

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La filtración es una operación clave en las industrias química, alimentaria, farmacéutica y ambiental, ya que se utiliza para separar sólidos de líquidos en diferentes etapas de producción. Uno de los equipos más comunes para llevar a cabo esta tarea es el filtro prensa, que destaca por su efectividad en la separación sólido-líquido. Funciona aplicando presión sobre una suspensión, lo que obliga al líquido a pasar a través de un medio filtrante, mientras que los sólidos quedan atrapados formando una torta. Esta tecnología es ampliamente utilizada en procesos como el tratamiento de aguas residuales, la clarificación de mostos en la industria de bebidas alcohólicas y la separación de lodos en la industria minera, entre otros.

Los filtros prensa son equipos esenciales en la separación sólido-líquido, ampliamente utilizados en diversas industrias alrededor del mundo. En Norteamérica, países como Estados Unidos y Canadá emplean filtros prensa en sectores como la minería, industria química y tratamiento de aguas. Empresas como Micronics Inc. en Estados Unidos ofrecen información detallada sobre el funcionamiento y componentes de estos equipos (Micronics, 2017).

En Europa, compañías como TEFSA (Técnicas de Filtración S.A.) en España han desarrollado filtros prensa de alto rendimiento, especialmente diseñados para la industria minera, destacando por su fiabilidad y diseño robusto. En África, la industria minera es un sector clave donde los filtros prensa se utilizan para la deshidratación de lodos y recuperación de minerales (Sigmadaf, 2024).

En Latinoamérica, en el ámbito académico, varias universidades han incorporado filtros prensa en sus laboratorios de operaciones unitarias para fortalecer la formación práctica de los estudiantes. Por ejemplo, la Universidad Católica del Norte (UCN) de Chile cuenta con un filtro prensa en su laboratorio de operaciones unitarias, utilizado para prácticas académicas y proyectos de investigación. En Colombia, la Universidad de Antioquia ha desarrollado proyectos de optimización de filtros prensa para el tratamiento de lodos en la industria del cuero (García, 2021).

En la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP), evaluaron el comportamiento de la resistencia específica de la torta en un filtro prensa a diferentes caídas de presión y concentraciones de CaCO_3 , demostrando que la presión influye significativamente en la eficiencia de filtración y en la compresibilidad de la torta (Rios & Rojas, 2012).

En Bolivia, la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM) ha equipado su laboratorio de ingeniería petrolera con un filtro prensa de media área completa, facilitando prácticas en la caracterización de lodos de perforación. Asimismo, la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) ha desarrollado manuales de operación para filtros prensa, indicando su uso en la formación de estudiantes de ingeniería. Estas iniciativas reflejan el compromiso de las universidades bolivianas en integrar equipos de filtración en sus programas académicos y de investigación.

En la ciudad de Tarija, al momento de la realización del presente trabajo, se identificó que la disponibilidad de equipos de filtración tipo filtro prensa en instituciones académicas locales es limitada, si bien la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho cuenta con un filtro prensa a nivel de laboratorio en el área de Física, este equipo presenta capacidades reducidas y no está diseñado para uso específico en prácticas de operaciones unitarias, por lo tanto, la carrera de Ingeniería Química carecía de un equipo propio de mayor capacidad y adaptado a los requerimientos pedagógicos y experimentales del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU). Esta situación reforzó la necesidad de impulsar el equipamiento tecnológico y la capacidad, justificando el dimensionamiento y construcción de un filtro prensa de uso exclusivo para la formación de estudiantes en operaciones de separación sólido-líquido bajo condiciones controladas y escalables.

Objetivos

Objetivo General

Dimensionar, construir e instalar un filtro prensa para su uso en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la UAJMS.

Objetivos Específicos

- Describir la teoría de filtración para filtros prensa.
- Dimensionar el equipo, seleccionar y especificar el material a usar en la construcción del filtro prensa.
- Determinar los costos de materiales y de construcción del equipo.
- Construir el filtro prensa para el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU).
- Realizar la instalación del filtro prensa y efectuar su prueba al vacío.
- Realizar pruebas de filtrado de dos fluidos con suspensión de pequeñas partículas, y determinar los costos de operación.
- Elaborar el manual de operación del filtro, manual de prácticas de filtrado.

Justificación

Justificación Económica

El filtro prensa es un equipo necesario y fundamental que se puede utilizar en el laboratorio de operaciones unitarias como equipo unitario o parte de un sistema de purificación de un fluido. La adquisición de dicho equipo en el mercado puede representar costos elevados para la Universidad, por lo que la construcción del equipo será de gran aporte para el Laboratorio de Operaciones Unitarias realizado por los proyectistas, permitiendo de esta manera usar el presupuesto en otros equipos como también en el mantenimiento del mismo.

Justificación Académica

Se podrá fortalecer el aprendizaje y la formación práctica de los estudiantes en el área de operaciones unitarias al aplicar conocimientos teóricos en un proyecto práctico como el dimensionamiento y construcción de un filtro prensa. Este trabajo integra materias clave como operaciones unitarias, transferencia de masa y diseño de equipos. Los estudiantes desarrollan habilidades en separación de fases, cálculo de presión y caudal, y selección de materiales. además, fomenta el análisis técnico y la solución de problemas reales de la industria química.

Justificación Técnica

El dimensionamiento y la construcción de un filtro prensa optimizará la filtración de mostos fermentados antes de la destilación en el laboratorio de operaciones unitarias de la UAJMS, mejorando la eficiencia del proceso y reduciendo costos de mantenimiento de la torre de destilación. Su versatilidad permitirá su uso en investigaciones y proyectos de grado en áreas: como tratamiento de aguas residuales, clarificación de jugos y recuperación de sólidos. Además, contará con un sistema de monitoreo para garantizar su correcto funcionamiento, su implementación fortalecerá la formación académica, alineando el laboratorio con estándares modernos y brindando a los estudiantes experiencia práctica en separación sólido-líquido y en otras operaciones donde se separe partículas sólidas pequeñas de un líquido.

Justificación Ambiental

En la ejecución del presente trabajo se priorizó el uso de materiales en desuso y componentes reutilizables, con el fin de reducir el consumo de nuevos recursos y minimizar el impacto ambiental asociado a los procesos de mecanizado. Esta práctica permitió aprovechar elementos disponibles en el laboratorio y en talleres locales, disminuyendo la generación de residuos metálicos y plásticos.

De esta manera, el proyecto promueve una gestión responsable de los recursos, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular. Además, la reutilización de materiales contribuye a la formación de una conciencia ambiental en el ámbito académico, incentivando el desarrollo de proyectos de ingeniería que integren eficiencia técnica con responsabilidad ecológica.

Justificación Personal

Este proyecto constituye el cumplimiento de los requisitos para nuestra titulación como Ingenieros Químicos, representando al mismo tiempo un logro académico y profesional que refleja nuestro compromiso con la carrera. El dimensionamiento, diseño y construcción de un filtro prensa materializa la aplicación práctica de conocimientos teóricos que despertaron nuestro interés durante la formación universitaria,

particularmente en el área de dimensionamiento de equipos y operaciones de separación, además, esta iniciativa nos ha permitido integrar y consolidar aprendizajes adquiridos en diversas áreas del currículo, especialmente en operaciones unitarias, fortaleciendo así nuestras competencias profesionales y preparándonos para enfrentar desafíos técnicos en el ámbito industrial.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Aspectos técnicos y otras consideraciones

El prototipo de filtro prensa propuesto se dimensionó y construyó con el objetivo de permitir la realización de prácticas experimentales de filtración a alta presión en el laboratorio de Operaciones Unitarias. Este equipo se compone principalmente de un conjunto de placas y marcos que conforman la cámara de filtración, un sistema de cierre mediante tornillo sin fin, un timón de ajuste manual, un medio filtrante colocado entre las placas, y un sistema de alimentación de la suspensión con control de presión.

El principio de funcionamiento se basa en la aplicación de una presión controlada que impulsa el fluido a través del medio filtrante, reteniendo los sólidos en forma de torta.

El dimensionamiento considera parámetros básicos como el área de filtración, el espesor de la torta, el tipo de medio filtrante y el volumen de suspensión a filtrar. Los materiales seleccionados, como de acero inoxidable AISI 304, acero dulce, camisas de pistones y rodamientos, garantizan resistencia mecánica, durabilidad y seguridad frente a la presión aplicada, para un buen funcionamiento del prototipo.

Además, el prototipo fue concebido bajo criterios de facilidad de manejo y bajo costo de mantenimiento, de modo que pueda ser utilizado de forma didáctica por los estudiantes en diferentes prácticas de laboratorio. Se han tomado en cuenta consideraciones de seguridad, tales como la correcta sujeción de las placas, la verificación de las conexiones de presión y la descarga controlada del filtrado, para evitar fugas o accidentes durante su funcionamiento.

Este dimensionamiento y construcción no solo contribuye a mejorar las condiciones de enseñanza práctica, sino que también permite analizar variables técnicas como la caída de presión, la resistencia de la torta y la eficiencia de separación bajo diferentes condiciones operativas, fortaleciendo así la comprensión experimental de las operaciones de filtración a presión.

1.2. Teorías básicas que sustentan el trabajo

La operación de filtración es una operación unitaria fundamental dentro del ámbito de la ingeniería química y de procesos, empleada para la separación de mezclas sólido-

líquido mediante el paso de un fluido a través de un medio poroso que retiene las partículas sólidas, esta operación se rige principalmente por la ley de Darcy, que establece la relación entre el caudal de filtrado, la caída de presión y la resistencia total ofrecida por la torta de sólidos y el medio filtrante.

La filtración puede realizarse bajo diferentes condiciones de operación, como presión constante, velocidad constante o presión variable, dependiendo del tipo de equipo y del objetivo del proceso. Entre los métodos de mayor eficiencia para la separación de fases se encuentra la filtración a presión, la cual permite obtener filtrados más claros y tortas con menor contenido de humedad debido a la mayor fuerza impulsora aplicada sobre la suspensión.

En el laboratorio de Operaciones Unitarias, las prácticas de filtración suelen realizarse mediante filtros al vacío que operan a bajas presiones, siendo adecuados únicamente para pequeñas cantidades de muestra y estudios preliminares. Sin embargo, para comprender de manera más completa los fenómenos de flujo a través de medios porosos y los efectos de la presión sobre la velocidad de filtración, es necesario realizar pruebas a presiones más elevadas, donde se evidencien las variaciones de resistencia y la eficiencia de la operación.

En este contexto, el filtro prensa se considera un equipo representativo de la filtración discontinua, su principio de funcionamiento se basa en la aplicación de una presión controlada sobre la suspensión, forzando el paso del fluido a través del medio filtrante y acumulando los sólidos en forma de torta. La eficiencia de este equipo depende de variables como la caída de presión, la permeabilidad del medio filtrante, la concentración de sólidos y la viscosidad del fluido.

El estudio y dimensionamiento de un prototipo de filtro prensa no solo permite disponer de un equipo adecuado para futuras prácticas experimentales, sino que además proporciona una base experimental sólida para analizar los principios teóricos de la filtración a alta presión, relacionando los conceptos de flujo, presión y resistencia específicas de la torta con los resultados obtenidos en laboratorio, así mismo permite

ser el punto de partida de un escalamiento para mayores capacidades o menores capacidades usando los principios de escalamiento en la ingeniería química.

1.3. Teoría de filtración

La filtración es la separación de partículas sólidas a partir de una suspensión sólido-líquido mediante el paso del mismo a través de un medio filtrante o pared separadora sobre el que se depositan los sólidos, gracias al concurso de un medio filtrante que permite el paso del fluido, pero retiene a las partículas del sólido.

En todos los tipos de filtración, la mezcla o lodo fluye debido a alguna acción impulsora, como la gravedad, la presión (o el vacío) o la fuerza centrífuga, el medio filtrante retiene y soporta a las partículas sólidas que van formando una torta porosa sobre la que se superponen estratos sucesivos a medida que el líquido va atravesando la torta y el medio filtrante (Brown, 1965).

Los diversos procedimientos para producir la fuerza impulsora del fluido, los diferentes métodos de formación y separación de la torta, y las distintas técnicas usadas para eliminar el fluido filtrado de la torta recién formada, requieren una gran variedad de aparatos o equipos de filtración. En general, los filtros se clasifican de acuerdo con la naturaleza de la fuerza impulsora que provoca la filtración (Brown, 1965).

La teoría simplificada para filtración tanto por lotes como continua se basa en la ecuación clásica de Hagen-Poiseuille:

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\Theta} = \frac{P}{\mu \left(\frac{\alpha w V}{A + r} \right)} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Donde:

V: volumen de filtrado recolectado

dΘ : tiempo de filtración

A: área del filtro

P: presión total en el sistema

W : peso de sólidos de la torta por unidad de volumen de filtrado

μ: viscosidad del filtrado

α : resistencia específica de la torta

r : resistencia de la tela del filtro más el sistema de drenaje

N : Número de placas para el filtro prensa

1.4. Filtración continua

Es un método en donde la separación líquido-sólido se mantiene de manera continua, es decir, el ciclo de filtrado se mantiene constante manteniendo etapas de forma paralela en su proceso.

Es conveniente y razonable en la filtración continua, excepto para filtros de precapa, asumir que la resistencia de la tela del filtro más el drenaje del filtrado es insignificante en comparación con la resistencia de la torta de filtro, y asumir que tanto la caída de presión como la resistencia específica de la torta permanecen constantes durante todo el ciclo de filtración. La ecuación (1.1.), integrada bajo estas condiciones, puede entonces manipularse para obtener las siguientes relaciones (Perry et al., 1999):

$$W = \sqrt{\frac{1 w P \Theta_f}{\mu \left(\frac{\alpha w V}{A + r} \right)}} \quad \text{Ec. (1.2)}$$

$$V_f = \sqrt{\frac{2 P \Theta_f}{\mu \alpha w}} \quad \text{Ec. (1.3)}$$

$$\Theta_w = \frac{W V_w \mu \alpha}{P_w} \quad \text{Ec. (1.4)}$$

$$\Theta_w \propto N W^2 \quad \text{Ec. (1.5)}$$

$$\frac{\Theta_w}{\Theta_f} = 2 \frac{V_w}{V_f} \quad \text{Ec. (1.6)}$$

Donde:

W = peso de sólidos secos de la torta de filtro por unidad de área

V_f = volumen de filtrado de formación de torta por unidad de área

V_w = volumen de filtrado de lavado de torta por unidad de área

Θ_f = tiempo de formación de torta

Θ_w = tiempo de lavado de torta

Mientras la concentración de sólidos suspendidos en la alimentación permanezca constante, estas ecuaciones conducen a las siguientes correlaciones convenientes:

$$\log W \text{ vs. } \log \Theta_f \quad \text{Ec. (1.7)}$$

$$\log V_f \text{ vs. } \log \Theta_f \quad \text{Ec. (1.8)}$$

$$\Theta_w \text{ vs. } W V_w \quad \text{Ec. (1.9)}$$

$$\Theta_{w/f} \text{ vs. } \frac{V_w}{V_f} \quad \text{Ec. (1.10)}$$

Existen otras dos correlaciones empíricas útiles que se indican a continuación:

$$W \text{ vs. Espesor de la torta} \quad \text{Ec. (1.11)}$$

$$\log R \text{ vs. } N \quad \text{Ec. (1.12)}$$

Donde:

R = Porcentaje remanente del porcentaje de soluto en la torta sin lavar que permanece después del lavado

Según el libro Brown existen los siguientes filtros que son de filtración continua y sus características principales se mencionan:

1.4.1. Filtro de tambor rotatorio al vacío

Este filtro opera de forma continua mediante un tambor recubierto con un medio filtrante que gira parcialmente sumergido en la suspensión. El vacío inducido extrae el líquido a través del medio, reteniendo los sólidos en forma de torta que se descarga de manera continua. Es ampliamente utilizado para suspensiones diluidas y partículas finas (Brown, 1965).

- Tambor giratorio parcialmente sumergido en la suspensión.
- El vacío extrae el líquido y forma una torta continua.

1.4.2. Filtro de disco al vacío

Este equipo utiliza varios discos montados sobre un eje giratorio, cada uno con sectores independientes conectados al sistema de vacío. Su diseño ofrece una gran superficie

filtrante en un volumen compacto, lo que permite procesar grandes cantidades de suspensión con alta eficiencia (Brown, 1965).

- Similar al de tambor, pero usa discos montados sobre un eje giratorio.
- Cada disco tiene sectores independientes conectados al vacío.
- Mayor área de filtración por volumen de equipo.

1.4.3. Filtros de tambor a presión

Estos filtros trabajan en una cámara cerrada donde se aplica presión positiva para forzar el paso del fluido a través del medio filtrante. Al alcanzar gradientes de presión más altos que los filtros al vacío, permiten una filtración más rápida y obtienen tortas con menor contenido de humedad (Brown, 1965).

- Operan igual que los filtros rotatorios, pero usan presión positiva en lugar de vacío.
- Adecuado para líquidos viscosos o cuando se necesita mayor velocidad de filtración.

1.5. Filtración discontinua

Es un proceso de separación sólido-líquido en el que la operación se realiza por lotes (batch). Esto significa que se filtra una cantidad determinada de suspensión, se detiene el proceso una vez que se ha formado una cantidad suficiente de torta, se retira el sólido acumulado, y luego se inicia un nuevo ciclo (McCabe, 2007).

Se debe conocer el patrón de la operación de filtración, es decir, la variación del caudal y la presión con el tiempo. Generalmente, el mecanismo de bombeo determina las características de flujo de la filtración y sirve como base para las siguientes tres categorías (Perry et al., 1999).

1.5.1. Filtración a presión constante

En este tipo de filtración, la presión aplicada sobre la suspensión se mantiene constante durante todo el proceso.

El mecanismo que genera la presión suele ser gas comprimido o una bomba hidráulica, que impulsa el fluido a través del medio filtrante.

A medida que la torta crece, su resistencia aumenta, por lo que la velocidad de filtración disminuye con el tiempo (Smiles, 1970).

Este método es útil para estudiar las propiedades del medio filtrante y de la torta, ya que permite observar cómo varía el caudal en función del tiempo.

1.5.2. Filtración a velocidad constante

En este caso, se controla el caudal del filtrado para mantener una velocidad de filtración constante.

Para lograrlo, se emplean bombas de desplazamiento positivo (como bombas de pistón o de diafragma), que ajustan automáticamente la presión de trabajo a medida que la resistencia de la torta aumenta.

Este método es menos común en aplicaciones industriales, pero resulta útil en estudios experimentales donde se requiere mantener una tasa de filtración constante para comparar distintos medios o suspensiones (Mahdi & Holdich, 2013).

1.5.3. Filtración a presión variable y velocidad variable

Es una operación de separación sólido-líquido en el que la presión aplicada y la velocidad del flujo se ajustan de forma controlada durante la operación. El uso de una bomba centrífuga resulta en este patrón: el caudal de descarga disminuye al aumentar la presión de retroceso.

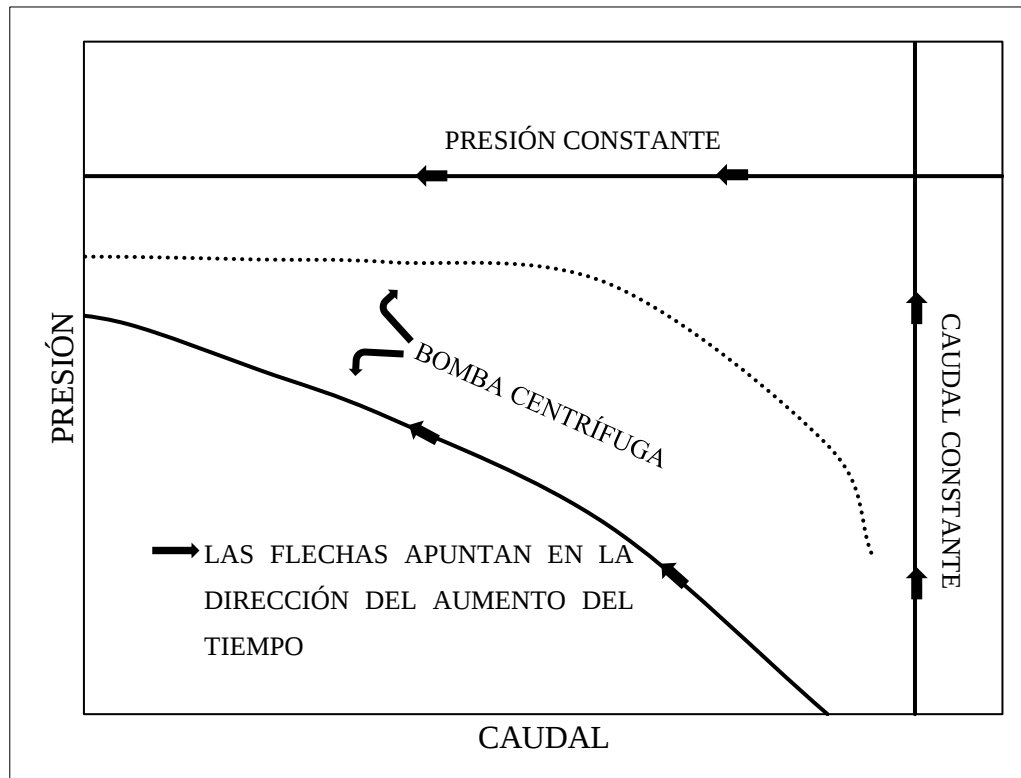
En este tipo de filtración, tanto la presión aplicada como la velocidad del flujo se ajustan de forma controlada durante la operación.

Generalmente, la presión se incrementa gradualmente para compensar el aumento de resistencia de la torta y mantener un flujo de filtrado adecuado. El uso de una bomba de velocidad variable o un sistema automatizado permite optimizar el proceso, reduciendo el tiempo total de filtración y mejorando la eficiencia de separación (Tarleton, 1998).

Este método se emplea con frecuencia en filtros prensa industriales, donde la presión se eleva progresivamente durante el ciclo hasta alcanzar el valor máximo permitido.

El comportamiento del caudal y la presión para los tres tipos de filtración se muestra en la Figura 1.1. Dependiendo de las características de la bomba centrífuga, pueden encontrarse curvas muy diferentes, como sugiere la figura.

Figura 1-1. Ciclos típicos de filtración



Fuente: (Perry et al., 1999)

Durante la formación de la torta predomina el flujo en régimen laminar, y la velocidad lineal del fluido en cualquier instante (v) viene dada por la ecuación 1.13. según (Brown, 1965).

$$v = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{K(-\Delta P_c)}{L \mu} \quad \text{Ec. (1.13)}$$

Donde:

V = volumen del filtrado

A = área del medio filtrante

L = espesor de la torta

t = tiempo

K = permeabilidad, $g_c D_p^2 F_{Re} / 32 F_f$

$-\Delta P_c$ = diferencia de presión a través de la torta

1.6. Aparatos indispensables para la filtración (Sólido-Líquido)

a) Un colador. - Es usualmente una tela metálica colocada a través de un canal de flujo para separar la herrumbre o suciedad de un líquido en movimiento, cuando la tela se obstruye se reemplaza fácilmente.

b) Los clarificadores. - También separan pequeñas cantidades, de sólidos, para producir generalmente líquidos translúcidos, como tintas de imprentas y bebidas. Los sólidos retirados se desechan en la mayoría de los casos. El medio filtrante en un clarificador es una membrana de tela o papel o un cartucho de discos metálicos.

c) Los filtros de tortas. - separan grandes cantidades de sólidos en forma de una pasta de cristales o lodos. A menudo están provistos de dispositivos para lavar los sólidos y retirar de ellos la mayor parte de líquido posible antes de la descarga.

d) Un espesador de filtro. - produce una separación parcial de una suspensión ligera, descargando algo de líquido claro y esperando la suspensión de sólidos.

Los líquidos pasan a través de un material filtrante gracias a una diferencia de presión en ambos lados del filtro. Esta presión mayor que la atmosférica puede generarse por el peso del propio líquido (como en una columna), mediante una bomba o utilizando fuerza centrífuga. En el caso de los filtros que funcionan solo por gravedad, el material filtrante debe ser delgado, como una tela o un lecho de partículas grandes (como arena). Por esta razón, los filtros por gravedad tienen un uso limitado en la industria, y suelen emplearse principalmente para separar líquidos de mezclas con cristales grandes o para purificar agua.

1.7. Medios filtrantes

En la filtración industrial, un medio filtrante frecuente es la tela de lona, de diferentes pesos y modelos de tejido, dependiendo del objetivo que se persiga. Los líquidos

corrosivos requieren el empleo de otros medios filtrantes tales como telas de lana, de metal monel o acero inoxidable, de vidrio o de papel. Las fibras sintéticas como nylon, propileno, y varios poliésteres tienen también una elevada resistencia química.

En una tela de un tamaño de malla dado, las fibras metálicas o las sintéticas lisas son menos efectivas que las fibras naturales para separar partículas muy finas. Sin embargo, por lo general esto sólo es una desventaja al comienzo de la filtración debido a que, excepto con partículas gruesas y duras que no contienen finos, el medio filtrante real lo constituye la primera capa de sólidos depositados. El filtrado es turbio al principio, pero luego se hace claro. El filtrado turbio se devuelve al tanque que contiene la suspensión para filtrarse de nuevo (McCabe, 2007)

Todos los filtros requieren un medio filtrante para retener sólidos, ya sea que el filtro sea para filtración con formación de torta o para filtración por medio filtrante o filtración en profundidad. La especificación de un medio se basa en la retención de un tamaño mínimo de partícula con buena eficiencia de eliminación y en una vida útil aceptable del medio en el entorno del filtro. La selección del tipo de medio filtrante es frecuentemente la decisión más importante para el éxito de la operación. Para la filtración con formación de torta, la selección del medio implica una optimización de los siguientes factores o atributos:

1. Capacidad para detener los sólidos sobre sus poros con rapidez, después de que se inicia la alimentación (o sea, propensión mínima a las purgas).
2. Velocidad baja de arrastre de sólidos dentro de sus intersticios (o sea, propensión mínima a los atascamientos).
3. Propiedades que favorezcan un flujo adecuado del filtrado, las cuales están relacionadas con la estructura del material, su porosidad y resistencia química
4. Resistencia a los ataques químicos.
5. Suficiente resistencia para sostener la presión de filtración.
6. Resistencia aceptable al desgaste mecánico.
7. Capacidad para descargar la torta con facilidad y limpieza.

8. Capacidad para conformarse mecánicamente al tipo de filtro con el cual se utilizará.
9. Costo mínimo de operación.

Para la filtración con medios filtrantes, se aplican los atributos 3, 4, 5, 8 y 9 de la lista anterior y es preciso agregarles a) capacidad para retener los sólidos que se requieren, b) libertad de descarga de pelusa o algún otro material adulterador en el filtrado, y c) capacidad para no atascarse con rapidez (o sea, larga duración).

En la selección del medio filtrante se incluyen innumerables tipos de telas, tejidos de fibras, fieltro o fibras no tejidas, y sólidos porosos o perforados, membranas poliméricas o sólidos particulados en forma de un lecho permeable. Todos los tipos de medios filtrantes se encuentran disponibles en gran variedad de materiales (Perry et al., 1999).

Tabla 1-1. Características de materiales de filtros.

Nombre genérico y descripción	RT	AT	R ac.	R alc.	RAO	RD	GE	T max.
Acetato: Acetato de celulosa. Cuando menos del 92% de los grupos hidroxilos están acetilados, se denomina "triacetato".	1.2-1.5	G	F	P	G	G	1.33	210
Acrílico: Polímero con $\geq 85\%$ en peso de unidades de acrilonitrilo.	2.0-4.8	G	G	F	G	E	1.18	300

Vidrio: Fibra inorgánica.	3.0-7.2	P	E	P	E	E	2.54	600
Metálico: Compuesto de metal, metal-plástico recubierto, o núcleo cubierto por metal.	—	G						
Modacrílico: Polímero con 35–85% en peso de unidades de acrilonitrilo.	2.5-3.0	G	G	G	G	G	1.30	180
Nailon: Poliamida con grupos amida recurrentes.	3.8-9.2	E	F-P	G	F-P	G	1.14	225
Poliéster: Polímero con $\geq 85\%$ en peso de éster de alcohol dihidrico y ácido tereftálico.	2.2-7.8	E-G	G	G-F	G	G	1.38	300
Polietileno: Polímero con $\geq 85\%$ en peso de etileno.	1.0-7.0	G	G	G	F	G	0.92	165‡
Polipropileno: Polímero con $\geq 85\%$ en peso de propileno.	4.8-8.5	G	E	E	G	G	0.90	250§

Algodón: Fibras naturales	3.3-6.4	G	P	F	G	E-G	1.55	210
Fluorocarbono: Polímero de tetrafluoretileno.	1.0-2.0	F	E	E	E	G	2.30	550¶

*Adaptado de Mais, Chem. Eng., 78(4), 51 (1971). Los símbolos tienen el siguiente significado: E = excelente, G = bueno, F = regular, P = malo.

† °C = (°F – 32) /1.8; K = (°F + 459.7) /1.8.

‡ Polímero de baja densidad. Hasta 230 °F para alta densidad.

§ Tela termofijada; de lo contrario, más bajo.

¶ Requiere ventilación debido a la liberación de gases tóxicos por encima de los 400 °F.

Descripción de abreviación de la tabla:

RT = Ruptura tenacidad(g/dinier)

AT = Abrasión resistencia

R ac. = Resistencia a los ácidos

R alc. = Resistencia a los álcalis

RAO = Resistencias a los agentes oxidantes

RD = Resistencia los disolventes

GE = Gravedad específica

T max = Temperatura máxima operativa(°F)

Fuente: (Perry et al., 1999).

1.7.1. Telas de fibras tejidas

Para la filtración de torta estas telas son el tipo más usual de medio filtrante. Existe gran variedad de materiales y los tipos más usuales se encuentran enumerados en la Tabla 1-1., con sus factores de resistencia química y temperatura. Aparte del material de las fibras, ciertas características de construcción describen la tela filtrante, a saber: 1) tejido, 2) estilo, 3) peso, 4) cuenta, 5) pliegues, y 6) número de hilaza. De los muchos

tipos de tejidos disponibles sólo cuatro son utilizados en forma amplia como medios filtrantes: lisos (cuadrados), tejido, sarga, tejido de cadena y satín.

El desempeño de la tela para filtros depende del tejido y del tipo de hilaza, y sus graduaciones se indican en la siguiente tabla.

Tabla 1-2. Efectos de los tipos de tejidos e hilazas sobre los medios filtrantes

Tipo de tejido/hilaza	Velocidad más alta de flujo	Mayor retención	Mejor descarga de torta	Menor humedad en las tortas	Resistencia a la aglutinación
Tejidos:					
Burdo o liso	4	1	4	4	4
Cruzado	2	3	2	2	2
Cadena	3	2	3	3	3
Satín	1	4	1	1	1
Hilaza:					
De un hilo	1	3	1	1	1
De hilos múltiples	2	2	2	2	2
Embobinada	3	1	3	3	3

Fuente: (Perry et al., 1999).

En la Tabla 1-2 se presenta una escala ordinal donde el valor 1 corresponde a la alternativa con mejor desempeño y el valor 4 a la de menor desempeño.

1.7.2. Telas metálicas o cedazos

Existen en varios tipos de tejidos en níquel, cobre, latón, bronce, aluminio, acero, acero inoxidable, monel y muchas otras aleaciones. En el tejido liso, el espaciamiento más

cerrado del alambre que existe es el de malla 400, lo cual limita el empleo de este tejido con las pulpas, las lechadas cristalinas gruesas, etc. Los llamados "tejidos holandeses" emplean alambres largos y rectos, relativamente anchos y de espaciamiento recto que permiten que el relleno, torcido y relativamente pequeño, se pueda tejer en forma mucho más cerrada, proporcionando un buen medio para la filtración de pulpas y cristales finos. Sin embargo, este tipo de tejido tiende a atascarse con facilidad cuando se filtran partículas suaves y amorfas; utilizando la filtración conveniente se simplifica este problema.

La gran resistencia a la corrosión y a la alta temperatura mediante la selección adecuada de metales, hace que en filtraciones hechas con medios filtrantes metálicos sean recomendables, sobre todo por su larga vida. Esta ventaja se acentúa muy especialmente cuando se manejan materias tóxicas en filtros cerrados en que es menester una exposición mínima del personal de mantenimiento.

1.7.3. Filtros prensados y borra de algodón

Estos materiales se utilizan para filtrar partículas gelatinosas de pinturas, soluciones de hilados y otros líquidos viscosos. La filtración se produce mediante la deposición de las partículas sobre las fibras a través de la trama.

1.7.4. Tramas no tejidas

Están hechas de fibras sintéticas como poliéster, nylon, o poliolefinas. Estas tramas son auto adheribles en capas que preceden a la extrusión de la fusión; son más ligeras y más delgadas que los fieltros y a menudo se utilizan en multicapas. El peso de la trama puede variar entre 14 a 369 g/m² (0.4 a 10.9 oz/yd²). En la gama de bajo peso se emplean para la filtración por gravedad de aceites ligeros, mientras que las de mayor peso son utilizadas para fluidos muy viscosos y para separar partículas tan pequeñas como de 5 µm de diámetro.

1.7.5. Papeles de filtro

Estos papeles se suministran en una amplia gama de permeabilidad, espesor y resistencia. Por lo que se refiere a las características de este material, poseen baja resistencia; sin embargo, requieren una placa de fondo como soporte.

1.7.6. Medios porosos rígidos

Estos medios se encuentran disponibles en hojas o placas y en tubos. Los materiales utilizados incluyen acero inoxidable sinterizado y otros metales, grafito, óxido de aluminio, sílice, porcelana y algunos plásticos, gama que permite un amplio intervalo de resistencia a la temperatura y a los productos químicos. La mayor parte de las aplicaciones son para la clarificación.

1.7.7. Membranas poliméricas

Estas membranas se utilizan en las aplicaciones de filtración para la separación de partículas finas, por ejemplo, en la microfiltración y ultrafiltración (la clarificación incluye la eliminación de partículas de 1 μm y menores). Las membranas se fabrican con diversos materiales y los más comunes son los acetatos de celulosa y las poliamidas.

1.7.8. Lechos granulares de sólidos particulados

Los lechos de sólidos, por ejemplo, arena o carbón, se utilizan como medio filtrante para la clarificación de agua o soluciones químicas que contienen pequeñas cantidades de partículas en suspensión. Se pueden adquirir los gránulos para filtro con el diámetro de partícula deseado. Con frecuencia, los lechos se fabrican en capas de diferentes materiales y varios tamaños de partícula.

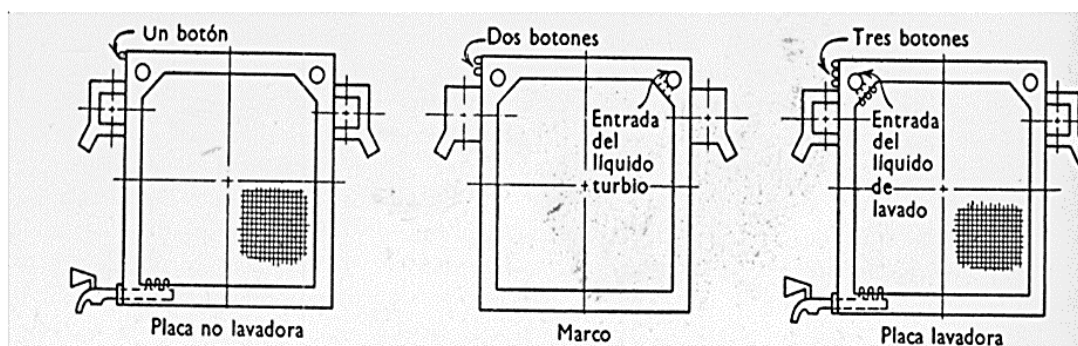
1.8. Teoría del filtro prensa de placas y marcos

Un filtro prensa contiene un conjunto de placas diseñadas para proporcionar una serie de cámaras o compartimentos en los que se pueden recoger los sólidos. Las placas se recubren con un medio filtrante tal como una lona. La suspensión se introduce en cada

compartimento bajo presión; el líquido pasa a través de la lona y sale a través de una tubería de descarga, dejando detrás una torta de sólidos húmeda (McCabe, 2007)

En la figura 1.2. se representan las placas y marcos de un filtro-prensa del modelo de desagüe abierto. Las placas y marcos se acoplan alternadamente adaptando telas de filtración sobre los dos lados de cada placa (Brown, 1965).

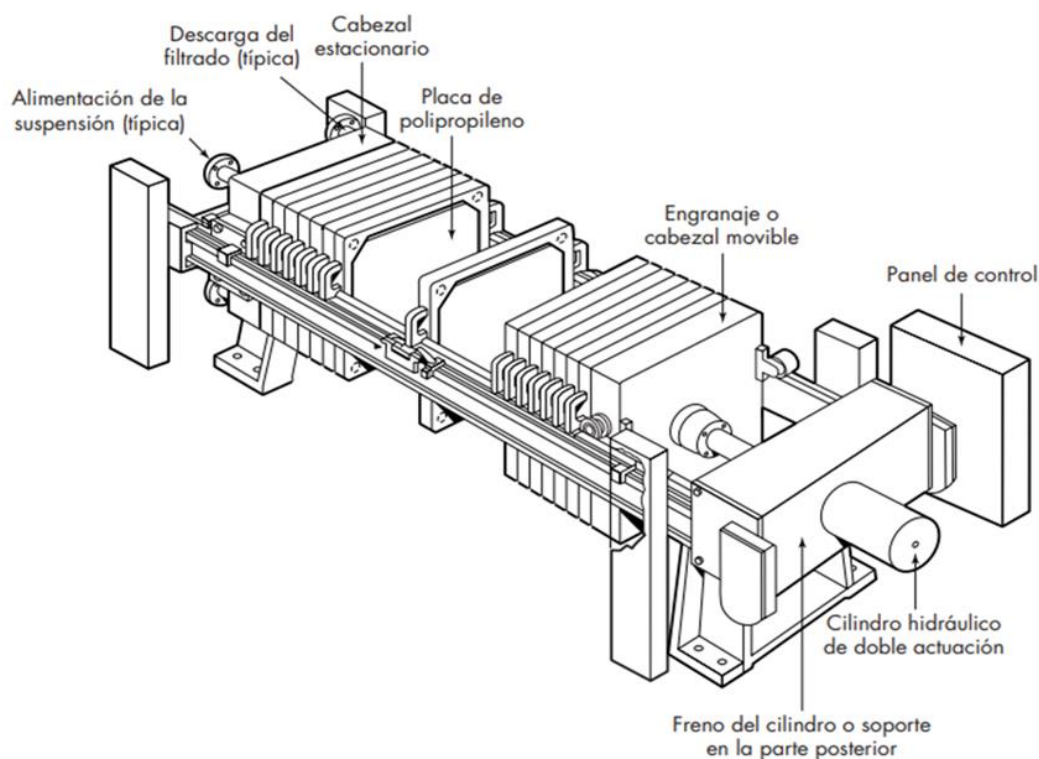
Figura 1-2. Placas y marcos de un filtro prensa de grifos



Fuente: (Brown, 1965).

Las placas de un filtro prensa pueden ser cuadradas o circulares, verticales u horizontales. Lo más frecuente es que los compartimentos para sólidos están formados por huecos en las caras de placas de polipropileno moldeado. En otros diseños, el filtro está formado por prensas de placas y marcos como los de la figura 1.3. en donde hay placas cuadradas de 6 a 78 in. (150 mm a 2 m) de lado alternan con marcos abiertos. Las placas tienen un espesor de 1/4 - a 2 in. (6 a 50 mm), el espesor de los marcos es de 1/4 - a 8 in. (6 a 200 mm). Las placas y los marcos se sitúan de forma vertical en un bastidor metálico, con telas que cubren las caras de cada placa y se acoplan estrechamente entre sí por medio de un tornillo o una prensa hidráulica. La suspensión entra por un extremo del conjunto de placas y marcos, y pasa a través de una esquina, hacia el canal que recorre el equipo de modo longitudinal. Los canales auxiliares llevan la suspensión desde el canal de entrada hasta cada uno de los marcos. Aquí los sólidos se depositan en las caras cubiertas de tela de las placas, el líquido pasa a través de las telas, desciende por las canaladuras de las caras de las placas y sale del filtro prensa (McCabe, 2007).

Figura 1-3. Filtro prensa equipado para operación automática.



Fuente: (McCabe et al., 2007).

1.9. Tortas incompresibles y compresibles

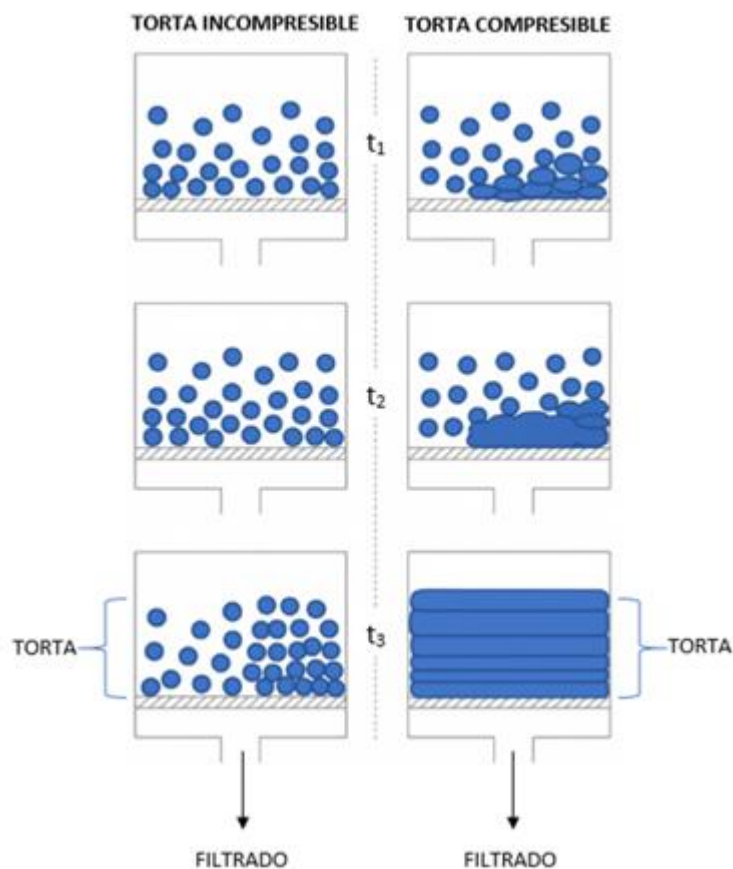
1.9.1. Tortas incompresibles

Cuando la torta está constituida por partículas granulares duras que le confieren una estructura rígida, ésta no experimenta deformaciones apreciables bajo la presión de filtración, considerándose por tanto incompresible. En tales condiciones, el coeficiente de compresibilidad adopta un valor igual a cero, reflejando que la resistencia de la torta permanece constante durante toda la operación; como resultado, la relación entre el tiempo de filtración y el volumen de filtrado al cuadrado (t vs. V^2) muestra un comportamiento lineal, característico de sistemas con tortas de resistencia independiente de la presión aplicada.

1.9.2. Tortas compresibles

Cuando la torta está formada por partículas blandas o deformables, su estructura se ve afectada significativamente por la presión aplicada durante la filtración, por lo que se considera compresible. En este caso, el coeficiente de compresibilidad adquiere un valor cercano a uno, indicando una reducción notable en la porosidad y permeabilidad a medida que aumenta la presión o la velocidad de filtración. Este tipo de tortas presenta una resistencia variable, ya que sus propiedades estructurales dependen directamente de las condiciones de operación. Diversos estudios señalan, además, que tanto la permeabilidad como la compresibilidad pueden relacionarse con la fracción de volumen de sólidos, lo que influye en la eficiencia global de la operación de filtración.

Figura 1-4. Comparación esquemática entre la filtración con torta incompresible y torta compresible.



Fuente: (Kol & De Somer, 2021).

1.10. Comparación con otras tecnologías de separación sólido-líquido

La selección de un equipo de separación sólido-líquido depende de múltiples factores: eficiencia de desaguado, costos de operación, facilidad de limpieza, grado de automatización y también criterios técnicos como resistencia mecánica o susceptibilidad al taponamiento u obstrucción.

En la siguiente tabla se presenta una comparación integral de las principales tecnologías, donde se combinan ventajas, limitaciones, aplicaciones típicas y características técnicas tomadas del Manual del Ingeniero Químico (Perry et al., 1999) y de textos clásicos de Operaciones Unitarias (McCabe, 2007), (Geankoplis, 1998).

Tabla 1-3. Comparación de tecnologías de separación sólido líquido

Tecnología	Ventajas	Limitaciones	Casos recomendados
Filtro prensa (placa y marco / membrana)	Alta eficiencia de desaguado; tortas secas; flexibilidad de tamaño	Operación por lotes; requerimiento de limpieza / cambio de telas	Minería, clarificación mostos, recuperación de sólidos valiosos, tratamiento de aguas
Centrífuga (bowl)	Procesos continuos; menor ocupación de espacio	Tortas más húmedas; mayor consumo energético	Procesos continuos, fracciones finas
Filtros rotatorios (drum, disc)	Operación continua; fácil automatización	Menor presión; no tan efectivo en tortas muy finas	Clarificación a gran escala
Lechos filtrantes (arena, multimedia)	Bajos costos iniciales; buen pretratamiento	Espacio grande; menor capacidad de desaguado	Potabilización y clarificación de agua
Filtración por membrana (micro/ultrafiltración)	Excelente retención de partículas finas; operación continua	Costosa; fouling y limpieza frecuente	Procesos farmacéuticos, alimentos, agua potable

Fuente: Adaptado de (McCabe et al., 2007), (Perry et al., 1999) y (Geankoplis, 1998).

1.11. Comparación de características técnicas de equipos de filtración

Tabla 1-4. Comparativa de parámetros técnicos de los equipos de filtración

Tipo de equipo →	Tubular	Placas y marcos	Tipo cuchilla	De espiral enrollada	De fibra hueca
Características ↓					
Sencillez del flujo	Buena	Mala	Regular	Regular	Regular
Resistencia al daño mecánico	Buena	Buena	Buena	Mala	Buena
Susceptibilidad al taponamiento	Buena	Mala	Mala	Mala	Mala
Retención de volumen	Mala	Buena	Buena	Buena	Buena
Facilidad de limpieza mecánica	Buena	Regular	Mala	Mala	Mala
Facilidad de aislamiento de pequeños volúmenes	Buena	Mala	Mala	Mala	Mala
Consumo de potencia	Buena	Buena	Regular	Buena	Mala

Fuente: Adaptado de (Perry et al., 1999).

1.12. Justificación técnica para la elección del filtro prensa

En un contexto académico y experimental como el del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU-UAJMS), la selección del equipo no se orienta a encontrar la alternativa con el mejor desempeño industrial absoluto, sino a identificar la tecnología que favorezca el aprendizaje profundo, la experimentación reproducible y la apropiación tecnológica por parte de los estudiantes. Bajo esta perspectiva, el filtro prensa no solo se alinea mejor con los objetivos formativos, sino que además ofrece ventajas claras en términos de operación, accesibilidad, mantenimiento y pertinencia regional.

Por estas razones, su elección se fundamenta en cuatro criterios complementarios que aseguran su adecuación integral al proyecto:

a) Criterio formativo: Transformación de limitaciones técnicas en oportunidades didácticas

Tabla 1-5. Análisis de limitaciones técnicas del equipo y su potencial educativo

Limitación técnica (Tabla 1-4)	Conversión en ventaja formativa	Competencia desarrollada
Sencillez del flujo: "Mala"	Visualización directa de líneas de flujo y distribución de presión.	Diagnóstico de problemas operativos
Susceptibilidad al taponamiento: "Mala"	Identificación temprana de fenómenos de cegamiento y formación de torta.	Optimización de ciclos de filtración
Facilidad de aislamiento de volúmenes pequeños "Mala"	Entrenamiento en el manejo de volúmenes de lote representativos y evaluación real de pérdidas.	Diseño de experimentos con criterio de escalabilidad. Cuantificación y análisis de pérdidas operativas

Fuente: Elaboración propia.

b) Criterio de factibilidad técnica local

Tabla 1-6. Matriz de viabilidad comparativa

Tecnología	Disponibilidad de materiales	Capacidad fabricación local	Mantenimiento local
Filtro prensa	Alta (excepto placas de PTFE)	Alta (soldadura, tornería básica)	Totalmente local
Sistemas tubulares	Media (sellos especializados)	Baja (precisión dimensional)	Dependiente de importación
Espiral enrollada	Baja (membranas espirales)	Nula	Imposible localmente
Fibra hueca	Baja (módulos específicos)	Nula	Imposible localmente

Fuente: Elaboración propia.

c) Criterio de transferencia tecnológica regional

Los estudiantes manipulan tecnología idéntica en principio a la utilizada en bodegas tarijeñas, con posibilidades de:

- Prácticas profesionales en contexto real
- Proyectos de investigación aplicada
- Desarrollo de protocolos específicos para la región

d) Criterio de integración curricular

La identificación de las competencias desarrolladas en el proyecto permite demostrar su coherencia con los resultados de aprendizaje establecidos en el plan de estudios de Ingeniería Química. Esta correspondencia confirma que el trabajo realizado contribuye directamente al desarrollo de las capacidades profesionales previstas en la formación.

Tabla 1-7. Integración de competencias específicas del proyecto dentro del marco curricular institucional

Práctica con filtro prensa	Asignatura	Resultado de aprendizaje
Cálculo de α y R_m	Operaciones Unitarias	Determinación de la resistencia específica de torta y del medio filtrante
Análisis t/V vs V	Fenómenos de Transporte	Aplicación de la Ley de Darcy a medios porosos
Diseño de placas fija y móvil.	Diseño de Equipos	Cálculo de esfuerzos por flexión

Fuente: Elaboración propia.

El equipo permite cuantificar por primera vez en el LOU:

- Curvas de compresibilidad
- Efecto de concentración en volumen filtrado
- Comportamiento diferencial en diferentes mezclas con sólidos en suspensión (arcilla vs sandía vs cal apagada)

La selección del filtro prensa se convierte así en un ejemplo claro de toma de decisiones en ingeniería: cuando los criterios de evaluación estándar (Tabla 1-4.) no representan por completo las condiciones reales de operación, el ingeniero debe ser capaz de definir indicadores propios que respondan a los objetivos técnicos del proceso. Este ejercicio, además de orientar la elección del equipo, refuerza una de las competencias esenciales en la formación del Ingeniero Químico: analizar un problema real y construir las métricas necesarias para resolverlo de manera fundamentada.

1.13. Dimensionamiento de un filtro prensa

1.13.1. Ciclo de filtración

La tecnología de desaguado es empleada por los filtros de prensa de placas empotradas o de membranas, está diseñada para funcionar en un proceso por lotes. Para completar este proceso discontinuo, el equipo atraviesa una serie de etapas que, en su conjunto, se conocen como el ciclo de desaguado del filtro de prensa o filtro por lotes.

Un ciclo típico de un filtro de prensa con placas consta de los siguientes pasos:

1. Cierre/sujeción de las placas de filtrado
2. Rellenado
3. Aumento de la velocidad/filtración
4. Soplado de núcleo (opcional)
5. Secado de los residuos (opcional)
6. Compresión de la membrana (opcional)
7. Desbloqueo/apertura de las placas de filtrado

1.13.2. Factores que afectan los tiempos del ciclo

Cada uno de los pasos del ciclo del filtro de prensa demora una cantidad de tiempo determinada. Esta duración varía en función de las características del material de pulpa que se desagua y del diseño del filtro de prensa.

Entre los factores de diseño del filtro de prensa que pueden influir sobre los tiempos del ciclo, podemos mencionar los siguientes:

- Espesor de las cámaras
- Presión de alimentación de la bomba para pulpa
- Velocidad de apertura y cierre de las placas de filtrado
- Diseño de las telas filtrantes

1.13.3. Ecuaciones de dimensionamiento

La ley de Darcy es una relación matemática aplicable al flujo de fluidos en medios porosos, establece que el caudal de un fluido es proporcional a la diferencia de presión

entre dos puntos y al área transversal del medio, e inversamente proporcional a la longitud del medio recorrido por el fluido. (Como un filtro o un pastel de sólidos).

Fue formulada por Henry Darcy (1856) y es válida para fluidos incompresibles y flujo laminar.

$$v = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad \text{Ec. (1.14)}$$

Dónde:

v : velocidad superficial del fluido (m/s)

k : permeabilidad del medio (m^2)

μ : viscosidad del fluido (Pa · s)

$\frac{dP}{dx}$: gradiente de presión (Pa/m)

1.13.4. Aplicación de la ley Darcy para la filtración

En filtración, adaptamos la ley Darcy al flujo a través de lo siguiente:

- Un medio filtrante (tela, papel, acero y entre otros medios).
- Una torta de sólidos formada sobre el mismo.

Donde el caudal volumétrico (dV/dt) a través de un área A , se expresa con la siguiente ecuación.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \cdot \Delta P}{\mu(R_c + R_m)} \quad \text{Ec. (1.15)}$$

Donde:

R_c : resistencia de la torta (m^{-1})

R_m : resistencia del medio filtrante (m^{-1})

ΔP : diferencia de presión total

μ : viscosidad

1.13.5. Expresión de la resistencia de la torta (R_c)

La resistencia de la torta crece con el volumen filtrado, ya que la torta se forma con los sólidos que se acumulan.

$$R_c = \alpha \frac{C \cdot V}{A} \quad \text{Ec. (1.16)}$$

Donde:

α : resistencia específica de la torta (m/kg)

C : concentración de sólidos $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

V : volumen de filtrado (m^3)

1.13.6. Sustitución en la ley de Darcy adaptada

Reemplazamos la resistencia de la torta (R_c) en la ecuación de Darcy para caudal.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \cdot \Delta P}{\mu \left(\alpha \cdot \frac{C \cdot V}{A} + R_m \right)} \quad \text{Ec. (1.17)}$$

Reordenamos para integrar (filtración a presión constante). Llevamos la ecuación a un formato que podamos integrar a presión constante.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{\mu (\alpha C V + A R_m)} \quad \text{Ec. (1.18)}$$

Separando variables

$$(\alpha C V + A R_m) dV = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{\mu} dt \quad \text{Ec. (1.19)}$$

Integrando desde $V = 0$ a V , y $t = 0$ a t

$$\int_0^V (\alpha C V + A R_m) dV = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{\mu} \int_0^t dt \quad \text{Ec. (1.20)}$$

Resolviendo la integral

$$\frac{\alpha C V^2}{2} + A R_m V = \frac{A^2 \cdot \Delta P}{\mu} t \quad \text{Ec. (1.21)}$$

Finalmente, despejamos t en función de V

$$t = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot C}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P} \cdot V^2 + \frac{\mu \cdot R_m}{A \cdot \Delta P} \cdot V \quad \text{Ec. (1.22)}$$

1.13.7. Ecuación de filtración a presión constante

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot C}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P} \cdot V + \frac{\mu \cdot R_m}{A \cdot \Delta P} \quad \text{Ec. (1.23)}$$

Esta es la ecuación clave para el diseño de filtros por presión constante: predice cuánto tiempo tarda en filtrarse un volumen V , o viceversa.

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Caracterización de la materia prima

En esta investigación se emplearon tres materiales base con propiedades físicas y químicas previamente evaluadas: una arcilla de origen local, pulpa de sandía y cal apagada.

Los materiales fueron seleccionados por representar sistemas de comportamiento diferente: uno inorgánico y predominantemente mineral y otro orgánico de estructura fibrosa, lo que permite evaluar la versatilidad del equipo frente a diferentes tipos de suspensión.

2.1.1. Selección de las suspensiones de prueba

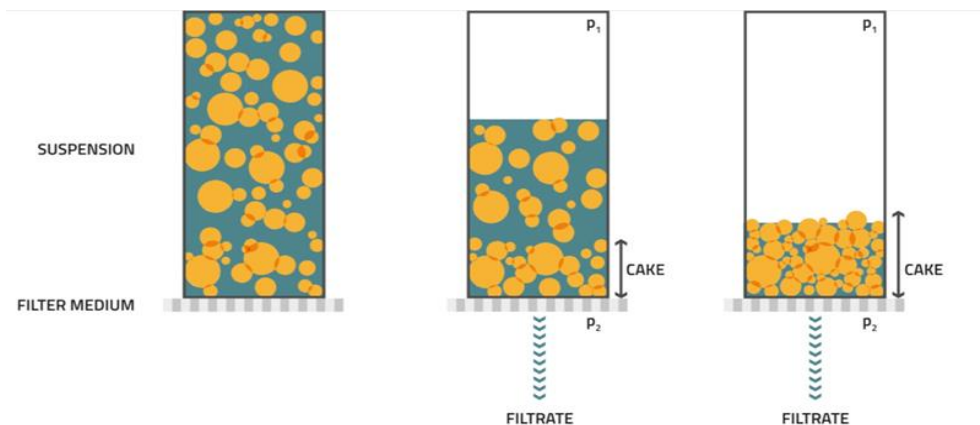
La selección de las soluciones a ensayar en el prototipo del filtro prensa se fundamentó en criterios de representatividad operacional, compatibilidad con el equipo diseñado y variabilidad de las propiedades de filtración. Se seleccionaron dos tipos de suspensión:

1. **Suspensión de arcilla natural:** se eligió por su uso habitual como suelo-modelo en ensayos de separación sólido-líquido y por su tendencia a formar tortas compactas de baja porosidad, lo que permite evaluar la eficiencia del sistema frente a una carga difícil de deshidratar.
2. **Suspensión de pulpa de sandía:** seleccionada por la facilidad de obtención, el carácter orgánico de los sólidos (fibrosos) y la variabilidad de su tamaño de partícula, de modo que el sistema pueda evaluarse frente a un reto de filtración distinto al de la arcilla.
3. **Suspensión de cal apagada:** Se eligió por su carácter químico básico ($\text{pH} > 12$) y su comportamiento contrastante como modelo de sólidos granulares no plásticos. A diferencia de la arcilla, tiende a formar tortas de alta porosidad y baja resistencia específica, lo que permite evaluar la eficiencia y versatilidad del sistema frente a una carga de fácil deshidratación y, simultáneamente, probar la compatibilidad química del equipo con medios fuertemente alcalinos.

Los criterios específicos de selección fueron:

- Concentración de sólidos que permita formación de torta en un tiempo razonable sin saturar el sistema.
- Compuestos químicamente inocuos para los materiales del filtro (evitar corrosión, degradación del sellado).
- Naturaleza contrastante de los sólidos para evaluar la compresibilidad de la torta, seleccionando materiales que, según la literatura, representen comportamientos opuestos: uno formador de tortas compresibles (arcilla, pulpa orgánica) y otro formador de tortas incompresibles o de baja compresibilidad (cal apagada). Esto permite validar experimentalmente los modelos teóricos de filtración a presión constante y determinar el coeficiente de compresibilidad para cada sistema.

Figura 2-1. Diagrama de “filtración de torta” mostrando la formación de torta bajo presión en una placa de filtración.



Fuente: (Van Den Akker et al., 2021).

2.1.2. Propiedades fisicoquímicas de la arcilla

La muestra de arcilla empleada presenta propiedades fisicoquímicas que influyen directamente en su desempeño durante la filtración sólido-líquido. A continuación, se detallan los parámetros más significativos.

Tabla 2-1. Parámetros fisicoquímicos de la arcilla.

Propiedad	Símbolo	Valor aproximado*	Unidad	Comentario
Densidad aparente	ρ_b	2.05 ± 2.65	g/cm^3	Depende del tipo de arcilla.
pH (suspensión suelo/agua)	pH	4.5 – 8	-	Suelos arcillosos pueden ser ligeramente ácidos.
Tamaño medio de partícula	d_o	< 2	μm	Parte de la fracción arcilla coloidal.
Superficie específica	S	hasta 1100	m^2/g	Alto en algunos tipos de arcillas.

Fuente: Adaptado de (Awad et al., 2019), (Nadziakiewicz et al., 2019).

2.1.3. Propiedades fisicoquímicas de la sandía

La suspensión de sandía también posee propiedades físico-químicas que afectan la dinámica de filtración. Aunque la bibliografía no se centra siempre en filtración a presión, hay estudios sobre sus propiedades físicas y químicas útiles como referencia.

Tabla 2-2. Parámetros típicos para sandía / pulpa de sandía

Propiedad	Símbolo	Valor aproximado*	Unidad	Comentario
Humedad inicial	H_i	94	% m/m	Pulpa de fruta fresca
Densidad aparente	ρ_b	0.95 – 1.03	g/cm^3	Según las partes de fruta; estudio sobre semillas obtuvo 0.915 g/cm^3 .
Tamaño de partícula (triturada)	d_{50}	-	μm	Depende de tamizado/triturado previo al ensayo.
Viscosidad de la suspensión	μ	-	$\text{mPa}\cdot\text{s}$	Según concentración de sólidos.

pH de la suspensión	pH	5.3 – 6.5	-	Frutas frescas suelen tener pH ácido.
Contenido de sólidos (orgánicos)	Cs	variable	% m/m	Según concentración de suspensión.

Fuente: Adaptado de (Ashoka et al., 2022), (Khater & Bhansawi, 2016).

2.1.4. Propiedades fisicoquímicas de la cal apagada

Las propiedades fisicoquímicas relevantes para la operación de filtración se presentan en la Tabla 2-3. Dado que los valores pueden variar según el origen y proceso de hidratación, se utilizaron valores de referencia reportados en la literatura para cal apagada comercial o de grado técnico.

Tabla 2-3. Parámetros fisicoquímicos de referencia de la cal apagada (hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad	Comentario
Fórmula química	$\text{Ca}(\text{OH})_2$		-	Hidróxido de calcio.
Densidad aparente	ρ_b	0.4 – 0.6	g/cm^3	Depende del grado de compactación y finura. Muy baja comparada con otros sólidos.
Solubilidad en agua	S	1.73	g/L	Baja solubilidad, forma una suspensión. La solubilidad disminuye con la temperatura.
Tamaño de partícula típico	d_{p50}	5 – 30	μm	Rango para productos comerciales, puede contener partículas submicrónicas.

pH de una suspensión saturada	pH	12.4 – 12.6	-	Medio fuertemente alcalino (básico).
Gravedad específica	GE	2.2 – 2.3	-	Referencia para cálculos de suspensión.
Temperatura de descomposición	T _{des}	> 580	°C	Se descompone en óxido de calcio (CaO) y agua.
Conductividad térmica (polvo)	k	0.12	W/(m·K)	Baja, considerado un aislante térmico.

Fuente: Adaptado de (Huntzinger & Eatmon, 2009), (Kosmatka et al., 2002), (Perry et al., 1999) y (Holman, 1998).

2.2. Diseño experimental general

El diseño experimental general se desarrolló con el propósito de evaluar el desempeño del filtro prensa construido y validar su eficiencia operativa en la separación sólido-líquido bajo condiciones controladas.

La secuencia metodológica del experimento se resume en la tabla 2-4.

Tabla 2-4. Esquema del procedimiento experimental general

Etapas	Actividad principal	Variable controlada	Resultado esperado
1	Preparación del fluido de ensayo	Concentración de sólidos	Suspensión homogénea reproducible
2	Obtención de la curva de calibración	Relación lineal entre la absorbancia y la concentración de la arcilla en las distintas disoluciones	Coefficiente de correlación cercano a 1

3	Montaje y calibración del sistema	Presión de entrada, estanqueidad	Equipo operativo sin fugas
4	Ejecución del ensayo	Tiempo y presión de filtrado	Obtención de curva volumen-tiempo
5	Análisis de muestras	Claridad del filtrado	Eficiencia de la operación determinada

Fuente: Elaboración propia (2025).

2.2.1. Variables experimentales

Las variables se clasificaron en variables independientes, dependientes y controladas, según se muestra en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5. Variables experimentales de la operación de filtración.

Tipo de variable	Nombre de variable	Símbolo	Unidad	Método de medición
Independiente	Presión de filtración	P	bar	Manómetro análogo ($\pm 0,05$ bar)
	Concentración de sólidos	Cs	kg	Balanza analítica ($\pm 0,001$ g)
Dependiente	Volumen filtrado	V	l	Probeta graduada (± 1 ml)
	Claridad del filtrado (absorbancia)	A	Unidades de absorbancia (UA)	Espectrofotómetro IVYMEN VR-2000

Controlada	Temperatura ambiente	T	°C	Termómetro digital
	Tiempo de filtración	t	s	Cronómetro digital
	Área de filtración	A _f	m ²	Diseño fijo del equipo

Fuente: Elaboración propia (2025).

2.3. Diseño mecánico del filtro prensa

2.3.1. Fundamentos del diseño del espesor de las placas fija y móvil

El cálculo del espesor de las placas del filtro prensa se realizó en función de la presión de operación del sistema (4 bar) y del área efectiva de filtración correspondiente a las medidas de las placas de PTFE (40 cm x 40 cm).

La fuerza total ejercida sobre las placas se determinó mediante la ecuación de presión estática:

$$F = P \cdot A \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

F = Fuerza

P = Presión

A = Área

Para poder calcular la fuerza mínima se calcula el valor del área efectiva de filtración que es lado por lado, y que la presión se encuentre en unidades coincidentes al área.

$$A = 40 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm} = 1600 \text{ cm}^2$$

$$P = 4 \text{ bar} \cong 4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Conociendo los datos se remplaza en la ecuación de 2.1.

$$F = P \cdot A = 4 \frac{\overrightarrow{\text{kg}}}{\text{cm}^2} \cdot 1600 \text{ cm}^2 = 6400 \overrightarrow{\text{kg}}$$

Al conocer la fuerza se procede a utilizar la ecuación 2.2 que representa el esfuerzo máximo por flexión ($\sigma_{\max}$), esta información se encuentra en el Manual de fórmulas técnicas (Gieck, 2007), expresado como:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{S} = \frac{\frac{F \cdot l}{4}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Datos conocidos para la fórmula de esfuerzo máximo por flexión ya que representa Momento máximo ($M_{\max}$) y módulo de sección (S).

$$\sigma_{\max} = 1122 \frac{\overrightarrow{\text{kg}}}{\text{cm}^2}$$

$$F = 6400 \overrightarrow{\text{kg}}$$

$$b = 40 \text{ cm}$$

$$l = 50 \text{ cm}$$

Haciendo cálculos por separado para el facilitar cálculo del espesor de las placas, principalmente momento máximo ya que se conoce todos los valores de sus variables.

$$M_{\max} = \frac{F \cdot l}{4} = \frac{6400 \overrightarrow{\text{kg}} \cdot 50 \text{ cm}}{4} = 80000 \overrightarrow{\text{kg}} \cdot \text{cm}$$

Una vez conocido el valor del momento máximo, quedando ecuación de la siguiente manera.

$$1122 \frac{\overrightarrow{\text{kg}}}{\text{cm}^2} = \frac{80000 \overrightarrow{\text{kg}} \cdot \text{cm}}{\frac{40 \text{ cm} \cdot h^2}{6}}$$

Consecutivamente se despeja h mediante la ley de extremos y medios.

$$1122 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = \frac{480000 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{40 \text{ cm} \cdot h^2}$$

Finalmente se despeja y se calcula el valor h que es el espesor de la placa fija y móvil.

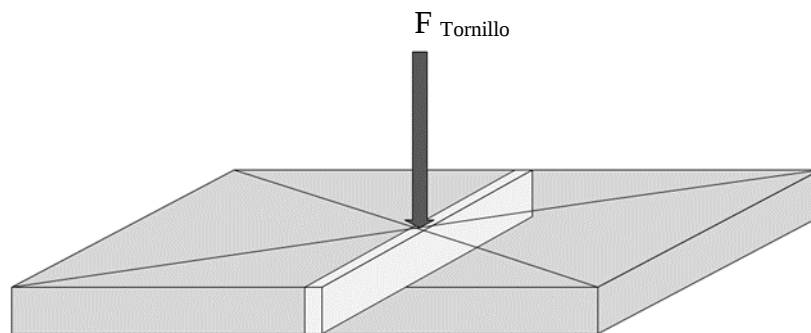
$$h^2 = \frac{480000 \text{ kg} \cdot \text{cm}}{1122 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 40 \text{ cm}} = 10.695 \text{ cm}^2$$

$$h = \sqrt{10.695} = 3.27 \text{ cm}$$

De esa manera se calculó el espesor de las placas para su construcción.

2.3.2. Diseño del tornillo de cierre en la placa móvil

El dimensionamiento del tornillo se efectuó considerando la torsión generada durante el apriete manual.



El esfuerzo admisible a la torsión es igual al torque por el radio dividido el momento polar, simplificando:

$$\tau_{\text{adm}} = \frac{T \cdot 2}{\pi \cdot r^3} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde:

τ_{adm} = Esfuerzo admisible a la torsión

T = Torque o momento de fuerza

r = radio del tornillo

En función a esta ecuación se calcula el diámetro que deberá tener el tornillo que ajuste a la placa móvil con el sistema de filtración para asegurar un margen de seguridad estructural.

τ_{adm} tiene un valor de $600 \left(\frac{\vec{\text{kg}}}{\text{cm}^2} \right)$ correspondiente al acero con contenido medio de carbono SAE 1045 (Shigley & Budynas, 2015).

Partiendo de la ecuación de momento de fuerza:

$$T = F \cdot d \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde:

T = Torque o momento de fuerza

F = Fuerza aplicada

d = brazo de palanca

Asumiendo que:

- Una persona en promedio ejecuta 10 kg de fuerza en cada mano.
- La distancia desde el centro del tornillo es de 25 cm
- Se realiza la fuerza en 2 varillas o palancas del timón

Entonces sustituyendo en la ecuación 2.4:

$$T = 10 \vec{\text{kg}} \cdot 25 \text{ cm} \cdot 2$$

$$T = 500 \vec{\text{kg}} \cdot \text{cm}$$

Despejando r de la ecuación 2.3 y sustituyendo valores:

$$r^3 = \frac{T \cdot 2}{\pi \cdot \tau_{adm}} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

$$r^3 = \frac{500 \overrightarrow{\text{kg}} \cdot \text{cm} \cdot 2}{\pi \cdot 600 \overrightarrow{\text{kg}} / \text{cm}^2}$$

$$r^3 = 0.8 \text{ cm}$$

Por lo tanto, el diámetro del tornillo deberá ser de 1,6 cm o aproximadamente 2 cm para que soporte la fuerza aplicada.

$$\theta_{\min} = 2 \text{ cm}$$

2.3.3. Cálculos de las varillas roscadas (soportes centrales)

Para el cálculo de diámetro de las varillas roscadas se consideró la fuerza que se ejerce en la placa fija y móvil, al ser 2 soportes la fuerza se divide entre los 2.

$$F = 6400 \overrightarrow{\text{kg}}$$

$$F_{\text{sopor}} = \frac{6400 \overrightarrow{\text{kg}}}{2} = 3200 \overrightarrow{\text{kg}}$$

Al conocer la Fuerza de cada soporte, se procede a calcular el área (A), conociendo los de esfuerzo de tensión (σ). Esta información se encuentra en el Manual de fórmulas técnicas Gieck 31ª edición aplicada*.

$$\sigma = 15.296 \overrightarrow{\text{kg}}$$

Para determinar el valor del área se calcula a través de la siguiente ecuación que se encuentra en el Manual de fórmulas técnicas Gieck 31ª edición aplicada*.

$$A = \frac{F_{\text{sopor}}}{\sigma} = \frac{3200 \overrightarrow{\text{kg}}}{15.296 \overrightarrow{\text{kg}} / \text{mm}^2} = 209.205 \text{ mm}^2$$

Conociendo estos valores se procedió a usar la siguiente ecuación para determinar el área de un círculo, para posteriormente de ahí despejar el diámetro (D) que es el valor que nos interesa.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Despejando el diámetro, quedando la ecuación de la siguiente manera y calcula el valor del diámetro.

$$D^2 = \frac{A \cdot 4}{\pi} = \frac{209.205 \text{ mm}^2 \cdot 4}{\pi} = 266.37 \text{ mm}^2$$

$$D = \sqrt{266.33 \text{ mm}^2} = 16.32 \text{ mm}$$

2.3.4. Cálculo del área efectiva del medio filtrante

Tomando como referencia la ecuación de filtración definida por la ley de Darcy (Ec. 1.15), se realiza el cálculo correspondiente al área de filtración.

Mediante la inserción de la ecuación 1.16 en la ecuación 1.15, se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \cdot \Delta P}{\mu(R_m + \alpha \frac{C \cdot V}{A})} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Despejando el producto de la fuerza impulsora ΔP y el área:

$$\frac{dV}{dt} \cdot \mu (R_m + \alpha \frac{C \cdot V}{A}) = \Delta P \cdot A \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Dado que el término dV/dt representa la tasa de variación del volumen filtrado con respecto al tiempo, este corresponde directamente al caudal volumétrico de filtración, denotado como Q , quedando la ecuación de la siguiente manera.

$$Q \cdot \mu \cdot R_m + Q \cdot \mu \cdot C_s \cdot \frac{V}{A} = \Delta P \cdot A \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Teniendo la ecuación se procede multiplicar cada término de la ecuación por el área, se deriva una ecuación de segundo grado.

$$(Q \cdot \mu \cdot R_m \cdot A) + (Q \cdot \mu \cdot \alpha \cdot C_s) = \Delta P \cdot A^2 \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Ordenando:

$$(\Delta P \cdot A^2) - (Q \cdot \mu \cdot R_m \cdot A) - (Q \cdot \mu \cdot \alpha \cdot C_s \cdot V) = 0 \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Mediante la ecuación cuadrática.

$$A = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Efectuando la sustitución de los valores, tras utilizar los datos de las tablas 3-1, 3-12 y 3-13, haciendo cálculos matemáticos donde queda la ecuación cuadrática de la siguiente manera.

$$31000 A^2 - 3.65 \times 10^5 A - 2 \times 10^5 = 0$$

Se llega a la siguiente solución:

$$A = 1.589 \text{ m}^2$$

Este valor representa el área efectiva total del medio filtrante, tomando en cuenta las 10 cámaras por placa del filtro prensa. Posteriormente, se realiza la división para determinar el área efectiva individual de cada medio filtrante.

$$A = 0.159 \text{ m}^2$$

Este resultado es coherente con las dimensiones reales del medio filtrante. Si bien el cálculo arroja un área de 0.158 m^2 , mientras que el área nominal de las placas es de 0.16 m^2 , la diferencia se justifica debido a las tolerancias propias de fabricación, el área adicional aportada por el pliegue del tejido filtrante y las zonas activas de paso de fluido que no se consideran en la medida geométrica plana. Por lo tanto, el valor obtenido es consistente con las dimensiones operativas, verificando la validez del procedimiento de cálculo.

En la tabla 2-6. se tabularon los datos calculados de área total efectiva respecto al tiempo, estos valores se obtuvieron utilizando la ecuación cuadrática, con los datos conocidos como volumen filtrado, tiempo de filtración, resistencias específicas de la torta (α), resistencia del medio filtrante (R_m), caudal y concentración de 2.5 kg/m^3 . De la misma manera se tabuló la tabla 2-7, está a una concentración de 5 kg/m^3 .

Tabla 2-6. Cálculo del área total efectiva N.º 1

Tiempo (s)	Tiempo (milisegundos)	Área total efectiva del medio filtrante(m^2)
10	10000	1.73
20	20000	1.67
30	30000	1.638
40	40000	1.629
50	50000	1.62
60	60000	1.615
70	70000	1.6025
80	80000	1.589

Fuente: Elaboración propia (2025).

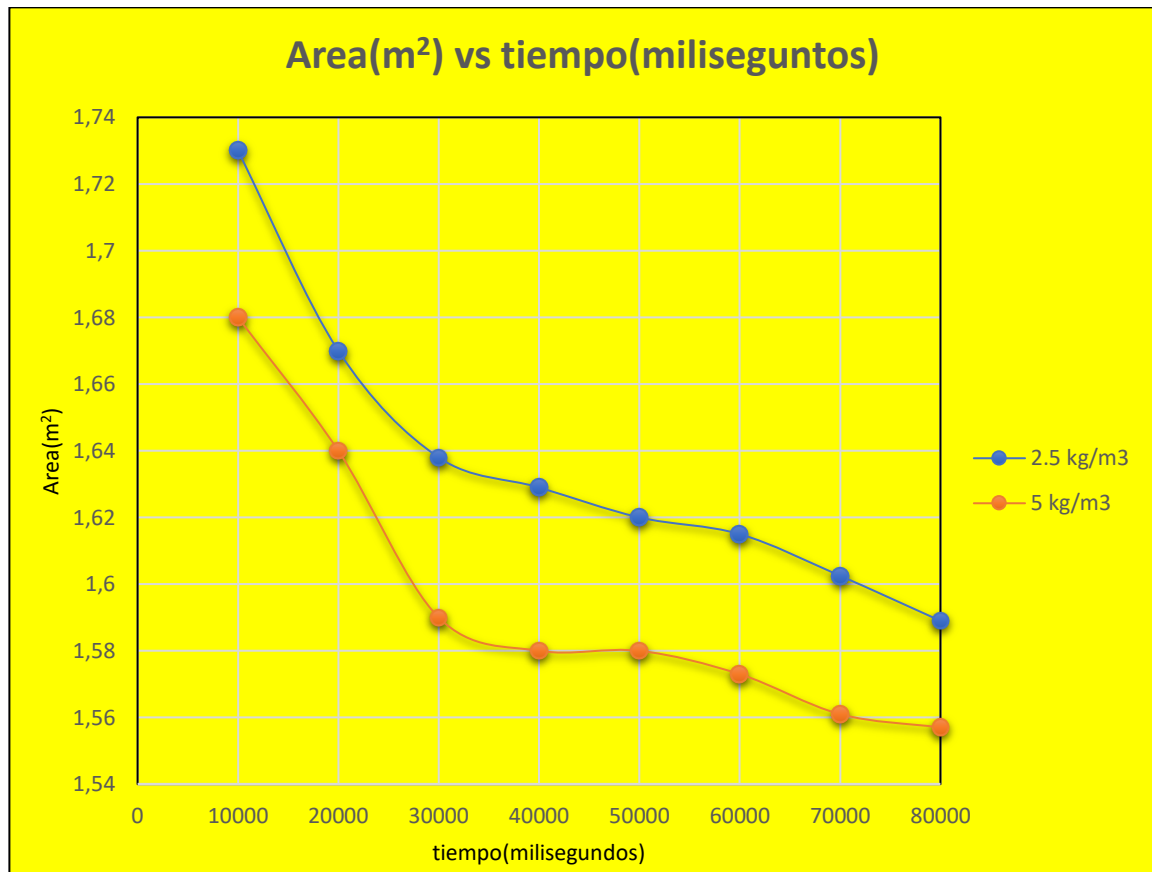
Tabla 2-7. Cálculo del área total efectiva N.º 2

Tiempo (s)	Tiempo (milisegundos)	Área total efectiva del medio filtrante(m^2)
10	10000	1.68
20	20000	1.64
30	30000	1.59
40	40000	1.58
50	50000	1.58
60	60000	1.573
70	70000	1.561
80	80000	1.557

Fuente: Elaboración propia (2025).

Finalmente se tiene la gráfica representativa de como el área disminuye respecto al tiempo de operación de filtración con diferentes concentraciones a filtrar.

Gráfico 2-1. Comportamiento del área de filtración efectiva respecto al tiempo de operación.



Fuente: Elaboración propia (2025).

2.4. Elección y justificación del medio filtrante para el prototipo

Para la selección del medio filtrante óptimo para el filtro prensa de laboratorio, se realizó un análisis de matriz de factor ponderado considerando los criterios más relevantes para el contexto operativo y pedagógico del equipo. Se evaluaron cuatro alternativas representativas:

- Telas de fibras tejidas (algodón/poliéster)
- Telas metálicas (acero inoxidable)
- Papeles de filtro de celulosa

- Membranas poliméricas (acetato de celulosa)

Los criterios de evaluación se ponderaron según su relevancia para:

- (25%) Compatibilidad química con suspensiones (resistencia a hidrólisis y pH 4.5-8)
- (20%) Facilidad de descarga y limpieza (reusabilidad)
- (18%) Costo por filtración
- (15%) Resistencia mecánica a 4 bar y ciclos repetidos
- (12%) Versatilidad para diferentes tipos de suspensión
- (10%) Disponibilidad en el mercado local

Tabla 2-8. Matriz de factores ponderados para la selección del medio filtrante.

Criterio de Selección	Pond.	Telas Tejidas (Algodón/ Poliéster)		Telas Metálicas (Acero Inox.)		Papeles de Filtro (Celulosa)		Membrana Polimérica (Acetato de Celulosa)	
		Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.
Compatibilidad química con suspensiones	25%	7	1.75	8	2	6	1.5	10	2.5
Facilidad de descarga y limpieza	20%	8	1.6	10	2	3	0.6	7	1.4
Costo por filtración	18%	9	1.62	5	0.9	10	1.8	8	1.44

Resistencia mecánica a 4 bar y ciclos repetidos	15%	8	1.2	10	1.5	4	0.6	9	1.35
Versatilidad para diferentes tipos de suspensión	12%	7	0.84	8	0.96	5	0.6	10	1.2
Disponibilidad en el mercado local	10%	8	0.8	6	0.6	9	0.9	9	0.9
PUNTUACIÓN TOTAL PONDERADA	100%		7.81		7.96		6		8.79

Fuente: Elaboración propia

Como resultado del análisis de la matriz ponderada, las membranas poliméricas de acetato de celulosa obtuvieron la puntuación más alta (8.79/10), confirmándose como la selección óptima. La versatilidad constituye una ventaja decisiva, estas membranas manejan eficientemente tanto partículas minerales finas (arcilla, cal apagada) como material orgánico fibroso (sandía) sin requerir cambios de medio entre experimentos, optimizando el tiempo de práctica y reduciendo costos operativos.

El costo-eficiencia considera la amplia disponibilidad de este tipo de membranas en el mercado tarijeño, con múltiples proveedores que ofrecen diversas dimensiones y especificaciones. Esto reduce significativamente los tiempos de adquisición y permite optimizar costos mediante la selección de formatos específicamente adaptados a las dimensiones del filtro prensa.

2.5. Fundamentos para la selección de la bomba

La presión de operación del sistema se estableció en 4 bar, valor típico en aplicaciones industriales de filtración, dado que la mayoría de las bombas de uso general y los equipos de filtración por presión operan en este rango. La elección de la bomba se fundamentó en criterios de disponibilidad comercial, compatibilidad de materiales, costo y facilidad de mantenimiento.

Tabla 2-9. Matriz de factores ponderados para la selección de la bomba.

Criterio de Selección	Pond.	Tipos de bombas							
		Cinética		Desplazamiento positivo					
		Centrífuga radial		De diafragma		Peristáltica		De engranajes	
		Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.
Compatibilidad con Suspensiones	20%	9	1.8	7	1.4	8	1.6	4	0.8
Presión de Trabajo	18%	8	1.44	8	1.44	6	1.08	9	1.62
Costo Total	15%	9	1.35	5	0.75	4	0.6	3	0.45
Disponibilidad Local (Tarija)	13%	10	1.3	5	0.65	4	0.52	4	0.52
Adecuación a Filtración	12%	8	0.96	9	1.08	6	0.72	6	0.72

Eficiencia Energética	9%	7	0.63	6	0.54	5	0.45	7	0.63
Facilidad Mantenimiento	8%	9	0.72	6	0.48	5	0.4	5	0,4
Seguridad Operativa	5%	10	0.5	5	0.25	5	0.25	5	0.25
PUNTUACIÓN TOTAL PONDERADA	1		8.7		6.59		5.62		5.39

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los criterios y ponderaciones se basan en: (Mott, 2015) para compatibilidad con fluidos; (McCabe et al. 2007) para adecuación a operaciones de filtración; (Perry et al. 1999) para eficiencia energética; e investigación de mercado local en Tarija (2025) para disponibilidad y costos.

Se justifica la elección de una bomba centrífuga con los resultados obtenidos en la matriz de factores ponderados de la tabla 2-9, con una notable diferencia frente a demás opciones, se seleccionó una bomba centrífuga por ser la opción más adecuada en términos de simplicidad constructiva, confiabilidad y resistencia al manejo de suspensiones con bajo contenido de sólidos abrasivos. Además, este tipo de bomba ofrece un flujo continuo y estable, con menores requerimientos de mantenimiento comparado con una bomba de desplazamiento positivo, la cual, aunque proporciona una presión más uniforme, presenta limitaciones ante partículas abrasivas y un costo considerablemente mayor al requerir componentes especiales (sellos y rotores de alta dureza).

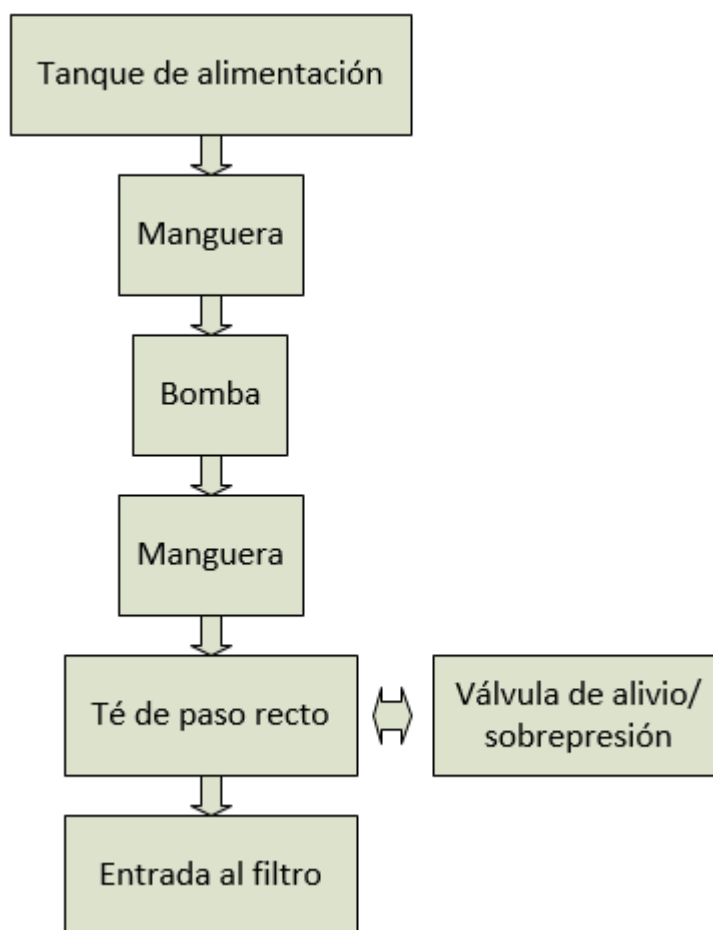
En consecuencia, la bomba centrífuga garantiza un desempeño eficiente y seguro dentro del rango operativo definido para el prototipo del filtro prensa.

2.6. Justificación de la selección de accesorios

El tramo de alimentación hacia el filtro prensa se diseñó con una configuración específica de accesorios para garantizar la operación segura y controlada del sistema. La disposición y selección de cada componente se fundamenta en criterios operativos y de seguridad.

La configuración analizada es la siguiente, en dirección del flujo:

Figura 2-2. Configuración de elementos del sistema de filtración.



Fuente: Elaboración propia

Té de Paso Recto de 1" Se seleccionó un Té estándar (igual entrada y salidas) para crear un punto de derivación. La función de esta derivación es exclusivamente de

seguridad: en la salida lateral se conecta una válvula de alivio. Durante la operación normal de filtración, el flujo pasa de manera recta a través del Té, dirigiéndose hacia el filtro.

Válvula de Alivio/Sobrepresión de 1": Conectada a la derivación lateral del Té. No contribuye a las pérdidas de carga en el cálculo del flujo principal, ya que en condiciones normales de operación (presión por debajo de su punto de ajuste) permanece cerrada, y el fluido no circula por su rama. Su función es puramente de protección del equipo: libera presión automáticamente si se excede el valor máximo seguro en el sistema (por ejemplo, por un bloqueo accidental), protegiendo la integridad del filtro prensa, las mangueras y la bomba.

Válvula de Bola de Paso Completo de 1": La selección de la válvula de bola como elemento de bloqueo principal se respalda mediante un análisis multicriterio, cuyos resultados se presentan en la Tabla 2-10. Las alternativas evaluadas fueron:

- Válvula de Bola: Válvula de cuarto de giro con un obturador esférico perforado.
- Válvula de Compuerta: Válvula de vueltas múltiples que abre o cierra mediante una compuerta vertical.
- Válvula de Mariposa: Válvula de cuarto de giro con un disco giratorio en el centro del flujo.
- Válvula de Globo: Válvula de vueltas múltiples diseñada para estrangulación y cierre, con un obturador que se mueve perpendicular al flujo.

Tabla 2-10. Matriz de factores ponderados para la selección de la válvula.

Criterio de Selección	Pond.	Válvula de Bola		Válvula de Compuerta		Válvula de Mariposa		Válvula de Globo	
		Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.
Pérdida de Carga	20%	7	1.4	6	1.2	5	1	4	0.8

Estanqueidad	20%	10	2	9	1.8	10	2	10	2
Resistencia a Atascamiento	15%	8	1.2	4	0.6	6	0.9	3	0.45
Facilidad Operación Manual	15%	10	1.5	5	0.75	10	1.5	5	0.75
Costo Unitario	15%	6	0.9	8	1.2	4	0.6	5	0.75
Disponibilidad Local	10%	8	0.8	8	0.8	4	0.4	6	0.6
Durabilidad	5%	6	0.3	5	0.25	6	0.3	5	0.25
PUNTUACIÓN TOTAL PONDERADA	1		8.1		6.6		6.7		5.6

Fuente: Elaboración propia

La Válvula de Bola obtuvo la puntuación ponderada más alta (8.1/10), confirmándose como la opción óptima. Su superioridad se debe a su combinación única de características:

- Mínima pérdida de carga (crítico para la eficiencia del filtro).
- Excelente estanqueidad y resistencia al atascamiento (ideal para suspensiones con sólidos).
- Operación manual rápida y sencilla (cuarto de giro).
- Buen balance entre costo, disponibilidad local y durabilidad.

Las alternativas presentan desventajas decisivas para esta aplicación: la Válvula de Compuerta es propensa a atascarse y de operación lenta; la Válvula de Mariposa

introduce una pérdida de carga significativa, es muy costosa y no hay en el mercado local; y la Válvula de Globo es costosa, muy propensa a atascarse y diseñada para estrangulación, no para bloqueo puro.

Por lo tanto, la selección de la Válvula de Bola de Paso Completo de 1" está técnicamente justificada y es la más adecuada para los requisitos operativos y económicos del sistema de alimentación del filtro prensa.

2.7. Pérdidas por fricción en el sistema de filtración

Para el cálculo de las pérdidas de carga se utilizó la ecuación de Darcy.

$$h_f = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \cdot \frac{L}{D} \cdot f \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga por fricción debida al flujo del fluido en la tubería. (m)

v = Velocidad promedio del fluido dentro de la tubería. (m/s)

ρ = Densidad del fluido. (kg/m³)

L = Longitud de la tubería (m)

D = Diámetro interno de la tubería. (m)

f = Factor de fricción de Darcy-Weisbach.

A partir de esta ecuación general, se procede a realizar los cálculos con los datos que se tuvo como ser: El caudal de la bomba (Q), diámetro de la manguera (D), longitud de la tubería (L), rugosidad absoluta de la manguera (ϵ) y también las propiedades físicas del agua viscosidad (μ), densidad (ρ).

Datos conocidos:

$$L = 0.4 \text{ m}$$

$$Q = 0.000833 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D = 0.0254 \text{ m}$$

$$\varepsilon = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.001 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

Una vez conociendo estos datos con exactitud, se calcula la rugosidad relativa ε/D :

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.0254 \text{ m}}{1.5 \times 10^{-6} \text{ m}} = 5.9 \times 10^{-5}$$

Seguidamente se calcula el área transversal (A) como también la velocidad (v):

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.0254 \text{ m})^2}{4} = 5.067 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.000833 \text{ m}^3/\text{s}}{5.067 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.6444 \text{ m/s}$$

Luego se calcula el número de Reynolds (Re) con los datos obtenidos:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Ec. (2.14)}$$

$$Re = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 1.6444 \text{ m/s} \cdot 0.0254 \text{ m}}{0.001 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 41767.76$$

Conocido el valor de Re y de E/D , se procede a utilizar la gráfica de Moody (Gráfico VI.1 – Anexo VI) para determinar el valor del factor de fricción:

$$f = 0.022$$

Luego, se calcula las longitudes de los accesorios que se utilizó para alimentación del filtro (Té, Válvula de Bola). A través de la Tabla VI.1 expuesta en el anexo VI de este documento.

Se obtuvo los siguientes valores.

Para: la válvula de bola = 0.2 m

Para: $Té = 0.5 \text{ m}$

Luego, se sumaron las longitudes de tramos rectos y de los accesorios:

$$LT = L_{\text{Rectos}} + L_{\text{Accesorios}} \quad \text{Ec. (2.15)}$$

$$LT = 0.4 \text{ m} + (0.2 \text{ m} + 0.5 \text{ m}) = 1.1 \text{ m}$$

Finalmente, se reemplaza en la ecuación de Darcy (Ec. 2.13) para determinar las pérdidas por fricción:

$$hf = \frac{1}{2} \cdot (1.644 \text{ m/s})^2 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1.1 \text{ m}}{0.0254 \text{ m}} \cdot 0.022 = 1288 \text{ Pa}$$

2.8. Descripción de la operación experimental del fluido a filtrar

2.8.1. Primera práctica experimental (torta compresible - arcilla)

Para la preparación de la mezcla empleada en la operación de filtración, se utilizó arcilla como soluto, la cual fue disuelta en agua hasta obtener una mezcla homogénea. Esta mezcla se preparó con el propósito de ser utilizada en las pruebas experimentales de filtración mediante filtro prensa, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema y las características de la operación de separación sólido-líquido.

Fotografía 2-1. Arcilla empleada para la elaboración de la mezcla de alimentación del filtro.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez obtenida la arcilla, se realizaron investigaciones previas para determinar su grado de solubilidad en agua y sus propiedades físico-químicas relevantes para la operación. Con esta información, se procedió a la trituration del material debido a que la arcilla se encontraba en forma de terrón, con el propósito reducir su tamaño de partícula.

Fotografía 2-2. Trituración del terrón de arcilla para la obtención de partículas finas utilizadas en la preparación de la suspensión de filtración.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Esta reducción de tamaño también tuvo como finalidad facilitar el pesaje del material, ya que se trabajó con cantidades pequeñas para la preparación de la mezcla patrón, las cuales fueron empleadas para evaluar la estabilidad de la suspensión, así como para observar el comportamiento de precipitación y determinar las condiciones más adecuadas para la operación de filtración en el filtro prensa.

Fotografía 2-3. Pesaje de la arcilla para su disolución en distintas proporciones de agua.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez determinada la mezcla patrón, correspondiente a una concentración de 0.5 g de arcilla disuelta en 100 mililitros de agua de grifo, se procedió a la preparación de una serie de mezclas diluidas a partir de esta muestra inicial. Las proporciones utilizadas fueron 1:2, 1:4, 1:5, 1:8 y 1:10, con el propósito de evaluar el comportamiento de sedimentación y la estabilidad de la suspensión en cada una de ellas, determinando así las condiciones más adecuadas para la posterior operación de filtración en el filtro prensa.

Fotografía 2-4. Preparación de patrones para su lectura en el espectrofotómetro.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez preparadas las mezclas, se procedió a llevar las muestras al espectrofotómetro con el fin de determinar la absorbancia de cada una de ellas a una longitud de onda de 425 nm. Este valor se seleccionó para evaluar la intensidad de la luz absorbida por las partículas de arcilla en suspensión, la cual está relacionada directamente con la concentración del soluto presente en la muestra, como lo establece la Ley de Lambert-Beer. “La absorbancia de una solución es proporcional a la concentración del soluto y a la longitud del trayecto óptico.” (Mayerhöfer et al., 2020).

Fotografía 2-5. Lectura de absorbancia en espectrofotómetro.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez obtenidos los resultados de absorbancia correspondientes a las seis disoluciones preparadas, estos fueron registrados y organizados en una tabla de resultados, como se muestra a continuación, para su posterior representación gráfica.

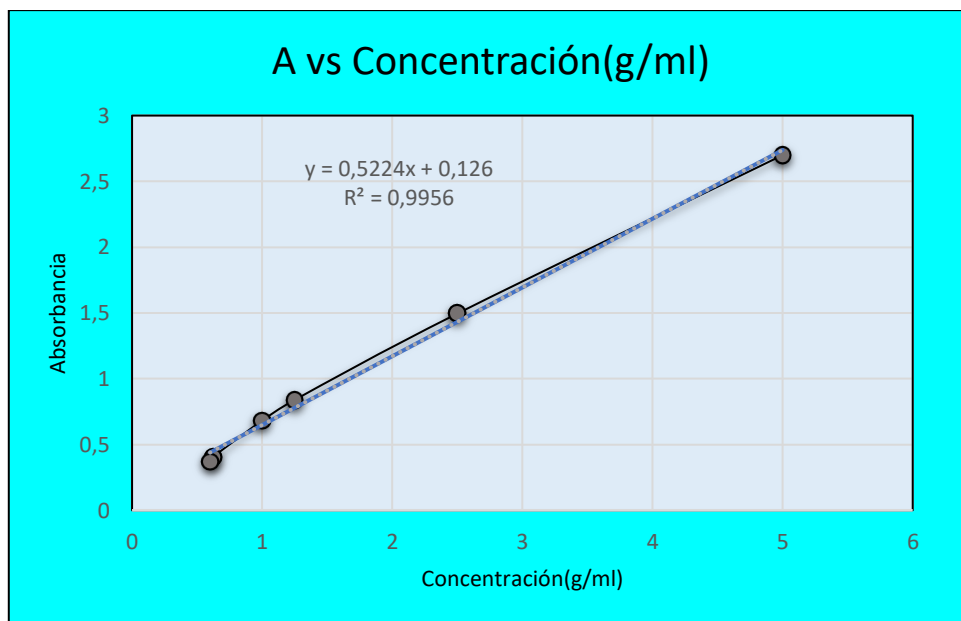
Tabla 2-11. Datos obtenidos de absorbancia para diferentes concentraciones de disolución de arcilla.

Mezcla	Concentración (g/ml)	Absorbancia (UA)
Patrón	5	2.699
1:2	2.5	1.495
1:4	1.25	0.839
1:5	1	0.682
1:8	0.625	0.407
1:10	0.5	0.367

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la gráfica de calibración, se puede apreciar la relación lineal entre la absorbancia y la concentración de la arcilla en las distintas mezclas, la cual se pudo determinar mediante pruebas experimentales realizadas con el espectrofotómetro, esta relación permite identificar claramente los valores máximos y mínimos de absorbancia, correspondientes a las concentraciones más alta y más baja de arcilla que pudo determinar mediante un análisis realizado en el laboratorio. Asimismo, la gráfica constituye una herramienta fundamental para futuras prácticas experimentales, ya que, si se desea trabajar con una muestra de concentración desconocida, basta con medir su absorbancia a 425 nm y localizar dicho valor en la curva de calibración para determinar su concentración aproximada.

Gráfico 2-2. Curva de calibración de la arcilla con puntos máximos y mínimos.



Fuente: Elaboración propia (2025).

2.8.2. Segunda práctica experimental (torta compresible - sandía)

Preparación de la segunda mezcla, para definir la concentración máxima a utilizar en las prácticas de filtración en el equipo.

Para la preparación de la mezcla empleada en la segunda prueba de filtración, se utilizó pulpa de sandía como material sólido, la cual fue triturada y mezclada con agua hasta obtener una suspensión homogénea. Esta mezcla se preparó con el propósito de ser utilizada en las pruebas experimentales de filtración mediante filtro prensa, permitiendo analizar el comportamiento del sistema y las características de la operación de separación sólido-líquido correspondiente a este material.

Fotografía 2-6. Sandía utilizada para la prueba experimental



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez obtenida la sandía, se procedió al pelado del fruto con el fin de emplear exclusivamente la pulpa. Posteriormente, la pulpa fue troceada en pequeños pedazos para facilitar su manipulación y lograr una mezcla más homogénea durante la preparación de la suspensión. Este procedimiento se realizó con el propósito de disponer de un material uniforme y adecuado para las pruebas experimentales de filtración mediante filtro prensa.

Fotografía 2-7. Trituración de la sandía



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez obtenidos los trozos pequeños de pulpa de sandía, se procedió a su trituración empleando una licuadora. Este paso permitió moler y desintegrar completamente los trozos de pulpa, obteniendo así un líquido concentrado homogéneo, el cual fue utilizado para la preparación de la mezcla patrón.

Fotografía 2-8. Trituración para concentrado homogéneo de la sandía.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez obtenido el líquido concentrado de sandía, se prepararon varias mezclas con diferentes concentraciones para observar su estabilidad, durante los primeros dos minutos se evaluó cuál de ellas se mantenía más uniforme, eligiéndose esta como la mezcla patrón para la preparación de disoluciones que nos ayudaran hacer la curva de calibración.

Fotografía 2-9. Preparación para determinar la mezcla patrón.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez determinada la mezcla patrón, correspondiente a una concentración de 10 g de pulpa de sandía en 100 mililitros de agua de grifo, se prepararon mezclas en proporciones 1:2, 1:4, 1:5, 1:8 y 1:10. Posteriormente, se realizaron las lecturas de absorbancia utilizando un espectrofotómetro a una longitud de onda de 425 nm, valor seleccionado por ser el estándar de referencia para este tipo de análisis. La absorbancia se utilizó para evaluar la intensidad de la luz absorbida por las partículas en suspensión, la cual está directamente relacionada con la concentración del soluto presente en la muestra, de acuerdo con la Ley de Lambert-Beer.

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2-12. Datos obtenidos de absorbancia para diferentes concentraciones de mezcla de sandía.

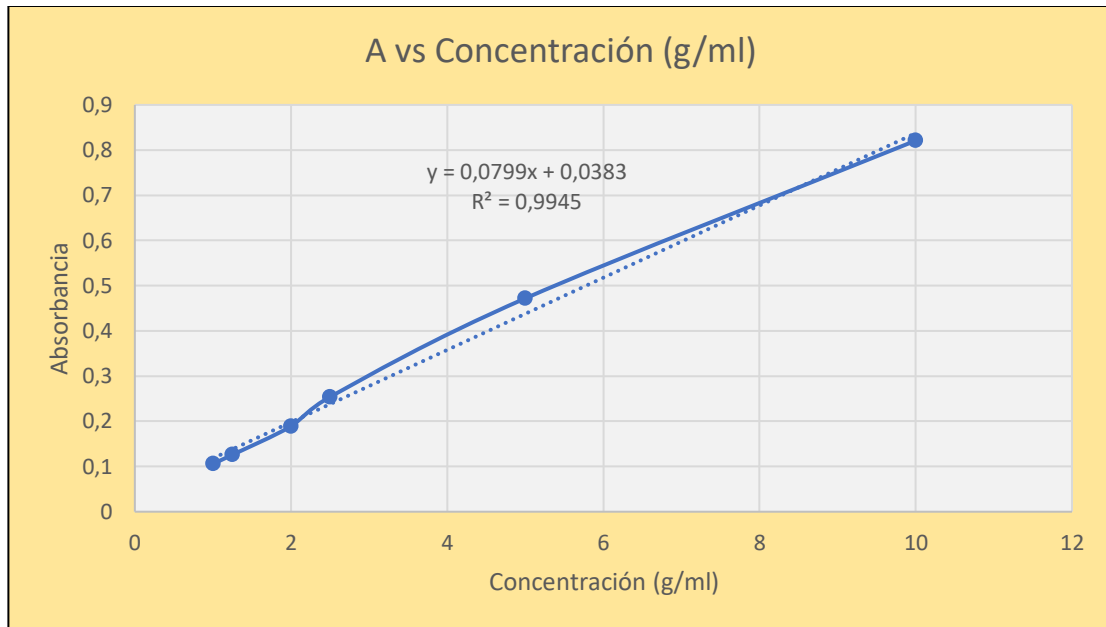
Mezcla	Concentración (g/ml)	Absorbancia
Patrón	10	0.821
1:2	5	0.472
1:4	2.5	0.254
1:5	2	0.189
1:8	1.25	0.126
1:10	1	0.106

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la gráfica de calibración se observa una relación lineal entre la absorbancia y la concentración de la sandía en las diferentes mezclas. Esta relación permitió identificar los valores máximos y mínimos de absorbancia, correspondientes a las concentraciones más alta y más baja de las mezclas preparadas.

La gráfica también sirve como referencia para futuras prácticas, ya que una muestra con concentración desconocida puede analizarse midiendo su absorbancia a 425 nm y ubicando el valor en la curva para estimar su concentración.

Gráfico 2-3. Curva de calibración de la sandía con puntos máximos y mínimos.



Fuente: Elaboración propia (2025).

2.8.3. Tercera práctica experimental (torta incompresible - cal apagada)

Preparación de la tercera mezcla, para definir la concentración máxima a utilizar en las prácticas de filtración en el equipo.

Para la preparación de la mezcla empleada en la operación de filtración, se utilizó cal apagada como soluto, la cual fue disuelta en agua hasta obtener una mezcla homogénea. Esta mezcla se preparó con el propósito de ser utilizada en las pruebas experimentales de filtración mediante filtro prensa, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema y las características de la operación de separación sólido-líquido.

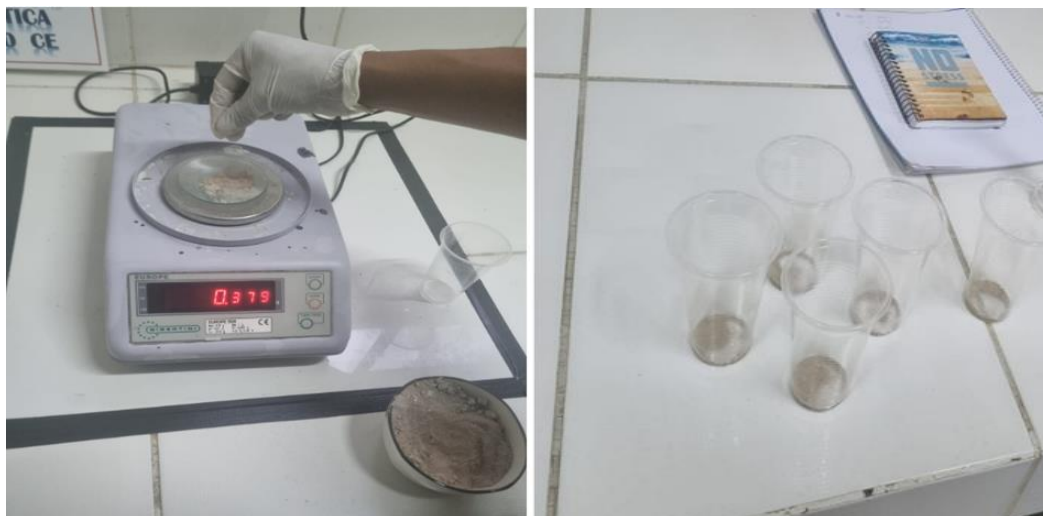
Fotografía 2-10. Cal apagada pulverizada utilizada para la experimentación.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez obtenida la cal apagada, se realizaron investigaciones previas para determinar su grado de solubilidad en agua y sus propiedades físico-químicas relevantes para la operación. Con esta información, se procedió al pesado del material sólido ya que se trabajó con cantidades pequeñas para la preparación de las soluciones patrón, las cuales fueron empleadas para evaluar la estabilidad de la suspensión, así como para observar el comportamiento de precipitación y determinar las condiciones más adecuadas para la operación de filtración en el filtro prensa.

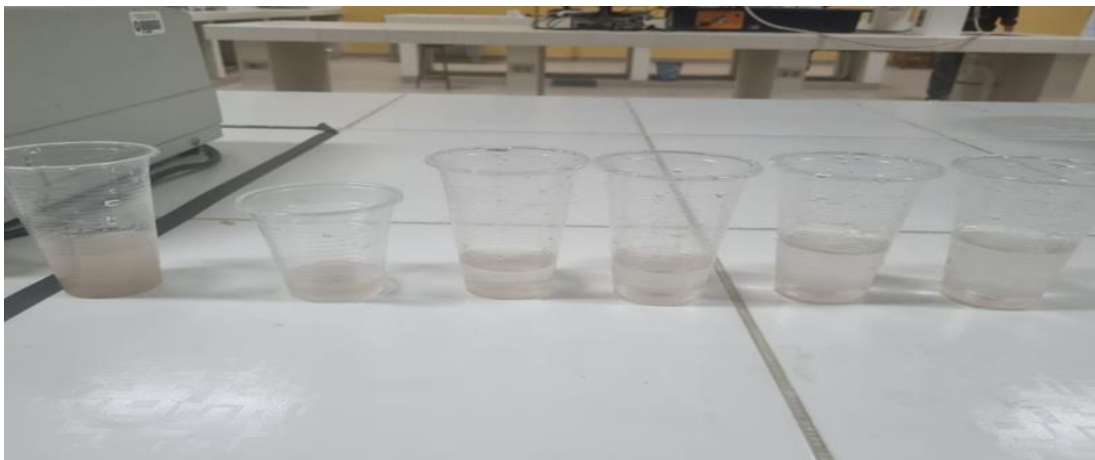
Fotografía 2-11. Pesaje de la cal apagada para su disolución en distintas proporciones de agua.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez determinada la mezcla patrón, correspondiente a una concentración de 2.5 g de cal apagada disuelta en 100 mililitros de agua de grifo, se procedió a la preparación de una serie de disoluciones diluidas a partir de esta muestra inicial. Las proporciones utilizadas fueron 1:2, 1:4, 1:5, 1:8 y 1:10, con el propósito de evaluar el comportamiento de sedimentación y la estabilidad de la suspensión en cada una de ellas, determinando así las condiciones más adecuadas para la posterior operación de filtración en el filtro prensa.

Fotografía 2-12. Preparación de patrones para su lectura en el espectrofotómetro.



Fuente: Elaboración propia (2025).

Una vez preparadas las mezclas, se procedió a llevar las muestras al espectrofotómetro con el fin de determinar la absorbancia de cada una de ellas a una longitud de onda de 425 nm. Este valor se seleccionó para evaluar la intensidad de la luz absorbida por las partículas de cal apagada en suspensión, la cual está relacionada directamente con la concentración del soluto presente en la muestra, como lo establece la Ley de Lambert-Beer. “La absorbancia de una solución es proporcional a la concentración del soluto y a la longitud del trayecto óptico.”

Fotografía 2-13. Lectura de absorbancia en espectrofotómetro.



Fuente: elaboración propia (2025).

Una vez obtenidos los resultados de absorbancia correspondientes a las seis disoluciones preparadas, estos fueron registrados y organizados en una tabla de resultados, como se muestra a continuación, para su posterior representación gráfica.

Tabla 2-13. Datos obtenidos de absorbancia para diferentes concentraciones de mezcla de cal apagada.

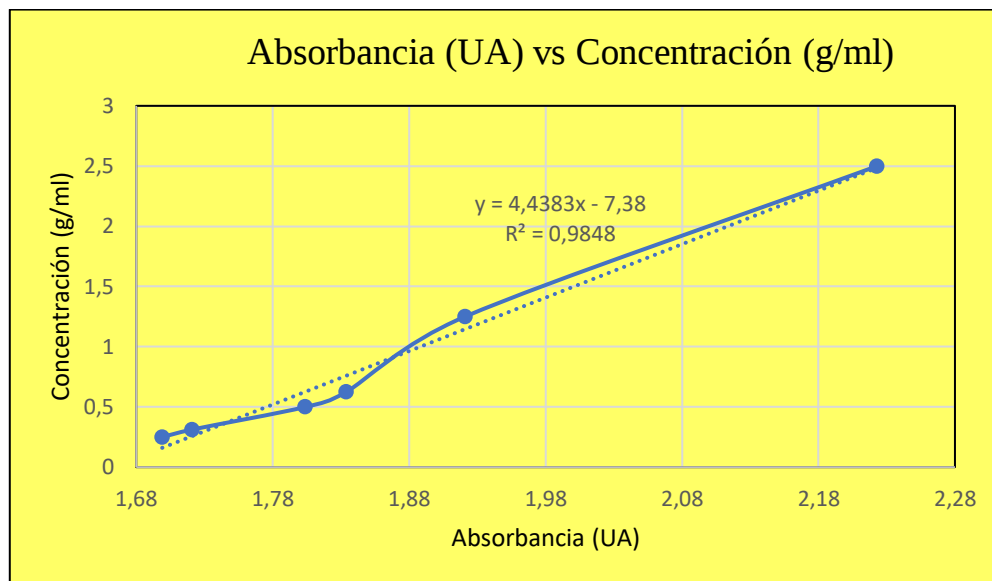
Mezcla	Concentración (g/ml)	Absorbancia (UA)
Patrón	2.5	2.223
1:2	1.25	1.921
1:4	0.625	1.834
1:5	0.5	1.804
1:8	0.3125	1.721
1:10	0.25	1.699

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la gráfica de calibración, se puede apreciar la relación lineal entre la absorbancia y la concentración de la cal apagada en las distintas mezclas, la cual se pudo determinar mediante pruebas experimentales realizadas con el espectrofotómetro. Esta relación permite identificar claramente los valores máximos y mínimos de absorbancia, correspondientes a las concentraciones más alta y más baja de cal apagada que pudo determinar mediante un análisis realizado en el laboratorio. Asimismo, la gráfica constituye una herramienta fundamental para futuras prácticas experimentales, ya que, si se desea trabajar con una muestra de concentración desconocida, basta con medir su

absorbancia a 425 nm y localizar dicho valor en la curva de calibración para determinar su concentración aproximada.

Gráfico 2-4. Curva de calibración de la cal apagada con puntos máximos y mínimos.



Fuente: elaboración propia (2025).

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de las pruebas de filtración

3.1.1. Resultados de las pruebas de filtración a diferentes caídas de presión y concentraciones de la arcilla

Para determinar los datos necesarios para el cálculo de la resistencia específica de la torta, se recolectaron información relevante durante los distintos ciclos de filtración realizados en el laboratorio de Operaciones Unitarias, utilizando diversas concentraciones de sólidos y distintas caídas de presión.

Para el registro de tiempos se empleó un cronómetro, que permitió un control preciso de cada ciclo, y se utilizaron baldes medidores transparentes de 10 y 5 litros para determinar con exactitud el volumen filtrado en cada prueba de filtración. Para cada una de las pruebas se midió el volumen filtrado cada 10 segundos durante 80 segundos, se hizo 3 pruebas para cada una de las concentraciones (1.25; 2.5 y 5 kg/m³) a distintas caídas de presión.

Para la prueba 1 se utilizó una mezcla con una concentración de 5 kg/m³ a diferentes caídas de presión.

Tabla 3-1. Prueba de filtración N.º 1 a 3.1 bar (arcilla)

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	5	0.005	0.000025	3.1
20	9	0.009	0.000081	3.1
30	13	0.013	0.000169	3.1
40	17.5	0.0175	0.00030625	3.1
50	22	0.022	0.000484	3.1
60	26	0.026	0.000676	3.1
70	29.5	0.0295	0.00087025	3.1
80	33	0.033	0.001089	3.1

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-2. Prueba de filtración N.º 2 a 3 bar (arcilla)

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	4.5	0.0045	0.00002025	3
20	8.5	0.0085	0.00007225	3
30	12	0.012	0.000144	3
40	17	0.017	0.000289	3
50	20	0.02	0.0004	3
60	23	0.023	0.000529	3
70	27	0.027	0.000729	3
80	30	0.03	0.0009	3

Fuente: Elaboración propia (2025).**Tabla 3-3.** Prueba de filtración N.º 3 a 2.3 bar (arcilla)

Tiempo (s)	Volumen (litros)	(m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	4	0.004	0.000016	2.3
20	7.5	0.0075	0.00005625	2.3
30	11	0.011	0.000121	2.3
40	14.5	0.0145	0.00021025	2.3
50	18.5	0.0185	0.00034225	2.3
60	22	0.022	0.000484	2.3
70	25	0.025	0.000625	2.3
80	28	0.028	0.000784	2.3

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la prueba 2 se utilizó una mezcla con una concentración de 2.5 kg/m³ a diferentes caídas de presión.

Tabla 3-4. Prueba de filtración N.º 1 a 3.1 bar (arcilla)

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	5	0.005	0.000025	3.1
20	9	0.009	0.000081	3.1
30	14	0.014	0.000196	3.1
40	17	0.017	0.000289	3.1
50	21	0.021	0.000441	3.1
60	26	0.026	0.000676	3.1
70	29	0.029	0.000841	3.1
80	32.5	0.0325	0.00105625	3.1

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-5. Prueba de filtración N.º 2 a 3 bar (arcilla)

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	4.5	0.0045	0.00002025	3
20	8.5	0.0085	0.00007225	3
30	12	0.012	0.000144	3
40	15.5	0.0155	0.00024025	3
50	19.5	0.0195	0.00038025	3
60	23	0.023	0.000529	3
70	26	0.026	0.000676	3
80	30	0.03	0.0009	3

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-6. Prueba de filtración N.º 3 a 2.3 bar (arcilla).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	4	0.004	0.000016	2.3
20	7.8	0.0078	0.00006084	2.3
30	11.5	0.0115	0.00013225	2.3
40	15.5	0.0155	0.00024025	2.3
50	19	0.019	0.000361	2.3
60	22	0.022	0.000484	2.3
70	25	0.025	0.000625	2.3
80	28	0.028	0.000784	2.3

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la prueba 3 se utilizó una mezcla con una concentración de 1.25 kg/m³ a diferentes caídas de presión.

Tabla 3-7. Prueba de filtración N.º 1 a 3.1 bar (arcilla).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	8	0.008	0.000064	3.1
20	15	0.015	0.000225	3.1
30	21	0.021	0.000441	3.1
40	27	0.027	0.000729	3.1
50	33	0.033	0.001089	3.1
60	40	0.04	0.0016	3.1
70	43	0.043	0.001849	3.1
80	50	0.05	0.0025	3.1

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-8. Prueba de filtración N.º 2 a 3 bar (arcilla).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	7	0.007	0.000049	3
20	12.5	0.0125	0.00015625	3
30	17	0.017	0.000289	3
40	23	0.023	0.000529	3
50	28	0.028	0.000784	3
60	33	0.033	0.001089	3
70	38	0.038	0.001444	3
80	42	0.042	0.001764	3

Fuente: Elaboración propia (2025).**Tabla 3-9.** Prueba de filtración N.º 3 a 2.3 bar (arcilla).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	5.5	0.0055	0.00003025	2.3
20	10.5	0.0105	0.00011025	2.3
30	15	0.015	0.000225	2.3
40	19	0.019	0.000361	2.3
50	24	0.024	0.000576	2.3
60	28	0.028	0.000784	2.3
70	31	0.031	0.000961	2.3
80	36	0.036	0.001296	2.3

Fuente: Elaboración propia (2025).

Las tablas presentadas contienen datos fundamentales obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas con el filtro prensa. Estas pruebas se efectuaron bajo tres

diferentes caídas de presión (230000; 300000 y 310000 Pa) y a concentraciones de 0.5; 0.250 y 0.125 kg/m³, como se detalla en las tablas correspondientes. La información obtenida resulta de gran importancia para el cálculo de las resistencias específicas de la torta, así como para su posterior representación y análisis mediante gráficos.

En la Tabla 3-10. se presenta el resumen de los tiempos y volúmenes filtrado alcanzado durante el tiempo de filtración a distintas caídas de presión y concentraciones de arcilla. Esta información fue extraída de las Tablas 3-1. a 3-9. las cuales detallan los datos experimentales empleados. Asimismo, dichas tablas constituyen la base para la elaboración del Gráfico 3-1. donde se analiza el comportamiento de la operación de filtración bajo las condiciones mencionadas.

Tabla 3-10. Resumen de tiempos y volúmenes filtrados en las 3 pruebas para la arcilla

Tiempo de filtración (s)	Concentración de suspensión de arcilla (kg/m ³)	Caída de presión ΔP (Pa)		
		230000	300000	310000
		Volumen filtrado (m ³)		
80	1.25	0.036	0.042	0.05
	2.5	0.028	0.03	0.0325
	5	0.028	0.03	0.033

Fuente: Elaboración propia (2025).

Al comparar los resultados de los volúmenes filtrados presentados en la Tabla 3-10. se observa que los mayores volúmenes se obtienen a la concentración de 1.25 kg/m³ de suspensión de arcilla, bajo las diferentes caídas de presión aplicadas. Asimismo, se puede evidenciar que el volumen filtrado aumenta conforme incrementa la caída de presión, lo cual se atribuye al aumento de la velocidad de filtración.

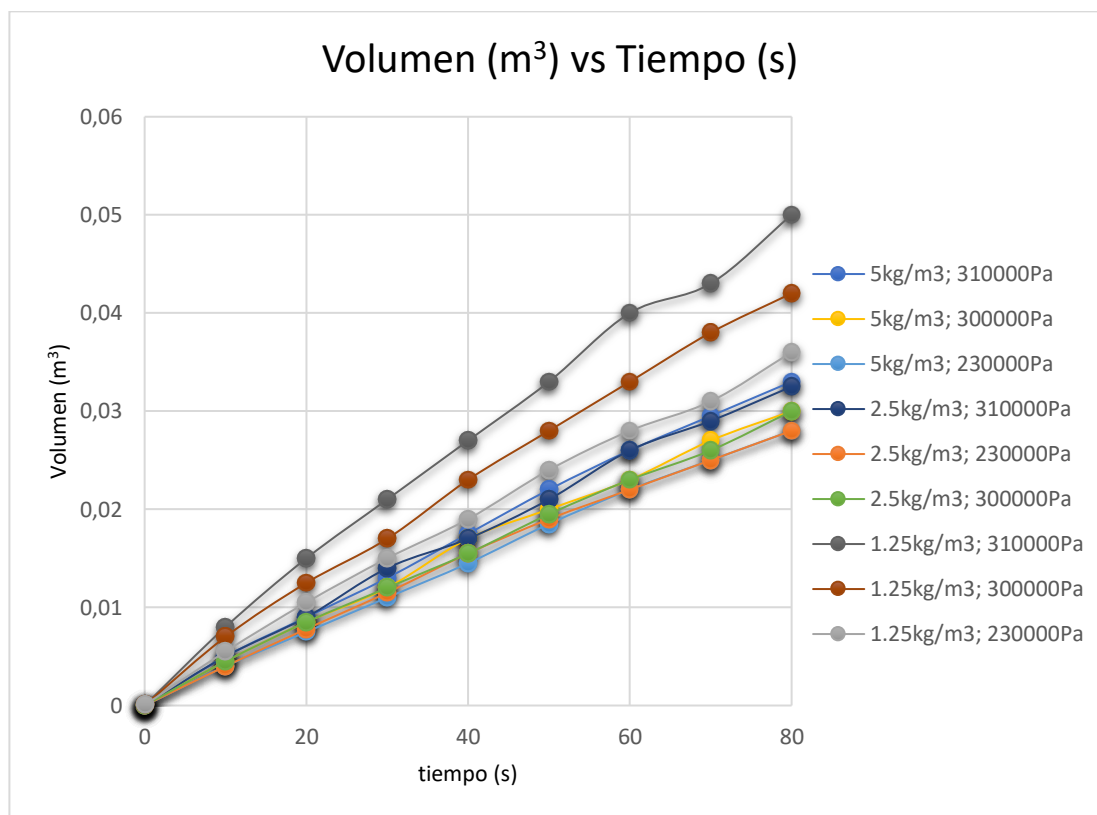
Por otro lado, al comparar los resultados obtenidos a una caída de presión de 230000 Pa, se aprecia que el volumen filtrado disminuye a medida que aumenta la

concentración de la suspensión de arcilla (1.25 ; 2.5 y 5 kg/m^3). Esta disminución se debe al incremento de la cantidad de partículas sólidas en el medio filtrante, lo que genera una mayor resistencia al flujo del fluido y por tanto habrá una reducción en el volumen filtrado.

De igual manera, este comportamiento se repite para las demás caídas de presión (300000 Pa y 310000 Pa) y concentraciones analizadas. En particular, a una presión de 310000 Pa y una concentración de 5 kg/m^3 , se obtiene el menor volumen filtrado, debido al efecto combinado de la alta concentración de sólidos y la elevada presión aplicada, que compactan la torta y reducen su permeabilidad.

En el Gráfico 3-1. se representa el comportamiento del volumen de filtrado en función del tiempo, evidenciando la influencia de la caída de presión y de la concentración de la suspensión de arcilla sobre la eficiencia de la operación de filtración.

Gráfico 3-1. Comportamiento del volumen de filtrado en función del tiempo.



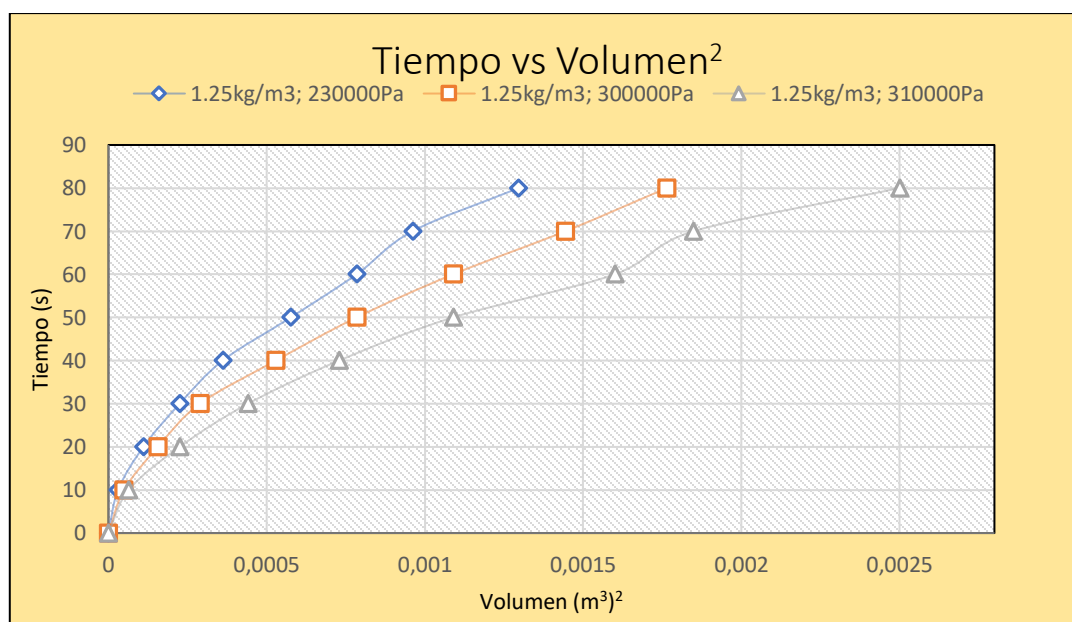
Fuente: Elaboración propia (2025).

Las curvas de filtración obtenidas para la concentración de 1.25 kg/m^3 de suspensión de arcilla y las diferentes caídas de presión (230000 Pa, 300000 Pa y 310000 Pa) muestran una separación clara entre sí, evidenciando la influencia directa de la presión sobre el volumen filtrado.

En cambio, las curvas correspondientes a las concentraciones de 2.5 y 5 kg/m^3 presentan una menor separación, lo que indica que, a medida que aumenta la concentración de la suspensión, la variación del volumen filtrado con la presión se vuelve menos pronunciada. Se observa además que los volúmenes filtrados aumentan conforme se incrementa la caída de presión, ya que una mayor presión de operación favorece la velocidad de paso del fluido a través del medio filtrante. Sin embargo, entre las presiones de 300000 Pa y 310000 Pa.

Este comportamiento concuerda con lo descrito por Stickland (2005), quien señala que, en operaciones de filtración a presión constante, el aumento de la caída de presión mejora la tasa de filtración hasta que la compresibilidad de la torta impone una resistencia mayor, limitando la eficiencia del proceso.

Gráfico 3-2. Influencia del volumen en el tiempo de filtración para la arcilla en suspensión.



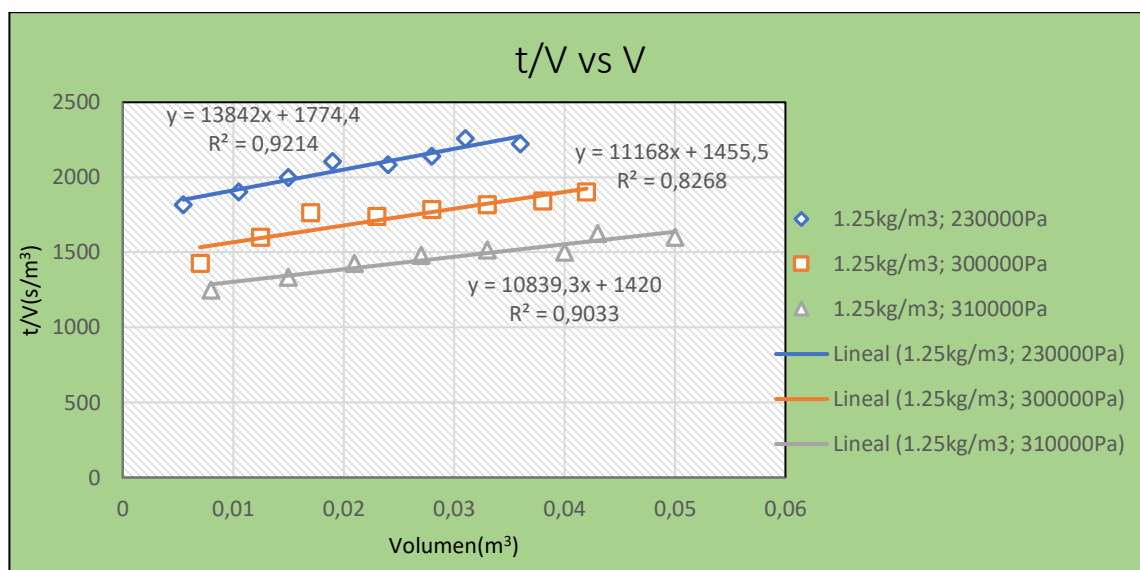
Fuente: Elaboración propia (2025).

En el gráfico 3-2. se observa que los puntos obtenidos para la concentración de 1.25 kg/m³ de suspensión de arcilla, a las diferentes caídas de presión aplicadas (230000 Pa, 300000 Pa y 310000 Pa), una tendencia no lineal, este comportamiento indica que la torta formada durante la operación de filtración se comporta como una torta compresible, a partir de los valores calculados de las resistencias específicas de la torta que se encuentran en la tabla (3-12). Se observa que el valor de alfa (α) aumenta de manera considerable entre 32% a 37% cuando la caída de presión se incrementa de 230000 Pa a 310000 Pa. Para todas las concentraciones utilizadas en las prácticas filtración. Donde podemos evidenciar que se trata de una torta poco compresible por que cumple lo se dice en la teoría clásica de filtración de (Ruth, 1935; Tiller & Cooper, 1960; Stickland, 2005). Si el incremento de la de las resistencias específicas en las distintas caídas de presión utilizadas en el ciclo de filtración, es menor al 20% se trata de una torta incompresible y cuando es mayor al 50% se trata de una torta totalmente compresible.

3.1.2. Resultados del cálculo de la resistencia específica de la torta relacionando la caída de presión y la concentración de cada una de las disoluciones

En el gráfico 3-3. se presentan las regresiones lineales del tiempo/volumen en función del volumen, correspondientes a las diferentes caídas de presión utilizadas para pruebas y a la concentración de 1.25 kg/m³ de suspensión de arcilla. Esta concentración fue seleccionada para el análisis debido a que permite obtener el mayor volumen filtrado al cabo de 80 segundos, en comparación con las concentraciones de 2.5 y 5 kg/m³.

Gráfico 3-3. Regresiones lineales del tiempo/volumen en función del volumen a diferentes presiones y a concentración de 1.25kg/m^3 de arcilla en agua.



Fuente: Elaboración propia (2025).

En el gráfico 3-3. se presentan las regresiones lineales obtenidas a partir de los resultados experimentales, donde se evidencia una relación lineal entre t/V y V . A partir de estas regresiones se determinaron las pendientes y las ordenadas al origen, parámetros fundamentales para el análisis del proceso de filtración.

La pendiente de cada línea de regresión se utiliza para calcular la resistencia específica de la torta (α), que expresa la dificultad que ofrece la torta al paso del fluido a través del medio filtrante. Por su parte, la ordenada al origen permite obtener la resistencia del medio filtrante (R_m), la cual representa la oposición inicial antes de la formación de la torta. Estos parámetros permiten analizar el comportamiento del sistema de filtración durante el ciclo de filtración.

Se observa, además, que algunos puntos experimentales presentan una ligera dispersión respecto a la línea de tendencia. Esta variación puede deberse a pequeños movimientos del tanque receptor durante la toma de datos, lo que afecta la medición del volumen filtrado. Esto es común que procesos de filtración por estas razones (Pickett y

Roberson, 1996), indican que es muy difícil obtener resultados repetidos en la operación de filtración.

En la tabla 3-11. se muestran los valores de las pendientes obtenidas para las distintas caídas de presión y concentraciones de la suspensión de arcilla. Estos valores fueron tomados de la gráfica 3-3.

Tabla 3-11. Valores de las pendientes para la prueba con arcilla.

Concentración de suspensión de arcilla (kg/m ³)	Caída de presión ΔP (Pa)		
	230000	300000	310000
	Pendientes (s/m ⁶)		
1.25	13842	11168	10839
2.5	13886	13897	13962
5	10533	10011	10765

Fuente: Elaboración propia (2025).

De forma general, en la tabla 3-11. se observa que, al mantener constante la concentración de la suspensión de arcilla y aumentar la caída de presión, el valor de la pendiente disminuye. Esto ocurre porque un incremento en la presión favorece el paso del fluido a través del medio filtrante, aumentando el volumen de filtrado obtenido.

En la tabla 3-12. se presentan los datos conocidos tabulados, tales como el área de filtración, la viscosidad del fluido, las caídas de presión y las concentraciones de la suspensión. Estos valores se emplean para calcular las resistencias específicas de la torta (α) y resistencia del medio filtrante (R_m) mediante la ecuación general de la filtración a presión constante.

Tabla 3-12. Datos conocidos de área de filtración, viscosidad del fluido, caídas de presión y concentraciones.

Área de filtración (m ²)	Caída de presión ΔP (Pa)	Viscosidad de la disolución (Pa · s)	Concentración de sólidos (kg/m ³)
1.6	230000	0.001	1.25
1.6	300000	0.001	2.5
1.6	310000	0.001	5

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para el cálculo de las resistencias específicas de la torta, se partió de la ecuación (1.23). Se realizó el despeje de la variable con el fin de obtener una expresión lineal que permita determinar parámetros característicos del sistema, al reorganizar la ecuación se obtiene la forma:

$$\frac{t}{V} = a \cdot V + b \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde a es la pendiente de la línea y b es la ordenada al origen.

La pendiente está asociada al término que contiene la resistencia específica de la torta, mientras que la ordenada al origen se relaciona directamente con la resistencia del medio filtrante.

A partir de la ecuación linealizada, los parámetros de la operación se determinan mediante:

$$a = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot C}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

$$b = \frac{\mu \cdot R_m}{A \cdot \Delta P} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Una vez obtenidos los valores experimentales de a y b mediante la regresión lineal, se procede a despejar la resistencia específica de la torta (α) y la resistencia del medio filtrante R_m de las anteriores ecuaciones, obteniéndose:

$$\alpha = \frac{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P}{\mu \cdot C} \cdot a \quad \text{Ec. (3.4)}$$

$$R_m = \frac{A \cdot \Delta P}{\mu} \cdot b \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Este fue el procedimiento que nos permitió el cálculo de las resistencias específicas de la torta. A diferentes caídas de presión y a distintas concentraciones como se muestra en la siguiente tabla para mezcla de arcilla en agua.

En la tabla 3-13. se muestran los resultados de las resistencias específicas de la torta obtenidas a diferentes caídas de presión y concentraciones de suspensión arcilla.

Tabla 3-13. Resistencias específicas de la torta (arcilla).

Concentración de suspensión de arcilla (kg/m ³)	α (m/kg)	Caída de presión ΔP (Pa)		
		230000	300000	310000
		Resistencia específica de la torta		
		α (m/kg)	α (m/kg)	α (m/kg)
1.25	$\alpha \times 10^{+12}$	1.735	2.05	2.33
2.5	$\alpha \times 10^{+12}$	2.395	3.052	3.23
5	$\alpha \times 10^{+12}$	2.48	3.07	3.41

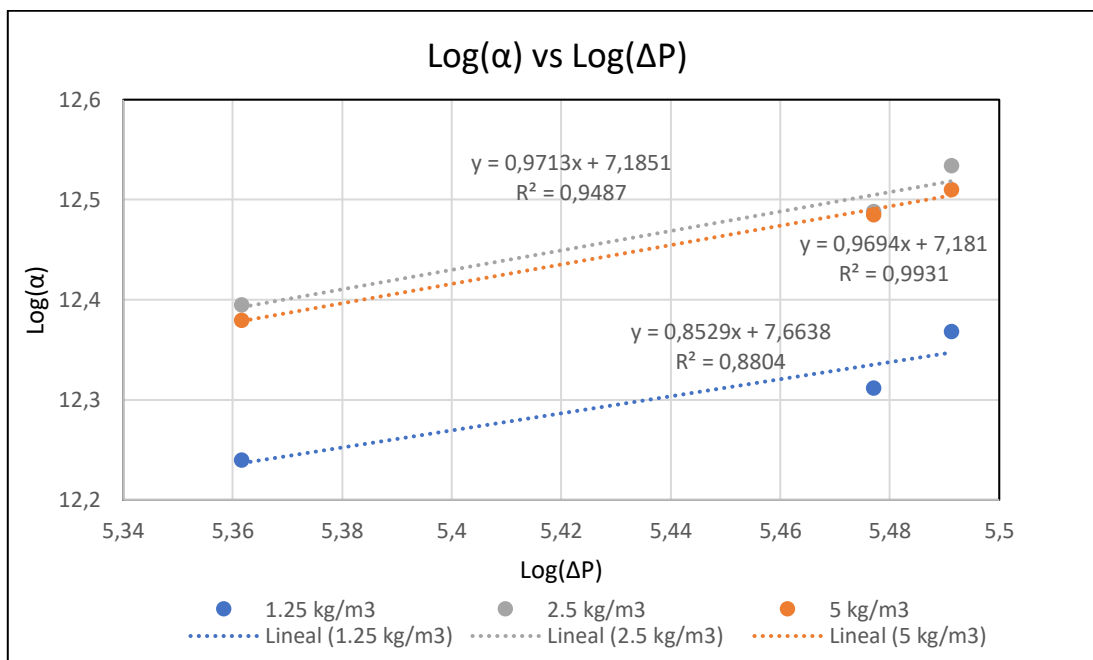
Fuente: Elaboración propia (2025).

En la tabla 3-13. se observa que, para la concentración de 1.25 kg/m³ de suspensión de arcilla, el valor de la resistencia específica de la torta aumenta con el incremento de la

caída de presión. Este comportamiento se explica porque una mayor presión compacta la torta con mayor intensidad, reduciendo su porosidad y, en consecuencia, aumentando la resistencia al paso del fluido.

El gráfico que relaciona la compresibilidad con las diferentes concentraciones de suspensión de arcilla se interpreta de manera óptima en el contexto de la filtración a presión constante mediante el análisis de la gráfica $\text{Log}(\alpha)$ vs $\text{Log}(\Delta P)$. Este análisis es fundamental para comprender cómo las propiedades de la torta de filtración cambian bajo esfuerzo.

Gráfico 3-4. Compresibilidad de la torta en función de la concentración y las diferentes presiones 230000 Pa, 300000 Pa y 310000 Pa para suspensión de arcilla.



Fuente: Elaboración propia (2025).

En el gráfico 3-4. se observa que la compresibilidad de la torta está influida por la concentración de la suspensión de arcilla. A mayores concentraciones, el valor tiende a aproximarse a uno, indicando un comportamiento más compresible. En cambio, a menores concentraciones, dicho valor se acerca a cero, reflejando un comportamiento prácticamente incompresible.

3.1.3. Resultados de las pruebas de filtración a diferentes caídas de presión y concentraciones de la sandía

Para determinar los datos necesarios para el cálculo de la resistencia específica de la torta, se recolectó información relevante durante los distintos ciclos de filtración realizados en el laboratorio de Operaciones Unitarias, utilizando diversas concentraciones de sólidos y distintas caídas de presión.

Para el registro de tiempos se empleó un cronómetro, que permitió un control preciso de cada ciclo, y se utilizaron baldes medidores transparentes de 10 y 5 litros para determinar con exactitud el volumen filtrado en cada prueba de filtración. Para cada una de las pruebas se midió el volumen filtrado cada 10 segundos durante 80 segundos, se hizo 3 pruebas para cada una de las concentraciones (2.5 y 2 kg/m³) a distintas caídas de presión.

Para la prueba 1 se utilizó una mezcla con una concentración de 2.5 kg/m³ a diferentes caídas de presión.

Tabla 3-14. Prueba de filtración N.º 1 a 1.8 bar (sandía).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	7	0.007	0.000049	1.8
20	13	0.013	0.000169	1.8
30	19.5	0.0195	0.00038025	1.8
40	26	0.026	0.000676	1.8
50	32	0.032	0.001024	1.8
60	39	0.039	0.001521	1.8
70	45	0.045	0.002025	1.8
80	51	0.051	0.002601	1.8

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-15. Prueba de filtración N.º 2 a 1.2 bar (sandía).

Tiempo(s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	6.5	0.0065	0.00004225	1.2
20	11.5	0.0115	0.00013225	1.2
30	18	0.018	0.000324	1.2
40	23	0.023	0.000529	1.2
50	30	0.03	0.0009	1.2
60	35	0.035	0.001225	1.2
70	40	0.04	0.0016	1.2
80	44.5	0.0445	0.00198025	1.2

Fuente: Elaboración propia (2025).**Tabla 3-16.** Prueba de filtración N.º 3 a 1 bar (sandía).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
1.2	5.5	0.0055	0.00003025	1
1.2	11	0.011	0.000121	1
1.2	16	0.016	0.000256	1
1.2	21	0.021	0.000441	1
1.2	27	0.027	0.000729	1
1.2	32	0.032	0.001024	1
1.2	36	0.036	0.001296	1
1.2	41	0.041	0.001681	1

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la prueba 2 se utilizó una mezcla con una concentración de 2 kg/m³ a diferentes caídas de presión.

Tabla 3-17. Prueba de filtración N.º 1 a 1.8 bar (sandía).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
10	7	0.007	0.000049	1.8
20	13	0.013	0.000169	1.8
30	18	0.018	0.000324	1.8
40	24	0.024	0.000576	1.8
50	30	0.03	0.0009	1.8
60	37	0.037	0.001369	1.8
70	41	0.041	0.001681	1.8
80	44	0.044	0.001936	1.8

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-18. Prueba de filtración N.º 2 a 1.2 bar (sandía).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
1.8	6	0.006	0.000036	1.2
1.8	11.5	0.0115	0.00013225	1.2
1.8	16	0.016	0.000256	1.2
1.8	21	0.021	0.000441	1.2
1.8	26	0.026	0.000676	1.2
1.8	32	0.032	0.001024	1.2
1.8	36	0.036	0.001296	1.2
1.8	41	0.041	0.001681	1.2

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-19. Prueba de filtración N.º 3 a 1 bar (sandía).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V (m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0
1.2	5	0.005	0.000025	1
1.2	10	0.01	0.0001	1
1.2	15	0.015	0.000225	1
1.2	19.5	0.0195	0.00038025	1
1.2	24	0.024	0.000576	1
1.2	29	0.029	0.000841	1
1.2	34	0.034	0.001156	1
1.2	38	0.038	0.001444	1

Fuente: Elaboración propia (2025).

En las tablas presentadas contienen datos fundamentales obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas con el filtro prensa. Estas pruebas se efectuaron bajo tres diferentes caídas de presión (180000; 130000 y 100000 Pa) y a concentraciones de 2 y 2.5 kg/m³, como se detalla en las tablas correspondiente, la información obtenida resulta de gran importancia para el cálculo de las resistencias específicas de la torta, así como para su posterior representación y análisis mediante gráficos.

En la Tabla 3-20. se presenta el resumen de los tiempos y volúmenes filtrados alcanzados durante el tiempo de filtración a distintas caídas de presión y concentraciones de sandía. Esta información fue extraída de las Tablas de datos, las cuales detallan los datos experimentales empleados. Asimismo, dichas tablas constituyen la base para la elaboración del Gráfico 3-5, donde se analiza el comportamiento del proceso de filtración bajo las condiciones mencionadas.

Tabla 3-20. Volumen que se filtrará en un tiempo de 80 segundos para la prueba con la sandía.

Tiempo de filtración (s)	Concentración de suspensión de sandía (kg/m ³)	Caída de presión ΔP (Pa)		
		100000	120000	180000
		Volumen filtrado (m ³)		
80	2.5	0.038	0.041	0.044
	2	0.039	0.0445	0.051

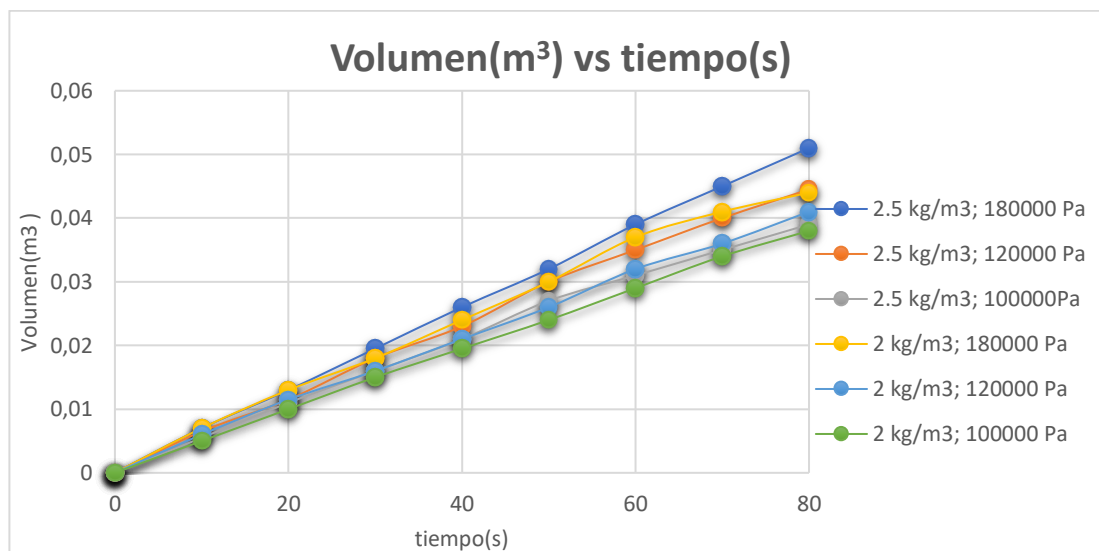
Fuente: Elaboración propia (2025).

Al comparar los resultados de los volúmenes filtrados presentados en la Tabla 3-20, se observa que los mayores volúmenes se obtienen a la concentración de 2 kg/m³ de suspensión de sandía, bajo las diferentes caídas de presión aplicadas. Asimismo, se puede evidenciar que el volumen filtrado aumenta conforme incrementa la caída de presión, lo cual se atribuye al aumento de la velocidad de filtración.

Por otro lado, al comparar los resultados obtenidos a una caída de presión de 180000 Pa, se aprecia que el volumen filtrado tiende a disminuir ligeramente a medida que aumenta la concentración de la suspensión de sandía (2 y 2.5 kg/m³). Sin embargo, esta disminución no es significativa, ya que la diferencia de volúmenes filtrados entre ambas concentraciones no presenta una variación considerable. De igual manera, este comportamiento se mantiene para las demás caídas de presión (120000 Pa y 100000 Pa) analizadas. En particular, a la mayor presión aplicada (180000 Pa) y una concentración de 2.5 kg/m³, se obtiene un volumen filtrado levemente menor, debido al efecto del incremento en la cantidad de sólidos, que aumenta la resistencia de la torta, aunque sin afectar de manera drástica la permeabilidad del medio filtrante.

En el Gráfico 3-5. se representa el comportamiento del volumen de filtrado en función del tiempo, evidenciando la influencia de la caída de presión y de la concentración de la suspensión de la sandía sobre la eficiencia de la operación de filtración.

Gráfico 3-5. Comportamiento del volumen de filtrado en función del tiempo para la pulpa de sandía.

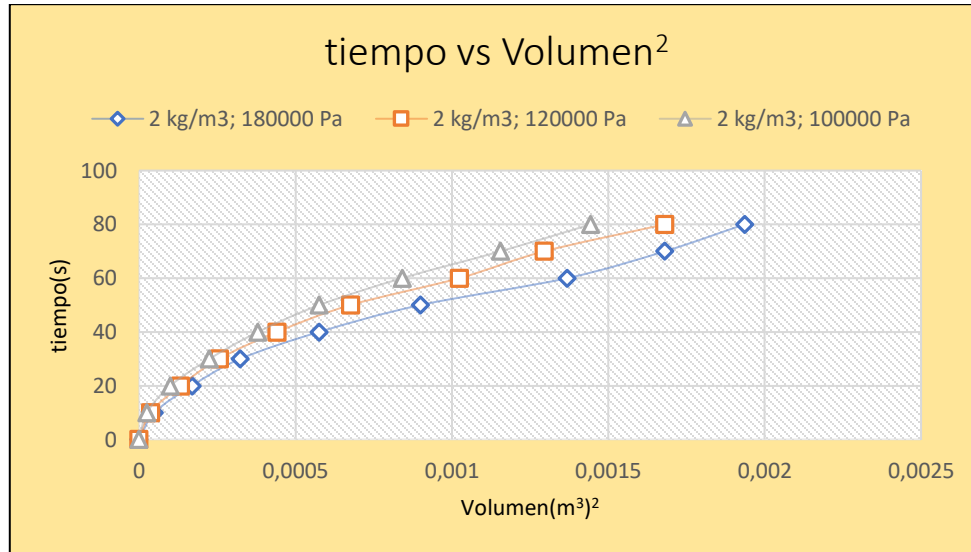


Fuente: Elaboración propia (2025).

En las curvas de filtración mostradas en la gráfica, se puede observar que se obtuvo una buena filtración tanto para la concentración de 2 como para la de 2,5 kg/m³, bajo las diferentes caídas de presión aplicadas. Estos resultados sirvieron como parámetros de referencia al momento de realizar la operación de filtración.

Este comportamiento concuerda con lo descrito por (Stickland, 2005), quien señala que, en operaciones de filtración a presión constante, el aumento de la caída de presión mejora la tasa de filtración hasta que la compresibilidad de la torta impone una resistencia mayor, limitando la eficiencia del proceso.

Gráfico 3-6. Comportamiento de la torta (pulpa de sandía).

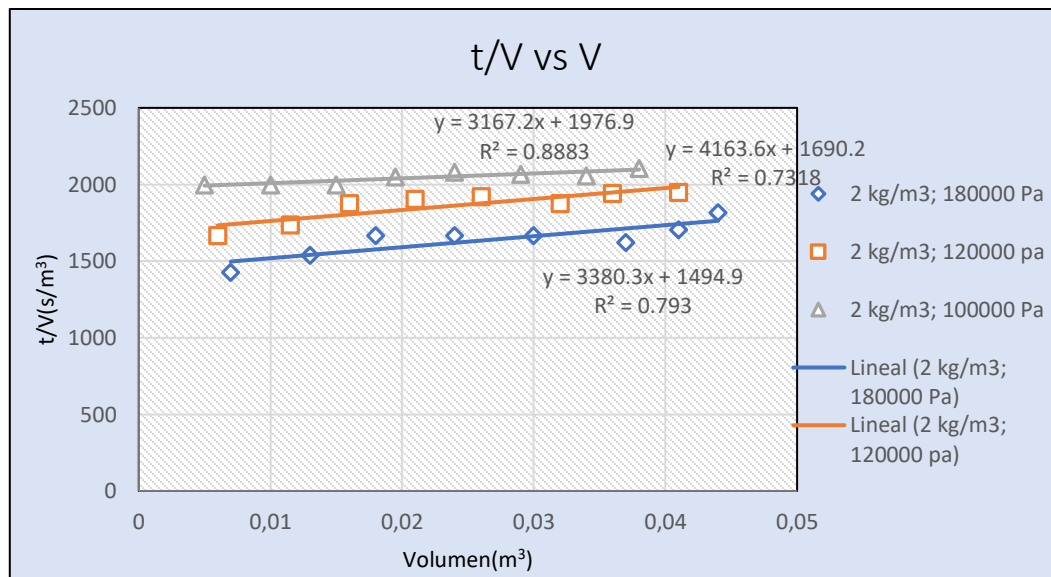


Fuente: Elaboración propia (2025).

En el gráfico 3-6. se observa que los puntos obtenidos para la concentración de 2 kg/m³ de suspensión de pulpa de sandía, a las diferentes caídas de presión aplicadas (100000 Pa, 120000 Pa y 180000 Pa), una tendencia no lineal. Este comportamiento indica que la torta formada durante la operación de filtración se comporta como una torta compresible, a partir de los valores calculados de las resistencias específicas de la torta que se encuentran en la tabla (3-12). Se observa que el valor de alfa (α) aumenta de manera considerable entre 60% a 70% cuando la caída de presión se incrementa de 100000 Pa a 180000 Pa. Para todas las concentraciones empleadas en las prácticas de filtración, se observa que el sólido forma una torta de carácter compresible, de acuerdo con los criterios establecidos en la teoría clásica de filtración (Ruth, 1935; Tiller & Cooper, 1960; Stickland, 2005). Según estos fundamentos, cuando el aumento de la resistencia específica frente a las distintas caídas de presión aplicadas durante el ciclo de filtración es inferior al 20%, la torta se clasifica como incompresible; en cambio, si dicho incremento supera el 50%, se considera una torta completamente compresible.

En el gráfico 3-7. se muestran las líneas de regresión del tiempo/volumen en función del volumen, obtenidas para las distintas caídas de presión empleadas en las pruebas, usando una concentración de 2 kg/m³ de sandía. Esta concentración se eligió para el análisis porque permitió obtener el mayor volumen filtrado en 80 segundos, en comparación con la concentración de 2.5 kg/m³.

Gráfico 3-7. Regresiones lineales del tiempo/volumen en función del volumen.



Fuente: Elaboración propia (2025).

En el gráfico 3-7. se presentan las regresiones lineales obtenidas a partir de los resultados experimentales, donde se evidencia una relación lineal entre t/V y V . A partir de estas regresiones se determinaron las pendientes y las ordenadas al origen, parámetros fundamentales para el análisis de la operación de filtración.

La pendiente de cada línea de regresión se utiliza para calcular la resistencia específica de la torta (α), que expresa la dificultad que ofrece la torta al paso del fluido a través del medio filtrante. Por su parte, la ordenada al origen permite obtener la resistencia del medio filtrante (R_m), la cual representa la oposición inicial antes de la formación de la torta. Estos parámetros permiten analizar el comportamiento del sistema de filtración durante el ciclo de filtración.

Se observa, además, que algunos puntos experimentales presentan una ligera dispersión respecto a la línea de tendencia. Esta variación puede deberse a pequeños movimientos del tanque receptor durante la toma de datos, lo que afecta la medición del volumen filtrado. Esto es común que procesos de filtración por estas razones (Pickett y Robertson, 1996), indican que es muy difícil obtener resultados repetidos en la operación filtración.

En la tabla 3-21. se muestran los valores de las pendientes obtenidas para las distintas caídas de presión y concentraciones de la suspensión de la sandía. Estos valores fueron tomados de las tablas, donde se detallan los cálculos realizados.

Tabla 3-21. Valores de las pendientes para la prueba con sandía.

Concentración de suspensión de la sandía (kg/m ³)	Caída de presión ΔP (Pa)		
	100000	120000	180000
	Pendientes (s/m ⁶)		
2	4367.2	4163.6	3380.3
2.5	6389.5	4030.7	3031.3

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la tabla se observa que, al mantener constante la concentración de la suspensión de la sandía y aumentar la caída de presión, el valor de la pendiente tiende a disminuir. Este comportamiento se debe a que una mayor presión favorece el paso del fluido a través del medio filtrante, incrementando el volumen de filtrado obtenido.

En la tabla 3-22. se presentan los datos conocidos tabulados, tales como el área de filtración, la viscosidad del fluido, las caídas de presión y las concentraciones de la

suspensión. Estos valores se emplean para calcular las resistencias específicas de la torta (α) y resistencia del medio filtrante (R_m) mediante la ecuación general de la filtración a presión constante.

Tabla 3-22. Datos conocidos para el cálculo de las resistencias específicas (sandía).

Área de filtración (m ²)	Caída de presión ΔP (Pa)	Viscosidad de la disolución (Pa · s)	Concentración de sólidos (kg/m ³)
1.6	100000	0.001	2
1.6	120000	0.001	2.5
1.6	180000	0.001	-

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para el cálculo de las resistencias específicas de la torta, se partió de la ecuación (1.23). Se realizó el despeje de la variable con el fin de obtener una expresión lineal que permita determinar parámetros característicos del sistema. Al reorganizar la ecuación se obtiene la ecuación 3.1 antes descrita. Donde a es la pendiente de la línea y b es la ordenada al origen.

La pendiente está asociada al término que contiene la resistencia específica de la torta, mientras que la ordenada al origen se relaciona directamente con la resistencia del medio filtrante.

A partir de la ecuación linealizada, los parámetros de la operación se determinan mediante la ecuación 3.2 y la ecuación 3.3.

Una vez obtenidos los valores experimentales de a y b mediante la regresión lineal, se procede a despejar la resistencia específica de la torta (α) y la resistencia del medio filtrante R_m de las ecuaciones 3.2 y 3.3 obteniéndose las ecuaciones 3.4 y 3.5.

Este fue el procedimiento que nos permitió el cálculo de las resistencias específicas de la torta. A diferentes caídas de presión y a distintas concentraciones como se muestra en la siguiente tabla para mezcla de pulpa de sandía en agua.

En la tabla 3.23 se muestran los resultados de las resistencias específicas de la torta obtenidas a diferentes caídas de presión y concentraciones de la mezcla de la sandía.

Tabla 3-23. Resistencias específicas de la torta (sandía).

Concentración de suspensión de sandía (kg/m ³)	α (m/kg)	Caída de presión ΔP (Pa)		
		100000	120000	180000
		Resistencia especifica de la torta		
		(m/kg) $\alpha \times 10^{+11}$	(m/kg) $\alpha \times 10^{+12}$	(m/kg) $\alpha \times 10^{+12}$
2	α	8.11	1.38	1.55
2.5	α	7.091	1.015	1.18

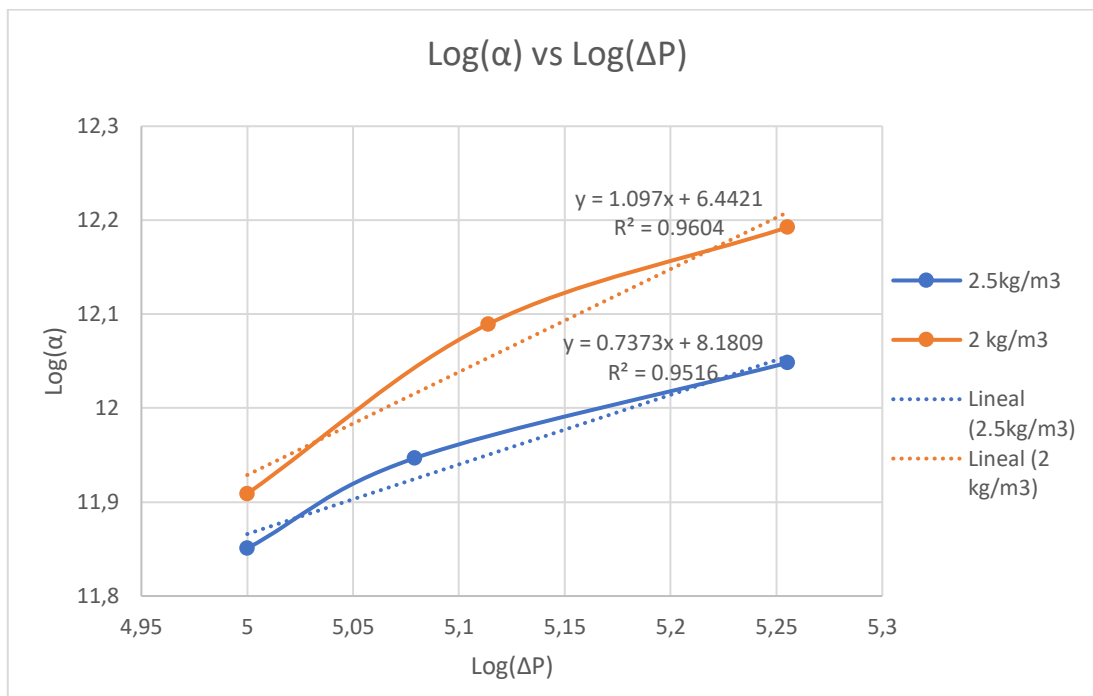
Fuente: Elaboración propia (2025).

En la tabla 3-23. se observa que, para la concentración de 2 y 2.5 kg/m³ de suspensión de la sandía, el valor de la resistencia específica de la torta aumenta con el incremento de la caída de presión. Este comportamiento se explica porque una mayor presión compacta la torta con mayor intensidad, reduciendo su porosidad y, en consecuencia, aumentando la resistencia al paso del fluido.

El gráfico que relaciona la compresibilidad con las diferentes concentraciones de suspensión de la sandía se interpreta de manera óptima en el contexto de la filtración a presión constante mediante el análisis de la gráfica Log (α) vs Log (ΔP). Este análisis

es fundamental para comprender cómo las propiedades de la torta de filtración cambian bajo esfuerzo.

Gráfico 3-8. Compresibilidad de la torta para pulpa de sandía variando presiones de operación y concentraciones.



Fuente: Elaboración propia (2025).

En el Gráfico 3-8. se observa que la compresibilidad de la torta está influida por la concentración de la suspensión de pulpa de sandía. A mayores concentraciones, el valor de R^2 tiende a aproximarse a uno, indicando un comportamiento más compresible. En cambio, a menores concentraciones, dicho valor se acerca a cero, reflejando un comportamiento prácticamente incompresible.

De acuerdo con lo señalado por (Perry et al., 1999) el tamaño de las partículas influye significativamente en la compresibilidad de la torta, ya que partículas más finas tienden a formar estructuras más compactas y, por tanto, más compresibles.

3.1.4. Resultados de las pruebas de filtración a diferentes caídas de presión y concentraciones de la cal apagada

Para determinar los datos necesarios para el cálculo de la resistencia específica de la torta, se recolectó información relevante durante los distintos ciclos de filtración realizados en el laboratorio de Operaciones Unitarias, utilizando diversas concentraciones de sólidos y distintas caídas de presión.

Para el registro de tiempos se empleó un cronómetro, que permitió un control preciso de cada ciclo, y se utilizaron baldes medidores transparentes de 10 y 5 litros para determinar con exactitud el volumen filtrado en cada prueba de filtración. Para cada una de las pruebas se midió el volumen filtrado cada 10 segundos durante 80 segundos, se hizo 3 pruebas para cada una de las concentraciones (2.5 y 2 kg/m³) a distintas caídas de presión.

Para la prueba 1 se utilizó una mezcla con una concentración de 2.5 kg/m³ a diferentes caídas de presión

Tabla 3-24. Prueba de filtración N.º 1 a 1.25 bar (cal apagada).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V(m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	1.25
10	8	0.008	0.000064	1.25
20	15	0.015	0.000225	1.25
30	23	0.023	0.000529	1.25
40	31	0.031	0.000961	1.25
50	38	0.038	0.001444	1.25
60	44	0.044	0.001936	1.25
70	51	0.051	0.002601	1.25
80	56	0.056	0.003136	1.25

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-25. Prueba de filtración N.º 2 a 1.1 bar (cal apagada).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V(m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	1.1
10	7	0.007	0.000049	1.1
20	14	0.014	0.000196	1.1
30	21	0.021	0.000441	1.1
40	25	0.025	0.000625	1.1
50	32	0.032	0.001024	1.1
60	38	0.038	0.001444	1.1
70	44	0.044	0.001936	1.1
80	49	0.049	0.002401	1.1

Fuente: Elaboración propia (2025).**Tabla 3-26.** Prueba de filtración N.º 3 a 0.8 bar (cal apagada).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V(m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	0.8
10	6.5	0.0065	0.00004225	0.8
20	13	0.013	0.000169	0.8
30	19	0.019	0.000361	0.8
40	25	0.025	0.000625	0.8
50	31	0.031	0.000961	0.8
60	38	0.038	0.001444	0.8
70	43	0.043	0.001849	0.8
80	47	0.047	0.002209	0.8

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para la prueba 2 se utilizó una mezcla con una concentración de 1.25 kg/m³ a diferentes caídas de presión.

Tabla 3-27. Prueba de filtración N.º 1 a 1.25 bar (cal apagada).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V(m ³)	V ²	Presión(bar)
0	0	0	0	1.25
10	9	0.009	0.000081	1.25
20	17	0.017	0.000289	1.25
30	26	0.026	0.000676	1.25
40	32	0.032	0.001024	1.25
50	40	0.04	0.0016	1.25
60	47	0.047	0.002209	1.25
70	53	0.053	0.002809	1.25
80	60	0.06	0.0036	1.25

Fuente: Elaboración propia (2025).**Tabla 3-28.** Prueba de filtración N.º 2 a 1.1 bar (cal apagada).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V(m ³)	V ²	Presión (bar)
0	0	0	0	1.1
10	8	0.008	0.000064	1.1
20	15	0.015	0.000225	1.1
30	24	0.024	0.000576	1.1
40	30	0.03	0.0009	1.1
50	36	0.036	0.001296	1.1
60	43	0.043	0.001849	1.1
70	50	0.05	0.0025	1.1
80	56	0.056	0.003136	1.1

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-29. Prueba de filtración N.º 3 a 0.8 bar (cal apagada).

Tiempo (s)	Volumen (litros)	V(m ³)	V ³	Presión (bar)
0	0	0	0	0.8
10	7.5	0.0075	0.00005625	0.8
20	14	0.014	0.000196	0.8
30	21	0.021	0.000441	0.8
40	26.5	0.0265	0.00070225	0.8
50	33	0.033	0.001089	0.8
60	40	0.04	0.0016	0.8
70	46	0.046	0.002116	0.8
80	51	0.051	0.002601	0.8

Fuente: Elaboración propia (2025).

En las tablas presentadas contienen datos fundamentales obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas con el filtro prensa. Estas pruebas se efectuaron bajo tres diferentes caídas de presión (125000; 110000 y 80000 Pa) y a concentraciones de 2 y 1.25 kg/m³, como se detalla en las tablas correspondientes. La información obtenida resulta de gran importancia para el cálculo de las resistencias específicas de la torta, así como para su posterior representación y análisis mediante gráficos.

En la Tabla 3-30. se presenta el resumen de los tiempos y volúmenes filtrados alcanzados durante el tiempo de filtración a distintas caídas de presión y concentraciones de cal apagada. Esta información fue extraída de las tablas de datos anteriores, las cuales detallan los datos experimentales empleados. Asimismo, dichas tablas constituyen la base para la elaboración del Gráfico 3-9, donde se analiza el comportamiento del proceso de filtración bajo las condiciones mencionadas.

Tabla 3-30. Volumen filtrado en función al tiempo (cal apagada)

Tiempo de filtración (s)	Concentración de suspensión de cal apagada (kg/m ³)	Caída de presión ΔP (Pa)		
		80000	110000	125000
		Volumen filtrado (m ³)		
80	2.5	0.047	0.049	0.056
	1.25	0.051	0.056	0.06

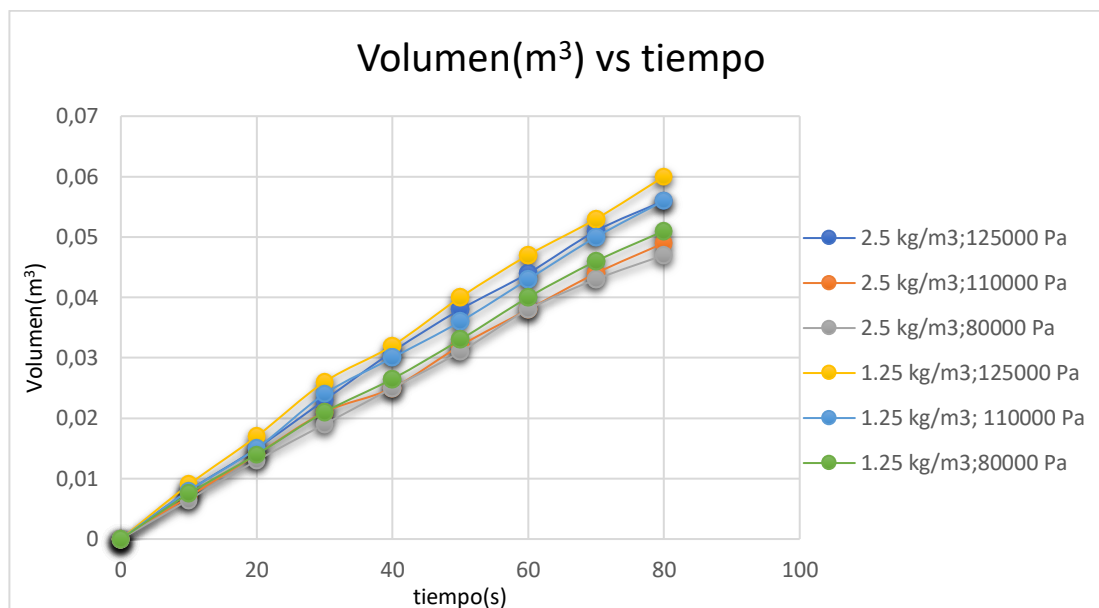
Fuente: Elaboración propia (2025).

Al comparar los resultados de los volúmenes filtrados presentados en la tabla 3.30. se observa que los mayores volúmenes se obtienen a la concentración de 1.25 kg/m³ de suspensión de cal apagada, bajo las diferentes caídas de presión aplicadas. Asimismo, se puede evidenciar que el volumen filtrado aumenta conforme incrementa la caída de presión, lo cual se atribuye al aumento de la velocidad de filtración.

Por otro lado, al comparar los resultados obtenidos a una caída de presión de 125000 Pa, se aprecia que el volumen filtrado tiende a disminuir ligeramente a medida que aumenta la concentración de la suspensión de cal apagada (1.25 y 2.5 kg/m³). Sin embargo, esta disminución no es significativa, ya que la diferencia de volúmenes filtrados entre ambas concentraciones no presenta una variación considerable. De igual manera, este comportamiento se mantiene para las demás caídas de presión (110000 Pa y 80000 Pa) analizadas. En particular, a la mayor presión aplicada (125000 Pa) y una concentración de 2.5 kg/m³, se obtiene un volumen filtrado levemente menor, debido al efecto del incremento en la cantidad de sólidos, que aumenta la resistencia de la torta, aunque sin afectar de manera drástica la permeabilidad del medio filtrante.

En el Gráfico 3-9, se representa el comportamiento del volumen de filtrado en función del tiempo, evidenciando la influencia de la caída de presión y de la concentración de la suspensión de cal apagada sobre la eficiencia de la operación de filtración.

Gráfico 3-9. Comportamiento del volumen de filtrado en función del tiempo (cal apagada).

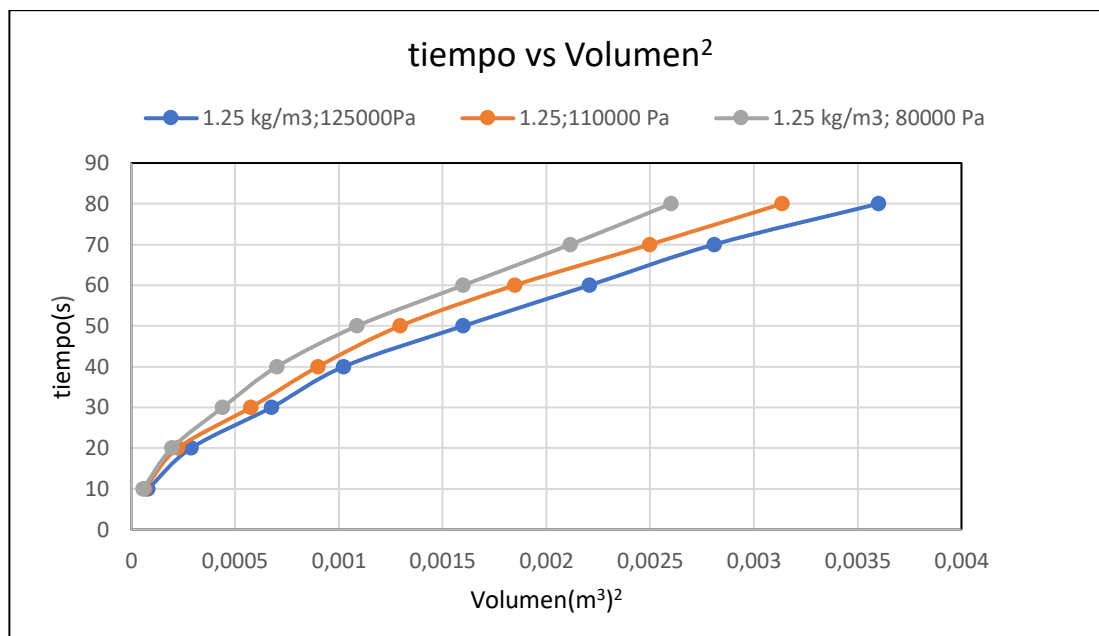


Fuente: Elaboración propia (2025).

En las curvas de filtración mostradas en la gráfica, se puede observar que se obtuvo una buena filtración tanto para la concentración de 1.25 como para la de 2,5 kg/m³, bajo las diferentes caídas de presión aplicadas. Estos resultados sirvieron como parámetros de referencia al momento de realizar la operación de filtración.

El Gráfico 3-9 evidencia que a 125000 Pa se alcanzan mayores volúmenes de filtrado, confirmando que el incremento de ΔP mejora la tasa de filtración al aumentar la fuerza impulsora del flujo. En contraste, a 80000 Pa se obtiene el desempeño menos eficiente debido a la menor capacidad para vencer la resistencia total del sistema. Asimismo, la mayor concentración (2.5 kg/m³) presenta pendientes ligeramente inferiores, atribuibles al incremento de la resistencia específica de la torta.

Gráfico 3-10. Comportamiento de la torta (cal apagada).



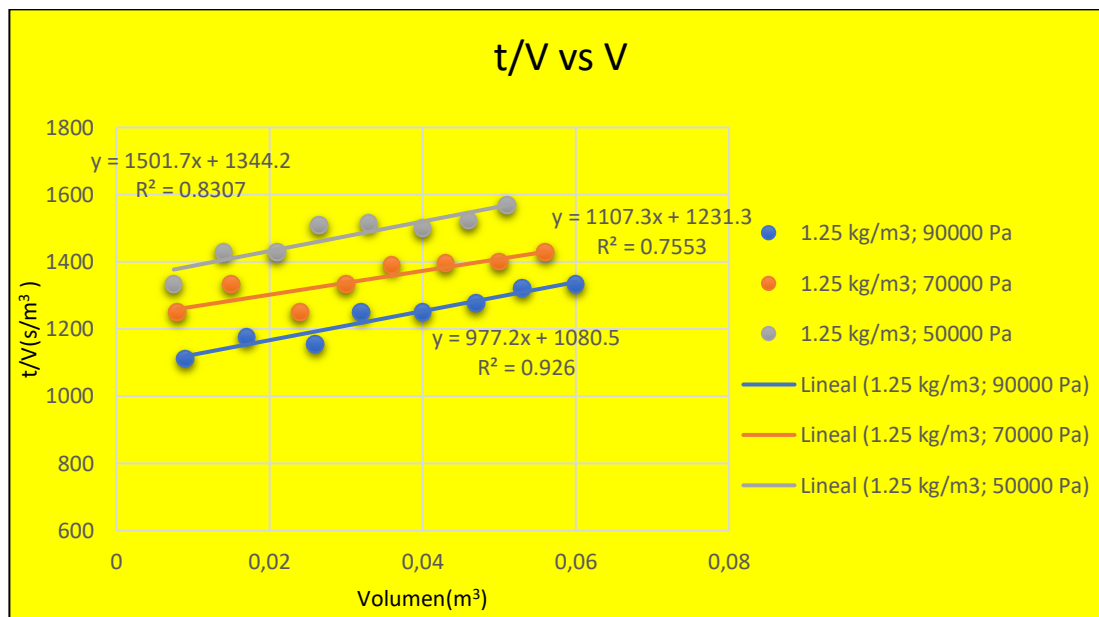
Fuente: Elaboración propia (2025).

En el Gráfico 3-10, se observa que los puntos correspondientes a la concentración de 1.25 kg/m³ de suspensión de cal apagada, evaluados a diferentes caídas de presión (125000 Pa, 110000 Pa y 80000 Pa), presentan una tendencia lineal definida. Este comportamiento indica que la resistencia específica de la torta (α) no varía significativamente con el incremento de ΔP . De acuerdo con los valores reportados en la Tabla 3-12, α aumenta entre 4% y 8% al incrementar la presión de 80 000 a 125 000 Pa, variación inferior al 20%. Según el criterio clásico de clasificación, incrementos menores al 20% se consideran no significativos, correspondiendo a una torta incompresible; entre 20% y 50% se clasifica como torta poco compresible, y valores superiores al 50% indican comportamiento compresible. En consecuencia, bajo las condiciones evaluadas, la torta formada puede considerarse incompresible.

En el gráfico 3-11, se muestran las líneas de regresión del tiempo/volumen en función del volumen, obtenidas para las distintas caídas de presión empleadas en las pruebas, usando una concentración de 1.25 kg/m³ de cal apagada, esta concentración se eligió

para el análisis porque permitió obtener el mayor volumen filtrado en 80 segundos, en comparación con la concentración de 2.5 kg/m³.

Gráfico 3-11. Regresiones lineales del tiempo/volumen en función del volumen.



Fuente: Elaboración propia (2025).

En el gráfico 3-11, se presentan las regresiones lineales obtenidas a partir de los resultados experimentales, donde se evidencia una relación lineal entre t/V y V . A partir de estas regresiones se determinaron las pendientes y las ordenadas al origen, parámetros fundamentales para el análisis del proceso de filtración.

La pendiente de cada línea de regresión se utiliza para calcular la resistencia específica de la torta (α), que expresa la dificultad que ofrece la torta al paso del fluido a través del medio filtrante. Por su parte, la ordenada al origen permite obtener la resistencia del medio filtrante (R_m), la cual representa la oposición inicial antes de la formación de la torta. Estos parámetros permiten analizar el comportamiento del sistema de filtración durante el ciclo de filtración.

Se observa, además, que algunos puntos experimentales presentan una ligera dispersión respecto a la línea de tendencia. Esta variación puede deberse a pequeños movimientos

del tanque receptor durante la toma de datos, lo que afecta la medición del volumen filtrado.

En la tabla 3-31, se muestran los valores de las pendientes obtenidas para las distintas caídas de presión y concentraciones de la suspensión de cal apagada. Estos valores fueron tomados de las tablas, donde se detallan los cálculos realizados.

Tabla 3-31. Valores de las pendientes para la prueba con cal apagada.

Concentración de suspensión de cal apagada (kg/m ³)	Caída de presión ΔP (Pa)		
	80000	110000	125000
	Pendientes (s/m ⁶)		
1.25	1501.7	1107.3	977.2
2.5	3137.8	2359.4	2131.3

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la tabla anterior se observa que, al mantener constante la concentración de la suspensión de cal apagada y aumentar la caída de presión, el valor de la pendiente tiende a disminuir. Este comportamiento se debe a que una mayor presión favorece el paso del fluido a través del medio filtrante, incrementando el volumen de filtrado obtenido.

En la tabla 3-32, se presentan los datos conocidos tabulados, tales como el área de filtración, la viscosidad del fluido, las caídas de presión y las concentraciones de la suspensión. Estos valores se emplean para calcular las resistencias específicas de la

torta (α) y resistencia del medio filtrante (R_m) mediante la ecuación general de la filtración a presión constante.

Tabla 3-32. Datos conocidos para el cálculo de las resistencias específicas (cal apagada).

Área de filtración (m ²)	Caída de presión ΔP (Pa)	Viscosidad de la disolución (Pa · s)	Concentración de sólidos (kg/m ³)
1.6	80000	0.001	1.25
1.6	110000	0.001	2.5
1.6	125000	0.001	-

Fuente: Elaboración propia (2025).

El procedimiento que permite el cálculo de las resistencias específicas es similar al explicado en las pruebas realizadas con la arcilla y sandía, con la ecuación 3.1 obtenida a partir de la ecuación 1.23, sustituyendo los valores de a y b en la ecuación 3.2 y 3.3, y con todos los valores conocidos permite la sustitución en las ecuaciones 3.4 (resistencia específica de la torta (α)) y la ecuación 3.5 (resistencia del medio filtrante (R_m)).

En la tabla 3-33, se muestran los resultados de las resistencias específicas de la torta obtenidas a diferentes caídas de presión y concentraciones de la mezcla de cal apagada.

Tabla 3-33. Resistencias específicas de la torta para la prueba con cal apagada.

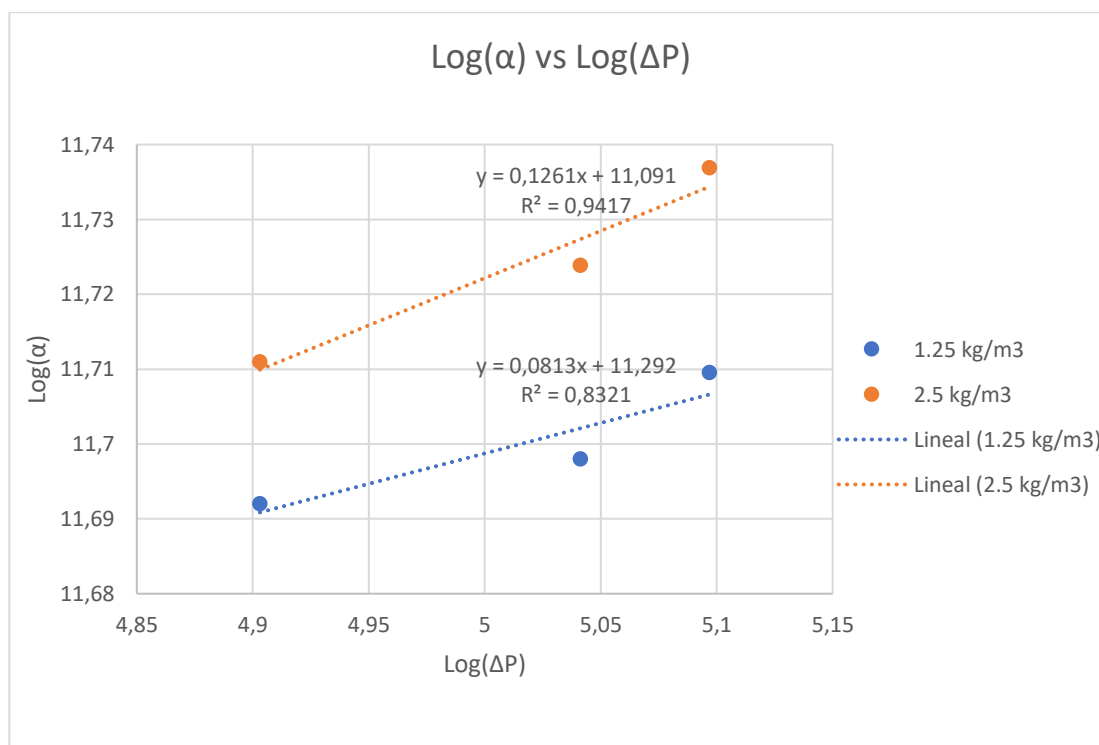
Concentración de suspensión de cal apagada (kg/m ³)	α (m/kg)	Caída de presión ΔP (Pa)		
		80000	110000	125000
		Resistencia específica de la torta		
		(m/kg) $\alpha \times 10^{+11}$	(m/kg) $\alpha \times 10^{+11}$	(m/kg) $\alpha \times 10^{+11}$
1.25	α	4.92	4.99	5.123
2.5	α	5.14	5.294	5.456

Fuente: Elaboración propia (2025).

En la tabla 3-33, se observa que para la concentración de 1.25 y 2.5 kg/m³ de suspensión de cal apagada, el valor de la resistencia específica de la torta aumenta con el incremento de la caída de presión. Este comportamiento se explica porque una mayor presión compacta la torta con mayor intensidad, reduciendo su porosidad y, en consecuencia, aumentando la resistencia al paso del fluido.

El gráfico que relaciona la compresibilidad con las diferentes concentraciones de suspensión de cal apagada, se interpreta de manera óptima en el contexto de la filtración a presión constante mediante el análisis de la gráfica Log (α) vs Log (ΔP). Este análisis es fundamental para comprender cómo las propiedades de la torta de filtración cambian bajo esfuerzo.

Gráfico 3-12. Compresibilidad de la torta para la cal apagada variando presiones de operación y concentraciones.



Fuente: Elaboración propia (2025).

En el Gráfico 3-12, se observa que la compresibilidad de la torta está influida por la concentración de la suspensión de cal apagada. A mayores concentraciones, el valor del coeficiente de correlación tiende a aproximarse a uno, indicando un comportamiento más compresible. En cambio, a menores concentraciones, dicho valor se acerca a cero, reflejando un comportamiento prácticamente incompresible.

De acuerdo con lo señalado por (Chilton y Perry, 1987), el tamaño de las partículas influye significativamente en la compresibilidad de la torta, ya que partículas más finas tienden a formar estructuras más compactas y, por tanto, más compresibles.

3.2. Análisis económico

El análisis económico se estructuró considerando las diferentes etapas involucradas en el desarrollo y materialización del filtro prensa, desde la concepción del prototipo hasta su configuración final. Para ello, el presupuesto se dividió en seis categorías principales que reflejan la lógica constructiva del equipo.

Tabla 3-34. Transporte y servicios técnicos requeridos

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
Envío de los marcos de PTFE	Transporte	1	200	200
Soldador	Servicio	1	1080	1080
Tornero (Placa fija, placa móvil)	Servicio	1	375	375
Tornero (Soportes)	Servicio	1	140	140
Tornero (Teflón)	Servicio	1	150	150
Mano de obra	Servicio	2	5000	10000
Subtotal				11945

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-35. Ítem para sistema de control, medición de variables y componentes eléctricos.

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
Manómetro con bulbo	Instrumento	1	300	300
Válvulas de bola (1")	Pieza	2	120	240
Interruptor térmico	Pieza	1	115	115
Acople para el manómetro de 1/2"	Pieza	1	35	35
Cable	Metro	3	6.5	19.5
Subtotal				709.5

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-36. Insumos para la construcción y operación del filtro

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
Cinta teflón	Unidades	2	4.5	9
Disco Flap	Pieza	3	25	75
Broca de 2 mm	Pieza	1	7	7
Disco para hierro	Pieza	2	20	40
Brocas dentadas	Pieza	2	32	64
Subtotal				195

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-37. Componentes principales del módulo de filtración

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
Marcos de PTFE	Unidad	10	480	4800
Plancha de 5mm	m ²	1	1700	1700
Medio Filtrante	Pieza	10	40	400
Lamina de acero inoxidable	m ²	1	800	800
Tubería Galvanizada (DN= 1´´)	Pieza	1	200	200
Adaptador para entrada del fluido	Pieza	1	55	55
Adaptador para la salida del fluido	Pieza	1	55	55
Tronillo sinfín	Pieza	1	200	200
Muelle de camión	Pieza	1	190	190
Grifo metálico 1/2"	Pieza	2	32.5	65
Chapa metálica (hierro galvanizado, m ²)	m ²	1	135	135
Tuerca hexagonal	Pieza	4	7.5	30
Subtotal				8630

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-38. Ítems que forman la estructura de soporte del filtro

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
Ruedas giratorias de 12cm	Pieza	3	50	150
Soportes de bandeja	Pieza	4	20	80
Tubería galvanizada (DN= 2´´)	M	1	75	75
Plancha metálica de 8 mm	Pieza	3	55	165
Pernos hexagonales	Pieza	6	4	24
Subtotal				494

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-39. Sistema de alimentación y descarga

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
Tanque de almacenamiento del fluido a filtrar (100 l)	L	2	300	600
Unión de PVC de 1"	Pieza	2	8	16
Válvula Reductora de presión	Pieza	1	265	265
Conector espiga 1" macho para manguera	Pieza	6	5	30

Niples de PVC de 1"	Pieza	2	6	12
Bomba centrífuga (Potencia = 1 HP)	Pieza	1	1200	1200
Manguera sanitaria	Metro	2	165	330
Abrazadera de manguera	Pieza	4	8.5	34
Subtotal				2487

Fuente: Elaboración propia (2025).

Tabla 3-40. Ítems para el soporte del sistema de alimentación del filtro.

Ítem	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Costo (Bs)
Tubo rectangular negro	M	2	130	260
Ruedas giratorias de 7 cm	Pieza	4	35	140
Pernos auxiliares	Pieza	8	2.5	20
Subtotal				420

Fuente: Elaboración propia (2025).

Posteriormente, se consolidó el presupuesto general del filtro prensa, integrando los costos de adquisición, fabricación, montaje y operación.

Tabla 3-41. Presupuesto global

Apartado	Subtotal (Bs.)
Servicios solicitados	11945
Ítems para el sistema de control e instrumentos	709.5
Insumos para la construcción y operación del filtro	195
Ítems que forman cuerpo del filtro	8630
Ítems que forman la estructura de soporte del filtro	494
Ítems de la alimentación y recepción del filtro	2487
Ítems para el soporte del sistema de alimentación del filtro	420
Total	24880.5

Fuente: Elaboración propia (2025).

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El diseño, construcción y evaluación del filtro prensa desarrollado en este proyecto demuestran la viabilidad técnica y funcional de un sistema de filtración a presión diseñado con criterios de ingeniería aplicados al ámbito académico. El equipo logró reproducir satisfactoriamente las condiciones operativas de un proceso industrial de separación sólido-líquido, confirmando que es posible adaptar principios teóricos de la ingeniería de filtración a un entorno de laboratorio con materiales disponibles localmente y bajo un enfoque de optimización económica.

Se dimensionó y construyó el filtro prensa para el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, cumpliendo con los criterios de diseño, resistencia mecánica y funcionalidad requeridos para su aplicación en procesos de separación sólido-líquido. Durante su desarrollo, se realizaron los cálculos de dimensionamiento, determinándose las especificaciones técnicas de cada componente y el material óptimo para su fabricación, asegurando la estabilidad estructural del equipo bajo condiciones de operación de hasta 3.1 bar.

Asimismo, se establecieron los costos de materiales y de construcción, los cuales se detallan en el análisis económico, en la tabla 3.31. de este documento, permitiendo estimar la viabilidad económica del proyecto y demostrar que la fabricación local representa una alternativa accesible frente a equipos importados de similares características.

El filtro prensa fue construido, ensamblado e instalado satisfactoriamente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, verificándose su correcto funcionamiento mediante pruebas experimentales y su puesta en marcha, como se evidencia en las fotografías incluidas en los anexos 2 y 3 del presente documento.

Se ejecutaron pruebas al vacío simulando el proceso de filtración de suspensiones, confirmando el adecuado desempeño hidráulico y la hermeticidad del sistema, garantizando así la operatividad del equipo para prácticas académicas y ensayos experimentales.

Finalmente, se elaboró el Manual de Operación y Prácticas de Filtrado, junto con una guía experimental diseñada para que los estudiantes desarrollen ejercicios y mediciones propias de la operación unitaria de filtración, ambos incluidos en el Anexo N.º 3, estos documentos fortalecen el proceso de enseñanza-aprendizaje, facilitando el uso didáctico del equipo y promoviendo la aplicación práctica de los conocimientos teóricos adquiridos en la carrera de Ingeniería Química.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda continuar con la evaluación del filtro prensa en condiciones operativas extendidas y con diferentes tipos de suspensiones, a fin de ampliar la base de datos experimental y establecer correlaciones más precisas entre la resistencia específica de la torta, la presión de filtración y la naturaleza de los sólidos. Estas pruebas permitirán definir curvas de comportamiento características del equipo y validar modelos predictivos aplicables al dimensionamiento de sistemas industriales.

Para optimizar su desempeño, se sugiere incorporar sensores digitales de presión y caudal, junto con un sistema automatizado de adquisición de datos, lo que permitirá realizar un monitoreo continuo y aumentar la precisión de los análisis experimentales.

Se sugiere implementar un agitador para garantizar la uniformidad de la muestra mientras se está realizando el ciclo de filtración. Asimismo, la instalación de un sistema de lavado de torta automatizado facilitaría la limpieza y reduciría los tiempos de operación entre ciclos, incrementando la eficiencia global del proceso.

Desde el punto de vista estructural, se recomienda realizar un mantenimiento preventivo periódico, verificando la integridad de las placas filtrantes, el estado de las juntas, la alineación de las varillas y el correcto funcionamiento de la bomba centrífuga. También se aconseja evaluar la sustitución de ciertos componentes por materiales poliméricos de menor peso y mayor resistencia a la corrosión, especialmente en el entorno de laboratorio donde se manipulan diferentes tipos de fluidos.

En el ámbito académico, se recomienda que este equipo se utilice como base para el desarrollo de nuevas prácticas experimentales relacionadas con la filtración, la determinación de parámetros de torta, la caracterización de suspensiones y la comparación de medios filtrantes. Además, puede servir como plataforma de investigación para proyectos de grado enfocados en la automatización de procesos, eficiencia energética y análisis geológico de fluidos no newtonianos.

Finalmente, se sugiere difundir los resultados de este proyecto a través de publicaciones o presentaciones académicas en el ámbito nacional, promoviendo el fortalecimiento de la investigación aplicada en la UAJMS. El filtro prensa desarrollado representa una herramienta de gran valor didáctico y tecnológico, que puede ser replicada y mejorada en futuras generaciones de ingenieros químicos, contribuyendo al progreso científico y al desarrollo sostenible de la región.