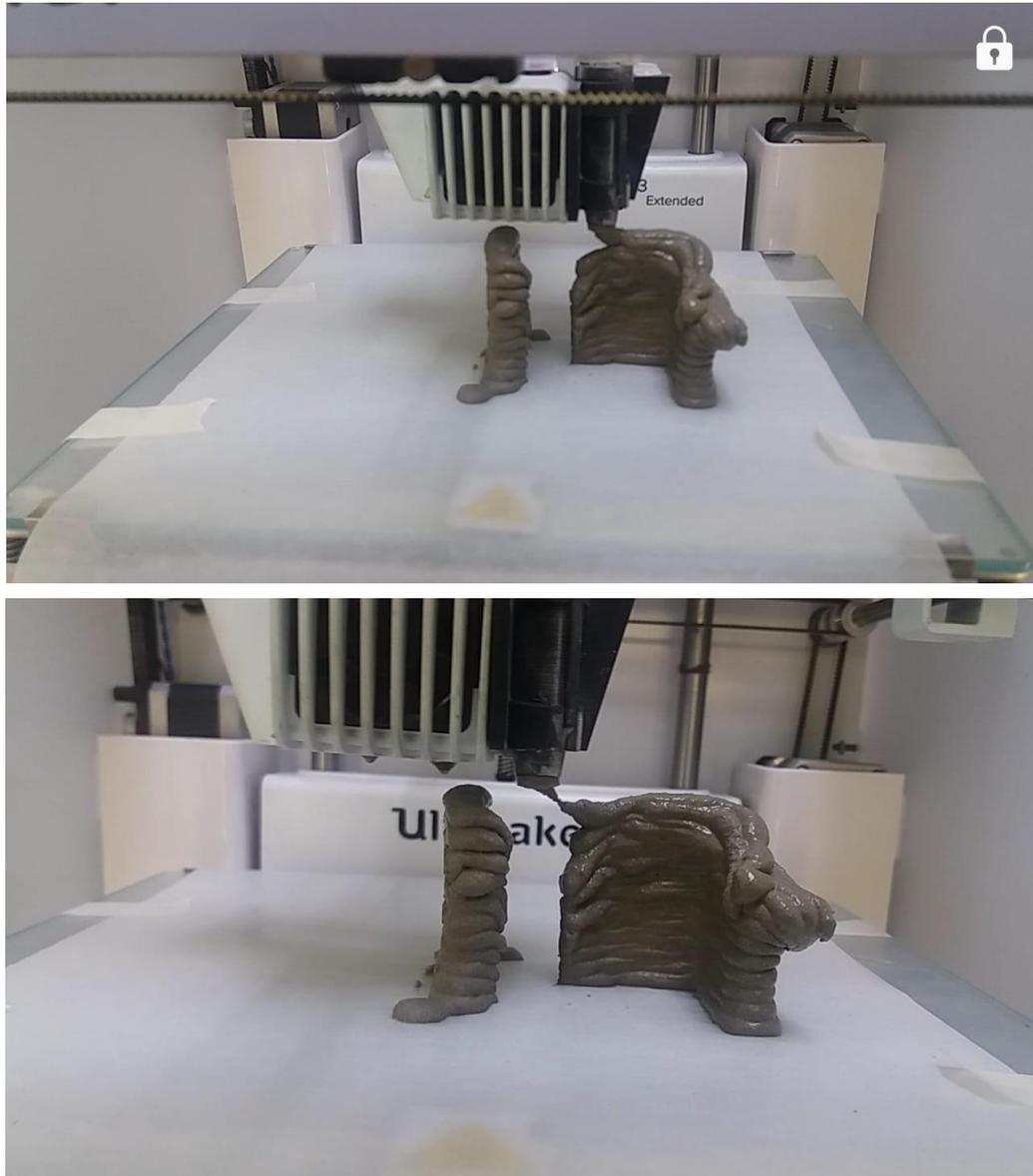
Fuente: [Fotografía de Carlos José Escobar Noriega]. (Guatemala, Guatemala. 2023).
Colección particular. Guatemala.

Como se menciona anteriormente se encontraron ciertas desventajas con este tipo de mecanismo, detalladas a continuación:

- No genera un flujo continuo en la impresión, debido a que imprime con muchas pulsaciones, esto hace que el acabado de la pieza no sea uniforme, y en algunos tramos imprime más o menos material de lo que requiere la pieza.
- Falta de inyección precisa del volumen de material que se debe imprimir.

- Los arranques y paradas de inyección de material cuando se comienza otra capa superior, no tienen precisión, son paradas escurriendo un poco de material, y arranques con escasos de material.
- No permite imprimir de manera continua piezas muy grandes o de gran escala porque habría que dimensionar la jeringa y diámetros de tuberías a medidas muy grandes y habría muchas pérdidas de carga al empujar todo el volumen del material dentro de la jeringa al inyectar.
- No se pueden imprimir piezas complejas.
- No cuenta con depósito de material, solo el que cabe en el cilindro de la jeringa.
- Cuando se termina el material dentro de la jeringa se debe detener la impresión, sacar la jeringa y llenar el cilindro de nuevo, esto es un problema para que continúe con una impresión exacta y precisa donde se quedó. y también le entra aire al sistema de inyección.
- No se puede fijar manualmente el flujo y velocidad de inyección requerida al variar la velocidad (RPM) del motor.
- No se puede tener un control exacto de volumen inyectado por vuelta del motor.

Figura 28. **Impresión de hormigón con extrusora de embolo, CETEC**



Fuente: [Fotografía de Carlos José Escobar Noriega]. (Guatemala, Guatemala. 2023).
Colección particular. Guatemala.

Debido a lo estudiado anteriormente y pruebas hechas realizadas con el mecanismo de émbolo se descartaron las bombas alternativas para la realización del diseño del extrusor, carecen de bastantes especificaciones importantes para el diseño requerido y se buscó mecanismos de máquinas de desplazamiento positivo con movimiento rotativo y no alternativo, es decir, con ventajas de bombas roto-dinámicas. Estas máquinas son llamadas roto-estáticas y son las ideales para el diseño del prototipo, que cumpla con todas las especificaciones del producto que se necesita, se verá el estudio de este sistema de máquinas a continuación.

1.8.4. Bombas roto-estáticas

En el inciso 1.8.4.1. se describen las bombas roto-estáticas.

1.8.4.1. Clasificación

Máquinas roto-estáticas son máquinas de desplazamiento positivo dotadas de movimiento rotativo.

- Se construyen en inmensa variedad de modelos y continuamente aparecen nuevos tipos, La clasificación de estas máquinas que se dará en esta sección es incompleta, se mencionará solo de las estudiadas para el diseño de la extrusora.
- Se basan en el principio del desplazamiento. Por tanto, aunque tienen movimiento rotativo como las turbo-maquinas (roto-dinámicas), el principio hidráulico de funcionamiento es el mismo que el de una bomba de émbolo, y su funcionamiento no se basa en la ecuación de Euler.

- Constan de un estator y de un rotor, dotado este último de paletas, émbolos, dientes, rosca, entre otros, según el tipo de máquina.
- Son máquinas hidráulicamente reversibles, aunque excepcionalmente, mecánicamente algunas no lo sean como es el caso de la de tornillo.

Se clasifican según el órgano desplazador en:

- Máquinas de émbolos
- Máquinas de engranes
- Máquinas de paletas

Según la variedad del caudal, sin variar el número de revoluciones

- Máquinas de desplazamiento fijo
- Máquinas de desplazamiento variable

La extrusora diseñada en este trabajo está clasificada dentro de las máquinas roto-estáticas con engranes de tornillo como órgano desplazador, (ver fig. 11). Se menciona detalladamente de este tipo de extrusoras en el capítulo *Máquina extrusora de tornillo*, que es la seleccionada para hacer el diseño del prototipo.

1.8.4.2. Máquinas de engranajes externos

Las bombas de este tipo encuentran múltiples aplicaciones. Al girar en el sentido de las flechas (ver fig. 27), en el lado de la admisión siempre hay dos dientes que se separan, creando un vacío, con lo que el líquido penetra en el estator, y es desplazado por los espacios entre los dientes y el estator hacia la impulsión, donde por el contrario siempre hay dos nuevos dientes que engranan

y expulsan el líquido. Estas máquinas se utilizan mucho como bombas de combustibles y lubricantes para caudales de 0.3 a 2 m³ /s y presiones de 10 a 20 bar, no es muy útil para fluidos de alta viscosidad es por eso que se descartó del trabajo, pero se deja una teoría básica que se tomó en cuenta para la selección de diseño.

Figura 29. **Máquina de engranajes externos**



Fuente: Sapiensman, cienciasfera (s.f.). *Bombas hidráulicas rotativas de engranajes externos*. Consultado el 22 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema08/41_rotativas_de_engranajes_externos.html.

1.8.4.2.1. Teoría de la bomba o motor de engranes

Esta máquina tiene 2 rotores. En ella el desplazamiento D , o volumen desplazado por revolución es:

$$D = Ab 2z \text{ m}^3 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

A – área del espacio ocupado por un diente, m³, SI

b – altura del diente, m, SI

z – número de dientes

El caudal útil de la bomba será:

$$Q = \eta_v \frac{Dn}{60} = \eta_v \frac{Ab 2z}{60} n \text{ m}^3/\text{s}, \text{ SI} \quad (\text{Ec. 5})$$

1.8.4.3. Ventajas y desventajas de las 3 máquinas roto-estáticas estudiadas para el diseño de la extrusora de este trabajo

Ventajas-máquinas de engranajes externos:

- Diseño compacto con ejecución en línea
- Se pueden desmontar los rotores sin que sea necesario separar la bomba de las tuberías.
- Reflujo de producto reducido en comparación con la bomba lobular.

Desventajas – máquinas de engranajes externos:

- La flexibilidad de las bombas es limitada.
- Los elementos de bombeo son frenados y desviados.
- El bombeo es pulsante.
- Debido a las tolerancias pequeñas hay un elevado riesgo de contacto entre rotor y carcasa.

- La tapa se utiliza como una superficie deslizante de los rotores para limitar la deflexión del eje.
- La bomba tiene contacto y existe el peligro que los materiales especiales con alto contenido de níquel pasen al producto.
- Tolerancias más grandes que aumentan el reflujo del producto.
- Las bombas horizontales no son auto-vaciantes.
- Las bombas precisan un bypass para la limpieza.

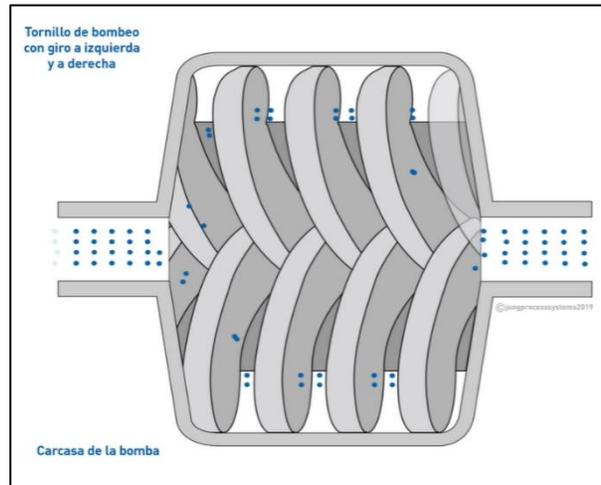
Ventajas - máquinas de tornillo helicoidal de husillo:

- Las bombas son muy flexibles y tienen un amplio rango de revoluciones.
- El bombeo está prácticamente libre de pulsaciones.
- El producto se desplaza axialmente, las velocidades dentro de la bomba son muy reducidas y el bombeo es cuidadoso.
- Muy elevado nivel de higiene.
- No es necesario ningún bypass para la limpieza.
- No se produce contaminación del producto, gracias a su principio de funcionamiento sin contacto.
- Gran potencia de succión.

Desventajas – máquinas de tornillo helicoidal de husillo:

- Potencia de succión limitada con bombas secas.

Figura 30. **Tornillo helicoidal**



Fuente: Jung process system (s.f.). *El principio de las bombas de tornillo: caudal axial suave y uniforme*. Consultado el 22 de marzo de 2023. Recuperado de <https://www.jung-process-systems.de/>.

Ventajas – máquinas de tornillo de cavidades progresivas

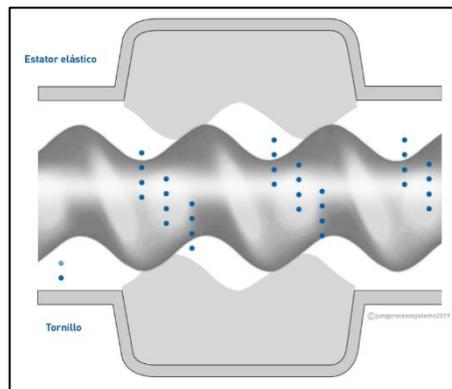
- Las bombas son prácticamente estancas, de modo que las diferentes presiones y viscosidades casi no tienen influencia en el caudal volumétrico.
- Las bombas pueden aspirar en seco, aunque su resistencia contra el funcionamiento en seco es limitada.

Desventajas – máquinas de tornillo de cavidades progresivas

- La flexibilidad de la bomba es limitada.

- El estator es una pieza de desgaste debido a su contacto continuo con el rotor y contamina el producto por la abrasión.
- Bombeando medios abrasivos la vida útil es corta, por lo que tiene gastos de mantenimiento elevados.
- Ocupan un espacio relativamente grande.
- Solo admiten funcionamiento en seco muy limitado, pues los estatores se queman debido al rozamiento.

Figura 31. **Tornillo de cavidades progresivas**



Fuente: Jung process system (s.f.). *El principio de las bombas de tornillo: caudal axial suave y uniforme*. Consultado el 22 de marzo de 2023. Recuperado de <https://www.jung-process-systems.de/>.

1.9. **Maquina extrusora de tornillo**

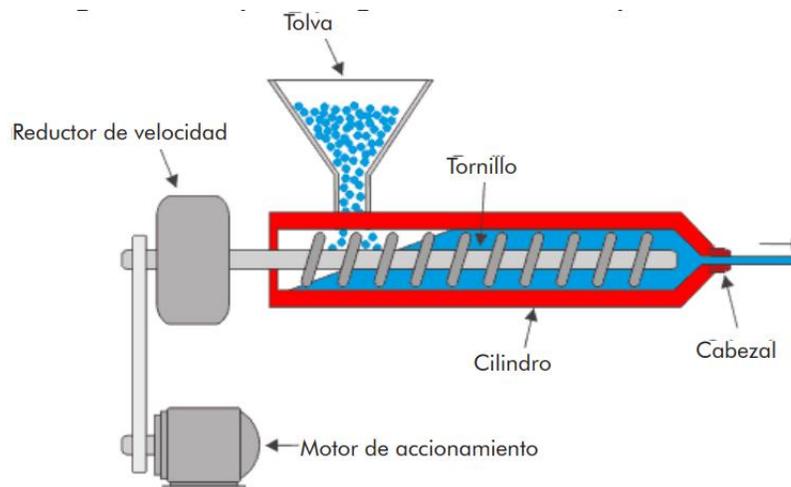
El husillo de extrusión es básicamente un tornillo de Arquímedes fijado por un extremo a un motor que lo hace girar a una velocidad angular previamente

decidida en los procesos de moldeo por inyección y extrusión. Este husillo tiene un canal separado por alabes que sirven para cortar y empujar el flujo.

1.9.1. Elementos constituyentes

Toda máquina de extrusión se compone principalmente de cinco partes esenciales: tolva, cilindro, sistema motriz, cabezal y tornillo. Este último se estudiará en el capítulo 2.

Figura 32. Componentes de una maquina extrusora de tornillo



Fuente: Camilo (2015). *Producción de la varilla peletizada de plástico*. Consultado el 22 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Produccion-de-la-varilla-peletizada-de-plastico-madera_fig2_280733573.

1.9.1.1. Tolva de alimentación

La tolva es el depósito de materia en donde se coloca la mezcla de material para la alimentación continua del extrusor.

Debe tener dimensiones adecuadas para ser completamente funcional; los diseños mal planeados, principalmente en los ángulos de bajada de material, pueden provocar estancamientos de material y paros en la producción.

1.9.1.2. Estator, cilindro o barril

Es un cilindro que aloja al husillo, el barril debe tener una compatibilidad y resistencia al material que esté procesando, es decir, ser de un metal con la dureza necesaria para reducir al mínimo cualquier desgaste. La dureza del barril se consigue utilizando aceros de diferentes tipos y cuando es necesario se aplican métodos de endurecimiento superficial de las paredes internas del cilindro, que son las que están expuestas a los efectos de la abrasión y la corrosión durante la operación del equipo.

En los modelos de extrusoras para polímeros. la experiencia ha demostrado que el cilindro debe poseer una longitud alta para así, con esta distancia, se pueda alcanzar a fundir totalmente el material. La longitud está definida por la relación L/D entre 20 y 24, para poli olefinas, para relaciones mayores a 24 se presentan problemas de ingeniería de construcción, debido a la torsión del tornillo cuando gira a grandes velocidades (rpm), como la extrusora está diseñada para hormigón y no para polímeros, no es necesario longitudes tan altas porque no se requiere que funda el material durante su paso por el estator y rotor. La longitud del cilindro se mide desde el plato rompedor hasta la parte posterior de la garganta de alimentación, su diámetro considerado es el diámetro interno.

Debido a la fricción generada entre el cilindro y el tornillo estos dos elementos deben ser construidos de materiales con propiedades mecánicas

buenas, y una alta resistencia al desgaste. Las propiedades exigidas hoy en día para que los cilindros tengan alta vida útil son:

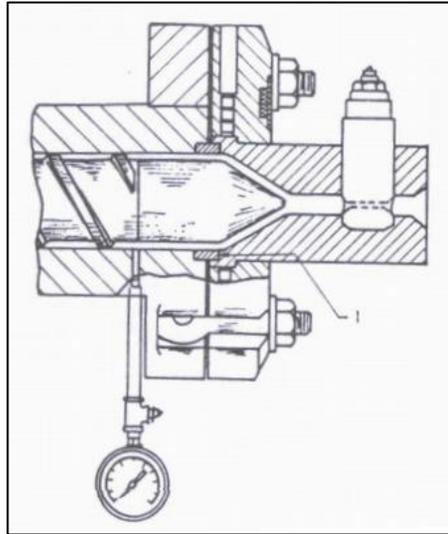
- Resistencia al desgaste
- Alta resistencia a la abrasión
- Buena resistencia química en contacto con el hormigón
- Elevada dureza

1.9.1.3. Cabezal

Las boquillas y el plato rompedor son componentes funcionales del cabezal. Es una de las partes móviles de la máquina, porque se remueve con gran facilidad, ya sea para cambiar el tipo de producción a extrudir o para cambiar o reparar el plato rompedor, la extrusora de este trabajo se diseñó sin plato rompedor, por la alta viscosidad del hormigón se producían atascamientos en los agujeros de diámetro pequeño.

El diseño interno del cabezal debe permitir el paso del hormigón hacia la boquilla. Lo más aconsejable es evitar perfiles con un ángulo excesivamente convergente, como regla general, cuanto mayor es la viscosidad del fluido más agudo debe ser el ángulo del perfil, para adaptarlo a las líneas de flujo del material. Para este diseño se reemplazó el plato rompedor por una prolongación del tornillo con torpedo en la punta, (ver fig. 31). Para evitar las zonas muertas en el cabezal y obtener velocidad del fluido con dirección lineal en la salida.

Figura 33. **Cabezal con torpedo**



Fuente: Anguita (1977). *Extrusión de plásticos*.

1.9.1.4. **Boquilla**

Es la pieza fundamental del cabezal. Sirve para dar la conformación final del material al perfil deseado y debe estar proyectada de manera que permita al hormigón estar en una zona de reposo, para poder conformar el perfil deseado. A través de la boquilla fluye el material, sumamente viscoso y de características newtonianas, por lo que la relación entre la viscosidad y la velocidad de cizalladura no es lineal. En el diseño de este trabajo se colocó una extensión de la boquilla (manguera con boquilla al final), hacia el cabezal móvil en la impresora, hecha de material flexible de plástico lo más liso posible, para evitar pérdidas por fricción, para poder adaptar el extrusor fuera de la impresora y liberar de peso el cabezal móvil.

1.10. Tornillo extrusor

Se aplicó en este trabajo la misma metodología y concepto del diseño de una extrusora de Arquímedes monohusillo para polímeros empleando ciertas ecuaciones de modelado para la extrusora de tornillo de hormigón, diseñada en este trabajo y transformando ciertas ecuaciones de las extrusoras de polímeros ya conocidas.

1.10.1. Tornillo de Arquímedes

En la actualidad las extrusoras de tornillo son prácticamente las únicas utilizadas en la transformación de termoplásticos, están compuestas por uno o dos husillos dependiendo de la función a realizar. Este tipo de extrusora ha sido la puerta de entrada para todos los tipos de estudio sobre el comportamiento del polímero a través del tiempo y de diferentes variables que lo afectan.

El componente principal de la extrusora de tornillo es como su propio nombre lo indica, el tornillo o husillo. Con este elemento el polímero utilizado puede fundirse por medio del paso del tiempo y de la distancia de este. El diseño del tornillo depende específicamente del material a trabajar por las propiedades tanto físicas como químicas de éste, no permiten tener un tornillo estándar.

Se aplicó en este trabajo la misma metodología y concepto del diseño de una extrusora de Arquímedes monohusillo para polímeros empleando ciertas ecuaciones de modelado para la extrusora de tornillo de hormigón, diseñada en este trabajo y transformando ciertas ecuaciones de las extrusoras de polímeros ya conocidas.

1.10.1.1. Definición

Gracias a los intensos estudios del comportamiento del flujo de los polímeros, el husillo o tornillo ha evolucionado ampliamente hasta el grado de convertirse en la parte que contiene la mayor tecnología dentro de una máquina de extrusión.

Por ello, es la pieza que en alto grado determina el éxito de una operación de extrusión.

Cabe mencionar que cuando se comienza la construcción de una máquina extrusora, debe identificarse el tipo de material a procesar para poder hacer un diseño óptimo del tornillo extrusor.

Para esta metodología, se desarrollarán los diseños, basados en las características de la mezcla hecha a base de cemento, que se extrudirá, la primera orientación la da la viscosidad del material mediante un ensayo de reología el cual se menciona adelante.

La configuración geométrica del tornillo, como se muestra en la figura 34, depende fundamentalmente del material a transformar. Es necesario tener en cuenta cada una de las variables que componen el tornillo extrusor:

- **Álabes o filetes:** los álabes o filetes, que recorren el husillo de un extremo al otro, son los verdaderos impulsores del material a través del extrusor. Las dimensiones y formas que éstos tengan, determinarán el tipo de material que se pueda procesar y la calidad de mezclado de la masa al salir del equipo.

- Profundidad del filete en la zona de alimentación: es la distancia entre el extremo del filete y la parte central o raíz del husillo. En esta parte, los filetes son muy pronunciados con el objeto de transportar una gran cantidad de material al interior del extrusor, aceptando el material y aire que está atrapado entre el material.
- Profundidad del filete en dosificación: en la zona de dosificación: en la mayoría de los casos es mucho menor la profundidad de filete que en la alimentación. Ellos tienen como consecuencia la reducción del volumen en el que el material es transportado, ejerciendo una compresión sobre el material. Esta compresión es útil para mejorar el mezclado del material y para la expulsión del aire que entra junto con la materia prima alimentada.
- Relación de compresión: como las profundidades de los álabes no son constantes, las diferencias se diseñan dependiendo del tipo de material a procesar, los fluidos tienen comportamientos distintos al fluir. La relación entre la profundidad del filete en la alimentación y la profundidad del filete en la descarga, se denomina relación de compresión. El resultado de este cociente es siempre mayor a uno y puede llegar incluso hasta 4.5 en algunos materiales.
- Longitud: tiene una importancia especial; influye en el desempeño productivo de la máquina. Funcionalmente, al aumentar la longitud del husillo y consecuentemente la del extrusor, también aumenta la capacidad de plastificación y la productividad de la máquina.

Esto significa que operando dos extrusores en las mismas condiciones de velocidad y temperatura que sólo se distingan en longitud, uno no tendrá capacidad de fundir o plastificar el material después de recorrer todo el extrusor, mientras que el extrusor de mayor longitud ocupará la longitud adicional para continuar la plastificación y dosificará el material perfectamente fundido, en condiciones para fluir por el dado.

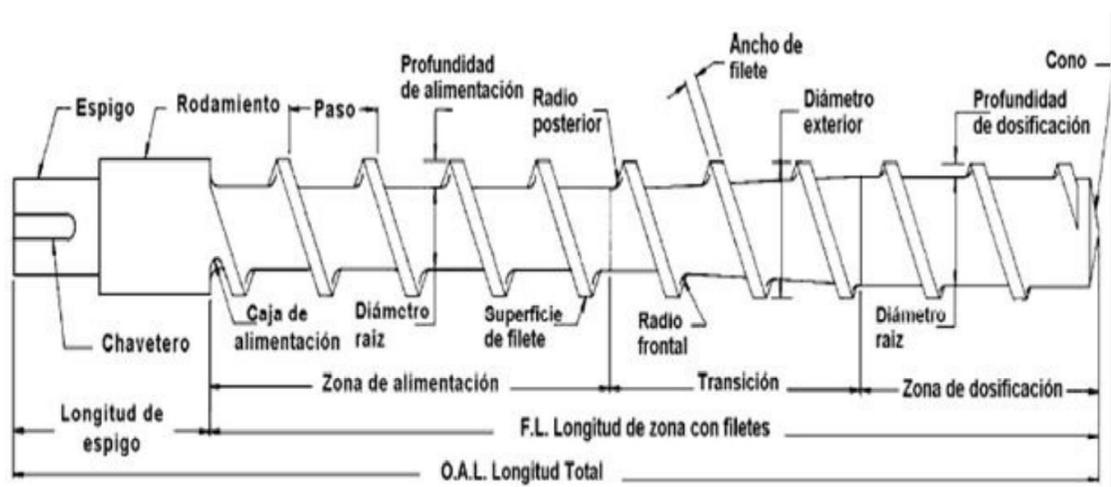
Otro aspecto que se mejora al incrementar la longitud es la calidad de mezclado y homogeneización del material. De esta forma, en un extrusor pequeño la longitud es suficiente, para fundir el material al llegar al final del mismo, y el plástico se dosifica mal mezclado. En las mismas condiciones, un extrusor mayor fundirá el material antes de llegar al final y en el espacio sobrante seguirá mezclando hasta entregarlo homogéneo. Esto es importante cuando se procesan materiales pigmentados, de cargas o aditivos que requieran incorporarse perfectamente en el producto.

En el diseño de este trabajo no se requiere plastificación ya que no se diseñó para plásticos, y la longitud será necesaria para aprovechar las zonas de alimentación y compresión de la mezcla con cemento.

- Diámetro: es la dimensión que influye en la capacidad de producción de la máquina y generalmente crece en proporción con la longitud del equipo. A diámetros mayores, la capacidad en kg/hr es presumiblemente superior. Al incrementar esta dimensión debe hacerlo también la longitud de husillo, el aumento de la productividad debe ser apoyada por una mejor capacidad de plastificación.

Como consecuencia de la importancia que tienen la longitud y el diámetro del equipo, y con base en la estrecha relación que guardan entre sí, se acostumbra especificar las dimensiones principales del husillo como una relación longitud/diámetro (L/D).

Figura 34. **Variabes a considerar en tornillos extrusores**



Fuente: Estrada (2002). *Exposición extrusión monohusillo y doblehusillo*.

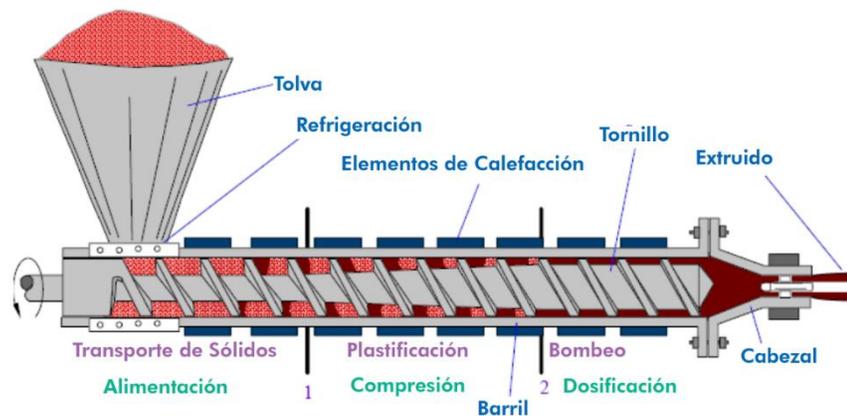
1.10.1.2. Zonas del tornillo

Los estudios teóricos avanzados que se han desarrollado en el transcurso de la historia han ido perfeccionando cada vez más el diseño de tornillos extrusores y han eliminado el proceso anterior de diseño por medio de tanteo experimental y sucesivas aproximaciones con el cual se fabricaron los primeros tornillos.

En los tornillos convencionales se diferencian tres zonas principales: alimentación, compresión y dosificación. Estas zonas se identifican por su

longitud y por la altura del filete, el cual disminuye hacia la punta, pues el volumen del plástico fundido es menor que en forma granular o pellets. Con el tornillo de tres zonas, básicamente, se pueden trabajar todos los termoplásticos, dependiendo de la proporción entre la longitud de las tres zonas, el tornillo podrá o no entregar la capacidad de producción requerida. Otra consideración a tener en cuenta es qué, tan profundo se cortan los canales, puesto que en los canales grandes el polímero no se fundirá muy bien o demorará en hacerlo, dependiendo de la viscosidad del material. Entre más viscoso sea, generará más calor por cizallamiento, por lo que requerirá canales más grandes. El diseño de este trabajo se realizó con las 3 zonas.

Figura 35. **Zonas de un tornillo extrusor**



Fuente: Gutiérrez y Bornacelli (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo.*

1.10.1.2.1. **Zona de alimentación**

La sección de alimentación es el primer elemento del tornillo al que se le introduce material. Esta es la parte más profunda del tornillo. En los diámetros

más pequeños (2.5" y menos), se debe prestar atención especial a esta sección para reducir el riesgo de falla por torsión, debido a la sobrecarga de torque en el tornillo.

Cuando el material cae desde la tolva al tornillo tiende a girar, pero se lo impide en parte la fricción con las paredes estacionarias del cilindro. El avance del material dependerá de la diferencia entre los coeficientes de fricción entre el material-tornillo y material-cilindro. Se busca que la primera sea mayor, por este motivo, los cilindros deben ser pulidos escrupulosamente, con el propósito de reducir la fricción entre su superficie y la del material.

1.10.1.2.2. Sección de alimentación – profundidades y longitudes

La altura del filete en la alimentación es una de las variables iniciales para realizar un buen diseño en los tornillos; existen gran variabilidad de reglas utilizadas para el cálculo de esta altura, en este trabajo se usó una regla para tornillos extrusores de arcilla, para calcular esta altura, la indica la ecuación 5 de relación.

$$\theta_{HA} / \theta_{eje} = 2.3 \quad (\text{Ec. 5})$$

En este estudio se aconseja utilizar una altura de alimentación basándose en las relaciones:

$$2H_D < H_A < 4H_D \quad (\text{Ec. 6})$$

$$H_A < 2 H_D \quad (\text{Ec. 7})$$

La teoría básica del transporte de sólidos determina que el fluido debe adherirse al tornillo y deslizarse sobre el barril, de tal forma que el fluido se desplace hacia delante. Para que esto ocurra el coeficiente de fricción (COF), de la mezcla debe ser superior en la raíz del tornillo que en la pared del barril. De esta forma, algunos fluidos tienen inherentemente mejores COF que otros, y para ellos no se requieren secciones de alimentación largas.

La longitud de la sección de alimentación debe alcanzar de ocho a diez diámetros. Una de las razones para tener mayores secciones de alimentación es hacer que se introduzca más calor a la forma sólida de la resina, haciendo que se adhiera al barril y de esta forma ayude en el desarrollo de la presión requerida, para tener un buen transporte de sólidos, se debe mencionar que esta longitud de alimentación recomendada es para polímeros debido a que el plástico ingresa como partes sólidas y se debe ir fundiendo en el transcurso de la longitud. En el caso de este proyecto no es necesaria una longitud de alimentación larga, ya que la mezcla de cemento ingresa como un fluido líquido con cierta viscosidad y sale igual con la misma viscosidad.

1.10.1.2.3. Zona de compresión

Esta es la porción del tornillo que trasciende desde la profundidad de alimentación hasta la profundidad de dosificación, y es donde se efectúa trabajo sobre el fluido. En esta sección del tornillo, la raíz se vuelve gradualmente menos profunda, forzando al material hacia delante de la pared del barril. En esta zona el fluido es comprimido en una masa que presenta un grado de adherencia a las superficies del tornillo y las paredes del cilindro.

Una característica importante a tener en cuenta en el momento de diseñar tornillos extrusores es la relación de compresión, cuya relación es la principal

responsable de la energía hidráulica que le aportara al fluido y es probablemente el término más usado en la terminología de diseño de tornillos, aunque no por eso es el mejor aplicado ni el mejor comprendido. Hay dos maneras de mantener esta relación en el diseño de un tornillo: la primera, es disminuir la profundidad del canal, bruscamente o de modo continuo a lo largo del tornillo; la segunda, es disminuir gradualmente el paso del filete manteniendo constante la profundidad del canal. Se define como relación de compresión la razón entre el volumen de una vuelta del canal en la zona de alimentación y el volumen del canal en la última vuelta antes de la boquilla.

1.10.1.2.4. Zona de dosificación

La sección de dosificación o bombeo en el tornillo es donde se genera presión para superar la restricción impuesta por el cabezal. Generalmente esta zona tiene una profundidad de canal pequeña y se tiene de ella más conocimiento de cómo funciona, respecto a las otras dos, pues el material es completamente viscoso y se puede estudiar matemáticamente y comprobar experimentalmente con el fin de calcular el flujo de material a través de ésta.

1.11. Modelamiento matemático en el tornillo extrusor

El concepto se tomó de los estudios de modelamiento para extrusoras de arcilla.

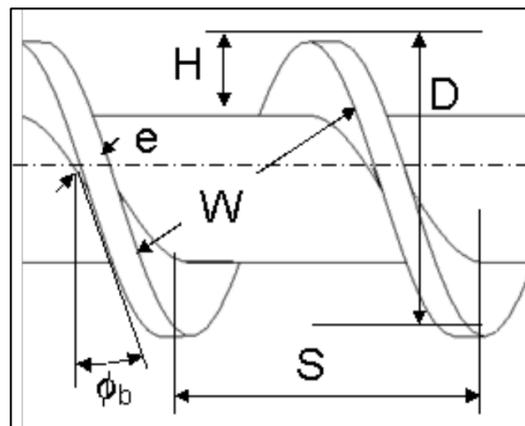
El flujo volumétrico (V); en realidad este flujo es un caudal, que está relacionado directamente con la velocidad del flujo y el área. Esta variable es la determinante en la velocidad de salida y la eficiencia.

Se debe establecer que para un buen transporte del material el coeficiente de fricción del barril (μ_B) o cilindro debe ser menor que el coeficiente de fricción del tornillo μ_S ; en caso contrario, el flujo de material no existiría, es por ésto que el interior del cilindro debe cumplir con la característica mecánica de tener un acabado superficial tipo espejo. Se considera que el tornillo se encuentra en un constante movimiento y que el cilindro permanece estático.

Todos los tornillos extrusores están compuestos por una serie de partes, las cuales serán de gran utilidad en el desarrollo de los modelos:

- Espesor de filete (e): considerado como el ancho de cada uno de los filetes que compone el tornillo extrusor. La normalización establece que se debe utilizar un espesor de $0.1 D$ como mínimo.
- Diámetro nominal del tornillo (D): correspondiente al diámetro exterior del mismo.

Figura 36. **Geometría de un tornillo extrusor**

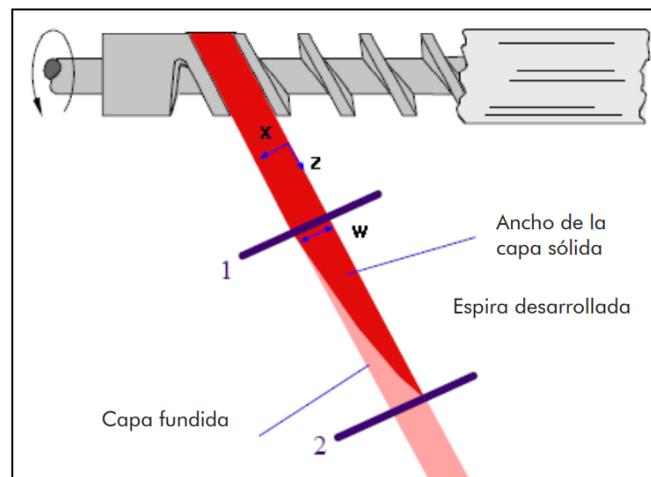


Fuente: Gutiérrez y Bornacelli (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo.*

- Paso diametral (S): es la distancia consecutiva entre dos puntos del filete.
- Altura del filete (H): es la profundidad máxima del canal, desde el punto más alto del filete hasta el diámetro nominal del tornillo o diámetro de eje.
- Ángulo de paso ϕ_B : el tornillo tiene un paso, cuyo valor es generalmente cercano al diámetro D . El ángulo de desarrollo helicoidal del tornillo, es decir, el ángulo de la hélice en la superficie del cilindro.

Se puede calcular considerando una espira del tornillo extrusor desarrollada como se observa en la figura 37 y de esta manera, por medio de su desarrollo, obtener el ángulo de paso.

Figura 37. **Desarrollo de una espira de un tornillo**



Fuente: Gutiérrez y Bornacelli (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo.*

Donde DE es el desarrollo de la espira y πD el perímetro. El ángulo de desarrollo helicoidal se define así:

$$\phi_B = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi * D}\right) \quad (\text{Ec. 8})$$

- Ancho del canal (W): es la distancia medida entre un determinado punto de un filete y el correspondiente de uno inmediato.

$$W = (S * \cos \phi_B) - e \quad (\text{Ec. 9})$$

- Angulo de paso de la raíz del tornillo ϕ_S : medido desde el diámetro interno del tornillo.

$$\phi_S = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi (D-2H)}\right) \quad (\text{Ec. 10})$$

- Angulo de paso medio ($\bar{\phi}$) : es la relación entre el paso diametral, el diámetro nominal y la altura del filete.

$$\bar{\phi} = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi (D-H)}\right) \quad (\text{Ec. 11})$$

1.11.1. Modelamiento matemático del modelo de presión

El modelo de presión considera principalmente dos flujos, los cuales han de ser tenidos en cuenta para el modelamiento matemático del problema: el flujo de arrastre (\dot{V}_a), debido a la fricción del material entre la superficie del barril y las hélices del tornillo. Este flujo es el responsable del transporte del material desde la tolva alimentadora hasta el cabezal. El segundo flujo considerado, es el de

presión o de retroceso (\dot{V}_p), opuesto al anterior y generado por la presión originada en el cabezal de la máquina extrusora, específicamente por la boquilla o por el plato rompedor; estos dos flujos son los encargados de darle forma al flujo volumétrico en la máquina extrusora.

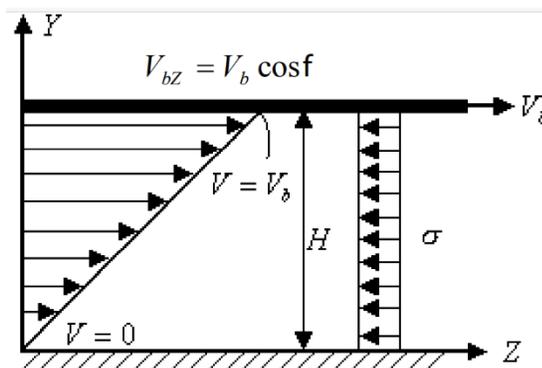
$$\dot{V} = \dot{V}_a - \dot{V}_p \quad (\text{Ec. 12})$$

1.11.2. Flujo de arrastre

El flujo de arrastre tiene lugar debido a que el material fundido en los canales del tornillo se adhiere a las paredes internas del cilindro y al propio tornillo en rotación. Se considera un flujo de arrastre donde el cambio de presión $\Delta P = 0$ para un fluido newtoniano. La velocidad del barril o estator está definida como:

$$V_{bz} = V_b \cos \phi \quad (\text{Ec. 13})$$

Figura 38. Perfil de velocidades para el flujo de arrastre



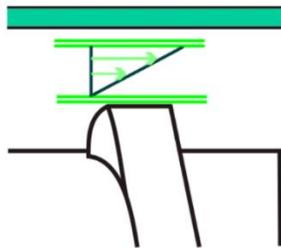
Fuente: Gutiérrez y Bornacelli (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo.*

De la figura 38 se puede observar que el flujo volumétrico se analiza bidimensionalmente (plano YZ), para facilidad de análisis y cálculo. Se supone el caso en que la velocidad del tornillo es cero y el barril posee velocidad, llamada velocidad del barril (V_b), la velocidad de flujo se incrementa en las proximidades del barril. El esfuerzo de corte es contrario al sentido de la velocidad debido a que estas son inversamente proporcionales.

1.11.3. Ley de Newton para fluidos newtonianos (estudio de la viscosidad)

La viscosidad es una de las más importantes variables a tomar en cuenta. En la fig. 39. se consideran dos láminas paralelas, separadas a una distancia (Y) entre las cuales se encuentra un fluido de viscosidad (η) . En el tiempo $t = 0$, donde el sistema se encuentra en reposo la placa superior se pone en dirección (Z) a una velocidad constante (V) , debido a la aplicación de una fuerza (F) . Con el transcurso del tiempo el fluido cobra un movimiento y finalmente alcanza un perfil de velocidades en un estado estacionario, relacionando la velocidad con la fuerza como se muestra en la figura 39:

Figura 39. Perfil de velocidades



Fuente: Gutiérrez y Bornacelli (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo.*

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{V}{Y} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde F/A se denomina el esfuerzo de corte (σ), A el área de la placa en contacto con el fluido. El esfuerzo cortante (σ_{YX}) se propagará en función de X , debido a un movimiento en dirección X , el cambio de velocidades que presenta el fluido en X se presenta como:

$$\sigma_{YX} = \eta \frac{\partial V}{\partial Y} \quad (\text{Ec. 15})$$

Además, se tiene que el cambio en la velocidad, es un cambio en la distancia (L) sobre el tiempo (t), obteniendo:

$$\frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\Delta V}{\Delta X} = \frac{\Delta L / \Delta t}{\Delta X} = \frac{\Delta L / \Delta Y}{\Delta t} = \frac{\dot{\gamma}}{\Delta X} = \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde $\frac{\Delta L / \Delta Y}{\Delta t}$ representa la velocidad de deformación. Si se sustituye la ecuación (15) en la ecuación (16) se obtiene la ley de Newton de la viscosidad para fluidos newtonianos.

$$\sigma_{YX} = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 17})$$

1.11.4. Velocidad resultante

Este modelo considera tres velocidades diferentes las cuales se experimentan en la relación entre el tornillo extrusor y el cilindro barril. La velocidad del fluido será denominada (V_a), la velocidad del tornillo relativa al barril (V_b) y la velocidad del canal (V_c). Como anteriormente se mencionó, el barril se encuentra en un estado estacionario respecto al tornillo, que genera un

gradiente de velocidad en la película fundida situada entre la capa sólida y la superficie del cilindro.

Se supone que el tornillo se encuentra en estado estacionario y el que gira sería el cilindro. La superficie del cilindro se moverá a una velocidad tangencial de acuerdo a:

$$V_b = \pi * D_b * N \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde D_b es el diámetro del barril o cilindro y N la frecuencia de la rotación dada en rpm – rps . El estado estacionario se mantiene, porque el fluido es arrastrado por la superficie del cilindro, hacia la parte posterior del canal, mientras que la capa sólida se mueve a una velocidad constante en la interface, debido a su reagrupación continua. Esta velocidad debe ser descompuesta en sus dos componentes respecto a los ejes x y z :

$$V_{bx} = V_b * \sin \theta_b \quad (\text{Ec. 19})$$

$$V_{bz} = V_b * \cos \theta_b \quad (\text{Ec. 20})$$

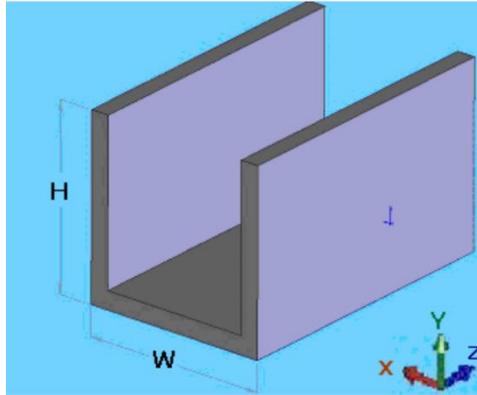
El fluido se moverá a una velocidad V_{SZ} la cual tiene su componente V_{SX} . Entonces la velocidad relativa entre la superficie del barril y el fluido está definida por:

$$V_j = V_b - V_{SZ} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$(V_j - V_j)^{1/2} (V_b^2 + V_{SZ}^2 - 2V_b V_{SZ} \cos \theta) \quad (\text{Ec. 22})$$

La velocidad de cizalladura ($\dot{\gamma}$) está relacionada por V_j/δ , donde δ es el espesor de la película fundida.

Figura 40. **Sistema de coordenadas en el canal del tornillo**



Fuente: Gutiérrez y Bornacelli (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo.*

1.11.5. Ecuación del cambio de presión en una máquina extrusora de plástico

En el capítulo anterior se explica la Ley de Newton de la viscosidad para Fluidos Newtonianos, la que será el punto de partida para encontrar la ecuación del cambio de presión en la máquina extrusora. Integrando la velocidad a ambos lados se obtiene:

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dY} \rightarrow dV = \dot{\gamma}dY \quad (\text{Ec. 23})$$

$$V = \dot{\gamma}Y + c_1 \quad (\text{Ec. 24})$$

Al evaluar $Y = 0$ y $V = 0$, se obtiene que $c_1 = 0$; cuando $Y = H$, se halla:

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{H} \quad (\text{Ec. 25})$$

En términos generales:

$$\dot{V} = \bar{V}A \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde

$$A = WH$$

(\dot{V}) es el flujo volumétrico

(\bar{V}) la velocidad media

(A) el área

(W) el ancho del canal

(H) la altura del canal.

Esfuerzo de corte (σ) en un fluido Newtoniano:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 27})$$

$$\sigma = \eta \frac{dV}{dY} = C_o \quad (\text{Ec. 28})$$

Integrando ambos lados de la ecuación, se obtiene:

$$\eta V = C_o Y + C_1 \quad (\text{Ec. 29})$$

Al evaluar $V = 0$, $Y = 0$ se obtiene que $C_1 = 0$

$$V_z = \frac{C_o}{\eta} Y \quad (\text{Ec. 30})$$

Si se evalúa $Y = H$, $V_z = V_{bz}$, se tiene:

$$V_{bz} = \frac{C_o}{\eta} H \quad C_o = \frac{V_{bz}}{H} \eta \quad (\text{Ec. 31})$$

Al reemplazar la ecuación (30) en la ecuación (31) se obtiene la velocidad en el eje Z:

$$V_z = \frac{V_{bz}}{H} Y \quad (\text{Ec. 32})$$

Por medio del teorema de Navier Stokes (Anexo), se halla la velocidad media:

$$\bar{V} = \frac{\int_0^H \frac{V}{H} dY}{\int_0^H dY} = \frac{V_{bz}}{2} \quad (\text{Ec. 33})$$

Se reemplaza en la ecuación (26) encontrando la velocidad de arrastre:

$$\dot{V}_a = \frac{V_{bz}}{2} (WH) F_d \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde (F_d) , es el factor de dimensión y está definido por:

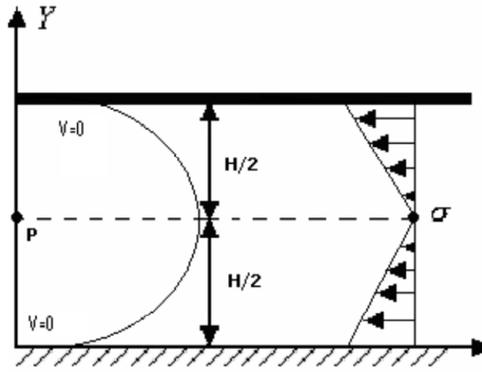
$$F_d = \left(1 - 0.571 \frac{H}{W} \right) \quad (\text{Ec. 35})$$

Reemplazando (V_{bz}) en la ecuación (10-27) se tiene:

$$\dot{V}_a = \frac{1}{2} V_b \cos \theta_b (WH) F_d \quad (\text{Ec. 36})$$

Para simplificar la teoría se hacen algunas suposiciones tales como asumir, que el diámetro del tornillo es mucho mayor, que la profundidad del canal ($H \ll D$), así mismo se supone que el fondo del canal y el cilindro, son dos placas paralelas fijas.

Figura 41. Perfil de velocidades para el flujo de presión



Fuente: Gutiérrez y Bornacelli (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo.*

Debido al efecto de la presión ejercida por el tornillo sobre el material, obliga al mismo a fluir entre las placas paralelas fijas, el cilindro y el tornillo; las otras consideraciones hechas son:

- La velocidad del fluido es igual a cero en la pared del canal y en las cercanías del tornillo.
- El fluido es independiente del tiempo, es decir, que no cambia con el tiempo.
- El patrón de flujo es constante a todo lo largo del canal.
- El flujo es isotérmico.

Se debe partir de la ecuación del movimiento, la cual se resume a:

$$-\frac{dP}{dz} - \frac{d\sigma_{YZ}}{dY} = 0 \quad (\text{Ec. 37})$$

Esfuerzo de corte (σ) en un Fluido Newtoniano

$$\sigma = -\dot{\gamma}\eta = \frac{dV_z}{dY}\eta \quad (\text{Ec. 38})$$

Al despejar la ecuación (37) el esfuerzo cortante e integrando a ambos lados se obtiene

$$\sigma_{YZ} = \frac{dP}{dZ}dY + C_1 \quad (\text{Ec. 39})$$

Al evaluar $Y = 0$, $\sigma_{YZ} = 0$, se obtiene que $C_1 = 0$. Al reemplazar la ecuación (38) en la ecuación (39), despejando e integrando a ambos lados:

$$V_z = -\frac{dP}{dZ}\frac{Y^2}{2\eta} + \frac{C_2}{\eta} \quad (\text{Ec. 40})$$

Evaluando $V_z = 0$, se obtiene:

$$C_2 = \frac{dP}{dZ}\frac{H^2}{8\eta} \quad (\text{Ec. 41})$$

Reemplazando (41) se puede organizar la ecuación:

$$V_z = \frac{dP}{dZ}\frac{H^2}{8\eta}\left[1 - \frac{4Y^2}{H^2}\right] \quad (\text{Ec. 42})$$

Por medio del teorema de Navier Stokes se halla la velocidad media:

$$\bar{V}_Z = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} V_Z dY}{2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} dY} \quad (\text{Ec. 43})$$

Luego de resolver y evaluar se reemplaza en la ecuación (26) obteniendo:

$$\dot{V}_p = \frac{dP}{dZ} \frac{1}{12} \frac{WH^3}{\eta} F_p \quad (\text{Ec. 44})$$

Donde F_p se define como:

$$F_p = \left(1 - 0.625 \frac{H}{W}\right) \quad (\text{Ec. 45})$$

Teniendo los dos flujos involucrados en el transporte del material y al reemplazar las ecuaciones (44) y (36), en la ecuación (13), se obtiene la ecuación para un flujo unidireccional, de un canal desarrollado para un Fluido Newtoniano, de acuerdo con el paper Experiments and simulations with barrier screws.

El modelo de presión hará uso de esta última ecuación, para el cálculo de la variación de la presión dentro del canal del tornillo, en donde (W) varía de acuerdo con el perfil de fusión, y (H) puede permanecer constante en las zonas cilíndricas del tornillo y variar en la zona de compresión o transición.

$$\dot{V} = \frac{1}{2} VWHF_d \cos \varphi_b - \frac{1}{12} \frac{WH^3 F_p}{\eta} \frac{dP}{dZ} \quad (\text{Ec. 46})$$

En los tornillos de barrena, (W) y (H) están definidos por el diseño inicial del tornillo y varían en cada punto del mismo. En el programa de modelamiento del perfil de presión, se debe obtener los datos de (W) y (H) en cada espira, a

partir de la tercera vuelta para calcular el aumento de presión que está dado por $\left(\frac{dP}{dZ}\right)$:

$$\frac{dP}{dZ} = \frac{6\eta(VWHF_d \cos \varphi_b - 2\dot{V})}{WH^3F_p} \quad (\text{Ec. 47})$$

Al integrar $\left(\frac{dP}{dZ}\right)$ en función de una longitud se obtendría el cambio de presión a lo largo del tornillo extrusor, de tal manera que, se pueda observar cómo la presión cambia a medida que se avanza en la longitud del tornillo de la de a cuerdo a:

$$\Delta P = \frac{-12(N_e)\pi D\eta}{WH^3 \sin \varphi_m F_p} * M_K - 0.5\pi D \cos \varphi_m H W F_d \quad (\text{Ec. 48})$$

Donde N_e es el número de espiras evaluadas, y φ_m es el ángulo de la hélice evaluado en la altura media del canal, calculado de esta manera:

$$\varphi_m = \tan^{-1} \left[\frac{S}{\pi(D-H)} \right] \quad (\text{Ec. 49})$$

Se utiliza φ_m para mejorar los resultados, ya que la forma geométrica del canal no es rectangular, es trapezoidal.

1.11.5.1. Cálculo del diámetro nominal del tornillo de una extrusora de plástico

El diámetro nominal del tornillo extrusor es una de las variables de entrada necesarias, para realizar el modelo de presión. Como en casos anteriores,

existen diversas formas de realizar el cálculo y son necesarias de algunas suposiciones para eliminar las restricciones de cálculo.

En esta metodología se plantea una forma relativamente sencilla para realizar el cálculo matemático del diámetro del tornillo extrusor.

Es necesario tener en cuenta estos planteamientos:

- Se considera un flujo volumétrico exento de pérdidas y de presión, por ende, el flujo volumétrico es netamente de arrastre, definido en la ecuación (33).
- La velocidad relativa tangencial V_{bz} del barril debe ser menor que 0.8m/s para evitar las alzas en las velocidades de cizalladura, que afectarían directamente al material.
- Se puede suponer el paso diametral igual al diámetro, obteniendo un ángulo de hélice igual a 0.9529.
- Si el paso diametral es diferente al diámetro se debe definir el paso en función del diámetro $S = f(D)$
- El ancho del canal se definió en la ecuación (9), el espesor definido como 0.1 D para tornillos con paso igual al diámetro.

El ancho del canal en función del diámetro queda definido así:

$$\begin{aligned}
W &= S * \cos \phi_b - e \\
W &= D * \cos \phi_b - \frac{D}{10} \\
W &= D * (0.9529) - 0.1D \\
W &= 0.8529D
\end{aligned}
\tag{Ec. 50}$$

La altura del filete en la zona de dosificación se refiere con el diámetro por medio de la ecuación 51:

$$0.0148D^{0.774} \leq H_D \leq 0.0415D^{0.774} \tag{Ec. 51}$$

El factor de dimensión calculado de la ecuación (10-28), corrige la suposición rectangular en el canal. Este factor puede ser asumido como $F_D = 0.96$.

Se tienen en cuenta cada una de las anteriores hipótesis y al reemplazar en la ecuación (36) del flujo volumétrico se encuentra el diámetro en función del flujo, como se expresa a continuación:

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \frac{1}{2} V_b * \cos \phi_B * W * H_D * F_D \\
\dot{V} &= 0.5 * \left(0.7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) * (0.9529) * (0.8529D) * (0.0267D^{0.774}) * (0.96) \\
\dot{V} &= 7.291 * 10^{-3} D^{1.774}
\end{aligned}
\tag{Ec. 52}$$

Al despejar el diámetro de la ecuación (10-45), se encuentra la relación en función del flujo volumétrico, del valor del diámetro del tornillo extrusor:

$$D = \left(\frac{\dot{V}}{7.291 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/1.774} \quad (\text{Ec. 53})$$

2. FASE TÉCNICO PROFESIONAL

En esta fase se procede a realizar todos los cálculos matemáticos con datos de pruebas experimentales y teóricos usando valores obtenidos de pruebas de reología de la mezcla a imprimir, se diseñó la maquina extrusora con un buen coeficiente de seguridad a través de fórmulas matemáticas, diseñando el mecanismo, par torsión requerido, velocidad de rotación, tipo y dimensionamiento de motor, material para fabricar, ajustes y montaje para las piezas empleando normas ISO.

2.1. Selección de diseño para modelado del tornillo extrusor

De acuerdo con la camisa del tornillo extrusor se seleccionó un diseño, de camisa combinada para la extrusora, consiguiendo con este diseño, un buen incremento de presión en la sección de compresión del tornillo, la geometría de la camisa en esta sección es de forma cónica y en la sección de alimentación y dosificación es de forma cilíndrica, otra característica importante es, no se altera la geometría del eje del extrusor logrando una buena resistencia a los esfuerzos de torsión producidos en él, debido a esto se definió un único diámetro de eje del tornillo extrusor (θ_{eje}) y los diámetros que cambian para las distintas secciones del tornillo son los de hélice ($\theta_{HA}-\theta_{HCD}$).

Se procede a seleccionar el diámetro del eje basado en una escala de una extrusora real, se parte con un diámetro definido:

$$\varnothing_{eje} = 20 \text{ mm}$$

Tomando en cuenta que la tinta a inyectar es a base de cemento y otros aditivos que la hacen ser de viscosidad muy parecida a la de la arcilla, se utilizaron las relaciones que gobiernan los diseños de las extrusoras de arcilla (extrusoras para pastas viscosas):

largo del eje del tornillo

$$L_{\text{eje}} / \phi_{\text{eje}} = 8.5 \quad (\text{Ec. 54})$$

Diámetro de Hélice en sección de alimentación

$$\phi_{\text{HA}} / \phi_{\text{eje}} = 2.3 \quad (\text{Ec. 55})$$

Diámetro de hélice en sección de compresión y dosificación

$$\phi_{\text{HCD}} / \phi_{\text{eje}} = 2.05 \quad (\text{Ec. 56})$$

Paso del tornillo en sección de alimentación y compresión

$$\text{Paso}_{\text{A-C}} / \phi_{\text{eje}} = 1.403 \quad (\text{Ec. 57})$$

Paso del tornillo en sección de dosificación

$$\text{Paso}_{\text{D}} / \phi_{\text{eje}} = 2.8 \quad (\text{Ec. 58})$$

Donde:

L_{eje} = largo del eje del tornillo

ϕ_{eje} = diámetro del eje del tornillo

ϕ_{HA} = diámetro de la hélice del tornillo en la sección de alimentación

ϕ_{HCD} = diámetro de hélice en sección de compresión y dosificación

ϕ_{HC} = diámetro de hélice en sección de compresión

$\text{Paso}_{\text{A-C}}$ = paso del tornillo en sección de alimentación y compresión

Paso_{D} = paso del tornillo en sección de dosificación

Utilizando las relaciones se obtienen los datos para el modelado del tornillo extrusor:

$$L_{\text{eje}} = 8.5 * \phi_{\text{eje}} = 8.5 * 20\text{mm} = 170\text{mm}$$

$$\phi_{\text{HA}} = 2.3 * \phi_{\text{eje}} = 2.3 * 20\text{mm} = 46\text{mm}$$

$$\phi_{\text{HCD}} = 2.05 * \phi_{\text{eje}} = 2.05 * 20\text{mm} = 41\text{mm}$$

$$\text{Paso}_{\text{A-C}} = 1.403 * \phi_{\text{eje}} = 1.403 * 20\text{mm} = 28.06\text{mm}$$

$$\text{Paso}_{\text{D}} = 2.8 * \phi_{\text{eje}} = 2.8 * 20\text{mm} = 56\text{mm}$$

$$\text{Relación de compresión} = \frac{26}{21} = 1.24$$

El ángulo de hélice con el que se trabaja es el ángulo de hélice en la sección de alimentación, se usa la ecuación:

$$\tan \varphi = \frac{\text{Paso}_A}{\pi * \varnothing_{HA}}$$

$$\tan \varphi = \frac{28.06}{\pi * 46}$$

$$\varphi = \tan^{-1} 0.1942 = 11^\circ = 0.19 \text{ Rad}$$

La separación entre la camisa y la hélice (δ) se calcula de acuerdo a la ecuación 59.

$$\delta / \varnothing_{eje} = 0.0075 \quad (\text{Ec. 59})$$

Utilizando esta relación se calcula la separación

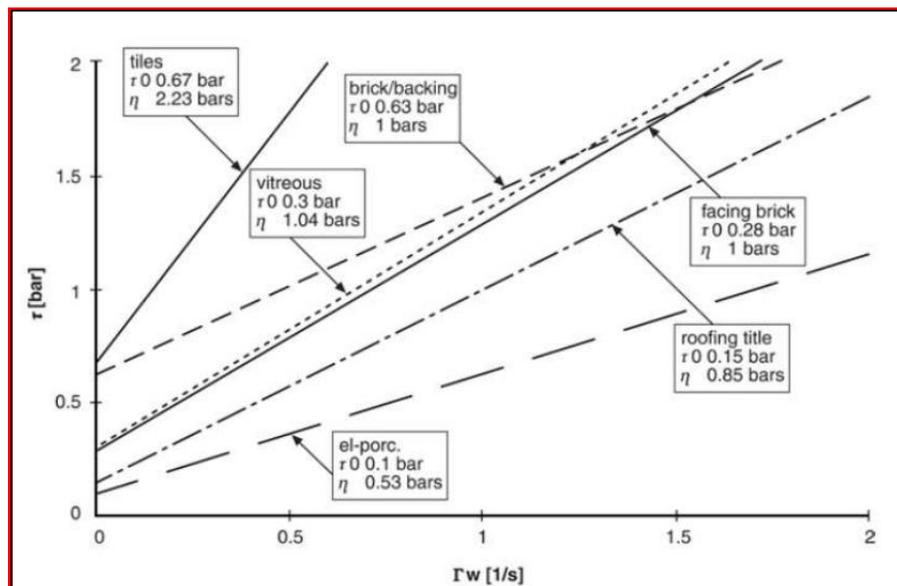
$$\delta = 0.0075 * \varnothing_{eje} = 0.0075 * 30\text{mm} = 0.15\text{mm}$$

2.2. Reología de la mezcla

En la figura 40 se observa la curva de diferentes materiales usados para fabricar muros, se puede observar el esfuerzo cortante que debe vencer los distintos materiales para hacerlos fluir, dicho valor es donde la curva intercepta en el eje (Y), aquí las revoluciones por segundo, tienen un valor igual a 0, dicho esfuerzo es el esfuerzo cortante inicial (τ_0) se puede observar como los distintos materiales requieren esfuerzos mayores o menores para hacerlos fluir, y la pendiente indica qué tan difícil es hacer fluir el material después de vencer el esfuerzo cortante, en materiales como el tiles, va creciendo mayormente el esfuerzo cortante a vencer para mantenerse en movimiento, mediante van aumentando las rps del tornillo.

Para el diseño del extrusor de este trabajo se seleccionó el fluido tipo brick/bracking, este material tiene propiedades reológicas, más parecidas a la mezcla de cemento que inyecta la extrusora, con un valor de esfuerzo cortante inicial de 63,000 Pa-sg y una viscosidad de 100,000 Pa-sg como se puede observar en la figura 42.

Figura 42. **Curva (Esfuerzo cortante – Rps) de compuestos de cerámicas fabricados en arcilla**



Fuente: Velilla (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla*. Consultado el 28 de marzo de 2023. ¿Recuperado de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/116/92694388.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

2.3. Modelo del transporté del fluido

Tomando en cuenta el fluido como newtoniano donde la viscosidad y la densidad se asumen como constantes a lo largo del proceso, se tienen 3

ecuaciones que gobiernan la cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas, en función de los gradientes de velocidad, estas ecuaciones son las de:

Componente angular, radial y axial, que tiene el movimiento del fluido al desplazarse en un canal cilíndrico, y se presentan en las siguientes Ecuaciones (ecuaciones Navier-Stokes).

- Componente radial

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * v_r \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (\text{Ec. 60})$$

- Componente angular

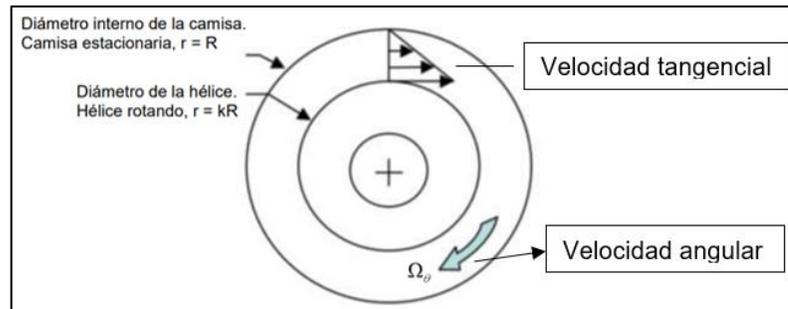
$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_\theta + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * v_\theta \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (\text{Ec. 61})$$

- Componente axial

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (\text{Ec. 62})$$

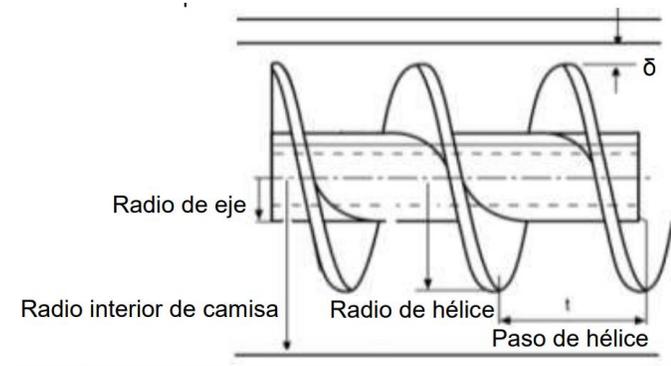
El estudio se presenta como se muestra en la figura 43

Figura 43. **Esquema de flujo laminar en el tornillo extrusor**



Fuente: Velilla (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla*. Consultado el 28 de marzo de 2023. Recuperado de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/116/92694388.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Figura 44. **Vista para nomenclatura del tornillo extrusor**



Fuente: Velilla (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla*. Consultado el 28 de marzo de 2023. Recuperado de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/116/92694388.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Se considera para el estudio del movimiento del fluido:

- Fluido newtoniano, con viscosidad constante
- Flujo Laminar (estado estable)
- Flujo incompresible $\rho = \text{cte}$, $\text{div } \vec{V} = 0$
- Flujo con simetría de revolución: Significa que el perfil de velocidades será siempre el mismo para cualquier plano que pase por el eje del conducto. (la velocidad no varía con el ángulo θ) $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$
- Sistema continuo.
- Flujo desarrollado hidrodinámicamente bidireccional $v_r = 0$
- Flujo estacionario (estado estable). El cambio de velocidades y otras magnitudes no cambiarán a lo largo del tiempo $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

Se reducirán las ecuaciones de las componentes cilíndricas del fluido cancelando derivadas parciales, esto consiste en definir la significancia independiente de cada una de las variables (v_θ v_r v_z) y luego relacionarlas en las derivadas parciales, la significancia de cada variable se tomara como se indica en la tabla IV.

Tabla IV. **Criterio de significancia de componentes de velocidad**

$v_r : \Delta$	$\hat{v}_r : \Delta$	$\hat{\theta} : 1$
$v_\theta : 1$	$\hat{v}_\theta : 1$	$\hat{r} : \Delta$
$v_z \approx 1$	$\hat{v}_z \approx 1$	$\hat{z} \approx 1$
$\frac{\hat{v}_r}{\hat{r}} \rightarrow \frac{\Delta}{\Delta} \rightarrow 1$	$\frac{\hat{v}_\theta}{\hat{r}} \rightarrow \frac{1}{\Delta}$	$\frac{\hat{v}_z}{\hat{r}} \rightarrow \frac{1}{\Delta}$
$\frac{\hat{v}_r}{\hat{\theta}} \rightarrow \frac{\Delta}{1} \rightarrow \Delta$	$\frac{\hat{v}_\theta}{\hat{\theta}} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$	$\frac{\hat{v}_z}{\hat{\theta}} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$
$\frac{\hat{v}_r}{\hat{z}} \rightarrow \frac{\Delta}{1} \rightarrow \Delta$	$\frac{\hat{v}_\theta}{\hat{z}} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$	$\frac{\hat{v}_z}{\hat{z}} \rightarrow \frac{1}{1} \rightarrow 1$

Fuente: Velilla (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla*. Consultado el 28 de marzo de 2023. Recuperado de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/116/92694388.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Gracias al criterio de significancia se pueden eliminar varias variables para encontrar una solución analítica, quedando solo la ecuación con las variables significativas, en cuanto a derivadas parciales.

Se definirá la magnitud de significancia de cada derivada parcial, que será tomada en cuenta, en las variables el valor 1 es el valor alto en significancia y Δ bajo en significancia, por lo que las derivadas parciales a tomar en cuenta en la ecuación son las que generan un orden de significancia $\frac{1}{\Delta}$.

$$\frac{1}{\Delta} \gg 1 \gg \Delta$$

Se considera que $v_\theta: 1$ debido a que la mayor cantidad de movimiento del hormigón se da en forma cilíndrica (angular) a través de su paso por las hélices describiendo una espiral, $v_z \approx 1$ debido a que es la velocidad de avance o de arrastre en línea recta de la componente z (eje del tornillo), esta es la velocidad con la que sale el hormigón de la boquilla del extrusor, pero no es más significativa que v_θ . $v_r: \Delta$, ya que la velocidad en la dirección radial dentro del cilindro tiende a ser nula, la aceleración es $\frac{\partial v}{\partial t}$ (derivada de la velocidad) por lo cual $\partial v_r: \Delta$ difícilmente existirá aceleración en esta dirección (r) si las velocidades son mínimas. $\partial v_\theta: 1$ en esta dirección (angular) el hormigón se acelera debido a la variación del paso de las hélices. $\partial v_z \approx 1$, hay aceleración en esta dirección igualmente por el paso de las hélices de la extrusora.

Para simplificar la ecuación de la componente radial se tiene

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r +$$

$$\mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * v_r \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right]$$

La primera expresión se cancela por la condición de estado estable (la velocidad del fluido en cualquier punto no varía con el tiempo), se cancelan las derivadas parciales por criterio de significancia y las fuerzas gravitacionales en la dirección radial y en todas las direcciones son despreciables, resulta la ecuación para la componente radial.

$$-\rho \frac{v_\theta^2}{r} = \frac{\partial p}{\partial r} \quad (\text{Ec. 63})$$

Para simplificar la ecuación de la componente angular se tiene

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta +$$

$$\mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * v_\theta \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right]$$

El primer término se cancela debido a la condición de estado estable de la velocidad angular en el tiempo, el segundo y cuarto término se cancelan debido a que v_r se considera insignificante, igualmente los cambios de presión y velocidad angular frente a los cambios en θ son despreciables, no hay fuerzas gravitacionales en θ y para las derivadas parciales se cancelan por criterio de significancia, por lo cual queda la expresión para la componente angular.

$$\mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * v_{\theta} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 64})$$

Para simplificar la ecuación de la componente axial se tiene:

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{v_{\theta}^2}{r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right]$$

Se cancela el primer término debido a la condición de estado estable de la velocidad axial en el tiempo, se cancela el segundo término debido a que v_r es despreciable, no hay fuerza gravitacional en la componente z y se usan los mismos criterios de significancia para eliminar las derivadas parciales y la velocidad axial frente a los cambios en θ son despreciables. de esto se obtiene la ecuación para la componente axial.

$$- \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 64})$$

De la ecuación de la componente radial (62) se puede obtener la presión en función del radio y la velocidad tangencial al resolver la coordenada tangencial, esta ecuación se utilizó en este trabajo para obtener la presión que ejerce el fluido.

De la ecuación de la componente axial (64), se puede obtener la velocidad axial o de arrastre a lo largo del eje del extrusor, con esta velocidad se podrá calcular el flujo másico del hormigón de salida en la boquilla del extrusor, esta velocidad se obtiene al reemplazar los valores de presión que resultan al

desarrollar la ecuación de la componente radial, sin embargo, no será necesaria dicha ecuación en este trabajo.

Por último, la ecuación que será útil para el desarrollo de este proyecto, es la ecuación de la componente angular (63), esta expresión sirve para calcular la potencia requerida por el motor de la extrusora, dado que a través de esta ecuación se calcula la velocidad tangencial v_θ (velocidad más significativa del fluido en la extrusora), con la cual se calcula el esfuerzo cortante, del esfuerzo cortante, se calcula la fuerza necesaria para hacer fluir el material, con esta fuerza se halla el par torsión y posteriormente la potencia del motor que hará girar el tornillo extrusor.

$$v_\theta \rightarrow \tau_{r\theta} \rightarrow F \rightarrow T \rightarrow P$$

Desarrollando la ecuación (63) componente angular, integrando 2 veces se obtiene:

$$\int \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * v_\theta \right) dr = 0$$

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} * v_\theta \right) = C_1$$

$$rv_\theta = \frac{r^2}{2} C_1 + C_2$$

$$v_\theta = \frac{r}{2} C_1 + \frac{1}{r} C_2 \quad (\text{Ec. 65})$$

A continuación, se aplican las condiciones de frontera del fluido para encontrar las constantes C_1 y C_2 , utilizando la velocidad tangencial y nivel en radio del extrusor del fluido, la fig. 43 muestra un diagrama acerca de esto.

Condición de frontera #1: cuando $r = R$, $v_\theta = 0$.

Condición de frontera #2: cuando $r = kR$, $v_\theta = \Omega_\theta kR$

Donde $k = 0.9935$ (coeficiente holgura entre la camisa y hélice)

Implementación de condición de frontera #1 en la ecuación (65)

$$v_\theta = \frac{r}{2}C_1 + \frac{1}{r}C_2$$

$$0 = \frac{R}{2}C_1 + \frac{1}{R}C_2$$

$$C_2 = -\frac{R^2}{2}C_1 \quad (\text{Ec. 66})$$

Implementación de condición de frontera #2 en la ecuación (65)

$$v_\theta = \frac{r}{2}C_1 + \frac{1}{r}\left(-\frac{R^2}{2}C_1\right)$$

$$\Omega_\theta kR = \frac{kR}{2}C_1 - \frac{1}{kR}\left(\frac{R^2}{2}C_1\right)$$

$$C_1 = \frac{\Omega_\theta kR}{\left(\frac{kR}{2} - \frac{R}{2k}\right)} \quad (\text{Ec. 67})$$

Reemplazando las ecuaciones equivalentes de los valores C_1 Y C_2 en la ecuación de la velocidad tangencial (63), se obtiene la ecuación final que describe la velocidad más significativa del fluido dentro de la extrusora.

$$v_{\theta} = \frac{r}{2} \frac{\Omega_{\theta} k R}{\left(\frac{kR}{2} - \frac{R}{2k}\right)} + \frac{1}{r} \left[-\frac{R^2}{2} \frac{\Omega_{\theta} k R}{\left(\frac{kR}{2} - \frac{R}{2k}\right)} \right]$$

$$v_{\theta} = \Omega_{\theta} k R \left[\frac{r}{kR - \frac{R}{k}} - \frac{R^2}{rkR - \frac{Rr}{k}} \right] \quad (\text{Ec. 68})$$

Con la ecuación de esta velocidad se procede a determinar el esfuerzo cortante (τ_{θ}) en el radio que llena la cama del fluido, de acuerdo con la ecuación de fluidos newtonianos, y considerando un fluido tipo brick/backing para la arcilla.

$$\tau_{r\theta} = -\mu \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) + \tau_{\theta}$$

El segundo término de esta ecuación se cancela dado que, se considera despreciable la magnitud de esta derivada parcial.

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\Omega_{\theta} k R \left(\frac{r}{kR - \frac{R}{k}} - \frac{R^2}{rkR - \frac{Rr}{k}} \right)}{r} \right] + \tau_{\theta}$$

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \Omega_{\theta} k R \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{kR - \frac{R}{k}} - \frac{R^2}{r^2 kR - \frac{Rr^2}{k}} \right] + \tau_{\theta}$$

El primer término de la derivada se cancela, es una constante, derivando y acomodando las variables, se obtiene la ecuación que describe el esfuerzo cortante del fluido en la extrusora.

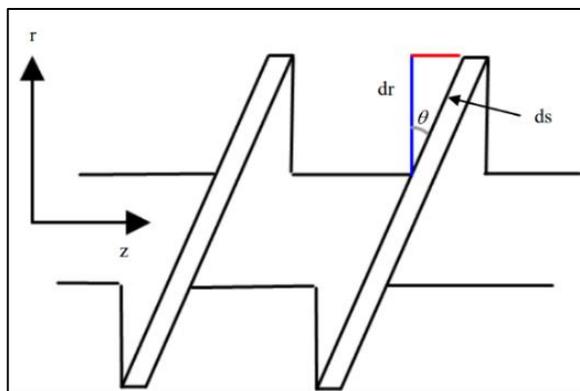
$$\tau_{r\theta} = -\mu r \Omega_{\theta} k R \frac{2R^2}{r^3 k R - \frac{Rr^3}{k}} + \tau_o$$

$$\tau_{r\theta} = -\mu \Omega_{\theta} k \frac{2R^2}{r^2 k - \frac{r^2}{k}} + \tau_o \quad (\text{Ec. 69})$$

A continuación, se deduce la ecuación para calcular la fuerza generada en toda el área superficial de la hélice de la extrusora.

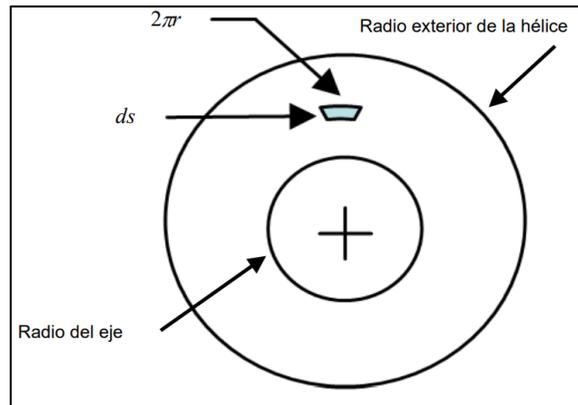
$$dF = \tau_{r\theta} dA_{\text{contacto}} \quad (\text{Ec. 70})$$

Figura 45. **Vista corte lateral de tornillo extrusor**



Fuente: Velilla (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla*. Consultado el 28 de marzo de 2023. Recuperado de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/116/92694388.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Figura 46. **Diferencial de área de la superficie de la hélice (vista frontal)**



Fuente: Velilla (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla*. Consultado el 28 de marzo de 2023. Recuperado de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/116/92694388.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

El esfuerzo cortante se aplica en toda el área superficial de la hélice del tornillo, es por esto, que se calcula el área resultante de la suma de todas las espirales, $(2 \cdot n)$, donde n es el número de vueltas, que conforman la longitud completa del tornillo; se multiplica por 2, para tomar en cuenta el área de las 2 caras de la hélice, se puede observar las fig. 45 y 46, que ayuda a describir la ecuación de diferencial de área, donde se aplica esfuerzo cortante.

$$dA = 2n2\pi r ds \quad (\text{Ec. 71})$$

Donde:

$$ds = \frac{dr}{\cos \theta}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$dA = \frac{4n\pi r_{\text{ext}} - r_{\text{eje}} dr}{\cos \theta}$$

Sustituyendo valores en ecuación (79) se obtiene

$$dF = - \left[\mu\Omega_{\theta}k \frac{2R^2}{r^2k - \frac{r^2}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi r_{\text{ext}} - r_{\text{eje}} dr}{\cos \theta} \right]$$

En el esfuerzo cortante se toma $r = R$, dado que en el radio interno de la camisa, (radio del cilindro) es donde el esfuerzo cortante que genera el fluido es máximo.

$$dF = - \left[\frac{2\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi r_{\text{ext}} - r_{\text{eje}} dr}{\cos \theta} \right]$$

Se integra para obtener el modelo matemático, que describe la fuerza aplicada al radio interno de la camisa, para obtener el máximo esfuerzo ejercido.

$$F = - \left[\frac{2\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi \left| \left(\frac{r^2}{2} - rr_{\text{eje}} \right) \right|_{r=R}}{\cos \theta} \right]$$

Reemplazando el valor de (r) se obtiene el modelo matemático, para la fuerza (F) que hace generar el esfuerzo cortante en las hélices.

$$F = - \left[\frac{2\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi \frac{R^2}{2} - Rr_{\text{eje}}}{\cos \theta} \right] \quad (\text{Ec. 71})$$

A continuación, se halla el modelo matemático, que describirá la par torsión del motor con el diámetro exterior de la hélice, para proceder a calcular la potencia del motor de la extrusora.

$$T = F * r_{helice} = - \left[\frac{2\mu\Omega_{\theta}k}{k-\frac{1}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi \frac{R^2}{2} - Rr_{eje}}{\cos \theta} \right] * r_{helice} \quad (\text{Ec. 72})$$

$$P = T * \Omega_{\theta} = -\Omega_{\theta} \left[\frac{2\mu\Omega_{\theta}k}{k-\frac{1}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi \frac{R^2}{2} - Rr_{eje}}{\cos \theta} \right] * r_{helice} \quad (\text{Ec. 73})$$

Donde Ω_{θ} es igual a la velocidad angular (N) (RPM), se procede a determinar la ecuación matemática, que describe la velocidad angular requerida para inyectar el flujo volumétrico de hormigón, dicho flujo, se logró determinar haciendo la prueba en una extrusora de jeringa (desplazamiento positivo con pistón) el cual es $Q = 2167 \text{ mm}^3/\text{min}$ se determinará, la ecuación a partir de la formula descrita por el investigador V.K.Savgorodny, en su libro, "Transformación de Plásticos", el flujo volumétrico de un extrusor horizontal en función de la velocidad angular (Ω_{θ}) y los 3 flujos del fluido en su paso por el extrusor (α, β, γ) se puede determinar a partir de la ecuación:

$$Q = \frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} * \Omega_{\theta} \quad (\text{Ec. 74})$$

$$\Omega_{\theta} = \frac{Q}{\left(\frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} \right)} \quad (\text{Ec. 75})$$

Donde:

α : flujo de arrastre (flujo producido por el husillo)

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos^2 \varphi}{2}$$

K: es la constante de forma de la cabeza perfiladora, esta constante se define como:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_1} + \sum \frac{1}{K_2} + \sum \frac{1}{K_n}}$$

K_1 : es la constante para canal cilíndrico:

$$K_1 = \frac{\pi * d^4}{128 * L_1}$$

Donde:

L_1 = longitud del canal

d = diámetro del canal

K_2 : es la constante para canal cónico

$$K_2 = \frac{3 * \pi * d_0^3 * d_1^3}{128 * L_2 * (d_0^2 + (d_0 * d_1) + d_1^2)}$$

Donde:

d_0 = diámetro de entrada

d_1 = diámetro de salida

L_2 = longitud del canal

β : flujo de presión (flujo en sentido opuesto al de arrastre).

$$\beta = \frac{m * h^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \sin \varphi * \cos \varphi}{12 * L}$$

Donde:

L: longitud del husillo (solamente la parte donde hay cresta)

m: número de canales del husillo

La función que proporciona Savgorodny no es válida, debido a que es para un husillo de canal uniforme (misma profundidad a lo largo del husillo).

Pero al ser una variación poco significativa, se tratará al husillo como que fuera uniforme, usando la profundidad en la zona de dosificación (profundidad del canal mínimo).

γ : es el flujo de filtración (perdida que se produce en la holgura δ).

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan \varphi}{10 * e * L}$$

Fuerza de gravedad se puede despreciar debido a la alta viscosidad del hormigón.

Conociendo los valores de:

- Diámetro interior del cilindro (d)

$$d = D + \delta$$

- Diámetro del husillo (D)

$$D = d - \delta$$

- Anchura de la cresta del filete (e)

$$e = (0.06 \rightarrow 0.12) * D$$

$$e = \theta_{HA} * 0.12 = 46 * 0.12 = 5.52\text{mm}$$

- Profundidad del canal (h) en la zona de compresión

$$h_c = (R_{HCD} + \delta) - R_{eje}$$

$$h_c = (20.5\text{mm} + 0.15\text{mm}) - 10\text{mm} = 10.65\text{mm}$$

- Angulo de la hélice en la zona de compresión

$$\tan \varphi = \frac{\text{Paso}_C}{\pi * \varnothing_{HC}}$$

$$\tan \varphi = \frac{28.06\text{mm}}{\pi * 41\text{mm}}$$

$$\varphi_C = \tan^{-1} 0.2178 = 12.29^\circ$$

Se utilizarán los valores del tornillo en la zona de compresión:

$$D = \varnothing_{HCD} = 41\text{mm}$$

$$h_c = 10.65\text{mm}$$

$$\varphi = 12.29^\circ$$

$$t = \text{Paso}_C = 28.06\text{mm}$$

$$e = 5.52\text{mm}$$

$L = \text{longitud del husillo} = 170 \text{ mm}$

$L_1 = 1,000 \text{ mm}$

$L_2 = 10 \text{ mm}$

$L_3 = 29.64 \text{ mm}$

$m = 1$

$\delta = 0.15 \text{ mm}$

$d_0 = 8 \text{ mm}$

$d_1 = 6 \text{ mm}$

Se obtiene:

Flujo de arrastre

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos^2 \varphi}{2} = \frac{\pi * 1 * 41 * 10.65 * \left(\frac{28.06}{1} - 5.52\right) * \cos^2 12.29^\circ}{2} = 14759.44 \text{ mm}^3$$

Flujo de presión

$$\beta = \frac{m * h^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \sin \varphi * \cos \varphi}{12 * L} = \frac{1 * 10.65^3 * \left(\frac{28.06}{1} - 5.52\right) * \sin 12.29 * \cos 12.29}{12 * 170} = 2.776 \text{ mm}^3$$

Flujo de filtración

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan \varphi}{10 * e * L} = \frac{\pi^2 * 41^2 * 0.15^3 * \tan 12.29}{10 * 5.52 * 170} = 0.0013 \text{ mm}^3$$

Constante para pérdidas en canal cilíndrico (manguera de transporte)

$$K_1 = \frac{\pi * d^4}{128 * L_1} = \frac{\pi * 8^4}{128 * 1000} = 0.1 \text{ mm}^3$$

Constante para canal cónico (boquilla en cabezal)

$$K_2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_0^3 \cdot d_1^3}{128 \cdot L_2 \cdot (d_0^2 + (d_0 \cdot d_1) + d_1^2)} = \frac{3 \cdot \pi \cdot 8^3 \cdot 6^3}{128 \cdot 10 \cdot (8^2 + (8 \cdot 6) + 6^2)} = 5.50 \text{ mm}^3$$

Constante para canal cónico (boquilla de extrusora)

$$K_3 = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_0^3 \cdot d_1^3}{128 \cdot L_3 \cdot (d_0^2 + (d_0 \cdot d_1) + d_1^2)} = \frac{3 \cdot \pi \cdot 41.3^3 \cdot 8^3}{128 \cdot 29.64 \cdot (41.3^2 + (41.3 \cdot 8) + 8^2)} = 42.66 \text{ mm}^3$$

Constante del total de perdidas

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_n}} = \frac{1}{\frac{1}{0.1} + \frac{1}{5.50} + \frac{1}{42.66}} = 0.098$$

Velocidad angular (ecu. 75) a la cual debe girar el tornillo para inyectar un flujo de $2167 \text{ mm}^3/\text{min}$.

$$\Omega_\theta = \frac{Q}{\left(\frac{\alpha \cdot K}{K + \beta + \gamma}\right)}$$

$$\Omega_\theta = \frac{2167}{\left(\frac{14759.44 \cdot 0.05}{0.05 + 2.776 + 0.0013}\right)} = 4.3 \text{ RPM}$$

Para hallar la potencia del motor se tiene:

$$\Omega_\theta = 4.3 \text{ RPM} = 0.45 \text{ rad/s}$$

$$\text{Numero de espirales (n)} = 5.5$$

$$\text{Angulo } (\varphi) = 0.19 \text{ Rad} = 11^\circ$$

$$\text{Esfuerzo cortante inicial } (\tau_o) = 63000 \text{ Pa} - \text{Sg}$$

$$K = 0.9935$$

$$\text{Viscosidad } (\eta) = 100000 \text{ Pa} - \text{sg}$$

Radio de eje (R_{eje}) = 0.010 m

Radio de helice R_{HA} = 0.023 m

Radio Interior de la camisa = 0.02315

Se calculará la Fuerza (F) que hace generar el esfuerzo cortante en las hélices, utilizando la ecuación (71).

$$F = - \left[\left(\frac{2\eta\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} \right) + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi \left(\frac{R^2}{2} - Rr_{eje} \right)}{\cos \theta} \right]$$

$$F = - \left[\left(\frac{2 * 100000 * 0.45 * 0.9935}{0.9935 - \frac{1}{0.9935}} \right) + 63000 \right] \left[\frac{4(5.5)\pi \left(\frac{0.02315^2}{2} - 0.02315 * 0.010 \right)}{\cos 11^{\circ}} \right]$$

$$F = 17,438 \text{ N}$$

A continuación, se procede a calcular el par de motor con la fuerza encontrada y el radio exterior de la hélice, usando la ecuación (72).

$$T = F * R_{HA} = - \left[\frac{3\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi \frac{R^2}{2} - Rr_{eje}}{\cos \theta} \right] * r_{helice}$$

$$T = 19,198 \text{ N} * 0.023 \text{ m} = 401.07 \text{ Nm}$$

Seguidamente se calcula la potencia del motor con este Torque y la velocidad angular a la cual se trabajará, usando la ecuación (73).

$$P = T * \Omega_{\theta} = -\Omega_{\theta} \left[\frac{3\mu\Omega_{\theta}k}{k - \frac{1}{k}} + \tau_o \right] \left[\frac{4n\pi \frac{R^2}{2} - Rr_{eje}}{\cos \theta} \right] * r_{helice}$$

$$P = 401.07 \text{ Nm} * 0.45 \text{ rad/s} = 180.5 \text{ w}$$

Esta potencia se utiliza para seleccionar el modelo del motor para la extrusora sin reductores de velocidad.

Tabla V. **Resultados del diseño de la extrusora**

Diseño de extrusora	Magnitud	Unidades
Revoluciones por segundo	0.45	rad/seg
Número de espirales	5.5	
Angulo	0.19	rad
Esfuerzo cortante inicial	63000	Pa-sg
K	0.9935	
Viscosidad	100000	Pa-sg
Radio de eje	0.010	M
Radio de hélice	0.023	M
Radio interior de la camisa	0.02315	M
Par motor	401	Nm
Potencia del motor	180.5	Watts
Potencia en caballos de fuerza	0.2	Hp

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

La potencia del motor es de 0.2 hp (180.5 watts), con un par motor de 401 Nm, se selecciona un servomotorreductor marca SEW EURODRIVE de engranajes cilíndricos modelo R57R37CMP40M con giro de 360 grados, debido que son motores pequeños capaces de generar altos torques empleando reductores de velocidad, son motores de alta precisión, capaces de ubicar la posición y número de vuelta en la que va girando el tornillo, otra cualidad necesaria de estos motores para este proyecto, es que, se puede controlar la velocidad angular de salida del motor de 0 hasta la máxima velocidad limitada por el motor, la velocidad necesaria para inyectar un flujo de tinta requerida puede ser controlada manualmente; por una tarjeta programada con arduino y así poder modificar el g-code que controla la impresora con los datos de velocidad angular

necesarios, y luego poder conectar el servo-motor a la tarjeta de la computadora que gobierna la impresora por medio de este código.

Beneficios

- Los servomotores CMP operan con pares elevados y ofrecen eficiencia energética especialmente relevante.
- Permite infinitas posibilidades de materialización.
- Diseño ligero y dimensiones compactas para numerosas opciones de montaje.

Figura 47. Documentación técnica de motor seleccionado

Información del producto

Descripción de catálogo

R57R37CMP40M/PK/RH1M/SM1
 Reductores de engranajes cilíndricos R + Reductores de engranajes cilíndricos R + Servomotores síncronos CMP (High Dynamic)

Datos de producto

Clase de número de revoluciones	[1/min] : 3000
nC	
Velocidad de salida	[1/min] : 9,20
Índice de reducción total	: 324,00
Par de salida Mamax	[Nm] : 450,00
Par de salida dinámico MaDyn	[Nm] : >455
Posición de montaje	: M1
Pintura imprimación/CapaFinal	: 9005 Negro azabache(51390050)
Posición de conexión/caja de bornas	[°] : 270
Entrada de cable/ Posición del conector	: Diseño de conexión: ajustable
Eje de salida	[mm] : 35x70
Salida permitida con carga radial n=3000	[N] : 7820
Cantidad de lubricante 1er reductor	[Litro] : 1,7
Cantidad de lubricante 2º reductor	[Litro] : 0,35
Par de parada M0	[Nm] : 0,80
Factor de duración	: S1-100%
Tensión del motor	[V] : 230
Esquema de conexionado	: DT11
Corriente estática I0	[A] : 1,50
Máxima corriente permitida I _{max}	[A] : 9,00
Clase de aislamiento	: F
Tipo protección del motor	: IP65
Peso	[kg] : 34,00

Características adicionales

Eje de salida: 35x70 mm
 Material Retén senoidal Premium - FKM
 Detección de temperatura Sensor de temperatura PT1000
 Regulación electrónica IEC34-1
 Unión aseguramiento Adhesivo ensamblaje II
 Unión aseguramiento Adhesivo ensamblaje II
 Lubricante: CLP 220 (-15 / +40 °C): 1.7 Litro
 Grado de protección IP 65
 SMB1 - Conector con ángulo recto ajustable (motor) - M23 (1,5 - 4 mm²)
 RH1M-Resolver





La información del producto presente no representa una oferta en términos legales. La información técnica debe confirmarse en una verificación técnica final. Esta verificación se lleva a cabo al crear la oferta/pedido. Un contrato legalmente vinculante requiere un pedido realizado por la parte demandante y una confirmación del pedido emitida por SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG. Puede encontrar el peso neto exacto en la confirmación del pedido. Por razones técnicas, el peso real puede diferir de esta información.
 DC Versión 2.36
 Creado en: 07/09/2021 22:24:17 CEST

Fuente: Sew Eurodrive (2021). *Driveconfigurator R57R37CMP40M*. Consultado el 21 de agosto de 2022. Recuperado de https://www.seweurodrive.com/os/catalog/products/drives/servogearmotor/default.aspx?language=en_US&country=US.

2.4. Cálculo de cargas sobre el eje

En esta sección se calcularán todas las cargas que actúan sobre el eje del tornillo extrusor para determinar mediante las ecuaciones de modelado las fuerzas axiales de tracción y momentos flectores cortantes máximos en el eje.

2.4.1. Masa del hormigón

Para determinar la masa que se encuentra entre los canales del tornillo y el cilindro de la extrusora, se calcula el volumen de la geometría dentro del cilindro donde circula masa de hormigón.

Tomando dimensiones de la extrusora, el volumen de masa de hormigón que soporta el eje, está dado por la ecuación 76.

$$V_{\text{horm}} = \frac{\pi * R_{\text{HA}}^2 * L}{2} \quad (\text{Ec. 76})$$

Donde:

R_{HA} = radio de helice en alimentacion (m)

L = largo del tornillo (m)

$$V_{\text{horm}} = \frac{\pi * 0.023^2 * 0.17}{2} = 1.413\text{E}^{-4} \text{ (m}^3\text{)}$$

Se calculó el valor de la densidad de la tinta de hormigón, de una prueba experimental en el laboratorio de CETEC el cual es:

$$\rho = 1825 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{Horm}} = 1.413\text{E}^{-4} * 1825 = 0.258\text{kg}$$

2.4.2. Carga distribuida del peso de la masa sobre el eje

Se determina mediante el peso de la masa que circula en el interior de la carcasa de la extrusora, mediante la ecuación 77:

$$q = \frac{m_{\text{horm}} * g}{L} \quad (\text{Ec. 77})$$

La fuerza distribuida de la tinta de hormigón es

$$q = \frac{0.258 * 9.81}{0.17} = 14.9 \text{ N/m}$$

2.4.3. Cálculo del peso del eje

Se emplea la ecuación para calcular el volumen del eje:

$$V_{\text{eje}} = \pi * r_{\text{eje}}^2 * L$$

$$V_{\text{eje}} = \pi * 0.010^2 * 0.17 = 5.34\text{E}^{-5} \text{ (m}^3\text{)}$$

Se calcula el peso del eje con la ecuación 78:

$$W_{\text{eje}} = \rho * V_{\text{eje}} * g \quad (\text{Ec. 78})$$

La densidad es la de un acero AISI 8740 al carbón con aleación, la cual tiene un valor de:

$$\rho_{\text{eje}} = 7680 \text{ kg/m}^3$$

El peso del eje es:

$$W_{\text{eje}} = 7680 * 5.34\text{E}^{-5} * 9.81 = 4.02 \text{ N}$$

2.4.4. Carga distribuida del peso del eje

Se utiliza la ecuación 79:

$$q_{\text{eje}} = \frac{W}{L} = \frac{4.02}{0.17} = 23.65 \text{ N/m} \quad (\text{Ec. 79})$$

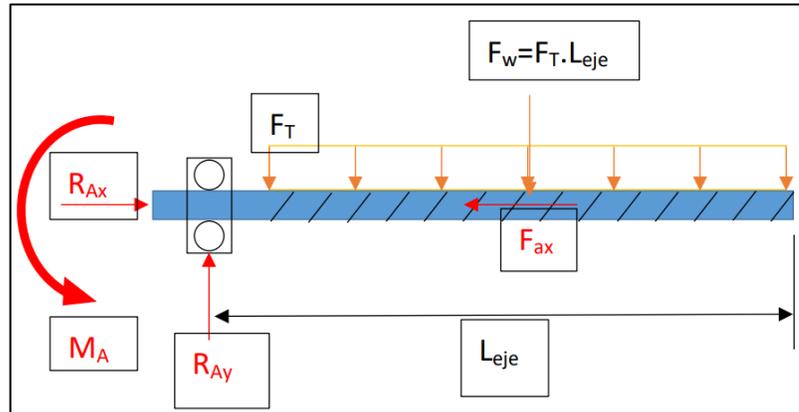
2.4.5. Fuerza distribuida total

$$q_{\text{total}} = q_{\text{horm}} + q_{\text{eje}} = 14.09 + 23.65 = 37.74 \text{ N/m}$$

2.4.6. Diagrama de cuerpo libre

La distribución de cargas sobre el tornillo helicoidal está graficada en la figura 48.

Figura 48. Diagrama de cuerpo libre



Fuente: Chapoñan y Rojas (2019). *Diseño de una maquina extrusora de ladrillos para la fábrica "Ladrillos Clark"*. Consultado el 21 de agosto de 2022. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12802/6619>.

Dado estas distribuciones de carga en el eje se procede a calcular las reacciones de apoyo en el cojinete donde va montado el eje, las cuales son R_{AX} y R_{AY} , para este trabajo se calculó la reacción R_{AY} debido a que la reacción R_{AX} es insignificante.

Para hallar la reacción en el eje (Y) se realiza sumatoria de fuerzas

$$\sum F_y = R_{AY} - F_w = 0 \quad (\text{Ec. 80})$$

$$R_{AY} = F_w = F_T (L_{eje} + esp)$$

$$R_{AY} = F_w = 37.74 (0.17 + 0.03) = 7.55 \text{ N} = 0.77 \text{ KG}$$

Para hallar el momento flector M_A se hacen sumatoria de momentos:

$$\sum M = M_A - F_w \frac{L_{eje} + esp}{2} = 0$$

$$M_A = F_w \frac{L_{\text{eje}} + \text{esp}}{2}$$

$$M_A = 7.55 \frac{0.20}{2} = 0.755 \text{ Nm}$$

2.5. Selección de rodamiento para el eje del tornillo de la extrusora

La experiencia ha demostrado que la verdadera causa de la rotura es la fatiga. Por ello, se utilizan las características de fatiga para la clasificación de los rodamientos en cuanto a carga, características que dependen en gran proporción de los resultados experimentales.

Se define la vida de un rodamiento de bolas determinado como el número de revoluciones, (o de vueltas a determinada velocidad constante), que el 90 % de un grupo de rodamientos alcanza, o excede, antes que aparezcan los primeros síntomas de fatiga.

La clasificación de carga básica C, es la carga radial fija constante, que un grupo de rodamientos de bolas aparentemente idénticos con anillo exterior fijo puede soportar, para una vida de clasificación de un millón de vueltas del anillo inferior.

Si se hacen rodar dos grupos de rodamientos idénticos, bajo cargas diferentes P_e y P_r se encuentra que sus vidas N_e y N_r son inversamente proporcionales a los cubos de las cargas, dando la ecuación 81.

$$\frac{N_e}{N_r} = \left(\frac{P_r}{P_e} \right)^3 \quad (\text{Ec. 81})$$

Se llama C en esta ecuación a la carga P , correspondiente a una vida de clasificación N , de un millón de ciclos, por lo tanto:

$$\frac{N_e}{1\ 000\ 000} = \left(\frac{C}{P_e}\right)^3 \quad (\text{Ec. 82})$$

Si se conoce la carga equivalente radial P_e para un rodamiento, puede encontrarse la vida de clasificación N_e a partir de la ecuación (82), mediante el uso del valor adecuado de C .

En este trabajo se puso una vida de clasificación esperada para el cojinete y se seleccionó encontrando el valor C , mediante esta ecuación (82), y luego de acuerdo a este valor, se buscó en el catálogo del fabricante SKF el cojinete más recomendado.

2.5.1. Tipo de rodamiento a elegir

Se seleccionó un rodamiento rígido de bolas con soporte de pestaña cuadrada, es el típico rodamiento más habitual y son especialmente versátiles. Tienen baja fricción y están optimizados, para un nivel de ruido bajo y baja vibración, lo que permite altas velocidades de giro. Soportan cargas radiales y axiales en ambos sentidos, son fáciles de montar y requieren menos mantenimiento que otros tipos de rodamientos.

Se seleccionó el rodamiento del catálogo de SKF, este contiene una amplia gama de diseños, versiones y tamaños de rodamientos rígidos de bolas.

2.5.2. Tamaño del rodamiento

El tamaño de un rodamiento debe ser suficiente para asegurar que sea lo suficientemente fuerte como para ofrecer la vida útil, requerida y esperada en las condiciones de funcionamiento definidas.

La deformación permanente en los elementos rodantes y caminos de rodadura está directamente relacionada con el tamaño del rodamiento.

Para determinar el tamaño del rodamiento se utilizó el criterio de selección del tamaño basada en la carga estática: esta se basa en la carga estática que puede soportar el rodamiento, teniendo en cuenta los posibles efectos de la deformación permanente, y requiere el cálculo de factor de seguridad estática C , para el rodamiento.

En este trabajo se puso una vida de clasificación esperada N_e para el cojinete y se seleccionó el tamaño del cojinete encontrando el valor C despejando esta variable de la ecuación (82), y luego con este valor se buscó en el catálogo del fabricante SKF el cojinete más recomendado.

Despejando

$$C = \frac{N_e^{1/3} P_e}{100}$$

Donde

P_e = carga radial = R_{AY} (N)

N_e = vida de clasificación esperada

C = carga estática (N)

$$C = \frac{2000000^{1/3} * 7.55}{100} = 9.51N$$

Se eligió el cojinete SKF FYK 20 TD con soporte de pestaña cuadrada (ver anexos), con mucha más resistencia a la carga básica calculada, con un valor de $c = 6.55 \text{ kN}$, eso asegura que tendrá mucha más vida de clasificación esperada.

2.6. Material del tornillo extrusor

Para el diseño se seleccionó un acero AISI 8740 al carbón, con aleación con condición OQT 400, cuyas propiedades han sido templadas y revenidas (Quenched and tempered Q y T). Este parámetro de la tesis de Velilla (2008) *Modelo experimental de una extrusora de ladrillos*, se seleccionó este acero debido a su alta resistencia, alta dureza, buena resistencia a fatiga y a la corrosión, sus características químicas y mecánicas son:

$$S_{ult} = 2000\text{MPa}$$

$$S_{yp} = 1650\text{MPa}$$

$$E = 207000\text{MPa}$$

$$\rho = 7680 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Dureza} = 578 \text{ HB}$$

2.7. Máxima tensión cortante estática en tornillo extrusor

El eje soporta cargas combinadas de flexión y torsión. El momento flector M produce una tensión normal en la dirección axial del eje designada con S y el momento torsor T produce una tensión cortante S_s . La tensión perpendicularmente al eje, es en general igual a cero. A partir del círculo de Mohr para este elemento.

Se deduce que el valor de la máxima tensión cortante para carga estática viene dado por la ecuación:

$$S_s \max = \frac{0.5 S_{yp}}{CS} = \sqrt{\left[\frac{s}{z}\right]^2 + S_s^2} \quad (\text{Ec. 83})$$

Sustituyendo en la ecuación (82) se obtienen las ecuaciones que dan las tensiones para un eje circular macizo:

$$S = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (\text{Ec. 84})$$

$$S_s = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (\text{Ec. 85})$$

Obteniendo la ecuación 86 que da la máxima tensión cortante para cargas estáticas.

$$S_s \max = \frac{0.5 S_{yp}}{CS} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M^2 + T^2} \quad (\text{Ec. 86})$$

La sustitución de $S_s \max = 0.5 S_{yp} / CS$ implica que se ha supuesto que es aplicable la teoría de rotura por cortadura máxima.

2.7.1. Código ASME para designación de ejes de transmisión

Como las cargas en la mayor parte de los ejes de máquinas no son constantes, es necesario tomar las medidas precisas para prever los efectos perjudiciales de las variaciones. El código ASME para proyecto de ejes de transmisión B17c-1927 lo logra introduciendo en la ecuación de la tensión máxima una constante C_m y C_t de la forma:

$$S_s \max = \frac{0.5 S_{yp}}{CS} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{C_m M^2 + C_t T^2} \quad (\text{Ec. 87})$$

Donde C_m = coeficiente numérico combinado para impacto y fatiga aplicable en cada caso al momento flector calculado, para este diseño se toma 1.5 para el valor de este coeficiente.

C_t = coeficiente correspondiente aplicable al momento torsor calculado. Para este diseño se toma 1.0 para el valor de esta constante.

Los valores recomendados de los coeficientes de impacto y fatiga se dan en la tabla (VI), para ejes giratorios, la tensión de flexión S no es constante; varia continuamente de máxima tracción a máxima compresión, al girar el eje.

Para cargas constantes, la tabla indica que puede hacerse una compensación adecuada, teniendo en cuenta la naturaleza alternativa de la tensión de flexión, empleando un valor de 1.5 para C_m .

Tabla VI. **Constantes según el código ASME**

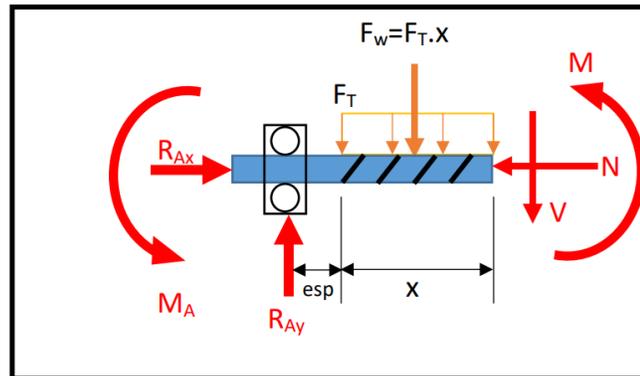
Naturaleza de la carga	Valores para	
	C_m	C_t
Ejes fijos:		
Carga aplicada gradualmente	1,0	1,0
Carga aplicada repentinamente	1,5 - 2,0	1,5-2,0
Ejes giratorios:		
Carga constante o aplicada gradualmente	1,5	1,0
Cargas aplicadas bruscamente, solamente		
Pequeños impactos	1,5 - 2,0	1,0 - 1,5
Cargas aplicadas bruscamente, grandes impactos	2,0 - 3,0	1,5 - 3,0

Fuente: Spotts (1966). *Proyecto de elementos de maquina.*

2.7.2. Cálculo del momento flector máximo

Del diagrama de cuerpo libre (fig. 46), se cortó la sección entre un tramo A-B como se puede observar en la (fig. 49), y se tomó la sección del eje del lado del rodamiento, para determinar las ecuaciones de corte V y momento flector M a lo largo de cualquier distancia X , entre el cojinete y final del eje (tramo A-B).

Figura 49. Diagrama de corte en sección A-B



Fuente: Chapañan y Rojas (2019). *Diseño de una maquina extrusora de ladrillos para la fábrica "Ladrillos Clark"*. Consultado el 21 de agosto de 2022. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12802/6619>.

$$\sum F_y = R_{Ay} - F_w - V = 0$$

$$V = R_{Ay} - F_T(X)$$

$$\sum M_x = M_A - R_{Ay} + F_T \frac{(X + esp)^2}{2} = 0$$

$$M = -M_A + R_{Ay}(X) - F_T \frac{(X)^2}{2}$$

Evaluando en tramo AB $0 \leq X \leq 0.20$

$$V_0 = 7.55 - F_T(0) = 7.55N$$

$$M_0 = -0.755 + R_{Ay}(0) - F_T \frac{(0)^2}{2} = 0.755 Nm$$

$$V_{0.20} = 7.55 - 37.74(0.20) = 0$$

$$M_{0.20} = -0.755 + 7.55(0.20) - 37.74 \frac{(0.20)^2}{2} = 0$$

El momento flector máximo a lo largo de todo el eje es $M_{\max} = 0.755\text{Nm}$, el torque calculado es 401 Nm ver tabla VIII.

2.7.3. Fuerza axial en el eje de extrusión

La fuerza axial se calcula por medio de la presión de extrusión, la cual se calculó con la ecuación de la componente radial de Navier Stokes, (ec. 63).

$$-\rho \frac{v_{\theta}^2}{r} = \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$v_{\theta} = \Omega_{\theta} k R \left[\frac{r}{kR - \frac{R}{k}} - \frac{R^2}{rkR - \frac{Rr}{k}} \right]$$

Sustituyendo los valores de tabla 8, en la ecuación (68)

$$v_{\theta} = 0.45 * 0.994 * 0.023 \left[\frac{r}{0.994 * 0.023 - \frac{0.023}{0.994}} - \frac{0.023^2}{r0.994 * 0.023 - \frac{0.023r}{0.994}} \right]$$

$$v_{\theta} = 0.45 * 0.994 * 0.023 \left[\frac{r}{0.994 * 0.023 - \frac{0.023}{0.994}} - \frac{0.023^2}{r0.994 * 0.023 - \frac{0.023r}{0.994}} \right]$$

$$v_{\theta} = 0.45 * 0.994 * 0.023 \left[\frac{1.911}{r} - 3612.286 * r \right]$$

$$v_{\theta} = \frac{-37.163(r^2 - 0.0005)}{r}$$

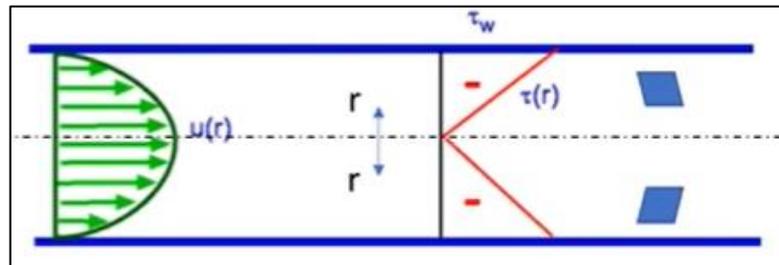
Sustituyendo v_θ en la ecuación de Navier Stokes y luego integrando en ambos lados para despejar p .

$$-\rho \int \frac{\left(\frac{-37.163(r^2 - 0.0005)}{r}\right)^2}{r} dr = \int \frac{\partial p}{\partial r} dr$$

$$p = -\rho * \frac{-0.691[r^2 * \ln(r^2) - 1000(r^4 - 2.500E^{-7})]}{r^2} + C_1$$

Se despeja C_1 con valores de fronteras

Figura 50. **Diagrama de esfuerzos cortantes y presión dentro de la extrusora**



Fuente: Aerodynamics for students (s.f.). *Análisis de volumen de control*. Consultado el 25 de marzo de 2023. Recuperado de http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/pipeflow/node12.htm.

Según el diagrama. (fig. 48)

$P = 0$ cuando $r = R$

P máximo cuando $r=0$

Sustituyendo valores de frontera:

$$0 = -\rho \frac{-0.691[0.023^2 * \ln(0.023^2) - 1000(0.023^4 - 2.500E^{-7})]}{0.023^2} + C_1$$

$$C_1 = \rho(5.25) = 1825(5.25) = 9581.25$$

$$p = -\rho * \frac{-0.691[r^2 * \ln(r^2) - 1000(r^4 - 2.500E^{-7})]}{r^2} + C_1$$

$$p = -\rho * \frac{-0.691[0^2 * \ln(0^2) - 1000(0^4 - 2.500E^{-7})]}{0^2} + 9581.25$$

$$p = 9581.25 \text{ pa}$$

La fuerza axial se halla por medio de la presión de extrusión, que para este caso es de 9581.25 pa. La fuerza F_{AX} se calcula multiplicando la presión por el área de sección transversal del eje.

$$F_{AX} = p * \frac{\pi}{4} (d_{eje}^2) \quad (\text{Ec. 88})$$

$$F_{AX} = 9581.25 * \frac{\pi}{4} (0.02)^2$$

$$F_{AX} = 3.01 \text{ N}$$

$$S_{AX} = \frac{F_{AX}}{A_{eje}} = \frac{3.01}{\pi 0.02^2} = 2395 \text{ N/m}^2 \quad (\text{Ec. 89})$$

2.7.4. Coeficiente de seguridad

Implementando el código ASME para proyectos de ejes de transmisión, B17c-1927 introduciendo en la ecuación (87), las constantes C_m y C_t de la forma:

$$S_s \max = \frac{0.5S_{yp}}{CS} = \sqrt{\left[\frac{C_m S}{2}\right]^2 + (C_t S_s)^2}$$

Para resolver la ecuación y despejar CS se encuentra S de la suma de las fuerzas axiales, que ejerce la presión F_{AX} y el momento flector máximo M_{\max} en el eje (ec. 84), S_s fuerza cortante que ejerce la torsión T (ec. 85) y los valores C_m y C_t de la tabla (6).

$$S = \frac{32M_{\max}}{\pi d^3} + S_{AX}$$

$$S = \frac{32(0.755)}{\pi(0.02)^3} + 2395 = 963690.87 \text{ N/m}^2$$

$$S_s = \frac{16T}{\pi d^3}$$

$$S_s = \frac{16(441.55)}{\pi(0.02)^3} = 281099460.49 \text{ N/m}^2$$

Conociendo los valores:

$$S_{yp} = 1650 \text{ Mpa}$$

$$S = 963690.86 \text{ N/m}^2$$

$$S_s = 281099460.489 \text{ N/m}^2$$

$$C_m = 1.5$$

$$C_t = 1.$$

Se procede a calcular el S_s max, para luego despejar el coeficiente de seguridad CS de la ecuación (87).

$$S_s\text{max} = \frac{0.5S_{yp}}{CS} = \sqrt{\left[\frac{C_m S}{2}\right]^2 + (C_t S_s)^2}$$

$$S_s\text{max} = \sqrt{\left[\frac{1.5(963690.86)}{2}\right]^2 + (281099460.49)^2} = 281100389.69 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$CS = \frac{0.5S_{yp}}{S_s\text{max}}$$

$$CS = \frac{0.5(1650 * 10^6)}{281100389.69} = 2.9 = 3$$

El coeficiente de seguridad, para este diseño tiene un valor de 3, y es aceptado, tanto el diseño del extrusor como el material con el que se recomienda fabricar.

2.8. Cilindro de extrusor de pared delgada sometido a presión

Como está bajo presión el material del que está hecho, se somete a una carga en todas las direcciones. El recipiente puede analizarse de una manera sencilla siempre y cuando tenga una pared delgada.

En general, pared delgada se refiere a un recipiente que tiene una relación del radio interior sobre el grosor de la pared, con un valor de 10 o mas ($\frac{r}{t} \geq 10$). Cuando $r/t = 10$ los resultados de las ecuaciones de pared delgada predicen un

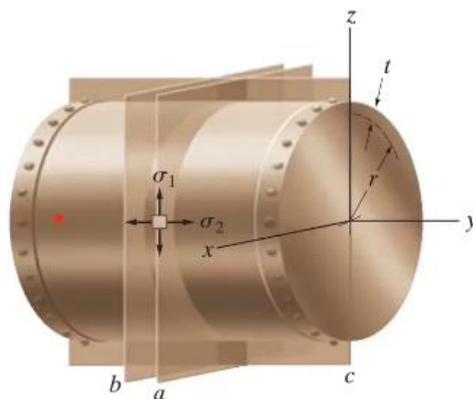
esfuerzo que es aproximadamente 4 por ciento menor que el esfuerzo máximo real en el recipiente. Para relaciones r/t mayores, este error será aún menor.

Siempre que la pared del recipiente sea delgada, la distribución de esfuerzos en todo su grosor no variara significativamente, por lo que se supone que es uniforme o constante. Considerando este supuesto, se analizará el estado de esfuerzo en el cilindro a presión. La presión en el cilindro se entiende como la presión manométrica.

2.8.1. Deducción de las ecuaciones para esfuerzos en recipientes cilíndricos

Como se muestra en la fig. 51 se presentan esfuerzos en 2 direcciones, a lo largo del elemento, conocida como dirección axial σ_2 y en la dirección circunferencial o anular σ_1 .

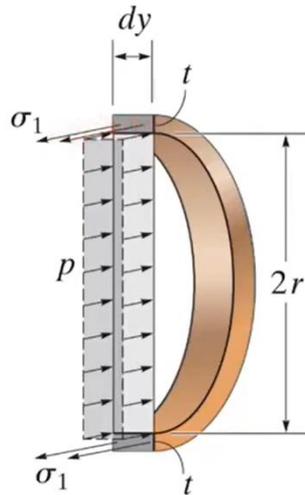
Figura 51. Esfuerzos en dirección axial y anular



Fuente: Beer, Johnston, DeWolf y Mazurek (2010). *Mecánica de materiales*.

Para la deducción de las ecuaciones se realizó una sumatoria de fuerzas generadoras de la presión P y σ_1 que actúan en las áreas del material del elemento en la dirección circunferencial, como se muestra en la fig. 52.

Figura 52. **Presión ejercida en el cilindro**



Fuente: Beer, Johnston, DeWolf y Mazurek (2010). *Mecánica de materiales*.

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = \sigma * A = P * A$$

$$\sum F(X) = 0$$

Se calculó la fuerza generadora del σ_1 que actúa en la dirección circunferencial, desarrollando la ecuación 88, como la fuerza esta 2 veces se multiplica por 2.

$$F_{\sigma} = 2[\sigma_1(t * dy)] \quad (\text{Ec. 88})$$

Se calculó la fuerza generadora de la presión P que actúa en la dirección circunferencial, desarrollando la siguiente ecuación.

$$F_p = [P(2r * dy)] \quad (\text{Ec. 89})$$

Desarrollo de la sumatoria de fuerzas para calcular el esfuerzo, y elegir un material adecuado que tenga la resistencia para soportar este esfuerzo, o uno más alto.

$$\sum F(X) = F_\sigma - F_p = 0$$

$$\sum F(X) = 2[\sigma_1(t * dy)] - P(2r * dy) = 0$$

$$2[\sigma_1(t * dy)] = P(2r * dy)$$

$$\sigma_1 = \frac{P * 2r * dy}{2 * t dy} = \frac{P * r}{t}$$

$$\sigma_1 = \frac{P * r}{t} \quad (\text{Ec. 90})$$

Donde:

t = espesor de pared del cilindro = 2mm

p = presión manométrica = 9581.25 pa

r = radio interior del cilindro = 0.023 mts

$\sigma_1 = \sigma_{syp}$ = esfuerzos

$$\sigma_1 = \frac{9581.25 * 0.023}{0.002} = 110184.38 \text{ pa}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{110184.38}{2} = 55092.19 \text{ pa}$$

Se sabe que el esfuerzo que actúa en la dirección axial σ_2 que ejerce presión en las tapaderas y boquilla del cilindro, equivale a la mitad del esfuerzo σ_1 por lo cual, este es el esfuerzo máximo que genera la presión en las paredes del cilindro, el que se comparó con el esfuerzo de fluencia del material elegido, para comprobar si éste es seguro para el diseño.

En la carga por cortadura pura, la ecuación que da las ecuaciones de trabajo en cortadura es:

$$\sigma_{smax} = \frac{\sigma_{syp}}{CS} \quad (\text{Ec. 91})$$

Como los materiales dúctiles fallan por cortadura, es muy empleada por los ingenieros la teoría de la rotura por cortadura máxima. Esta teoría se aplica encontrando primeramente la máxima tensión de cortadura, que se produce para la carga dada, dividiéndola después por la tensión de fluencia en cortadura para determinar el coeficiente de seguridad.

$$\sigma_{smax} = \frac{1}{2} \sigma_1 \quad (\text{Ec. 92})$$

$$\sigma_{smax} = \frac{1}{2} (110184.38) = 55092.19 \text{ pa}$$

Si la tensión (σ) creciera hasta el valor de fluencia, la teoría de cortadura máxima establece que el material estará sometido también, a la tensión de fluencia en cortadura, por consiguiente:

$$\sigma_{syp} = \frac{1}{2}\sigma_{yp} \quad (\text{Ec. 93})$$

Se calculó el coeficiente de seguridad, para fabricar con plancha de acero (ASTM A36) con un $\sigma_{yp} = 235359600$ pa

$$\sigma_{syp} = \frac{1}{2}(235359600 \text{ pa}) = 117679800 \text{ pa}$$

Lo que puede sustituirse en la ecuación (83) para dar:

$$\sigma_{smax} = \frac{0.5\sigma_{yp}}{CS}$$

$$CS = \frac{0.5\sigma_{yp}}{\sigma_{smax}} = \frac{0.5(235359600)}{55092.19} = 2136.05$$

El material para fabricar seleccionado, plancha de acero ASTM A36 de espesor de 2 mm (ver fig 53), se puede observar que se obtuvo un CS sobredimensionado empleando la teoría de la rotura por cortadura máxima. claramente sobrepasa el valor que se espera con un alto coeficiente de seguridad y no hay necesidad de colocar refuerzos del material en ambas direcciones.

Figura 53. Catálogo plancho de acero ASTM A36

Espesor		Ancho		Largo		Peso Teórico
						Kg/ plancha
mm	pulg	mm	pie	mm	pie	
1.5	1/16"	1200	4	2400	8	33.91
2.0	5/64"	1200	4	2400	8	44.05
2.5	3/32"	1200	4	2400	8	55.55
2.9	1/8"	1200	4	2400	8	67.08
3.0	1/8"	1200	4	2400	8	67.08
		1500	5	3000	10	109.2
4.4	3/16"	1200	4	2400	8	99.48
		1200	4	2400	8	100.50
4.5	3/16"	1500	5	3000	10	164.5
		1200	4	2400	8	133.39
5.9	1/4"	1200	4	2400	8	134.81
		1500	5	3000	10	212.00
6.0	1/4"	1500	5	6000	20	423.90
		1200	4	2400	8	178.34
7.9	5/16"	1200	4	2400	8	180.60
		1500	5	6000	20	565.20
8.0	5/16"	2400	8	6000	20	904.32
		1200	4	2400	8	201.00
8.9	3/8"	1200	4	2400	8	203.26
		1500	5	3000	10	318.00
9.0	3/8"	1500	5	6000	20	635.85
		2400	8	6000	20	10173.36
11.9	1/2"	1200	4	2400	8	278
		1200	4	2400	8	279.90
12.0	1/2"	1500	5	3000	10	424.00
		1500	5	6000	20	847.80
12.0	1/2"	2400	8	6000	20	1356.48
		3000	10	6000	20	1695.60
16	5/8"	1200	4	2400	8	363.74
		1500	5	6000	20	1130.40
16	5/8"	2400	8	6000	20	1808.64
		3000	10	6000	20	2260.80
19	3/4"	1200	4	2400	8	433.60
		1500	5	3000	10	671.175
19	3/4"	1500	5	6000	20	1342.35
		2400	8	6000	20	2147.76
25	1"	3000	10	6000	20	2684.70
		1500	5	6000	20	1766.25
25	1"	2400	8	6000	20	2826.00
		3000	10	6000	20	3532.50
32	1 1/4"	1500	5	6000	20	2260.80
		2400	8	6000	20	3617.28
32	1 1/4"	3000	10	6000	20	4521.60
		1500	5	6000	20	2684.70
38	1 1/2"	2400	8	6000	20	4295.52
		3000	10	6000	20	5369.40
50	2"	1500	5	6000	20	3532.50
		2400	8	6000	20	5652.00
50	2"	3000	10	6000	20	7065.00

Planchas de Acero ASTM A36



PLANCHAS DE ACERO A36

Planchas de acero, también conocido como laminado en caliente (LAC) de acero en calidad A36. La plancha es una placa de acero estructural utilizado para la construcción en general y aplicaciones industriales.

Especificaciones: ASTM A36, AISI A36

Fácil de soldar, cortar, dar forma y maquinar.

Se mide en espesor x ancho x largo

Propiedades Mecánicas	GRADO B	
	Límite de Fluencia (kg/mm ²)	24 min.
	Resistencia a la Tracción (kg/mm ²)	41 min
Alargamiento (%) en 50 mm	18 min.	

NORMA TÉCNICA	GRADO B				
	C	Mn	P	S	Si
A36	0.25	0.8-1.2 máx	0.040 máx	0.050 máx	0.40 máx

* Equivalencias de conversión son aproximadas.

* Fotos y datos referenciales. No aceptamos responsabilidad por usos incorrectos o mal interpretaciones de estos datos.

Fuente: Fiorella (2021). *Plancha acero A-36, características del producto*. Consultado el 26 de marzo de 2023. Recuperado de <https://www.fiorellarepre.com.pe/FichaTecnica/605020.pdf>.

2.9. Acoplamiento para la unión de eje de extrusora y moto-reductor

Se acoplará el eje del moto-reductor al eje de la extrusora con un acoplamiento rígido a la torsión, modelo GTR/S del tamaño No 3, seleccionado del catálogo de la marca CominTec.

2.9.1. Acoplamiento rígido GTR

Realizado para ensamblarse en aplicaciones donde se necesita una elevada fiabilidad y precisión y una óptima relación peso-potencia. Es indispensable en el diseño de aplicaciones de baja carga suspendida, sobre todo en el caso de potencias elevadas. Este acoplamiento está compuesto por tres elementos principales: 2 cubos mecanizados, realizados en acero UNI EN ISO 683-1:2018, y el bloque laminar, construido en acero inoxidable AISI 301 C, con tornillos de conexión de acero clase 10.9.

Todos los componentes de este producto, están realizados y equilibrados estáticamente con clase DIN ISO 1940- 1;2003 Q 6.3, antes del mecanizado de la chaveta y del bloqueo.

Figura 54. **Acoplamiento rígido GTR**

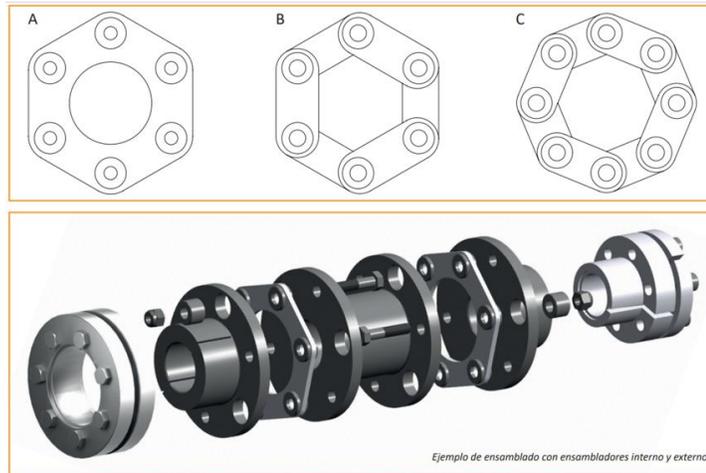


Fuente: Comintec (2021). *Catálogo Acoplamiento rígido a la torsión*. Consultado el 26 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.comintec.com/download/cataloghi/acoplamientos/GTR_ES.pdf.

- Descripción de las membranas:

El elemento fundamental de este acoplamiento rígido a la torsión son los bloques laminares formados por una serie de láminas, o membranas de acero inoxidable AISI 304-C ensambladas entre sí, mediante casquillos de acero. Este bloque laminar se ensambla, a su vez, de forma alternada a las bridas de los cubos.

Figura 55. **Membranas**



Fuente: Comintec (2021). *Catalogo Acoplamiento rígido a la torsión*. Consultado el 26 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.comintec.com/download/cataloghi/acoplamientos/GTR_ES.pdf.

Características:

- Realizado en acero mecanizado
- Elevada rigidez a la torsión
- Sin mantenimiento ni desgaste
- Tamaño No 3 transmite 600 Nm de par máximo

2.10. Componentes

En esta sección se detallarán las características y función de los componentes que conforman el diseño de la extrusora de tinta cementante.

- Motor CMP40M

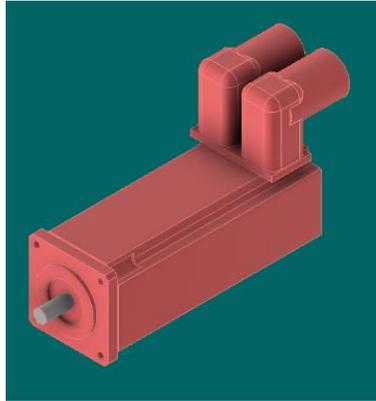
Función:

Accionamiento principal generador de movimiento rotacional a determinadas RPM y par torsión.

Características:

- Es un servomotor con variador de velocidad incorporado, controlado por computadora, se destaca por su precisión en la posición en grados, velocidad y par torsión del eje.
- velocidad 3000 RPM.
- Par 3.8 Nm.
- Par de parada 0.8 Nm.
- Tensión del motor 230 V.
- Corriente max permitida 9 A.
- Corriente estática 1.5 A.
- Posición de montaje M1.
- Acoplado a los reductores de velocidad por medio de brida cuadrada.

Figura 56. **Motor CMP40M**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Reductores de velocidad R-37 Y R-57

Función:

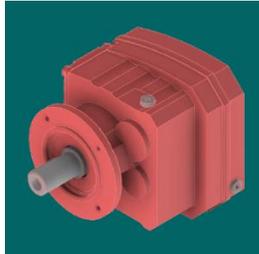
Incrementar Par Torsión y disminuir las RPM del motor a valores requeridos en el proyecto.

- Índice de reducción total con ambos $i= 324$
- Reducción de la velocidad de giro máximo a 9.20 rpm
- Incremento del Par torsión máximo a 450 Nm

Características R-37

- Montado al eje del motor por medio de acople de brida
- Unión aseguramiento adhesivo
- Aceite CLP 220 (-15 / +40 °C)
- Capacidad 0.35 litros

Figura 57. **Reductor de velocidad R-37**

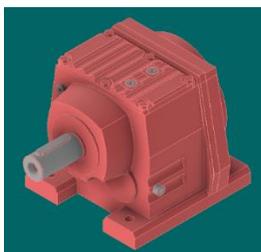


Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Características Reductor R-57

- Montado seguidamente del reductor R-37 por medio de brida redonda.
- Anclado al suelo con 4 tornillos.
- Es el que contiene el eje de salida montado hacia el eje del extrusor generando las RPM y par torsión necesarios.
- Unión aseguramiento adhesivo.
- Aceite CLP 220 (-15/ +40 °C).
- Capacidad 1.7 litros.

Figura 58. **Reductores de velocidad R-57**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Acoplamiento rígido GTR

Función:

Transmisión de potencia del eje de salida del reductor R-57 al eje del extrusor.

Características:

- Acero mecanizado
- Elevada rigidez a la torsión
- Sin mantenimiento ni desgaste
- Pares de transmisión elevados
- Se aseguran los ejes con bloqueo con mordaza y cuña
- Par máximo transmitido 600 Nm

Figura 59. **Acoplamiento rígido GTR**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Rodamiento FYK 20 TD (ver especificaciones en anexos, apéndice III)

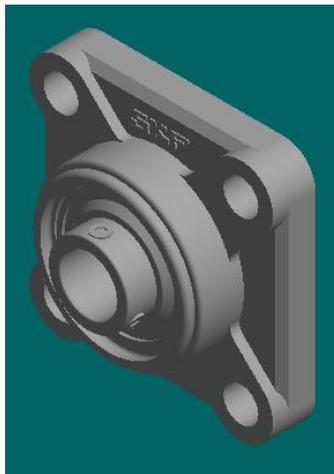
Función:

Soporte, apoyo y alineación del eje del extrusor con el eje del servomotor.

Características:

- Capacidad de carga dinámica (C) = 12.7 Kn
- Capacidad de carga estática (CO) = 6.55 Kn
- Velocidad limite = 1800 r/min
- Montado al cubo base con soporte de pestaña cuadrada con tornillos M12.

Figura 60. **Rodamiento FYK 20 TD**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Cubo base de alimentación (ver plano en anexos, apéndice I)

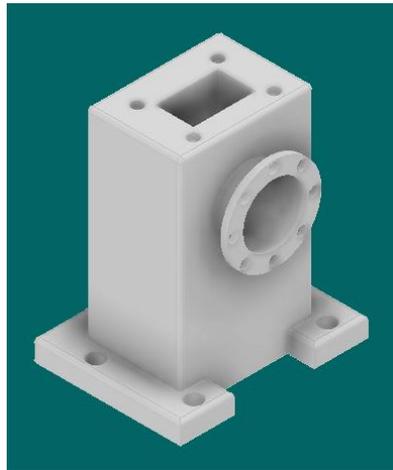
Función:

Base de la extrusora, contiene la zona de alimentación de la mezcla, esta parte va anclada al suelo y es en la que se ancla el soporte del cojinete, para alinear el eje de la extrusora con el eje del motoreductor.

Características:

- Anclada al suelo con patas de 4 tornillos M12
- Acero AISI 8740 al carbón

Figura 61. Cubo base de alimentación



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Tornillo helicoidal (ver plano en anexos, apéndice I)

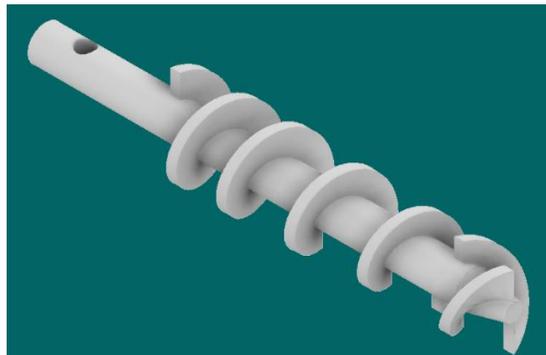
Función:

Componente principal, bombear la mezcla, transportarla, comprimirla y generar el caudal a extrudir, accionado por el motor.

Características:

- Diámetro de eje 20 mm
- 3 zonas alimentación, compresión y dosificación
- Diseñado para soportar el esfuerzo cortante inicial max 63000 pa-sg.
- Viscosidad de la tinta 100000 pa-sg (arcilla brick-backing).
- Densidad de mezcla 1825 kg/mm².
- Par torsión max 442 Nm.
- Material de fabricación Acero AISI 8740 al carbón.
- Montado en el cojinete.

Figura 62. **Tornillo helicoidal**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Adaptador de pasador (ver plano en anexos, apéndice I).

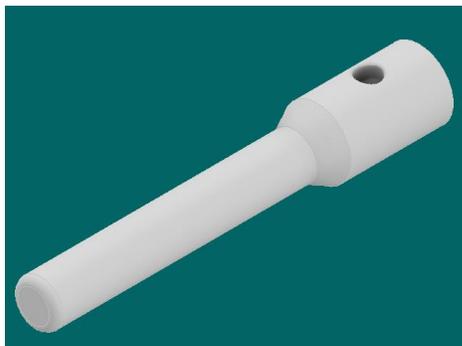
- **Función:**

Se diseñó un adaptador de pasador para poder montar y desmontar el eje del tornillo extrusor, de una manera rápida y sencilla, así poder limpiar el tornillo de los restos de mezcla de tinta cada vez que se termine de usar. Además, permite poder adaptarle otro tipo de tornillo, con características diferentes para extrudir otro tipo de fluido o material.

- **Características:**

- Diámetro de agujero interior (entrada del eje) 20 mm
- Diámetro de eje para adaptar al acople rígido 20 mm
- Diámetro del pasador 10 mm.
- Diseñado para soportar el esfuerzo cortante inicial máximo 63000 pa-sg.
- Par torsión máximo 442 Nm.
- Material de fabricación Acero AISI 8740 al carbón.
- Montado entre el eje del tornillo extrusor y el acople rígido.

Figura 63. **Adaptador de pasador**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Cámara de compresión (ver plano en anexos, apéndice I).

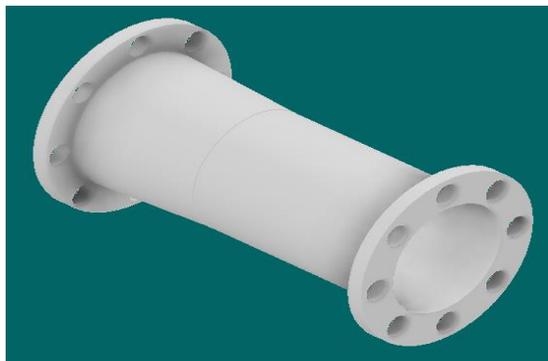
Función:

Es el cilindro y carcasa del tornillo helicoidal de extrusión, contiene dos diámetros para las zonas de compresión y dosificación, con el helicoidal forman la cámara de compresión y los canales para el flujo.

Características:

- Montado al cubo base por medio de una brida redonda y 8 tornillos 3-48 UNC.
- Holgura con las hélices del tornillo = 0.15 mm.
- Diámetro de zona de alimentación = 46.15 mm.
- Diámetro de zona de dosificación = 41.15 mm.
- Espesor de pared 2 mm soporta presión manométrica de 9581.25 pa.
- Material de fabricación Acero ASTM A-36.

Figura 64. **Cámara de compresión**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Boquilla de extrusión (ver plano en anexos, apéndice I).

Función:

Extrudir un caudal de salida con diámetro y perfil de canal requerido

Características:

- Montado al cilindro de compresión por medio de brida redonda con 8 tornillos M2.
- Material de fabricación Acero ASTM A-36.
- Diámetro de entrada 41 mm y de salida 8 mm.
- Flujo de salida 2167 mm³/min.

Figura 65. **Boquilla de extrusión**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

- Tolva de alimentación (ver plano en anexos, apéndice I).

Función:

Alta capacidad de depósito y alimentar de mezcla la extrusora.

Características:

- Montado al cubo base por medio de brida cuadrada
- con 10 tornillos M2
- Espesor de pared 2 mm
- Acero ASTM A36

Figura 66. **Tolva de alimentación**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

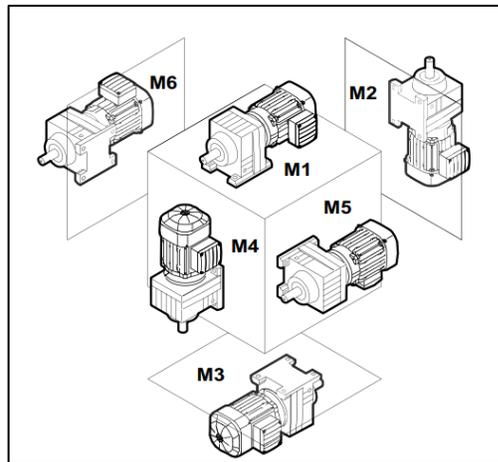
2.11. Montaje

A continuación, se describe la metodología de montaje de la impresora 3D.

2.11.1. Sujeción del motor reductor y extrusor

Posición de montaje: el moto-reductor y extrusora deben montarse/instalarse exclusivamente en la posición establecida, ver la placa de características, es una posición de montaje M1 (ver fig. 67).

Figura 67. Posición de montaje



Fuente: Sew Eurodrive (2021). *Driveconfigurator R57R37CMP40M*. Consultado el 21 de agosto de 2022. Recuperado de https://www.seweurodrive.com/os/catalog/products/drives/servogearmotor/default.aspx?language=en_US&country=US.

- Nivel de aceite del motoreductor: se debe controlar el nivel de aceite dependiente de la posición de montaje, durante la instalación del reductor procurar que el tornillo del nivel de aceite y el tapón de drenaje de aceite, queden accesibles.
- Estructura de soporte: la estructura de soporte debe ser plana, anti vibratoria y rígida a la torsión.

- La tabla (6), muestra las tolerancias de planitud máximas admisibles en el montaje con patas.
- Los tornillos de sujeción son M12 con clase de resistencia 8.8.
- Evitar corrosión en uniones roscadas: usar distanciadores de plástico de 2-3 mm de espesor si existe riesgo de corrosión. Se puede presentar corrosión electroquímica entre metales diferentes. Poner también arandelas de plástico en los tornillos. Conectar la carcasa adicionalmente a tierra. Utilizar tornillos de puesta a tierra en el motor.

Tabla VII. **Pares de apriete tornillos de sujeción**

Tornillo/tuerca de sujeción	
Tornillo/tuerca	Par de apriete +- 15 % Clase de resistencia 8.8 Nm
M6	12
M8	28
M10	56
M12	96
M16	235
M20	460

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

- Los tornillos de sujeción de anclaje de la base de la extrusora son M12

Tabla VIII. **Pares de apriete tornillos de nivel de aceite**

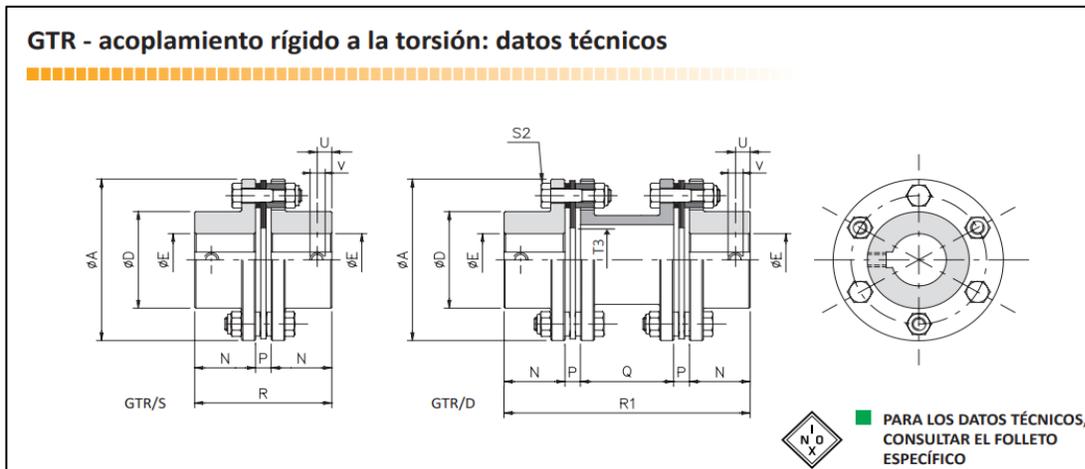
Par de apriete para tornillos de nivel de aceite, drenaje de aceite y cierre	
Rosca	Par de apriete (Nm)
M10 X 1	12
M12 X 1.5	15
M22 X 1.5	60
M33 X 2	100
M42 X 2	150

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

- Montaje de ejes de extrusora y moto-reductor
- Se pueden presentar daños en rodamiento, carcasa o en los ejes, debido a un montaje incorrecto.
- Utilizar un dispositivo de montaje para instalar los elementos de entrada y salida. Para el posicionamiento, utilizar el orificio de centraje con rosca, que se encuentra en el extremo del eje.
- Introducir el acoplamiento sin golpear el extremo del eje con un martillo.
- Cerciorarse que los elementos de transmisión colocados están equilibrados y no provocan fuerzas radiales ni axiales inadmisibles.
- Se puede facilitar el montaje untando el elemento de salida con lubricante o calentándolo brevemente a 80 °C – 100 °C.

La unión entre el acople es como se indica en la fig. (66) es mediante 6 tornillos de acero de clase 10.9, llevan un par de apriete de 22 Nm, (ver fig. 66) para S2, con lo cual, es capaz de transmitir un par máximo de 600 Nm como se puede observar en el catálogo del fabricante para los acoples de tamaño No 3.

Figura 68. Dimensionamiento de acople



Fuente: Comintec (2021). *Catálogo Acoplamiento rígido a la torsión*. Consultado el 26 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.comintec.com/download/cataloghi/acoplamientos/GTR_ES.pdf.

Tabla IX. Variables de las dimensiones

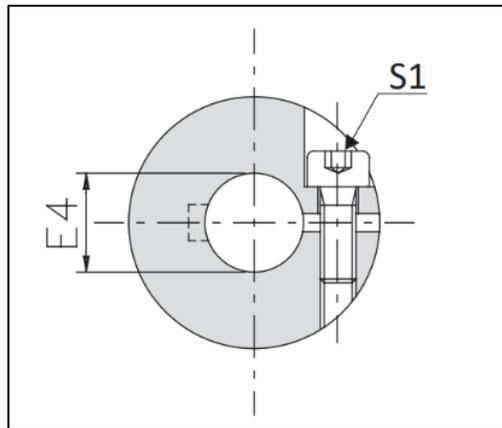
DIMENSIONES

Tamaño	A	D	E H7 máx.	E4 H7		N	P	Q		R	R1	T3	U	V
				min.	máx.			▲min.	std.					
0	78	45	32	10	25	29	7,5	36	50	65,5	123	38	8,5	M5
1	80	45	32	10	25	36	8	36	50	80	138	38	8,5	M5
2	92	53	38	12	30	42	8	36	50	92	150	45	10	M5
3	112	64	45	15	35	46	10	47	59	102	171	55	12,5	M8
4	136	76	52	19	45	56	12	51	75	124	211	65	15,5	M8
5	162	92	65	20	55	66	13	60	95	145	253	75	20	M8
6	182	112	80	25	▲ 70	80	14	61	102	174	290	88	20	M8
7	206	128	90	35	▲ 80	92	15	64	101	199	315	105	25	M10
8	226	133	95	35	▲ 80	100	22	86	136	222	380	106	25	M10
9	252	155	110	-	-	110	25	88	130	245	400	128	25	M12
10	296	170	120	-	-	120	32	124	144	272	448	134	25	M12
▲ 11	318	195	138	-	-	140	32	-	136	312	480	156	30	M16
▲ 12	352	220	155	-	-	155	32	-	172	342	546	156	40	M20
▲ 13	386	245	175	-	-	175	37	-	226	387	650	-	40	M20
▲ 14	426	270	190	-	-	190	37	-	236	417	690	-	45	M24
▲ 15	456	290	205	-	-	205	42	-	246	452	740	-	45	M24

Fuente: Comintec (2021). *Catálogo Acoplamiento rígido a la torsión*. Consultado el 26 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.comintec.com/download/cataloghi/acoplamientos/GTR_ES.pdf.

El montaje del eje del extrusor al motorreductor es lineal, mediante un acople de bloqueo con mordaza tipo B, como el que se puede observar en la fig. 67. Se puede observar del manual de fabricante el valor de par de apriete para los tornillos S1 (ver figura 67), los tornillos de acople tienen un valor de apriete de 43 Nm.

Figura 69. **Tornillos S1 de mordaza**



Fuente: Comintec (2021). *Catálogo Acoplamiento rígido a la torsión*. Consultado el 26 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.comintec.com/download/cataloghi/acoplamientos/GTR_ES.pdf.

Tabla X. Características técnicas del acople

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GTR/S

Tamaño	Par [Nm]			Peso [kg]	Inercia [kgm ²]	Velocidad máx. *2 [rpm]	Carga axial [kg]	par de apriete tornillos [Nm]		Desalineaciones			Rigidez R _{1s} [10 ⁶ Nm/rad]
	Nom	Máx.	Movimiento alterno					S1	S2	Angular α [°]	Axial x [mm]	Radial k [mm]	
0	60	120	20	1,6	0,00058	14500	10	10,5	12	1°	0,7	-	80
1	100	200	33	1,3	0,00067	14200	14	10,5	12	0° 45'	0,8	-	117
2	150	300	50	2,4	0,00193	12500	19	17	13	0° 45'	0,9	-	156
3	300	600	100	3,9	0,00386	10200	26	43	22	0° 45'	1,2	-	415
4	700	1400	233	6,3	0,00869	8500	34	43	39	0° 45'	1,4	-	970
5	1100	2200	366	10,4	0,01009	7000	53	84	85	0° 45'	1,6	-	1846
6	1700	3400	566	15,6	0,03648	6300	70	145	95	0° 45'	2,0	-	2242
7	2600	5200	866	24,8	0,07735	5500	79	220	127	0° 45'	2,2	-	3511
8	4000	8000	1333	33,0	0,13403	5000	104	220	260	0° 45'	2,4	-	8991
9	7000	14000	2333	42,0	0,25445	4500	115	-	480	0° 45'	2,5	-	11941
10	10000	20000	3333	67,0	0,45019	3800	138	-	760	0° 45'	2,6	-	15720
11	12000	24000	4000	94,0	0,71654	3600	279	-	780	0° 45'	2,9	-	15521
12	25000	50000	8333	130,0	1,22340	3200	484	-	800	0° 30'	2,9	-	37700
13	35000	70000	11666	160,0	1,94410	3000	638	-	1100	0° 30'	3,1	-	51500
14	50000	100000	16666	210,0	3,10950	2700	683	-	1500	0° 30'	3,4	-	64300
15	65000	130000	21666	270,0	4,37920	2500	744	-	2600	0° 30'	3,8	-	69800

Fuente: Comintec (2021). *Catalogo Acoplamiento rígido a la torsión*. Consultado el 26 de marzo de 2023. Recuperado de https://www.comintec.com/download/cataloghi/acoplamientos/GTR_ES.pdf.

Tabla XI. Holguras para montaje de ejes, normas ISO

Eje/ acople	Norma	Holgura (mm)
Eje reductor 35 mm	DIN 748 ISO k6	+35.018 +35.002 Holgura máx. = 0.016
Eje Adaptador para eje desmontable de la extrusora a acople 20 mm	DIN 748 ISO k6	+20.015 +20.002 Holgura máx. = 0.013
Acople 20 mm 35 mm	DIN ISO 1940-1:2003 Q 6.3	
Eje del tornillo extrusor 20 mm	Ajuste corriente con ajuste de deslizamiento ISO h8	0 -20.033 Holgura máx. = 0.033
Agujero de adaptador del eje del tornillo extrusor para eje desmontable 20 mm	Ajuste corriente con ajuste de deslizamiento ISO H8	+20.033 +20 Holgura máxima 0.033

Continuación de la tabla XI.

Pasador de adaptador del eje de tornillo extrusor 10 mm	Ajuste corriente con ajuste de deslizamiento ISO h8	0 -10.033 Holgura máx. = 0.033
Agujero de pasador	Ajuste corriente con ajuste de deslizamiento ISO H8	+10.033 +10 Holgura máxima 0.033

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Tabla XII. **Clase de resistencia de tornillos**

Componente	Tornillo	Clase de resistencia	Torque
Sujeción Motor	M12	8.8	96 Nm
Sujeción de extrusora	M12	8.8	96 Nm
Tornillo nivel de aceite y drenaje de aceite			
Sujeción cubo de extrusora	M12	8.8	96 Nm
Acople (unión)	M10	10.9	22 Nm
Mordaza de acople		10.9	43 Nm
Base de cojinete	M12	8.8	96 Nm
Tolva	M6	8.8	12 Nm
Boquilla	M6	8.8	12 Nm

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

2.12. Mantenimiento

En la tabla XIII se describe el proceso del mantenimiento de los componentes.

Tabla XIII. **Mantenimiento de los componentes**

Componente	Intervalo de tiempo	Que hacer
Servomotor	Cada 1000 horas de servicio	Comprobar rodamientos y sustituir si fuera necesario, sustituir retén, limpiar conductos de aire de refrigeración.
Freno BK	Cada 0.5 a 2 años	Determinar tensión de apertura (chasqueo de freno).
Superficies del servomotor	Variable	Limpiar las superficies
Reductores	Cada 3000 horas de servicio, mínimo cada 6 meses	Comprobar el aceite y nivel de aceite Comprobar ruido de funcionamiento, si el rodamiento presentara daños Control visual de las juntas por si presentaran fugas Compruebe que todos los tornillos de cierre, la válvula de salida, de gases, y los tornillos de cubierta de inspección estén bien ajustados.
Reductores, cojinetes	Aceite mineral Cada 3 años De acuerdo a la temperatura del aceite	Cambio de aceite. Sustituir la grasa para rodamientos Sustituir el retén (no montarlo sobre la misma huella)
Reductores, cojinete	Aceite sintético Cada 5 años De acuerdo a la temperatura del aceite	Cambio de aceite. Sustituir la grasa para rodamientos Sustituir el retén (no montarlo sobre la misma huella).
Reductor	Variable	Retocar pintura anticorrosiva. Comprobar el funcionamiento de la válvula de salida de gases.
Reductor	A partir del 5to. año de servicio	Compruebe el efecto bloqueador del anti retorno. Asegurarse que no pase el par de bloqueo máximo.
Extrusor	Cada vez que se use	Limpiar cámara de compresión, tornillo, orificio de cubo base, boquilla y manguera para que no queden residuos de mezcla. Asegurar bien todos los tornillos de acople, que queden bien ajustados.

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

Figura 70. **Reductor R-57**



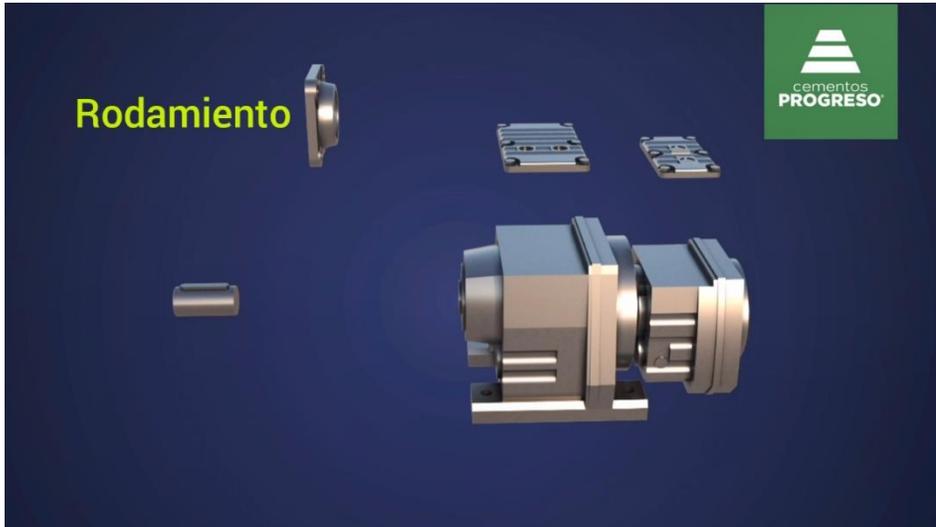
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 71. **Reductor R-37**



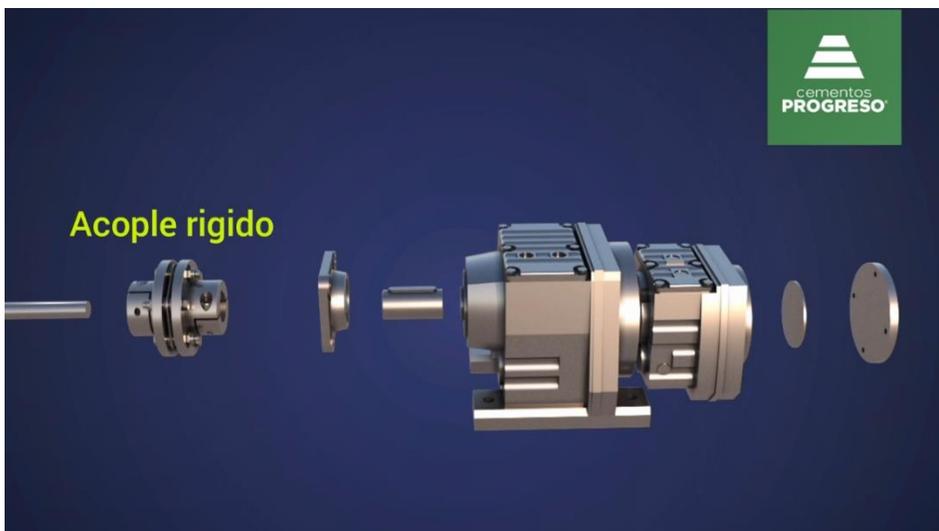
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 72. **Rodamiento**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 73. **Acople rígido**



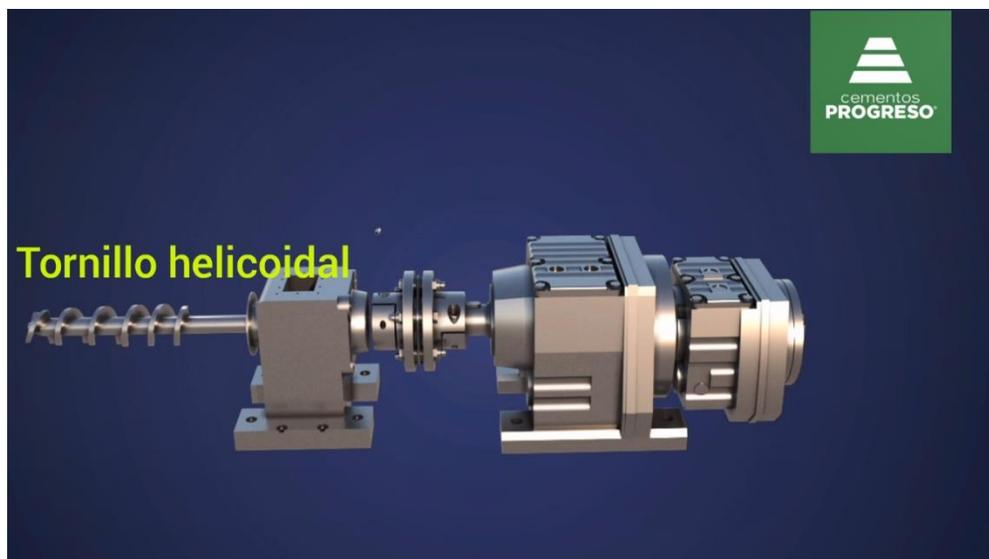
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 74. **Cubo base de alimentación**



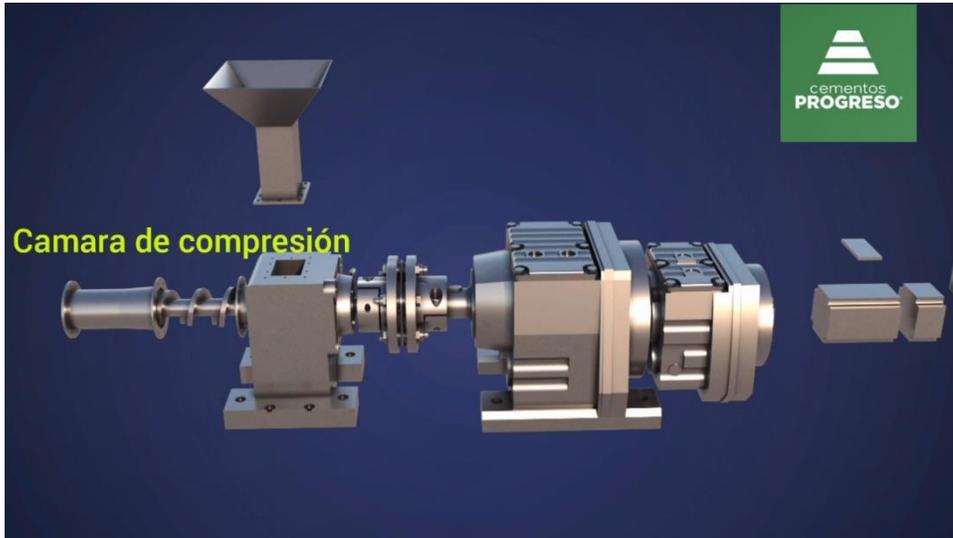
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 75. **Tornillo helicoidal**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 76. **Cámara de compresión**



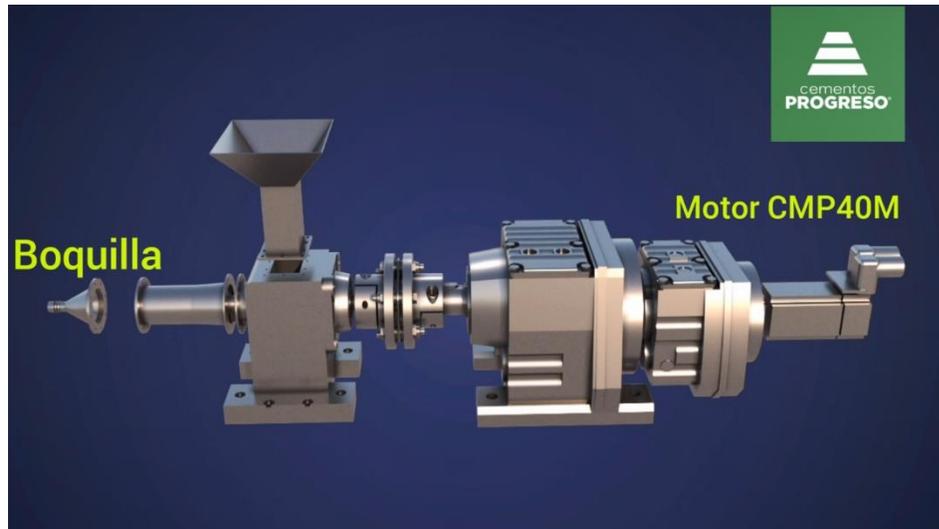
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 77. **Tolva de alimentación**



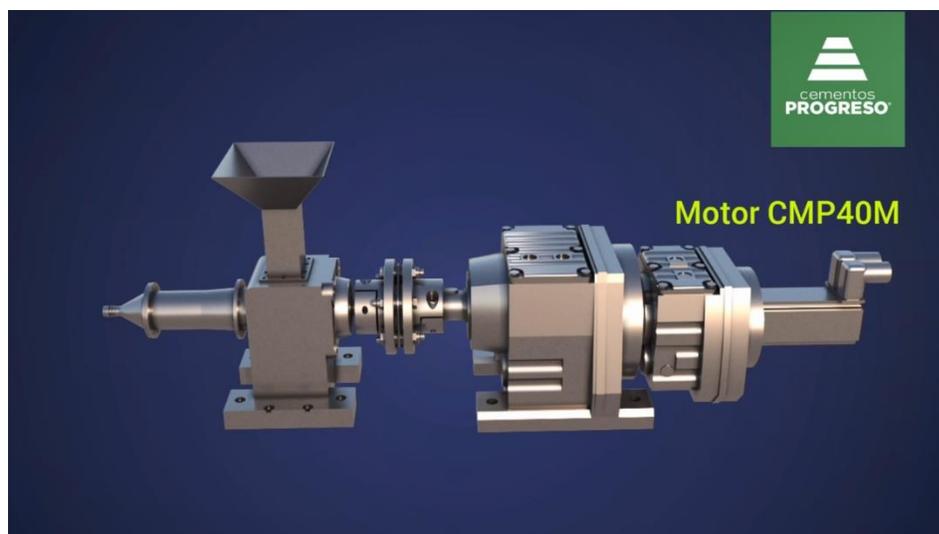
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 78. **Boquilla de extrusión**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 79. **Motor CMP40M**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Figura 80. **Extrusora de tinta cementante**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

3. FASE DE DOCENCIA

3.1. Capacitación

- Nombre de la empresa: Cementos Progreso S.A. CETEC
- Epesista: Carlos Jose Escobar Noriega
- Asesor de Ejercicio Profesional Supervisado: Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma.
- Área: Ingeniería Mecánica.
- Fecha de capacitación: jueves 05/mayo/2022.
- Lugar: Laboratorios CETEC (área de diseño).

3.2. Objetivo general

Capacitar al equipo técnico de la empresa que se hará responsable del buen funcionamiento y mantenimiento preventivo del prototipo, resultado de la investigación, dar a conocer el funcionamiento de cada uno de los componentes mecánicos de la máquina, su respectivo funcionamiento dentro de la misma y la función que desempeña.

3.3. Objetivos específicos

- Capacitar al equipo delegado por la empresa para el conocimiento del manejo y funcionamiento de cada uno de los componentes mecánicos.
- Resolver inquietudes de los participantes en el manejo de la extrusora de tinta cementante.

- Observar el interés presentado en la capacitación del prototipo y el reconocimiento de apoyo laboral dentro de la empresa.

3.4. Programa de capacitación

En la tabla XIV se presenta y describe el programa de capacitación.

Tabla XIV. Programa de capacitación

Tema	Actividades	Tiempo de actividad	Recursos	Evaluación
Presentación de máquina Extrusora	Bienvenida al equipo de técnicos de la empresa	00:02 minutos	<ul style="list-style-type: none"> • Salón de audiovisuales • Cañonera • Computadora 	Se formularon preguntas por los participantes, que fueron resueltas en ese momento.
	Presentación de diapositivas de estructura y funciones de la máquina	05 minutos		
	1. Motor CMP40M <ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 	05 minutos		
	2. Reductores de velocidad mecánicos (R57R37) <ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 	05 minutos		
	3. Acoplamiento rígido GTR (rodamiento de bolas) <ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 	05 minutos		

Continuación de la tabla XIV.

Presentación de máquina Extrusora	4. Rodamiento FYJ 25 KF	05 minutos	<ul style="list-style-type: none"> • Salón de audiovisuales • Cañonera • Computadora 	Se formularon preguntas por los participantes, que fueron resueltas en ese momento.
	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 			
	5. Cubo base de alimentación	05 minutos		
	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 			
	6. Tornillo helicoidal	05 minutos		
	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 			
7. Cámara de compresión	05 minutos			
<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 				
6. Boquilla de extrusión	05 minutos			
<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 				
6. Tolva de alimentación	05 minutos			
<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento • Características • Mantenimiento • Montaje 				

Continuación de la tabla XIV.

Presentación de máquina Extrusora	7. Mantenimiento Componente, intervalo de tiempo y qué hacer	05 minutos	<ul style="list-style-type: none"> • Salón de audiovisuales • Cañonera • Computadora 	Se formularon preguntas por los participantes, que fueron resueltas en ese momento.
	8. Seguridad Precauciones, advertencias, avisos y cuidados para maniobrar la máquina	04 minutos		
	9. Video de montaje y acoplamiento de la máquina Transmisión de video de la colocación de los distintos componentes de la extrusora			

Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

3.5. Listado de asistencia

En la figura 81 se presenta el listado de asistencia de la presentación de la extrusora.

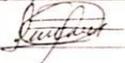
Figura 81. Listado de asistencia



Nombre de la empresa: Cementos Progreso S.A. CEDEC
 Epesista: Carlos José Escobar Noriega
 Asesor de Ejercicio Profesional Supervisado: Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma
 Área: Ingeniería Mecánica
 Fecha de capacitación: jueves 05/mayo/2022
 Lugar: Laboratorio de diseño, CEDEC

LISTADO DE ASISTENCIA

CAPACITACIÓN PROYECTO EPS SOBRE EXTRUSORA DE TINTA CEMENTANTE PARA IMPRESORA 3D

Nombre	No CUI	Teléfono	Firma
William Alvarado Quiroz	1801556010101	52086135	
ANDRÉS BARRILAS	2173617140501	4543766	
Araciel Quillo	2007998710101	47661339	
Wilson A. Jara	2537204860116	40124186	

Escaneado con CamScanner

Fuente: [Fotografía de Carlos José Escobar Noriega]. (Guatemala, Guatemala. 2023).
 Colección particular. Guatemala.

3.6. Presentación de programa de capacitación

En las siguientes figuras se presentan detalles de la capacitación que se llevo a cabo para presentar la extrusora.

Figura 82. Explicación de los componentes de la extrusora



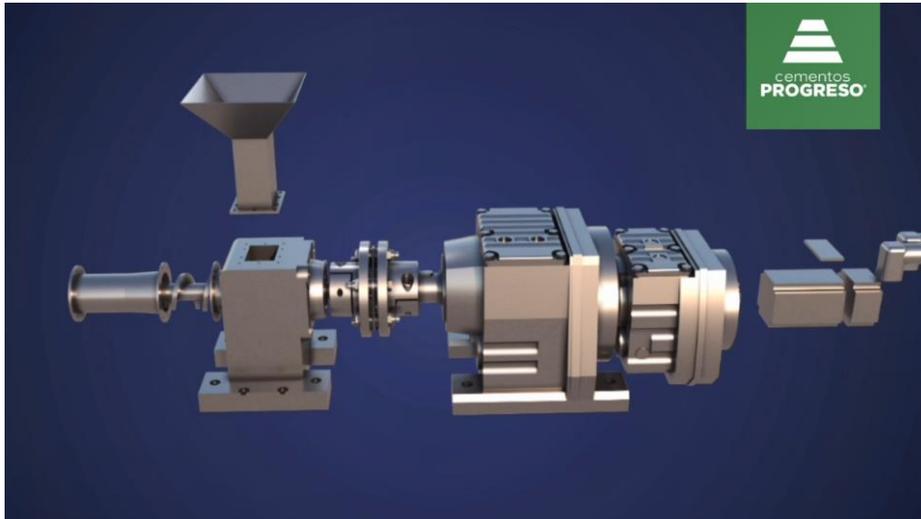
Fuente: [Fotografía de Carlos José Escobar Noriega]. (Guatemala, Guatemala. 2023). Colección particular. Guatemala.

Figura 83. **Presentación de la extrusora**



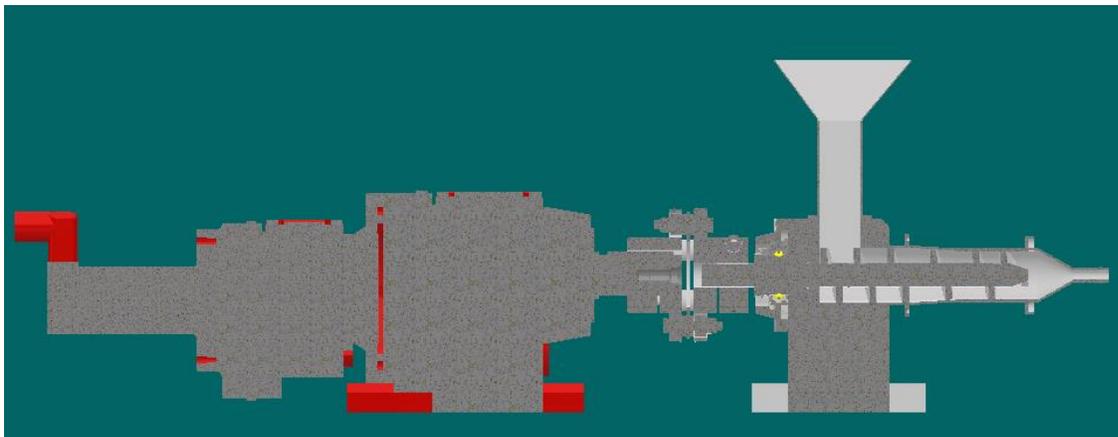
Fuente: [Fotografía de Carlos José Escobar Noriega]. (Guatemala, Guatemala. 2023). Colección particular. Guatemala.

Figura 84. **Montaje extrusor**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor profesional 2020.

Figura 85. **Corte extrusor**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor profesional 2020.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que el mejor mecanismo hidráulico para un excelente bombeo de una tinta de valor muy alto de viscosidad, como lo es la tinta de cemento de este proyecto, es el mecanismo de una máquina de desplazamiento positivo, generadora roto-estática clasificada en máquina de engranaje de tornillo.
2. Se diseñó con una dimensión de componentes para generar un flujo de tinta de $Q = 2167 \text{ mm}^3/\text{min}$ de una boquilla de sección transversal de diámetro 6mm, capaz de vencer un par torsión máximo de 401 Nm girando a un rango de 4.3 RPM para lograr el flujo de tinta requerida partiendo de un eje de extrusor de 20 mm.
3. No es necesario la construcción de la estructura, ejes de desplazamiento y cabezal, se adaptará el sistema de extrusión de hormigón a una impresora de PLA existente en el mercado.
4. Las ventajas que ofrece el mecanismo de maquina hidráulica, seleccionada es que, tienen un bombeo que está prácticamente libre de pulsaciones, generando un flujo continuo, además tienen un amplio rango de revoluciones y el fluido se desplaza axialmente, las velocidades dentro de la bomba son muy reducidas y el bombeo es cuidadoso. Pueden trabajar a bajas y altas RPM.

5. La reología de la mezcla de impresión presenta una densidad de 1825 kg/m³, valor de esfuerzo cortante inicial de 63,000 Pa-sg y una viscosidad de 100,000 Pa-sg. Se usaron estos datos para encontrar el par torsión generado en el eje.
6. Se diseñó la extrusora de flujo continuo de tinta cementante, capaz de imprimir piezas o proyectos completos sin pausas por recargar material, dado un rango de velocidad de extrusión.
7. Se seleccionó un servomotor de la marca sew-eurodrive controlado por computadora, se destaca por su precisión en la posición en grados y par torsión, con una velocidad máxima de 3000 Rpm, par de 3.8 Nm, tensión del motor 230v.
8. Al motor se le adaptara 2 reductores de velocidad para aumentar el par torsión a 450 Nm y reducir las revoluciones máximas a 9.20 RPM, para poder controlar de 0 a este valor máximo de revoluciones.
9. La extrusora se diseñó con posición de montaje horizontal
10. Se implementó el código ASME, para proyectos de ejes de transmisión, *B17c-1927* el coeficiente de seguridad del diseño del tornillo extrusor es $CS = 3$

RECOMENDACIONES

1. Transportar la tinta de la extrusora hacia la boquilla del cabezal de impresión en la impresora, con una manguera de vinil de 8mm de diámetro interior y una longitud de hasta 100 cm máximo, usar boquilla de sección circular de 6 mm de diámetro en el cabezal de la impresora.
2. Fabricar el eje de la extrusora de material AISI 8740 al carbón, en las 3 zonas (alimentación, compresión y dosificación).
3. Construir la cámara de compresión cilíndrica, con plancha de acero ASTM A36 de un espesor de pared de 2mm.
4. Producir la extrusora con una tolva de alimentación para la recarga de la tinta, con planchas de acero ASTM A-36 de espesor de 2mm.
5. Hacer boquilla de extrusora con un diámetro de entrada de 41mm y 8mm de salida, por la cual debe salir un flujo de tinta de $2167 \text{ mm}^3/\text{min}$, fabricar con acero ASTM A-36.
6. Montar el eje de la extrusora sobre un rodamiento FYJ 26 KF con capacidad de carga estática de 7.8 Kn.
7. Acoplar el eje de la extrusora al eje del servomotor, mediante un acoplamiento rígido GTR de elevada rigidez a la torsión, de un par máximo transmitido de 600 Nm.

8. Confeccionar el adaptador de pasador del eje del tornillo extrusor, para desmontar fácilmente, siempre que se termine de usar, con un ajuste corriente de deslizamiento ISO h8.

9. Incorporar un variador de velocidad electrónico acoplado los mismos reductores de velocidad mecánicos presentados en este proyecto.

REFERENCIAS

1. Aerodynamics for students. (s.f.). Análisis de volumen de control [Mensaje en blog]. Recuperado de http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/pipeflow/node12.htm.
2. Anguita, R. (1977). *Extrusión de plásticos*. Barcelona: Hermann Blume.
3. Azarello, N. (28 de agosto, 2014). Andrey Rudenko constructs 3D printed concrete castle [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.designboom.com/technology/3d-printed-concrete-castle-minnesota-andrey-rudenko-08-28-2014/>.
4. Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J. y Mazurek, D. (2010). *Mecánica de materiales*. México: McGraw-Hill.
5. Camilo, W. (1 de agosto, 2015). Producción de la varilla peletizada de plástico [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Produccion-de-la-varilla-peletizada-de-plastico-madera_fig2_280733573.
6. Chapoñan, C. y Rojas, J. (2019). *Diseño de una maquina extrusora de ladrillos para la fábrica “Ladrillos Clark”* (Tesis de licenciatura). Universidad Señor de Sipán, Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12802/6619>.

7. Comintec. (2021). *Catalogo Acoplamiento rígido a la torsión*. Italia: Autor. Recuperado de https://www.comintec.com/download/cataloghi/acoplamientos/GTR_ES.pdf.
8. Estrada, O. (2002). *Exposición extrusión monohusillo y doblehusillo*. Medellín: ICIPC.
9. Fiorella. (2021). *Plancha acero A-36, características del producto*. Perú: Autor. Recuperado de <https://www.fiorellarepre.com.pe/FichaTecnica/605020.pdf>.
10. Granito de Arena. (s.f.). Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso, S.A. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.revistagranitodearena.com/acerca-de-cid/>.
11. Gutiérrez, P. y Bornacelli, J. (2008). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo*. Colombia: Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico, Universidad Autónoma de Occidente.
12. Ji Chen, W. (2017). *Diseño de un extrusor para imprimir chocolate* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado de <https://docplayer.es/93451581-Diseno-de-un-extrusor-para-imprimir-chocolate.html>.
13. Jung process system. (s.f.). El principio de las bombas de tornillo: caudal axial suave y uniforme [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.jung-process-systems.de/>.

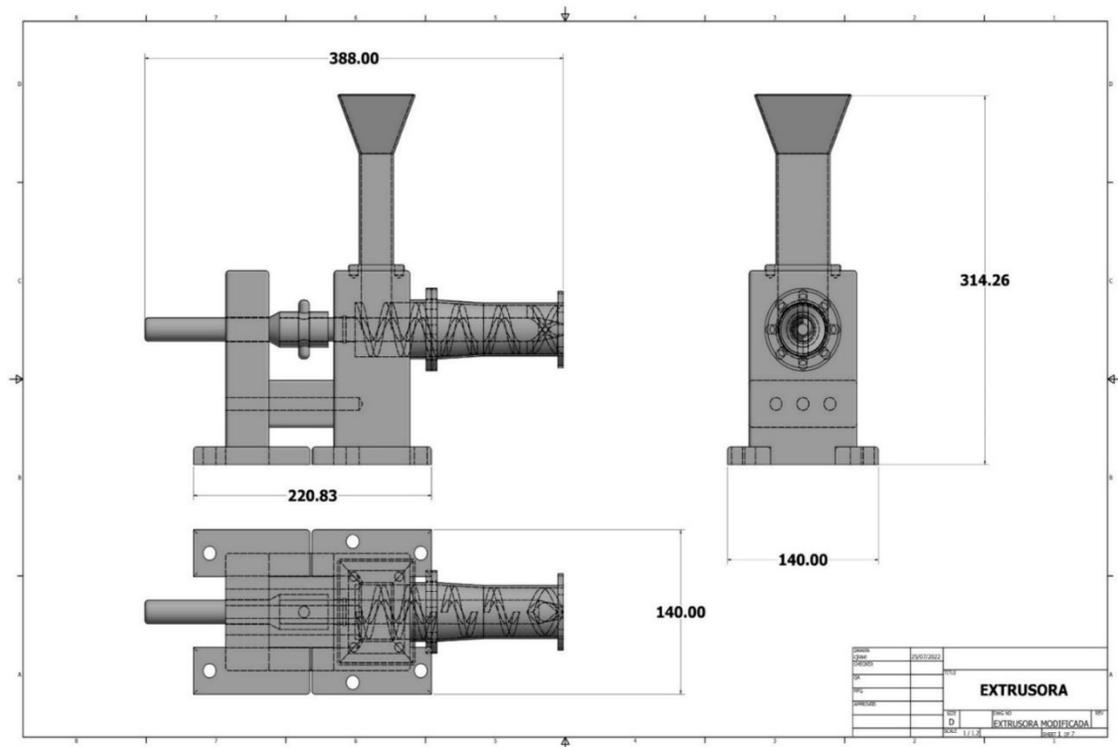
14. Mataix, C. (1982). *Mecanica de fluidos y maquinas hidraulicas, bombas de embolo*. Madrid: Ediciones del Castillo, S.A.
15. Pacheco, G. (2017). *Diseño y construcción de una extrusora lateral y obtención de fuerzas* (Tesis de licenciatura). Universidad de Sevilla, Sevilla. Recuperado de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91076/fichero/Dise%C3%B1o+y+construcci%C3%B3n+de+una+extrusora+lateral.pdf>.
16. Pinterest. (1 de noviembre, 2022). 3d illustration archimedes screw above engineering stock ilustration 732536893 [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.pinterest.com/pin/1066086543017518911/>.
17. Sapiensman, cienciasfera. (s.f.). Bombas hidráulicas rotativas de engranajes externos [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.cienciasfera.com/materiales/tecnologia/tecno02/tema08/41_rotativas_de_engranajes_externos.html.
18. Sew Eurodrive. (12 de abril, 2021). Driveconfigurator R57R37CMP40M [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.seweurodrive.com/os/catalog/products/drives/servogearmotor/default.aspx?language=en_US&country=US.
19. Spotts, M. (1966). *Proyecto de elementos de maquina*. España: Reverte, S.A.

20. Velilla, W. (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla* (Tesis de maestría). Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Recuperado de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/116/92694388.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

21. Verbruggen, D. (marzo, 2014). The Road to Better Paste Extrusion. *RepRap Magazine*, (3), 26-29. Recuperado de https://issuu.com/garyhodgson/docs/reprapmagazine_issue_3.

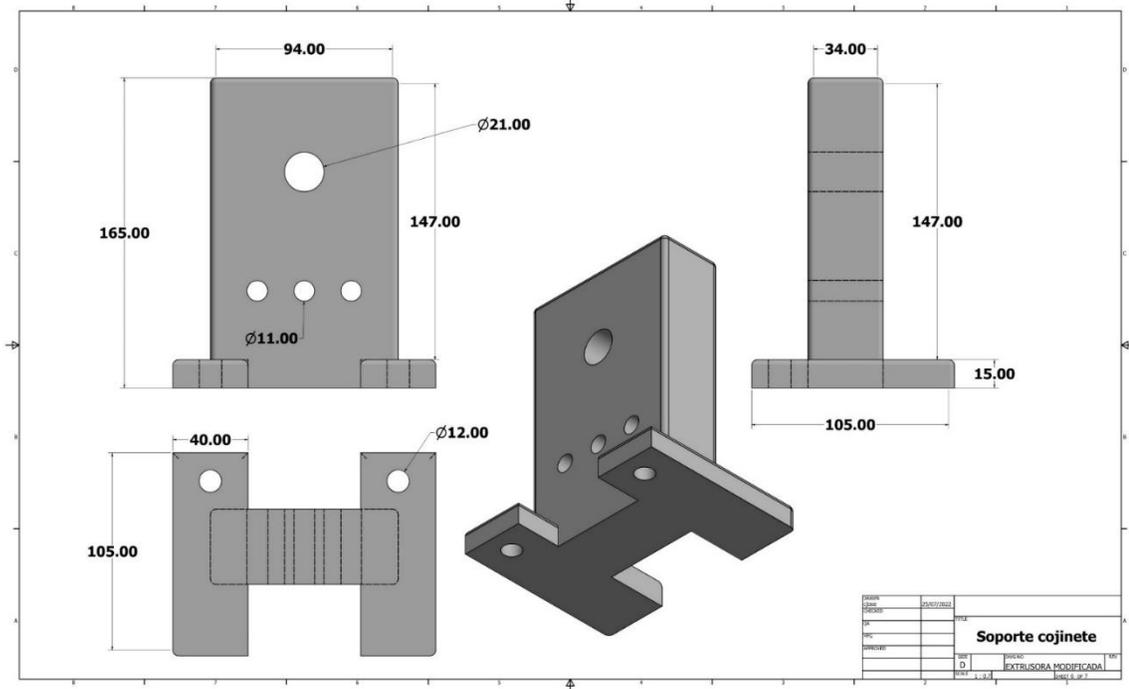
APÉNDICES

Apéndice 1. Plano del cuerpo de la extrusora sin motor



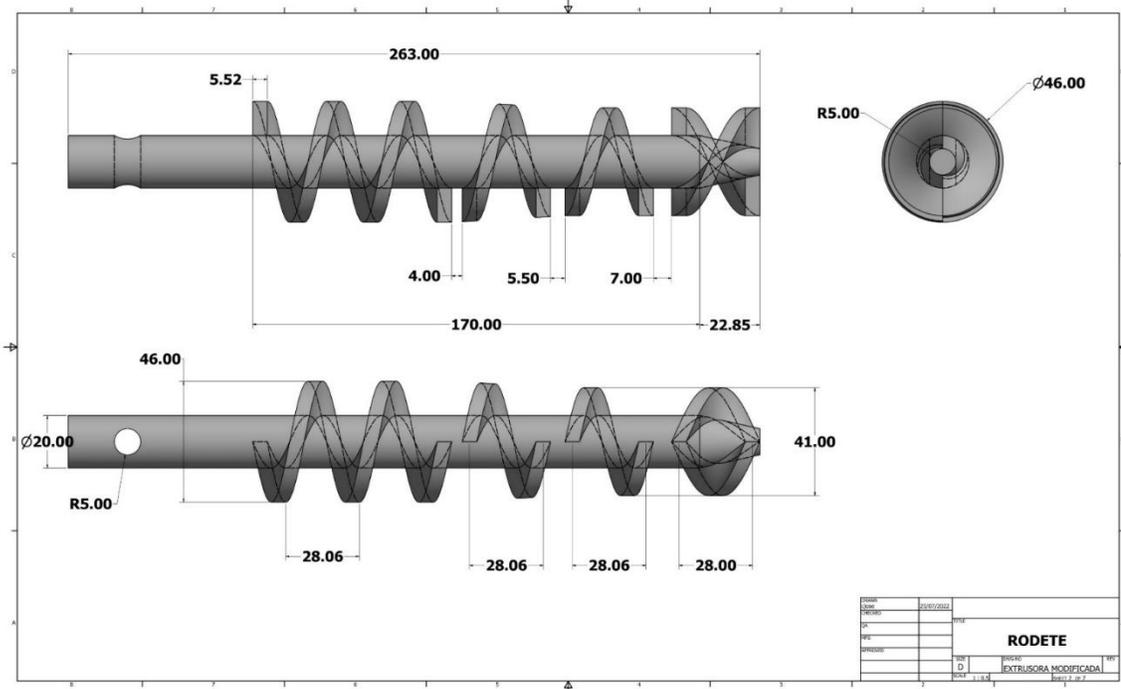
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Apéndice 3. Plano soporte de cojinete



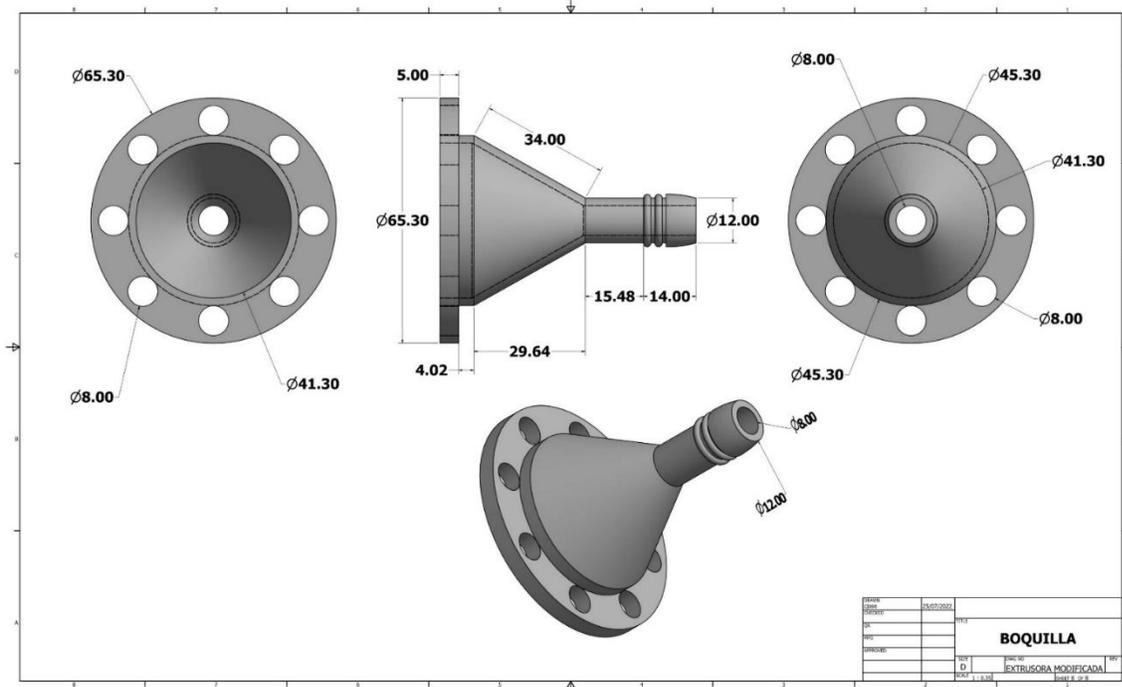
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Apéndice 5. **Plano rodete tornillo extrusor**



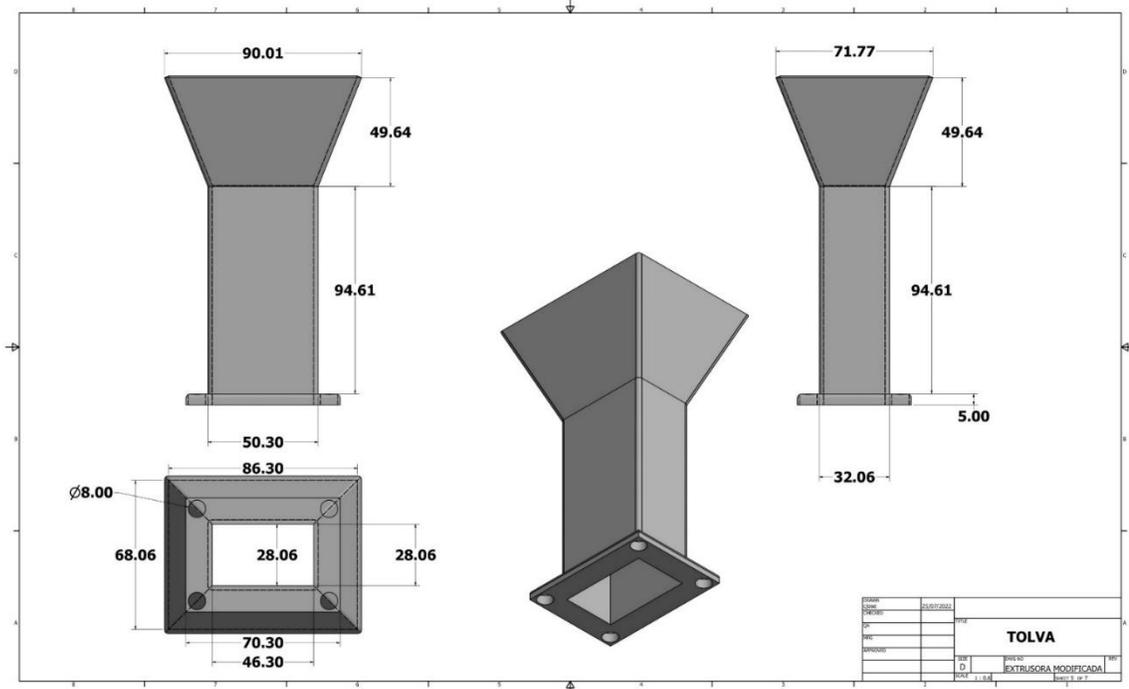
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Apéndice 6. Plano boquilla



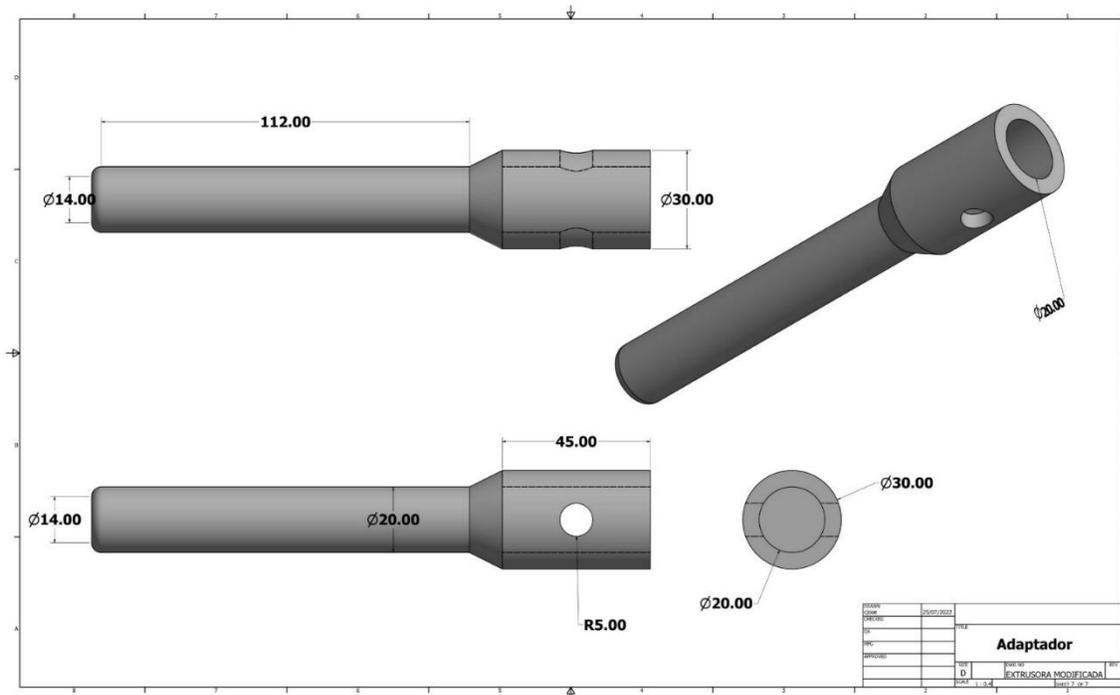
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Apéndice 7. Plano tolva de alimentación



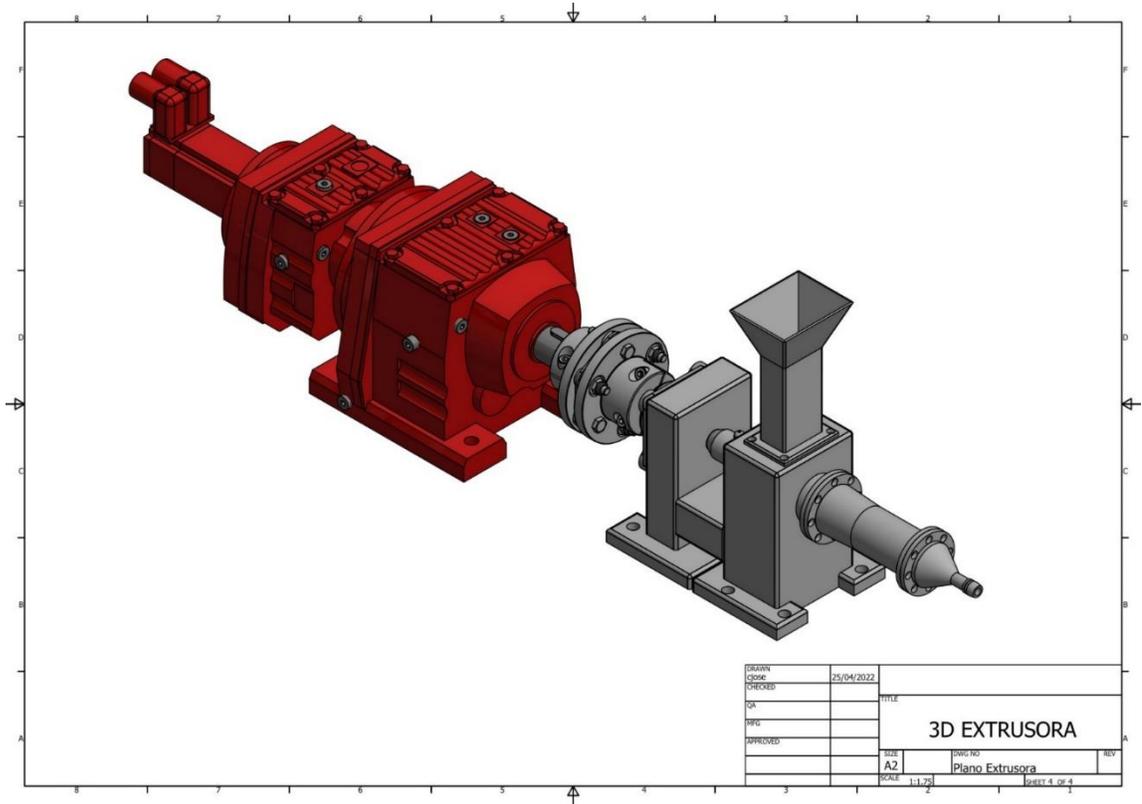
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Apéndice 8. Plano Adaptador de eje



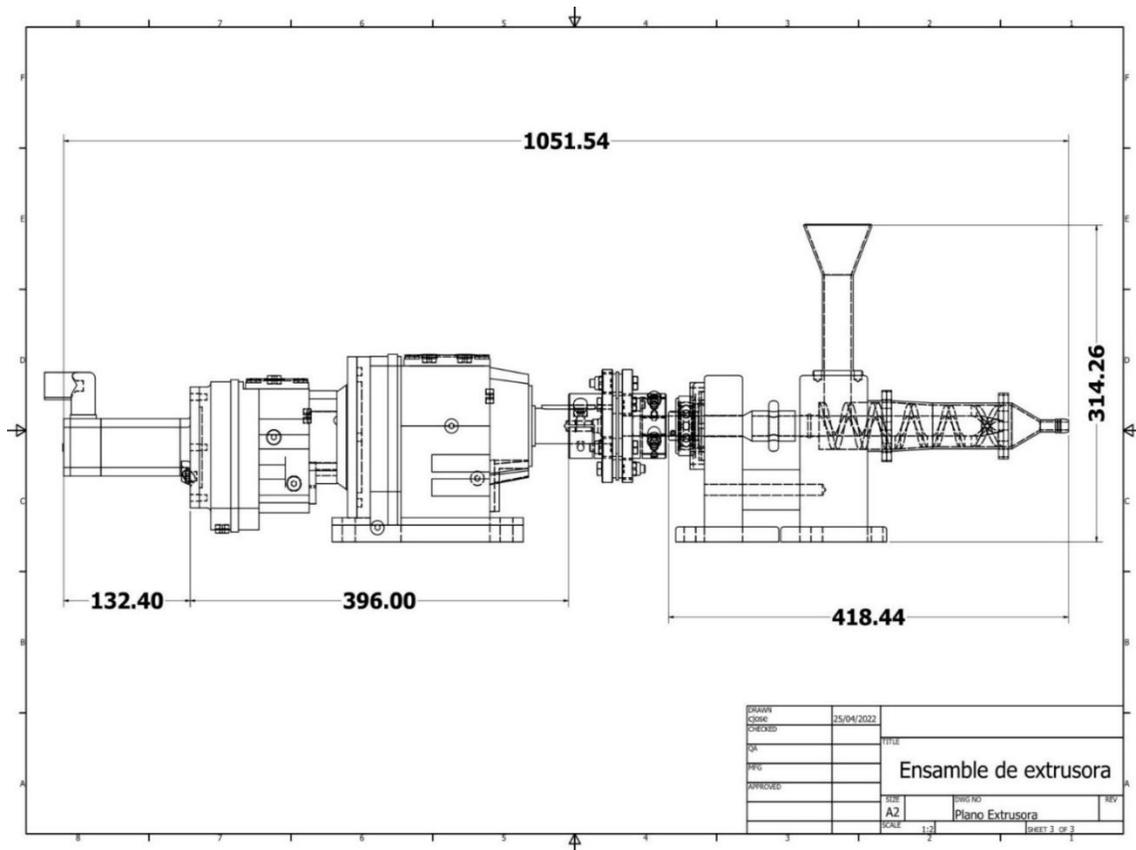
Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Apéndice 9. **Dibujo 3D de la extrusora con motor adaptado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

Apéndice 10. **Plano del ensamble de la extrusora con motor**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk Inventor Profesional 2020.

ANEXOS

Anexo 1. Cojinete FYK 20 TD



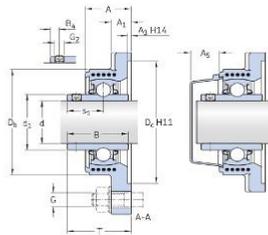
FYK 20 TD

Unidades de rodamientos de bolas con pestaña cuadrada

Los valores dependen del rodamiento incluido:
 tabla 1, tabla 2, tabla 3,
 tabla 4

Especificación técnica

Cumplimiento con el estándar	ISO
Para un propósito específico	Para aplicaciones agrícolas
Material del soporte	Material compuesto
Solución de sellado	Sellos de 5 labios



DIMENSIONES

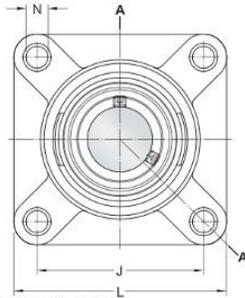
d	20 mm	Diámetro del agujero
d ₁	≈ 28.2 mm	Diámetro exterior del aro interior
A	30 mm	Ancho total
A ₁	15 mm	Ancho de la pestaña
A ₃	3.2 mm	Profundidad del rebaje de centrado
A ₅	20 mm	Parte que sobresale de la tapa lateral
B	31 mm	Ancho del aro interior
B ₄	4.5 mm	Distancia entre la cara lateral del dispositivo de fijación y el centro de la rosca
D _b	59 mm	Diámetro superior externo
D _c	68.3 mm	Diámetro del rebaje de centrado del soporte
J	63.5 mm	Distancia entre los tornillos de fijación

Fuente: SKF (s.f.). *Unidades de rodamiento de bolas con pestaña cuadrada, productos FYK 20 TD.* Consultado el 27 de marzo de 2023. Recuperado de <https://www.skf.com/ar/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/flanged-ball-bearing-units/productid-FYK%2020%20TD>.

Anexo 2. Cojinete SKF FYK 20 TD Datos de calculo

SKF

Generado desde [sitio] el [fecha]



L	86 mm	Longitud total
N	12.3 mm	Diámetro del agujero del tornillo de fijación
≤1	18.3 mm	Distancia entre la cara lateral del dispositivo de fijación y el centro del camino de rodadura
T	37.3 mm	Ancho total de la unidad

DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	12.7 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	6.55 kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.28 kN
Velocidad límite		1 800 r/min
con tolerancia de eje h6		

MASA

Masa de unidad de rodamientos	0.27 kg
-------------------------------	---------

INFORMACIÓN DE MONTAJE

Tornillo de fijación	G ₂	M6x0.75
Tamaño de llave hexagonal para tornillo de fijación		3 mm
Par de apriete recomendado para el tornillo de fijación		4 Nm
Diámetro recomendado para los tornillos de fijación, mm	G	10 mm
Diámetro recomendado para los tornillos de fijación, pulgadas	G	0.375 in

PRODUCTOS INCLUIDOS

Soporte	FYK 504
Rodamiento	YAR 204-2DW/AG

SKF

Página [página] de 4

Fuente: SKF (s.f.). *Unidades de rodamiento de bolas con pestaña cuadrada, productos FYK 20 TD*. Consultado el 27 de marzo de 2023. Recuperado de <https://www.skf.com/ar/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/flanged-ball-bearing-units/productid-FYK%2020%20TD>.