

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño de un medidor de permeabilidad para materiales porosos”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

José Daniel Intriago Moral

Miguel Jamil Proaño Bernal

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico a mis padres quienes con su apoyo incondicional me acompañaron durante cada etapa de mi vida y con su ejemplo me enseñaron que con esfuerzo y dedicación es posible cumplir cada objetivo que me plantee.

**Miguel Proaño Bernal**

Dedico este proyecto a mi familia, sobre todo a mi madre que siempre me ha apoyado y ha estado por mí. A mi padre, que en paz descansa, y a mis hermanos que son los que me dan fuerza. Finalmente, a mi hija que es lo mejor de mi vida y la razón del porque todo mi esfuerzo.

**José Daniel Intriago Moral**

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro más sincero agradecimiento a los docentes y miembros de la Escuela Superior Politécnica del Litoral por los conocimientos y guía brindada a la largo de nuestra vida universitaria.

**Miguel Proaño Bernal**

**José Daniel Intriago Moral**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Miguel Jamil Proaño Bernal* y *José Daniel Intriago Moral* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Miguel Proaño Bernal



José Intriago Moral

## EVALUADORES



---

**Francis Roderich Loayza**  
PROFESOR DE LA MATERIA



---

**Mayken Stalin Espinoza**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El medidor de permeabilidad para materiales porosos se basa en un permeámetro de cabezal variable provisto de un sistema electrónico que se encarga del procesamiento de datos y presentación de resultados. Se hace una investigación sobre permeabilidad, aplicación de la Ley de Darcy, tipos de permeámetros, normas técnicas y trabajos previos que se relacionan con medición de permeabilidad. Con esta información se pensó en el diseño conceptual, se plantean tres modelos, de los cuales se selecciona el mejor prototipo mediante la aplicación de matrices QFD, esta metodología permitió determinar las principales características técnicas en relación a las necesidades del usuario. Para el diseño del medidor de permeabilidad se realiza un análisis hidráulico con el objetivo de determinar las dimensiones, siempre buscando el cumplimiento de las condiciones para la aplicación de la Ley de Darcy. Una vez definidas las dimensiones se realizó la selección de componentes y análisis de esfuerzos. Para la validación del medidor de permeabilidad se realizó la simulación en software para análisis CFD, en donde se analizó el funcionamiento con diferentes probetas, fluidos y presiones. Analizando los resultados se pudo verificar que el medidor de permeabilidad permite determinar la porosidad de materiales porosos, en las conclusiones se describe las fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora. Siendo sus fortalezas que permite determinar la permeabilidad de materiales con hasta 50% de porosidad.

**Palabras Clave:** Darcy, medidor, poroso, permeabilidad.

## **ABSTRACT**

*The permeability meter for porous materials is based on a variable head permeameter provided with an electronic system that is responsible for data processing and presentation of the results. An investigation is done about permeability, application of Darcy's Law, types of permeameters, technical standards and previous works that are related to permeability measurement. With this information, the conceptual design was thought, three models are proposed, of which the best prototype is selected by applying QFD matrices, this methodology allowed to determine the main technical characteristics in relation to the user's needs. For the design of the permeability meter, a hydraulic analysis is carried out in order to determine the dimensions, always seeking compliance with the conditions for the application of Darcy's Law. Once the dimensions were defined, the component selection and stress analysis were performed. For the validation of the permeability meter, the simulation was carried out in software for CFD analysis, where the performance with different test tubes, fluids and pressures was analyzed. The results it was possible to verify that the permeability meter allows to determine the porosity of porous materials, in the conclusions the strengths, limitations and opportunities for improvement are described. Its strengths being that it allows to determine the permeability of materials with up to 50% porosity.*

*Keywords: Darcy, meter, porous, permeability.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. GENERALIDADES .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	2
1.4 OBJETIVOS .....	3
1.4.1 Objetivo General .....	3
1.4.2 Objetivos Específicos .....	3
1.5 MARCO TEÓRICO .....	4
1.5.1 Porosidad .....	4
1.5.2 Porosidad efectiva .....	4
1.5.3 Conductividad hidráulica .....	5
1.5.4 Ley de Darcy .....	5
1.5.5 Resistividad hidráulica .....	11
1.5.6 Permeámetro .....	12
1.5.7 Normas Aplicables .....	13
CAPÍTULO 2 .....	22
2. DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	22
2.1 METODOLOGÍA .....	22
2.2 DEFINICIÓN DE NECESIDADES .....	22
2.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN .....	23
2.3.1 Modelo 1: Diseño de presión constante .....	23



2.3.2	Modelo 2: Diseño de cabezal variable .....	25
2.3.3	Modelo 3: Cabezal Constante con propio sistema hidráulico .....	26
2.3.4	Selección del modelo del prototipo .....	27
2.3.5	Diseño ganador .....	29
2.4	DISEÑO DETALLADO .....	31
2.4.1	Determinación de dimensiones del poro y probeta .....	32
2.4.2	Diseño CAD .....	41
2.4.3	Diseño del cuerpo .....	42
2.4.4	Diseño de pistón porta masas .....	44
2.4.5	Soporte .....	44
2.4.6	Selección del sello .....	50
2.4.7	Diseño de reservorio .....	51
2.4.8	Selección del manómetro .....	52
2.4.9	Selección de balanza .....	52
2.4.10	Diseño de sistema de medición de flujo .....	53
CAPÍTULO 3 .....		57
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	57
3.1	Cálculos para el diseño de los componentes del permeámetro .....	57
3.1.1	Selección de cilindro para el cuerpo .....	57
3.1.2	Diseño de pistón porta masas .....	59
3.1.3	Reservorio .....	60
3.1.4	Soporte .....	61
3.1.5	Selección de sello .....	66
3.1.6	Selección de balanza .....	67
3.1.7	Selección del manómetro .....	67
3.2	Simulación .....	68
3.2.1	Simulación de Probeta 1 .....	68
3.2.2	Simulación de Probeta 2 .....	72
3.2.3	Simulación de Probeta 3 .....	76

3.3	Comparativa de resultados por probetas .....	80
3.4	Análisis de costos.....	90
CAPÍTULO 4 .....		92
4.	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS .....	92
4.1	Conclusiones.....	94
4.2	Recomendaciones.....	95
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
SAE	Society of automotive engineers
QFD	Quality Function Deployment
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAE	Computer Aided Engineering
CAD	Computer Aided Design

## SIMBOLOGÍA

$ml$	Mililitro
$mg$	Miligramo
$kg$	Kilogramo
$m$	Metro
$mm$	Milímetro
$l$	Litro
$Pa$	Pascal
$MPa$	Megapascal
$Psi$	Libra por pulgada cuadrada
$s$	Segundo
$m/s$	Metro sobre segundo
$m^2$	Metro cuadrado
$n_{ef}$	Porosidad efectiva
$v_{ef}$	Volumen de fluido en poros interconectados
$v$	Volumen total del material
$\eta$	Porosidad en %
$K$	Conductividad hidráulica
$k$	Permeabilidad intrínseca
$\gamma$	Peso específico
$\mu$	Viscosidad dinámica
$Re$	Número de Reynolds
$\rho$	Densidad
$i$	Gradiente hidráulico
$\xi$	Resistividad hidráulica
$H$	Carga hidráulica externa
$g$	Aceleración de la gravedad
$Q$	Caudal

$h$	Pérdida de cabezal por probeta
$P_{atm}$	Presión atmosférica
$c$	Altura de columna de agua
$e$	Espesor de probeta
$n$	Número de perforaciones
$a$	Área de poros
$A$	Área
$t$	Espesor
$\sigma_c$	Esfuerzo de tensión del cilindro
$F_s$	Factor de seguridad
$\sigma_{max}$	Esfuerzo máximo
$\sigma_e$	Esfuerzo de tensión del eje
$A_e$	Área transversal del eje
$W$	Peso
$\sigma_{cr}$	Esfuerzo crítico
$\sigma_a$	Esfuerzo axial
$F_a$	Fuerza axial
$E$	Elástica del material
$K$	Factor de pandeo
$r$	Radio de giro
$I$	Momento de inercia del perfil
$A_b$	Área de sección de perfil
$FS_1$	Factor de seguridad por pandeo
$\sigma_x$	Esfuerzo normal en viga
$\tau$	Esfuerzo cortante en viga
$S_y$	Esfuerzo de fluencia de material obtenido
$M$	Momento flector máximo
$V$	Fuerza cortante máxima
$Q$	Momento de primer orden del área transversal

$b$	Ancho de viga
$y$	Distancia desde eje neutro
$FS_2$	Factor de seguridad por momento flector
$FS_3$	Factor de seguridad por fuerza cortante
$R_c$	Ratio de compresión
$H_{cs}$	Altura del perfil de la junta
$H_R$	Altura de la ranura
$v_f$	Volumen de fluido dentro del permeámetro
$m_{m\acute{a}x}$	Masa máxima
$m_{recipiente}$	Masa del recipiente
$m_{fluido}$	Masa del fluido

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Experimento de Darcy en Filtro de Arena Vertical (Bear, 1972) .....	6
Figura 1.2 Experimento de Darcy en Filtro de Arena Inclinado (Bear, 1972) .....	7
Figura 1.3 Clasificación esquemática de flujo a través medio poroso (Bear, 1972) .....	11
Figura 1.4 Permeámetro carga variable .....	12
Figura 1.5 Permeámetro de carga constante .....	13
Figura 1.6 Sistema de carga variable (ASTM, 2002).....	17
Figura 1.7 Sistema de volumen contante, carga constante (ASTM, 2002) .....	19
Figura 1.8 Sistema de volumen contante, carga variable (ASTM, 2002) .....	20
Figura 2.1 Diseño de presión constante.....	24
Figura 2.2 Diseño de cabezal variable .....	25
Figura 2.3 Cabezal constante con recuperación .....	26
Figura 2.4 Matriz QFD Modelo 1 .....	28
Figura 2.5 Matriz QFD Modelo 2 .....	28
Figura 2.6 Matriz QFD Modelo 3 .....	29
Figura 2.7 Diseño de cabezal variable .....	30
Figura 2.8 Esquema para determinación de diámetro de poro .....	32
Figura 2.9 Diseño CAD del prototipo .....	41
Figura 2.10 Presión interna del cuerpo .....	43
Figura 2. 11 Diagrama de Soporte del Equipo .....	45
Figura 2.12 Diagrama de cuerpo libre de perfil.....	46
Figura 2.13 Análisis de Pandeo de Columna .....	48
Figura 2.14 Análisis de Flexión de Viga .....	50
Figura 2.15 Dimensiones del sello hidráulico .....	50
Figura 2.16 Diagrama de Flujo del Proceso .....	54
Figura 2.17 Diagrama del circuito.....	55
Figura 3.1 Simulación de esfuerzos y factor de seguridad.....	60
Figura 3.2 Reservorio inferior de 10000 ml (LABCOMERCIAL, 2020).....	61

Figura 3.3 Vista frontal del soporte.....	61
Figura 3.4 Vista superior del soporte.....	62
Figura 3.5 Volumen interior .....	68
Figura 3.6 Líneas de flujo con Probeta 1 .....	69
Figura 3.7 Plano de velocidad con la Probeta 1 .....	70
Figura 3.8 Gráfica Presión Vs Posición con la Probeta 1 .....	71
Figura 3.9 Gráfica Velocidad Vs con la Probeta 1 .....	71
Figura 3.10 Gráfica del perfil de velocidad con la Probeta 1 .....	72
Figura 3.11 Líneas de flujo con la Probeta 2 .....	73
Figura 3.12 Plano de velocidad con la Probeta 2 .....	74
Figura 3.13 Gráfica Presión vs. Posición con la Probeta 2.....	75
Figura 3.14 Gráfica Velocidad Vs Posición con la Probeta 2.....	75
Figura 3.15 Gráfica del perfil de velocidad con la Probeta 2 .....	76
Figura 3.16 Líneas de flujo con la Probeta 3 .....	77
Figura 3.17 Plano de velocidad con la Probeta 3 .....	78
Figura 3.18 Gráfica Presión Vs Posición con la Probeta 3 .....	79
Figura 3.19 Gráfica Velocidad Vs Posición con la Probeta 3.....	79
Figura 3.20 Gráfica del perfil de velocidad con la Probeta 3 .....	80
Figura 3. 21 Probeta 1 - Aceite de Girasol: Permeabilidad Intrínseca .....	82
Figura 3. 22 Probeta 1 – Aceite SAE90: Permeabilidad Intrínseca.....	82
Figura 3. 23 Probeta 2 - Aceite de Girasol: Permeabilidad Intrínseca .....	84
Figura 3. 24 Probeta 2 - Aceite de SAE90: Permeabilidad Intrínseca.....	84
Figura 3. 25 Probeta 3 - Aceite de Girasol: Permeabilidad Intrínseca .....	86
Figura 3. 26 Probeta 3 - Aceite de SAE90: Permeabilidad Intrínseca.....	86



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Partes del medidor de permeabilidad .....	31
Tabla 2.2 Datos de densidad y viscosidad de fluidos .....	38
Tabla 2.3 Parámetros y resultados teóricos del Aceite de Girasol.....	39
Tabla 2.4 Parámetros y resultados teóricos del Aceite de SAE90 .....	40
Tabla 2.5 Propiedades del Acero ASTM A53 .....	42
Tabla 2.6 Rango de ratio de compresión (Global O-Ring & Seal, 2020).....	51
Tabla 2.7 Partes del sistema electrónico.....	56
Tabla 3.1 Dimensiones y resultados para Aceite de Girasol.....	57
Tabla 3.2 Dimensiones y resultados para Aceite SAE90.....	58
Tabla 3.3 Peso total soportado por el soporte .....	62
Tabla 3.4 Cálculo de esfuerzo crítico por pandeo .....	62
Tabla 3.5 Cálculo de factor de seguridad por pandeo .....	64
Tabla 3.6 Cálculo de esfuerzo axial y cortante por deflexión.....	64
Tabla 3.7 Cálculo de factor de seguridad por deflexión.....	65
Tabla 3.8 Comparativa de resultados en probeta 1 .....	81
Tabla 3.9 Comparativa de resultados en probeta 2 .....	83
Tabla 3.10 Comparativa de resultados en probeta 3 .....	85
Tabla 3.11 Comparativa de datos con masa de 0.93 kg.....	87
Tabla 3.12 Comparativa de datos con masa de 1.13 kg.....	88
Tabla 3.13 Comparativa de datos con masa de 1.53 kg.....	89
Tabla 3.14 Listado de precios de materiales y servicios.....	90

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la amplia rama de la ingeniería el estudio de materiales ha probado ser clave para la evolución de la carrera de ingeniería mecánica. A lo largo de la historia se ha investigado las diferentes propiedades de varios materiales para poder entablar sus aplicaciones y utilizarlos eficazmente. Se han desarrollado varios métodos investigativos para probar diferentes características tales como: tenacidad, plasticidad, dureza, conductividad, composición química, etc. El estudio de unas de las propiedades específicas de los materiales que ha demostrado ser útil dentro de los campos de los hidrocarburos, la geología, ingeniería química y la ingeniería civil es la permeabilidad de los materiales porosos. Por lo general, esta característica se puede cuantificar mediante ecuaciones empíricas a partir de otras propiedades como el tamaño de partículas o porosidad del material en cuestión, pero existen varios procedimientos experimentales para poder medir dicha propiedad. Este proyecto tiene como objetivo principal diseñar un equipo que permita medir la permeabilidad de materiales porosos mediante mediciones hidráulicas que puedan relacionarse a la ley física de Henry Darcy sobre la conductividad hidráulica de los materiales.

### 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La permeabilidad de los materiales porosos es una propiedad significativa para varios campos de la ingeniería ya que dicha característica es importante para diferentes aplicaciones. Este concepto es útil para conceptos ambientales como los estudios geológicos de reservas naturales de hidrocarburos y de agua en acuíferos subterráneos. Además de sus usos dentro de la ingeniería del suelo,

dicha propiedad es importante para varias aplicaciones dentro de la ingeniería química y la ingeniería civil; por ejemplo, las membranas permeables son utilizadas para procesos de separación de líquidos y gases. Para dichas aplicaciones se requiere cuantificar la cantidad de fluido capaz de atravesar el material sin alterar su composición, esta propiedad se la conoce como permeabilidad, y puede ser calculada experimentalmente al someter el material en cuestión a un flujo constante de líquido. Ya que existen varios procedimientos para poder medir tal propiedad en un sin número de diferentes materiales porosos, el proyecto se enfocará en utilizar la teoría de Henry Darcy para desarrollar un equipo que pueda medir el paso de un fluido a través de una probeta de un material compacto con propiedades y dimensiones definidas. El diseño y la fabricación de este equipo permitirá realizar estudios relacionados con esta propiedad y su relación con la porosidad del material permeable en cuestión. Desde el punto de vista de seguridad, investigaciones sobre los efectos permeables de los materiales son relevantes ya que estos son usados en aplicaciones como los guantes dieléctricos y filtros. Este proyecto es influyente al nivel cultural, social y económico ya que no solo culminara en el diseño de un equipo investigativo que podrá ayudar a futuro ingenieros de diferentes ramas poder comprender y cuantificar este fenómeno de la dinámica de fluidos y de elementos porosos, sino que también podrá ser utilizado para fines que ayudarían el progreso de la sociedad y la economía.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Lo que se desea obtener en este proyecto es el conocimiento apropiado para poder modelar las condiciones hidráulicas necesarias para relacionar el flujo permisible a través de un material poroso con su coeficiente hidráulico, mejor conocido como coeficiente de permeabilidad. En la actualidad existen varios métodos y diferentes medidores de permeabilidad, pero debido a sus altos costos y restricciones es necesario diseñar un banco de pruebas con mayor

accesibilidad para estudiantes e investigadores del tema. Muchos de los permeámetros disponibles en el mercado son diseñados para el estudio de la permeabilidad de los suelos y no pueden ser adaptados para medir otros tipos de probetas de materiales porosos. El medidor de permeabilidad que se busca diseñar, además de servir como herramienta para la investigación básica de la permeabilidad de materiales modificados, podrá ser aplicable en áreas como ciencias del suelo, ingeniería química, ciencias ambientales y energéticas.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Diseñar un medidor de permeabilidad mediante mediciones hidráulicas que pueden relacionarse a la ley física de permeabilidad establecida por Henry Darcy y que permita cuantificar la propiedad en materiales porosos.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar conceptualmente el medidor de permeabilidad tomando en cuenta el procedimiento experimental necesario y las variables que se requieren controlar y medir.
- Diseñar detalladamente todos los componentes del equipo tomando en cuenta las necesidades hidráulicas y estructurales.
- Diseñar un sistema de medición con el cuál sea posible determinar la permeabilidad de la probeta estudiada.
- Analizar el costo necesario para la construcción local del sistema propuesto.

## 1.5 MARCO TEÓRICO

### 1.5.1 Porosidad

El término porosidad se refiere a la relación entre el volumen de poros que tiene un material dentro de su volumen total, siendo un poro un intersticio existente entre las partículas de un cuerpo.

$$\eta = 100 \frac{w}{v} \quad (1.1)$$

Donde:

$\eta$ : porosidad en %

$v$ : volumen total del material

$w$ : volumen de agua requerida para llevar a saturar todos los huecos (Villón, 2007)

### 1.5.2 Porosidad efectiva

El término porosidad efectiva hace referencia a la relación entre el volumen de poros interconectados que permiten el flujo del fluido en relación al volumen total.

$$n_{ef} = \frac{v_{ef}}{v} \quad (1.2)$$

Donde:

$n_{ef}$ : es la porosidad efectiva

$v_{ef}$ : es el volumen de poros interconectados que permiten el flujo del fluido

$v$ : volumen total del material (Mook, 2002)

### **1.5.3 Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica hace referencia al paso de un fluido a través de un cuerpo en un tiempo determinado, siendo la constante de proporcionalidad entre el caudal y el gradiente hídrico, como lo expresa la Ley de Darcy. (Fernández, González, & Carrillo, 2016)

Para determinar la permeabilidad de los materiales se suelen aplicar las siguientes técnicas:

Directos:

- Permeámetro de carga constante.
- Permeámetro de carga variable.
- Prueba directa en los suelos in situ.

Indirectos:

- Cálculo a partir de la curva granulométrica.
- Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad. (Romaña, 2014)

### **1.5.4 Ley de Darcy**

En 1856, el físico francés Henry Darcy, realizó una serie de experimentos para investigar el flujo de agua en los filtros de arena homogéneos conectados a las fuentes de la ciudad de Dijon, Francia, como se muestra en la Figura 1.1. (Bear, 1972)

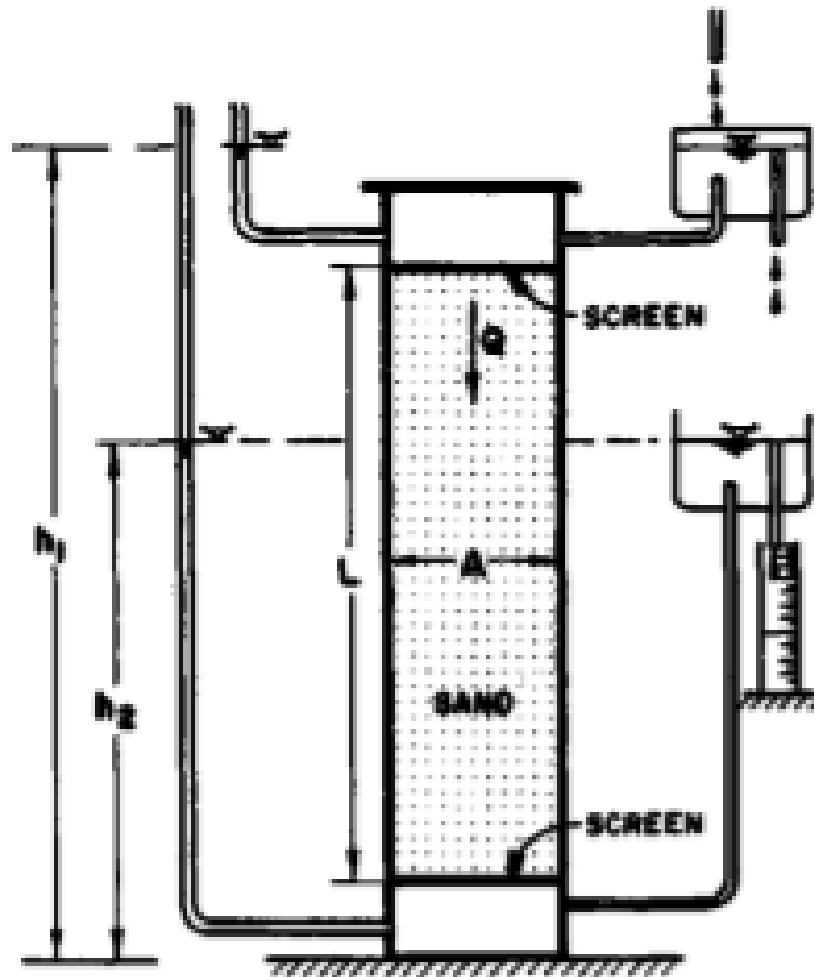


Figura 1.1 Experimento de Darcy en Filtro de Arena Vertical (Bear, 1972)

El experimento de Henry Darcy puede ser recreado para medir el flujo a través de un medio poroso inclinado, Figura 1.2. (Bear, 1972)

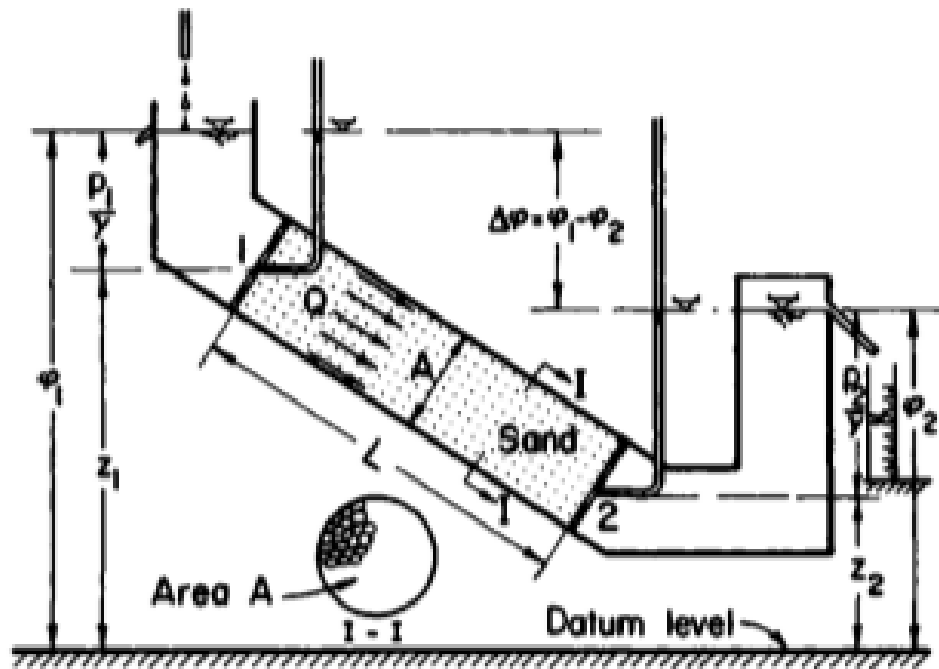


Figura 1.2 Experimento de Darcy en Filtro de Arena Inclinado (Bear, 1972)

Los experimentos que establecieron la Ley de Darcy decretaron que la cantidad de agua que fluye a través de un medio poroso por unidad de tiempo es proporcional a la sección transversal y a la diferencia entre cargas del fluido en la superficie de entrada y de salida de la muestra. Dicho flujo también es inversamente proporcional a la longitud de la muestra de arena o trayectoria de flujo, conforme a la ecuación (1.3). (Bear, 1972)

$$Q = KA \frac{\Delta\Phi}{L} \quad (1.3)$$

$$Q = KA \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{L} \quad (1.4)$$



Donde:

$Q$ : volumen de agua que atraviesa la muestra por unidad de tiempo

$K$ : constante de proporcionalidad llamada conductividad hidráulica que depende de la naturaleza de la arena y del fluido

$A$ : área de la sección transversal

$\Phi_1 - \Phi_2$ : potenciales en los puntos 1 y 2 respectivamente

$\Delta\Phi$ : pérdida de carga

$L$ : longitud de la muestra (Bear, 1972)

Las condiciones para la aplicación de la Ley de Darcy son:

1. El flujo que pasa a través del material poroso debe ser gravitacional, no se considera el flujo forzado por energía química, mecánica, eléctrica o de otra naturaleza.
2. El flujo debe ser estacionario durante el proceso de flujo.
3. El medio no debe tener aire para evitar condición de multi - flujo.
4. La estabilidad del agua se toma como indicador para la condición de flujo laminar.
5. El medio permeable debe ser homogéneo con el fin de permitir el análisis de flujo unidireccional.
6. El fluido no debe reaccionar con el medio, y la porosidad y permeabilidad de este no deben cambiar durante el ensayo. (Romaña, 2014)
7. La constante  $K$  no es propia del medio poroso ya que también depende del fluido.

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (1.5)$$

Donde:

$K$ : conductividad hidráulica

$k$ : Permeabilidad intrínseca (depende del medio poroso)

$\gamma$ : peso específico del fluido

$\mu$ : viscosidad dinámica del fluido (Sánchez, 2006)

La relación entre caudal y gradiente hidráulico no siempre es lineal, cuando:

a. El valor de  $K$  es muy bajo.

Tomando como ejemplo la arcilla, el caudal que se obtendría sería nulo, es decir no habrá circulación de agua a menos que se apliquen gradientes de presión muy elevados.

b. Las velocidades del flujo son muy altas.

Si la velocidad a la que circula el agua es elevada, el caudal es directamente proporcional al gradiente y a la sección, pero no sería linealmente proporcional, tendría función potencial como la ecuación (1.6), siendo  $n$  diferente de 1.

$$q = -K \left( \frac{dh}{dl} \right)^n \quad (1.6)$$

El número de Reynolds se aplica para analizar el límite de validez de la Ley de Darcy, los valores altos indican un régimen de flujo turbulento mientras que los valores bajos un flujo laminar. Para medios porosos se sustituye el diámetro de la conducción por el diámetro medio de los granos del medio poroso y se

usa la velocidad de Darcy en lugar de la velocidad real o lineal media. (Sánchez, 2006)

$$R_e = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\mathcal{V}} \quad (1.7)$$

Donde:

$R_e$ : número de Reynolds

$\rho$ : densidad del fluido ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$v$ : velocidad de Darcy ( $\frac{m}{s}$ )

$d$ : diámetro medio de los granos ( $m$ )

$\mu$ : viscosidad dinámica ( $Pascal \cdot m = Kg/(m^2 \cdot s)$ )

$\mathcal{V}$ : viscosidad cinemática =  $\mu/\rho$  ( $m^2/s$ )

Cuando R alcanza valores entre 1 y 10 el caudal deja de ser linealmente proporcional al gradiente, en el flujo subterráneo los valores de R son muy bajos por lo que siempre la velocidad es lineal.

La restricción se puede apreciar en la Figura 1.3, donde se grafica la relación entre el coeficiente de fricción de Fanning y el número de Reynolds. La Figura 1.3 muestra la validez de la ley de Darcy para valores de Reynold bajos, donde el flujo se considera laminar. Esta ley pierde su validez para flujos en transición y flujos turbulentos ya que deja de existir tal relación lineal que permitía relacionar el caudal con el gradiente.

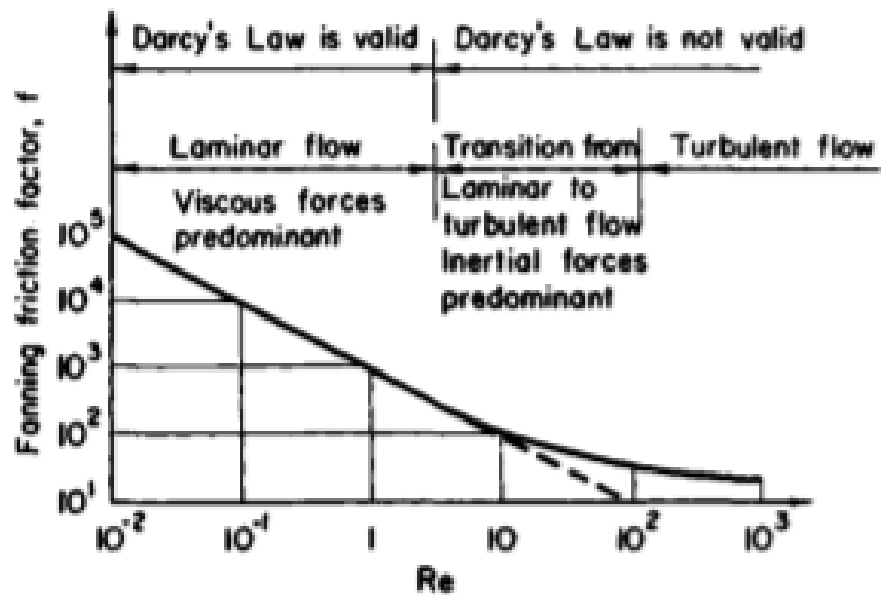


Figura 1.3 Clasificación esquemática de flujo a través medio poroso (Bear, 1972)

### 1.5.5 Resistividad hidráulica

La resistividad hidráulica está definida como la resistencia al paso de un fluido por unidad de longitud y área en un medio permeable bajo un cabezal constante. Este parámetro es inversamente proporcional a la permeabilidad.

$$i = \xi \cdot H \quad (1.8)$$

Donde:

$i$ : es el gradiente hidráulico

$\xi$ : es la resistividad hidráulica

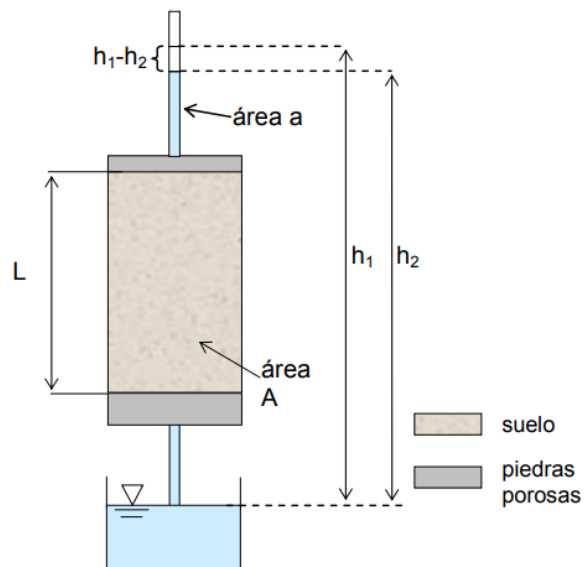
$H$ : es la carga hidráulica externa (Romaña, 2014)

### 1.5.6 Permeámetro

Se llama permeámetro a un aparato que sirve para medir la permeabilidad de los materiales ante el paso de fluidos a través de ellos. Existen dos tipos de permeámetros, de carga variable y de carga constante.

#### 1.5.6.1 Permeámetro de carga variable

En este método se mide de forma indirecta la cantidad de agua que sale, a través de la relación entre la caída de nivel de agua en el tubo de ingreso y el tiempo que transcurre. La longitud  $L$ , el área de sección de la muestra  $A$  y el área  $a$  del tubo son conocidos conforme a la Figura 1.4. (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)



**Figura 1.4 Permeámetro carga variable**

(Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

Este aparato permite medir con mayor exactitud la permeabilidad en suelos menos permeables.

### 1.5.6.2 Permeámetro de carga constante

En este método se mantiene constante el nivel de agua en el tubo conectado al permeámetro, mientras en el otro lado de la muestra de agua que sale es recolectada en una probeta graduada para su medición. Se puede medir el diámetro  $D$  y longitud  $L$  de la muestra conforme a la Figura 1.5. (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

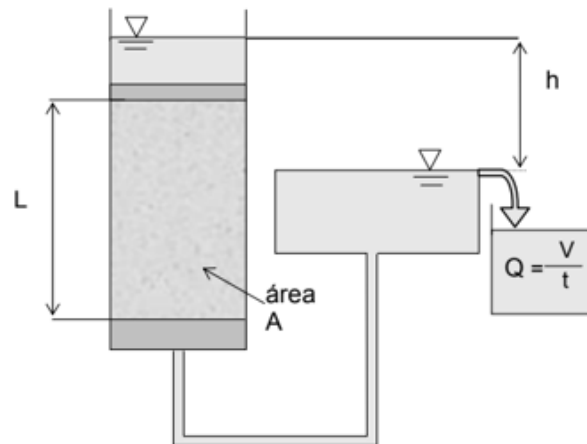


Figura 1.5 Permeámetro de carga constante

(Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

### 1.5.7 Normas Aplicables

El diseño de ambos tipos de permeámetros pueden ser desarrollados de acuerdo a las siguientes normas:

- ASTM D5084 - Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter
- ASTM D4491 - Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity
- ASTM D2434 - Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)
- INV E-130-07 - Permeabilidad de Suelos Granulares (Cabeza Constante)

#### **1.5.7.1 ASTM D5084 - Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**

Esta norma presentada por la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (American Society of Testing Materials) muestra seis métodos diferentes para poder medir experimentalmente el coeficiente de permeabilidad de algún medio poroso, utilizando un sistema hidráulico a temperaturas entre 15 y 30°C. Estos procedimientos de medición están limitados por los siguientes requerimientos:

- Todos estos métodos son utilizados para medir la permeabilidad de materiales porosos con conductividad hidráulica menores a  $1 \times 10^{-6}$  m/s, siempre que se cumplan los requisitos de pérdida de carga.
- Si la conductividad hidráulica es mayor a  $1 \times 10^{-6}$  m/s pero menor a  $1 \times 10^{-5}$  m/s, el tamaño del tubo hidráulico debe incrementarse. También podría utilizarse algún fluido de mayor viscosidad o disminuir el área de la sección transversal de la probeta.

- Si la conductividad hidráulica del material poroso es mayor a  $1 \times 10^{-5}$  m/s se puede utilizar el método descrito en la norma ASTM D2434 - Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).
- Estos métodos experimentales de medición aplican a sistemas hidráulicos de flujo laminar uni-direccional dentro del material poroso.
- Se asume que la ley de Darcy es válida y que la conductividad hidráulica no es afectada por el gradiente hidráulico. La validez de la ley de Darcy puede ser evaluada al medir la conductividad hidráulica del material para tres gradientes hidráulicos. Si las mediciones son similares dentro de un rango de 25% se puede tomar la ley de Darcy como válida.

La norma indica los siguientes sistemas hidráulicos para la medición de la conductividad hidráulica de un material poroso:

### **Método de carga constante**

El sistema debe estar diseñado para mantener presiones hidráulicas constantes y debe tener los medios para medir estas presiones dentro de una tolerancia de  $\pm 5\%$ . El aparato también debe tener una pérdida de presión constante que pueda ser medida dentro de una tolerancia de  $\pm 5\%$ . El permeámetro además debería incluir un medidor de presión, un transductor electrónico de presión o cualquier otro dispositivo de precisión adecuada que pueda medir presiones a un mínimo de tres dígitos significativos.

Este método involucra la medición y registro de la pérdida de carga requerida al comienzo y al final de cada prueba de permeabilidad. Esta pérdida de carga debe mantenerse constante mientras se mide y



registra periódicamente la cantidad de flujo de entrada, así como la cantidad de flujo de salida.

Adicionalmente, este método utiliza la siguiente fórmula para calcular el coeficiente hidráulico:

$$K = \frac{\Delta Q \cdot L}{A \cdot h \cdot \Delta t} \quad (1.9)$$

Donde:

$K$ : conductividad hidráulica (m/s)

$\Delta Q$ : cantidad de flujo para un intervalo de tiempo dado  $\Delta t$  (m<sup>3</sup>)

$L$ : longitud de probeta (m)

$A$ : área de sección transversal (m<sup>2</sup>)

$\Delta t$ : intervalo de tiempo, durante el cual flujo  $\Delta Q$  ocurre (s)

$h$ : pérdida de carga a través de probeta (m de Agua)

### **Método de carga variable**

El sistema mide el cabezal perdido dentro de una tolerancia de  $\pm 5\%$ . Adicionalmente, la relación de pérdida de carga inicial dividida por la pérdida de carga final durante un intervalo de tiempo se medirá dentro de una tolerancia de  $\pm 5\%$ . Este método experimental puede realizarse mediante una presión de salida constante o mediante una presión variable.

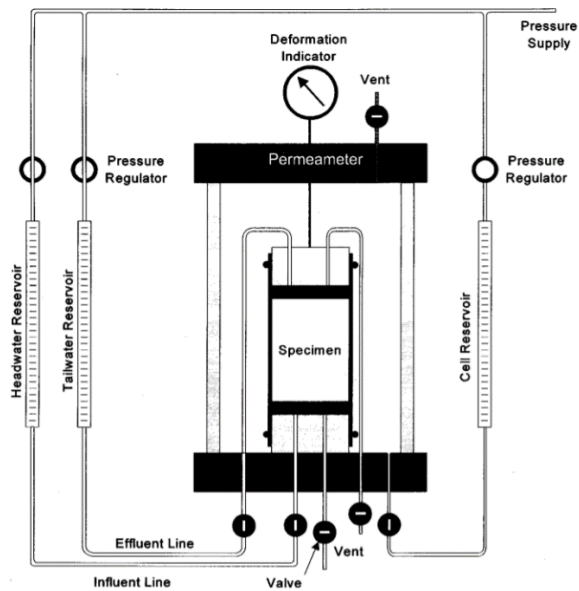


Figura 1.6 Sistema de carga variable (ASTM, 2002)

Se utiliza la siguiente fórmula para calcular el coeficiente hidráulico al utilizar el método experimental de carga variable con presión de salida constante:

$$K = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1.10)$$

Donde:

$a$ : área de sección transversal del reservorio que contiene el líquido de entrada ( $m^2$ )

$h_1$ : pérdida de carga inicial (*m de Agua*)

$h_2$ : pérdida de carga final (*m de Agua*)

En caso de utilizar un permeámetro de carga variable con presión de salida variable se utiliza la siguiente fórmula para calcular el coeficiente hidráulico:

$$K = \frac{a_{in} \cdot a_{out} \cdot L}{(a_{in} + a_{out}) \cdot A \cdot \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1.11)$$

Donde:

$a_{in}$ : área de sección transversal del reservorio aguas arriba de permeámetro(m<sup>2</sup>)

$a_{out}$ : área de sección transversal del reservorio aguas abajo de permeámetro(m<sup>2</sup>)

### **Método de flujo constante**

El sistema debe estar diseñado para mantener flujos constantes y debe tener los medios para medir estos flujos dentro de una tolerancia de  $\pm 5\%$ . Las mediciones del flujo deben ser realizadas mediante una jeringa calibrada, una pipeta graduada u otro dispositivo de precisión adecuado.

### **Método de volumen constante, carga constante (uso de mercurio)**

El sistema con mercurio para crear la pérdida de carga debe ser capaz de mantener una pérdida de carga constante y debe poder medir la pérdida de carga dentro de una tolerancia  $\pm 5\%$ .

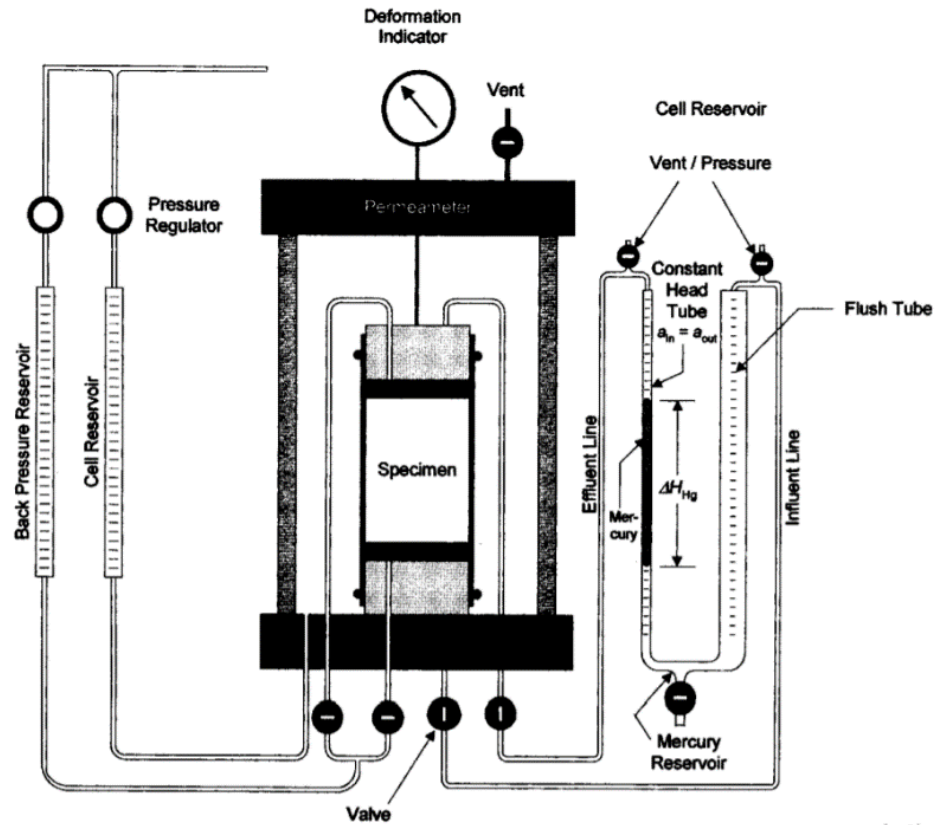
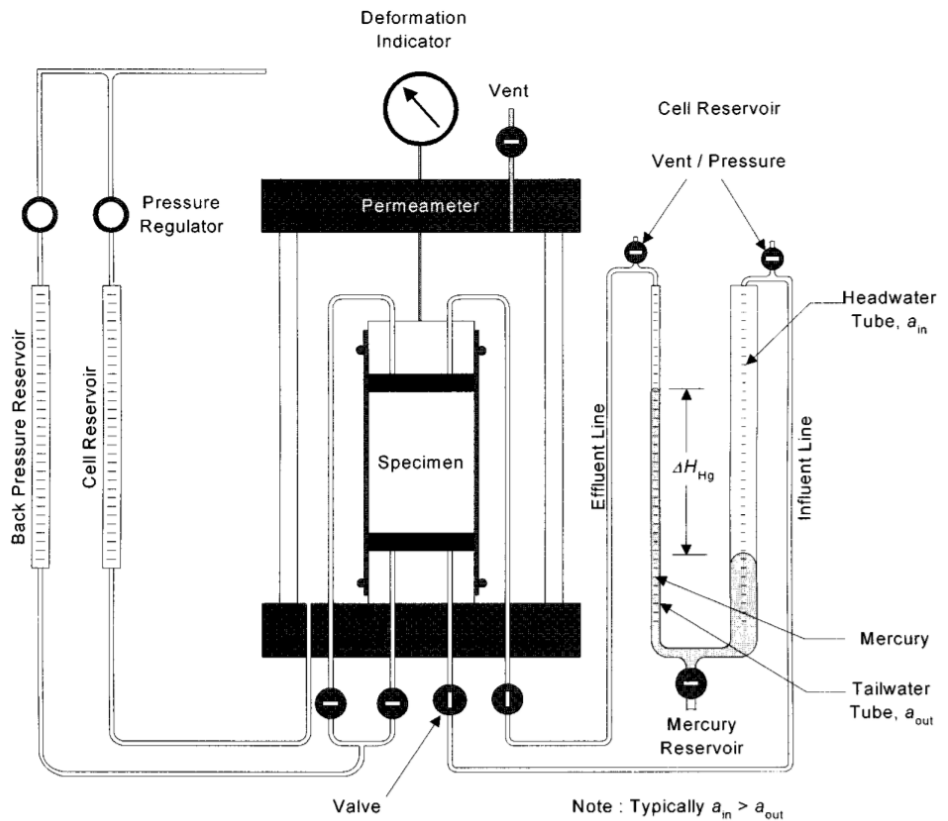


Figura 1.7 Sistema de volumen constante, carga constante (ASTM, 2002)

### Método de volumen constante, carga variable (uso de mercurio)

Este método deberá cumplir con los criterios dados en el método de carga variable. La Figura 1.8 muestra el arreglo típico de un permeámetro de mercurio de volumen constante y carga variable:



**Figura 1.8 Sistema de volumen constante, carga variable (ASTM, 2002)**

Estos diferentes sistemas hidráulicos deben mantenerse dentro un rango de temperatura de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5.7^{\circ}\text{F}$ ). Normalmente, esto se logra realizando la prueba en una habitación con una temperatura relativamente constante. Si dicha habitación no está disponible, el aparato se colocará en un baño de agua, cámara aislada u otro dispositivo que mantenga una temperatura dentro de la tolerancia especificada anteriormente. La temperatura se medirá y registrará periódicamente.

Adicionalmente, la norma indica que se debe utilizar agua desairada para poder mantener el flujo laminar y evitar errores en las mediciones

dadas por turbulencia en el medio. El agua generalmente puede ser desairada al hervirla, al rociar una fina neblina de agua en un recipiente evacuado conectado a una fuente de vacío, o mediante una agitación forzada de agua en un recipiente conectado a una fuente de vacío.

# CAPÍTULO 2

## 2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El sistema debe funcionar con un fluido newtoniano y debe contar con los sensores adecuados que permitan la lectura de los parámetros necesarios para relacionar el flujo a través de la probeta con la Ley de Darcy. De tal manera se podrá cuantificar y probar la permeabilidad del material poroso en cuestión. Los materiales del equipo deberán ser de adquisición nacional y seleccionados de acuerdo un análisis de costo que permitirá que el equipo sea eficiente y económicamente accesible. Ante todo, se procurará que el sistema mida la permeabilidad de la manera más eficiente posible en cuanto a tiempo y precisión de medición.

### 2.1 METODOLOGÍA

La metodología de diseño que será aplicada a este proyecto se conoce como modelo de diseño concurrente, mismo que inicia con la identificación de necesidades tanto del usuario como del diseñador, para lograr definir las especificaciones más importantes y diseñar un concepto de solución funcional y viable.

A continuación, se detalla cada punto dentro del proceso de diseño, hasta llegar a la definición del concepto, lo cual permitirá seleccionar las mejores alternativas tanto de materiales como de equipo necesario para la implementación.

### 2.2 DEFINICIÓN DE NECESIDADES

Este paso tiene mucha importancia dentro del proceso de diseño ya que permite conocer a fondo las necesidades existentes, por las que se planteó el desarrollo de este proyecto. Esta información se obtuvo mediante reuniones, donde se

realizaron lluvias de ideas y se discutieron las necesidades y limitaciones del proyecto.

Teniendo como referencia los modelos de permeámetros actuales se los utiliza en el área de textiles y suelos para determinar la resistencia al paso de un fluido, en este caso se medirá la resistencia al pasar de un líquido a través de un metal cilíndrico perforado, por lo que hay que tener diferentes consideraciones dependiendo la cantidad y radio de los orificios; además el dispositivo debe de ser portátil, resistente, de fácil manejo y de fácil construcción ya que este será operado para estudios universitarios y todo esto rigiéndose lo más posible a las normas ASTM.

## **2.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN**

La medición de la permeabilidad de las probetas se realizará de manera indirecta ya que se medirá la cantidad de agua que puede atravesar la probeta por unidad de tiempo y a una presión dada al inicio de la probeta, es decir se medirá el volumen, el tiempo y presión, y a partir del caudal y sabiendo las dimensiones de la probeta y en conjunto con las propiedades del fluido se determinará la permeabilidad del material.

Para medir el caudal, se pesará el fluido durante el experimento mediante una balanza digital, dicha balanza será el esclavo de un controlador digital al igual que un sensor difuso que detecta la presencia una compuerta, la cual tiene como finalidad impedir el paso del fluido y con el retiro de ella se dará inicio al experimento.

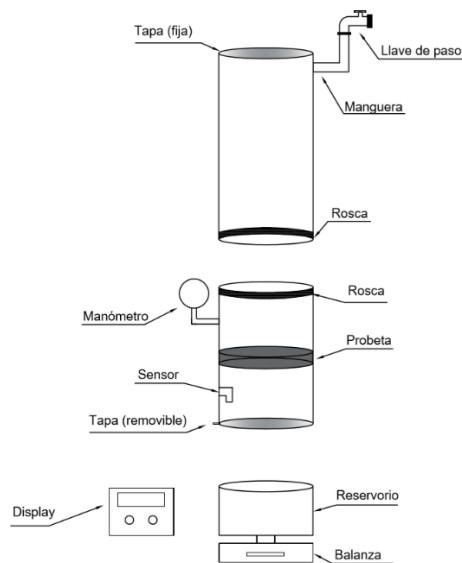
### **2.3.1 Modelo 1: Diseño de presión constante**

En este diseño se puede observar un reservorio cerrado en la parte superior y en este se introducirá agua directamente de la red pública hasta llenar totalmente el reservorio y de esta manera la presión del interior del reservorio



será la misma que la red de agua. Ya que en este diseño la presión es constante, el reservorio puede ser de un material no transparente ya que va a contener agua en su totalidad. Para colocar la probeta el reservorio tendrá dos partes que se unen mediante rosca y en la parte inferior se encuentra una tapa que se removerá una vez se quiera iniciar la medición. En la parte inferior se tendrá un reservorio abierto sobre una balanza, en donde el agua que fluya a través de la muestra se acumulará al mismo tiempo que es pesada, una vez iniciada la medición; la balanza que está conectada a una interfaz de medición almacenará los datos de tiempo y masa, y los procesará para mostrar el caudal.

Este diseño tendrá como sensores un manómetro para verificar que la presión sea constante, un sensor fotosensible para detectar la tapa inferior y una balanza para medir la masa del agua depositada en el reservorio inferior. Dentro del modelo también se contempló el uso de sellos para evitar fugas de fluido y un pedestal.



**Figura 2.1** Diseño de presión constante

### 2.3.2 Modelo 2: Diseño de cabezal variable

Para obtener una medición de permeabilidad en esta configuración, se tendrá que realizar marcaciones de altura en el reservorio superior y este tendrá que ser de un material transparente para medir la diferencia de cabezal, o en su defecto medirlo manualmente mediante un flexómetro. Al igual que en el Modelo 1, el depósito tendrá dos partes unidas por una rosca para colocar la probeta y una tapa en la parte inferior. Debajo se encontrará un depósito abierto sobre una balanza y el funcionamiento es similar al Modelo 1, sin embargo, cambia el parámetro de medición.

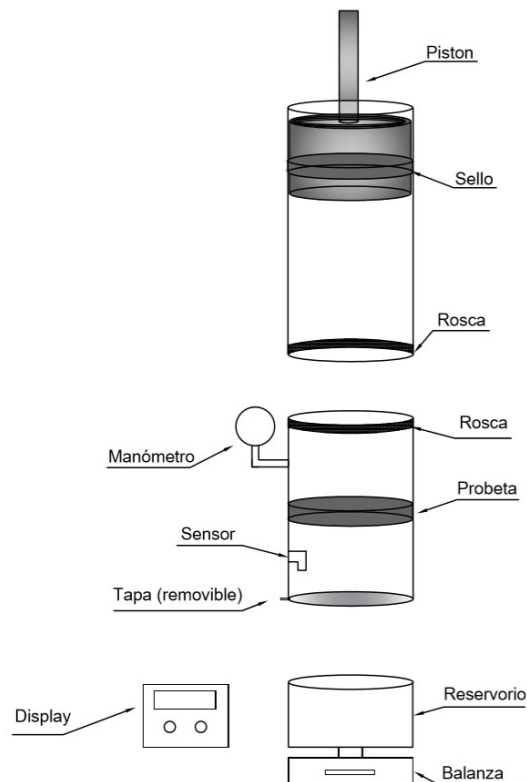


Figura 2.2 Diseño de cabezal variable

### 2.3.3 Modelo 3: Cabezal Constante con propio sistema hidráulico

Para que el equipo tenga su propio sistema hidráulico que mantenga un cabezal constante se necesitará incluir dos reservorios, uno inferior y otro superior. Además, se necesitará incluir una bomba que pueda transportar el fluido desde el reservorio inferior al superior para poder generar y mantener la columna del líquido sobre la probeta. Este diseño incluye el uso de manómetros y un flujómetro para poder realizar las mediciones necesarias, pueden ser análogos o digitales. Además, se incluye una válvula de globo a la salida del equipo para variar el flujo en caso de ser necesario.

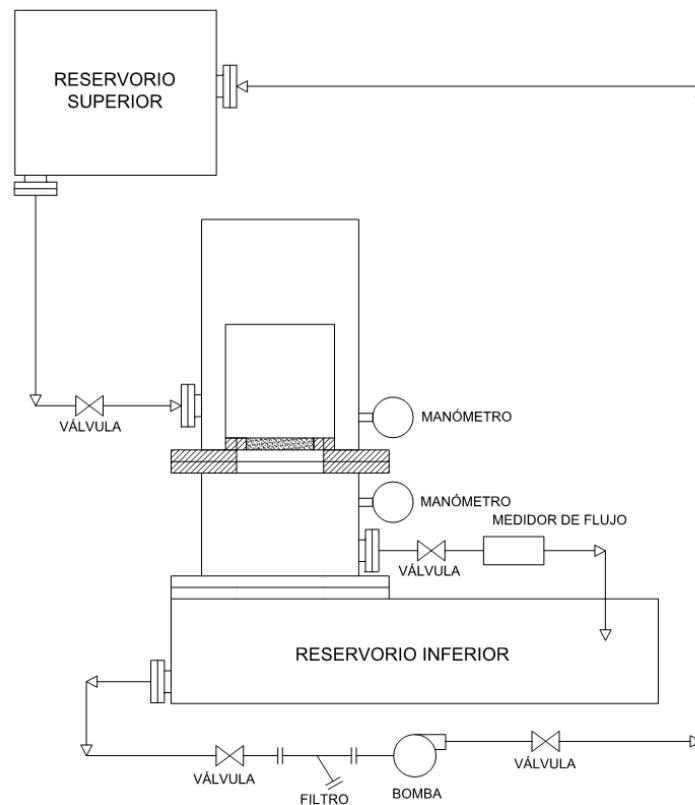


Figura 2.3 Cabezal constante con recuperación

El equipo completo estaría soportado por una estructura rectangular empernada al reservorio 1. Esta estructura soportará el peso de dicho reservorio lleno, del cuerpo cilíndrico lleno, de la bomba, de la tubería y de los accesorios. Se diseñaría una estructura aparte para soportar el reservorio 2.

#### **2.3.4 Selección del modelo del prototipo**

La matriz QFD, Quality Function Deployment, es un sistema organizado aplicado en el diseño de productos y tiene dos objetivos principales: asegurar que el producto corresponderá a las necesidades del usuario y acortar el tiempo de desarrollo al permitir definir sus características y funcionalidades. (Grima & Tort-Martorell, 1995)

Para la selección del modelo se realizaron tres matrices QFD, una por cada modelo conforme a la Figura 2.4, 2.5 y 2.6. Se establecieron las necesidades del usuario y se dio un valor numérico del 1 al 5 para identificar el grado de importancia.

Dentro de las necesidades del usuario se identificó el fácil cambio de la probeta, medición exacta, facilidad de uso, que permita el almacenamiento de datos en el computador, la facilidad de instalación y la durabilidad. Junto con las necesidades se definió los requisitos técnicos del prototipo y la relación de importancia entre sí.

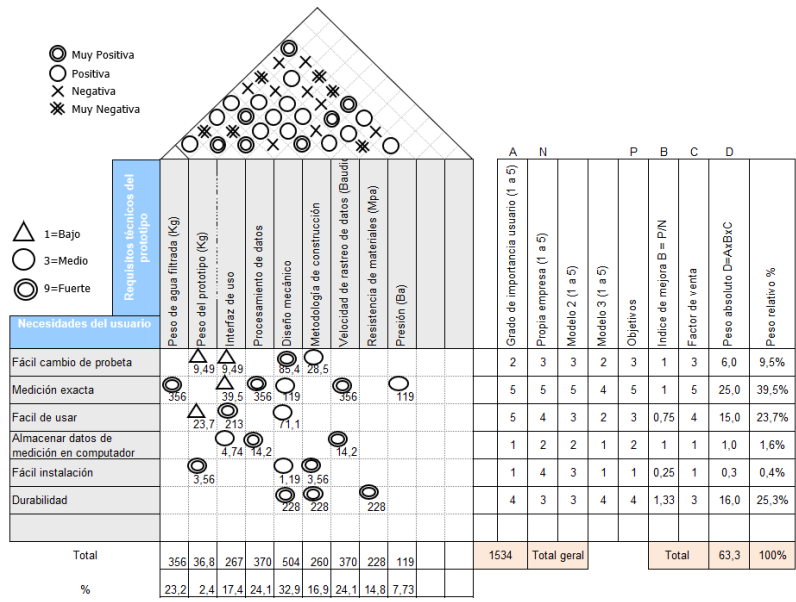


Figura 2.4 Matriz QFD Modelo 1

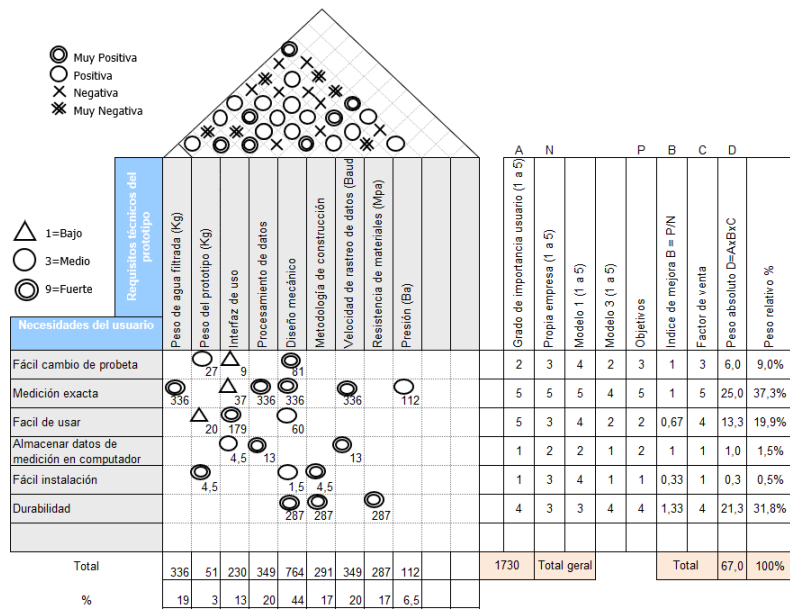


Figura 2.5 Matriz QFD Modelo 2

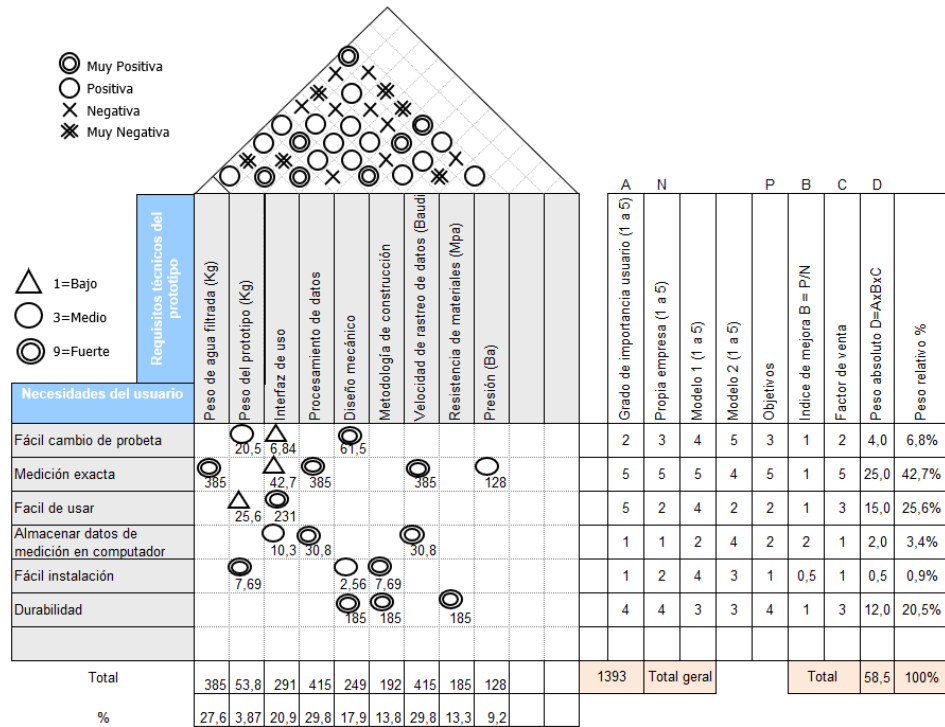


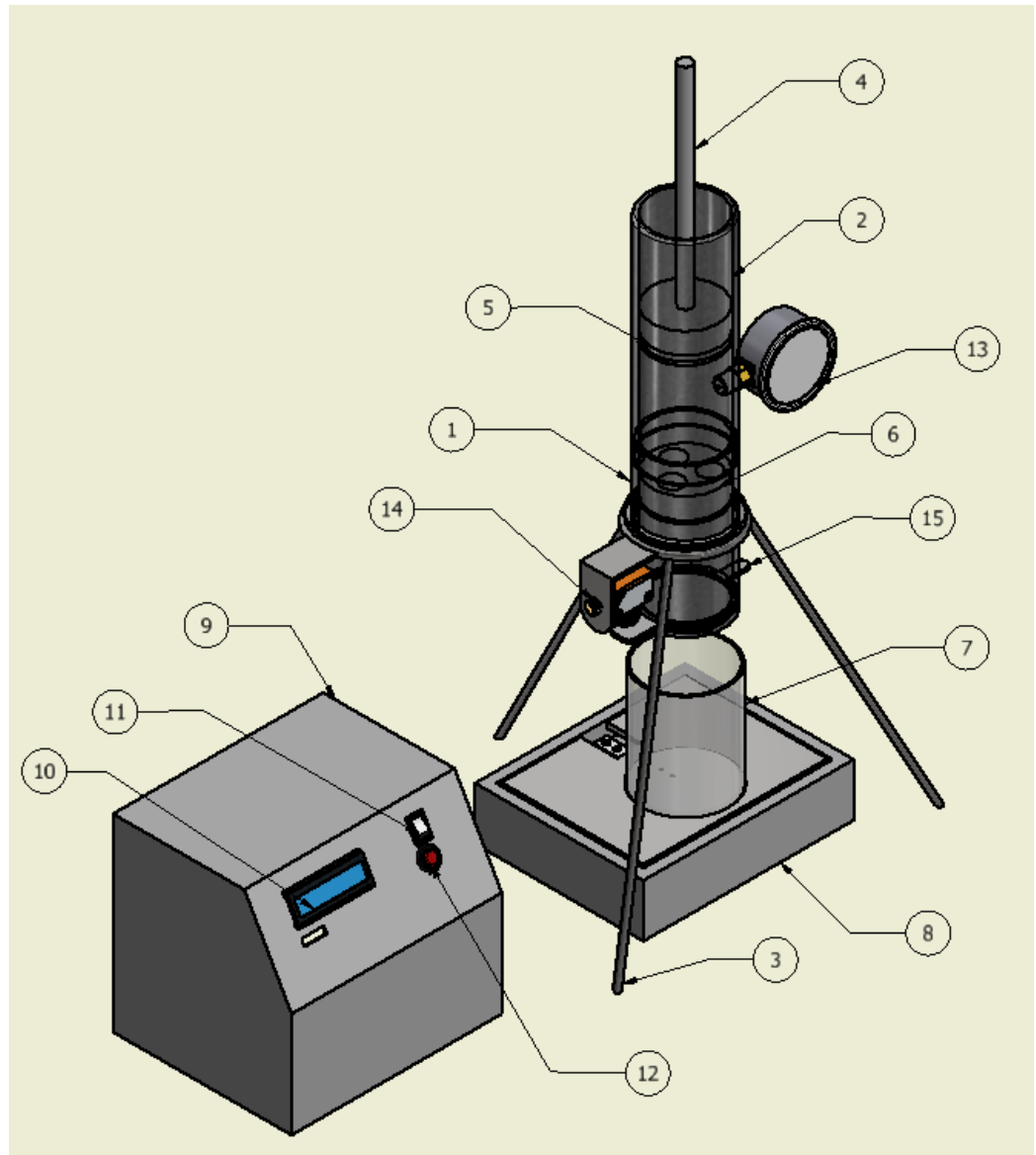
Figura 2.6 Matriz QFD Modelo 3

Comparando el total general de las matrices se tiene que el modelo 2 tiene 1730 puntos, representa el mayor valor entre los tres, por lo que es el modelo de prototipo seleccionado.

### 2.3.5 Diseño ganador

El diseño seleccionado como ganador mediante las matrices QFD es el modelo 2, éste que basa su medición en función de un cabezal variable y obtuvo una puntuación de 1730 puntos, 196 puntos más en comparación al modelo 1 que basa su análisis en un cabezal constante. Esta diferencia de puntuaciones se debe a que con un cabezal variable se obtiene mediciones de mayor precisión en probetas con alta porosidad.

En la Figura 2.7 se observan las piezas que forman parte del diseño del medidor de permeabilidad, el nombre de cada parte se detalla en la Tabla 2.1.



**Figura 2.7 Diseño de cabezal variable**

**Tabla 2.1 Partes del medidor de permeabilidad**

N°	Parte
1	Cuerpo cilíndrico inferior
2	Cuerpo cilíndrico superior
3	Soporte
4	Pistón
5	Sello
6	Probeta
7	Recipiente inferior
8	Balanza
9	Panel de control
10	Pantalla
11	Interruptor
12	Pulsador
13	Manómetro
14	Sensor fotoeléctrico
15	Tapa inferior

## **2.4 DISEÑO DETALLADO**

Para realizar el diseño detallado del prototipo se tomaron en cuenta los requisitos técnicos del prototipo y su relación de importancia, por lo que se dividió el diseño detallado del prototipo en tres partes; diseño mecánico, diseño electrónico y diseño de la interfaz de conexión.



Adicionalmente, el dispositivo debía cumplir ciertos requisitos de dimensiones, ya que según la norma Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity de ASTM, la probeta deberá tener un diámetro de mínimo de 50 milímetros o 2 pulgadas aproximadamente y con una altura mínima de 15 milímetros para poder tener un muestreo suficientemente largo y obtener mediciones confiables, y el material sugerido a utilizar es un acero de baja aleación martensíticos ya que este dispositivo no estará sumergido la totalidad del tiempo por lo que no necesita gran resistencia a la corrosión.

#### 2.4.1 Determinación de dimensiones del poro y probeta

Para determinar el diámetro del poro se realizó el análisis descrito a continuación, en base al esquema de la Figura 2.8.

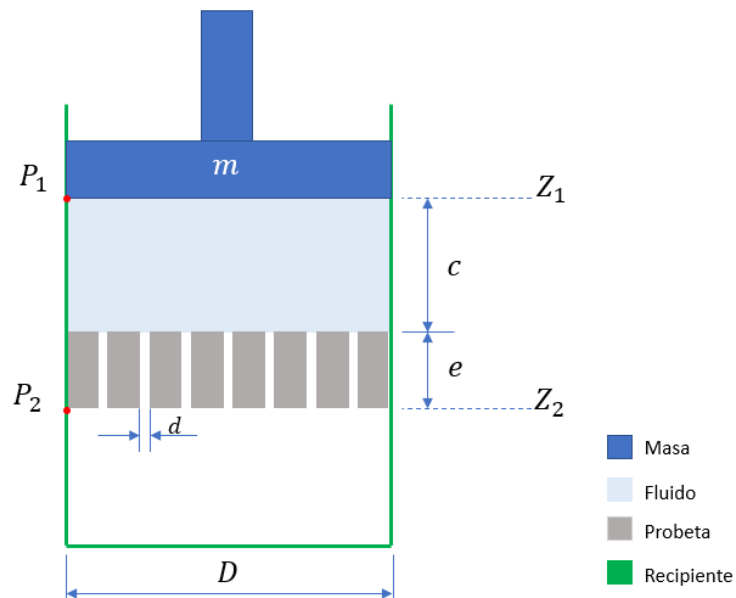


Figura 2.8 Esquema para determinación de diámetro de poro

En la Figura 2.8 se diferenci6 mediante colores, la maza aplicada (azul), el fluido (celeste), la probeta (gris) y el recipiente a presi6n (verde). Se tom6 como referencia los puntos del sistema, P1 y P2, para realizar el an6lisis hidrost6tico. En base al esquema, se plante6 la siguiente ecuaci6n:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h \quad (2.1)$$

Donde:

$P_1$ : Presi6n en el punto 1

$\gamma$ : Peso espec6fico

$Z_1$ : Altura desde la referencia  $Z_2$

$V_1$ : Caudal en el punto 1

$g$ : Aceleraci6n de la gravedad

$P_2$ : Presi6n en el punto 2

$Z_2$ : Referencia

$V_2$ : Velocidad de flujo 2

$h$ : P6rdida de cabezal por probeta

La presi6n en el punto 2 es igual a presi6n atmosf6rica, mientras que presi6n en el punto 1 es la atmosf6rica m6s la presi6n que genera la masa:

$$P_2 = P_{atm} \quad (2.2)$$

$P_2$ : Presi6n en punto 2

$$P_1 = P_{atm} + \frac{4mg}{\pi D^2} \quad (2.3)$$

$P_{atm}$ : Presión atmosférica

$\frac{4mg}{\pi D^2}$ : Presión proporcionada por la porta masas

Para analizar la pérdida de energía del fluido hay que definir los puntos de referencias, en este caso el punto 2 fue definido con cabezal cero, mientras que el punto 1 tiene el siguiente cabezal:

$$Z_1 = c + e \quad (2.4)$$

Donde:

$c$ : Altura de columna de agua

$e$ : Espesor de probeta

Ya que el caudal con el que baja el nivel del reservorio es el mismo que el caudal que sale, se tiene que el caudal en  $Q_1$  será igual al caudal  $Q_2$ .

$$Q_1 = Q_2 \quad (2.5)$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2.6)$$

$$V_1/V_2 = A_2/A_1 \quad (2.7)$$

Dado que caudal de salida se distribuye entre los agujeros de la probeta, al desarrollar la ecuación anterior resulta la ecuación:

$$V_1 \frac{\pi D^2}{4} = V_2 \frac{n\pi d^2}{4} \quad (2.8)$$

Donde:

$n$ : Número de perforaciones en la probeta

$d$ : Diámetro de la perforación

$$V_1 D^2 = V_2 n d^2 \quad (2.9)$$

$$V_1 = V_2 n \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (2.10)$$

Dado que se conoce que una de las condiciones para que sea aplicable la Ley de Darcy, es que el flujo sea laminar, se procederá a plantear una relación mediante la ecuación de Reynolds.

$$R_e = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (2.11)$$

$$V_2 = \frac{\mu R_e}{\rho d} \quad (2.12)$$

$$R_e < 2000$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido

$V$ : Velocidad promedio de flujo

$\mu$ : Viscosidad del fluido

Resolviendo la ecuación (2.1) se obtuvo:

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + Z_1 - Z_2 \quad (2.13)$$

$$h = \frac{4mg}{\pi D^2} + \frac{V_2^2 \left( n^2 \left( \frac{d}{D} \right)^4 - 1 \right)}{2g} + c + e \quad (2.14)$$

$$h = \frac{4mg}{\pi \rho D^2} + \left( \frac{\mu R_e}{\rho d \sqrt{2g}} \right)^2 \left( n^2 \left( \frac{d}{D} \right)^4 - 1 \right) + c + e \quad (2.15)$$

Conforme a lo expresado en el primer capítulo, ecuación (1.1), se conoce que la porosidad se expresa como la relación entre el volumen de poros sobre el volumen total. Para nuestro caso la altura de la probeta siempre será la misma por lo que se realiza el planteamiento con una relación de áreas.

$$\eta = \frac{w}{v}$$

$$\eta = \frac{na}{A} \quad (2.16)$$

Donde:

$\eta$ : Porosidad

$n$ : Número de perforaciones

$a$ : Área de la perforación

$A$ : Área de medición de la probeta

Resolviendo tenemos:

$$\eta = \frac{n \frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (2.17)$$

$$\eta = n \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (2.18)$$

Despejando  $R_e$  de la ecuación (2.15) y suponiendo un caso ideal donde  $h = 0$  se obtuvo la ecuación (2.19):

$$R_e = \sqrt{\frac{\left(\frac{4m}{\pi \rho D^2} + c + e - h\right)}{\left(1 - n^2 \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)}} \cdot \left(\frac{\rho d \sqrt{2g}}{\mu}\right) \quad (2.19)$$

De la ecuación (2.19) se despejó  $d$  para identificar el diámetro del poro, se obtuvo la ecuación (2.20).

$$d = \sqrt{\frac{\left(\frac{4m}{\pi\rho D^2} + c + e - h\right)}{(1 - \eta^2)}} \cdot \left(\frac{\rho\sqrt{2g}}{\mu R_e}\right)^{-1} \quad (2.20)$$

En base a las ecuaciones (2.19) y (2.20) se definieron valores de constantes y variables para el cálculo de la pérdida de cabezal con diferentes fluidos. En la Tabla 2.2 se observan los valores de densidad y viscosidad de dos fluidos.

**Tabla 2.2 Datos de densidad y viscosidad de fluidos**  
(Rodríguez, Lafargue, Sotolongo, Rodríguez, & Assuncao, 2012)

Fluido	Densidad $\rho$ [g/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad $\mu$ [g/ms]
Aceite de Girasol	903000	25.284
Aceite SAE 90	890000	176.22

Una vez se ingresó las ecuaciones en la hoja de cálculo, se procedió a modificar los valores de diámetro de poro (d), diámetro del recipiente (D), altura de probeta (e), altura de reservorio (c), para verificar con cuales se cumplía la condición de flujo laminar, número de Reynolds menor a 2600, y porcentaje de porosidad entre 10% y 50%.

En las Tablas 2.3 y 2.4 se observan los parámetros y resultados correspondientes al aceite de girasol y aceite SAE 90. Se marcaron los datos constantes con color celeste, las variables con color gris y los resultados con color rosa.

**Tabla 2.3 Parámetros y resultados teóricos del Aceite de Girasol**

ACEITE GIRASOL			
m [g]	930	930	930
$\pi$	3.1416	3.1416	3.1416
g [m/s <sup>2</sup> ]	9.81	9.81	9.81
Re	1913.96	1917.89	889.23
$\rho$ [g/m <sup>3</sup> ]	903000	903000	903000
$\mu$ [Pa.s]	25.284	25.284	25.284
D [m]	0.06	0.06	0.06
N	3	7	31
c [m]	0.2	0.2	0.2
e [m]	0.02	0.02	0.02
H	0.19	0.40	0.38
h [m]	0	0	0
d [m]	0.016	0.02	0.007
Pabs [Pa]	104251.72	104251.72	104251.72

	Variable
	Constante
	Resultado



**Tabla 2.4 Parámetros y resultados teóricos del Aceite de SAE90**

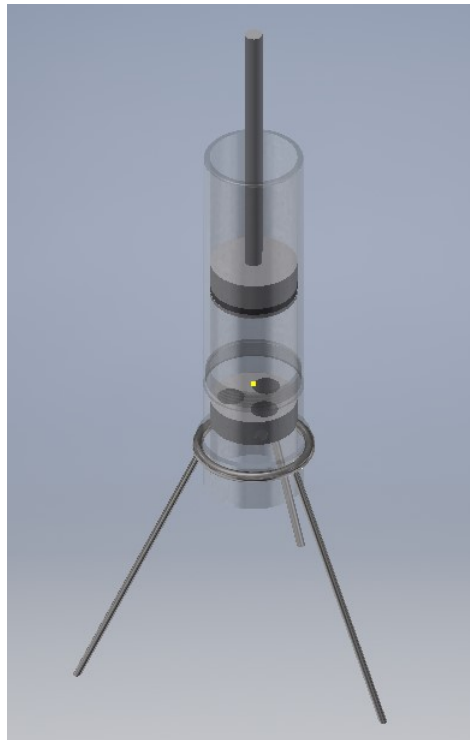
ACEITE SAE90			
m [g]	930	930	930
$\pi$	3.1416	3.1416	3.1416
g [m/s <sup>2</sup> ]	9.81	9.81	9.81
Re	271.96	272.40	196.30
$\rho$ [g/m <sup>3</sup> ]	890000	890000	890000
$\mu$ [Pa.s]	176.22	176.22	176.22
D [m]	0.06	0.06	0.06
N	3	7	31
c [m]	0.2	0.2	0.2
e [m]	0.02	0.02	0.02
H	0.19	0.40	0.38
h [m]	0	0	0
d [m]	0.016	0.02	0.007
Pabs [Pa]	104251.72	104251.72	104251.72

	Variable
	Constante
	Resultado

### 2.4.2 Diseño CAD

En base a los datos obtenidos en la Tabla 2.5 y Tabla 2.6, se consultó en catálogos de proveedores nacionales para obtener datos y dimensiones de materiales disponibles en el mercado que se asemejen a las dimensiones teóricas obtenidas.

En el Anexo 1 se encuentra la tabla de dimensiones de tubería redonda galvanizada, de la cual se seleccionó la de 2 ½". En base a estas medidas se realizó el dibujo CAD del prototipo, se utilizó el software Autodesk® Inventor Professional 2020, con su licencia libre para estudiantes (Figura 2.9).



**Figura 2.9 Diseño CAD del prototipo**

### 2.4.3 Diseño del cuerpo

Para el diseño mecánico se partió de las consideraciones que debe tener el material, dado que el recipiente va a trabajar a presiones bajas y con fluidos no corrosivos, se optó por acero galvanizado (Anexo 1), ya que no es necesario ver el interior del recipiente.

La Tabla 2.7 muestra las propiedades del acero ASTM A53, el cual fue seleccionado para la construcción del medidor.

**Tabla 2.5 Propiedades del Acero ASTM A53**

Resistencia a la tensión (MPa)	Límite Elástico (MPa)
330	205

Para el diseño se determinó la presión hidrostática máxima, conforme a la siguiente ecuación:

$$P_{pared} = \rho g H + \frac{4mg}{\pi D^4} \quad (2.21)$$

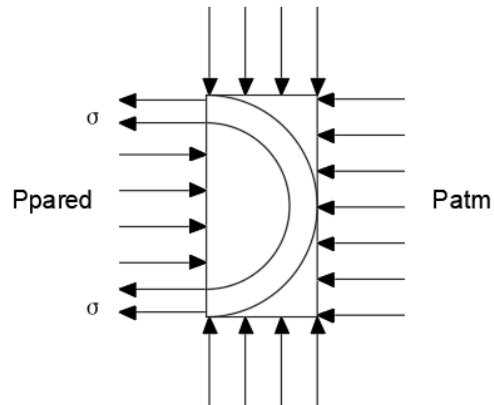
$P_{pared}$ : Presión hidrostática máxima

$\rho$ : Densidad del fluido

$H$ : Altura de columna del fluido

$g$ : Constante gravitacional

Se realizó un corte en la mitad de la sección transversal del cilindro para analizar el esfuerzo de tensión, conforme a la Figura 2.10.



**Figura 2.10 Presión interna del cuerpo**

Con la presión hidrostática máxima se determina el esfuerzo al que está sometido la pared del cuerpo cilíndrico.

$$\sigma_c = P_{pared} \cdot \frac{D}{2t} \quad (2.22)$$

Donde:

$\sigma_c$ : Esfuerzo de tensión del cilindro

$t$ : Espesor

Se comprobó la correcta selección del material al obtener el factor de seguridad, al aplicar la siguiente ecuación:

$$F_s = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \quad (2.23)$$

Donde:

$F_s$ : Factor de seguridad

$\sigma_{max}$ : Esfuerzo máximo del material

#### 2.4.4 Diseño de pistón porta masas

El pistón también funcionará como porta masas, ya que se encargará de añadir presión adicional al fluido, fue concebido del mismo material que el cuerpo y con un eje sobresaliendo de la mitad con el fin de añadir masas si se requiere de más presión en el análisis, y con una canaleta cerca del borde inferior para la inserción de una junta tórica con el fin de evitar la fuga de fluido.

La porta masas durante sus ciclos de trabajo estará sometido a carga de compresión en un área significativamente extensa en comparación al eje donde se centrarán las masas, por lo que el diseño se basará en el eje el cual está sometido a un esfuerzo de tensión simple.

$$\sigma_e = \frac{mg}{A_e} \quad (2.24)$$

Donde:

$\sigma_e$ : Esfuerzo de tensión del eje

$A_e$ : Área transversal del eje

#### 2.4.5 Soporte

La estructura cilíndrica debe ser sostenida por encima del reservorio siempre a la misma altura, por lo que se decidió diseñar un soporte en forma de trípode que pueda soportar el peso del equipo. Por tal motivo se diseñó el soporte

basándose en el peso total del cuerpo del medidor, del fluido dentro del equipo y de la porta masas tipo pistón.

$$W = (m_{\text{permeámetro}} + m_{\text{fluido}} + m_{\text{porta masas}}) \cdot g \quad (2.25)$$

Donde:

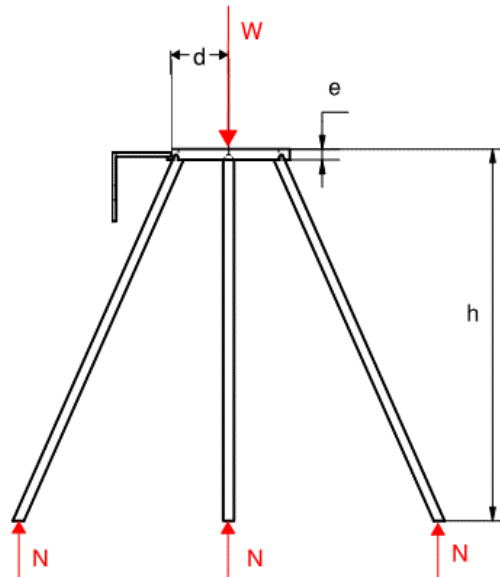
$W$ : es el peso total del permeámetro; incluye el equipo, los instrumentos, el fluido, la probeta y la porta masas

$m_{\text{permeámetro}}$ : masa total del permeámetro

$m_{\text{fluido}}$ : masa total del fluido dentro del equipo

$m_{\text{portamasas}}$ : masa de la porta masas tipo pistón

$g$ : constante gravitacional



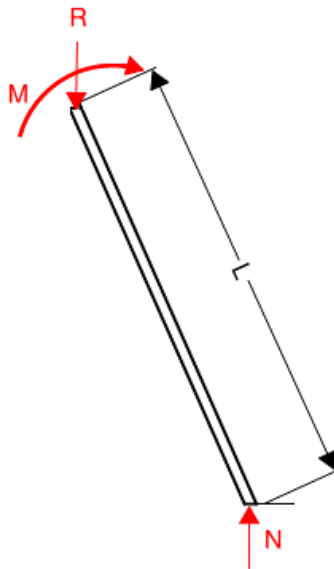
**Figura 2.11 Diagrama de Soporte del Equipo**

Se utilizó el diagrama de cuerpo libre del soporte para encontrar las fuerzas que actúan sobre los diferentes componentes de la estructura. Al analizar las fuerzas estáticas que influyen pudimos encontrar las reacciones y de tal manera las fuerzas internas a las que sometidas los diferentes elementos que componen el soporte.

$$\sum F_y = 0 \quad (2.26)$$

$$N = \frac{W}{3} \quad (2.27)$$

De tal manera se generó el diagrama de cuerpo libre para cada elemento con el fin de encontrar las fuerzas internas que afectan las barras del soporte.



**Figura 2.12 Diagrama de cuerpo libre de perfil**

Al analizar las fuerzas que actúan sobre el perfil y considerarlo como una columna pudimos encontrar el esfuerzo crítico al cual son sometidos dichos perfiles. Se consideró que dicha columna tendría un extremo fijo y un extremo libre. De tal manera comparamos este valor con el esfuerzo axial que soporta la columna debido al peso para verificar un factor de seguridad adecuado.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(Kl/r)^2} \quad (2.28)$$

$$r = \sqrt{I/A_b} \quad (2.29)$$

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A_b} \quad (2.30)$$

$$FS_1 = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_a} \quad (2.31)$$

Donde:

$\sigma_{cr}$ : esfuerzo crítico de la columna

$\sigma_a$ : esfuerzo axial sobre la columna

$F_a$ : fuerza axial sobre columna

$E$ : constante elástica del material

$K$ : factor de pandeo

$l$ : longitud de perfil

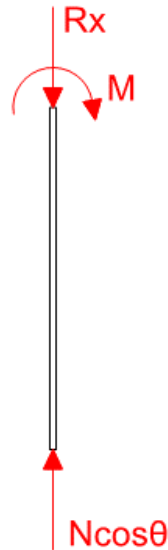
$r$ : radio de giro

$I$ : momento de inercia del perfil



$A_b$ : área de sección del perfil

$FS_1$ : factor de seguridad por pandeo



**Figura 2.13 Análisis de Pandeo de Columna**

También analizamos dicho elemento como si fuera una viga empotrada para determinar el esfuerzo cortante y esfuerzo por flexión al cual es sometido la barra. Con el uso de los gráficos de fuerza cortante y momento flector pudimos calcular estos esfuerzos, conforme a la Figura 2.14. Una vez calculadas dichas variables se las comparó con el esfuerzo de fluencia del material escogido para asegurar un factor de seguridad adecuado.

$$\sigma_x = \frac{-My}{I} \quad (2.32)$$

$$\tau = \frac{VQ}{Ib} \quad (2.33)$$

$$FS_2 = \frac{S_y}{\sigma_x} \quad (2.34)$$

$$FS_3 = \frac{S_y}{2\tau} \quad (2.35)$$

Donde:

$\sigma_x$ : esfuerzo normal en viga

$\tau$ : esfuerzo cortante en viga

$S_y$ : esfuerzo de fluencia de material obtenido

$M$ : momento flector máximo

$V$ : fuerza cortante máxima

$Q$ : momento de primer orden del área transversal

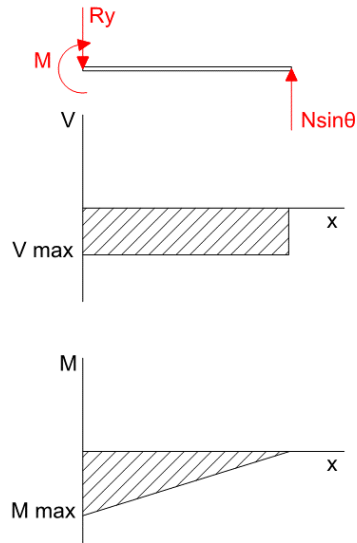
$b$ : ancho de viga

$y$ : distancia desde eje neutro

$I$ : momento de inercia del perfil

$FS_2$ : factor de seguridad por momento flector

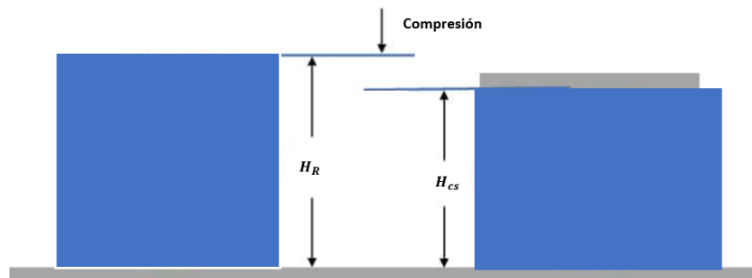
$FS_3$ : factor de seguridad por fuerza cortante



**Figura 2.14 Análisis de Flexión de Viga**

### 2.4.6 Selección del sello

Para realizar la selección del sello del pistón superior se deben aplicar las siguientes ecuaciones, conforme a la Figura 2.15.



**Figura 2.15 Dimensiones del sello hidráulico**

$$R_c = \frac{H_{CS} - H_R}{O_{CS}} \quad (2.36)$$

Donde:

$R_c$ : ratio de compresión

$H_{CS}$ : altura del perfil de la junta

$H_R$ : altura de la ranura

En la Tabla 2.6 se muestra el rango de ratio de compresión recomendado para el sello.

**Tabla 2.6 Rango de ratio de compresión (Global O-Ring & Seal, 2020)**

Mínimo	Recomendado	Máximo
5%	20%	30%

#### 2.4.7 Diseño de reservorio

El reservorio se lo concibió de plástico y de forma cilíndrica, con un radio mayor al del cuerpo ya que se desea evitar derramamientos que pueden ocasionar mediciones erróneas, este reservorio no almacenará gran cantidad de líquido por lo que no es necesario ahondar en profundidad con el diseño del espesor de la pared del reservorio o altura, ya que reservorios de plásticos comunes para el hogar puede ser usados, sin embargo se realizará el respectivo análisis para determinar cuál será la carga estática que soporta el recipiente.

Se calculó el máximo valor de volumen de fluido, para lo que se aplicó la siguiente ecuación:

$$v_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot c \quad (2.37)$$

Donde:

$v_f$ : Volumen de fluido dentro del permeámetro

#### 2.4.8 Selección del manómetro

Se seleccionó el manómetro del equipo de acuerdo a la presión máxima del sistema. Para esto se consideró la presión generada por la columna del fluido cuando el permeámetro esté lleno y la presión generada por la carga constante que se aplicaría. Conforme a lo expuesto en la sección 2.4.3.

#### 2.4.9 Selección de balanza

Para poder medir el flujo que atraviesa el equipo se seleccionó una balanza digital que pese la cantidad de fluido acumulado en el segundo reservorio. Para poder seleccionar dicha balanza se consideró el peso del recipiente y el peso del fluido acumulado. Esta balanza digital se conectará al Arduino para poder reflejar la medida en el LCD y calcular el flujo realizado.

$$m_{m\acute{a}x} = m_{recipiente} + m_{fluido} \quad (2.38)$$

$$m_{m\acute{a}x} = m_{recipiente} + \rho v_f \quad (2.39)$$

Donde:

$m_{m\acute{a}x}$ : Máxima masa a medir

$m_{recipiente}$ : Masa del recipiente

$m_{fluido}$ : Masa del fluido

#### **2.4.10 Diseño de sistema de medición de flujo**

Para medir el flujo que atraviesa la probeta dentro del medidor de permeabilidad se dividió la medición en dos partes. Dado que se requiere conocer la cantidad de fluido utilizado dentro de un periodo de tiempo se decidió utilizar una balanza y un temporizador para obtener lo deseado. Con la medición del peso del fluido utilizado y el tiempo transcurrido se podra calcular el flujo.

Para poder medir el tiempo transcurrido de la medición se decidió realizar un sistema electrónico compuesto por una tarjeta con microprocesador, la cual fue programada para realizar el conteo de tiempo en respuesta a una señal estipulada. Se utilizara un sensor fotoeléctrico el cual enviara una señal a la tarjeta indicando cuando es retirada la tapa del equipo para iniciar el conteo.

Para reiniciar el cronómetro se decidió utilizar un botón de reinicio, mismo que al ser presionado enviara una señal a la tarjeta para detener la lectura de datos. Se decidió utilizar un sensor fotoeléctrico ya que son de fácil manejo y bajo costo, ideal para enviar la señal a una tarjeta Arduino

Al mismo tiempo el Arduino recibira una señal de la celda de carga conectada a un amplificador el cual mide el peso del fluido. Con los datos obtenidos durante la medición, la tarjeta realizara el cculo correspondiente del flujo. Una vez detenida la adquisición de valores, una pantalla LCD también conectado a la tarjeta, mostrara los resultados.

El proceso se describe en el siguiente diagrama de flujo (Figura 2.16), donde se describen las operaciones lógicas que se deben tomar para realizar las mediciones necesarias.

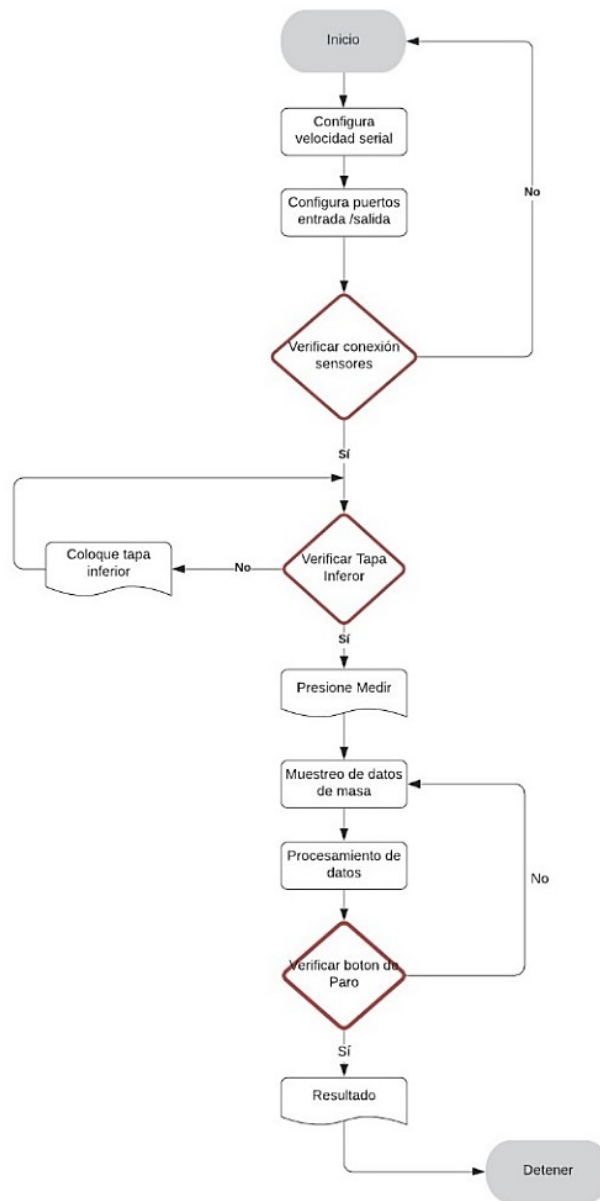


Figura 2.16 Diagrama de Flujo del Proceso

Las partes que componen el sistema electrónico se muestran en la Figura 2.17, y se enumeran en la Tabla 2.8. El código del Arduino y el circuito están detallados en los Anexos 6 y 7.

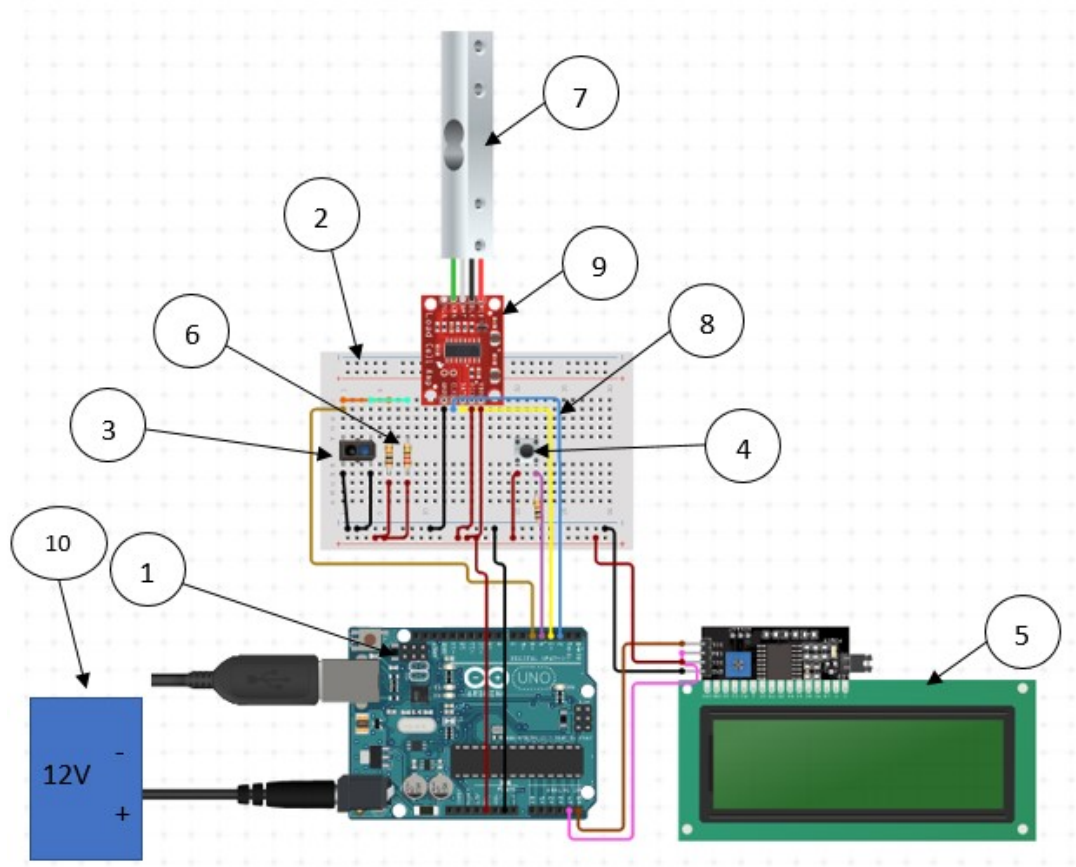


Figura 2.17 Diagrama del circuito



**Tabla 2.7 Partes del sistema electrónico**

N°	Parte
1	Arduino Uno - R3
2	Tablero Protoboard sin Soldadura
3	Sensor Reflectivo IR
4	Interruptor tipo Botón
5	Monitor LCD 20x4 I2C
6	Resistencias 220 Ohm / 10k Ohm
7	Celda de carga
8	Cables de Interconexión
9	Amplificador
10	Fuente de alimentación 12V

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Cálculos para el diseño de los componentes del permeámetro

#### 3.1.1 Selección de cilindro para el cuerpo

Para la sección adecuada se obtuvo la presión máxima a la que estará sometida el cuerpo considerando que se le puede añadir hasta 20 kg a la porta masas.

En la Tabla 3.1 y 3.2 se muestran las dimensiones con las que se cumplen las condiciones para la aplicación de la Ley de Darcy, para tres probetas diferentes.

**Tabla 3.1 Dimensiones y resultados para Aceite de Girasol**

Aceite de Girasol						
	Re	n	d (m)	$\eta$	D (m)	e (m)
Probeta 1	1913	3	0.016	0.19	0.063	0.02
Probeta 2	1918	7	0.015	0.4	0.063	0.02
Probeta 3	889	31	0.007	0.38	0.063	0.02

**Tabla 3.2 Dimensiones y resultados para Aceite SAE90**

Aceite SAE90						
	Re	n	d (m)	$\eta$	D (m)	e (m)
Probeta 1	413	3	0.016	0.19	0.063	0.02
Probeta 2	413	7	0.015	0.4	0.063	0.02
Probeta 3	192	31	0.007	0.38	0.063	0.02

Por lo que se reemplaza los datos en la ecuación (2.21):

$$P_{pared} = (890)(9.81)(0.2) + \frac{4(0.93+20)(9.81)}{\pi(0.063^4)}$$

$$P_{pared} = 67613.08 \text{ Pa}$$

El valor obtenido de  $P_{pared}$  se reemplazó en la ecuación (2.22) considerando las dimensiones de la tubería de dos pulgadas y media que se muestran en el Anexo 1.

$$\sigma = (67613.08) \left( \frac{63}{5} \right)$$

$$\sigma = 0.852 \text{ MPa}$$

Finalmente se comprobó que el factor de seguridad sea mayor a 2 con la ecuación (2.23), obteniendo el esfuerzo máximo del material de la Tabla 2.5.

$$F_s = \frac{330}{0.852}$$

$$F_s = 387.36$$

Con el factor de seguridad obtenido se comprueba que el cuerpo cilíndrico de 400 mm de alto y 63 mm de diámetro interno fabricado de material ASTM A53 soporta la columna de 200 mm de agua con 20 kg en la porta masas

### 3.1.2 Diseño de pistón porta masas

Se calculó el esfuerzo a tensión al que estaría sometido el vástago del pistón con la ecuación (2.24):

$$\sigma_e = \frac{(20.93)(9.81)}{\frac{12.7(3.1416)}{4}}$$

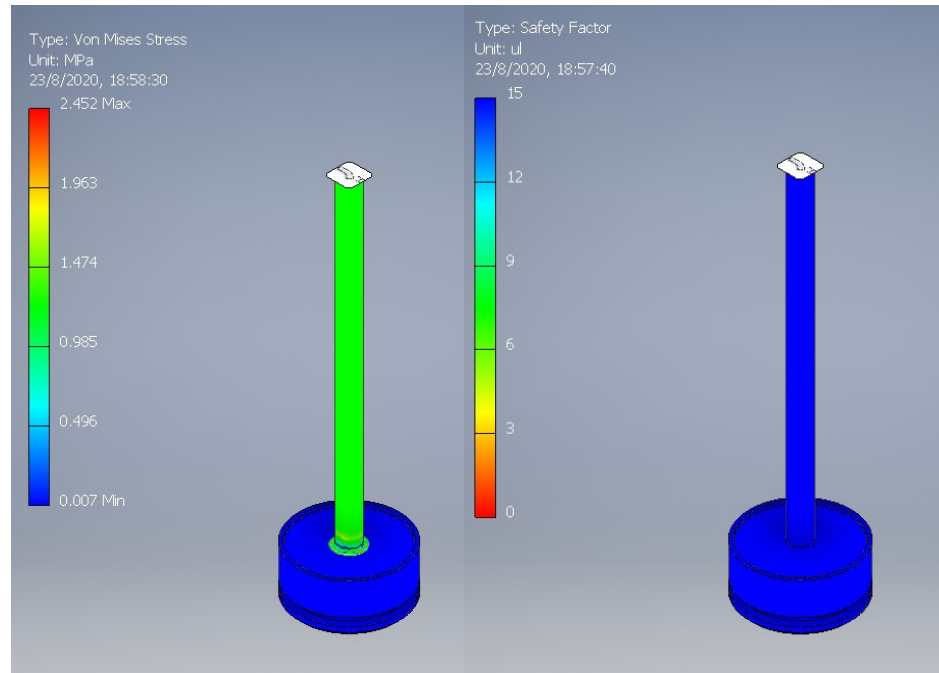
$$\sigma_e = 2.058 \text{ MPa}$$

Se reemplazó el valor obtenido y la resistencia a la tensión del material AISI 1020 laminado en caliente de 207 MPa, en la ecuación (2.23) para obtener el factor de seguridad:

$$F_s = \frac{207}{2.058}$$

$$F_s = 100.58$$

El valor del factor de seguridad es alto, sin embargo, es comprensible dado que el valor de esfuerzo máximo a tensión es 2.058 MPa. Se realizó un análisis CAE para verificar el diseño, se muestra los resultados en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 Simulación de esfuerzos y factor de seguridad**

### 3.1.3 Reservoirio

Conforme a lo expuesto en la sección 2.4.7 se realizó el cálculo del volumen máximo de fluido que puede contener el permeámetro, esto nos permitirá seleccionar un reservorio con la capacidad de almacenamiento adecuada.

$$v_f = \frac{(3.1416)(63)^2}{4} \cdot 200$$

$$v_f = 623450.52 \text{ mm}^3$$

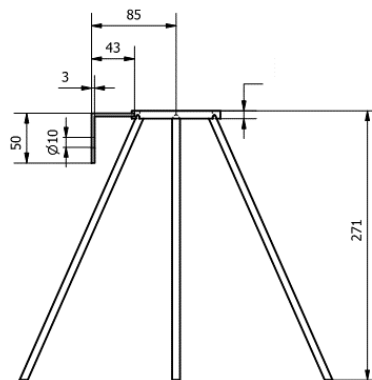
Convirtiendo el valor obtenido se tiene que es equivalente a 0.63 litros, se realizó esta conversión para facilitar la búsqueda de un recipiente dentro del mercado local. Se halló un recipiente de 1 litro transparente, conforme a la Figura 3.3. Elaborado en vidrio con graduación.



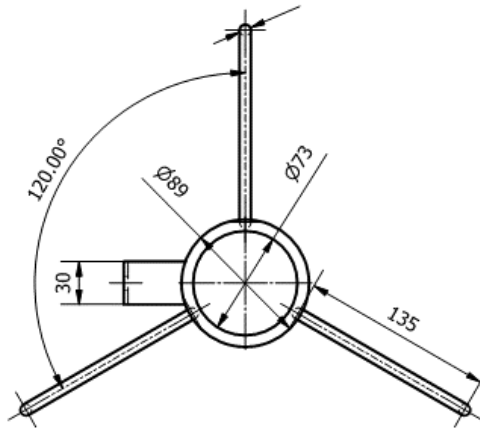
**Figura 3.2 Reservorio inferior de 10000 ml (LABCOMERCIAL, 2020)**

### **3.1.4 Soporte**

Para poder proceder con el diseño de la estructura del soporte primero se analizó el peso total que este deberá soportar. Esta fuerza incluyó el peso del equipo, el peso de la probeta, el peso del fluido y el peso de la porta masas que funciona como pistón, conforme a la ecuación (2.25). De tal manera se generó la Tabla 3.3 que enlista el peso de los elementos previamente mencionados y el cálculo de la fuerza externa que soportara el soporte. Además, se dimensiono la estructura del soporte de acuerdo con lo ilustrado en las Figuras 3.3 y 3.4.



**Figura 3.3 Vista frontal del soporte**



**Figura 3.4 Vista superior del soporte**

**Tabla 3.3 Peso total soportado por el soporte**

Parte	Material	Peso [kg]
Cuerpo de Permeámetro	Acero ASTM A53	2.68
Fluido Experimental	Aceite SAE 90	3.02
Pistón tipo Porta Masas	Acero ASTM A53	0.93
TOTAL [kg]		6.631
TOTAL [N]		65.03

Al hacer esto, se pudo analizar si el perfil seleccionado cumple con un factor de Dado el peso obtenido en la Tabla 3.3, se procedió a seleccionar el perfil que se utilizará para el diseño del trípode. seguridad mayor a 2, asegurando que dicho elemento no falle por pandeo, por flexión o por los esfuerzos cortantes aplicados. Se consultó con un proveedor local de perfiles y barras, y se obtuvo el Catálogo de Perfiles Estructurales y el Catálogo de Varillas de

construcción (Anexo 2). De estos catálogos se decidió comparar el uso de un perfil estructural “Ángulo Doblado” con código L 20x2, del perfil L 40x2, de una varilla de construcción lisa con diámetro de 8mm y de una varilla cromada con diámetro de 8mm. Los tres primeros elementos están compuestos de acero ASTM A36 mientras la varilla cromada está compuesta de acero inoxidable AISI 304.

Dado las dimensiones del soporte se analizó el esfuerzo que podría ser causado por pandeo. Utilizando la ecuación (2.28), se pudo encontrar el esfuerzo crítico por pandeo que sufriría cada perfil del trípode. El cálculo de este esfuerzo esta descrito en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Cálculo de esfuerzo crítico por pandeo**

Material	Perfil L20x2	Perfil L40x2	Varilla Lisa (8mm)	Varilla Cromada (8mm)
Módulo Elástico de Young [GPa]	200	200	200	193
Momento de Inercia de Sección Transversal [cm <sup>4</sup> ]	0.28	2.44	0.02	0.02
Área de Sección de Perfil [cm <sup>2</sup> ]	0.73	1.33	0.50	0.50
Factor de Longitud Efectiva [K]	2	2	2	2
Longitud de Perfil [m]	0.303	0.303	0.303	0.303
Esfuerzo Critico por Pandeo [MPa]	205.96	985.10	21.48	20.73



Comparando el esfuerzo crítico calculado con el esfuerzo axial soportado por cada columna, bajo el peso encontrado, pudimos determinar que al utilizar cualquiera de estos perfiles podemos asegurar un factor de seguridad elevado, conforme la ecuación (41) y lo mostrado en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.5 Cálculo de factor de seguridad por pandeo**

Material	Perfil L20x2	Perfil L40x2	Varilla Lisa (8mm)	Varilla Cromada (8mm)
Esfuerzo Critico por Pandeo [MPa]	205.96	985.10	21.48	20.73
Esfuerzo Axial [MPa]	0.40	0.22	0.58	0.58
Factor de Seguridad 1	519.16	4524.07	37.26	35.96

También se analizaron dichos perfiles como si estos fueran vigas empotradas y de tal manera se procedió a calcular el esfuerzo axial y cortante causado por la deflexión de estas vigas, conforme las ecuaciones (2.32) y (2.33) y lo mostrado en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Cálculo de esfuerzo axial y cortante por flexión**

Material	Perfil L20x2	Perfil L40x2	Varilla Lisa (8mm)	Varilla Cromada (8mm)
Momento Flector máximo [Nm]	17.6	17.6	17.6	17.6

Longitud de Perfil [m]	0.303	0.303	0.303	0.303
Fuerza Cortante Máxima [N]	58.1	58.1	58.1	58.1
Distancia desde Eje Neutro [mm]	10	20	4	4
Momento de Inercia de Sección Transversal [cm <sup>4</sup> ]	0.28	2.44	0.02	0.02
Área de Sección de Perfil [cm <sup>2</sup> ]	0.73	1.33	0.50	0.50
Esfuerzo Cortante por Deflexión [MPa]	0.80	0.44	1.54	1.54
Esfuerzo Axial por Deflexión [MPa]	62.91	14.44	350.62	350.62

Comparando los esfuerzos axiales y cortantes calculados con el esfuerzo de fluencia de cada material pudimos calcular el factor de seguridad por deflexión de cada perfil propuesto, conforme a las ecuaciones (2.34) y (2.35) y lo mostrado en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7 Cálculo de factor de seguridad por deflexión**

Material	Perfil L20x2	Perfil L40x2	Varilla Lisa (8mm)	Varilla Cromada (8mm)
Esfuerzo Cortante por Deflexión [MPa]	0.80	0.44	1.54	1.54
Esfuerzo Axial por Deflexión [MPa]	62.91	14.44	350.62	350.62

Esfuerzo de Fluencia del Material [MPa]	250	250	250	205
Factor de Seguridad 2	3.97	17.31	0.71	0.58
Factor de Seguridad 3	313.92	571.94	162.04	132.87

Dado a los cálculos realizados y los resultados encontrados decidimos utilizar la varilla lisa de 8mm como perfil para la estructura del trípode. Dicho elemento de tal dimensiones y material cumple con todos los factores de seguridad estipulados mientras que se mantiene dentro de un rango aceptable de sobre dimensionamiento.

Una vez seleccionado el perfil adecuado este se unirá al anillo que sujeta el cuerpo del permeámetro mediante puntos de soldadura. Dicho anillo estará compuesto de la misma varilla lisa de 8 mm, la cual será doblada al diámetro necesario.

### 3.1.5 Selección de sello

La selección del sello hidráulico para el pistón se hizo en base al diámetro interior del cuerpo cilíndrico (D), se consultó en catálogos de proveedores y se halló el sello CTC de 2 ½", cuyas características se muestran en el Anexo 3. Se calculó la razón de compresión para verificar que esté conforme a lo expresado en la sección 2.4.6.

$$R_c = \frac{6-5}{6} (100)$$

$$R_c = 16\%$$

Se tiene porcentaje de 16%, comparando con lo recomendado que es 20% según la Tabla 2.9 se tiene que sello seleccionado fue seleccionado correctamente. El sello es de material nitrilo y presión de trabajo de hasta 5000 Psi.

### **3.1.6 Selección de balanza**

Para la selección de la balanza se calculó el máximo valor de peso de fluido, para ello se reemplazó los datos del máximo valor de volumen de fluido que puede almacenar el permeámetro y el valor más alto de densidad de los fluidos en la Tabla 2.2 en la ecuación (2.39).

$$m_{m\acute{a}x} = 170 + (903000)(0.00062345)$$

$$m_{m\acute{a}x} = 0.733 \text{ kg}$$

Conforme el valor máximo de peso calculado se optó por seleccionar una celda de carga de 2 kg, cuyas características se describen en el Anexo 5.

### **3.1.7 Selección del manómetro**

Conforme a lo expresado en la sección 2.4.8, la presión máxima que genera la columna del fluido cuando el permeámetro está lleno es 67613.08 Pascales o 9.8 Psi. Por lo que se seleccionó un manómetro cuyo rango de medición va de 0 a 30 Psi, con una precisión de 1 a 1.5%.

La temperatura de trabajo y el tipo de fluido no fueron determinantes a en la selección dado que el fluido no es corrosivo y se trabajará a temperatura ambiente. Se seleccionó un manómetro Bourdon de la marca WIKA disponible en el mercado local, cuyas características se describen en el Anexo 4.

## 3.2 Simulación

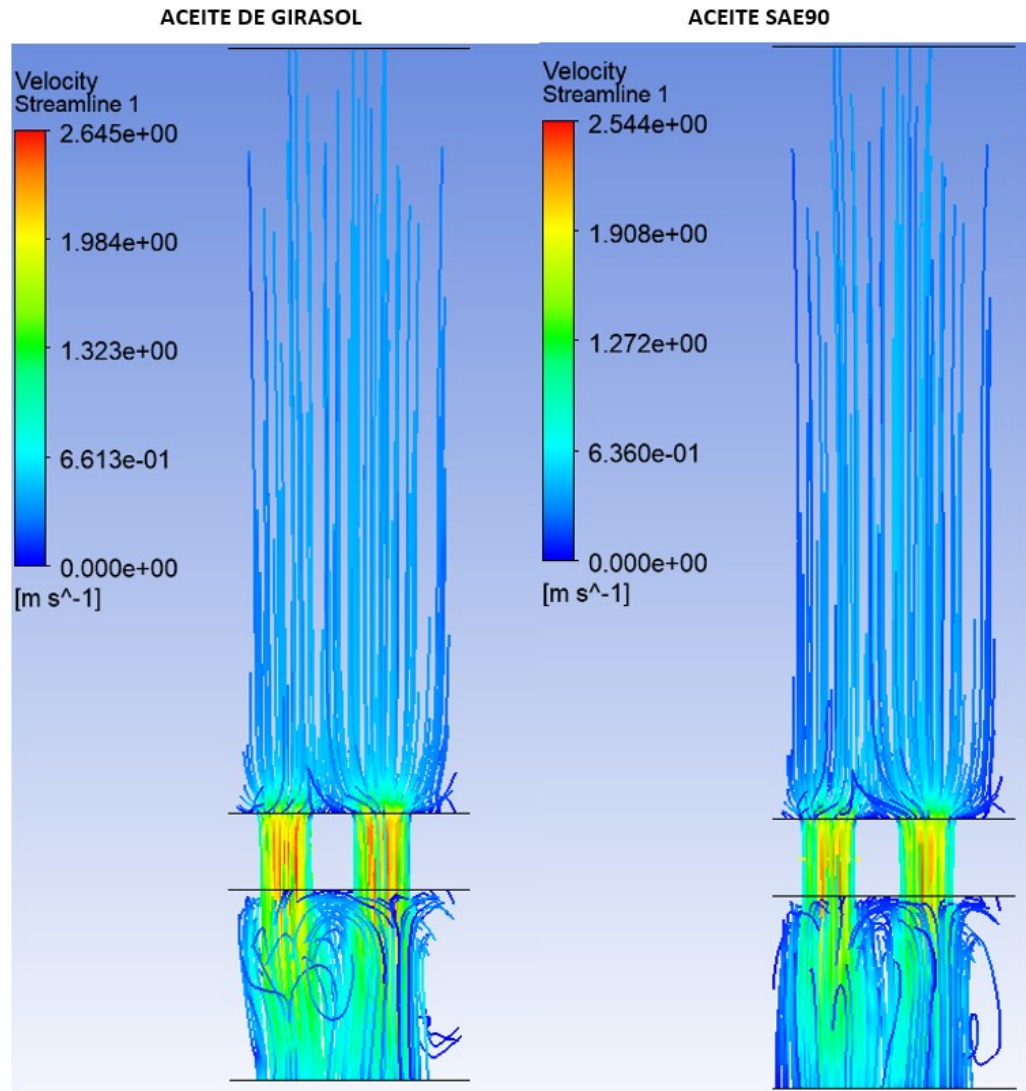
Para la simulación CAE se utilizó el programa ANSYS 2020 R2 ACADEMIC con el módulo FLUID FLOW(FLUENT) trabajando con el modelo matemático k- $\epsilon$ , para lo cual se extrajo el volumen vacío del modelo 1 mostrado en la Figura 2.9 y se obtuvo un sólido cilíndrico con cambio de sección como se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5 Volumen interior**

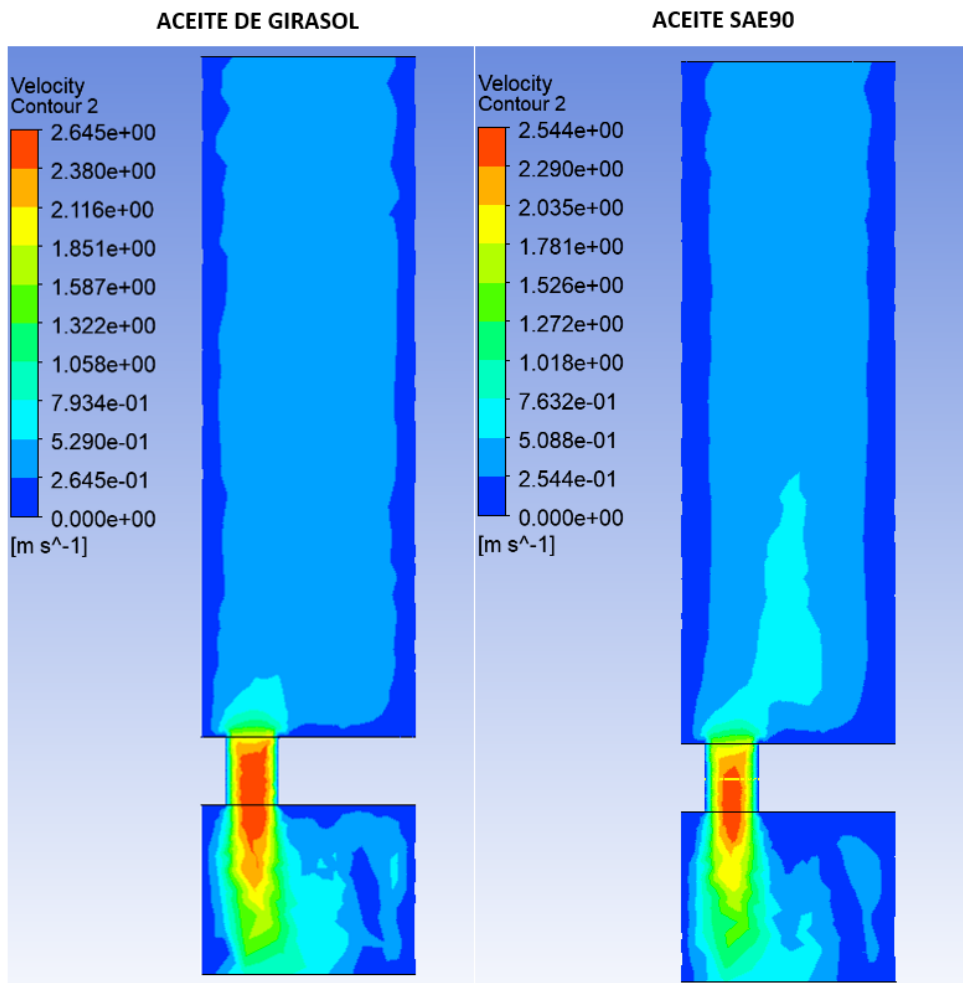
### 3.2.1 Simulación de Probeta 1

En la simulación se analizó las líneas de flujo para observar si el flujo se mantiene laminar en la sección angosta y como se observa en la Figura 3.6, el flujo mantiene su estado laminar tanto con aceite de girasol como con SAE90.



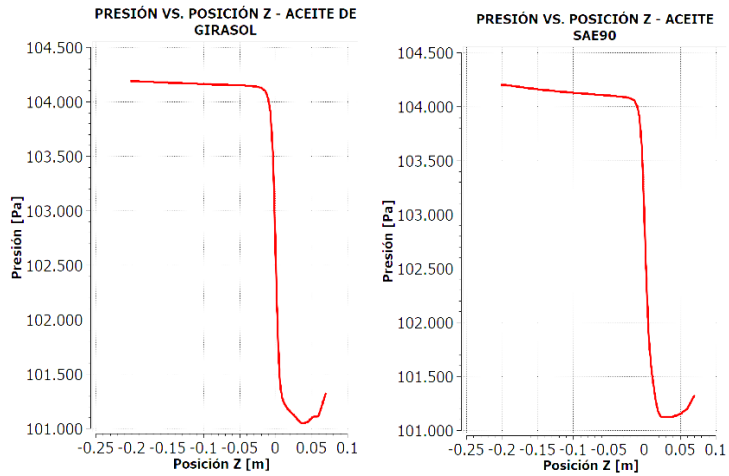
**Figura 3.6 Líneas de flujo con Probeta 1**

En la Figura 3.7 se muestra un plano longitudinal coloreado por zonas para visualizar los diferentes valores de velocidad y el cambio de ella durante el recorrido del flujo.



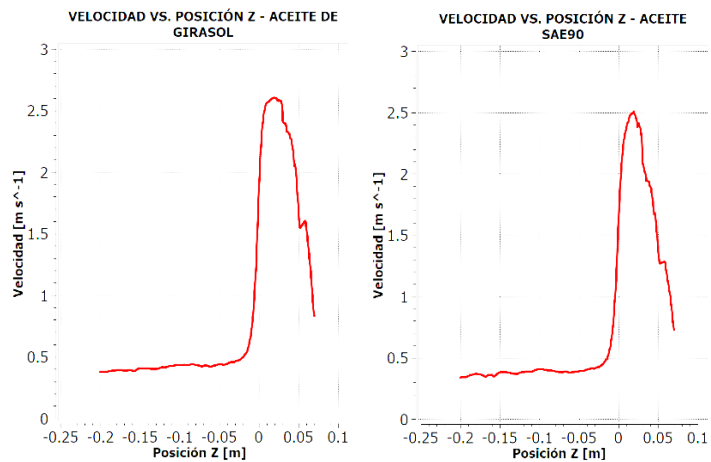
**Figura 3.7 Plano de velocidad con la Probeta 1**

En la Figura 3.8 observamos las gráficas de presión versus posición del aceite de girasol y SAE90 respectivamente, y podemos visualizar que a pesar de que los valores iniciales y forma de la curva sean los mismos la pendiente y valor mínimo cambia.



**Figura 3.8 Gráfica Presión Vs Posición con la Probeta 1**

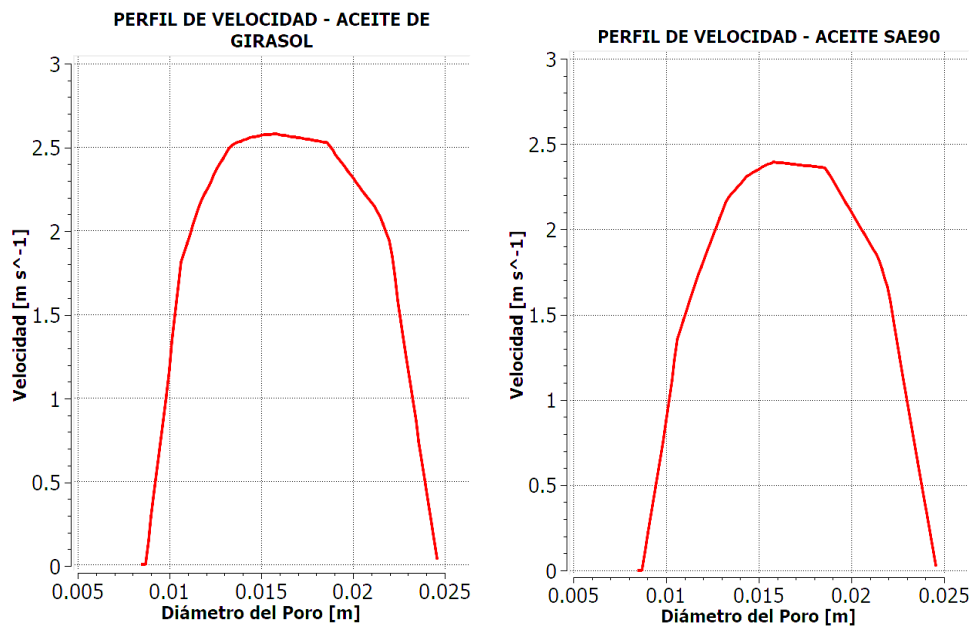
En la Figura 3.9 se nos muestra las gráficas de velocidad versus posición del aceite de girasol y SAE90 respectivamente, y se observa que las gráficas tienen características muy similares, sin embargo, el aceite de girasol llega a tener una velocidad máxima mayor.



**Figura 3.9 Gráfica Velocidad Vs con la Probeta 1**



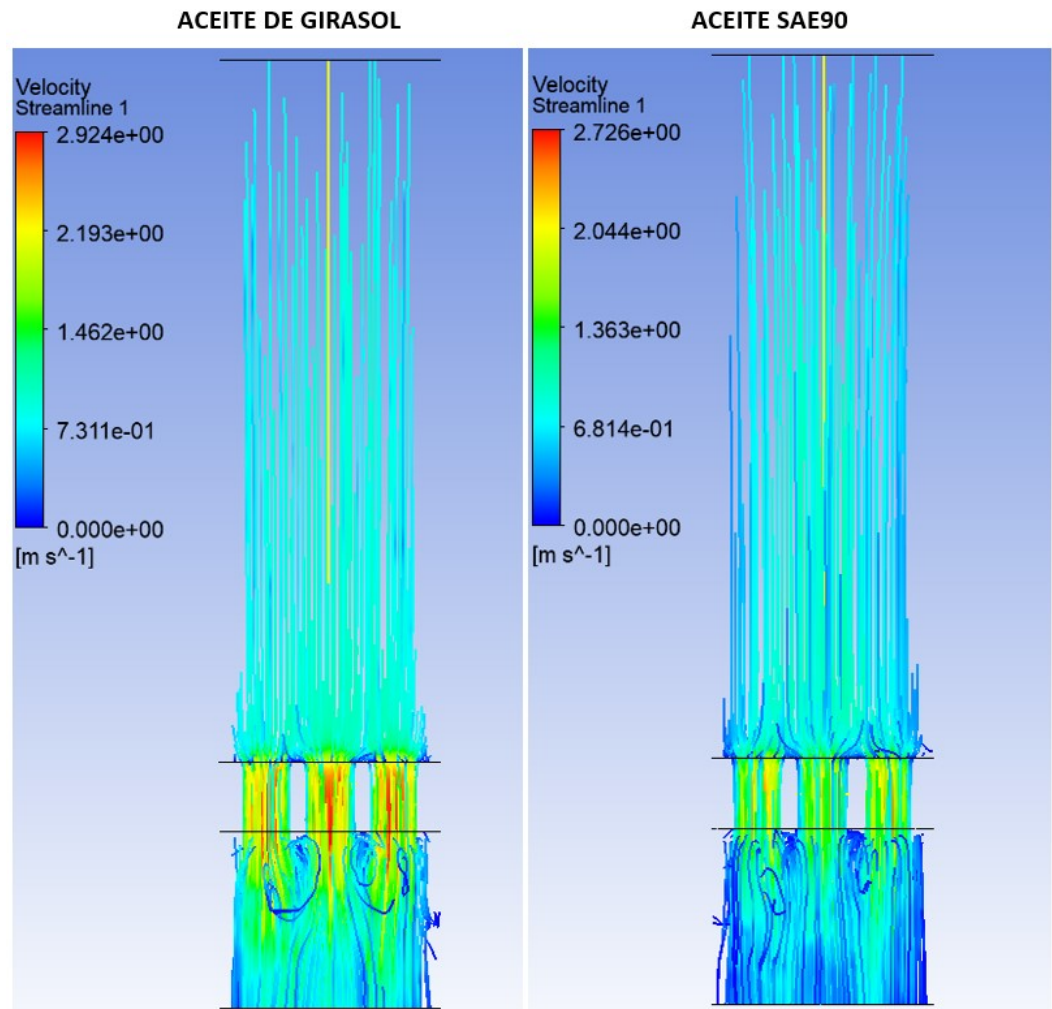
En la Figura 3.10 se presentan las gráficas del perfil de velocidad de los fluidos en la sección de la probeta, y se logra apreciar una diferencia notable tanto en la forma como en valores, ya que el aceite de girasol llega a velocidades más altas y tiene una mayor concavidad.



**Figura 3.10 Gráfica del perfil de velocidad con la Probeta 1**

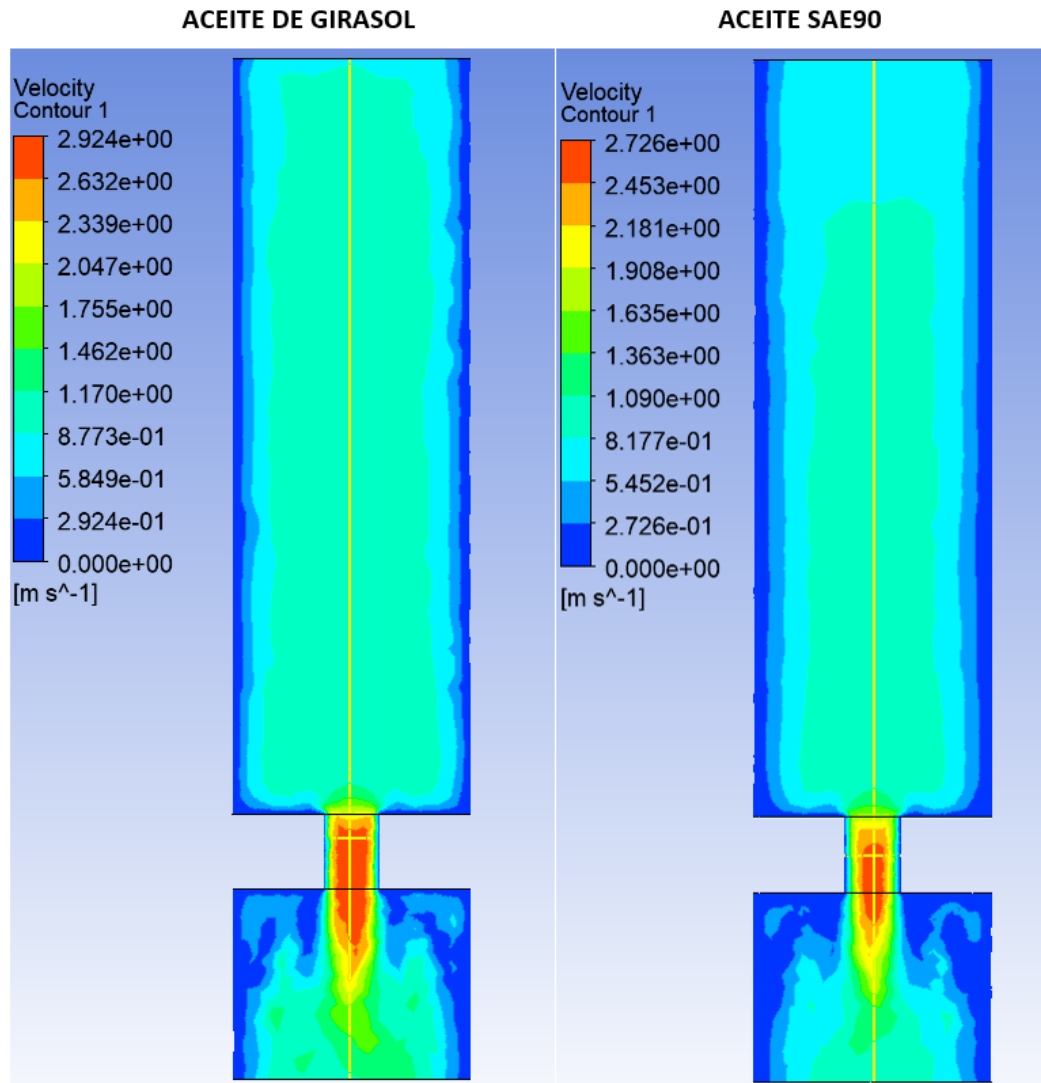
### 3.2.2 Simulación de Probeta 2

Comparando las simulaciones de la Figura 3.11, se visualiza como con el aceite de girasol se forman líneas de flujo turbulentas a la salida de la probeta mientras que el aceite SAE90 se mantiene más estable.



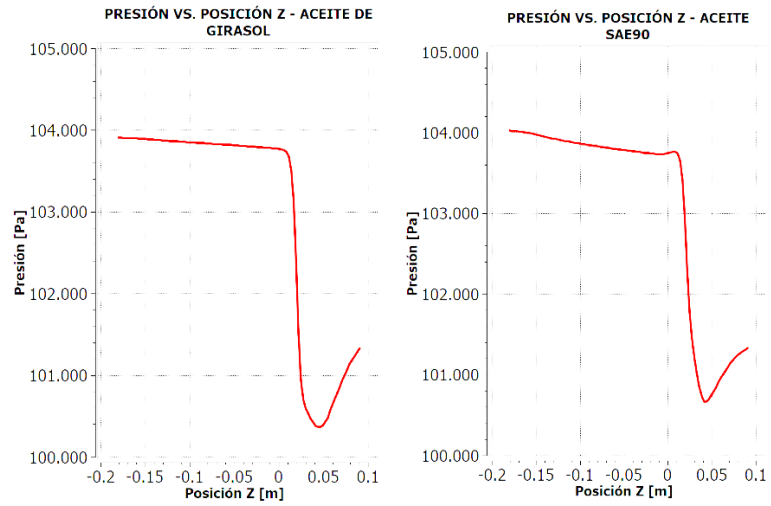
**Figura 3.11 Líneas de flujo con la Probeta 2**

De forma similar a la Figura 3.12, se nota como el aceite de girasol tiene una mayor velocidad en la salida y una mayor velocidad en la zona del poro, en comparación que el aceite SAE90.



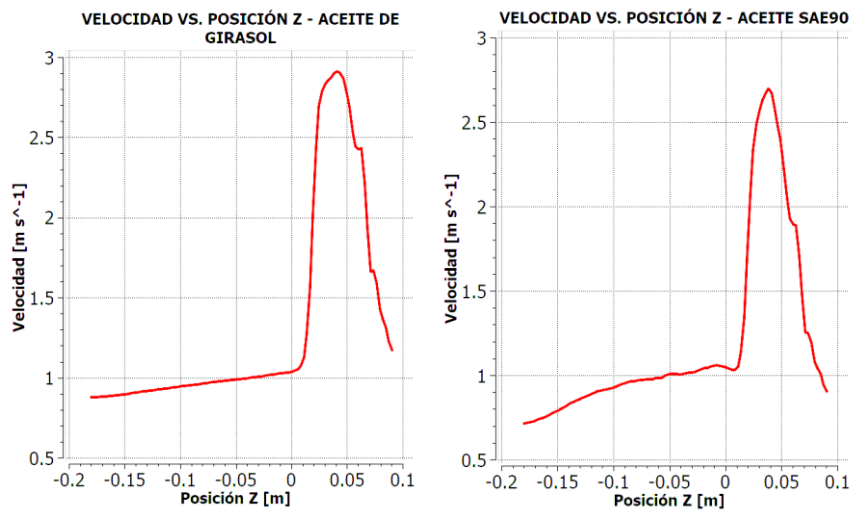
**Figura 3.12 Plano de velocidad con la Probeta 2**

La Figura 3.13 se muestra como el aceite SAE90 llega a alcanzar una menor presión, por lo tanto, una mayor velocidad pico, sin embargo, el aceite de girasol mantiene una zona de alta velocidad en mayor parte del recorrido que el aceite SAE90.



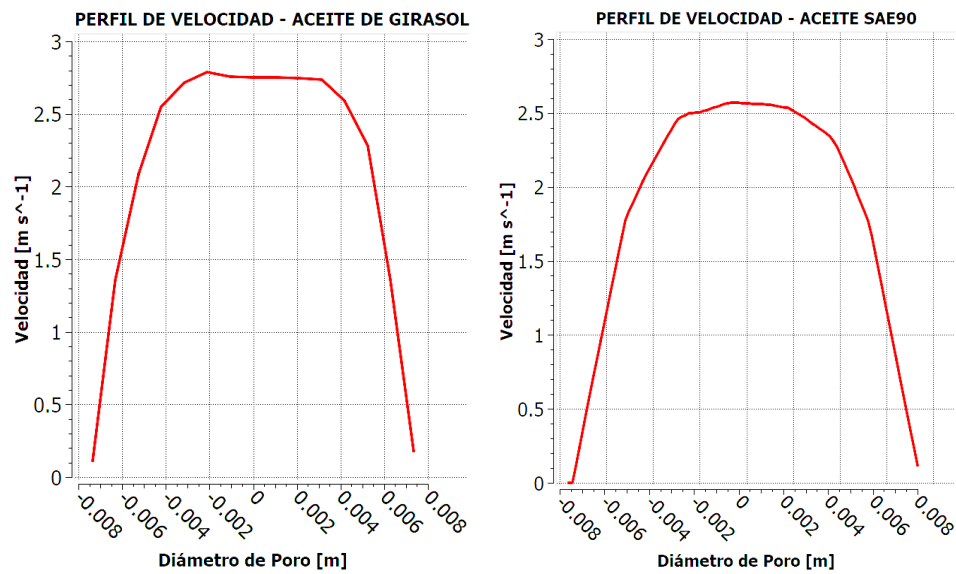
**Figura 3.13 Gráfica Presión vs. Posición con la Probeta 2**

La Figura 3.14 la tasa de cambio de la pendiente con el aceite SAE90 es mayor que con el aceite de girasol.



**Figura 3.14 Gráfica Velocidad Vs Posición con la Probeta 2**

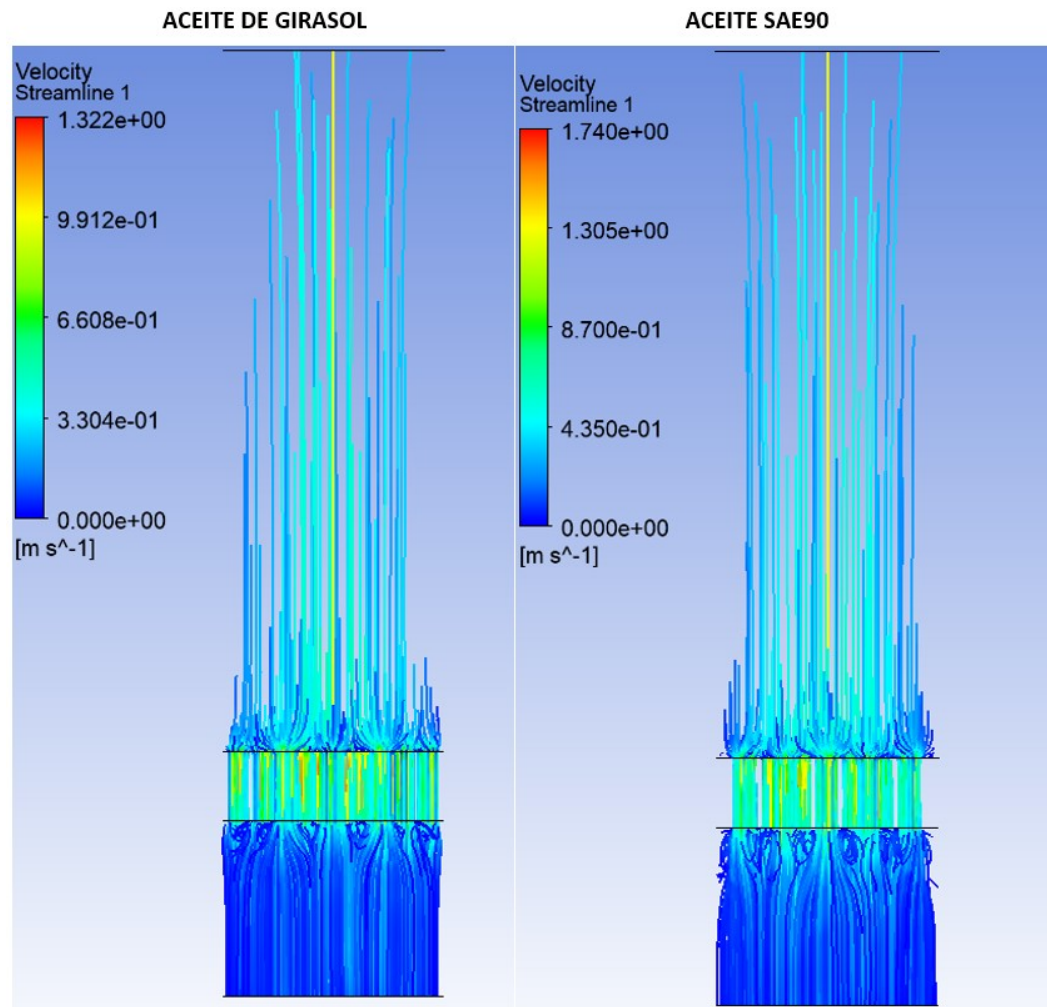
En las gráficas de perfil de velocidad de la Figura 3.15 observamos como el aceite de girasol tiene una mayor velocidad pico y promedio, en comparación que el aceite SAE90.



**Figura 3.15 Gráfica del perfil de velocidad con la Probeta 2**

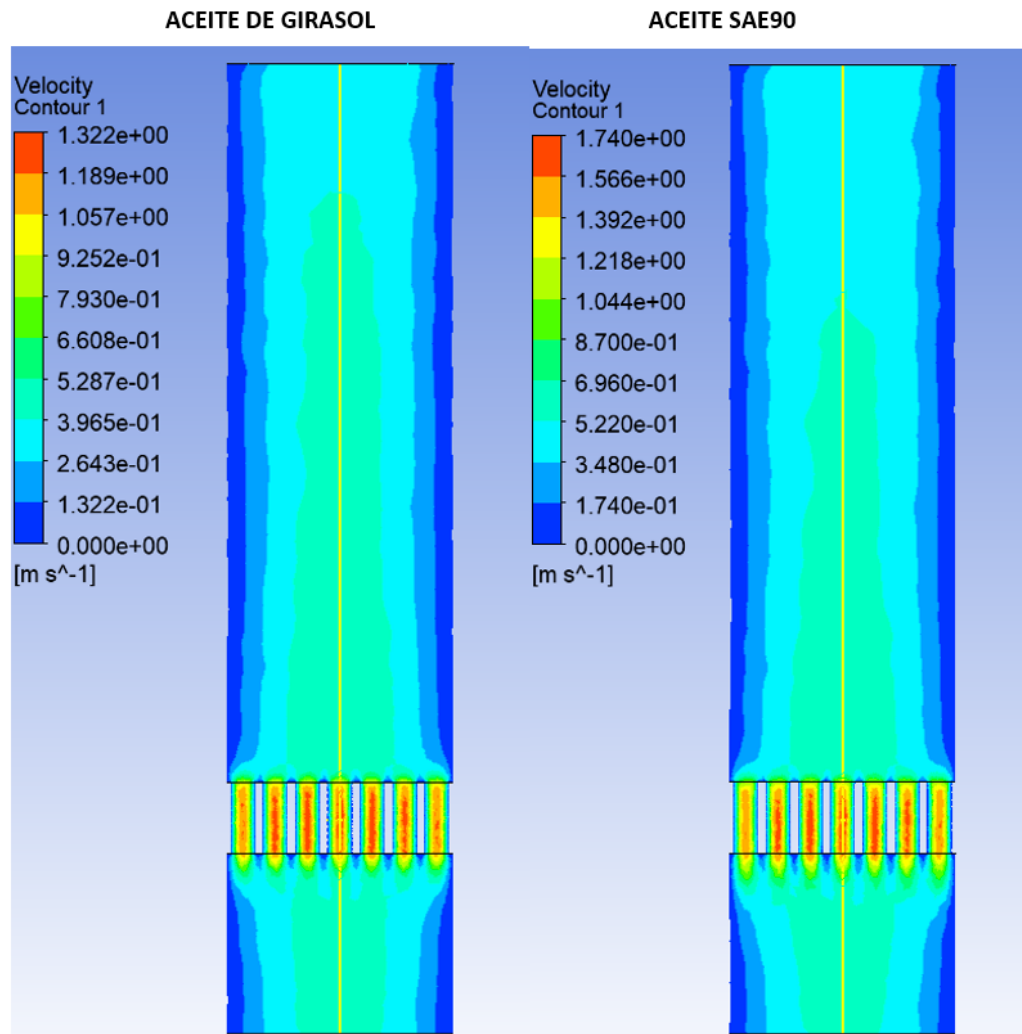
### 3.2.3 Simulación de Probeta 3

Las líneas de flujo en la Figura 3.16, con aceite de girasol y con SAE90, se notan casi en su totalidad paralelas ya que los 31 orificios de la probeta 3 provoca que el Reynolds de ambos fluidos se mantenga debajo de 1000.



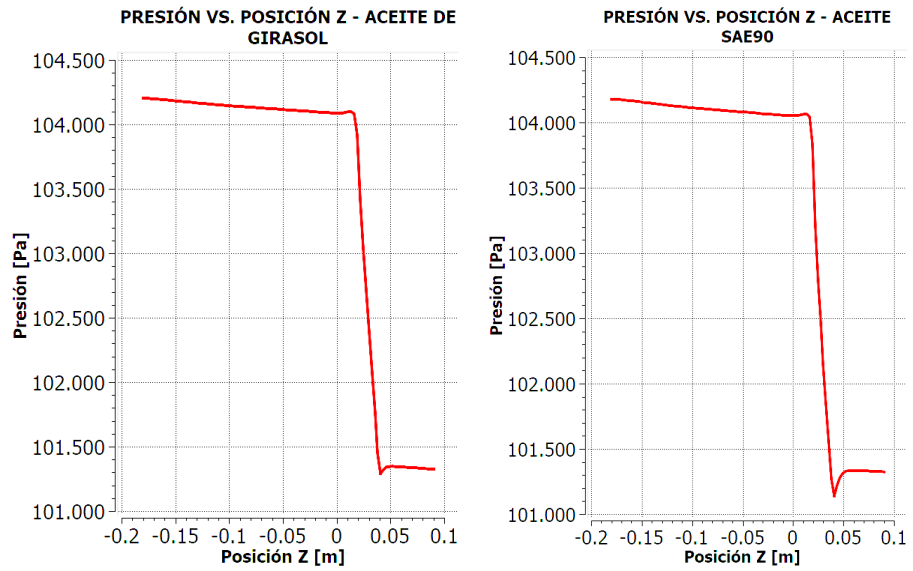
**Figura 3.16 Líneas de flujo con la Probeta 3**

La Figura 3.17 muestra que tanto en el aceite de girasol como en aceite SAE90 el fluido tiene mayor velocidad en los poros centrales que en los poros cercanos a las paredes.

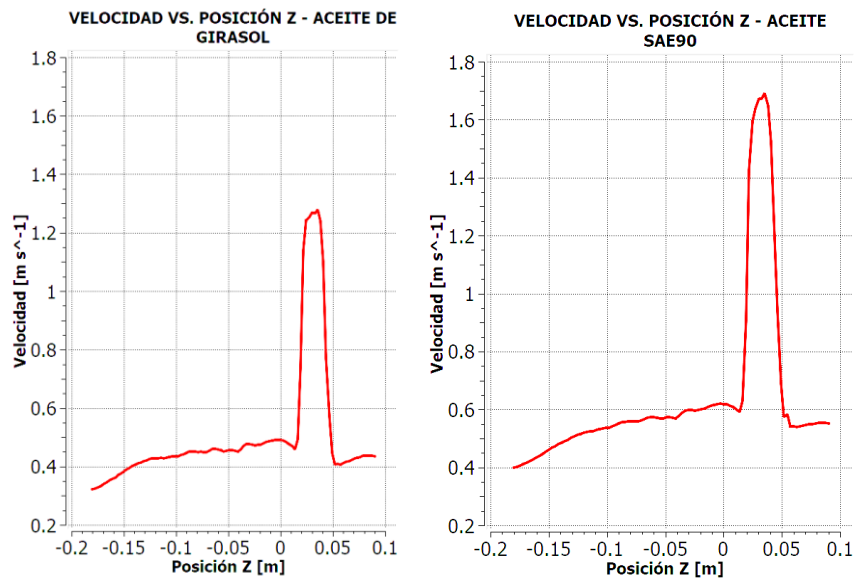


**Figura 3.17 Plano de velocidad con la Probeta 3**

Las gráficas de presión en la Figura 3.18 son casi idénticas, la diferencia más notable es en el mínimo de presión, ya que el aceite SAE90 alcanza una menor presión y por consiguiente un mayor pico de velocidad, lo que se comprueba en las Figura 3.19.



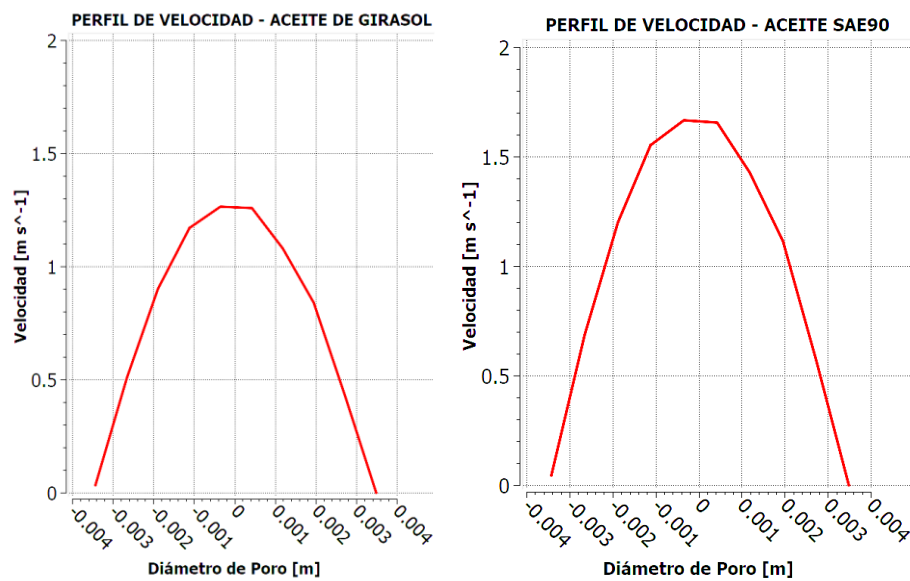
**Figura 3.18 Gráfica Presión Vs Posición con la Probeta 3**



**Figura 3.19 Gráfica Velocidad Vs Posición con la Probeta 3**



Los perfiles de velocidad de la Figura 3.20 fueron obtenidos del poro central, para notar de mejor manera la diferencia de velocidades entre ambos fluidos, y como ya fue mencionado anteriormente, el aceite SAE90 alcanza mayor velocidad pico en la probeta 3, y como ambos tiene una curva similar, el aceite SAE90 también tiene una mayor velocidad promedio que el aceite de girasol.



**Figura 3.20 Gráfica del perfil de velocidad con la Probeta 3**

### 3.3 Comparativa de resultados por probetas

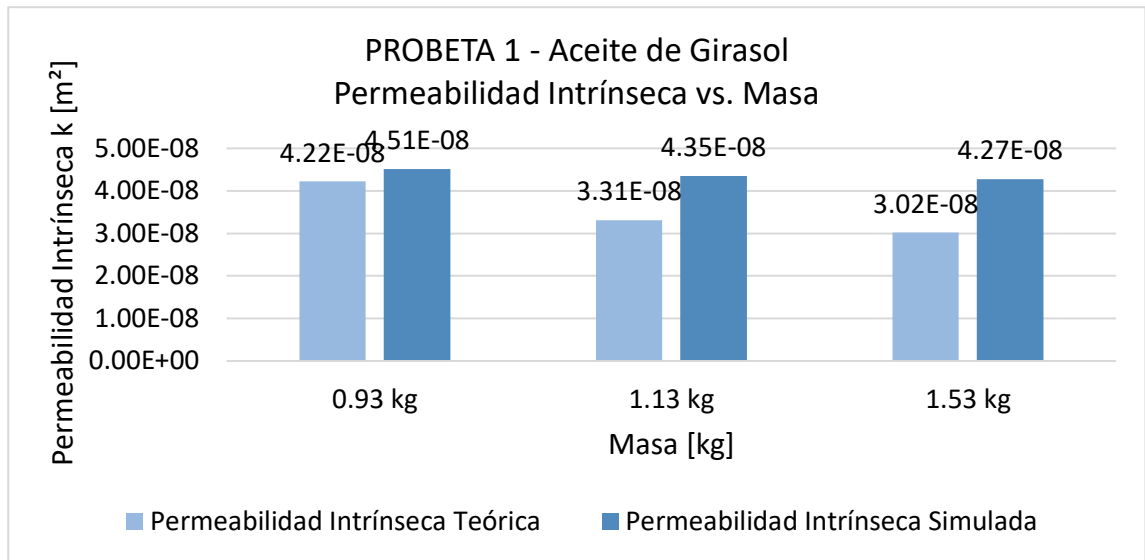
Conforme a lo analizado en la sección 3.2, se decide estudiar el comportamiento de la constante de permeabilidad para cada probeta, tanto con aceite de girasol como con aceite SAE90, esta vez variando el peso de la porta masas para aumentar la presión, sin perder la condición de flujo laminar.

En la Tabla 3.6 podemos visualizar que la diferencia de resultados simulados y teóricos tiende a disminuir con el aceite SAE90, mientras que con el aceite de girasol tiende a aumentar, situación que solo se dio en la probeta 1, ya que, en las demás probetas, como se visualiza en las Tablas 3.8 y 3.9, la diferencia entre los resultados simulados y teóricos solo aumentan.

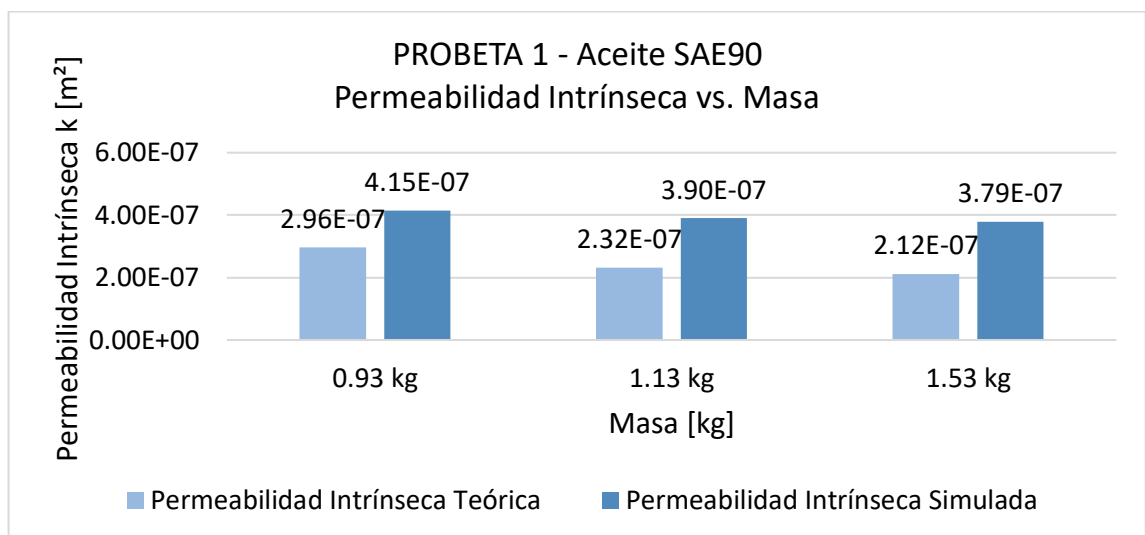
**Tabla 3.8 Comparativa de resultados en probeta 1**

PROBETA 1						
Masa	0.93 kg		1.13 kg		1.53 kg	
Fluido	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90
Velocidad teórica [m/s]	1.934	1.942	2.169	2.180	2.278	2.289
Velocidad simulada [m/s]	1.939	1.699	2.329	2.078	2.504	2.246
Flujo másico teórico [kg/s]	1.053	1.043	1.181	1.170	1.241	1.229
Flujo másico simulado [kg/s]	1.032	0.840	1.242	1.036	1.336	1.123
Conductividad hidráulica teórica K [m/s]	0.023	0.022	0.018	0.018	0.016	0.016
Conductividad hidráulica simulado K [m/s]	0.022	0.018	0.019	0.016	0.017	0.015
Permeabilidad intrínseca teórica k [m <sup>2</sup> ]	6.47E-08	4.53E-07	5.07E-08	3.55E-07	4.63E-08	3.24E-07
Permeabilidad intrínseca simulada k [m <sup>2</sup> ]	6.33E-08	3.65E-07	5.33E-08	3.14E-07	4.98E-08	2.96E-07
Diferencia	2.04%	19.44 %	5.11%	11.47 %	7.67%	8.63%

Conforme a los datos mostrados en la Tabla 3.8 se realizaron las Figuras 3.21 y 3.22 para facilitar la visualización de resultados.



**Figura 3. 21 Probeta 1 - Aceite de Girasol: Permeabilidad Intrínseca**

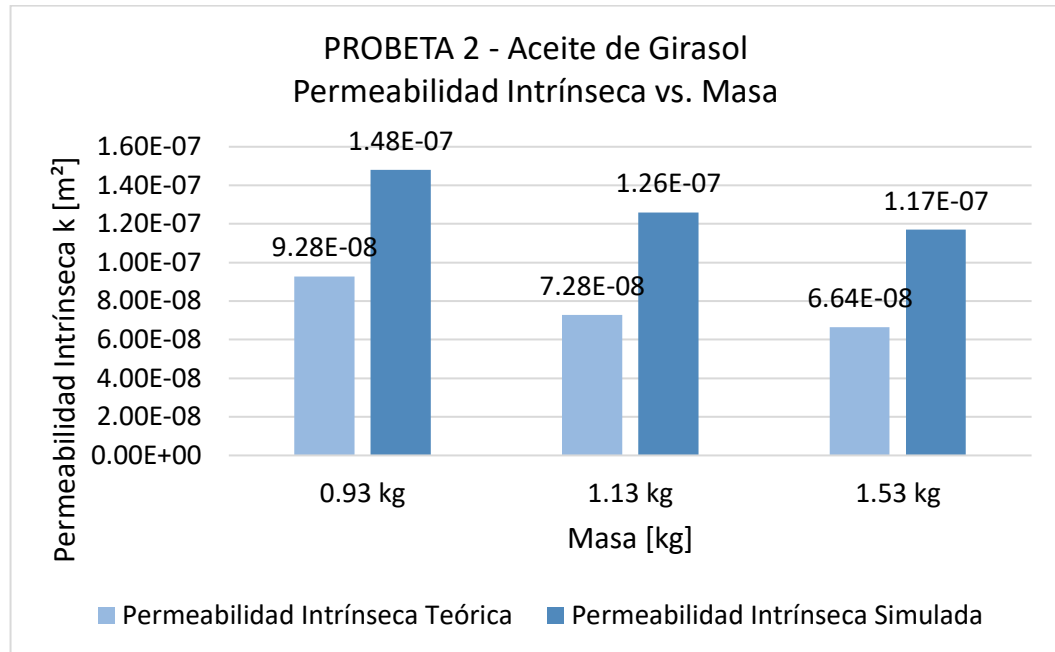


**Figura 3. 22 Probeta 1 – Aceite SAE90: Permeabilidad Intrínseca**

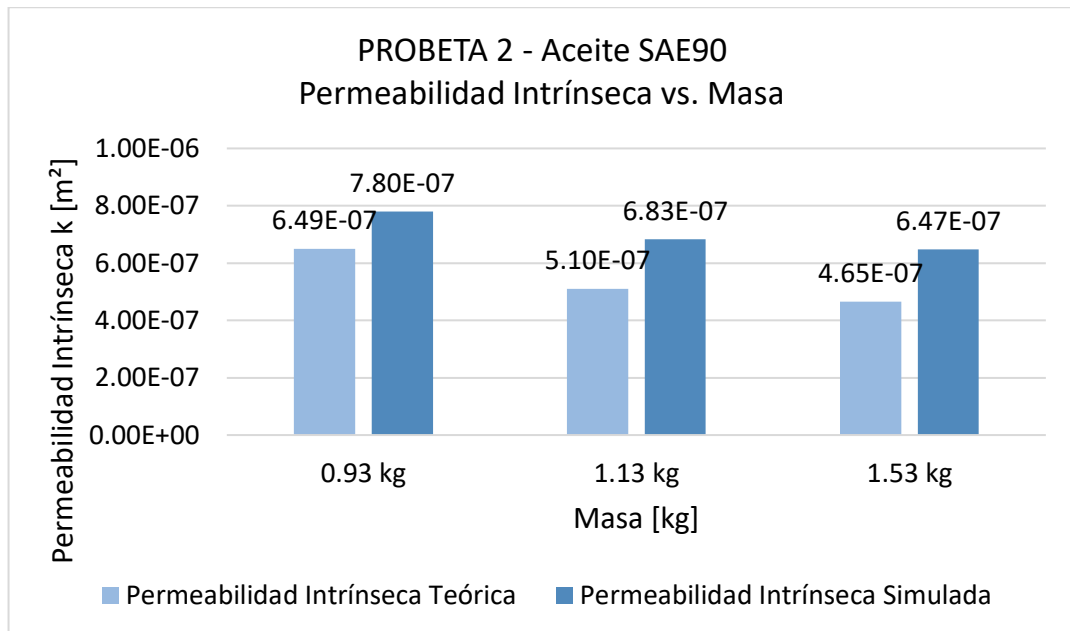
**Tabla 3.9 Comparativa de resultados en probeta 2**

PROBETA 2						
Masa	0.93 kg		1.13 kg		1.53 kg	
Fluido	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90
Velocidad teórica [m/s]	1.353	1.359	1.518	1.525	1.594	1.602
Velocidad simulada [m/s]	2.242	1.899	2.566	1.466	2.757	1.586
Flujo másico teórico [kg/s]	1.511	1.496	1.695	1.679	1.780	1.764
Flujo másico simulado [kg/s]	2.406	1.798	2.928	2.249	3.149	2.452
Conductividad hidráulica teórica K[m/s]	0.033	0.032	0.025	0.025	0.023	0.023
Conductividad hidráulica simulado K[m/s]	0.052	0.039	0.044	0.034	0.041	0.032
Permeabilidad intrínseca teórica k [m <sup>2</sup> ]	9.28E-08	6.49E-07	7.28E-08	5.10E-07	6.64E-08	4.65E-07
Permeabilidad intrínseca simulada k [m <sup>2</sup> ]	1.48E-07	7.80E-07	1.26E-07	6.83E-07	1.17E-07	6.47E-07
Diferencia	59.16%	20.17%	72.67%	33.92%	76.86%	39.02%

En base a los datos mostrados en la Tabla 3.9 se realizaron las Figuras 3.23 y 3.24 para facilitar la visualización de resultados.



**Figura 3. 23 Probeta 2 - Aceite de Girasol: Permeabilidad Intrínseca**

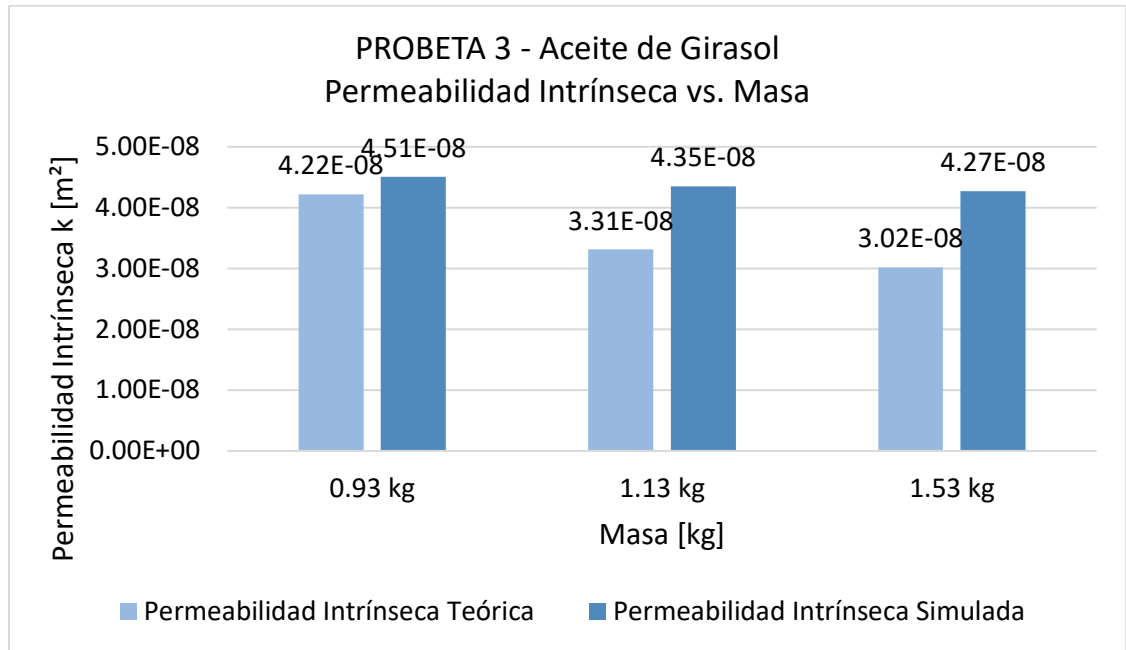


**Figura 3. 24 Probeta 2 - Aceite de SAE90: Permeabilidad Intrínseca**

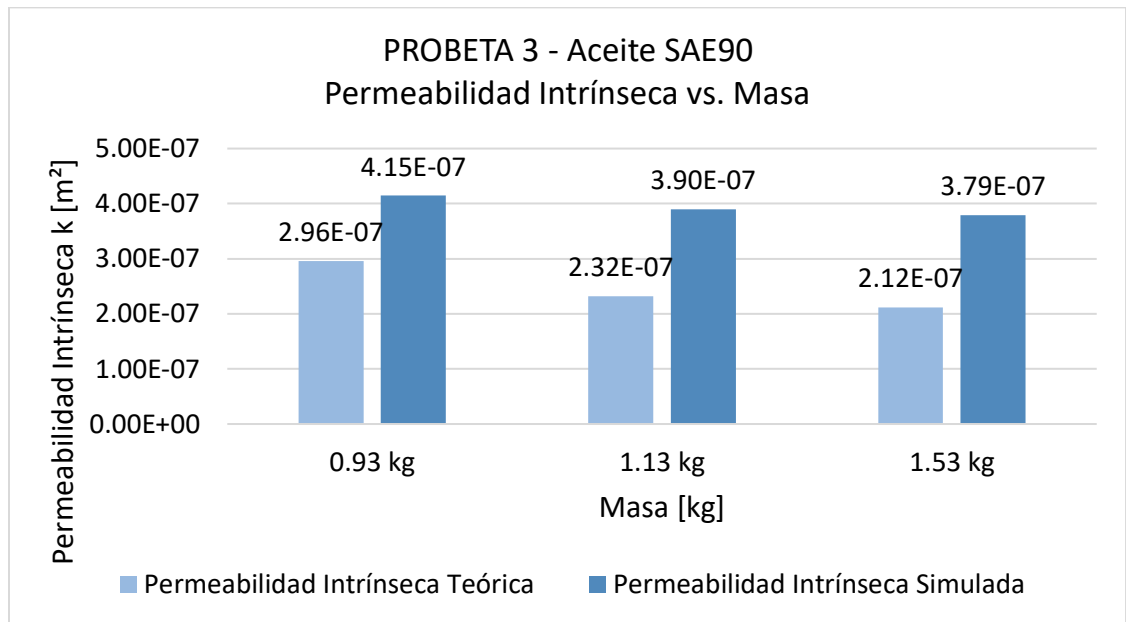
**Tabla 3.10 Comparativa de resultados en probeta 3**

PROBETA 3						
Masa	0.93 kg		1.13 kg		1.53 kg	
Fluido	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90
Velocidad teórica [m/s]	0.639	0.642	0.717	0.720	0.752	0.756
Velocidad simulada [m/s]	0.748	0.992	1.035	1.332	1.170	1.488
Flujo másico teórico [kg/s]	0.688	0.681	0.772	0.765	0.811	0.803
Flujo másico simulado [kg/s]	0.735	0.955	1.014	1.284	1.145	1.436
Conductividad hidráulica teórica K[m/s]	0.015	0.015	0.012	0.011	0.011	0.010
Conductividad hidráulica simulado K[m/s]	0.016	0.021	0.015	0.019	0.015	0.019
Permeabilidad intrínseca teórica k [m <sup>2</sup> ]	4.22E-08	2.96E-07	3.31E-08	2.32E-07	3.02E-08	2.12E-07
Permeabilidad intrínseca simulada k [m <sup>2</sup> ]	4.51E-08	4.15E-07	4.35E-08	3.90E-07	4.27E-08	3.79E-07
Diferencia	6.78%	40.18%	31.33%	67.92%	41.23%	78.81%

En base a los datos mostrados en la Tabla 3.10 se realizaron las Figuras 3.25 y 3.26 para facilitar la visualización de resultados de permeabilidad intrínseca.



**Figura 3. 25 Probeta 3 - Aceite de Girasol: Permeabilidad Intrínseca**



**Figura 3. 26 Probeta 3 - Aceite de SAE90: Permeabilidad Intrínseca**

Las Tablas 3.11, 3.12 y 3.13 contienen la misma información que las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10, pero ordenadas por la masa del pistón, para una mejor comparación del comportamiento de la permeabilidad al variar la probeta y fluido.

Analizando los resultados de las simulaciones con la probeta 2, trabajando con el aceite de girasol, se logra visualizar un aumento drástico en la permeabilidad en comparación a los resultados obtenidos en la probeta 1 y 3; dicho comportamiento no se da con el aceite SAE90, ya que con el aceite SAE90 variando las probetas y presiones, el comportamiento en términos de la permeabilidad es descendente a medida que se incrementa el número de orificios de las probetas, exceptuando con la masa de 0.93 kg y también tiene comportamiento descendente la permeabilidad cuando aumenta la masa del pistón.

**Tabla 3.11 Comparativa de datos con masa de 0.93 kg**

MASA 0.93 kg						
Probeta	1		2		3	
Fluido	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90
Velocidad teórica [m/s]	1.934	1.942	1.353	1.359	0.639	0.642
Velocidad simulada [m/s]	1.939	1.699	2.242	1.899	0.748	0.992
Flujo másico teórico [kg/s]	1.053	1.043	1.511	1.496	0.688	0.681
Flujo másico simulado [kg/s]	1.032	0.840	2.406	1.798	0.735	0.955



Conductividad hidráulica teórica K[m/s]	0.023	0.022	0.033	0.032	0.015	0.015
Conductividad hidráulica simulado K[m/s]	0.022	0.018	0.052	0.039	0.016	0.021
Permeabilidad intrínseca teórica k [m <sup>2</sup> ]	6.47E-08	4.53E-07	9.28E-08	6.49E-07	4.22E-08	2.96E-07
Permeabilidad intrínseca simulada k [m <sup>2</sup> ]	6.33E-08	3.65E-07	1.48E-07	7.80E-07	4.51E-08	4.15E-07
Diferencia	2.04%	19.44%	59.16%	20.17%	6.78%	40.18%

**Tabla 3.12 Comparativa de datos con masa de 1.13 kg**

MASA 1.13 kg						
Probeta	1		2		3	
Fluido	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90
Velocidad teórica [m/s]	2.169	2.180	1.518	1.525	0.717	0.720
Velocidad simulada [m/s]	2.329	2.078	2.566	1.466	1.035	1.332
Flujo másico teórico [kg/s]	1.181	1.170	1.695	1.679	0.772	0.765
Flujo másico simulado [kg/s]	1.242	1.036	2.928	2.249	1.014	1.284
Conductividad hidráulica teórica K[m/s]	0.018	0.018	0.025	0.025	0.012	0.011

Conductividad hidráulica simulado K[m/s]	0.019	0.016	0.044	0.034	0.015	0.019
Permeabilidad intrínseca teórica k [m <sup>2</sup> ]	5.07E-08	3.55E-07	7.28E-08	5.10E-07	3.31E-08	2.32E-07
Permeabilidad intrínseca simulada k [m <sup>2</sup> ]	5.33E-08	3.14E-07	1.26E-07	6.83E-07	4.35E-08	3.90E-07
Diferencia	5.11%	11.47%	72.67%	33.92%	31.33%	67.92%

**Tabla 3.13 Comparativa de datos con masa de 1.53 kg**

MASA 1.53 kg						
Probeta	1		2		3	
Fluido	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90	Aceite de Girasol	Aceite SAE90
Velocidad teórica [m/s]	2.278	2.289	1.594	1.602	0.752	0.756
Velocidad simulada [m/s]	2.504	2.246	2.757	1.586	1.170	1.488
Flujo másico teórico [kg/s]	1.241	1.229	1.780	1.764	0.811	0.803
Flujo másico simulado [kg/s]	1.336	1.123	3.149	2.452	1.145	1.436
Conductividad hidráulica teórica K[m/s]	0.016	0.016	0.023	0.023	0.011	0.010
Conductividad hidráulica simulado K[m/s]	0.017	0.015	0.041	0.032	0.015	0.019

Permeabilidad intrínseca teórica k [ $m^2$ ]	4.63E-08	3.24E-07	6.64E-08	4.65E-07	3.02E-08	2.12E-07
Permeabilidad intrínseca simulada k [ $m^2$ ]	4.98E-08	2.96E-07	1.17E-07	6.47E-07	4.27E-08	3.79E-07
Diferencia	7.67%	8.63%	76.86%	39.02%	41.23%	78.81%

La diferencia de valores entre la simulación y el cálculo teórico de este análisis se debe a la asunción de cero pérdidas realizada en la sección 2.4.1, la cual fue necesaria para la determinación de condiciones diseño del equipo y probetas.

### 3.4 Análisis de costos

En la Tabla 3.14 se detalla el listado de precios de materiales y servicios necesarios para llevar a cabo el proyecto.

**Tabla 3.14 Listado de precios de materiales y servicios**

Parte	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Celda de carga 20 kg	1	Unidad	\$19.50	\$19.50
Sensor fotoeléctrico	1	Unidad	\$120.00	\$120.00
Manómetro WIKA 0 a 30 Psi	1	Unidad	\$35.00	\$35.00
Varilla lisa diámetro 8 mm	1	Unidad	\$12.70	\$12.70
Tubería galvanizada de Acero A53 2 ½"	1	Unidad	\$140.00	\$140.00
Sello pistón CTC 2 ½"	1	Unidad	\$15.00	\$15.00

Módulo de amplificador HX711	1	Unidad	\$5.00	\$5.00
Display LCD 20x4	1	Unidad	\$10.40	\$10.40
Arduino UNO R3	1	Unidad	\$9.80	\$9.80
Protoboard	1	Unidad	\$4.00	\$4.00
Pulsador	1	Unidad	\$0.60	\$0.60
Resistencias 220 ohm	2	Unidad	\$0.05	\$0.10
Resistencias 10 Kohm	1	Unidad	\$0.05	\$0.05
Cables de Interconexión	5	Metros	\$0.70	\$3.50
Fuente de alimentación 12V	1	Unidad	\$14.98	\$14.98
Reservorio de capacidad 1 litro diámetro aprox. 80 mm	1	Unidad	\$9.10	\$9.10
Servicio de: corte, torneado, roscado, soldadura.	1	Unidad	\$300.00	\$300.00
Servicio: diseño, ensamblaje, cableado, programación	1	Unidad	\$800.00	\$800.00
TOTAL				1581.63

El total estimado es de \$1581.63 dólares, que en comparación con proyectos con función similar que pueden llegar a costar \$6000.00 dólares, sería un producto competitivo dentro del mercado. La implementación también es viable porque usa materiales que pueden ser adquiridos con proveedores locales.

# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Discusión y análisis

En este trabajo se presenta el diseño de un permeámetro, el cual es un equipo de laboratorio utilizado para medir la permeabilidad de materiales porosos, también se realizó los respectivos cálculos y simulaciones del comportamiento de 2 diferentes fluidos para comprobar la viabilidad del dispositivo, además se realizó el respectivo cálculo de costo de construcción local, el cual fue de 1582\$ incluido diseño y mano de obra.

El modelo diseñado sobresale por ser compacto y simple, comparados a otros de cabezal constante, e incluso de cabezal variable, ya que la presión que se ejerce es determinada por las masas que se coloquen en el pistón y no se requiere llenar una columna vertical desproporcionada de agua o utilizar un motor de recirculación, como en modelos ya desarrollados, (Calderón, 2015, pág. 52), (Orejuela & Hernández, 2018, pág. 27), (Valencia & Triana, 2013, pág. 66), (Cordero & Franco, 1972, pág. 57).

Hay que resaltar que el mayor beneficio que presenta el diseño creado es la capacidad de obtener los resultados al terminar la prueba, ya que este modelo incluye un sensor fotoeléctrico, una balanza electrónica y un microprocesador con el cual se podrá realizar el cálculo al instante a diferencia de los permeámetros comúnmente diseñados, donde el experimentador debe tomar los datos de tiempo y masa para ingresar los datos manualmente en una calculadora o matriz de fórmulas para obtener los resultados, y este proceso además de ser

tedioso genera errores de medición de hasta un 10% y una variación en los resultados que generan desconfianza al usuario. (Haza, 2003, pág. 49)

El modelo diseñado y estudio planteado se direcciona para la determinación de la permeabilidad en materiales sólidos compactos, sin embargo, también da la oportunidad de ser usado para la determinación del coeficiente de pérdida para la ecuación de Darcy-Weisbach, la cual “es una de las ecuaciones matemáticas más completas utilizadas para determinar la pérdida de presión en las tuberías porque está relacionada tanto con las características del fluido que fluye como con el material del conducto y se puede aplicar a cualquier tipo de material y cualquier diámetro de tubería” (Ladino, César, & María, 2018, pág. 53).

El modelo diseñado y estudio planteado se direcciona para la determinación de la permeabilidad en materiales sólidos compactos, sin embargo, también da la oportunidad de ser usado para la determinación del coeficiente de pérdida para la ecuación de Darcy-Weisbach, la cual “es una de las ecuaciones matemáticas más completas utilizadas para determinar la pérdida de presión en las tuberías porque está relacionada tanto con las características del fluido que fluye como con el material del conducto y se puede aplicar a cualquier tipo de material y cualquier diámetro de tubería” (Ladino, César, & María, 2018, pág. 53).

Aunque el modelo diseñado presenta la cualidad de ser compacto y simple, esto también genera la desventaja de estar limitado a probetas de 63 mm de diámetro y por lo tanto la escalabilidad en términos de diámetros es imposible y la cantidad de orificios queda limitada por el diámetro de la probeta.

El modelo propuesto fue basado en los permeámetros más comunes actualmente, los cuales basan su medición en el volumen de líquido que deja atravesar la probeta en un tiempo determinado con una presión determinada por la columna del fluido de trabajo, por lo que realizamos mediciones indirectas de los datos necesarios para calcular la permeabilidad de la probeta, a diferencia de

los primeros modelos, lo cuales mantenían un flujo constante y determinaban la permeabilidad midiendo la diferencia de presiones como el modelo propuesto por Henry Darcy (Bear, 1972, pág. 49), a diferencia del modelo propuesto el cual tiene 1 manómetro para determinar la presión antes de la probeta.

Ningún dispositivo es perfecto y siempre se dan mejoras de los equipos ya desarrollados, por lo que es probable que el diseño propuesto sea mejorado de tal manera que no sea necesario calcular el peso para determinar el límite laminar, y de esta manera se pueda realizar pruebas en el equipo hasta llegar al límite laminar real ya que “el trabajo con fluidos es muy delicado y debe ser muy preciso, bajo condiciones de trabajo controladas, sobre todo en el rango de ( $100 < Re < 1000$ )” (Jiménez, García, Mendoza, Alvarado, & Ramírez, 2017, pág. 80).

## 4.2 Conclusiones

- El permeámetro diseñado permite cuantificar la permeabilidad de materiales sólidos compactos de hasta 50% de porosidad, cumpliendo las condiciones para analizar los resultados mediante la ley de Darcy y basándose en la norma ASTM D5084.
- En base al análisis estructural del cuerpo del cilindro y de la basa de prototipo, donde se obtuvieron factores de seguridad mayores a 2, con los materiales seleccionados en el Capítulo 3, se puede aseverar que el diseño es seguro al trabajar con valores de presión que van desde 0 a 2MPa, por lo tanto, el diseño cumple estructuralmente con las condiciones necesarias para soportar las presiones que se ejercerán en los ensayos.
- Conforme a los resultados obtenidos mediante simulación con flujo laminar, se puede apreciar que el valor de permeabilidad intrínseca disminuye a medida que se incrementa la masa aplicada, esto debido a la mayor presión ejercida que provoca una mayor pérdida de cabezal, por lo tanto, la permeabilidad intrínseca varía en materiales porosos compactos con diferentes presiones y fluidos.

- En base a los resultados obtenidos en el Capítulo 3, se puede concluir que la permeabilidad intrínseca incrementa proporcionalmente al número de poros en la probeta.
- En la Figura 2.7 y Tabla 2.1 se pueden visualizar todos los elementos que componen el permeámetro diseñado, en la Figura 2.16 el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema y en el Anexo 6 el código de programación para el control de los sensores que se encargarán de medir la masa del fluido que atraviesa la probeta, tiempo del ensayo y presión del fluido antes de la probeta, por lo tanto, es posible determinar la permeabilidad de las probetas a estudiar ya que las variables medidas son las necesarias para el cálculo de la permeabilidad.
- Conforme a los costos de materiales y servicios necesarios para la construcción del medidor de permeabilidad detallados en la Tabla 3.14, se infiere que es viable la construcción local del diseño propuesto.

### **4.3 Recomendaciones**

- El dispositivo debe ser secado después de cada uso para aumentar su tiempo de vida útil.
- La balanza debe ser encerada después de cada medición para mantener una lectura confiable.
- El dispositivo debe ser colocado en una superficie plana.
- Antes de realizar la primera medición el equipo debe ser purgado con el fluido a analizar.
- Cada medición debe realizarse 5 veces y excluir el valor pico máximo para minimizar los errores de medición.
- Si se quiere analizar el comportamiento de la permeabilidad se sugiere aumentar la masa en 200 gramos por punto de medición, hasta llegar al límite del flujo laminar teórico.



- Si se quiere determinar el comportamiento en flujo turbulento se sugiere aumentar la masa en 500 gramos por punto de medición y realizar 7 mediciones con cada peso, eliminando los 2 valores pico.

# BIBLIOGRAFÍA

ANDEC. (2020). *Catálogo de productos*. Recuperado el 23 de Agosto de 2020, de <https://www.andec.com.ec/documentos/Catalogo%20de%20Productos%20Andec.pdf>

Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de suelos*.

Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover Publications. Recuperado el 15 de Junio de 2020

Calderón, D. C. (2015). *DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD*. Bogotá: repository.ucatolica.edu.co. Recuperado el 22 de 08 de 2020, de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2932/4/TESIS%20DIANA%20CARMARGO.pdf>

Cordero, J., & Franco, M. (1972). *Construcción de un permeámetro de cabezal constante para la determinación de la conductividad hidráulica en muestras sin disturbar*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

DIPAC. (2016). *Catálogo de Tubería de Acero*. Recuperado el 12 de Julio de 2020, de <http://www.dipacmanta.com/tubos>

DISETEC. (2018). *MANOMETROS INDUSTRIALES WIKA*. Recuperado el 2020 de Agosto de 22, de <http://www.disetec-ec.com/equipo-insumo-solucion-industrial-instrumento-medicion-quito-ecuador.php?recordID=551>

Electronilab. (2020). Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de <https://electronilab.co/tienda/celda-de-carga-1kg-sensor-de-fuerza-o-peso-convertidor-hx711/>

Fernández, G., González, F., & Carrillo, J. (2016). Conceptos de permeabilidad y porosidad en futuros profesores de Ciencias de la Educación. *IX Congreso Geológico de España*. Recuperado el 13 de Junio de 2020

Global O-Ring & Seal. (2020). *Diseño de ranura de junta tórica*. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de <https://www.globaloring.com/es/o-ring-groove-design/>

Grima, P., & Tort-Martorell, J. (1995). *Técnicas para la gestión de la calidad*. Madrid: Diaz de Santos. Recuperado el 2 de Agosto de 2020, de <https://books.google.com.ec/books?id=SXDKgrbY1HQC&pg=PA45&dq=matriz+qfd&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiX8urIsJ7rAhUwo1kKHxVZBT4Q6AEwAnoECAMQA#v=onepage&q=matriz%20qfd&f=false>

Haza. (2003). *¿Ayuda la teoría de errores a diseñar experimentos?* Santa Clara: Universidad Pedagógica Félix Varela.

HYDROMECHANICA. (2020). Recuperado el 3 de Agosto de 2020, de <https://www.hydropneumatica.com/productos/linea-de-productos-1/sellos-hidraulicos/metricas>

Jiménez, F., García, A., Mendoza, Á., Alvarado, A., & Ramírez, A. (2017). *Diseño y construcción de un equipo para visualizar el comportamiento de los fluidos en regímenes laminar y turbulento*. Cuernavaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca.

LABCOMERCIAL. (2020). *LABCOMERCIAL*. Recuperado el 23 de Agosto de 2020, de <https://www.labcomercial.com/en/beakers/1488-250ml-tall-form-glass-beaker.html>

Ladino, E., César, G., & María, G. (2018). *Darcy-Weisbach resistance coefficient determination using Newton-Raphson approach for android 4.0*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Mook, W. (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico*. Madrid: UNESCO. Recuperado el 20 de Junio de 2020, de

[https://books.google.com.ec/books?id=vp8lF9WqjjkC&pg=PA316&dq=porosidad+efectiva&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjQk\\_Kz1aLqAhVhUN8KHdIlgC9wQ6AEwA3oECAUQAg#v=onepage&q=porosidad%20efectiva&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=vp8lF9WqjjkC&pg=PA316&dq=porosidad+efectiva&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjQk_Kz1aLqAhVhUN8KHdIlgC9wQ6AEwA3oECAUQAg#v=onepage&q=porosidad%20efectiva&f=false)

Orejuela, J., & Hernández, C. (2018). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN PERMEÁMETRO LCS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTES*. Bogotá: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

Otegui, J., & Rubertis, E. (s.f.). *Cañerías y recipientes de presión (Introducción al Diseño y aptitud para el servicio)*. Universidad Nacional de Mar de Plata.

Rodríguez, C., Lafargue, F., Sotolongo, J., Rodríguez, A., & Assuncao, J. d. (19 de Julio de 2012). Determinación de las propiedades físicas y carga crítica del aceite vegetal. *Scielo Ingeniería Mecánica*, 15(3).

Romaña, J. (2014). *Los límites de la Ley de Darcy*. Medellín. Recuperado el 13 de Junio de 2020

Sánchez, J. (2006). *Ley de Darcy. Conductividad Hidráulico*. Salamanca. Recuperado el 14 de Junio de 2020

TUGALT. (2020). Catálogo de Productos. 16. Recuperado el 28 de Julio de 2020

Valencia, C., & Triana, J. (2013). *Diseño, construcción y puesta en funcionamiento de permeámetro de carga constante para suelos granulares*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.

Villón, M. (2007). *Drenaje* (Primera ed.). Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. Recuperado el Junio de 2020

# APÉNDICES

## APÉNDICE 1

Material para cuerpo cilíndrico (Valencia & Triana, 2013)

### TUBERÍA CONDUCCIÓN DE FLUIDOS

Descripción: Tubería soldada fabricada con acero laminado en caliente

Norma de fabricación: NTE INEN 2415 - INEN 2483

#### ASTM A53 CEDULA 40 GRADO A

TOLERANCIAS			
DIÁMETRO EXTERIOR		LONGITUD	
DN ≤ 40	+0.4 mm	L < 6400 mm	+10 mm
	-0.4 mm		0 mm
DN ≥ 50	+1%	L ≥ 6400 mm	+10 mm
	-1%		0 mm
RECTITUD			
Máxima variación: 12 mm en 6000 mm			

ESPESOR	D	D	d	PESO	UNIDADES
mm	Ø in	mm	mm	kg/6m	Por paquete
2,65	1/2"	21,30	16,00	7,31	91
	3/4"	26,70	21,40	9,43	91
3,2	1"	33,40	27,00	14,30	61
	1 1/4"	42,20	35,80	18,47	37
3,6	1 1/2"	48,30	41,10	23,81	37
	2"	60,30	53,10	30,20	19
5,0	2 1/2"	73,00	63,00	53,66	19
	3"	88,90	78,90	66,21	19
	4"	114,30	104,30	86,26	7

## APÉNDICE 2

### Características varilla lisa de acero (ANDEC, 2020)

GAMA DE FABRICACIÓN			
Diámetro (mm)	Peso Nominal (mm)	Tolerancia en el diámetro (+/- mm)	Ovalidad Máx(mm)
8	0,395		
10	0,617		
12	0,888	0,40	0,60
14	1,208		
16	1,578		
18	1,996		
20	2,466	0,50	0,75
22	2,984		
25	3,853		
28	4,834	0,60	0,90
32	6,313		

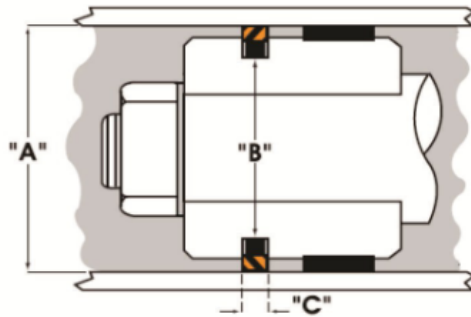
  

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS		
Fluencia MPa	Resistencia MPa	Alargamiento (%)
235 (Mín)	340 (Mín) 470 (Máx)	26 (Mín)

## APÉNDICE 3

Catálogo de Sellos Hidráulicos (HYDROMECHANICA, 2020)

### CTC - SELLO PISTON CATERPILLAR



ESPECIFICACIONES	
Aplicación:	Pistón
Material:	PTFE + Molly Nitrilo (NBR)
Temperatura:	-40°C a +104°C
Presión:	0 a 5.000 psi
Velocidad:	0 a 5.0 m/seg

A	B	C	Referencia	V. Unitario
1	0,691	0,129	CTC-1000	
1 1/4	0,941	0,129	CTC-1250	
1 1/2	1,106	0,188	CTC-1500	
1 3/4	1,441	0,129	CTC-1750	
2	1,625	0,192	CTC-517004	
2 1/4		0,192	CTC-1U3998	
2 1/2	2,125	0,192	CTC-8J6213	
2 3/4	2,375	0,192	CTC-517010	
3	2,460	0,192	CTC-6J1972	
3 1/4	2,710	0,192	CTC-6J0793	



## APÉNDICE 4

### Manómetro Bourdon (DISETEC, 2018)



#### Pressure Gauges

---

##### Application

Suitable for environments compatible with copper alloy wetted parts where vibration or pressure pulsation occur and for gaseous or liquid media that will not obstruct the pressure system.

##### Sizes (All sizes not stocked)

2", 2½", 4" (50, 63, and 100 mm)

##### Accuracy

± 1.5% of span

##### Ranges (All ranges not stocked)

Vacuum / Compound to 30"HG / 0 / 200 PSI  
Pressure from 15 PSI to 10,000 PSI - 2"  
Pressure from 10 PSI to 15,000 PSI - 2½", 4"  
or other equivalent units of pressure or vacuum

##### Working Range

2" & 2½" Steady: 3/4 of full scale value  
Fluctuating: 2/3 of full scale value  
Short time: full scale value

4" & 6" Steady: Full scale value  
Fluctuating: 0.9 x full scale value  
Short time: 1.3 x full scale value

##### Operating Temperature

Ambient: -40°F to 160°F (-40°C to 71°C)<sup>NOTE1</sup>  
Media: max. 140°F (+60°C)

##### Temperature Error

Additional error when temperature changes from reference temperature of 68°F (20°C) ±0.4% for every 18°F (10°C) rising or falling. Percentage of span.

#### Bourdon Tube Pressure Gauges

Stainless Steel Case / Copper Alloy Wetted Parts

Industrial Series Liquid Fillable • Type 21X.53



##### Weather Protection

Weather resistant (NEMA 3 / IP 54) - dry case  
Weather tight (NEMA 4X / IP 65) - liquid-filled case

##### Standard Scale

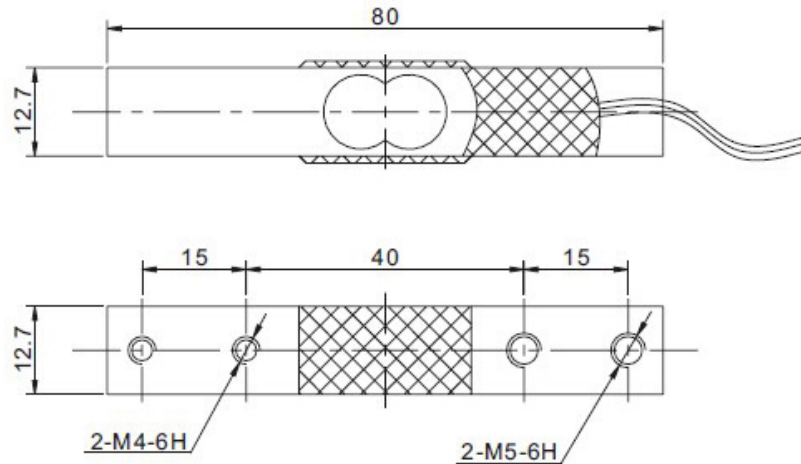
PSI  
PSI, PSI/KG/CM<sup>2</sup>, PSI/BAR (2½")

##### Window Gasket

Buna-N

## APÉNDICE 5

### Características de celda de carga (Electronilab, 2020)



Application		Kitchen scale
Model		YZC-133
Capacity	Kg	1, 2, 3, 5, 10, 20
Rated output	mV/V	1.0±0.15
Nonlinearity	%	0.05
Repeatability	%	0.03
Hysteresis	%	0.03
Creep(5min)	%	0.1
Temperature effect on sensitivity	%RO/°C	0.003
Temperature effect on zero	%RO/°C	0.02
Zero balance	%RO	±0.1
Input resistance	Ω	1066±20
Output resistance	Ω	1000±20
Insulation resistance	MΩ (50V)	2000
Recommended excitation voltage	V	5V
Compensated temperature range	°C	-10~+50
Operating temperature range	°C	-20~+65
Safe overload	%RO	120
Ultimate overload	%RO	150
Load cell material		Aluminium
Connecting cable		Ø 0.8X180mm
Method of connecting wire		red input(+) black input(-) green output(+) white output(-)

## APÉNDICE 6

### Código de programación para Arduino

```
#include <LiquidCrystal_PCF8574.h>
#include <Arduino.h>
#include <sensor.h>
#include <HX711_ADC.h>

#define LCD_ADDRESS 0x3F
#define LCD_ROWS 4
#define LCD_COLUMNS 20
#define SCROLL_DELAY 150
#define BACKLIGHT 255
LiquidCrystal_PCF8574 lcd;

int s=0;
int ms=0; //ajuste de segundos y milisegundos a 0
const int reset_pin = 4; //define pins para botón de reinicio y sensor difuso
const int sensor_pin = 5;
const int LoadCell_pin = (2, 3);
int reset=0;
int sensor=0;
int LoadCell=0; //define punto de partida para botón, celda de carga y sensor difuso
long t
int f=0;
int w=0

void setup()
{
  lcd.begin(LCD_COLUMNS, LCD_ROWS, LCD_ADDRESS, BACKLIGHT);
  pinMode(sensor_pin, INPUT);
  pinMode(reset_pin, INPUT);
  LoadCell.begin ();
  long stabilisingtime = 2000;
  LoadCell.start (stabilisingtime);
  LoadCell.setCalFactor (6032.00);
  f=(w/(890000s)); //define fórmula para calcular flujo
}

void loop()
{
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("CRONOMETRO");
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("TIEMPO(S):");
```



```

    stopwatch_stop();
}
else
{
    stopwatch();
}
}
void stopwatch_stop()                                //parada de contador
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("TIEMPO(S):");
    lcd.print(s);

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("CRONOMETRO");

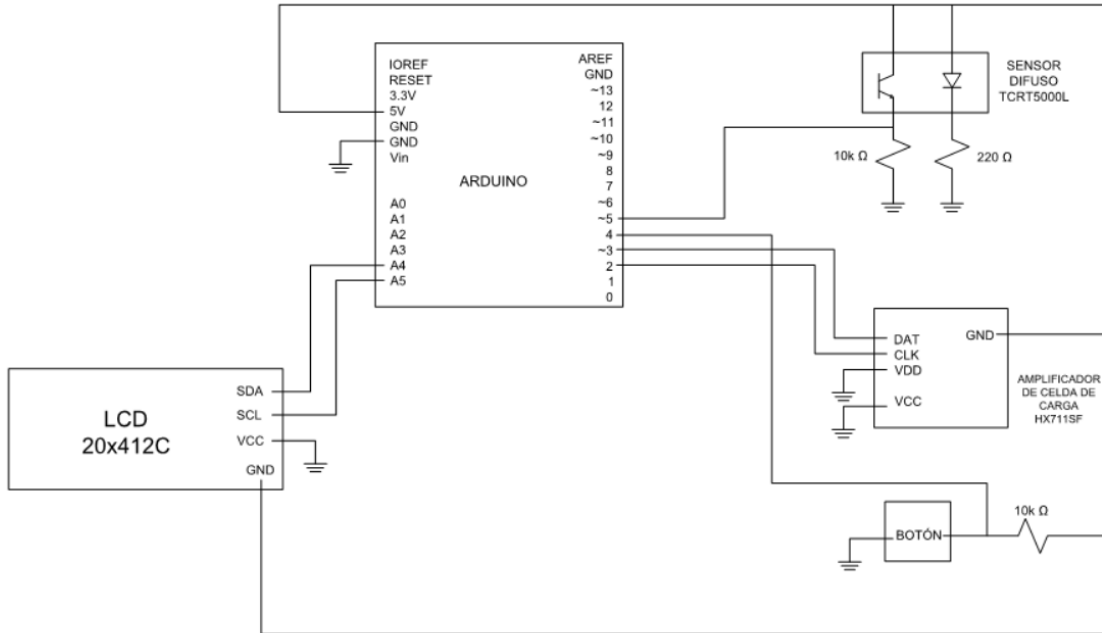
    lcd.setCursor(2,0);
    lcd.print("FLUJO (m3/s):");
    lcd.print(f);

    start = digitalRead(sensor_pin);                    //lee estado de sensor difuso
    if(start == HIGH)
    {
        stopwatch();
    }
    reset = digitalRead(reset_pin)                      //lee estado de botón de reseteo
    if(reset == HIGH)
    {
        stopwatch_reset();
        loop();
    }
    if(reset == LOW)
    {
        stopwatch_stop();
    }
}
void stopwatch_reset()                                //reseteo de contador
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("CRONOMETRO");
    s=00;                                               //ajusta segundos a 0
    return;                                             //salida de programa y retorna a inicio
}

```

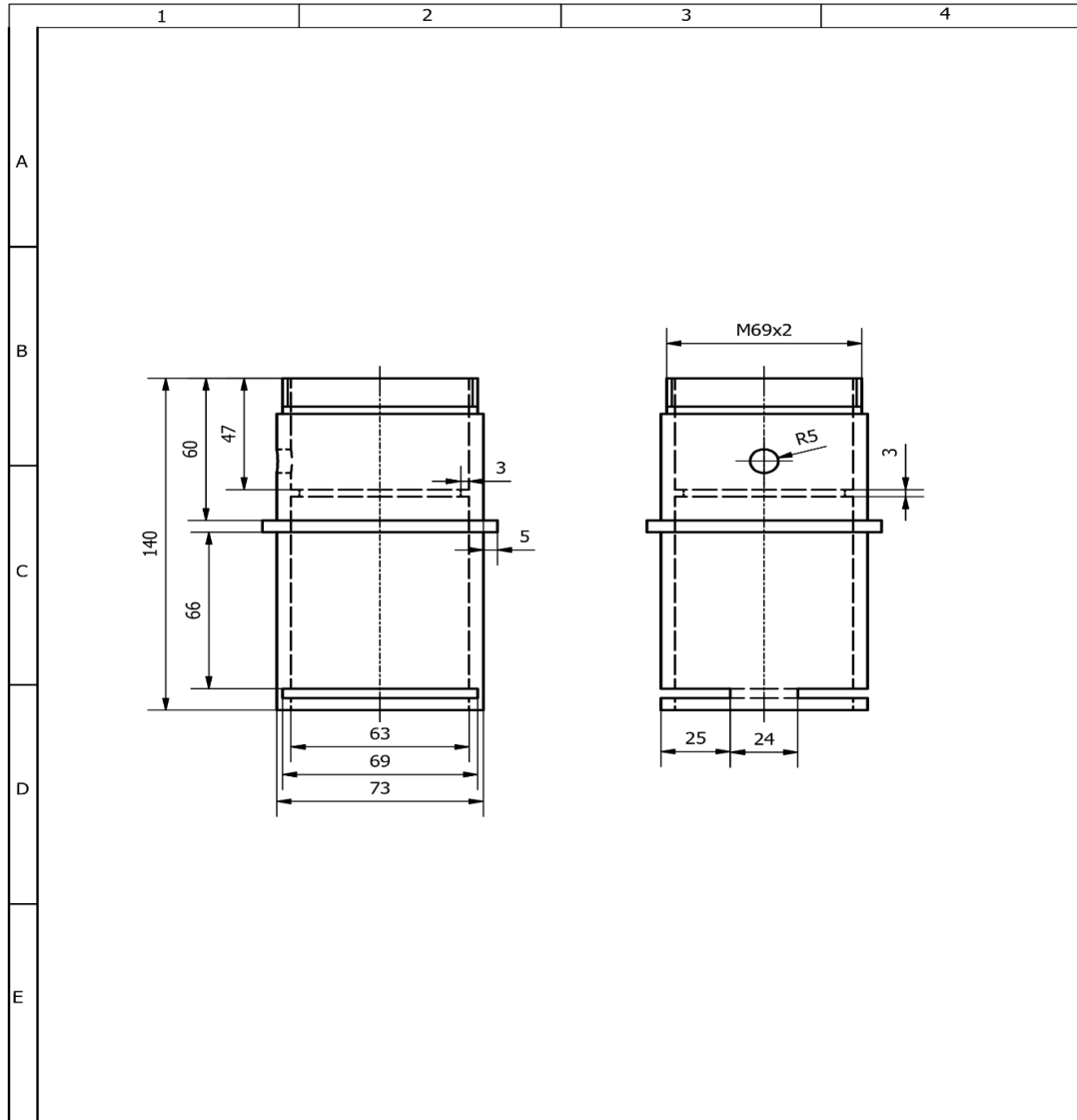
## APÉNDICE 7

### Circuito eléctrico



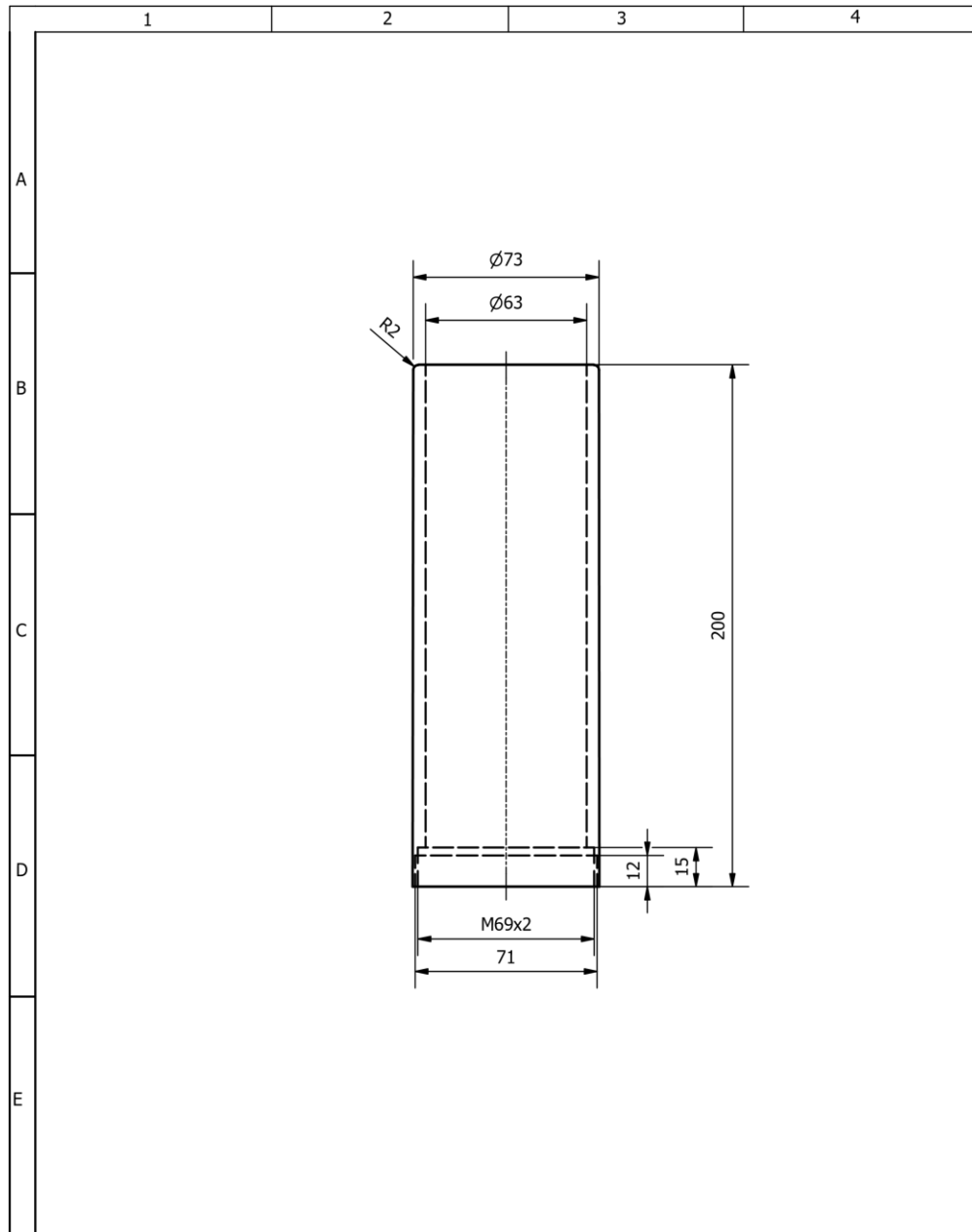
# APÉNDICE 8

## Planos



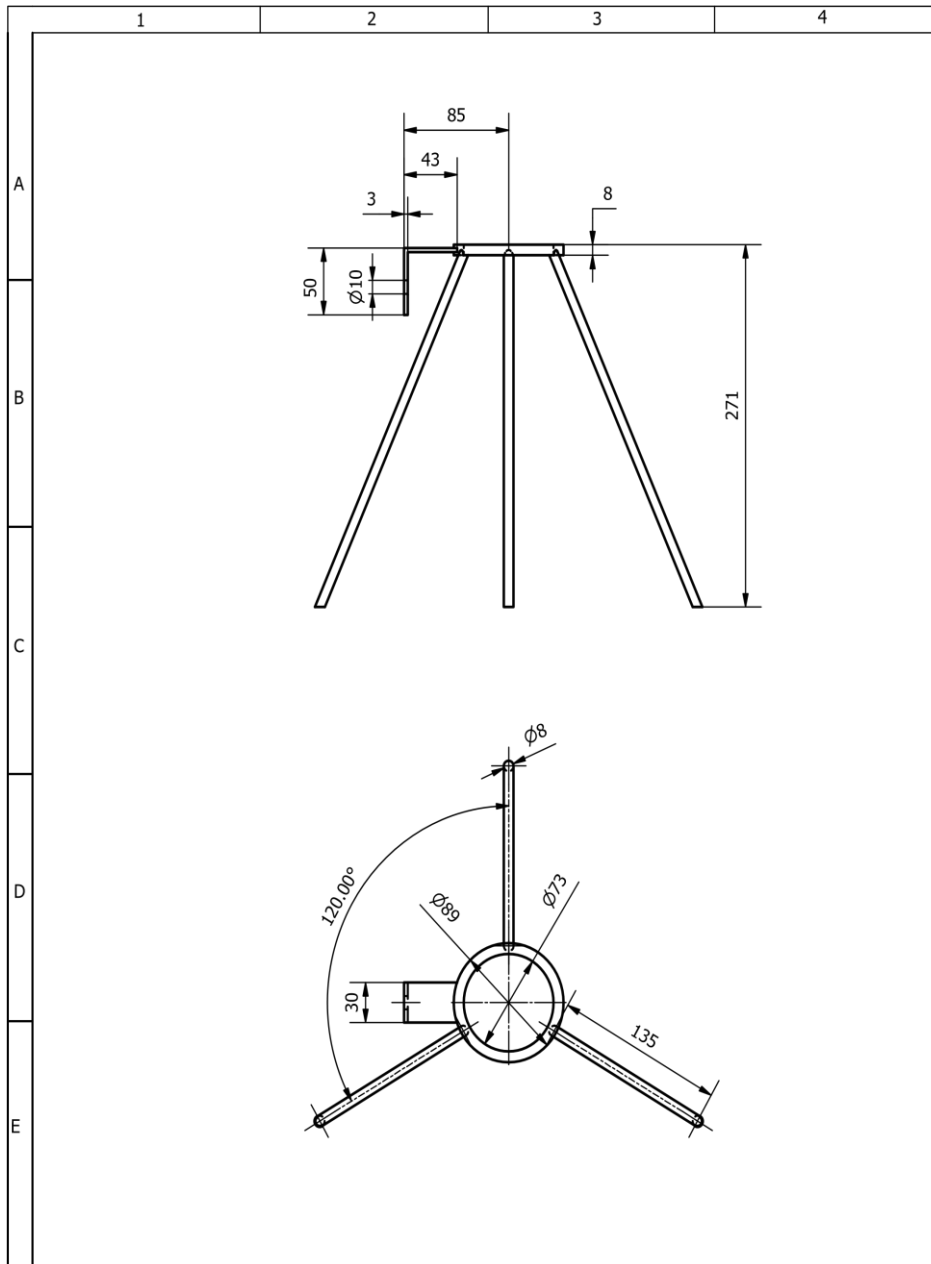
				Tolerancia: 0.5 %	Peso: 1.148 kg	Material: Acero Galvanizado A53
				Fecha	Nombre	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.	
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.	
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.	
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		CUERPO CILÍNDRICO 1
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 1





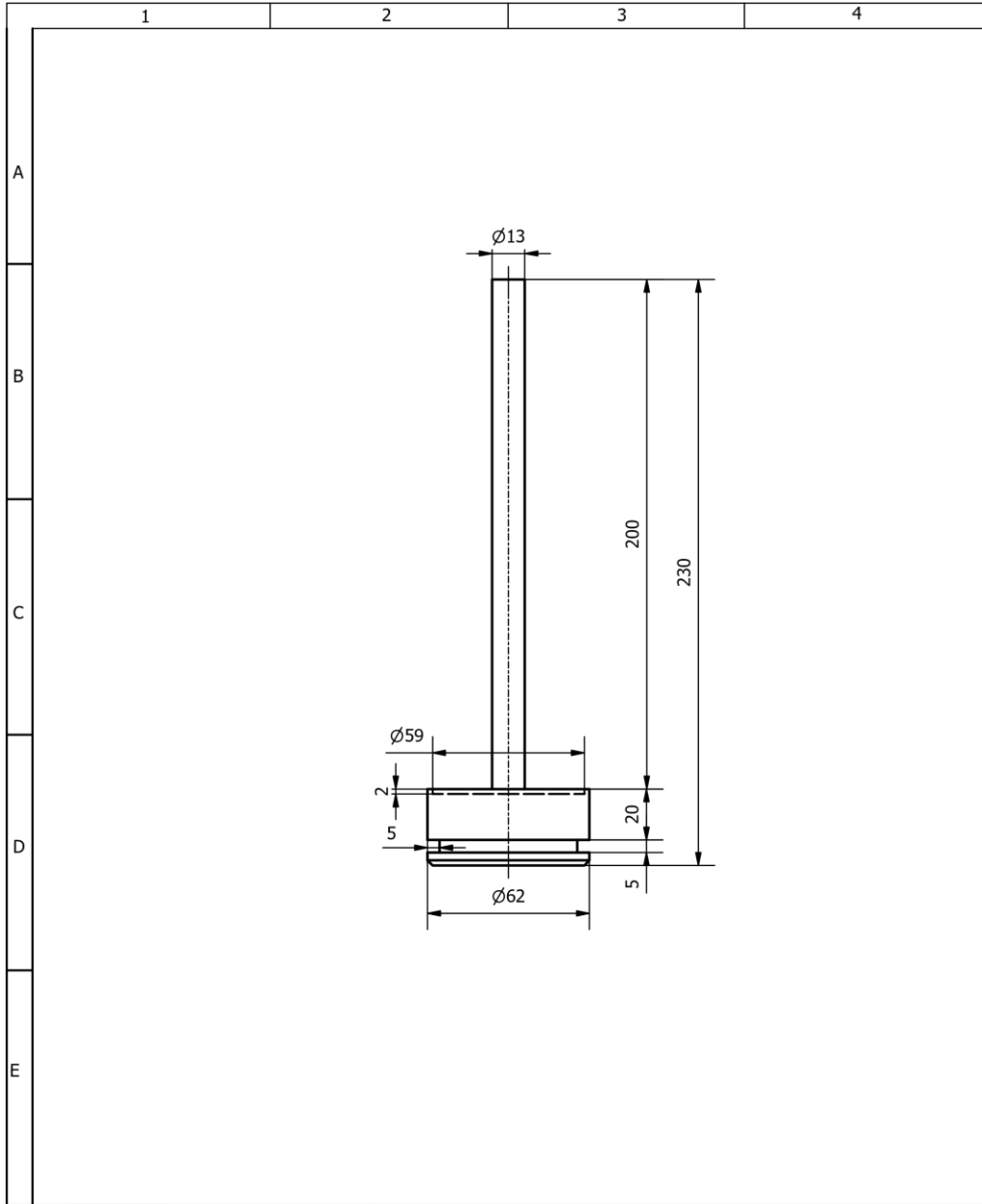
				Tolerancia: 0.5 %	Peso: 1.569 Kg	Material: Acero Galvanizado A53		
				Fecha	Nombre	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	Esc: 1 : 2	
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.			
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.			
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.			
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		CUERPO CILÍNDRICO 2		
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			N° : 2		





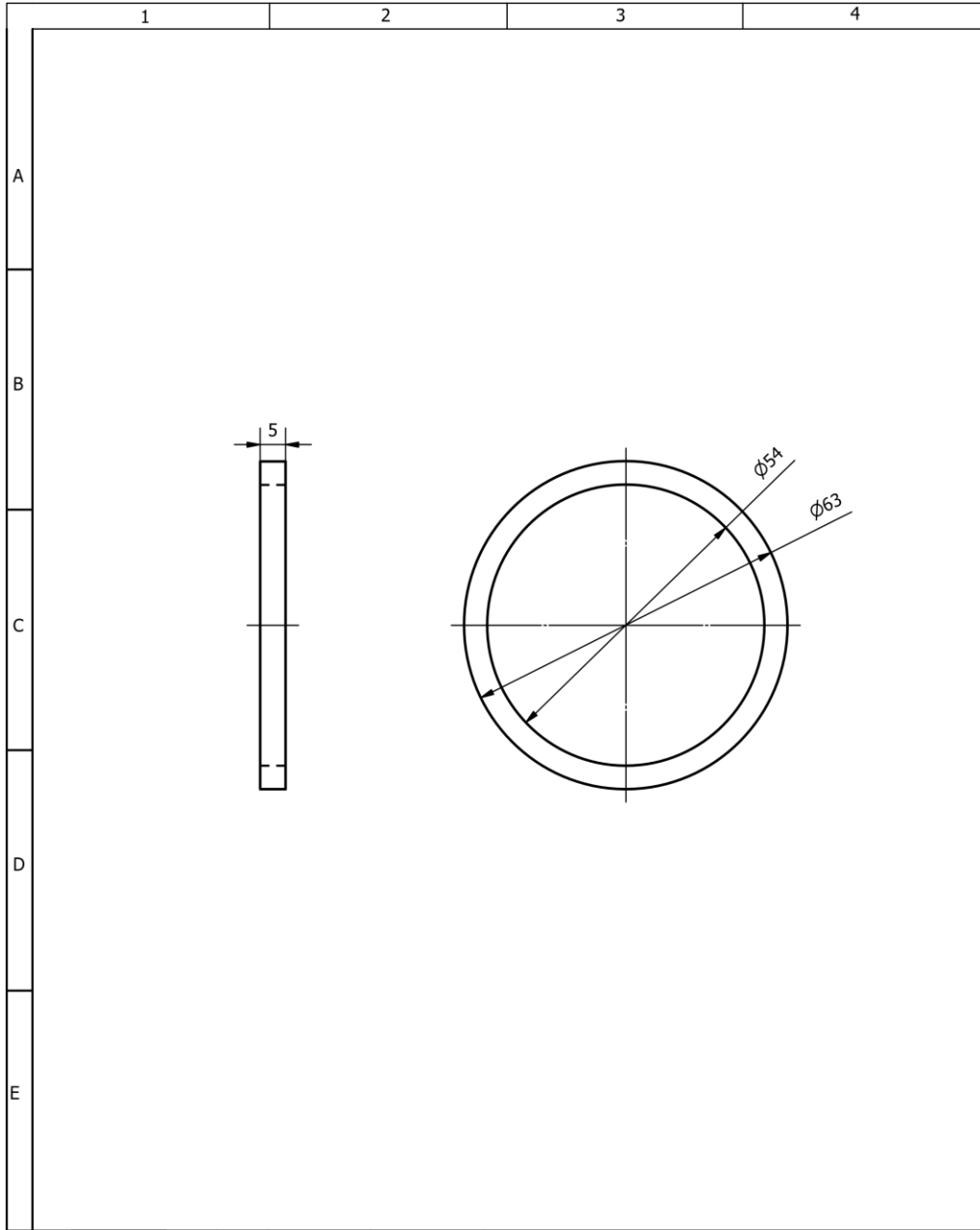
				Tolerancia: 0.5 %	Peso: 0.063 Kg	Material: Acero
				Fecha	Nombre	
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Rev.		Esc: 1 : 4
				Aprov.		
				ESCUJELA POLITECNICA DEL LITORAL		SOPORTE
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 3




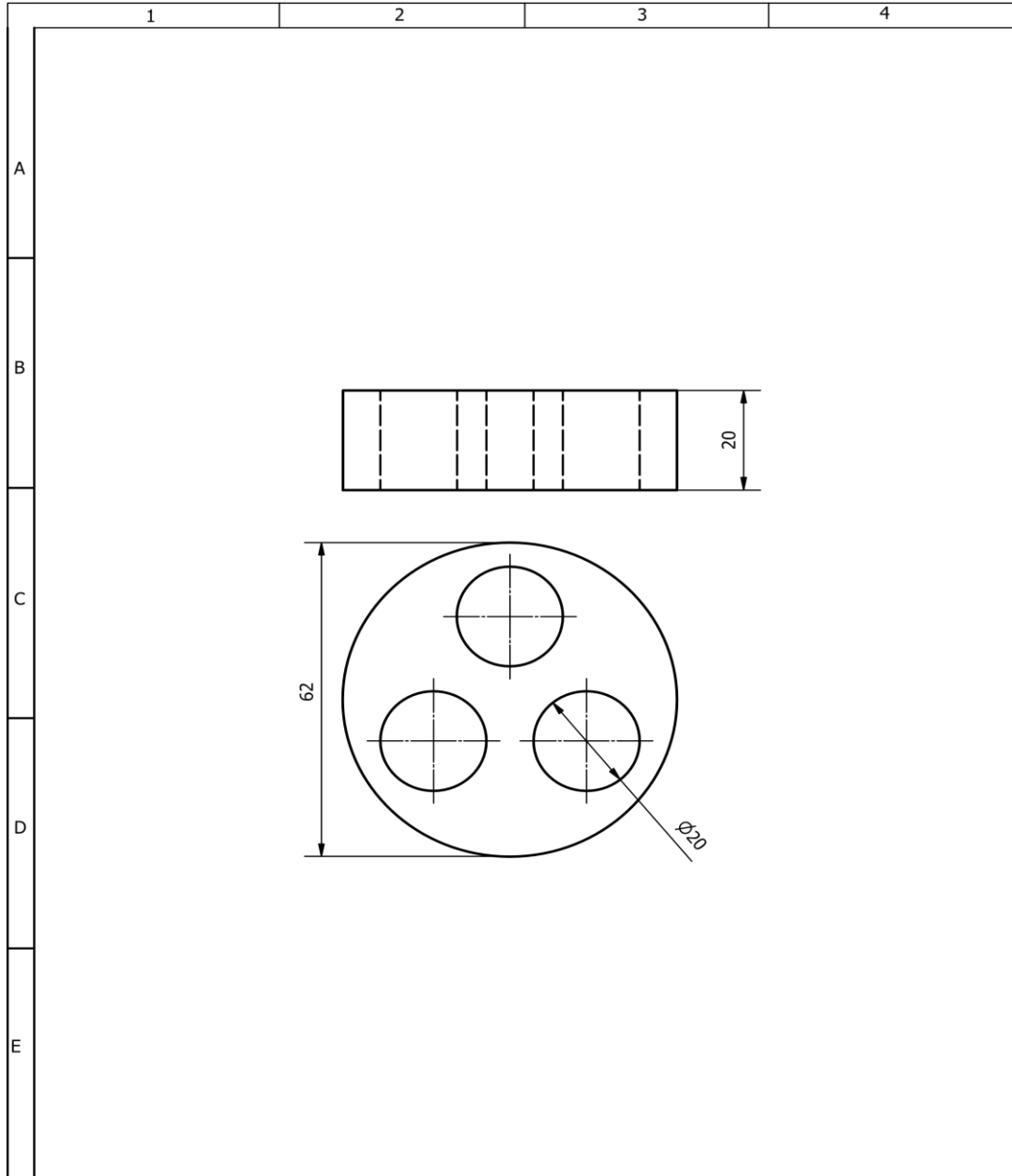


				Tolerancia: 0.5 %	Peso: 0.853 kg	Material: Acero AISI 1020		
				Fecha	Nombre			
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.		MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.			
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.			
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		PISTÓN		Esc: 1 : 2
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 4		



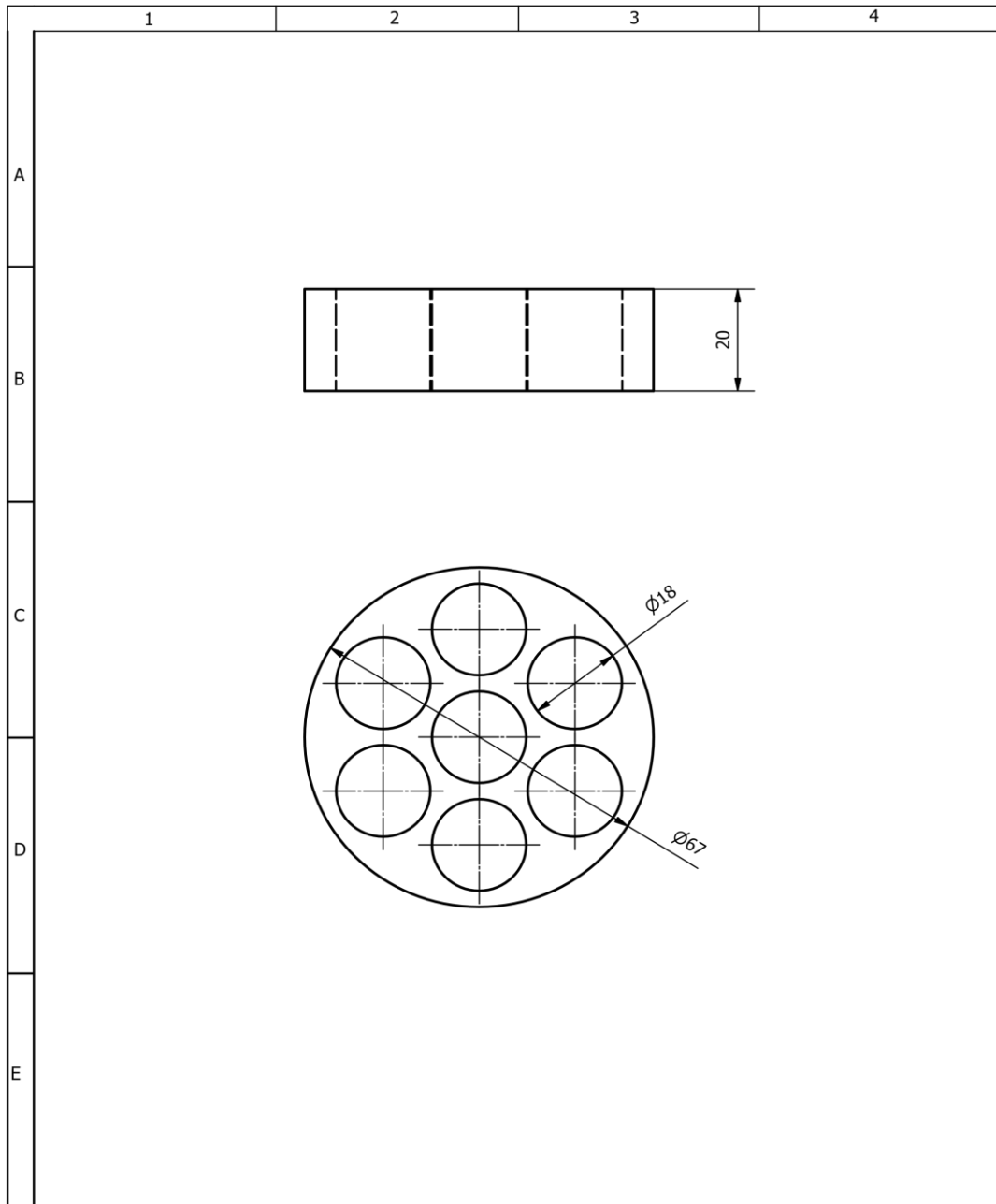


				Tolerancia: 0,5 %	Peso: 0.005 kg	Material: Nitrilo	
				Fecha	Nombre		
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	Esc: 1 : 2
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		SELLO HIDRÁULICO	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 5	



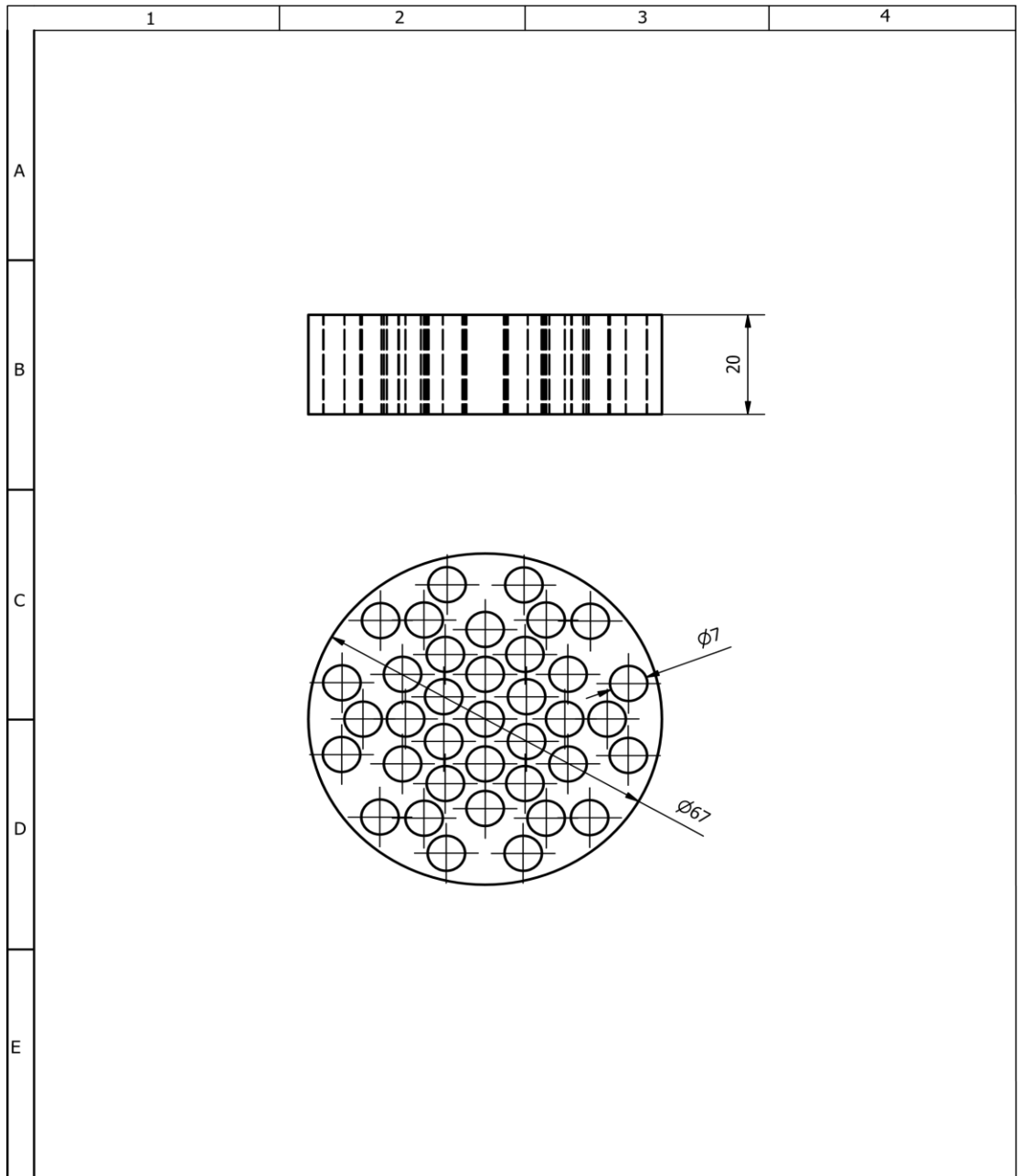
				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: A36	
				Fecha	Nombre		MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.		
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		Esc: 1 : 1
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		PROBETA 1	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			N° : 6 - 1	





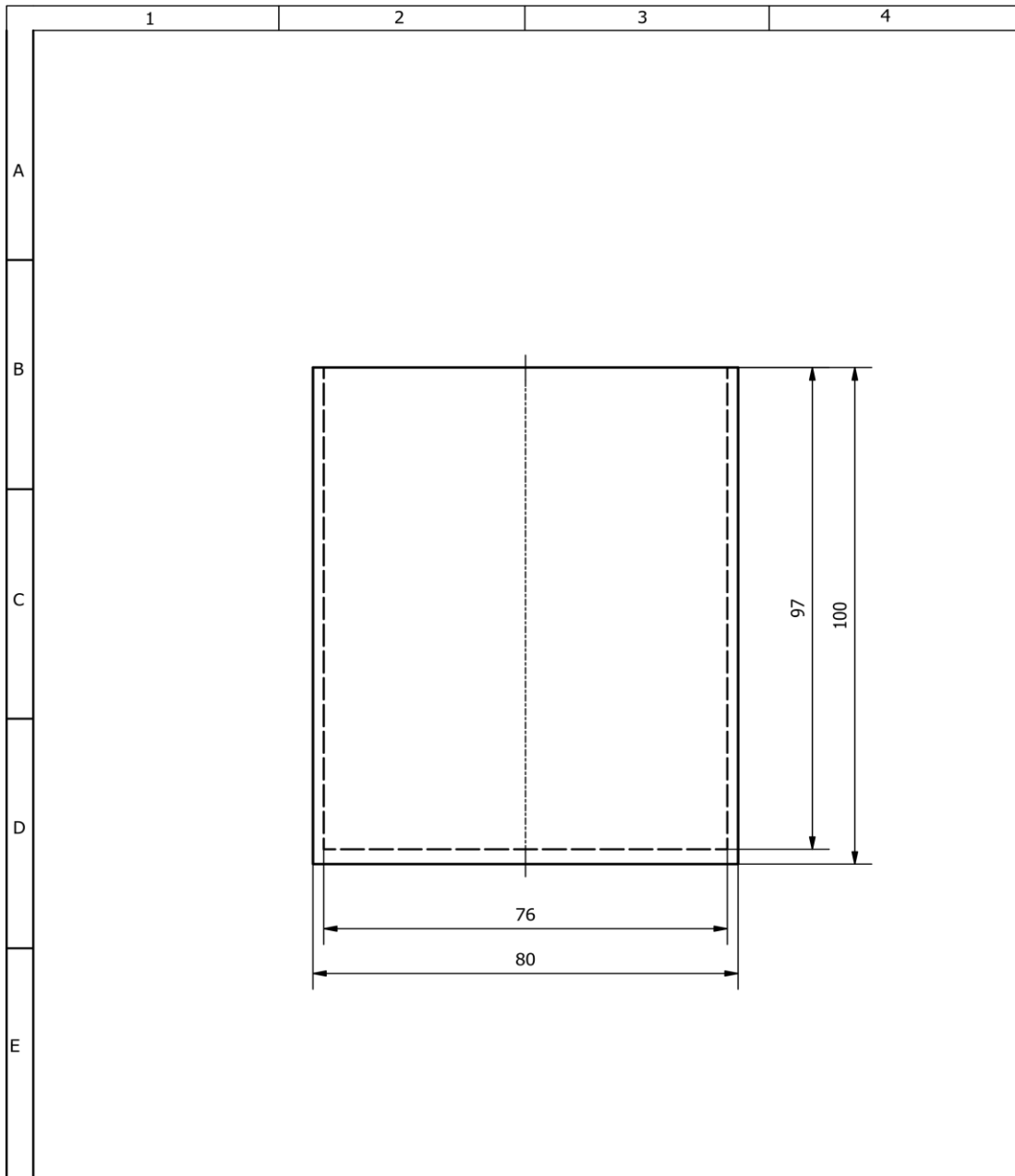
				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: A36	
					Fecha	Nombre	
				Dibu.		Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Rev.		Loayza F. - Espinoza M.	
				Aprov.		Loayza F. - Espinoza M.	
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		PROBETA 2	Esc: 1 : 1
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 6 - 2	



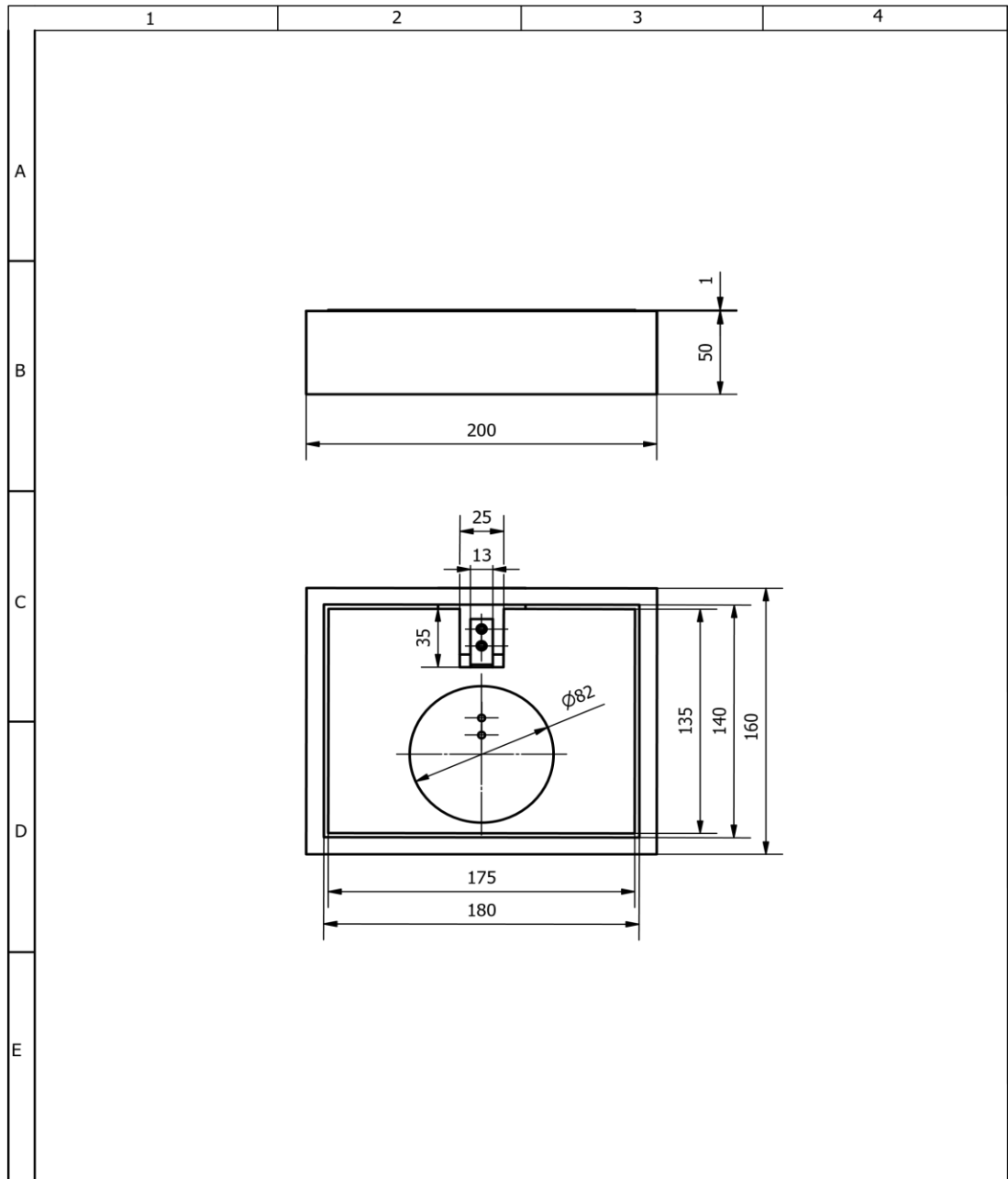



				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: A36	
				Fecha	Nombre		
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL		PROBETA 3	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Esc: 1 : 1	
						N° : 6 - 3	



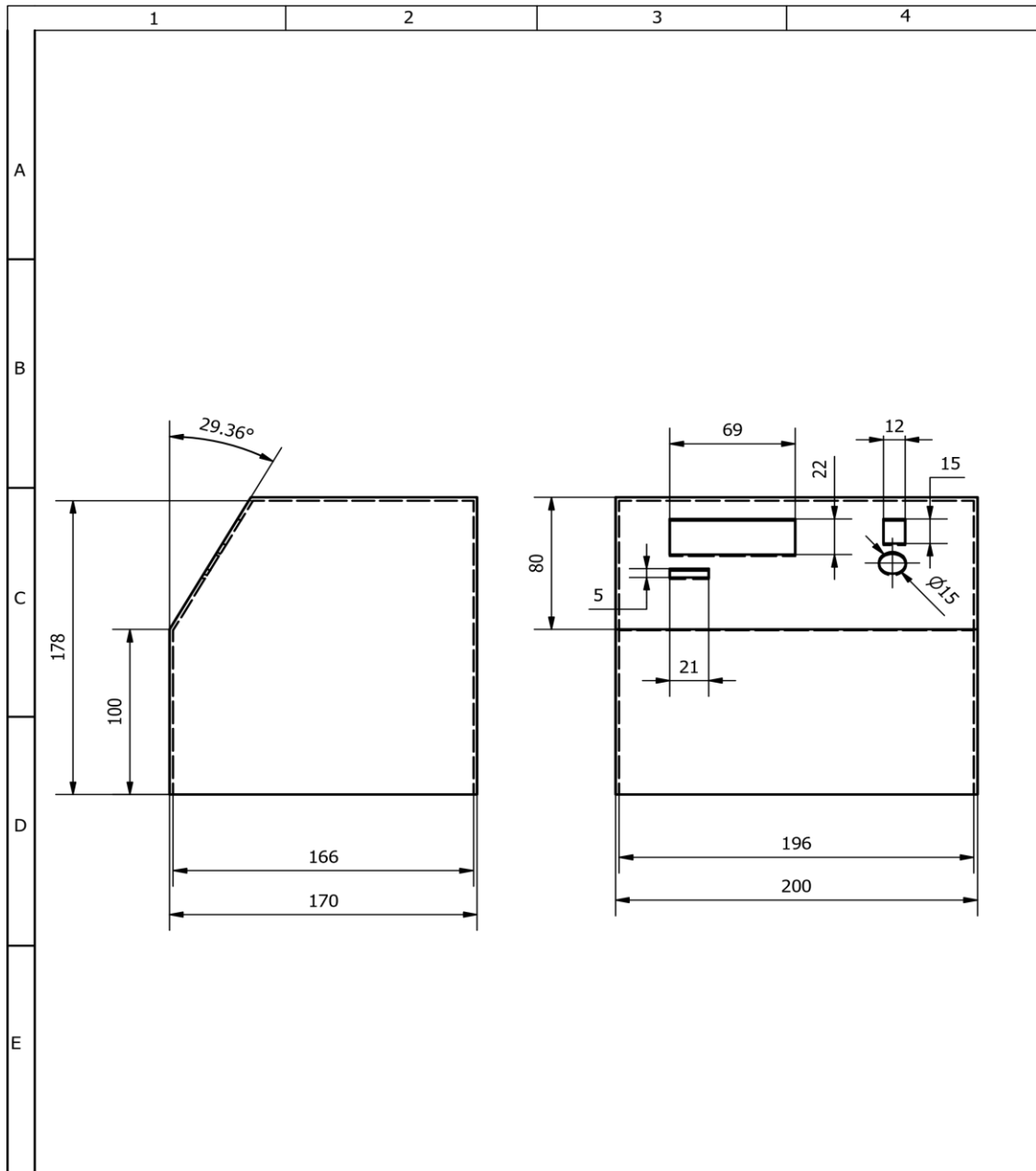



				Tolerancia: 0.5 %	Peso: 0.075 kg	Material: Vidrio	
				Fecha	Nombre	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.		
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL		RESERVORIO INFERIOR	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Esc: 1 : 1	
						Nº : 7	

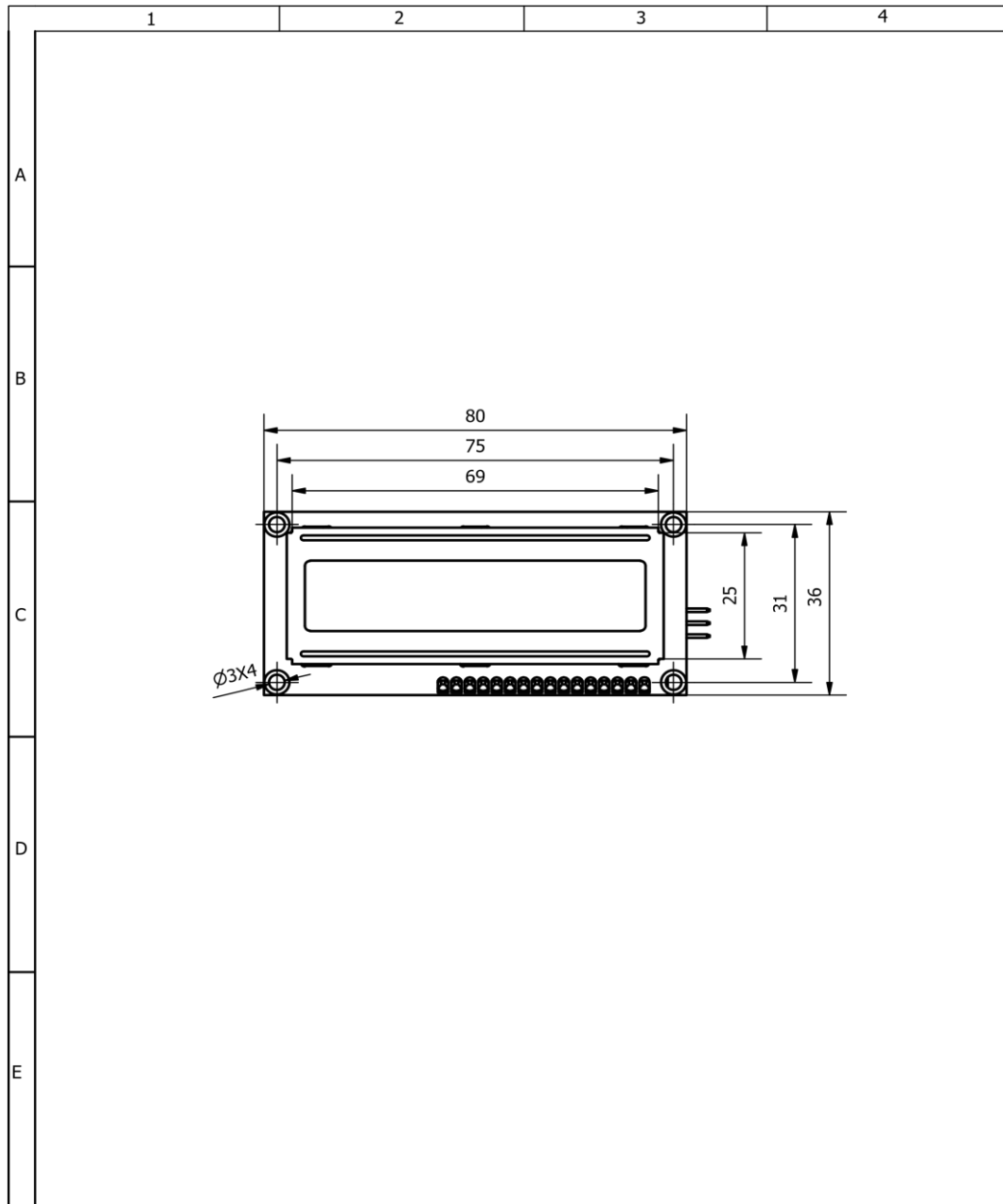


				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: Varios	
				Fecha	Nombre		
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		BALANZA	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Esc: 1 : 3	
						N° : 8	
							

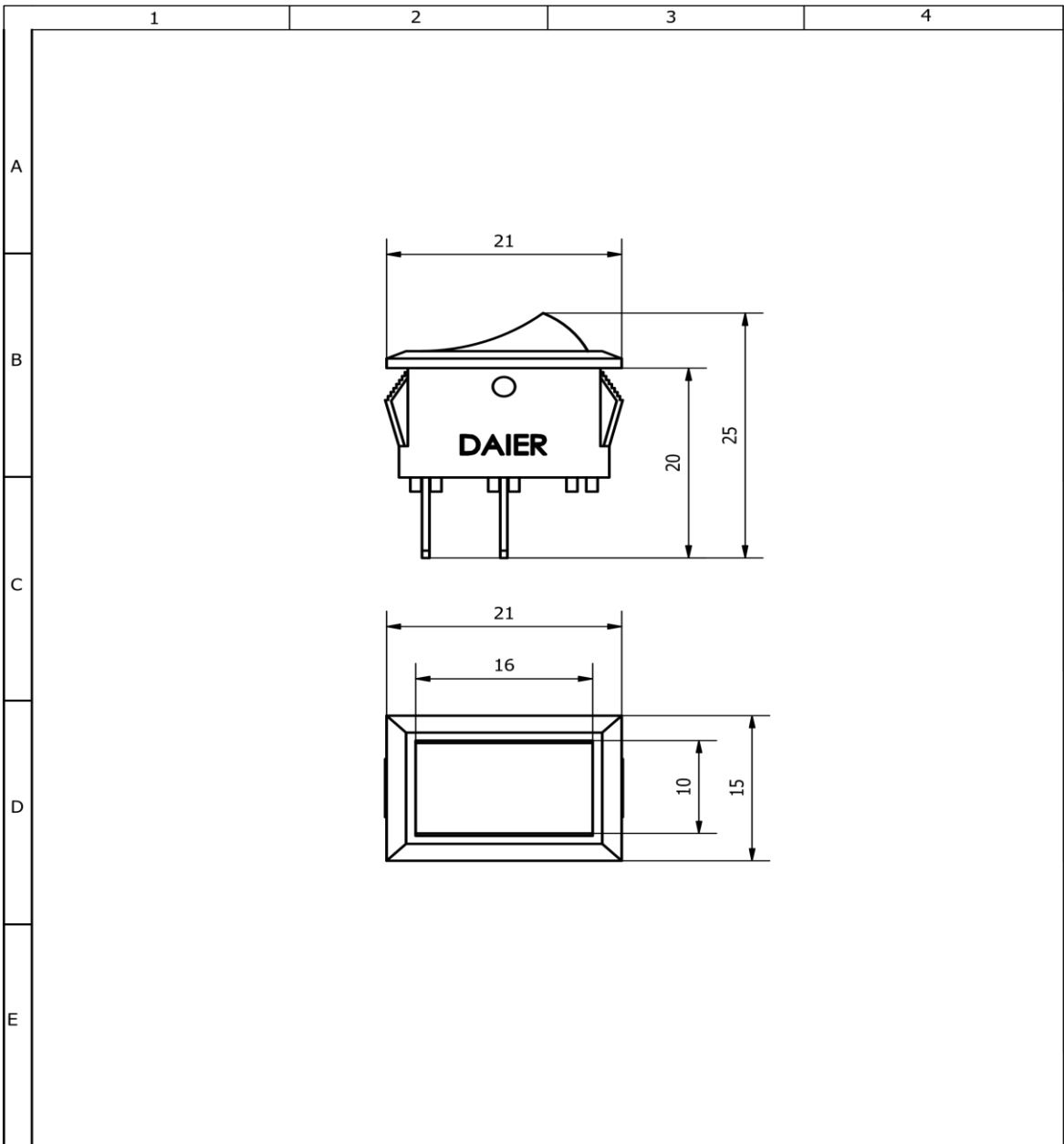





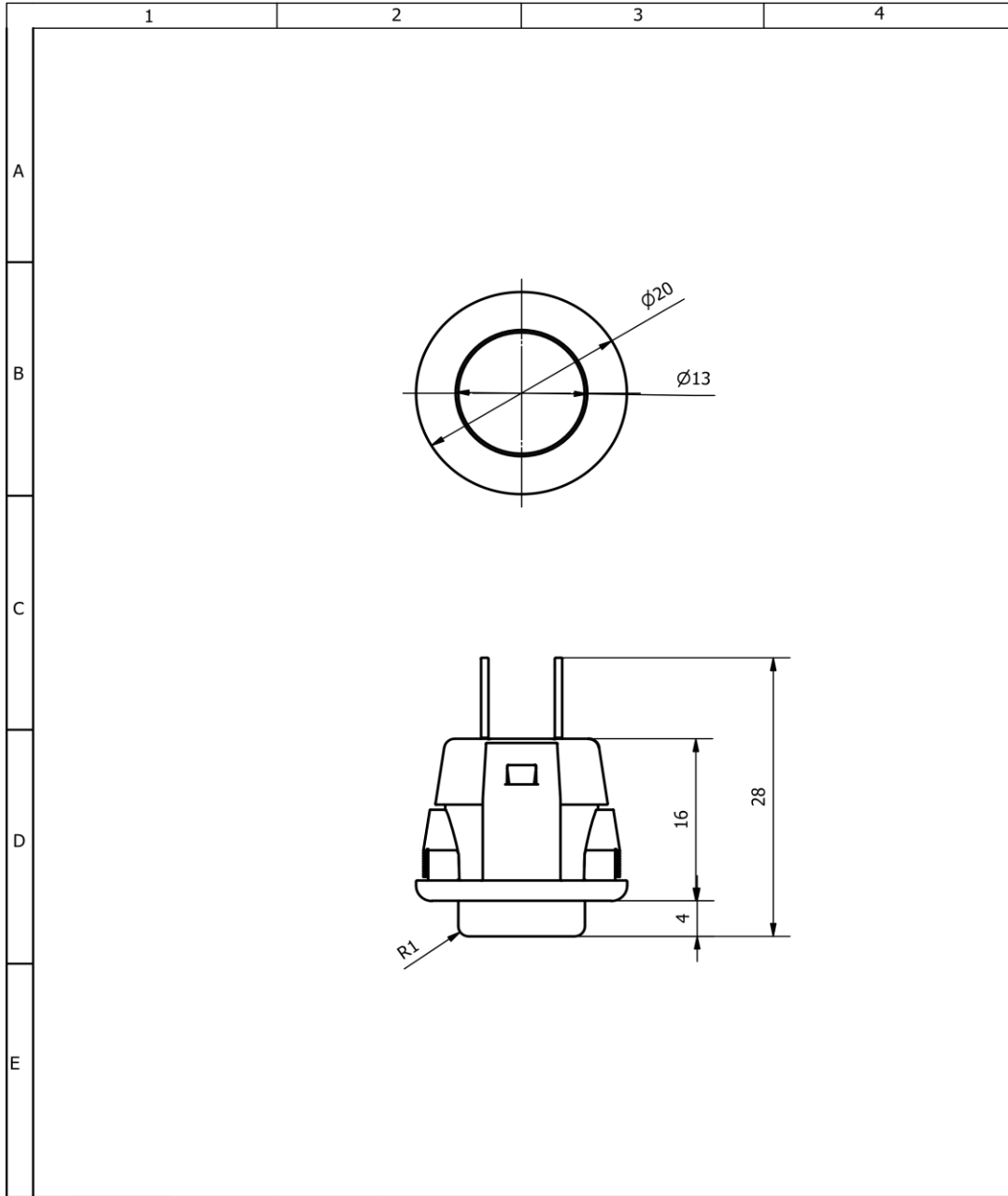
				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: Varios	
				Fecha	Nombre	<b>MEDIDOR DE PERMEABILIDAD</b>	Esc: 1 : 3
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.		
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				<b>ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL</b>		<b>PANEL DE CONTROL</b>	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			N° : 9	



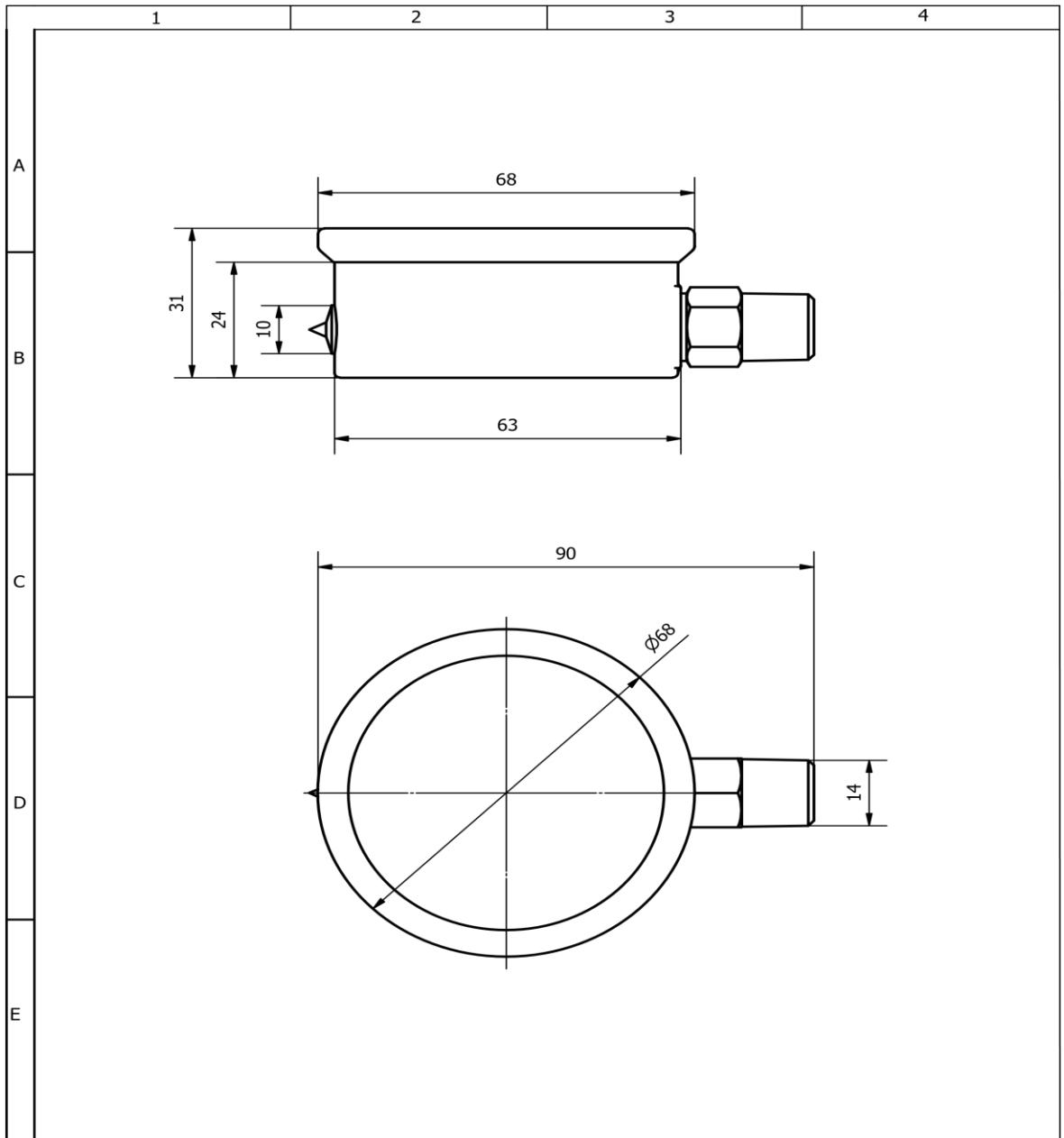
				Tolerancia: 0,5 %	Peso: 0.005 kg	Material: Varios	
				Fecha	Nombre		
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	Esc: 1 : 1
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		DISPLAY LCD	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 10	



				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: Varios	
				Fecha	Nombre	<b>MEDIDOR DE PERMEABILIDAD</b>	
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.		
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				<b>ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL</b>		<b>INTERRUPTOR</b>	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.				
						N° : 11	

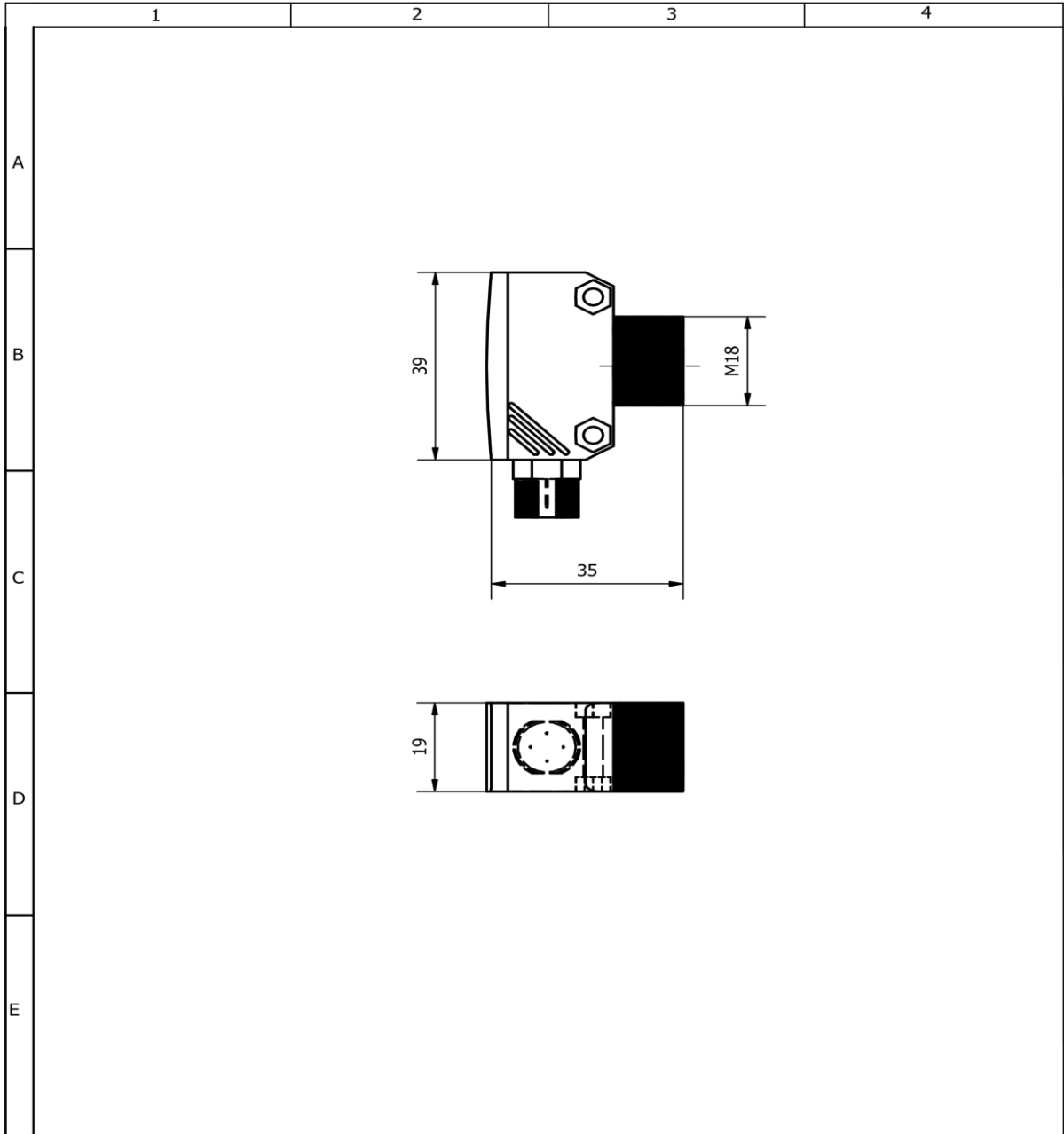


				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: Varios
				Fecha	Nombre	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Dibu.	Proario M. - Intriago J.	
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.	
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.	
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		PULSADOR
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.	N° : 13		
						Esc: 2 : 1

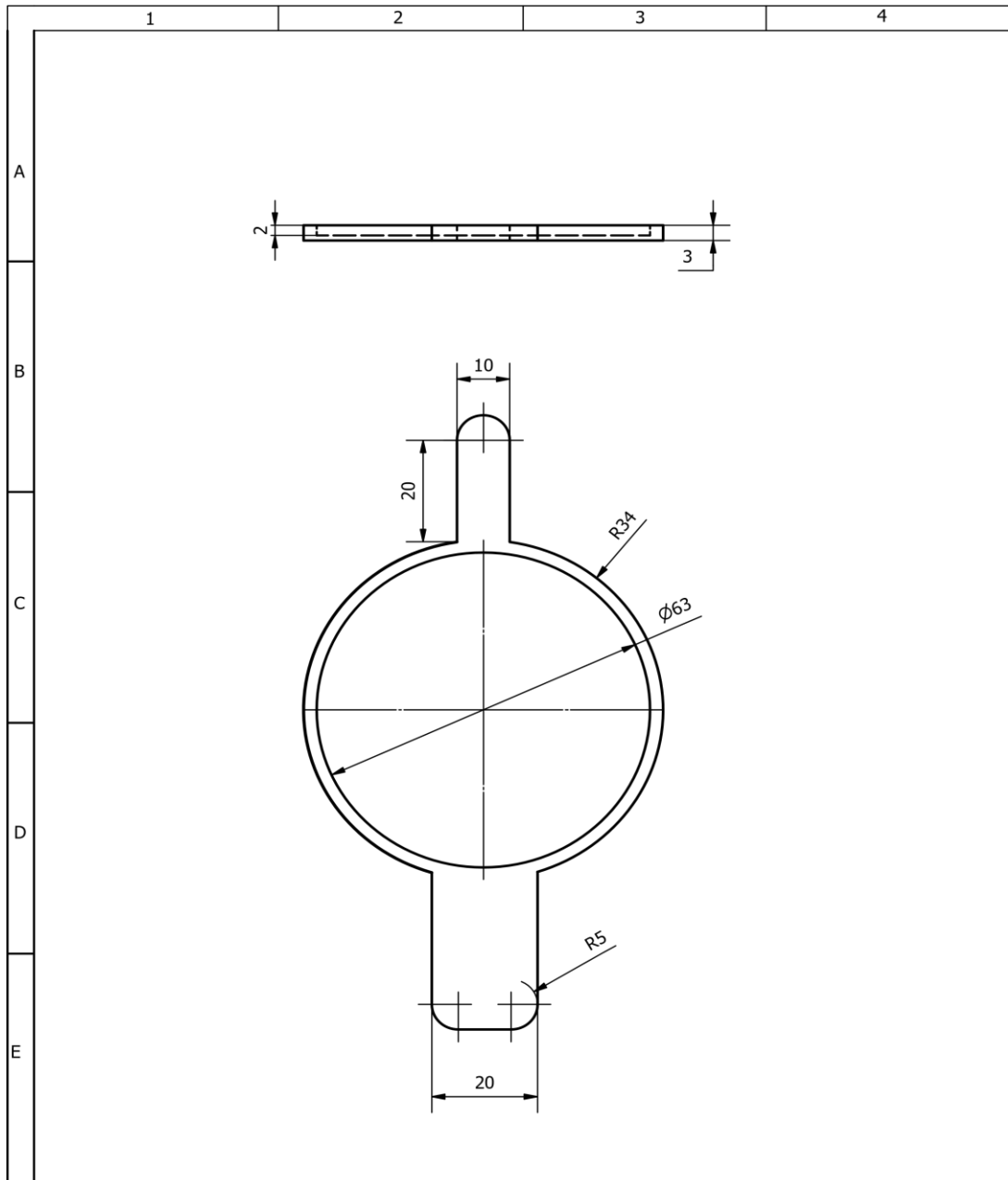


				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: Varios	
				Fecha	Nombre		MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.		
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL		MANÓMETRO	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 13	Esc: 1 : 1



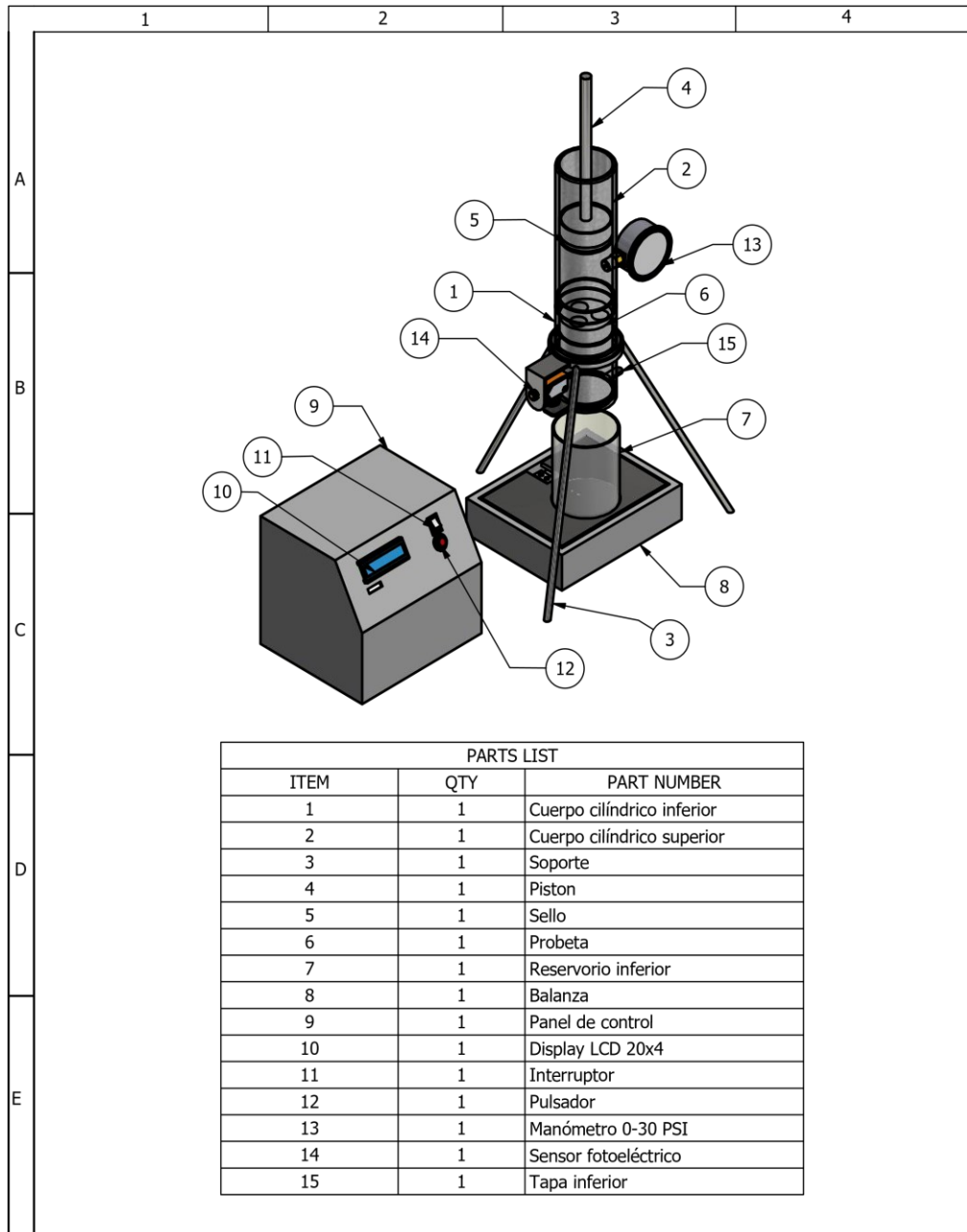


				Tolerancia: 0.5 %	Peso:	Material: Varios	
					Fecha	Nombre	
				Dibu.		Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Rev.		Loayza F. - Espinoza M.	
				Aprov.		Loayza F. - Espinoza M.	
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		SENSOR FOTOELÉCTRICO	
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			N° : 14	



				Tolerancia: 0.5 %	Peso: 0.056 kg	Material: Acero al carbono	
				Fecha	Nombre		
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.	MEDIDOR DE PERMEABILIDAD	
				Rev.	Loayza F. - Espinoza M.		
				Aprov.	Loayza F. - Espinoza M.		
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL		TAPA INFERIOR	Esc: 1 : 1
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.			Nº : 15	





PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Cuerpo cilíndrico inferior
2	1	Cuerpo cilíndrico superior
3	1	Soporte
4	1	Piston
5	1	Sello
6	1	Probeta
7	1	Reservorio inferior
8	1	Balanza
9	1	Panel de control
10	1	Display LCD 20x4
11	1	Interruptor
12	1	Pulsador
13	1	Manómetro 0-30 PSI
14	1	Sensor fotoeléctrico
15	1	Tapa inferior

				Tolerancia:	Peso:	Material: Varios	
				Fecha	Nombre		MEDIDOR DE PERMEABILIDAD
				Dibu.	Proaño M. - Intriago J.		
				Rev.			
				Aprov.			
				ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL			Esc: 1 : 5
				Ensamble			
Edic.	Modif.	Fecha	Nomb.	N° : 16			