ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE BARBOTINA EN LA EMPRESA FV ÁREA ANDINA S.A.

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

CHICAIZA POLUCHI DIEGO ALEJANDRO
diego.chicaiza01@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. CANDO NARVÁEZ EDGAR HERNÁN, Ph.D.
edgar.cando@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. HIDALGO DÍAZ VÍCTOR HUGO, D. Sc.
victor.hidalgo@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **Diego Alejandro Chicaiza Poluchi** bajo nuestra supervisión.

Ing. Edgar Hernán Cando Narváez, PhD.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D. Sc.

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo **Diego Alejandro Chicaiza Poluchi**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Diego Alejandro Chicaiza Poluchi

DEDICATORIA

Por todo el apoyo incondicional que recibí en cada momento que necesitara, con el objetivo de cumplir mi más grande sueño de ser un profesional.

Por todo los ejemplos y enseñanzas de vida que recibo día a día para ser una mejor persona.

Por su fortaleza y tenacidad con la que afronta cada obstáculo en su vida, y la cual me ha servido de motivación para seguir adelante y no rendirme ante cualquier adversidad y levantarme cada vez con más fuerza.

Por el amor y el cariño que me brindas incondicionalmente.

Sabiendo que estarás muy orgullosa y feliz de mi esfuerzo y meta cumplida, te dedico este trabajo mamá.

Aida Elizabeth Poluchi Cajas

AGRADECIMIENTO

A mi mamá, Aida, por todos los sacrificios que ha hecho a lo largo de mi carrera estudiantil, y porque me ha enseñado que con perseverancia, esfuerzo y dedicación se puede alcanzar cualquier meta que uno se propone.

A mi hermana Cristina, por su predisposición a ayudarme en todo momento, y porque me considera su referente a seguir, lo que me motiva a ser mejor cada día.

A mis profesores quienes son responsables de transmitirme sus bastos conocimientos y experiencias, en especial a los Ing. Edgar Cando e Ing. Víctor Hidalgo por el apoyo ante cualquier inquietud que tuviese para el desarrollo del presente proyecto.

A la empresa FV Área Andina, en especial al Ing. Marco Bravo, la Ing. Luz Vallejo y la Ing. Diana Minayo, quienes me dieron la oportunidad y la confianza para realizar este proyecto. También a todos quienes conforman el sector de procesos cerámicos quienes me brindaron su ayuda y me acogieron como un compañero más del sector.

A mis amigos por tantas experiencias académicas, viajes, fiestas, reuniones que tuve con ellos a lo largo de mi paso por la universidad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Pág.

Certificación i
Declaración ii
Dedicatoria iii
Agradecimiento iv
Índice de contenido v
Índice de figuras viii
Índice de tablas xi
Glosario de términos xii
Resumen xiv
Abstract xv
Introducción 1
Pregunta de Investigación 2
Objetivo general 2
Objetivos Específicos 2
Alcance 2
1. MARCO TEÓRICO 4
1.1. Estado del arte 4
1.2. Fluidos no Newtonianos 5
1.2.1. Definición 6
1.2.2. Fluidos no newtonianos dependientes de la velocidad de cizalla 7
1.2.3. Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo de aplicación 9
1.3. Reología 11
1.3.1. Definición 11
1.3.2. Importancia de la reología en la cerámica 11
1.4. Viscosidad 12
1.4.1. Definición 13

1.4.2. Viscosidad aparente....13
1.4.3. Factores que afectan la viscosidad....14
1.5. Modelos reológicos....16
1.5.1. Modelo de ley de potencia (Ostwald de Waele)....16
1.5.2. Modelo de plástico de Bingham....16
1.5.3. Modelo de Herschel Bulkley....17
2. METODOLOGÍA....18
2.1. Caracterización reológica....18
2.1.1. Descripción del fluido de trabajo....19
2.1.2. Condiciones del fluido de trabajo....20
2.1.3. Diseño experimental de la caracterización reológica....21
2.1.4. Procedimiento de análisis reológico....24
2.2. Modelación matemática y simulación del flujo de fluidos no newtonianos....27
2.2.1. Condiciones de simulación....28
2.2.2. Modelación matemática....31
2.2.3. Geometría del circuito de pruebas....33
2.2.4. Descripción del procedimiento experimental....37
2.3. Diseño del sistema de bombeo....38
2.3.1. Análisis del área de colado....38
2.3.2. Parámetros de diseño....39
2.3.3. Diseño del circuito de bombeo....40
2.3.4. Programa de simulación EPANET....41
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN....43
3.1. Análisis de caracterización reológica....43
3.1.1. Propiedades básicas de la pasta (barbotina)....43
3.1.2. Dependencia de la viscosidad en función del tiempo....43
3.1.3. Curva de flujo....46
3.1.4. Ajuste al modelo no Newtoniano....50
3.1.5. Análisis de la curva de flujo para la barbotina....50

3.2. Validación del modelo matemático.....51
3.2.1. Simulación del fluido a través del circuito de pruebas 51
3.2.2. Comparación de resultados entre la simulación y el estudio experimental del flujo 54
3.3. Análisis del sistema de bombeo.....56
3.3.1. Curva del sistema de bombeo.....56
3.3.2. Análisis en condiciones de operación 58
4. CONCLUSIONES 60
4.1. Conclusiones 60
4.2. Trabajos futuros.....61
Referencias bibliográficas 62
Anexos……65
Anexo I. Descripción de la barbotina.....66
Anexo II. Modelado matemático para el circuito de pruebas. 68
Anexo III. Plano del circuito de pruebas.....70
Anexo IV. Planos de circuitos actuales de distribución de barbotina 71
Anexo V. Análisis del área actual de colado 74
Anexo VI resultados de medicion de las propiedades principales de la barbotina. 83
Anexo VII. Resultados de mediciones.....84
Anexo VIII. Especificaciones técnicas de la bomba YAMADA NDP 50 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1. Clasificación de los tipos de fluidos. 6
Figura 1.2. Curva de flujo para tipos de fluidos no newtonianos 7
Figura 1.3. Curvas de a) flujo y b) viscosidad de un material fludificante 8
Figura 1.4. Comportamiento reológico de fluidos no newtonianos en estado estacionario 8
Figura 1.5. Comportamiento reológico de fluidos no newtonianos en estado transitorio ..10
Figura 1.6. Histéresis de un fluido no newtoniano en estado transitorio 10
Figura 1.7. Esfuerzo cortante entre dos placas paralelas 12
Figura 1.8. Viscosidad dinámica y aparente en una curva de flujo 13
Figura 1.9. Ciclo de histéresis para un fluido tixotrópico 14
Figura 1.10. Curvas de flujo y viscosidad para distintos tipos de comportamiento 15
Figura 2.1. Metodología general 18
Figura 2.2. Secuencia del diseño experimental 22
Figura 2.3. Procedimiento de recolección de la muestra de barbotina 22
Figura 2.4. Procedimiento de medición de la densidad 23
Figura 2.5. Procedimiento de medición de la humedad 23
Figura 2.6. Procedimiento de medición del PDH 24
Figura 2.7. Caracterización del comportamiento tixotrópico 24
Figura 2.8. Equipo reológico REOLABQC marca Anton Paar. 25
Figura 2.9. Esquema del desarrollo de pruebas para la caracterización tixotrópica 26
Figura 2.10. Esquema del desarrollo de pruebas para la caracterización en estado estable 27
Figura 2.11. Distribución de velocidades de un flujo laminar de fluidos con esfuerzo umbral 28
Figura 2.12. Sistema típico de bombeo 31
Figura 2.13. Diagrama unifilar del circuito de pruebas 34
Figura 2.14. Bomba YAMADA NDP 80 BAC 35
Figura 2.15. Regulador de presión de aire 35
Figura 2.16. Manómetro tipo Bourdon marca WIKA 35
Figura 2.17. Caudalímetro Endress Hauser modelo Proline Promag P300 36
Figura 2.18. Procedimiento experimental en el circuito piloto 37
Figura 2.19. Recirculación del circuito de distribución 38
Figura 2.20. Línea de llenado o colado 39
Figura 2.21. Diagrama unifilar del sistema de bombeo propuesto 41
Figura 2.22. Pasos para el análisis del circuito de bombeo en EPANET 42

Figura 2.23. Esquema del circuito de bombeo en EPANET 42
Figura 3.1. Evolución de la viscosidad de la barbotina con respecto al tiempo. 44
Figura 3.2. Pruebas tipo paso a paso de 1 a 100 [1/s] y tipo paso a paso de 100 a 10 [1/s] para la barbotina.....45
Figura 3.3. Pruebas tipo paso a paso de 10 a 50 [1/s] y tipo paso a paso de 500 a 50 [1/s] para la barbotina.....45
Figura 3.4. Pruebas tipo paso a paso de 50 a 500 [1/s] y tipo paso a paso de 1000 a 50 [1/s] para la barbotina 46
Figura 3.5. Construcción por fases de las curvas de (a) flujo y (b) viscosidad 47
Figura 3.6. Construcción en una sola fase de las curvas de (a) flujo y (b) viscosidad 47
Figura 3.7. Comparación de la curva de flujo construida por varias fases y una sola fase 48
Figura 3.8. Comparación de la curva de viscosidad construida por varias fases y una sola fase.....48
Figura 3.9. Curva de flujo y curva de viscosidad a partir del modelo de Herschel Bulkley49
Figura 3.10. Comparación de las curvas de flujo y viscosidad con el modelo matemático ajustado 51
Figura 3.11. Caídas de presión vs longitud de tubería para una presión de bombeo 53
Figura 3.12.Comparación de las caídas de presión vs longitud de tubería para las diferentes presiones de bombeo 53
Figura 3.13. Curva del sistema de bombeo.....56
Figura 3.14. Caudal requerido durante el horario de llenado por el circuito de bombeo...57
Figura 3.15. Resultados de la simulación proporcionado por EPANET.....58
Figura 4.1. Líneas de llenado en el área de colado.....74
Figura 4.2. Volumen requerido por cada línea del circuito 1 actual 76
Figura 4.3. Volumen requerido por cada línea del circuito 2 actual 76
Figura 4.4. Volumen requerido por cada línea del circuito 3 actual 76
Figura 4.5. Consumo de volumen de barbotina en el horario de llenado de líneas de los tres circuitos actuales de bombeo.....77
Figura 4.6. Nueva propuesta de distribución de circuitos para el área de colado 78
Figura 4.7. Volumen requerido por cada línea del circuito 1 propuesto.....78
Figura 4.8. Volumen requerido por cada línea del circuito 2 propuesto.....79
Figura 4.9. Volumen requerido por cada línea del circuito 3 propuesto.....79
Figura 4.10. Consumo de volumen de barbotina en el horario de llenado de líneas de los tres circuito propuestos de bombeo 79
Figura 4.11. Vista de planta del circuito 2 propuesto.....80

Figura 4.12. Configuración de bombas para el circuito 2 propuesto.....80
Figura 4.13. Vista lateral izquierda del circuito 2 propuesto 80
Figura 4.14. Vista lateral derecha del circuito 2 propuesto.....81
Figura 4.15. Especificaciones técnicas de la bomba de diafragma marca YAMADA.....85
Figura 4.16. Curvas características de la bomba YAMADA NDP 50 86

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1.1.Velocidades de cizalla de diferentes procesos de conformado cerámico. 16
Tabla 2.1. Parámetros de aceptación de densidad de la barbotina 21
Tabla 2.2. Parámetros de aceptación de humedad de la barbotina.....21
Tabla 2.3. Parámetros de aceptación de PDH de la barbotina 21
Tabla 2.4. Resultado de condiciones del fluido en el circuito de pruebas a diferentes presiones 30
Tabla 2.5. Factor de corrección de energía cinética (α) en régimen laminar. 32
Tabla 2.6. Datos del circuito de pruebas y del fluido de trabajo 36
Tabla 2.7. Distancia entre manómetros colocados en el circuito de pruebas 36
Tabla 2.7. Valores máximos y mínimos de caudal y presión en punto de llenado 39
Tabla 3.1. Propiedades principales de la barbotina.....43
Tabla 3.2. Tiempo de estabilización para los diferentes rangos de tasas de cizallamiento 46
Tabla 3.3. Parámetro reológicos de la barbotina.....50
Tabla 3.4. Resultados de la simulación del modelo matemático 52
Tabla 3.5. Datos de caudal y caídas de presión obtenidas del estudio experimental 54
Tabla 3.6. Porcentajes de error al comprar los resultados de la simulación y los del estudio experimental 55
Tabla 3.7. Condiciones de bombeo.....57
Tabla 3.8. Resultados de presión y caudal en cada una de las salidas del circuito.....58
Tabla 4.1. Distribución de líneas y cantidad de piezas por circuitos.....75
Tabla 4.2. Volumen requerido por cada línea 75
Tabla 4.3. Resultados de medición de la propiedades de control de la barbotina 83
Tabla 4.4. Datos obtenidos de las mediciones en el circuito piloto.....84

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ρ	Densidad
τ	Esfuerzo cortante
τ_0	Esfuerzo umbral o de fluencia
τ_0	Esfuerzo cortante en la pared de la tubería
γ	Deformación
$\dot{\gamma}$	Tasa de deformación
$\dot{\gamma}_w$	Tasa de deformación en la pared de la tubería
μ	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática
η	Viscosidad aparente
η_0	Viscosidad plástica
K	Índice de consistencia
n	Índice de comportamiento
f	Factor de fricción de Fanning
Dh	Diámetro hidráulico
GR_E	Reynolds generalizado
Re_{HB}	Reynolds de Herschel Bulkley
ϕ	Parámetro adimensional de Herschel Bulkley
V_{ann}	Velocidad del área anular
D_{shear}	Diámetro de corte

Q_p	Caudal del tapón
V_{plug}	Velocidad del tapón
R_p	Radio del tapón de tubería
R	Radio de tubería
Re_B	Reynolds de Bingham
H_E	Número de Hedstrom
C_c	Constante de Bingham
$\bar{v}$	Velocidad promedio de flujo
$\dot{q}$	Flujo volumétrico
ΔP	Caída de presión
W	Trabajo específico
Ef	Pérdidas de energía por fricción
α	Factor de corrección de energía cinética
$\dot{w}$	Potencia de bombeo

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el diseño y la simulación de un sistema de distribución de barbotina para la empresa FV Área Andina S.A. basado en la caracterización reológica del fluido y modelos matemáticos para fluidos no newtonianos. Inicialmente se realizó la caracterización reológica del fluido a través de la construcción de la curva de flujo (Tensión de cizallamiento vs tasa de deformación y viscosidad aparente vs tasa de deformación), luego se ajusta los datos obtenidos a un modelo de fluido no newtoniano. La modelación matemática para el diseño del sistema considera ecuaciones para fluidos no newtonianos encontrados en la bibliografía existente. Con la finalidad de realizar un proceso de validación de la metodología utilizada en el diseño, la caída de presión en un sistema piloto experimental fue comparado con las estimaciones obtenidas en el presente estudio, de la cual se determinó que la barbotina utilizada en la empresa FV Área Andina S.A. tiene un comportamiento pseudoplástico que se ajusta al modelo de Herschel Buckley con un error del 10 %. Finalmente, el software de acceso libre EPANET fue utilizado para el diseño y análisis del circuito hidráulico requerido, para lo cual se implementó en el software, la ecuación para estimar el factor de fricción y las propiedades del fluido. Los resultados muestran la caracterización reológica, el diseño y análisis del circuito hidráulico para que los puntos de alimentación a las líneas de colado se encuentren dentro de los parámetros de presión y caudal detallados en el manual de calidad de la empresa.

Palabras clave: caracterización reológica, barbotina, fluido no newtoniano, sistemas de bombeo.

ABSTRACT

The present study shows the design and simulation of a barbotine distribution system for the company FV Area Andina S.A. based on rheological characterization of the fluid and mathematical models for non-Newtonian fluids. Initially, the rheological characterization of the fluid was performed through the construction of the flow curve (shear stress vs shear rate and viscosity vs shear rate). Then, the data obtained was adjusted to a non-Newtonian fluid model. Mathematical modeling for system design considers equations for non-Newtonian fluids founded in existing literature. In order to carry out a process of validation of the methodology used in the design, the pressure drop in an experimental pilot system was compared with the estimates obtained in this study, where, it was determined that the barbotine used in FV Area Andina S.A. has a pseudoplastic behavior that conforms to the models of Herschel Bulkley and the mathematical model used shows a 10 % error. Finally, EPANET software was used to design and analyze the requirements of the hydraulic circuit, for which the equation to estimate the friction factor and fluid properties were implemented in the software. The results show the rheological characterization, design and analysis of the hydraulic circuit in order to keep the feed points to the draining lines within the pressure and flow parameters detailed in the company quality manual.

Key words: Rheological characterization, barbotine, non-Newtonian fluid, pumping system.

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO PARA PARA LA DISTRIBUCIÓN DE BARBOTINA EN LA EMPRESA FV ÁREA ANDINA S.A.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los ceramistas (ingenieros, artistas, técnicos) se ven enfrentados a la reología, ya que es necesario no solo comprender el concepto de viscosidad, sino la amplitud de otros temas reológicos como las relaciones causa-efecto que gobiernan las propiedades de deformación de las pastas de producción. Las pastas cerámicas al ser suspensiones complejas de partículas traen consigo la posibilidad de que presenten reologías no newtonianas [14].

El estudio de la viscosidad de un fluido y sus propiedades es una tarea compleja pero imprescindible para conocer el comportamiento completo de los mismos, por la gran aplicabilidad que tiene su conocimiento como por ejemplo su afección sobre los procesos de lubricación, la determinación de los regímenes laminares y turbulentos en los flujos, o su influencia en las pérdidas de carga. [36]. En los fluidos newtonianos, la viscosidad es una constante que prácticamente depende únicamente de la temperatura, mientras que, en los fluidos no newtonianos, el propio movimiento del fluido afecta a la viscosidad, adoptando valores cambiantes conforme lo hace la velocidad y el esfuerzo cortante [37].

En la división sanitarios de FV Área Andina S.A. han mostrado el interés en la mejora de cada uno de los procesos para la fabricación de porcelana sanitaria y con ello, la mejora en la calidad de su producto final. Uno de sus procesos se lleva a cabo en el área de colado, donde se utiliza barbotina (fluido viscoso producto de mezcla de arcillas) para el moldeado de piezas. En el área de colado, el proceso empieza con el bombeado del fluido desde la sección de procesos cerámicos hacia las distintas líneas de colado, a través de los circuitos de distribución.

Actualmente, los circuitos del sistema de distribución de barbotina presentan problemas con la caída de presión y la disminución de caudal en los puntos de llenado. El problema fundamental es la falta de un diseño previo en los circuitos de distribución de barbotina, debido a que la construcción de este se ha ido realizando por los requerimientos que se han presentado en la producción sin ningún estudio técnico que garantice un correcto abastecimiento de barbotina y prevenga variaciones de presión y caudal.

Este inconveniente conlleva a dos graves problemas:

- Un llenado incompleto de la tubería que afecta a la cantidad de llenado, desabasteciendo de barbotina a las líneas de distribución y a los moldes, provocando cortes de llenado en las piezas o un desfase en el tiempo de fabricación produciendo pérdidas de piezas y retrasos en la producción.
- La entrada de aire en la barbotina durante el bombeo introduciendo burbujas de aire en la pasta que afecta la calidad superficial de la pieza.

Con estos inconvenientes presentados anteriormente se puede deducir que el problema principal es el diseño del circuito de distribución para las líneas de colado. Dado este problema se plantea diseñar un nuevo circuito, en el cual se considere un estudio previo del fluido a transportar, y también un diseño que cumpla con todos los requerimientos que permitan evitar los problemas ya mencionados, los mismos que repercuten tanto en los costos de producción como en la calidad del producto final que se obtiene.

Pregunta de Investigación

¿Es posible diseñar un sistema de distribución de barbotina basado en la caracterización reológica del fluido y modelos matemáticos de fluidos no newtonianos?

Objetivo general

Diseñar y simular un sistema de bombeo para la distribución de barbotina en la empresa FV Área Andina S.A.

Objetivos Específicos

- Recopilar información del estado del arte sobre sistemas de bombeo de barbotina y su caracterización reológica.
- Determinar los parámetros de diseño para el bombeo de barbotina en el área de colado de la empresa FV área Andina.
- Determinar los datos reológicos de la barbotina.
- Simular y validar el flujo de barbotina mediante un estudio experimental.
- Analizar los puntos de operación del circuito.

Alcance

El presente proyecto tiene como finalidad determinar un sistema de distribución de barbotina para el área de colado de la empresa FV, para ello es necesario utilizar modelos o simulación de fluidos no Newtonianos y el estudio hidráulico para el diseño del circuito de bombeo.

Para lograr el diseño del circuito, se debe estudiar el comportamiento reológico en los sistemas de transporte de un fluido no Newtoniano como la barbotina mediante ensayos de caracterización, en donde se estudiará las características y propiedades del fluido, principalmente viscosidad y esfuerzo de fluencia, que ayudarán a construir una ecuación reológica de la barbotina y en adición con un estudio hidráulico, donde se determinarán los parámetros de bombeo, permitirán el análisis del flujo al interior de las tuberías y los puntos de llenado a diferentes condiciones de operación, y así solucionar los problemas que disminuyen la calidad en los productos y afectan a los costos de producción de la empresa. Además, este proyecto sirve como base para la aplicación y mejora de otros circuitos de distribución existentes en la empresa.

1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se recopila y describe el estado del arte que comprende el presente trabajo y que será base para desarrollar las siguientes etapas.

1.1. Estado del arte

Un sistema de bombeo es un mecanismo que permite el transporte de fluidos sin alterar su densidad. La potencia requerida por un sistema de bombeo será determinada por las características del fluido que se requiere transportar, específicamente de su viscosidad, la diferencia de alturas entre un punto y otro del circuito de bombeo, longitud de la tubería, diámetro de la tubería, cantidad de accesorios y la ubicación geográfica [1].

El diseño de un sistema de bombeo consiste en el cálculo y la selección de bomba, potencia, etc., que permita satisfacer los requerimientos operacionales [1]. Varios trabajos se han realizado en el área del diseño del sistema de transporte de barbotina. Algunos de estos trabajos se mencionan a continuación.

Chango [10], realizó una investigación del comportamiento reológico de la pasta de producción (barbotina) de la empresa EDESA S.A., en donde analizó la influencia del esfuerzo cortante y la velocidad de deformación a varias condiciones de temperatura para diferentes muestras de viscosidad. Preparó muestras de barbotinas con viscosidades de 180, 500 y 1000 cP, medidas con un viscosímetro Brookfield a 20 °C, de las cuales determinó las propiedades fisicoquímicas. Para el desarrollo del proyecto contó con la ayuda del reómetro PHYSICAL MCR 301 y realizó el análisis reológico en el rango de velocidades de deformación de 0,1 a 1000 rev/s a las temperaturas de 25, 32 y 45 °C. Como resultados se obtuvo gráficas de esfuerzo cortante y viscosidad en función de la tasa de deformación y concluye que la barbotina a las temperaturas estudiadas se comporta bajo el modelo reológico de Herschel Bulkley. Los parámetros obtenidos del modelo reológico sirvieron para los cálculos de las pérdidas en el sistema, la presión ejercida por la bomba, la potencia de la bomba y el número de Reynolds.

Llumiquinga [19], llevo a cabo el estudio de las viscosidades medias en tuberías de sistemas de distribución de fluidos no newtonianos tipo barbotina en la empresa FV para propósitos de aumento de la eficiencia en procesos de producción, en el cual determina que la barbotina es un fluido no newtoniano dependiente del tiempo con recuperación total de su estructura que permite ajustarse al modelo de Herschel Bulkley. En este estudio se realiza la caracterización de la barbotina utilizada en la empresa FV de forma que se obtuvo modelos matemáticos para la viscosidad aparente y la tixotropía.

También analizó los sistemas de distribución para fluidos no newtonianos y se resuelve la ecuación para la barbotina estudiada, y desarrolla un programa matemático en Matlab con el objetivo de obtener la velocidad media y la viscosidad efectiva en cualquier punto del sistema, ingresando datos de características del fluido y geometría del sistema.

Cabe mencionar que el estudio reológico del fluido en el aspecto de la deformación y flujo de la materia ayuda a comprender y predecir el comportamiento del fluido de tipo no newtoniano a lo largo de un proceso, por eso la importancia de realizar la caracterización.

En el área de la caracterización reológica, Cando [7] analiza el flujo permanente de un líquido tixotrópico a través de contracciones abruptas simétricas al eje de expansión, en donde se estudia experimentalmente el comportamiento de los fluidos tixotrópicos. El fluido utilizado para la investigación es caracterizado reológicamente al obtener la curva de flujo mediante pruebas oscilatorias de barrido de tensión y barrido de frecuencia.

En el trabajo de investigación Cando [7] trabaja con una arcilla denominada Laponita RD y determina que es un fluido tixotrópico, es decir un fluido con características dependientes del tiempo. Esto se realizó mediante pruebas tipo “step change” en la que se evidencia el tiempo para alcanzar el nivel de régimen permanente depende del cizallamiento anterior. Las pruebas tipo “step change” se emplean para distinguir los efectos de la elasticidad y evaluar la tixotropía. La prueba consiste inicialmente en aplicar una tasa de deformación constante, y luego cambiar la tasa de deformación, donde el valor es reducido o incrementado. También concluye que el material tiene un comportamiento viscoplástico, debido a que la viscosidad disminuye con la tasa de deformación y que el alcanza un nivel que puede ser extrapolado como la tensión límite del flujo. El modelo matemático de Herschel Bulkley fue empleado para hacer un ajuste de la curva de tensión de cizallamiento y obtener los parámetros reológicos.

1.2. Fluidos no Newtonianos

En el ámbito industrial, las características reológicas de un fluido es un criterio determinante en el desarrollo de productos e influyen en el control de calidad, el comportamiento mecánico, diseño de operaciones básicas como bombeo, mezclado y envasado, en el almacenamiento y también durante el consumo.

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de esfuerzos cortantes. Las propiedades reológicas dependen de la relación entre la fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, ya sea como deformación o flujo [29].

Matemáticamente, es sistema de fuerzas externas se representa mediante el esfuerzo cortante y la respuesta dinámica se cuantifica mediante la velocidad de deformación. Los fluidos pueden clasificarse en dos tipos:

- *Fluidos Newtonianos:* presenta proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.
- *Fluidos no Newtonianos:* no presenta una proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, puede necesitar de un esfuerzo inicial o esfuerzo umbral para que este empiece a fluir.

La clasificación de los diferentes tipos de fluidos se representa en un esquema conciso mostrado en la Figura 1.1.

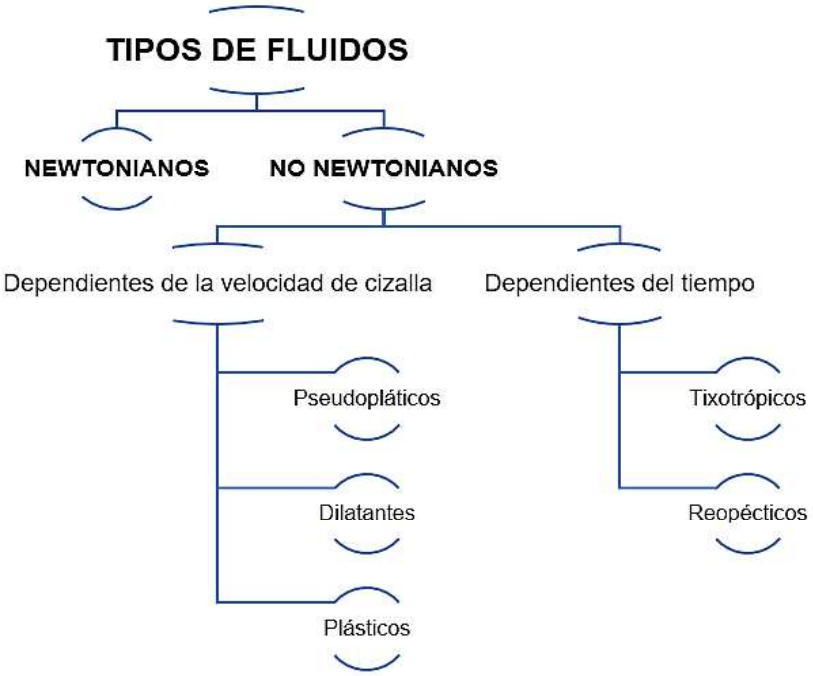


Figura 1.1. Clasificación de los tipos de fluidos.
(Fuente: Propia)

1.2.1. Definición

Los fluidos no newtonianos presentan una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, esto significa que la viscosidad no permanece constante y está en función de la velocidad de corte [13].

La mayoría de los fluidos a nivel industrial no obedecen la ley de viscosidad de Newton, así se tiene productos alimenticios, emulsiones, pastas, suspensiones. Estos fluidos se diferencian en dependientes de la velocidad de cizalla y dependientes del tiempo.

1.2.2. Fluidos no newtonianos dependientes de la velocidad de cizalla

Esta clase de fluidos tienen su comportamiento reológico en estado estacionario (la viscosidad no varía con respecto al tiempo), donde la viscosidad varía según la tasa de cizalladura, pero es independiente de la duración de la aplicación del esfuerzo.

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo si requieren de un esfuerzo umbral, es decir, si necesitan de un esfuerzo cortante mínimo para que el fluido empiece a fluir. La clasificación se puede observar en la Figura 1.2.

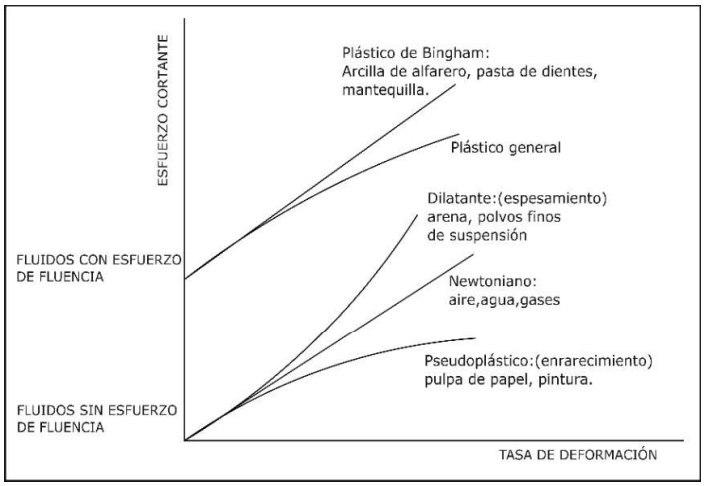


Figura 1.2. Curva de flujo para tipos de fluidos no newtonianos.
(Fuente: [12])

1.2.2.1. Fluidos pseudoplásticos o fluidificante: (Shear – Thinning)

Este fluido se caracteriza por un decrecimiento en la viscosidad aparente a medida que la tasa de cizalladura aumenta [29]. Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son algunas clases de pinturas, suspensiones de arcillas, etc.

En suspensiones cerámicas este comportamiento fluidificante es habitual en las etapas de procesamiento, cuando está en reposo la viscosidad es alta mientras que en condiciones de flujo (bombeo, transferencia por circuitos y tuberías, inyección en un molde, entre otros) la viscosidad disminuye. En reposo, las partículas forman una estructura desordenada que generan contactos con los bordes y las caras. Al cizallar, las partículas tienden a orientarse en dirección al flujo disminuyendo la viscosidad [20].

Cabe mencionar que el comportamiento fluidificante presenta diferencias en regiones de alta y baja cizalla, como se distingue en la Figura 1.3, se puede dividir en tres zonas, una primera región newtoniana a bajas velocidades de cizalladura, una región intermedia en donde la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de cizalla y una segunda región newtoniana a elevadas velocidades de cizalla [24].

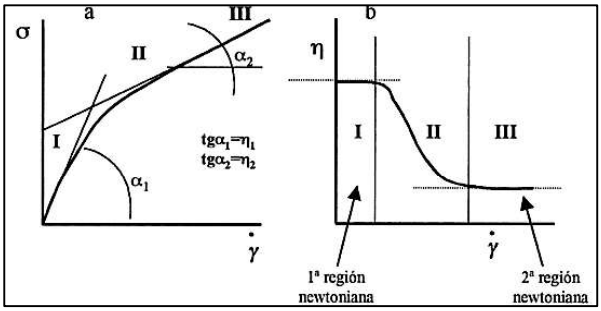


Figura 1.3. Curvas de a) flujo y b) viscosidad de un material fludificante.
(Fuente: [24])

1.2.2.2. Fluidos dilatantes o espesantes: (Shear – Thickening)

Este fluido se caracteriza por un incremento de la viscosidad aparente a medida que la taza de cizallamiento aumenta [29]. Ejemplos de algunos fluidos dilatantes son arena mojada, dióxido de titanio, etc.

El fenómeno de dilatancia se produce debido a la fase dispersa del fluido, donde tiene lugar un empaquetamiento de partículas dejando a la fase continua casi sin espacio. Cuando se aplica un esfuerzo este empaquetamiento se altera y los espacios entre partículas dispersas aumentan [8]. Con el aumento de velocidad de deformación existe una mayor turbulencia y es más difícil el movimiento de la fase continua, dando lugar un mayor esfuerzo córtate y por lo tanto la viscosidad aumenta. En la Figura 1.4 se muestra el comportamiento reológico de un fluido pseudoplástico y un dilatante frente al comportamiento de un fluido ideal o newtoniano.

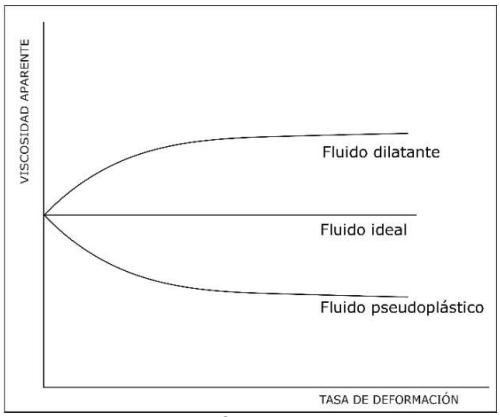


Figura 1.4. Comportamiento reológico de fluidos no newtonianos en estado estacionario.
(Fuente: [11])

1.2.2.3. Fluidos plásticos o viscoplásticos

Este tipo de fluido se caracteriza por tener un comportamiento sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo llamado esfuerzo umbral, a partir de ello el fluido se comporta como líquido. Como ejemplo se tiene crema de dientes, arcillas, emulsiones, espumas [29].

Su comportamiento se debe a la interacción existente entre las partículas suspendidas en su interior que forman una capa llamada solvatación. Están compuestos por dos fases, una dispersa formada por sólidos y burbujas distribuidas en una fase continua.

En este tipo de fluido se forman coloides cuyas fuerzas repulsivas tienden a formar estructuras tipo gel. Si las partículas son muy pequeñas poseen una gran superficie específica rodeados de una capa de adsorción. Por esta capa, las partículas inmovilizan la fase continua hasta que se aplican sobre ellas un esfuerzo cortante determinado.

Los fluidos plásticos se diferencian por la proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación a partir del esfuerzo umbral. Si existe proporcionalidad se denominan plásticos de Bingham y si no lo hay solo se denominan plásticos [8].

1.2.3. Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo de aplicación

Esta clase de fluidos tienen su comportamiento reológico en estado transitorio (la viscosidad varía con respecto al tiempo), donde la viscosidad depende de la duración del esfuerzo aplicado. Por ejemplo, en sistemas de bombeo, extrusión, entre otros.

En algunos casos, los cambios de viscosidad son reversibles si se permite permanecer en reposo el tiempo necesario al fluido (tixotropía o reopexia propia), en otros casos, los cambios de viscosidad no son reversibles (tixotropía o reopexia impropia). El comportamiento del fluido no newtoniano dependiente del tiempo se clasifica en dos tipos: tixotrópicos y reopécticos [11].

1.2.3.1. Fluidos tixotrópicos

Este tipo de fluido se caracteriza por la disminución de la viscosidad aparente al aumentar el tiempo de aplicación de una velocidad de cizalladura constante, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado [10].

El fluido tixotrópico cuando se somete a un esfuerzo cortante provoca que la partículas de agregado sean distorsionadas, ofreciendo menos resistencia al flujo debido a la reducción de la viscosidad con el tiempo hasta alcanzar un valor constante.

Este valor corresponde al punto donde la razón de la distorsión estructural del fluido es igual a la razón de reformación estructural, o a la condición donde no hay más estructura para ser fracturada. Cuando cesa dicho esfuerzo, la viscosidad vuelve a incrementarse por la reconstrucción de la estructuras apareciendo un fenómeno de histéresis.

1.2.3.2. Fluidos reopécticos

Este tipo de fluido se caracteriza por el aumento de la viscosidad aparente al aumentar el tiempo de aplicación de una tasa de cizalladura constante [10]. Su comportamiento es completamente contrario al tixotrópico.

Al fluido reopéctico cuando se aplica un esfuerzo cortante se produce por la formación de enlaces intermoleculares que conlleva el aumento de la viscosidad, cuando se deja de aplicar el esfuerzo se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a la diminución de la viscosidad. En la curva de viscosidad mostrada en la Figura 1.5 se observa el comportamiento de un fluido tixotrópico y reopéctico con respecto al tiempo.

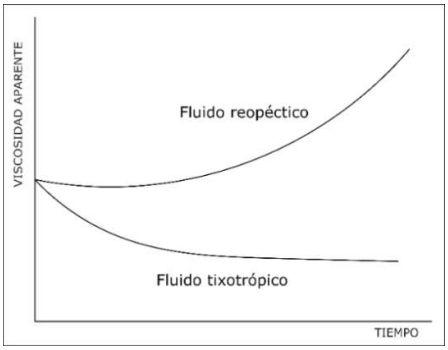


Figura 1.5. Comportamiento reológico de fluidos no newtonianos en estado transitorio.
(Fuente: [11])

La tixotropía en los fluidos es relacionada con el colapso estructural "Estructural breakdown" que sufre bajo la deformación del gradiente de velocidad. Una forma de estimar el colapso estructural de los fluidos tixotrópicos y reopécticos, es la medida de la histéresis del fluido, la cual se puede obtener en la curva de flujo [11].

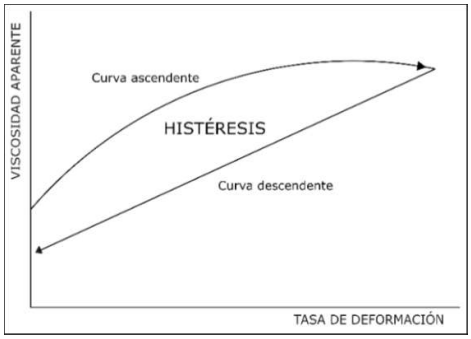


Figura 1.6. Histéresis de un fluido no newtoniano en estado transitorio.
(Fuente:[11])

Este comportamiento se construye al someter al fluido a un incremento de la tasa de cizalladura y después disminuyéndola de forma gradual. Como se observa en la Figura 1.6, el área encerrada en las dos curvas define el grado de colapso estructural del fluido. Si las dos curvas coinciden significa que no se trata de un fluido dependiente del tiempo.

1.3. Reología

1.3.1. Definición

La reología, proveniente del griego reo (deslizamiento) y logo (estudio), ha sido utilizada hace muy poco en el área de la cerámica y es una de las bases para el estudio de las barbotinas y de los esmaltes cerámicos [27].

La definición de la IUPAC ("*International Union of Pure and Applied Chemistry")* es: Reología es el estudio del flujo y deformación de la materia bajo la influencia de una fuerza mecánica. Se refiere especialmente al comportamiento del material que no puede describirse por los modelos lineales simples de la hidrodinámica y elasticidad [24].

La reología es una parte de la física que estudia el origen, la naturaleza y las características de deformación de los cuerpos bajo la acción de fuerzas externas [27].

1.3.2. Importancia de la reología en la cerámica

La reología es de gran importancia en la industria que trabaja con fluidos viscosos, por ejemplo, los productores de plásticos, lubricantes, etc. En el ámbito de la cerámica, la reología influye en varios aspectos por el tipo de fluido con el cual se trabaja.

La reología se encuentra restringida a conocer el comportamiento de los materiales sometidos a deformaciones sencillas, pero este conocimiento permite obtener, en principio, las funciones materiales o propiedades que caracterizan el material.

La barbotina cerámica es una suspensión de mezclas de materias arcillosas y no arcillosas, llevadas a un punto de defloculación óptimo para su uso, además que este tipo de fluido tiene un comportamiento no Newtoniano y generalmente tixotrópico [14].

La reología de un fluido, en especial no newtoniano, es relevante cuando se bombea, extruye, moldea, mezcla, transporta, almacena, etc. Debido a que las condiciones del fluido en cada uno de los procesos pueden cambiar y provocar alteraciones durante el mismo. Por ejemplo, se evidencia en el colado de la barbotina, en donde los materiales ya molidos o muy finos granulométricamente son mezclados en solución de agua y defloculantes, para luego ser vaciados en moldes de yeso cerámico que darán la forma de la pieza deseada.

El comportamiento reológico de suspensiones acuosas puede ser de alta complejidad a causa de la adición de otros materiales, y en la industria se tiende a ignorar este problema tratándolo de manera sencilla e incluso primitivamente [13]. Es necesario conocer a fondo la importancia de los factores que causan problemas durante el manejo de la barbotina, a través de un estudio reológico, con el fin de eliminarlos lo máximo posible.

1.4. Viscosidad

Las fuerzas de atracción que mantienen las moléculas a distancias ínfimas, dando a los líquidos suficiente cohesión, determinan que éstos al fluir a través de un tubo produzcan fricción. La resistencia que el líquido ofrece al flujo se denomina viscosidad [29].

El análisis del fenómeno establece que la velocidad con que las capas del líquido fluyen aumenta a medida que crecen las distancias entre capas en dirección normal a las paredes del conducto [29]. Cuando una capa infinitesimal dz fluye con velocidad uniforme, en relación con una capa adyacente, se origina una fuerza tangencial F proporcional al área A de la capa y a la gradiente dy/dz en dirección normal al flujo del líquido. En ese caso es

$$F = A\eta \frac{\Delta v}{\Delta z} \qquad [1.1]$$

Donde η es un coeficiente de proporcionalidad llamado viscosidad

Se considera una capa delgada de un fluido contenido entre dos placas paralelas separadas una distancia dy como se observa en la Figura 1.7. Si bajo condiciones de estado estable, el fluido es sometido a esfuerzos de carga debido a la aplicación de una fuerza F, estos serán balanceados por una fuerza interna de fricción igual y opuesta. Para un fluido newtoniano incompresible en flujo laminar, el esfuerzo cortante es igual al producto del gradiente de velocidad y la viscosidad del fluido [9].

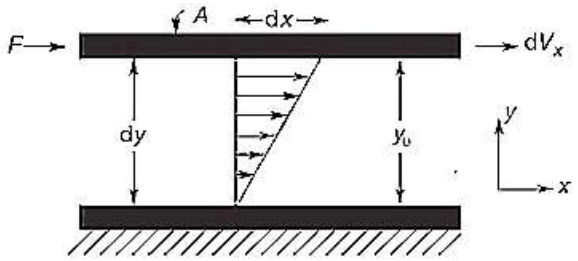


Figura 1.7. Esfuerzo cortante entre dos placas paralelas.
(Fuente:[9])

En varios fluidos se ha determinado de forma experimental que la fuerza F es directamente proporcional a la velocidad Δv [29] (ver Ecuación 1.2); el área A de la placa es inversamente proporcional a la distancia dy. Expresada con la ley de viscosidad de Newton cuando el flujo es laminar, se tiene:

$$\frac{F}{A} = -\mu \frac{\Delta V_x}{\Delta y} \qquad [1.2]$$

Donde μ es una constante de proporcionalidad llamada viscosidad del fluido en Pa.s o Kg/m.s. Cuando dy tiende a cero la definición de derivada.

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \qquad [1.3]$$

Donde $\tau_{yx} = \frac{F}{A}$, es el esfuerzo cortante o fuerza por unidad de área en N/m^2.

1.4.1. Definición

La viscosidad se define como la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Es decir, aplicando una fuerza en una cierta zona de la masa del fluido, para mantenerla en movimiento, este responde provocando esfuerzos de corte con velocidades diversas de zona a zona [11].

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido, este relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación.

$$\tau = \mu * \dot{\gamma} \qquad [1.4]$$

Donde τ: esfuerzo cortante, μ: viscosidad y $\dot{\gamma}$:velocidad de deformación.

1.4.2. Viscosidad aparente

La viscosidad aparente se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Esta viscosidad depende de la velocidad de cizalla [29]. Se representa con "η".

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad [1.5]$$

Cabe mencionar que cuando se utiliza el término de viscosidad en fluidos no newtonianos se refiere a la viscosidad aparente. En la curva de fluidez se diferencia la viscosidad dinámica y la viscosidad aparente (ver Figura 1.8).

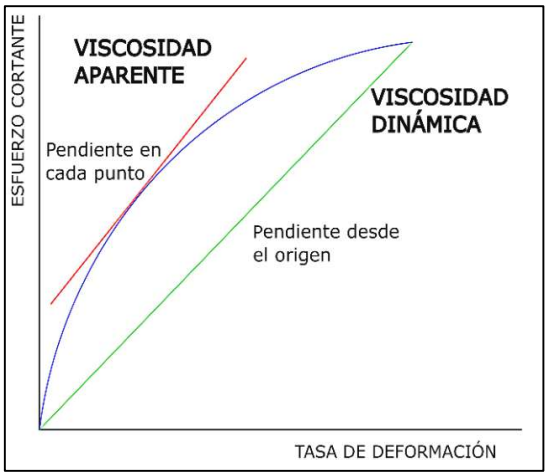


Figura 1.8. Viscosidad dinámica y aparente en una curva de flujo.
(Fuente: [16])

1.4.3. Factores que afectan la viscosidad

La viscosidad de los materiales puede verse afectada significativamente por factores como la velocidad de cizalla, temperatura, presión y tiempo de cizalla, aunque de todos ellos, la velocidad de cizalla es el factor más interesante desde el punto de vista reológico.

En los fluidos newtonianos la viscosidad se ve afectada por la presión y temperatura, mientras que en los fluidos no newtonianos la viscosidad se ve afectada por la presión, temperatura y además por la velocidad de corte.

1.4.3.1. Variación de la viscosidad con el tiempo de aplicación de la cizalla

En general, los valores de viscosidad para ciertas velocidades de cizalla no se mantienen constantes conforme aumenta el tiempo de aplicación de la deformación. Existen dos tipos de fluidos: tixotrópico si el valor de la viscosidad disminuye con el tiempo y reopéctico si la viscosidad aumenta con el tiempo. Cabe mencionar que el comportamiento de un fluido depende en gran medida del histórico, por lo que se podrían obtener distintas curvas para una misma muestra que depende también del procedimiento experimental.

Las causas más comunes que provocan la variación de la viscosidad con el tiempo están asociadas a la ruptura o formación de agregados coloidales e interacciones que formen una estructura reticular de la muestra [3].

El efecto de la tixotropía en una muestra se puede observar en la Figura 1.9, de esta forma se observa un ciclo de histéresis llamado ciclo de tixotropía al medirse una mayor viscosidad durante la primera medida cuando se incrementa la velocidad de cizalla que durante la segunda medida donde se disminuye paulatinamente la velocidad de cizalla.

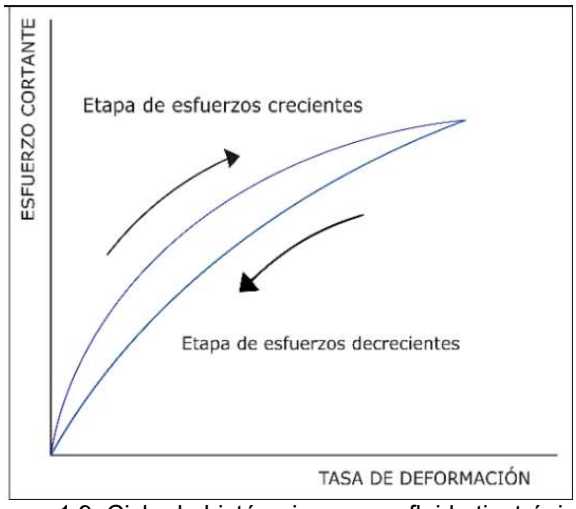


Figura 1.9. Ciclo de histéresis para un fluido tixotrópico.
(Fuente: [3])

1.4.3.2. Variación de la viscosidad por la velocidad de deformación o corte.

Desde el punto de vista reológico, la velocidad de cizalladura es la variable más importante que influye en la viscosidad, por lo tanto, se puede definir la función $\eta(\dot{\gamma})$ como viscosidad de cizalla o viscosidad aparente.

La representación gráfica del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalladura se denomina curva de flujo. Para un fluido Newtoniano, la curva de flujo es una línea recta que empieza en el origen y su pendiente es función del ángulo α. La viscosidad en la recta es el resultado de dividir los valores de τ (esfuerzo cortante) y $\dot{\gamma}$ (velocidad de corte) por lo que se puede definir como la tangente del ángulo α.

Otra representación gráfica es mediante la curva de viscosidad, donde se representa la viscosidad en función de la velocidad de cizalladura. Para un fluido Newtoniano, la curva es una línea recta paralela al eje de las abscisas.

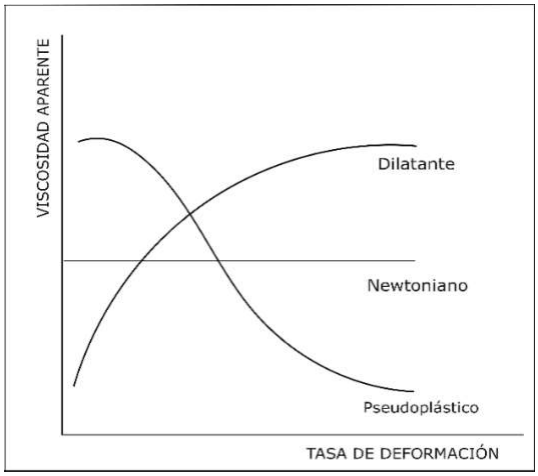


Figura 1.10. Curvas de flujo y viscosidad para distintos tipos de comportamiento.
(Fuente: [3])

La mayoría de los fluidos de interés industrial presentan desviaciones a la ley de Newton debido a la dependencia de la velocidad de cizalladura aplicada. En la Figura 1.10 se presenta curvas de flujo y viscosidad para comportamientos que se alejan a la ley de Newton.

Es importante evaluar la velocidad de cizalla en la que se encuentra un sistema durante su operación del proceso. Para ello, se divide la velocidad promedio del fluido por una dimensión característica definida por la geometría del sistema.

Una suspensión cerámica está sometida a etapas de procesamiento desde la materia prima hasta el producto final. En la Tabla 1.1 se muestran valores de velocidad de cizalla de algunas etapas en el procesamiento cerámico.

Tabla 1.1.Velocidades de cizalla de diferentes procesos de conformado cerámico.

PROCESO	VELOCIDAD DE CIZALLA TÍPICA (s^{-1})
Atomizado, impresión, cepillado	10^3 - 10^4
Moldeo por inyección	10^2 - 10^4
Extrusión	10^2 - 10^3
Mezclado, agitación y bombeo	10^1 - 10^3
Colaje en cinta, Inmersión	10^1 - 10^2
Moldeo por inyección a baja presión	10^1 - 10^2
Colaje (filtración)	$<10^1$

(Fuente: [24])

1.5. Modelos reológicos

Varios son los factores que influyen al seleccionar un modelo reológico, el cual describe el flujo de las partículas. Existen varios modelos que describen el comportamiento de fluido no newtoniano, entre los más utilizados se encuentra la ley de potencia, plástico de Bingham y el modelo de Herschel Bulkley.

1.5.1. Modelo de ley de potencia (Ostwald de Waele)

El modelo es de dos parámetros y se representa por la relación que se muestra en la Ecuación 1.6.

$$\tau = K * \dot{\gamma}^n \qquad [1.6]$$

Donde K es el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento. Para n=1, el modelo representa un fluido newtoniano, con n=K. Por lo tanto, el valor de n es una medida de la desviación de comportamiento newtoniano.

1.5.2. Modelo de plástico de Bingham

Este modelo se aplica a fluidos que requieren un esfuerzo umbral o de fluencia. El modelo tiene dos condiciones la cuales se presentan en las Ecuaciones 1.7 y 1.8.

$$\tau \leq \tau_0 \qquad \dot{\gamma} = 0 \qquad [1.7]$$

$$\tau > \tau_0 \qquad \tau = \tau_0 + \eta_0 * \dot{\gamma} \qquad [1.8]$$

El material no fluye hasta que se aplica un esfuerzo superior al de fluencia τ_0. El parámetro η_0 se denomina viscosidad plástica y se relaciona con la viscosidad aparente, esto se describe en la Ecuación 1.9.

$$\eta = \eta_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \qquad [1.9]$$

1.5.3. Modelo de Herschel Bulkley

De forma general, sin contemplar el comportamiento transitorio, el comportamiento reológico de los fluidos puede ser definido a través del modelo generalizado de Herschel Bulkley. Este modelo se aplica para los fluidos pseudoplásticos y plásticos dilatantes. El modelo se representa como se muestran las Ecuaciones 1.10 y 1.11.

$$\tau \leq \tau_0 \qquad \dot{\gamma} = 0 \qquad [1.10]$$

$$\tau > \tau_0 \qquad \tau - \tau_0 = K * \dot{\gamma}^n \qquad [1.11]$$

Donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa), K es el índice de consistencia del fluido (Pa.s^n), n es el índice de potencia del fluido y adimensional, y $\dot{\gamma}$ es la tasa de cizalladura (1/s).

Cabe mencionar que la expresión de Herschel Buckley puede ser modificada dependiendo del tipo de comportamiento reológico

- Para fluidos Newtonianos ($n = 0\ y\ \tau_0 = 0$)

$$\tau = K * \dot{\gamma}$$

- Para fluidos pseudoplásticos ($n \neq 0\ y\ \tau_0 = 0$)

$$\tau = K * \dot{\gamma}^n\ ; n < 1$$

- Para fluidos dilatantes ($n \neq 0\ y\ \tau_0 = 0$)

$$\tau = K * \dot{\gamma}^n\ ; n > 1$$

Como se ha mencionado para los fluidos no Newtonianos la viscosidad no es constante, y la viscosidad aparente se describe con la Ecuación 1.12.

$$\eta = K * \dot{\gamma}^{n-1} \qquad [1.12]$$

Reemplazando la expresión 1.12 en la Ecuación 1.11, se llega a un modelo alterno de la viscosidad aparente en fluidos de Herschel-Bulkley.

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K * \dot{\gamma}^{n-1} \qquad [1.13]$$

En resumen, los fluidos que se ajustan al comportamiento del modelo ideal de Bingham se llaman fluidos plásticos ideales (o de Bingham), mientras que los que se comportan como el modelo ideal de Herschel Bulkley se denominan fluidos plásticos.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describe la metodología empleada para el diseño del sistema de bombeo, donde se menciona la caracterización reológica experimental del fluido de trabajo. Así también, se describe el procedimiento del modelamiento matemático y la simulación del flujo del fluido no Newtoniano a través de un circuito de pruebas.

Finalmente se describe el proceso de diseño del sistema de distribución de barbotina y el análisis en condiciones de operación del circuito con la ayuda del software libre EPANET. La Figura 2.1 esquematiza la metodología general de este trabajo.

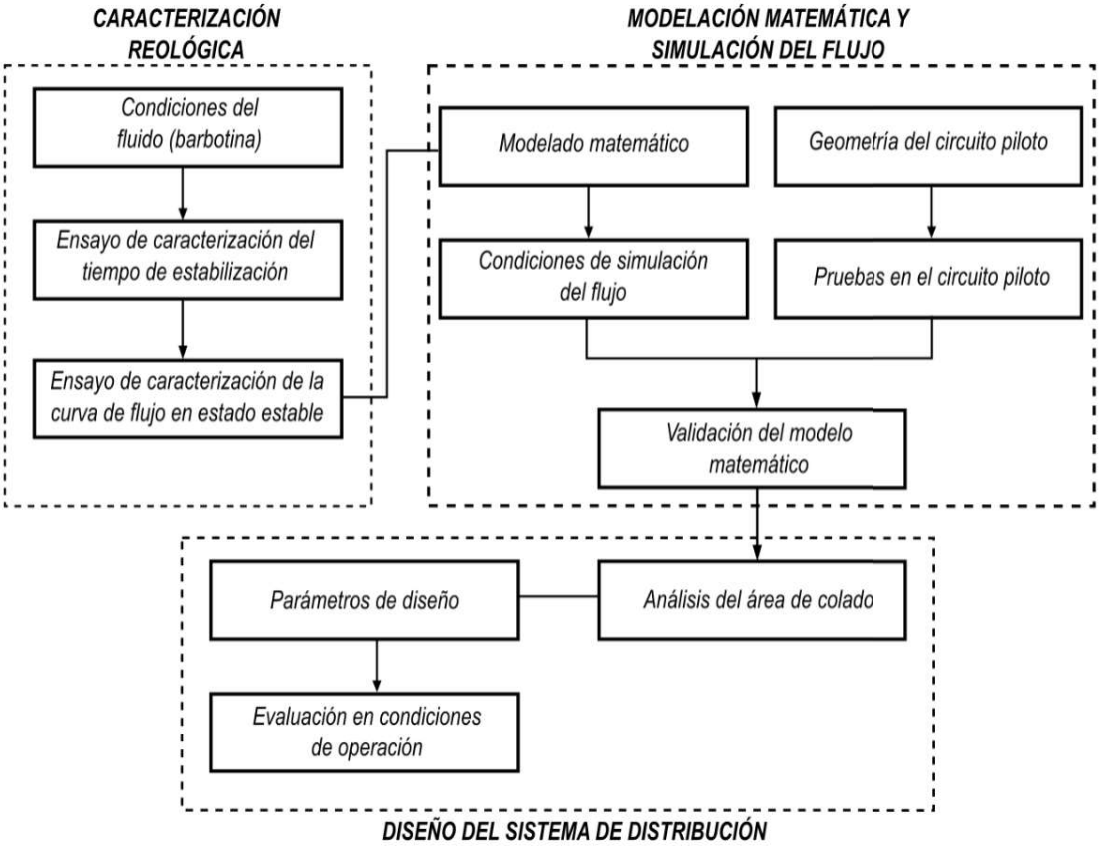


Figura 2.1. Metodología general.
(Fuente: Propia)

2.1. Caracterización reológica

El desarrollo de la caracterización reológica da a conocer el comportamiento del fluido de trabajo en área de colado. Se mencionan características importantes del fluido, así como las condiciones de preparación. Además, se describen las pruebas realizadas al fluido, con el objetivo de obtener la curva de flujo característica y la ecuación reológica del fluido.

2.1.1. Descripción del fluido de trabajo

El fluido de trabajo utilizado para la producción de porcelana sanitaria y accesorios en la división sanitarios de la empresa FV se denomina pasta cerámica o barbotina.

2.1.1.1. Pasta cerámica o barbotina

La pasta cerámica o barbotina es una suspensión formada normalmente por la mezcla de materias arcillosas y no arcillosas, principalmente caolines, arcillas y feldespatos. Las materias primas de la barbotina, con una granulometría muy fina, son mezcladas en agua y defloculante [10]. Posterior a ello, la mezcla es transportada hacia los moldes de yeso para luego ser colada y obtener la forma de pieza deseada.

La barbotina presenta un comportamiento reológico no Newtoniano y puede presentar un comportamiento plástico o pseudoplástico, dependiendo del porcentaje de sólidos. Cada componente que forma la barbotina permite al fluido ajustarse a las condiciones óptimas para la producción.

2.1.1.2. Composición de la pasta cerámica

La barbotina está compuesta de materias primas de origen natural como son las arcillas, caolines y feldespatos. Para obtener condiciones óptimas de la barbotina es de gran importancia conocer el tipo y la cantidad de cada mineral presente en la mezcla, y además de los componentes químicos adicionales como los floculantes y defloculantes [10].

Las arcillas, material que forma la barbotina, son de los sedimentos más abundantes en la corteza terrestre. Las arcillas son rocas sedimentadas de diverso tipo dependiente de sus características físicas y su origen [27].

Los minerales arcillosos que forman la barbotina, desde el punto de vista químico, son silicatos hidratados de Al, Mg, y algunos elementos en estado iónico, los cuales forman estructuras cristalinas y alguna amorfas. Estos filosilicatos forman estratos laminares, es decir bidimensional, y como todos los silicatos, son formados de poliedros de coordinación tetraédrica $SiO4^{-4}$, con un átomo de silicio en el centro y los cuatro oxígenos en los vértices.

Entre los materiales arcillosos, existen cuatro que pueden ser considerados los principales de cada tipo: Caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, Serpentino $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, Pirofilita $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ y Talco $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$.

Las arcillas y caolines son elementos importantes en la pasta cerámica, por un lado, las arcillas por la buena compactación que presentan permiten dar forma a la cerámica, y los caolines por su parte proporcionan una buena resistencia luego de la cocción.

Otros elementos importantes son el feldespato y el cuarzo los cuales se adicionan finamente molidos. El feldespato proporciona a la pieza una mayor dureza gracias a la fundición tipo vitrificado que produce este material. El cuarzo da a la pieza cerámica sin cocción una buena adherencia del vitrificado e influye en la expansión térmica.

En el ANEXO I se describe algunos aspectos importantes a tomar en cuenta para la reología del fluido, así también se menciona la influencia de parámetros en la preparación de la barbotina.

2.1.2. Condiciones del fluido de trabajo

2.1.2.1. Procedimiento para la preparación de la barbotina

La elaboración de la barbotina en la empresa FV Área Andina S.A. es un proceso que utiliza la mezcla de varios tipos de arcillas, feldespatos, caolines y una química adicional. La mezcla debe pasar a través de máquinas mezcladoras, turbodiluidores, zarandas, electroimanes, etc. Además, intervienen varias propiedades reológicas, las cuales son medibles y sirven como un control de la calidad de la pasta.

1. El proceso empieza con la preparación de una suspensión de sílice, para lo cual se requiere de la molienda de arena sílice y feldespato. La adición de caolines o arcillas a la suspensión depende si se observa problemas de sedimentación de la arena o el feldespato dentro del molino.
2. Luego se prepara una suspensión de mezcla de arcillas, la cual comprende mezclar en el turbodiluidor tres tipos de arcillas diferentes con carbonato de sodio.
3. Luego se mezcla la suspensión de sílice con la de arcillas y se le adiciona cargas de feldespatos y caolines. Con ello se consigue lo que se conoce como barbotina virgen.
4. La barbotina virgen se mezcla con barbotina ya utilizada en el proceso de fabricación conocida como devolución, esto para aprovechar materias primas. Dependiendo de las condiciones en las que se encuentre la mezcla, se le añade silicatos de sodio para conseguir las condiciones requeridas en el proceso.
5. Para obtener la barbotina de producción, toda la mezcla debe pasar por zarandas, laberintos de imanes y un electroimán con el objetivo de quitar cualquier impureza y reducir el hierro que afecta a procesos posteriores.

La muestra utilizada en el reómetro se toma de la barbotina de producción, verificando que las condiciones sean las mismas para cada uno de los ensayos. Esto se controla midiendo densidad y humedad en cada muestra.

2.1.2.2. Propiedades para el control del fluido

La barbotina se controla con la medición de sus propiedades, entre las más importantes se tiene la densidad, humedad y peso de deposición húmedo (PDH).

- *Densidad*

La densidad es la propiedad que indica la cantidad de sólidos disueltos en un litro de pasta. El valor de densidad se encuentra dentro de un rango el cual se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de aceptación de densidad de la barbotina.

PROPIEDAD	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad
Densidad	1.835	1.860	g/cm^3

(Fuente: Propia)

- *Humedad*

La humedad es una propiedad que indica el porcentaje de agua presente en la pasta cerámica. El valor de humedad se encuentra dentro de un rango el cual se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros de aceptación de humedad de la barbotina.

PROPIEDAD	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad
Humedad	24	27	%

(Fuente: Propia)

- *Peso de deposición húmedo*

El peso de deposición húmedo o PDH es una propiedad, que dependiendo del valor que se obtenga, permite conocer el tiempo que le toma a la suspensión formar pared a presión. El valor del peso de deposición húmedo o PDH, se encuentra dentro de un rango el cual se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros de aceptación de PDH de la barbotina.

PROPIEDAD	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad
PDH	72	80	g

(Fuente: Propia)

2.1.3. Diseño experimental de la caracterización reológica

La caracterización reológica permite describir al fluido de tal manera que se puede conocer las condiciones del fluido al momento de fluir por los circuitos de bombeo. Además, a través

de la caracterización se obtiene curvas características como son las de flujo y viscosidad y mediante un ajuste matemático se adecua el comportamiento a una ecuación reológica.

Para la caracterización del fluido de la barbotina en la empresa FV Área Andina S.A., se toma las muestras de la barbotina utilizada para la producción, a las cuales se midió las propiedades de control y posterior a ello se realizó el análisis reológico. El procedimiento se visualiza en la Figura 2.2.

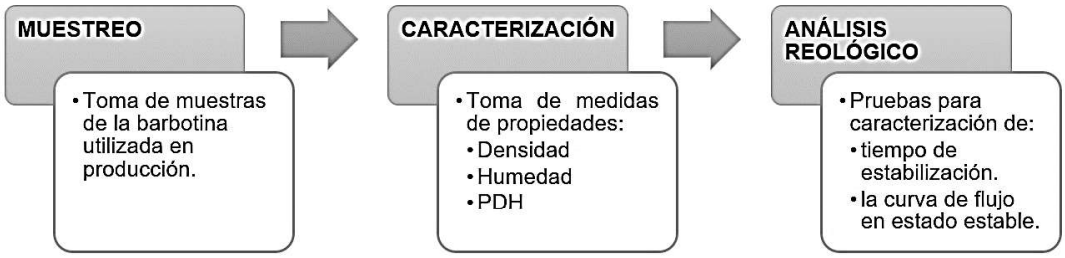


Figura 2.2. Secuencia del diseño experimental.
(Fuente: Propia)

2.1.3.1. Procedimiento de recolección de la muestra de pasta de producción

Para la preparación de cada una de la muestras de la pasta cerámica, se realizó a partir de la barbotina de producción, elaborada por la empresa FV Área Andina S.A. En la toma de muestra de la barbotina utilizada se sigue el siguiente proceso esquematizado en la Figura 2.3.

Figura 2.3. Procedimiento de recolección de la muestra de barbotina.
(Fuente: Propia)

Cabe mencionar que no se realizó ninguna modificación en las propiedades de densidad y viscosidad, sino que se trabajó con los valores obtenidos directamente de la pasta de producción.

2.1.3.2. Procedimiento de caracterización de la pasta de producción

Los procedimientos para la caracterización de cada propiedad se realizaron mediante el Manual de Laboratorio de la empresa FV Área Andina S.A. división sanitarios sección procesos cerámicos instructivo L7.5.1.17, los cuales se describen a continuación.

Medición de la densidad.

En la medida de la densidad se utiliza el método del picnómetro, el cual se esquematiza en la Figura 2.4.

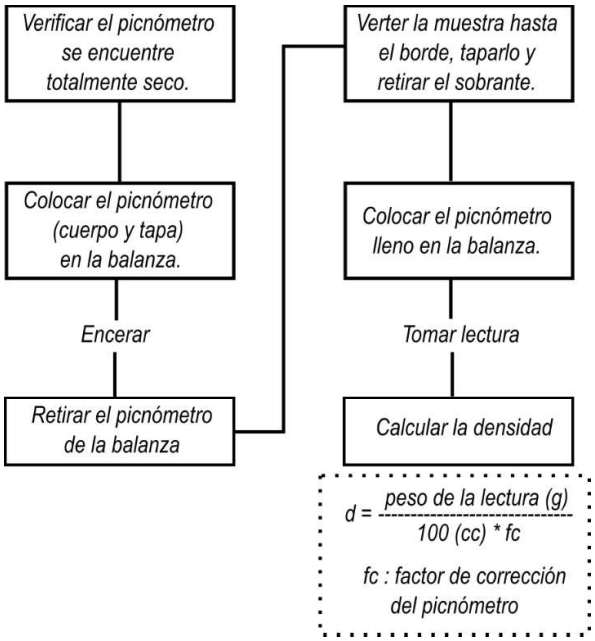


Figura 2.4. Procedimiento de medición de la densidad.
(Fuente: Propia)

Medición de la humedad

Para la medición de esta propiedad se usa una balanza de humedad con una precisión 0,1% de humedad, para el cual se utiliza el procedimiento descrito en la Figura 2.5.

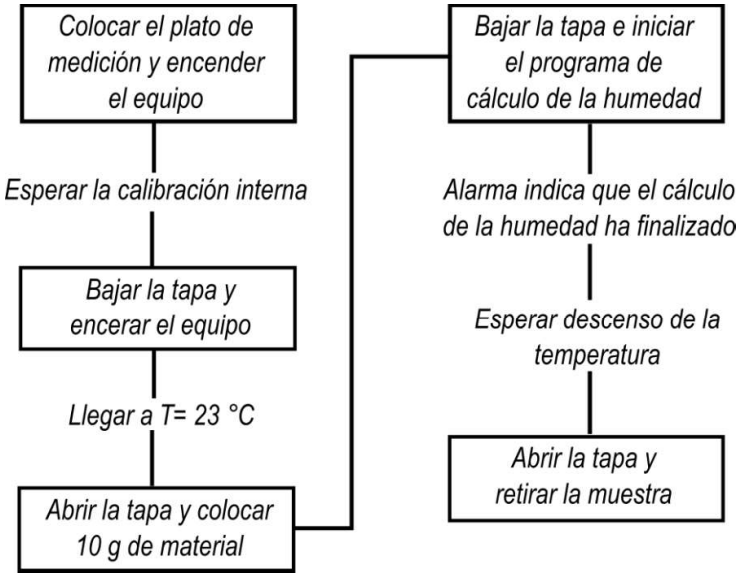


Figura 2.5. Procedimiento de medición de la humedad.
(Fuente: Propia)

Medición del peso de deposición húmedo (PDH)

Para la medición de esta propiedad se utiliza un filtro prensa Baroid, y sigue el procedimiento esquematizado en la Figura 2.6.

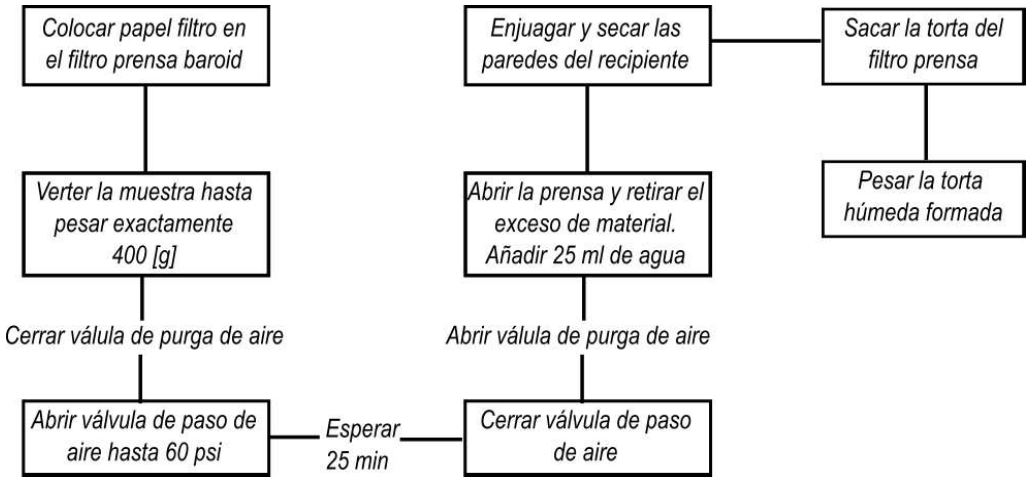


Figura 2.6. Procedimiento de medición del PDH.
(Fuente: Propia)

2.1.4. Procedimiento de análisis reológico

El proceso establecido para la caracterización del comportamiento tixotrópico de Cheng et al. [7], se emplea en este trabajo. El procedimiento se presenta en la Figura 2.7. La caracterización reológica se realiza bajo pruebas conocidas como “ensayo paso a paso”, este tipo de pruebas se emplean para distinguir los efectos de elasticidad y evaluar la tixotropía en el fluido.

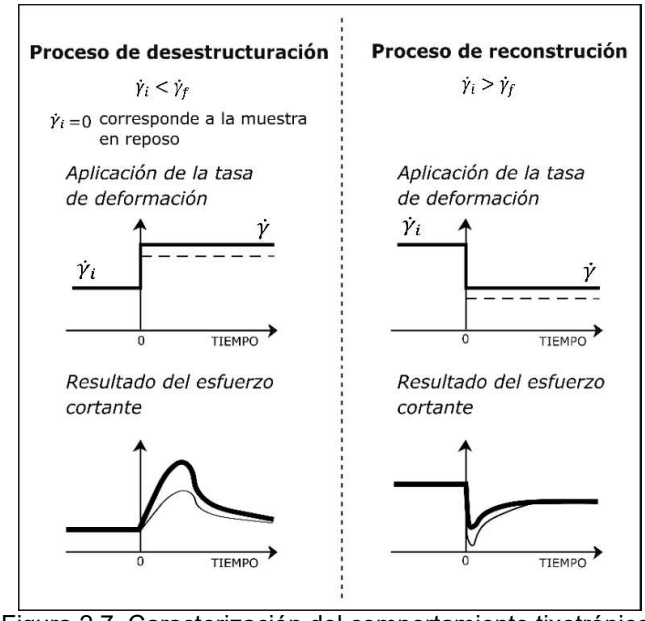


Figura 2.7. Caracterización del comportamiento tixotrópico.
(Fuente: [7])

Durante esta prueba existe un proceso de desestructuración y de reconstrucción de la materia. El estudio de desestructuración consiste en la aplicación de una taza de deformación inicial ($\dot{\gamma}_i$) y después cambiar abruptamente a una taza de deformación final ($\dot{\gamma}_f$), donde $\dot{\gamma}_i < \dot{\gamma}_f$, y la tasa de deformación inicial se considera como en el estado de reposo. Durante la prueba el material pasa de una estructura de aglomeración con una viscosidad alta a otro estado estructural de aglomeración con una viscosidad más baja.

En el estudio de reconstrucción el procedimiento implica pasar de una tasa de deformación inicial ($\dot{\gamma}_i$) a una tasa de deformación final ($\dot{\gamma}_f$), donde $\dot{\gamma}_i > \dot{\gamma}_f$. Durante el proceso el material pasa de un estado de desagregación con una viscosidad baja hacia un estado estructural de aglomeración con una viscosidad más alta.

Todas las pruebas se realizan con un reómetro rotacional RHEOLAB QC, marca ANTON PAAR conforme a la Figura 2.8. Para las pruebas se utiliza la geometría de cilindros concéntricos o Couette. Este tipo de geometría permite efectuar mediciones de tasas de deformación de 1 [1/s] como valor mínimo, y como máximo en el orden de los 1500 [1/s].

Figura 2.8. Equipo reológico REOLABQC marca Anton Paar.

(Fuente: Propia)

2.1.4.1. Ensayo de caracterización de tiempo de estabilización

Las medidas del fluido se realizaron a una temperatura de 35°C con ± 0,15°C de tolerancia, ya que el proceso de producción en el área de colado se lleva a cabo a esa temperatura. Cabe mencionar que el rango de tasa de deformación para las pruebas es de 1 [1/s] hasta 1000 [1/s], esto porque el bombeo de los fluidos se lleva a cabo dentro de ese rango.

Las pruebas de caracterización de comportamiento tixotrópico permitirán conocer el comportamiento del fluido con respecto al tiempo, y además se podrá establecer el tiempo necesario para que la dispersión alcance el régimen de estado estable.

El método consiste en realizar el ensayo paso a paso, para lo que se debe partir de una tasa de cizallamiento inicial inferior a una tasa de cizallamiento mayor, seguido de otras pruebas que parten de una tasa de deformación elevada a una tasa de deformación menor.

Las pruebas se dividen en tres rangos tomando en cuenta la tasa de deformación y para evitar problemas de evaporización de la muestra y otros fenómenos que afecten la repetitividad de las pruebas. En la Figura 2.9. se describe el desarrollo de la caracterización.

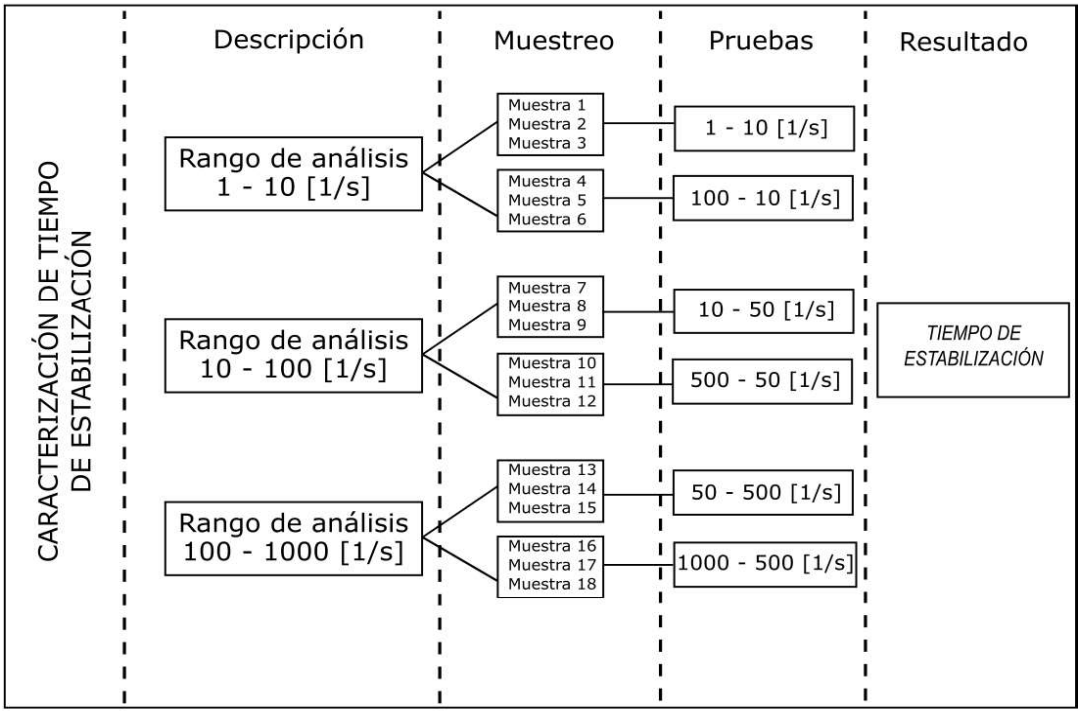


Figura 2.9. Esquema del desarrollo de pruebas para la caracterización tixotrópica.
(Fuente: Propia)

2.1.4.2. Ensayo de caracterización de la curva de flujo en estado estable

La caracterización en estado estable tiene como objetivo obtener la curva de flujo y la curva de viscosidad característica del fluido. Para ello, luego de haber determinado el tiempo de estabilización con la caracterización de tiempo de estabilización, se realiza medidas para la construcción de ambas curvas.

Cabe mencionar que el ensayo de caracterización se llevó a cabo a una temperatura de 35°C con ± 0,15°C de tolerancia, y dentro del rango de 1 [1/s] hasta 1000 [1/s] de tasa de deformación.

El método consiste en construir la curva de flujo y de viscosidad del fluido. Para ello se toma valores de esfuerzo cortante y viscosidad a diferentes tasas de deformación. Para la

toma de cada uno de los puntos, es importante dejar que la muestra se estabilice a la tasa de deformación que se está aplicando, por lo tanto, se deja la muestra el tiempo de estabilización correspondiente a la tasa de deformación que se está aplicando.

La curva de flujo y viscosidad se realizó por dos métodos, el primero se realizó por fases, es decir cambiando de muestra para cada rango de tasa de deformación, y el segundo se realizó sin un cambio de muestra, esto con el objetivo de realizar una comparación entre los dos métodos y obtener repetibilidad de la pruebas.

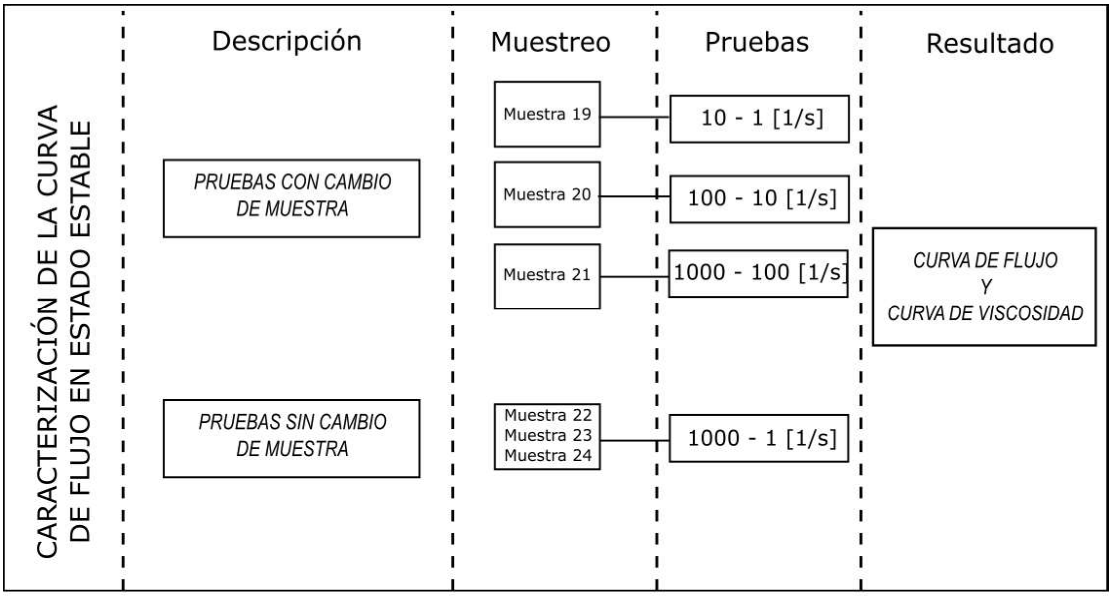


Figura 2.10. Esquema del desarrollo de pruebas para la caracterización en estado estable. (Fuente: Propia)

En la Figura 2.10 se describe el desarrollo de la caracterización. Para el primer método, la muestra se deja reposar en la geometría del reómetro por 450 segundos para estabilizar y equilibrar la temperatura del fluido. Como se mencionó, la construcción de la curva se dividió en tres fases, la primera de 1000 a 100 [1/s], la segunda de 100 a 10 [1/s] y la tercera de 10 a 1 [1/s].

Para el segundo método, al igual que el anterior, se deja reposar por 450 segundos para luego llevar a cabo la construcción de la curva, pero esta vez sin un cambio de muestra, es decir se toma valores en el rango de 1000 a 1 [1/s].

2.2. Modelación matemática y simulación del flujo de fluidos no newtonianos

Es preciso corroborar los resultados obtenidos de la caracterización. Para ello, se realiza una simulación del fluido de trabajo y un estudio experimental a través de un circuito piloto.

Se menciona una descripción del circuito de pruebas, el proceso de modelado matemático del flujo a través del circuito y también el desarrollo de la pruebas realizadas en el circuito con el fluido de trabajo.

2.2.1. Condiciones de simulación

La simulación del fluido se realiza para cuatro condiciones de operación de la bomba, en la cual se busca calcular las caídas de presión en diferentes tramos de tubería y representarlos a través de graficas de caída de presión vs longitud de tubería.

Las variables del fluido son diferentes para cada una de las condiciones de bombeo, de las cuales se va a mencionar cuatro variables importantes que definen al fluido entre ellas se tiene la velocidad del fluido, el número de Reynolds Herschel Bulkley, el esfuerzo cortante de pared de tubo y el parámetro adimensional ø.

2.2.1.1. Cálculo de la velocidad del fluido no Newtoniano

La velocidad promedio del fluido se determina con la Ecuación 2.1 [9,11]

$$\bar{v} = \frac{\dot{q}}{\pi\, R^2} = \frac{4\dot{q}}{\pi\, D^2} \qquad [2.1]$$

Donde

$\dot{q}$ = Flujo volumétrico (m^3/s)

$D, R\ y\ L$ = Diámetro, radio y longitud de la tubería respectivamente (m)

$\bar{v}$ = Velocidad promedio de flujo (m/s)

2.2.1.2. Cálculo del esfuerzo cortante de pared de tubo

En los fluidos que requieren de un esfuerzo de fluencia para fluir, habrá un sólido núcleo similar a un tapón que fluirá en el centro de la tubería, donde τ_{rz} es menor que el esfuerzo de fluencia como se muestra en la Figura 2.11. El radio del tapón Rp dependerá de la magnitud del esfuerzo de fluencia y del esfuerzo de corte en la pared de la tubería.

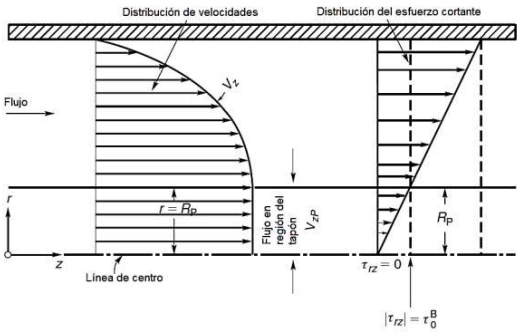


Figura 2.11. Distribución de velocidades de un flujo laminar de fluidos con esfuerzo umbral. (Fuente: [9])

En el área anular ($R_p < r < R$), la velocidad disminuirá gradualmente desde la velocidad constante del tapón hasta cero en la pared de tubería, además el valor del esfuerzo cortante será mayor que el esfuerzo de fluencia del fluido.

$$\frac{\tau_0}{\tau_w} = \frac{R_p}{R} \qquad [2.2]$$

Para la pared del ducto, la tasa de cizalladura y el esfuerzo cortante se describen por la siguientes expresiones respectivamente

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4\bar{v}}{R} = \frac{8\bar{v}}{D} \qquad [2.3]$$

$$\tau_w = \frac{\Delta P\ R}{2\ L} \qquad [2.4]$$

2.2.1.3. Cálculo del número de Reynolds de Herschel Bulkley

Para este tipo de fluido, el número de Reynolds se encuentra definido por la siguiente expresión.

$$Re_{HB} = \frac{8\rho {V_{ann}}^2}{\tau_o + K\left(\frac{8\ V_{ann}}{D_{shear}}\right)^n} \qquad [2.5]$$

Donde

V_{ann} = Velocidad en el área anular (m/s^2)

D_{shear} = Diámetro de corte (m)

τ_o = Esfuerzo de fluencia (Pa)

ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)

n = índice de potencia del fluido (adimensional)

K = Índice de consistencia del fluido (Pa s^n)

La velocidad del área anular se define por la Ecuación 2.6

$$V_{ann} = \frac{Q - Q_p}{\pi\left(R^2 - {R_p}^2\right)} \qquad [2.6]$$

Donde Q_p es el caudal del tapón (m^3/s), Q es el caudal por el tubo (m^3/s), R es el radio del tubo (m) y R_p es el radio del tapón (m). El valor de Q_p se encuentra con la Ecuación 2.7.

$$V_{plug} = \frac{Q_p}{\pi\, {R_p}^2} \qquad [2.7]$$

Donde V_{plug} es la velocidad del tapón. Este valor se encuentra mediante la Ecuación 2.8.

$$V_{plug} = \frac{nR}{n+1}\left(\frac{\tau_w}{K}\right)^{\frac{1}{n}}[1-\emptyset]^{\frac{n+1}{n}} \qquad [2.8]$$

Por otro lado, para el cálculo de la velocidad V, utilizada para el cálculo del caudal Q, se utiliza la Ecuación 2.9.

$$V = nR\left(\frac{\tau_o}{\emptyset K}\right)^{\frac{1}{n}}(1-\emptyset)^{\frac{n+1}{n}}\left\{\frac{(1-\emptyset)^2}{3n+1}+\frac{2\emptyset(1-\emptyset)}{2n+1}+\frac{\emptyset^2}{n+1}\right\} \qquad [2.9]$$

El flujo se considera como laminar cuando el $Re_{HB} \leq 2100$.

2.2.2.3. Cálculo del parámetro adimensional de Herschel Bulkley

En las expresiones 2.8, 2.9 el valor de ϕ, es un parámetro adimensional determinado en función del esfuerzo de cedencia τ_0.

$$\phi = \frac{\tau_0}{\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)} = \frac{\tau_0}{\left(\frac{f\rho\bar{v}^2}{2}\right)} \qquad [2.10]$$

Para determinar el valor de ϕ, las expresiones 2.8, 2.9 deben resolverse de forma iterativa. Las variables fueron calculadas y los resultados se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Resultado de condiciones del fluido en el circuito de pruebas a diferentes presiones.

Presión de bombeo $P\ [psi]$	**CONDICIONES DEL FLUIDO EN EL CIRCUITO DE PRUEBAS**			
	Velocidad $v\ [m/s]$	**Reynolds** $Re_{HB}\ [\,]$	**Esfuerzo cortante de pared de tubo** $\tau_w\ [Pa]$	**Parámetro adimensional** $\emptyset\ [\,]$
20	0,0760	5	11,4021	0,5812
40	0,2221	33	16,6673	0,3976
60	0,3534	72	20,8917	0,3172
80	0,4662	112	24,3529	0,2721

(Fuente: Propia)

De la Tabla 2.4 se puede mencionar que todas las variables dependen del incremento o descenso del valor de presión de bombeo. La velocidad del fluido y el número de Reynolds de Herschel Bulkley aumentan su valor conforme la presión de bombeo es mayor. Por otro lado, el parámetro adimensional ø, el cual es utilizado para el cálculo de pérdidas mayores del modelo matemático, aumenta conforme el valor de presión de bombeo disminuye.

2.2.2. Modelación matemática

2.2.2.1. Ecuación fundamental

Para el modelado matemático se debe contemplar los criterios básicos del transporte de fluidos no Newtonianos. En la figura 2.12 se muestra un esquema básico de un sistema de bombeo.

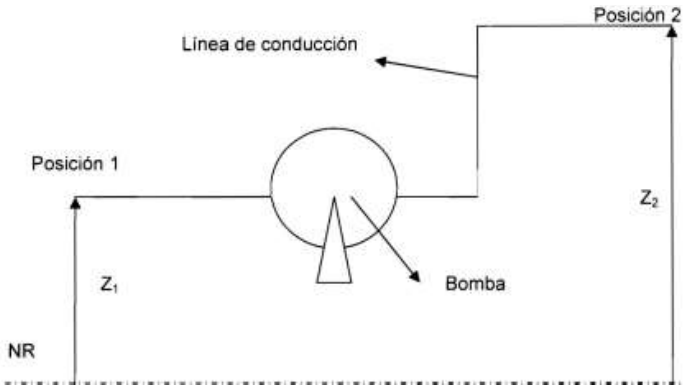


Figura 2.12. Sistema típico de bombeo.
(Fuente: [11])

La energía requerida para bombear un líquido incompresible en estado estacionario a través de la tubería puede determinarse mediante el siguiente balance de energía.

$$\left(\frac{V_2^2}{2\alpha_2} - \frac{V_1^2}{2\alpha_1}\right) + g * (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum Ef + W = 0 \qquad [2.11]$$

Donde

z_2 y z_1 = posiciones de referencia a la salida y entrada del sistema (m)

P_2 y P_1= presiones de salida y entrada del sistema (Pa)

ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

V_2 y V_1 = Velocidades medias de salida y entrada del sistema (m/s)

W = Trabajo específico (J/kg)

Ef = Pérdidas de energía por fricción entre la salida y entrada del sistema (J/kg)

α = Factor de corrección para la energía cinética (adimensional)

2.2.2.2. Factor de corrección para la energía cinética (α)

La energía cinética en términos del balance de energía puede ser evaluada si se conoce el factor de corrección de energía cinética. Para el régimen de flujo turbulento de cualquier fluido $\alpha = 2$. Para el régimen de flujo laminar, los valores del factor de corrección α se

especifican en la Tabla 2.5. Las ecuaciones vienen en términos del índice de potencia del fluido (n), o puede venir en términos de ϕ, el cual se define como

$$\phi = \frac{\tau_0}{\tau_w} \qquad [2.12]$$

Los valores del factor de corrección para los diferentes modelos de flujo, como son ley de potencia, de Bingham y de Herschel – Bulkley, fueron descritos por Osorio y Steffe (1984). Las diferencias en la energía cinética con el factor de corrección son muy pequeñas que en algunos casos con ignorados cuando se selecciona elementos del sistema de bombeo.

Tabla 2.5. Factor de corrección de energía cinética (α) en régimen laminar.

FLUIDO	FÓRMULA	α, DIMENSIONAL
Newtoniano	$\tau = \mu\dot{\gamma}$	1.0
Ley de Potencia	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	$\alpha = \frac{2(2n+1)(5n+3)}{3(3n+1)^2}$
Plástico de Bingham	$\tau = \mu_B\dot{\gamma} + \tau_0$	$\alpha = \frac{2}{2-c}$
Herschel Bulkley	$\tau = K\dot{\gamma}^n + \tau_0$	$\alpha = exp(0.168\phi - 1.062n\phi - 0.954n^5 - 0.115\phi^5 + 0.831)$ $para\ 0.06 \leq n \leq 0.38$ y $\alpha = exp(0.849\phi - 0.0296n\phi - 0.600n^5 - 0.602\phi^5 + 0.733)$ $para\ 0.38 \leq n \leq 1.60$

(Fuente: [28])

2.2.2.3. Pérdidas de energía por fricción (Ef)

El término Ef representa las pérdidas de energía por fricción por longitud de la tubería más las pérdidas locales por accesorios. Este valor se obtiene con la siguiente expresión

$$Ef = \sum \frac{2fv^2L}{D} + \sum \frac{kv^2}{2} \qquad [2.13]$$

En donde

f = Factor de fricción de Fanning en el tramo de tubería (adimensional)

L y D = Longitud y diámetro del tramo (m)

k = coeficiente de pérdida local del accesorio (adimensional)

Según Costa [12], en los fluidos no Newtonianos, las pérdidas locales no son fáciles de estimar, pero con fines de cálculo, se puede emplear los valores de los coeficientes de pérdida local dados para los fluidos Newtonianos.

2.2.2.4. Factor de fricción de Fanning

El factor de Fanning ficción se define, a partir de consideraciones en el análisis dimensional, como la relación de la tensión de cizallamiento de pared en una tubería a la energía cinética por unidad de volumen [28].

$$f = \frac{2\tau_w}{\rho \bar{v}^2} \qquad [2.14]$$

Sustituyendo la definición de esfuerzo cortante para la pared del tubo se tiene la siguiente expresión

$$f = \frac{2\Delta PR}{\rho L \bar{v}^2} = \frac{\Delta PD}{2\rho L \bar{v}^2} \qquad [2.15]$$

En general, el cálculo de pérdidas por fricción se realiza con el factor de fricción de Darcy, el cual es igual a cuatro veces el factor de fricción de Fanning. Los resultados finales son iguales usando cualquiera de los factores de fricción.

Es de gran importancia en el análisis de fluidos la resistencia friccional al flujo, caracterizada por el coeficiente de fricción, cuyo valor es determinado por el régimen de flujo que tenga el fluido. Existen dos grandes regímenes laminar y turbulento

Para la simulación del fluido se requiere de un modelo matemático para determinar las relaciones cuantitativas del sistema. Este modelo matemático se fundamenta en la ecuación de conservación de energía aproximada a flujo unidimensional descrita en la Ecuación 2.1.

La ecuación fundamental ajustada al circuito piloto permite simular la caída de presión a lo largo de la tubería del circuito. Las consideraciones y las simplificaciones respectivas de la ecuación fundamental para el circuito piloto se detallan en el ANEXO II.

2.2.3. Geometría del circuito de pruebas

2.2.3.1. Descripción del circuito de pruebas

Para llevar a cabo la simulación y el estudio experimental se define el sistema a simular, para este caso se trata de un circuito de pruebas el cual fue montado en las áreas de procesos cerámicos y de colado. El circuito de pruebas consiste en un conjunto de tuberías y accesorios montados de tal forma que permiten el transporte de barbotina. Además, el

circuito cuenta con una bomba que impulsa al fluido desde el reservorio hacia las máquinas de alta presión.

Para realizar la validación de la simulación se pretende tomar medidas de presión y caudal en el circuito, para lo cual se colocan manómetros y caudalímetros en el circuito. En la Figura 2.13 se muestra el esquema del circuito de pruebas.

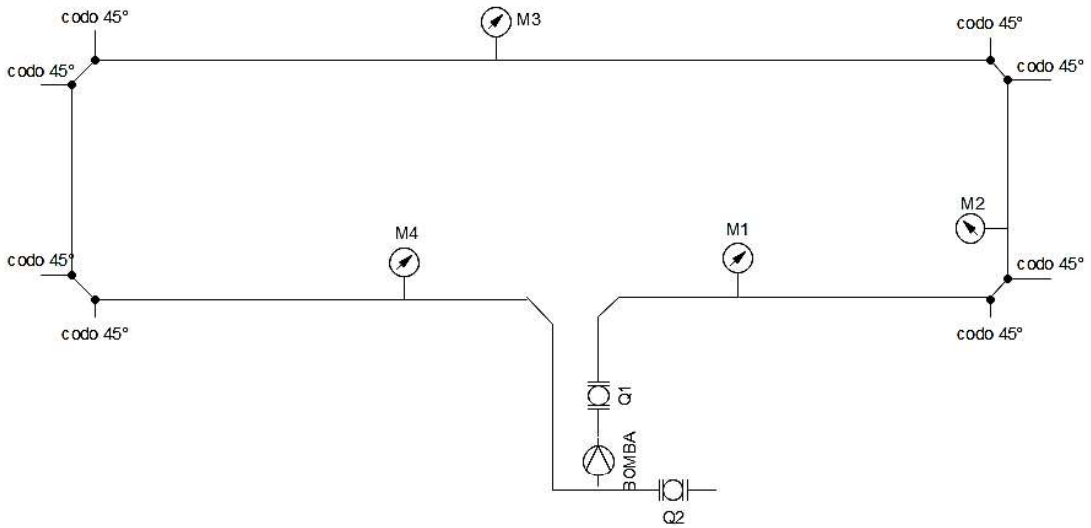


Figura 2.13. Diagrama unifilar del circuito de pruebas.
(Fuente: Propia)

Los componentes del circuito de pruebas de acuerdo con el esquema de la Figura 2.13 son:

1. Bomba.
2. Tubería plástica de diámetro de 2” (190 m).
3. 8 codos de 45° de 2” de diámetro
4. 4 manómetros (M1, M2, M3, M4)
5. 2 caudalímetros (Q1,Q2)

Bomba: La bomba utilizada en el circuito de pruebas es una bomba de desplazamiento positivo, específicamente una bomba de diafragma, marca YAMADA modelo NDP – 80 BAC, su cuerpo es de aluminio y su diafragma es de neopreno, donde la entrada y salida son de 3 pulgadas. El rango de presión de suministro de aire con el que trabaja la bomba es de 137,9 – 689,5 KPa (20 – 100 psi) la cual puede ser regulada por un regulador de presión de aire. La bomba resiste un fluido con una temperatura máxima de 82 °C. En la Figura 2.14 se muestra la bomba descrita y en la Figura 2.15 se muestra el regulador de presión de aire.

Figura 2.14. Bomba YAMADA NDP 80 BAC.
(Fuente: Propia)

Figura 2.15. Regulador de presión de aire.
(Fuente: Propia)

Manómetro: los manómetros utilizados son tipo Bourdon de la marca WIKA. Estos manómetros cuentan con un rango de medición de 0 – 2068,4 KPa (0 – 300 psi). En la Figura 2.16 se muestra el tipo de manómetro.

Figura 2.16. Manómetro tipo Bourdon marca WIKA.
(Fuente: Propia)

Caudalímetro: los caudalímetros utilizados en el circuito de pruebas son de tipo electromagnético de la marca Endress+Hauser modelo Proline Promag P300. Este tipo de caudalímetro trabaja con fluidos a una temperatura de -20°C hasta 60 °C, y con un flujo volumétrico dentro del rango de 0,2 m^3/h – 9600 m^3/h. Los valores de caudal se visualizan en una pantalla digital. En la Figura 2.17 se muestra el tipo de caudalímetro.

Figura 2.17. Caudalímetro Endress Hauser modelo Proline Promag P300.
(Fuente: Propia)

El circuito de pruebas se construye con tubería plástica de diámetro de 2 in con una longitud total de 190 m desde la bomba hasta el reservorio, el cual va montado a lo largo de las estructuras del área de procesos cerámicos y colado. En el trayecto del circuito se tiene accesorios principalmente codos de 45° que permiten el cambio de trayectoria del circuito. En la Tabla 2.6 se resume los datos conocidos del circuito y del fluido con el cual se va a simular el sistema.

Tabla 2.6. Datos del circuito de pruebas y del fluido de trabajo.

COMPONENTE	DATO	UNIDAD
Longitud de la tubería	190	m
Diámetro de la tubería	2	in
Kf del codo 45°	0,35	-

(Fuente: Propia)

En el circuito de pruebas se colocan dos caudalímetros, el primero al principio del circuito y el segundo al final de este, esto con el fin de verificar los caudales de entrada y salida. También se colocan cuatro manómetros dispuestos de tal forma que se pueda evaluar las caídas de presión en el circuito de pruebas. La distancia entre manómetros se especifica en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Distancia entre manómetros colocados en el circuito de pruebas.

MANÓMETROS	DISTANCIA (m)
M1 – M2	28,4
M1 – M3	68,6
M1 – M4	130,35

(Fuente: Propia)

Cabe mencionar que se considera un caudal constante en todo el circuito. En el ANEXO III se encuentra el plano con vista de planta del circuito de pruebas colocado en el área procesos cerámicos y colado.

2.2.4. Descripción del procedimiento experimental

Este procedimiento se desarrolla a pesar de algunos problemas como no visualizar un valor constante de caudal y presión en los instrumentos de medición, esto porque la bomba es de desplazamiento positivo y por lo tanto no envía un flujo constante, sino que lo hace por intervalos. Para garantizar la repetibilidad es importante tomar varios valores de caudal y presión para luego sacar un promedio. Una vez adecuado el circuito de piloto para llevar a cabo las pruebas, se repite cuatro veces el proceso esquematizado en la Figura 2.18.

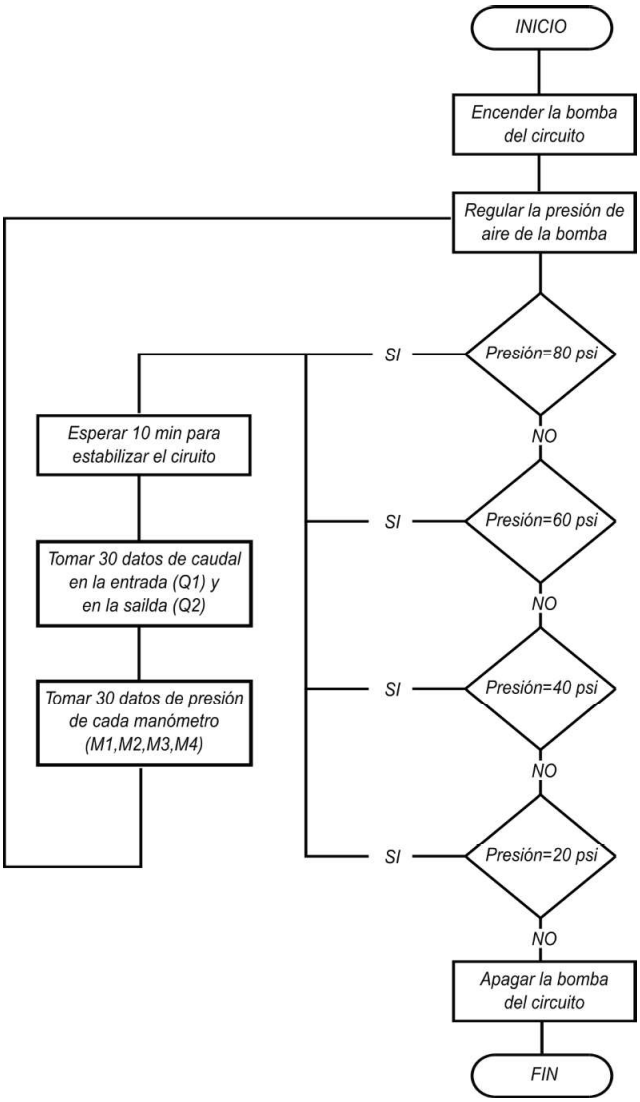


Figura 2.18. Procedimiento experimental en el circuito piloto.
(Fuente: Propia)

2.3. Diseño del sistema de bombeo

Una vez validados los parámetros reológicos de la barbotina obtenidos de la caracterización reológica y el modelo matemático que describe las condiciones del flujo, se procede a realizar el diseño del circuito de bombeo para el área de colado. Para ello se realiza un análisis previo del sistema de distribución de barbotina con la que cuenta el área de colado actualmente para así determinar los parámetros de diseño que permiten establecer la mejor propuesta del sistema de bombeo.

2.3.1. Análisis del área de colado

El área de colado de la empresa FV Área Andina S.A. cuenta actualmente con circuitos para el llenado en moldes por alta presión y moldes de yeso. Actualmente, la mayoría de las piezas fabricadas se realiza por moldes de yeso.

2.3.1.1. Circuitos de distribución de barbotina para el diseño

El circuito de distribución es un conjunto de elementos como tubería, accesorios, bomba, etc. que permiten transportar la barbotina desde las tinas madres o de almacenamiento hasta cada uno de los puntos de llenado.

Actualmente, el área de colado cuenta con tres circuitos principales que recorren el área distribuidos de tal forma que puedan abastecer a cada una de las líneas de llenado. Cada circuito tiene una línea principal que tiene como objetivo el alimentar a cada una de las ramificaciones que llevan la barbotina hacia los puntos de llenado, y también permite una recirculación de la barbotina, como se observa en la Figura 2.19, para mantener al fluido en movimiento y evitar sedimentación dentro de la tubería.

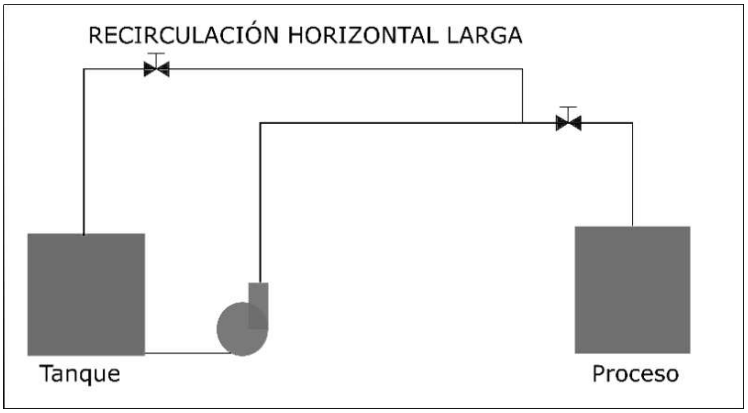


Figura 2.19. Recirculación del circuito de distribución.
(Fuente: [14])

En el ANEXO IV se muestran los planos con vista de planta de la distribución de cada uno de los tres circuitos.

2.3.1.2. Línea de llenado o colado

Las líneas de llenado o colado se componen de un conjunto de moldes de yeso colocados en línea horizontal montados sobre una estructura metálica. Cada molde cuenta con un tubo en la parte inferior para la entrada de barbotina al molde. El paso de la barbotina al molde es regulado por una válvula. También en los extremos de cada línea cuentan con 1 o 2 embudos, dependiendo del tipo de línea, los cuales sirven para el llenado de los moldes. En la figura 2.20 se muestra un ejemplo de una línea de colado.

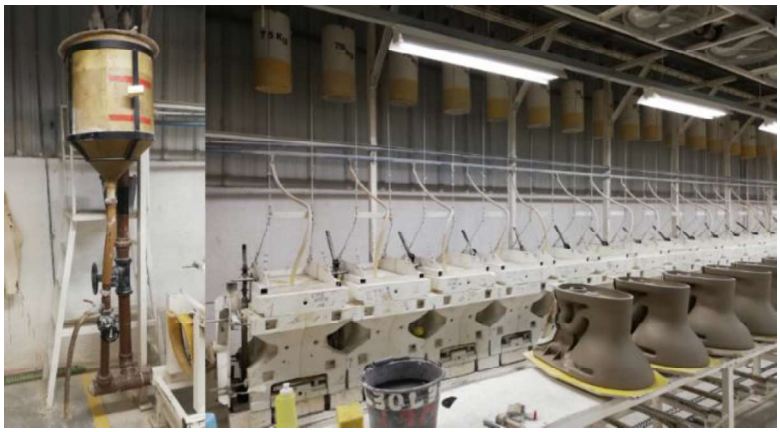


Figura 2.20. Línea de llenado o colado.
(Fuente: Propia)

Para el llenado de los moldes con barbotina se sigue un procedimiento, primero se abre todas las válvulas de paso de barbotina al molde, luego se abre la válvula del punto de llenado del embudo para que llene cada molde.

Una vez que toda los moldes se llenan, el cual se determina por el nivel en el embudo, se cierra la válvula del punto. Este proceso es manual y es realizado por cada operador de la línea, y la abertura de las válvulas depende de la velocidad con la que se llena la línea.

2.3.2. Parámetros de diseño

La empresa FV Área Andina S.A. en su manual de calidad detalla un rango de presiones y caudales en donde la línea de colado se llena correctamente. Estos valores los obtuvieron de pruebas tomando como referencia los puntos de llenado inicial y final de un circuito de distribución de barbotina actual. Los valores obtenidos se detallan en la tabla 2.7.

Tabla 2.8. Valores máximos y mínimos de caudal y presión en punto de llenado.

PARÁMETRO	Valor Máximo	Valor Mínimo
Presión (psi)	45	17,67
Caudal (LPS)	1,66	0,364

(Fuente: Propia)

2.3.2.1. Cálculo de la potencia de bombeo

El requerimiento de potencia de bombeo es

$$\dot{w} = W\rho\dot{q} = W\dot{m} \qquad [2.16]$$

$\dot{w}$ = Potencia de bombeo (J/s)

W = Trabajo específico del sistema de bombeo (J/kg)

$\dot{m}$ = flujo másico (kg/s)

$\dot{q}$ = flujo volumétrico (m^3/s)

2.3.2.2. Cálculo de la caída de presión

La caída de presión por fricción a lo largo de la tubería se describe con Ecuación 2.17.

$$\Delta P = \frac{2fL\rho\bar{v}^2}{D} \qquad [2.17]$$

ΔP = Caída de presión a lo largo de la tubería (Pa)

f = Factor de fricción de Fanning ( )

D, L = Diámetro y longitud de la tubería (m)

ρ = densidad (kg/m^3)

$\bar{v}$ = velocidad promedio del fluido (m/s)

2.3.3. Diseño del circuito de bombeo

Para el análisis del nuevo diseño del circuito de distribución de barbotina se utiliza el programa EPANET, en donde se evalúa al nuevo diseño en condiciones de operación máxima y verificar que el sistema se encuentre dentro de los parámetros de diseño.

2.3.3.1. Diagrama unifilar del circuito de bombeo

El nuevo diseño de bombeo se establece luego de un reconocimiento del área de colado , la distribución de líneas y la cantidad en volumen de barbotina requerido por cada línea.

En el ANEXO V se detalla todo el análisis mencionado para obtener el diseño del nuevo circuito de bombeo esquematizado en el siguiente diagrama unifilar (ver Figura 2.21) y así también todos los componentes que conforman el nuevo circuito.

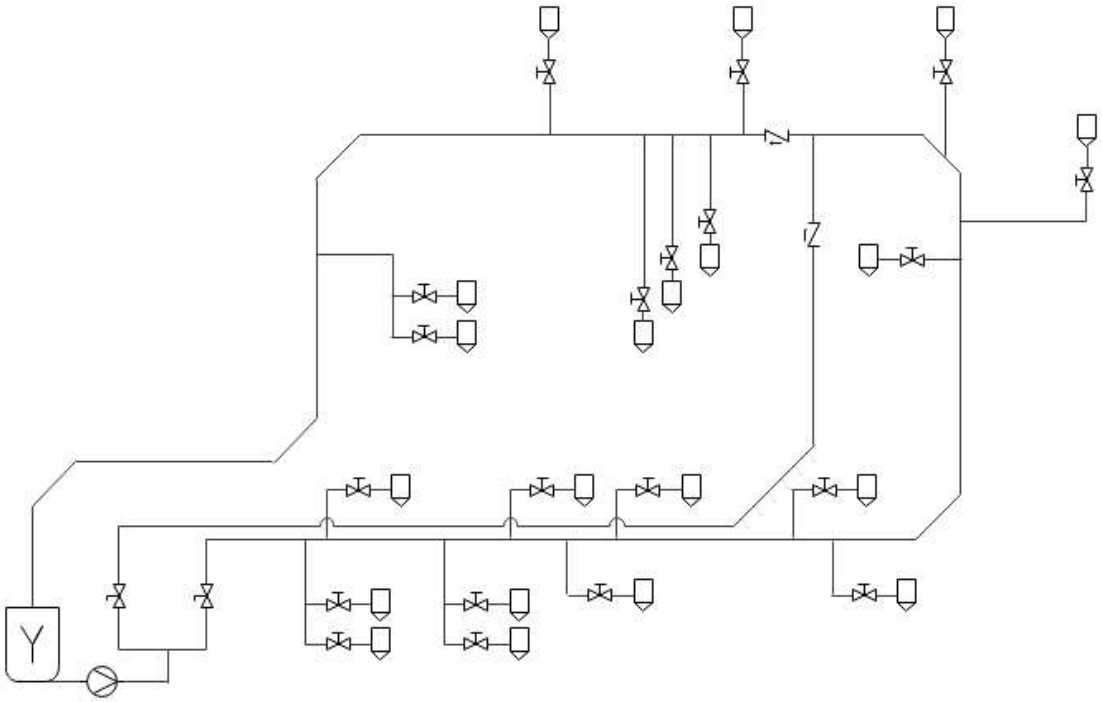


Figura 2.21. Diagrama unifilar del sistema de bombeo propuesto.
(Fuente: Propia)

2.3.4. Programa de simulación EPANET

El circuito de bombeo propuesto es un caso de redes de conducciones complejas, que a diferencia del sistema de bombeo típico de una entra y una salida, este sistema tiene una entrada y varias salidas.

Para realizar el análisis en condiciones de operación se utiliza un programa simulador hidráulico llamado EPANET. Este software permite calcular complejas redes de abastecimiento y regadío y permite entender el comportamiento del sistema de distribución.

EPANET es un programa de ordenador que realiza simulaciones en períodos prolongados del comportamiento hidráulico. El programa permite trabajar con sistema complejos de redes los cuales están constituidas por tuberías, nudos (uniones entre tuberías), bombas, válvulas, depósitos de almacenamiento o embalses, etc. Efectúa un control del desarrollo de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles de los depósitos.

El software proporciona un entorno integrado bajo Windows, para la edición de los datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulica, la visualización de resultados en varios formatos, entre estos se tiene mapas de red codificados por colores, tablas numéricas [38].

Para utilizar el programa EPANET se sigue normalmente los siguientes pasos descritos en la Figura 2.22.

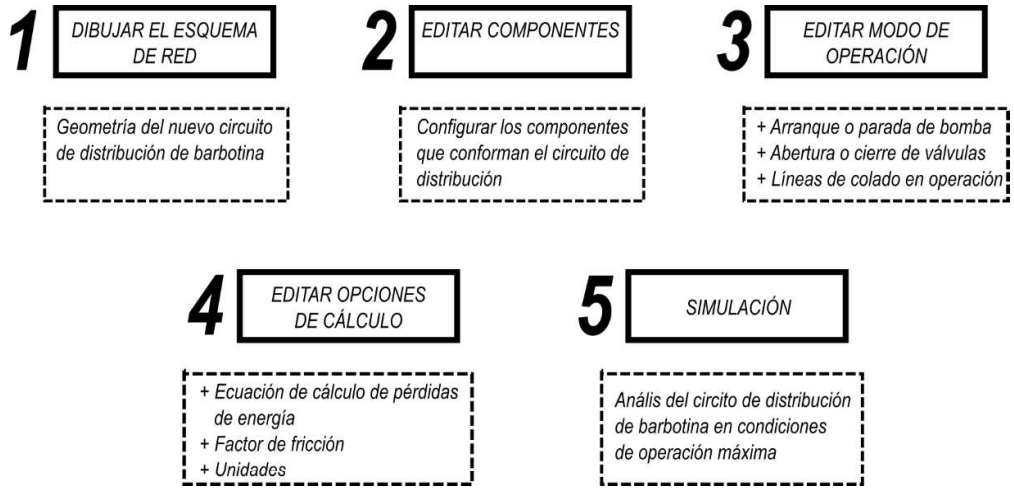


Figura 2.22. Pasos para el análisis del circuito de bombeo en EPANET.
(Fuente: Propia)

Entonces se procede a realizar el esquema del circuito del sistema de bombeo propuesto (ver Figura 2.23), luego se introduce los coeficientes de pérdidas en cada uno de los accesorios, las dimensiones de la cada una de las tuberías y depósitos, la curva de la bomba escogida y las condiciones del fluido con el cual se va a realizar la simulación.

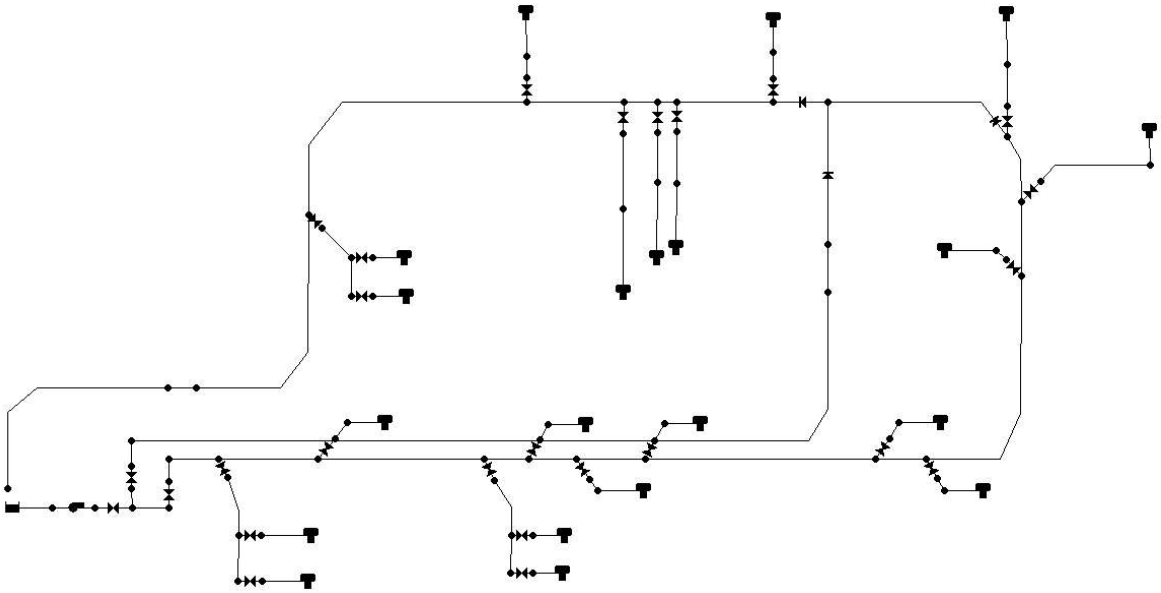


Figura 2.23. Esquema del circuito de bombeo en EPANET.
(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente sección se presenta los resultados obtenidos de la caracterización reológica de la barbotina, la validación del modelo matemático a través del circuito piloto y el diseño del sistema de distribución de barbotina para el área de colado, en donde se realiza un análisis en condiciones de operación.

3.1. Análisis de caracterización reológica

El análisis permite conocer el comportamiento del fluido de trabajo (barbotina) utilizada en la empresa FV Área Andina S.A. para la producción de porcelana sanitaria. Las curvas de esfuerzo cortante y viscosidad en función de la tasa de deformación permiten la caracterización del fluido. También, la curva de flujo fue ajustada a un modelo reológico.

3.1.1. Propiedades básicas de la pasta (barbotina)

La pasta cerámica o barbotina debe reunir varios aspectos que garanticen una buena reología, para ello se realizó la medición de algunas propiedades para el control del fluido, como son la densidad, humedad y peso de deposición húmedo (PDH). Los datos recopilados de las mediciones se detallan en el ANEXO VI. Con los datos adquiridos se obtiene un promedio de cada una de la propiedades de la barbotina y así también una desviación estándar (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Propiedades principales de la barbotina.

PROPIEDADES	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	UNIDAD
DENSIDAD	1,849	0,001	[g/cm3]
HUMEDAD	25,602	0,257	[%]
PDH	77,419	0,945	[g]

(Fuente: Propia)

Como se observa los valores de densidad, humedad y peso de deposición húmedo, estos se encuentran dentro del rango de valores permitidos descritos en el apartado 2.1.2.2. Esto garantiza que la barbotina cumpla con los estándares reológicos establecidos en la empresa.

3.1.2. Dependencia de la viscosidad en función del tiempo

La caracterización tixotrópica permite conocer el comportamiento del fluido con respecto al tiempo, además para la construcción de las curvas características de la barbotina es necesario conocer el tiempo que le toma al fluido llegar a un estado estable.

Inicialmente, como el fluido se encuentra en reposo, se aplica una tasa de deformación alta, donde existe una desestructuración de la microestructura y la tensión límite disminuye con el tiempo hasta alcanzar un nivel de régimen permanente.

Después de aplicar una tasa de deformación diferente, sea mayor o menor, existe una reconstrucción si la tasa de deformación es menor y una desestructuración si la tasa de deformación es mayor. El tiempo para alcanzar los nuevos estados de régimen permanente depende de la tasa de deformación anterior, es decir, del nivel de estructuración que tenía el material antes. La dependencia del estado de la estructura anterior da a conocer la existencia del comportamiento tixotrópico [7].

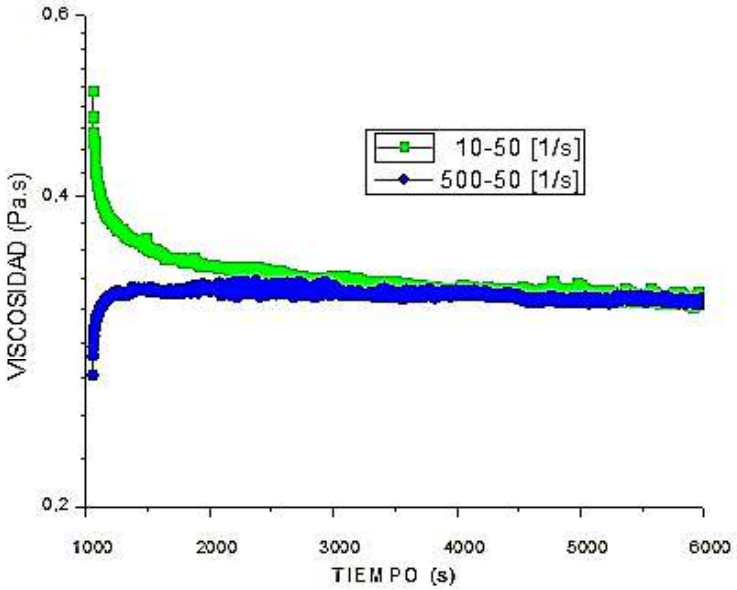


Figura 3.1. Evolución de la viscosidad de la barbotina con respecto al tiempo.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.1 corresponde a la evolución de la viscosidad con respecto al tiempo, en un instante $\mathrm{t} = 1000\,\mathrm{s}$, una tasa de deformación de 50 [1/s]. Verde: $\dot{\gamma} = 10\,[1/s]$ para $\mathrm{t} < 1000\,\mathrm{s}$; Azul: $\dot{\gamma} = 500\,[1/s]$ para $\mathrm{t} < 1000\,\mathrm{s}$, donde se puede observar que el régimen permanente no se alcanza al mismo tiempo cuando se varía la tasa de deformación inicial, ya que este tiempo depende del estado estructural anterior.

Las Figuras 3.2 – 3.4 presentan las curvas de la evolución de la viscosidad con el tiempo, cuando se aplica una tasa de deformación constante y luego se cambia a otro valor, ya sea este menor o mayor. Se puede notar que la barbotina es un fluido con características dependientes del tiempo y alcanza niveles de viscosidad iguales, pero el tiempo necesario para alcanzar el régimen permanente depende del histórico de cizalla de la muestra, es decir, posee características tixotrópicas [7].

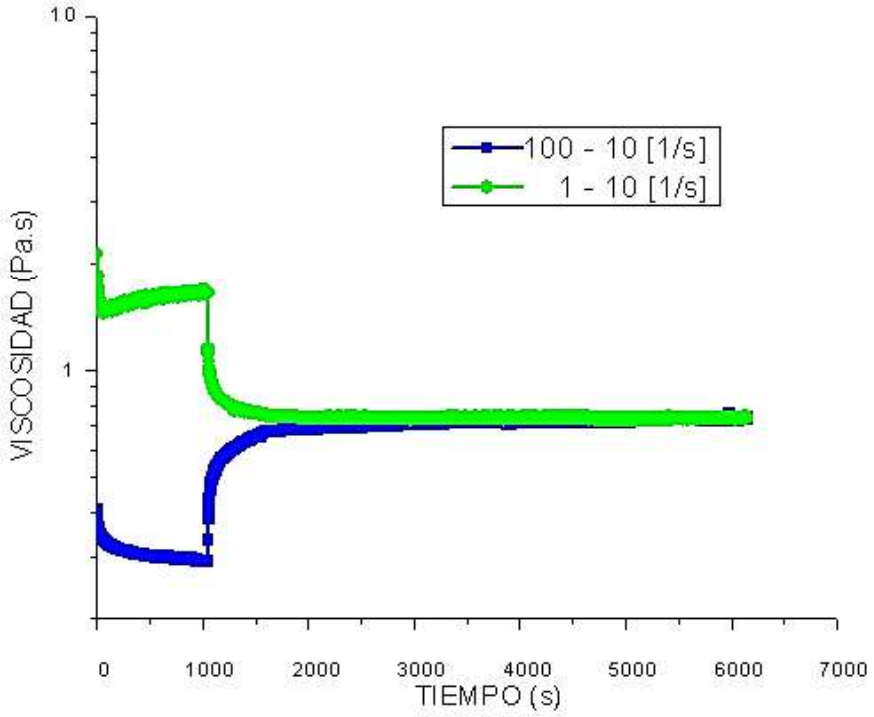


Figura 3.2. Pruebas tipo paso a paso de 1 a 100 [1/s] y tipo paso a paso de 100 a 10 [1/s] para la barbotina.
(Fuente: Propia)

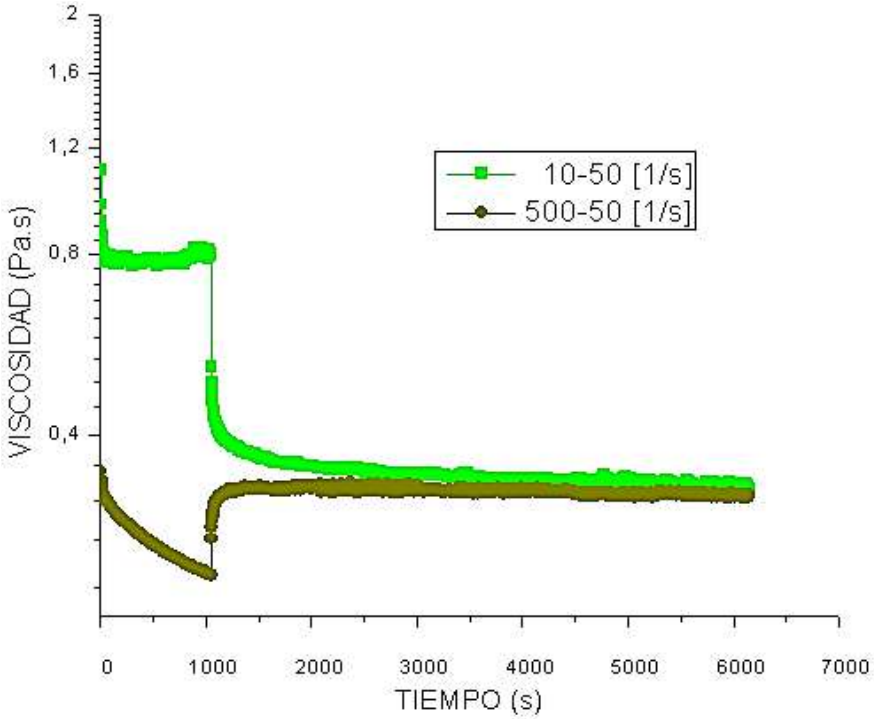


Figura 3.3. Pruebas tipo paso a paso de 10 a 50 [1/s] y tipo paso a paso de 500 a 50 [1/s] para la barbotina.
(Fuente: Propia)

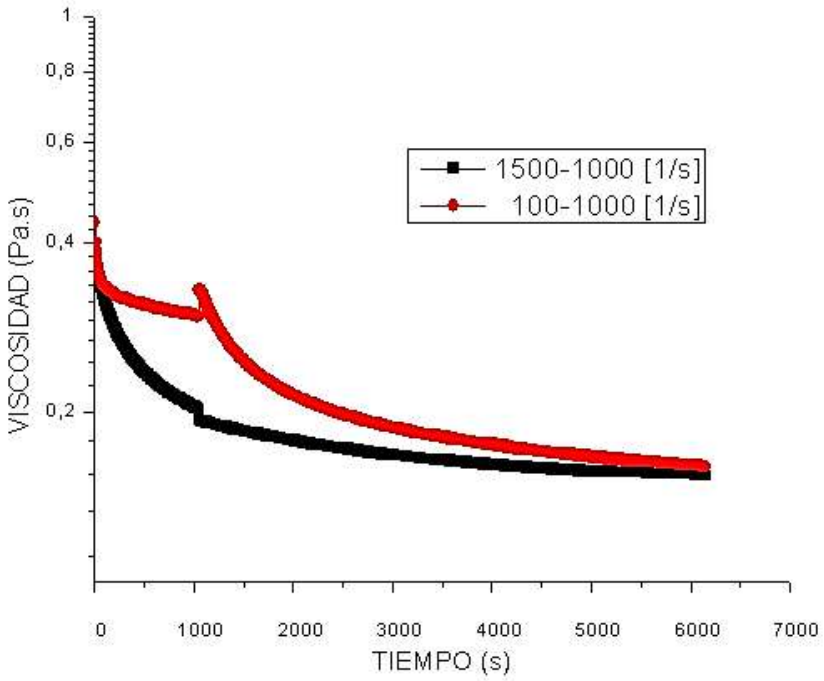


Figura 3.4. Pruebas tipo paso a paso de 50 a 500 [1/s] y tipo paso a paso de 1000 a 50 [1/s] para la barbotina.
(Fuente: Propia)

El tiempo que le toma al fluido alcanzar el régimen permanente depende del rango de tasa de deformación. Para el rango de 1 a 10 [1/s], el tiempo de estabilización fue de 1500 s, para el rango de 10 a 100 [1/s] el tiempo de estabilización fue 2000 s y para el rango de 100 a 1000 [1/s] el tiempo de estabilización fue de 4000 [s]. Esta diferencia de tiempos para cada uno de los rangos se debe a la tasa de deformación a la cual estuvo sometida la barbotina. Los valores de los tiempos de estabilización se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Tiempo de estabilización para los diferentes rangos de tasas de cizallamiento.

Rango de tasa de cizallamiento [1/s]	Tiempo de estabilización [s]
1 -10	1500
10-100	2000
100-1000	4000

(Fuente: Propia)

3.1.3. Curva de flujo

A partir de las pruebas de estabilización de la viscosidad en función del tiempo, se ha definido un tiempo de lectura de cada punto de la curva de flujo para que el régimen permanente se haya alcanzado. La caracterización de la barbotina en estado estable consiste en tomar valores de esfuerzo cortante y viscosidad a varias tasas de deformación

tomando en cuenta el tiempo de lectura de cada punto. Cabe recalcar, que el tiempo de estabilización no es el mismo para los rangos de tasa de deformación.

Como se había mencionado en la sección 2.1 la construcción de las curvas de flujo y viscosidad se realizó por dos métodos. Para el primer método se construyó la curva de flujo y viscosidad en tres fases (ver Figura 3.5) de 1000 a 100 [1/s], de 100 a 10 [1/s] y de 10 a 1 [1/s], en la cual para cada una de las fases se utilizó una muestra diferente. Para el segundo método se construyó la curva de flujo y de viscosidad en una sola fase (ver Figura 3.6) de 1000 a 1 [1/s], en el cual se utilizó una sola muestra.

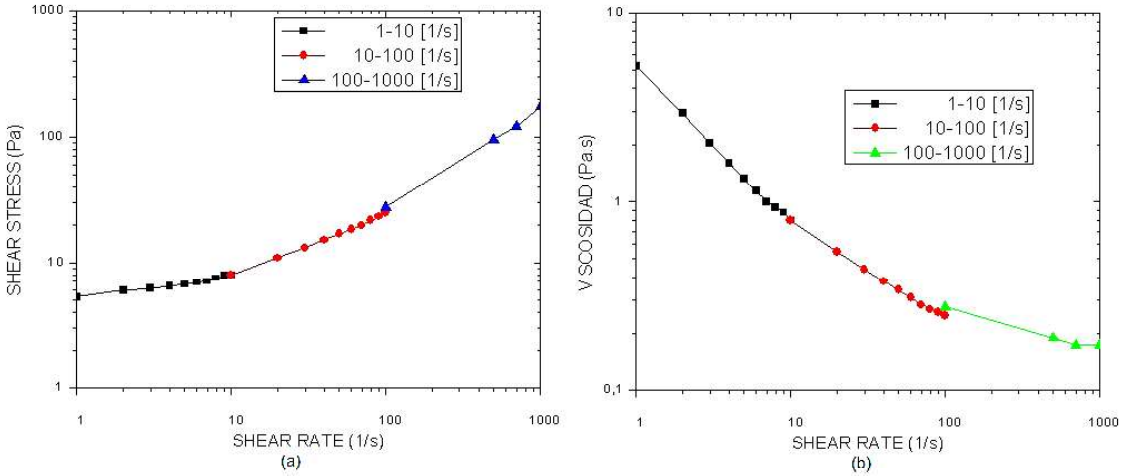


Figura 3.5. Construcción por fases de las curvas de (a) flujo y (b) viscosidad.
(Fuente: Propia)

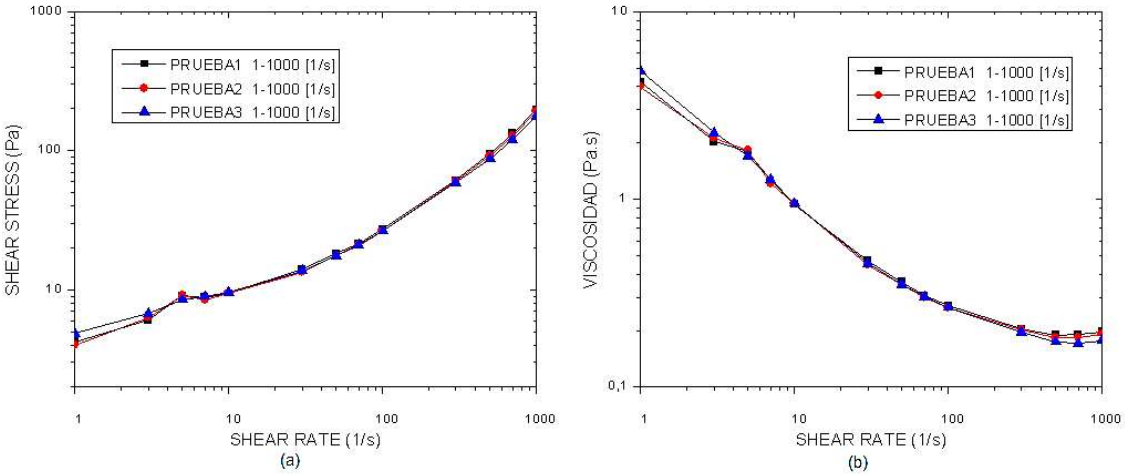


Figura 3.6. Construcción en una sola fase de las curvas de (a) flujo y (b) viscosidad.
(Fuente: Propia)

La construcción de la curva de flujo y la curva de viscosidad se realiza en régimen de estado estacionario o permanente, en donde a un determinado valor de tasa de deformación las condiciones de la muestra como el esfuerzo cortante y la viscosidad permanecen sin una variación considerable, por lo que se podría decir que son constantes.

Esto se evidencia en los cambios de muestra (ver Figura 3.5), exactamente en los valores de 10 [1/s] y 100 [1/s], en donde a pesar de haber una transición de rango, por el uso de una diferente muestra, los valores tanto de viscosidad como esfuerzo cortante son iguales para cada rango de tasa de deformación, esto solo será posible si se permite que el fluido llegue al régimen de estado estable.

También se realizó la construcción de la curva de flujo y de viscosidad en una sola fase, es decir sin realizar un cambio de muestra para los diferentes rangos de tasa de deformación (ver Figura 3.6).

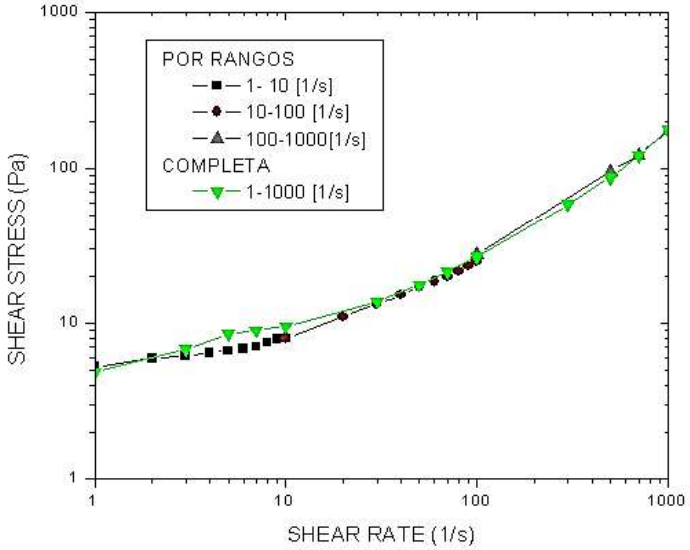


Figura 3.7. Comparación de la curva de flujo construida por varias fases y una sola fase.
(Fuente: Propia)

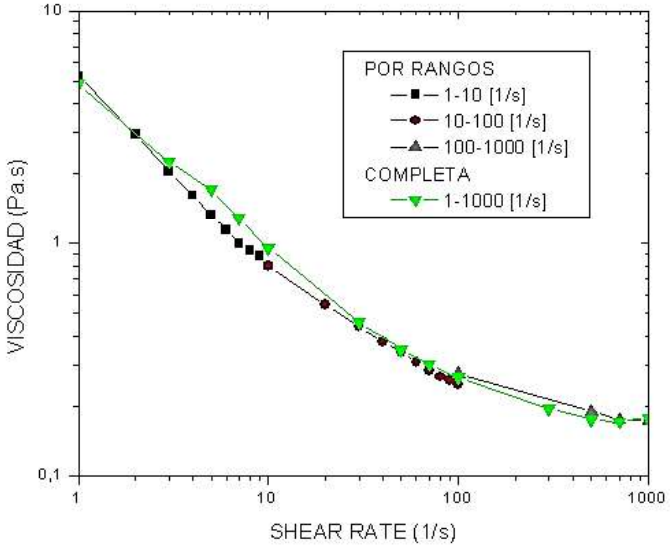


Figura 3.8. Comparación de la curva de viscosidad construida por varias fases y una sola fase.
(Fuente: Propia)

Se realizó un comparación entre tres pruebas diferentes, donde se observa que existe repetibilidad entre cada una de ellas a excepción de los valores tomados a bajas tasa de deformación específicamente valores menores a 10 [1/s]. También cabe mencionar que las curvas características adquieren una mejor tendencia a comparación de las construidas por fases.

Como se observa en las Figuras 3.7 y 3.8 tanto las curvas de flujo como de viscosidad construidas por los dos métodos no difieren en gran medida una de otra, por lo que se tiene repetibilidad y se puede trabajar con los dos métodos.

También se puede evidenciar en la curva de flujo, que el esfuerzo cortante de la barbotina incrementa su valor conforme la tasa de deformación aumenta (ver Figura 3.7), además se observa que la curva no parte del origen, esto quiere decir que la barbotina requiere de un esfuerzo inicial para que este empiece a fluir. Por otro lado, se tiene la curva de viscosidad en la que se puede afirmar que la viscosidad disminuye conforme la tasa de deformación va aumentando su valor (ver Figura 3.8) y por lo tanto es posible ver que la barbotina es un fluido viscoplástico.

Con el objetivo de obtener los parámetros reológicos que describen a la barbotina, se realiza un ajuste de las curvas características al modelo matemático de Herschel Bulkley. Esto solo luego de comparar con otros modelos matemáticos como son el de Ley de Potencia y el plástico de Bingham. Por lo tanto, la ecuación reológica 3.1 caracteriza la barbotina utilizada en la producción de sanitarios.

$$\tau = 6{,}6273 + 0{,}33012 * \dot{\gamma}^{0{,}89234} \qquad [3.1]$$

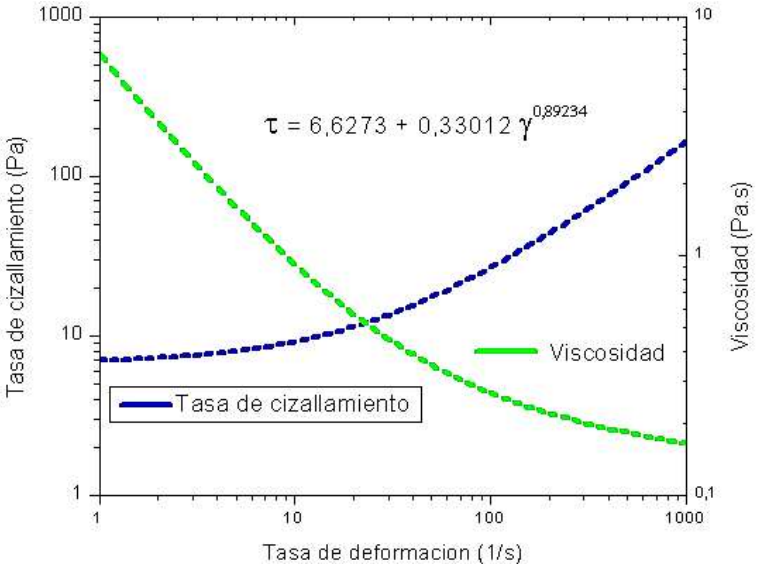


Figura 3.9. Curva de flujo y curva de viscosidad a partir del modelo de Herschel Bulkley. (Fuente: Propia)

Una vez obtenida la ecuación reológica se construye la curva de flujo (esfuerzo cortante vs tasa de deformación) y la curva de viscosidad (viscosidad aparente vs tasa de deformación) como se muestra en la Figura 3.9. Es importante mencionar que el modelo matemático de Herschel Bulkley se ajusta con un coeficiente de correlación cuadrático (R2) igual a 0,9937.

3.1.4. Ajuste al modelo no Newtoniano

El modelo matemático de Herschel Bulkley se ajusta de mejor manera a las curvas características ya que combina las propiedades del fluido de Ley de Potencia y del plástico de Bingham, siendo un modelo bastante usado para materiales viscoplásticos.

En la Tabla 3.3 se presenta los parámetros reológicos de la barbotina obtenidos del ajuste al modelo matemático de Herschel Bulkley. Las ecuaciones reológicas utilizadas para el ajuste matemático se describen en el apartado 1.5.3.

Tabla 3.3. Parámetro reológicos de la barbotina.

PARÁMETROS	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Índice de consistencia	K	0,33012	$Pa.s^n$
Índice de comportamiento	n	0,89234	–
Esfuerzo de Fluencia	τ_0	6,6273	Pa
Densidad	ρ	1850	$\frac{kg}{m^3}$

(Fuente: Propia)

3.1.5. Análisis de la curva de flujo para la barbotina

La barbotina utilizada para la producción de sanitarios presenta características tixotrópicas ya que el fluido depende del histórico de cizalla para alcanzar el estado de régimen permanente. El estado de estructura anterior define el tiempo que le toma a la barbotina estabilizarse la cual depende del rango de tasa de deformación en la que se está analizando. En el régimen permanente las características, como son el esfuerzo cortante y viscosidad aparente de la barbotina permanecen constantes.

La barbotina es un fluido viscoplástico que se ajustó perfectamente la ecuación reológica de Herschel Bulkley (ver Figura 3.10). Con esta ecuación reológica se construye las curvas características de flujo y de viscosidad que permiten predecir el comportamiento a diferentes tasas de deformación.

El análisis reológico permite obtener los parámetros reológicos como son el esfuerzo de fluencia y los índices de consistencia y comportamiento. El esfuerzo de fluencia indica que

el fluido requiere de un esfuerzo inicial para que este empiece a fluir, para el caso de la barbotina se requiere un esfuerzo de fluencia igual a 6,63 Pa.

Con respecto al índice de consistencia K para la barbotina se tiene un valor de 0,33012 $Pa.s^n$ el cual depende del valor del índice de comportamiento n que tiene un valor de 0,89234. Al tener el índice de comportamiento $n < 1$ se puede aseverar que el fluido es no Newtoniano con un comportamiento pseudoplástico, es decir que la viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de deformación.

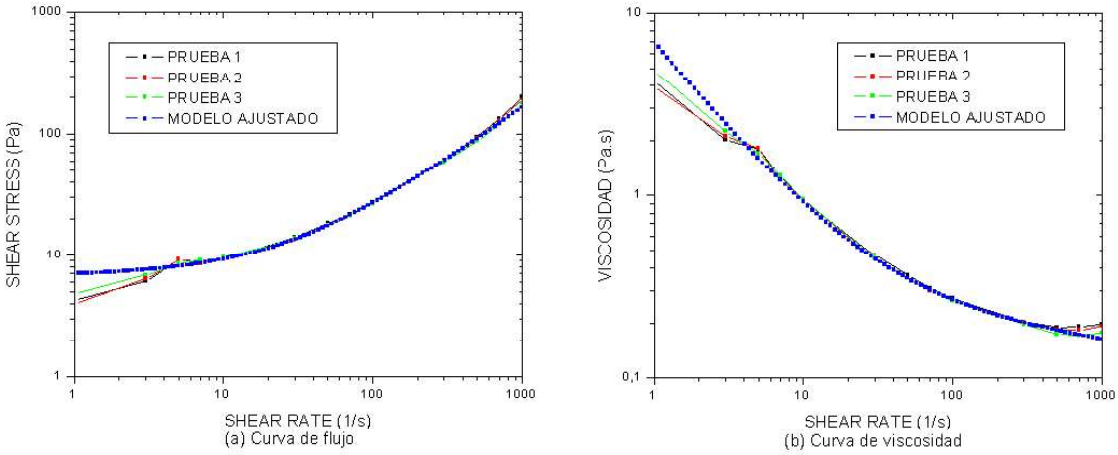


Figura 3.10. Comparación de las curvas de flujo y viscosidad con el modelo matemático ajustado (Fuente: Propia)

3.2. Validación del modelo matemático

3.2.1. Simulación del fluido a través del circuito de pruebas

La simulación del sistema permite predecir las caídas de presión que tiene el flujo de barbotina a través del circuito de pruebas. Como se mencionó en el apartado 2.2, la simulación del modelo matemático se realizó para cuatro condiciones de operación de la bomba, en el cual se busca calcular las caídas de presión en tres tramos del circuito de pruebas y representarlos a través de una gráfica de la caída de presión en función de la longitud de la tubería.

En el apartado 2.2.1. se describe las condiciones del fluido para la simulación así también se presenta la geometría utilizada para la simulación. En la simulación, el fluido se evalúa para la longitud recorrida en la tubería del circuito de pruebas con el objetivo de predecir la caída de presión a lo largo de la tubería. Los resultados se observan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de la simulación del modelo matemático.

ACCESORIOS	LONGITUD DE TUBERÍA L [m]	CAÍDA DE PRESIÓN ΔP [psi]			
		20 PSI	40 PSI	60 PSI	80 PSI
MANÓMETRO 1	0	0	0	0	0
Tramo de tubería	26,70	3,4766	5,0820	6,3701	7,4255
1 codo de 45°	26,70	3,5558	5,1818	6,4884	7,5598
Tramo de tubería	27,40	3,6469	5,3151	6,6554	7,7545
1 codo de 45°	27,40	3,7260	5,4149	6,7737	7,8888
MANÓMETRO 2	28,40	3,8563	5,6052	7,0123	8,1669
Tramo de tubería	37,68	5,0640	7,3706	9,2251	10,7464
1 codo de 45°	37,68	5,1431	7,4704	9,3434	10,8807
Tramo de tubería	38,38	5,2342	7,6036	9,5104	11,0754
1 codo de 45°	38,38	5,3134	7,7034	9,6287	11,2098
MANÓMETRO 3	68,60	9,2490	13,4564	16,8398	19,6156
Tramo de tubería	97,70	13,0381	18,9952	23,7825	27,7085
2 codos de 45°	97,70	13,1964	19,1948	24,0191	27,9772
Tramo de tubería	108,20	14,5636	21,1934	26,5242	30,8973
2 codos de 45°	108,20	14,7219	21,3930	26,7607	31,1660
MANÓMETRO 4	130,35	17,6060	25,6090	32,0453	37,3261

(Fuente: Propia)

La Tabla 3.4 muestra los resultados de las caídas de presión obtenidas de la simulación del modelo matemático, en la cual se puede observar que a medida que se recorre la tubería, es decir que incrementa la longitud de la tubería, la caída de presión aumenta. También se puede mencionar que la caída de presión a una presión de bombeo de 80 psi es mayor que la caída de presión a una presión de bombeo de 20 psi a pesar de recorrer la misma longitud de tubería. Por lo tanto, se puede aseverar que la caída de presión es directamente proporcional con la presión de bombeo.

La caída de presión a lo largo de la tubería del circuito de pruebas, para cada presión de bombeo, se presenta en la Figura 3.11, en la cual se puede observar la relación que existe entre la caída de presión versus la longitud de la tubería.

En la Figura 3.11 se puede observar que la relación de la caída de presión con la longitud de la tubería es lineal y directamente proporcional una de la otra, es decir que mientras se aumenta la longitud de la tubería la caída de presión será mayor. Cabe mencionar que en los accesorios existen pérdidas menores que se representan con el salto en la recta, en este caso al tratarse de codos como los accesorios, no existe un salto notorio en la gráfica.

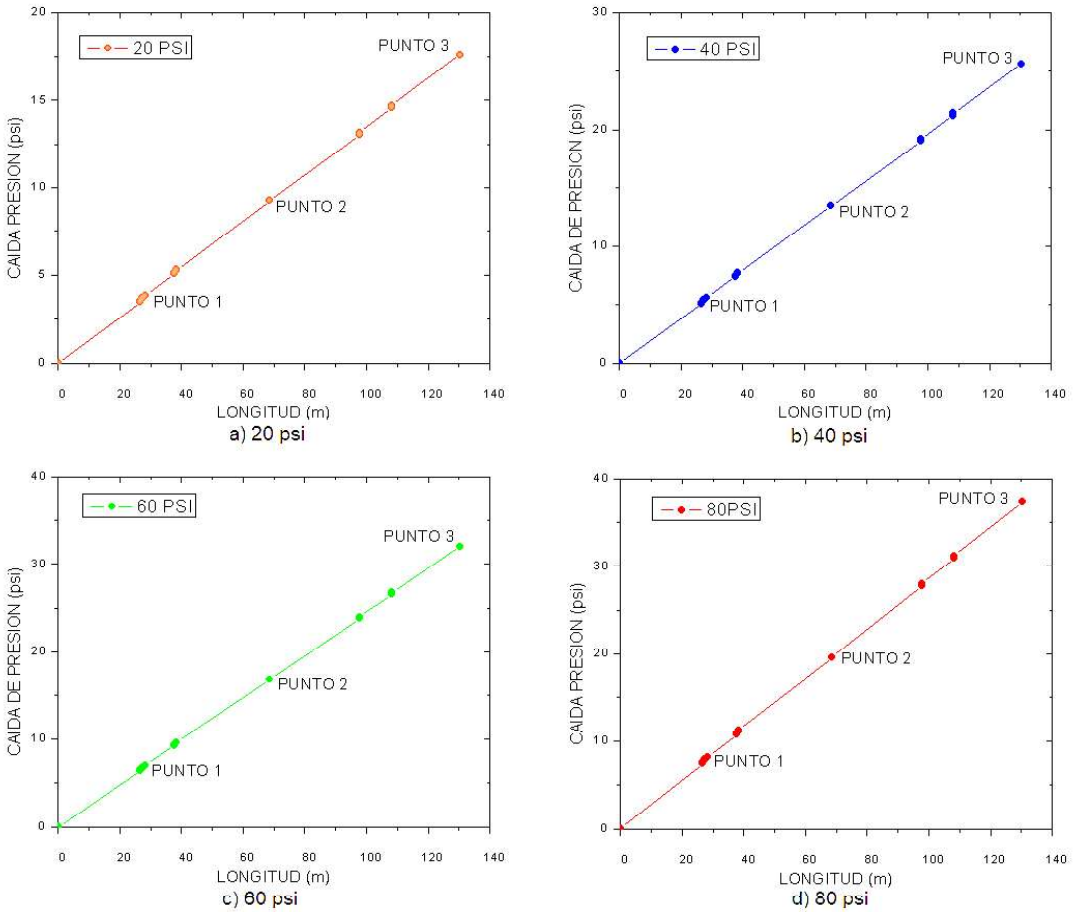


Figura 3.11. Caídas de presión vs longitud de tubería para una presión de bombeo.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.12 se observa la comparación de las curvas de caída de presión para las presiones de bombeo utilizadas para la simulación del modelo matemático.

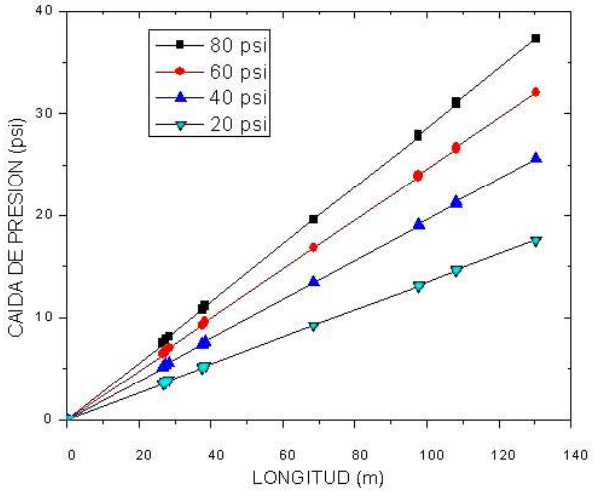


Figura 3.12.Comparación de las caídas de presión vs longitud de tubería para las diferentes presiones de bombeo.
(Fuente: Propia)

3.2.2. Comparación de resultados entre la simulación y el estudio experimental del flujo

Luego de realizado la simulación y predecir los valores de caída de presión a lo largo de la tubería en el circuito de pruebas, se realiza el estudio experimental siguiendo el procedimiento que se detalla en el apartado 2.2.4.

El estudio experimental permite validar los resultados obtenidos de la simulación, para luego compararlos y determinar un porcentaje de error que existe entre el modelo simulado con el modelo físico. Todos los datos obtenidos del estudio experimental se encuentran en el ANEXO VII, en la Tabla 3.5 se presenta el promedio de todos los datos obtenidos.

Tabla 3.5. Datos de caudal y caídas de presión obtenidas del estudio experimental.

PRESIÓN DE BOMBEO [psi]	CAUDAL [L/h|	CAIDA DE PRESIÓN [psi]		
	Q	L1	L2	L3
20	554,499	4,242	8,725	16,508
40	1620,548	5,992	12,183	23,142
60	2578,671	7,417	18,100	29,733
80	3401,724	8,208	21,400	35,192

(Fuente: Propia)

Los valores obtenidos del estudio experimental son el resultado de realizar un promedio de todos los datos tomados durante la prueba. Para obtener el valor del caudal se tomó datos, con la ayuda de caudalímetros, a la entrada y salida del circuito de pruebas para luego promediar y obtener un caudal promedio que circula por el circuito de pruebas.

De igual manera se realiza con la presión, en donde se realizó un promedio de los valores de presión por cada manómetro colocado en el circuito de pruebas. Una vez que se obtuvo las presiones medias en cada manómetro se calculó la caída de presión en los tramos definidos, las distancias de cada uno de los tramos se mencionan en la Tabla 2.7.

Finalmente, se compara los resultados obtenidos de la simulación del modelo matemático con los resultados del estudio experimental. Para la comparación se toma tres puntos de la curva caída de presión vs longitud de la tubería, los cuales coinciden con los valores de caída de presión en los tramos definidos. Los porcentajes de error al comprar los resultados se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Porcentajes de error al comprar los resultados de la simulación y los del estudio experimental.

PRESIÓN DE BOMBEO P[psi]		CAIDA DE PRESIÓN ΔP [psi]		ERROR [%]
		Experimental	*Simulación*	
20	L1	4,2417	3,8563	9,9945
	L2	8,7250	9,2490	5,6654
	L3	16,5083	17,6060	6,2348
40	L1	5,9917	5,6052	6,8947
	L2	12,1833	13,4564	9,4607
	L3	23,1417	25,6090	9,6346
60	L1	7,4167	7,0123	5,7670
	L2	18,1000	16,8398	7,4835
	L3	29,7333	32,0453	7,2147
80	L1	8,2083	8,1669	0,5067
	L2	21,4000	19,6156	9,0971
	L3	35,1917	37,3261	5,7183

(Fuente: Propia)

Como se muestra en la tabla 3.6, la comparación se realiza para los tres tamos de tubería establecidos a las diferentes presiones de bombeo (20 psi, 40 psi, 60 psi y 80 psi). Entonces, para una presión de bombeo de 20 psi se tiene un error máximo de 9,99 %, para una presión de bombeo de 40 psi se tiene un error máximo de 9,63 %, para 60 psi se tiene un error máximo de 7,48 % y finalmente para 80 psi se tiene un error máximo de 9,1%.

Como se puede notar, en general los errores que se obtiene entre los valores de la simulación y el estudio experimental son menores al 10 % para cualquier tramo de tubería. Estos errores pueden ser causa de la precisión y exactitud con la que se toma los datos de caudal y presión en cada uno de los instrumentos de medida, además en un estudio experimental con un modelo físico siempre existen factores ajenos o no considerados que pueden afectar la toma de mediciones.

Con todo lo expuesto anteriormente, se puede aceptar el valor del 10 % de error y dar como válido el modelo matemático que describe las caídas de presión en un circuito de pruebas. Además, se verifica que los parámetros reológicos de la barbotina, obtenidos de la caracterización, son válidos ya que permiten predecir de forma muy cercana las condiciones en la que está fluyendo la barbotina a través del circuito de pruebas.

3.3. Análisis del sistema de bombeo

Una vez establecido el nuevo diseño del sistema de bombeo se realiza un análisis del mismo, para lo cual se establece la curva del sistema de bombeo que permite la selección de la bomba requerida. Después se realiza un análisis, con la ayuda del software libre EPANET, de las condiciones de operación máxima para verificar que el caudal y la presión se encuentren dentro de los parámetros de diseño.

3.3.1. Curva del sistema de bombeo

Como se describe en el apartado 2.3.3 se realizó un modelado matemático del sistema de bombeo propuesto. Este modelo permite construir la curva del sistema (ver Figura 3.13) el mismo que es necesario para determinar la bomba adecuada para el sistema.

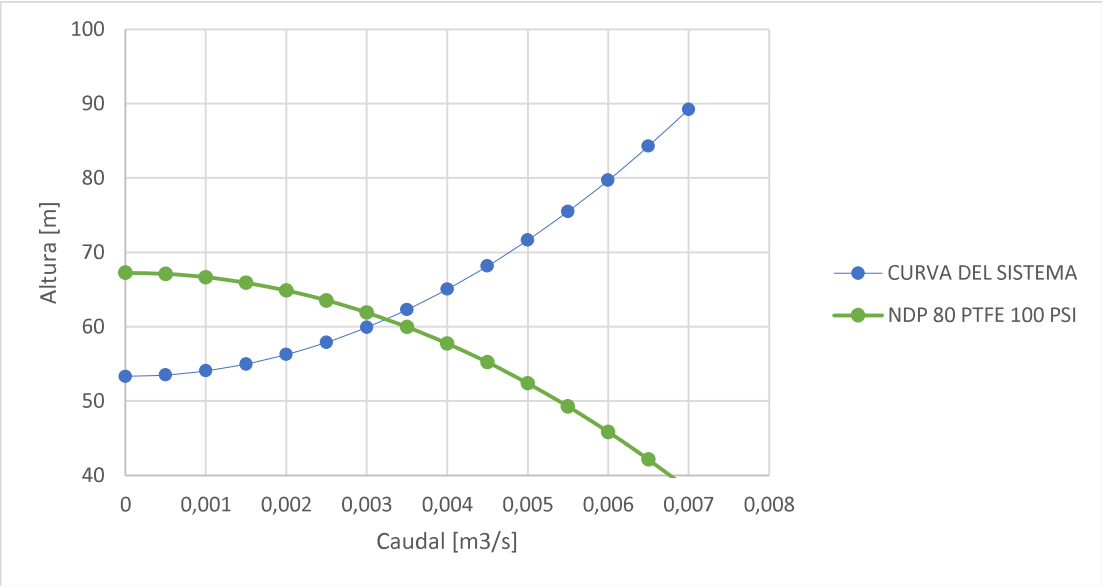


Figura 3.13. Curva del sistema de bombeo.
(Fuente: Propia)

La curva del sistema se obtuvo al evaluar el modelo matemático del sistema a diferentes condiciones de caudal y así tener los valores de pérdidas totales del sistema, y luego con la ayuda de un ajuste por mínimo cuadrados se obtiene la ecuación que describe al sistema. (ver Ecuación 3.2)

$$H = 53{,}33 + 732262{,}24\, Q^2 \qquad [3.2]$$

Al tener la curva del sistema de bombeo se procede al calcular la pérdida total del sistema para determinar la pérdida de presión total del bombeo y también la potencia requerida de la bomba, para ello se utiliza las ecuaciones de la sección 2.3.2.

El caudal de diseño se determina del volumen de barbotina requerida por el circuito 2, en donde se analiza los picos más altos de consumo para determinar el caudal máximo necesario por el circuito de bombeo.

En la Figura 3.14 se puede observar el consumo de caudal del circuito a lo largo del día, en el que se puede decir que se tiene un mayor consumo en la mañana con un caudal máximo de 13355,12 [L/h].

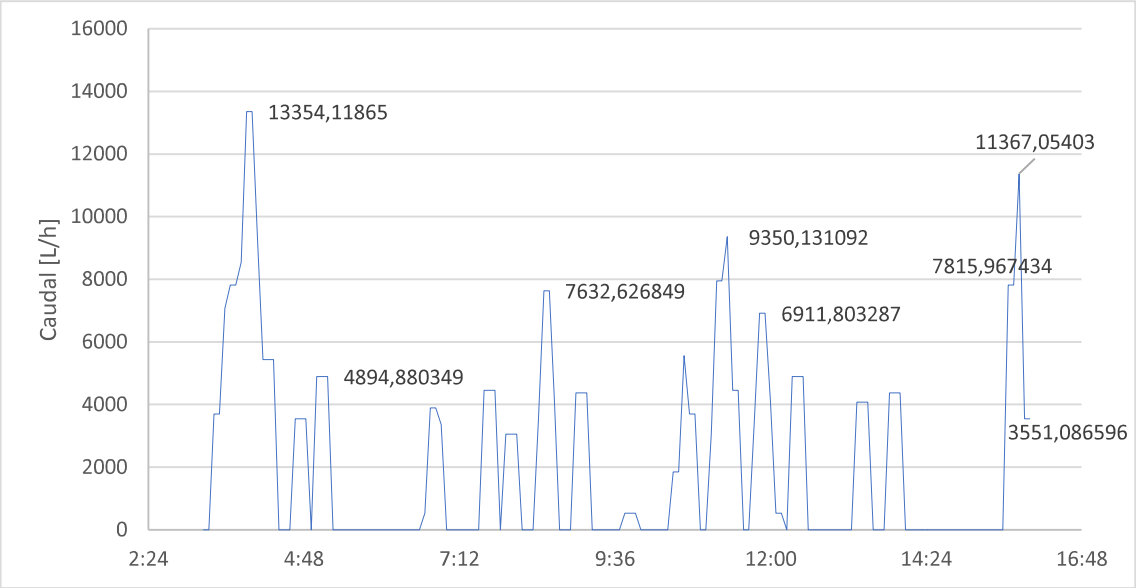


Figura 3.14. Caudal requerido durante el horario de llenado por el circuito de bombeo.
(Fuente: Propia)

Luego de haber realizado todos los cálculos con las ecuaciones descritas en el apartado 2.3.2.1. se tiene las siguientes condiciones de bombeo resumidas en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Condiciones de bombeo.

ALTURA REQUERIDA	POTENCIA BOMBA		PÉRDIDA DE PRESIÓN	
[m]	[W]	[HP]	[KPa]	[Psi]
64,3	4517,06	6,06	114,080	16,542

(Fuente: Propia)

Con los datos de las condiciones de bombeo se seleccionó una bomba de desplazamiento positivo, esta es una bomba de diafragma de la marca YAMADA modelo NDP 80 BAP, las especificaciones técnicas se detallan en el ANEXO VIII.

3.3.2. Análisis en condiciones de operación

Con el objetivo de verificar la efectividad del diseño del sistema de bombeo, se realiza un análisis en condiciones de operación máxima. Esta condición de operación máxima se da cuando el circuito tiene que bombear el caudal máximo requerido, el cual ya se mencionó anteriormente.

Una vez establecida todas los parámetros necesarios para que la simulación se acerque a lo más real posible, se procede con la simulación. En la Figura 3.2 se observa los resultados obtenidos por el programa.

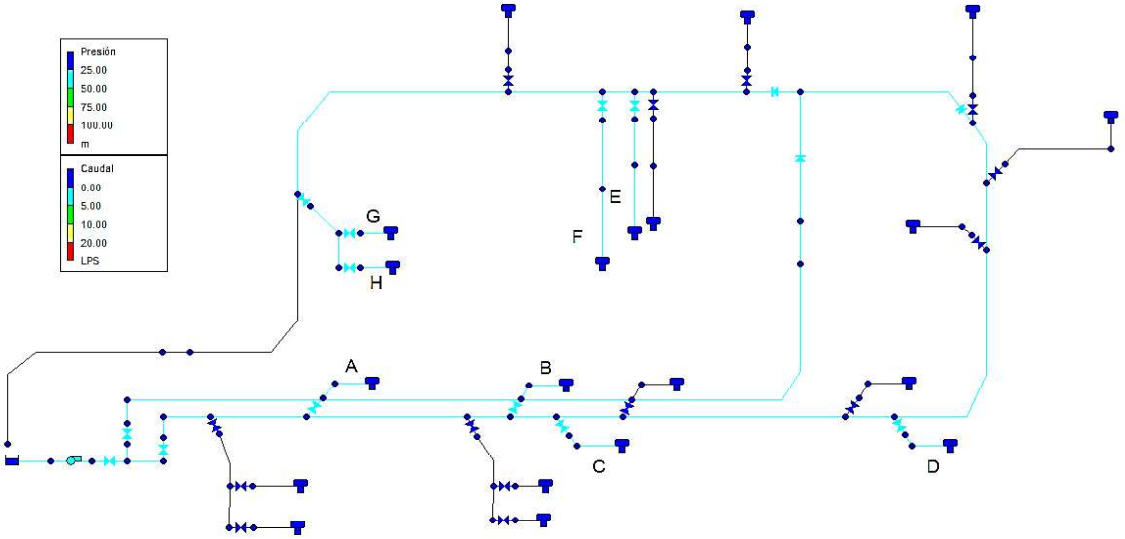


Figura 3.15. Resultados de la simulación proporcionado por EPANET.
(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 3.2, la simulación se realizó para la condiciones de operación máxima, en donde del total de líneas contempladas en el diseño, apenas 4 líneas se encuentran en funcionamiento, por lo tanto, se tiene 8 salidas de barbotina abiertas. Los resultados de caudal y presión en cada una de las salidas se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados de presión y caudal en cada una de las salidas del circuito.

Salida	Caudal [LPS]	Presión de salida [psi]
A	0,87	32,67
B	0,72	30,41
C	0,71	30,28
D	0,60	28,04
E	0,61	28,22
F	0,50	27,84
G	0,53	26,10
H	0,35	26,03

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 3.8, se tiene un valor de 0,87 LPS como caudal máximo de salida y como valor mínimo se tiene 0,37 LPS. Por otro lado, se tiene 32,668 psi como valor máximo de presión y como valor mínimo se tiene 26,031 psi. Estos valores se encuentran dentro del rango permitido por la empresa (ver Tabla 2.7). Cabe mencionar que los valores máximos de presión y caudal se encuentran al principio del circuito (en la primera salida de barbotina) mientras que los valores mínimos se encuentran al final del circuito (en la última salida de barbotina)

También es importante notar que con el caudal máximo requerido por el circuito de bombeo no supera una velocidad de flujo que llegue a ser flujo turbulento, por lo tanto, todo el circuito trabaja a condiciones de fluido laminar.

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

El diseño y la simulación del sistema de distribución de barbotina para la empresa FV Área Andina S.A. ha sido realizado, de donde se puede sacar las siguientes conclusiones adicionales.

Se desarrolló una metodología que permite realizar una caracterización de la barbotina en régimen de estado estable, en donde se obtuvo las curvas características de flujo y viscosidad, y mediante un ajuste matemático se obtiene la ecuación reológica que describe el comportamiento de la barbotina.

La barbotina es un fluido no newtoniano que se ajusta al modelo matemático de Herschel Bulkley. Con este ajuste, se obtiene tres parámetros reológicos, el esfuerzo de fluencia, el índice de consistencia y el índice de comportamiento. La barbotina requiere un esfuerzo de fluencia igual a 6,62 Pa para que este empiece a fluir, además se tiene un índice de comportamiento igual a 0,89234 por lo tanto se comporta como un fluido pseudoplástico, es decir que la viscosidad disminuye conforme aumenta la tasa de deformación.

Mediante la simulación del flujo de barbotina y un estudio experimental en un circuito de pruebas se demostró la validez de los parámetros obtenidos de la caracterización reológica. En este estudio se analizó la caída de presión del fluido conforme recorre la tubería, en donde se puede afirmar que las pérdidas por fricción es el factor más influyente en la caída de presión. Este factor de fricción depende del parámetro adimensional ø que a su vez depende de los valores de los parámetros reológicos de la barbotina.

Al comparar los resultados de la simulación con los del estudio experimental se tiene un error máximo del 10 %, por lo que se puede concluir que la efectividad de estos parámetros reológicos es aceptable para la predicción del comportamiento de la barbotina en un sistema de bombeo.

En base al análisis de condiciones de operación se puede afirmar que el nuevo diseño del sistema de distribución de barbotina permite transportar el fluido de manera más equitativa a cada uno de los puntos de llenado, garantizando que tanto caudal y presión se encuentren dentro de los rangos de trabajo permitidos y por lo tanto no exista un desabastecimiento de barbotina en algún punto de llenado que provocan cortes en el llenado de las piezas o desfase en el tiempo de fabricación.

También se puede concluir que para las condiciones de bombeo en la que se encuentra el fluido, este trabaja en flujo laminar debido a que el número de Reynolds en ningún punto

del circuito llega a sobrepasar el valor de los 2100. Por lo tanto, se garantiza tener un flujo laminar en cada uno de los puntos de llenado.

4.2. Trabajos futuros

Tras haber realizado el diseño del circuito de distribución de barbotina es necesario realizar un estudio de un modelado matemático con ecuaciones reológicas diferentes como de la Ley de Potencia y de Bingham, ya que su relación con el modelo de Herschel Bulkley son muy parecidas.

En el presente trabajo se realizó una simulación que fue comparada con pruebas experimentales para validar sus resultados. En trabajos futuros se puede realizar una simulación con la ayuda de programas de simulación 3D como es el módulo CFD de ANSYS.

En el área de la caracterización reológica de la barbotina se puede realizar ensayos oscilatorios en un reómetro para conocer más a fondo de la viscoplasticidad de la barbotina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Burgos, A., Amores, R. (2014). Diseño, construcción y montaje de un sistema de bombeo móvil con capacidad de 1m3/min a fin de realizar pruebas hidrostáticas. Quito. Universidad de las Fuerzas Armadas.

[2]. Barnes, H.A. (2000). A Handbook of elementary rheology. University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics.

[3]. Barnes, H.A. (1999). The yield stress a review. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 81:133-177.

[4]. Barnes, H.A. (1997). Thixotropy a Review. J. Non-Newtonian Fluid Mech., 70:1-33.

[5]. FORMIC INDUSTRIES. «Bomba, Tuberías y válvulas» [En línea]. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168450/TFG_FormicIndustries_v04.pdf. [Accedido: 23 - may-2019]

[6]. Cáceres, J. (2016). Válvulas. [En línea]. Disponible en: http://josecasares.com/ category/actuadores/valvulas/. [Accedido: 25-may-2019].

[7]. Cando, E. (2012). Escoamento Permanente De Um Fluido Tixotrópico Através de Expansões–Contrações Abruptas Axissimétricas. (Maestría). Pontifícía Universidade Católica do Rio de Janeiro.

[8]. Carty, W. (2001). Rheology and Plasticity for ceramic processing. Westerville: American Ceramic Society

[9]. Chhabra, R., Richardson, J. (2008). Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications. 2nd edition.

[10]. Chango, P. (2015). Comportamiento reológico de la pasta de producción de la empresa EDESA S.A. (Ingeniería). Universidad Central del Ecuador.

[11]. Ciro, H. (2006). Reología de fluidos y su aplicación en el área de los alimentos. Colombia, Medellín.

[12]. Costa, J. (1993). Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor. España, Barcelona: Editorial Reverté.

[13]. Deshpande, A., Sunil, P. & Murali, J. (2010). Rheology of Complex Fluids. New York: Springer.

[14]. Dinger, D. R. (2010). Reología para ceramistas.

[15]. García, M. (2006). Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas. Colombia, Cartejena.

[16]. González, S. (2009). Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos.

[17]. Hackley, V. (2001). Guide to Rheological Nomenclature: Measurements in Ceramic Particulate systems. Washington: NIST.

[18]. Hodges, P. (2004). Hydraulic Fluids. New York: Elsevier Ltd.

[19]. Llumiquinga, J. (2012) Estudio de las viscosidades medias en tuberías de sistemas de distribución de fluidos no newtonianos tipo barbotina en la empresa FV para propósitos de aumento de la eficiencia en procesos de producción. (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional.

[20]. Macosko, C. (1994). Rheology: Principles, Measurements and Applications. Wiley VCH.

[21]. Malkin, A., Isayev, A. (2006). Rheology: Concepts, Methods, & Applications. Canada, Toronto: ChemTec Publishing.

[22]. Malkin, A. (1994). Rheology Fundamentals. Canada, Toronto: ChemTec Publishing.

[23]. Martín, I. Salcedo, R. Font, R. (2011). Mecánica de fluidos: Tema 1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles. España.

[24]. Moreno, R. (2005). Reología de suspensiones cerámica. España, Madrid

[25]. Moreno, E. (2014). Elementos finitos mixtos estabilizados para fluidos viscoelásticos.

[26]. Mott, R. (1996). Mecánica de Fluidos Aplicada. Prentice Hall Hispanoamericana.

[27]. Salinas, J. L. (2000). Viscoelasticidad dinámica de las barbotinas cerámicas. México, Nuevo León.

[28]. Steffe, J. (1996). Rheological Methods Food Process Engineering. USA.

[29]. Ramírez, J. S. (2006). Introducción a la Reología de los Alimentos. Colombia, Cali.

[30]. Revista Iberoamericana de Polímeros. (2002). Glosario de terminología reológica.

[31]. Salcedo, R. Martín, I. (2011). Mecánica de fluidos. Tema 1: Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles. Estados Unidos. California.

[32]. Tanner, R., Walters, K. (1998). Rheology: An Historical Perspective. The Netherlands, Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE B.V.

[33]. «YAMADA high pressure flyer HP0714» [En línea]. Disponible en: https://www.yamadapump.com/assets/literature/specialty_pumps/YAMADA_2to1_HighPressure_Flyer_HP0714.pdf [Accedido: 28-may-2019]

[34]. «Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable» (2005). [En línea]. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/023_Diseno_estaciones_bombeo/Dise%C3%B1o%20estaci%C3%B3n%20de%20bombeo.pdf. [Accedido: 14-abr-2019]

[35]. Puche, J. (2005). Guía práctica para la simulación de procesos industriales. España, Murcia. CETEM.

[36]. Masoliver, G., Pérez, M., López, A. (2017). Modelo experimental para estimar la viscosidad de fluidos no newtonianos: ajuste a expresiones matemáticas convencionales. España, Valencia.

[37]. Méndez, A., Pérez, L., Paniagua, A., (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette).

[38]. Grupo REDHISHP, (2017). Manual de Usuario EPANET 2.0 en español. Universidad de Valencia. España, Valencia.

ANEXOS

ANEXO I. DESCRIPCIÓN DE LA BARBOTINA

I.1. Influencia de parámetros en la preparación de barbotina

El comportamiento de la barbotina depende de diferentes variables, y cada uno de ellos requiere de un análisis minucioso. De forma general existen varios factores fisicoquímicos que afectan la reología de las arcillas, de las cuales se puede mencionar.

- Factores que alteran el potencial zeta y en particular el intercambio iónico.
- El área de superficie de contacto entre sólido y líquido, el cual depende de la granulometría de la arcilla.
- La presencia de sales solubles, en especial en sulfatos y sales de calcio.

Estos factores pueden ser controlados, por ejemplo, seleccionando el tipo de arcilla adecuado al proceso, modificando los porcentajes de arcillas, agregando defloculantes, controlando molienda, etc.

I.2. Aspectos para una buena reología

Para obtener una buena reología en la barbotina existen varios aspectos importantes a tomar en cuenta:

- *Plasticidad.*

La plasticidad en los materiales permite moldear o dar forma a la pieza cerámica. Las arcillas tienen como característica principal su plasticidad y gran parte tiene que ver la cantidad de agua presente, ya que este permite a las partículas deslizarse una sobre otra. Cuanto más plástica es la arcilla más agua absorbe.

- *Resistencia en verde y durante la quema*

Durante la cocción la pasta utilizada en el moldeo presenta una alteración en las propiedades, ya que el material adquiere una consistencia mucho más fuerte tomando la pieza una forma inalterable, aumentando así su dureza y resistencia mecánica. Esto se logra por la adición de calor al material produciendo internamente transformaciones fisicoquímicas en la estructura química y cristalina en la arcillas que forman la barbotina, adquiriendo una consistencia pétrea para conseguir la pieza cerámica.

- *Tamaño de partícula*

Conseguir el tamaño de partícula adecuada en una barbotina se realiza con el objetivo de tener una mezcla uniforme de los materiales sólidos que lo conforman, además que influye notablemente en la plasticidad y por tanto en la formación de la pieza cerámica. También

es importante el tamaño de partícula para aumentar la superficie específica, lo cual ayuda a mejorar la velocidad con la que se produce la transferencia de masa

- *Vitrificación*

La vitrificación es el método para más común para la cocción de cerámica, este proceso ayuda a reducir la porosidad durante la cocción de las piezas cerámicas. Durante la cocción se forma un vidrio viscoso que rodea las partículas refractarias y bajo las fuerzas de la tensión superficial dadas por los finos poros de la pieza, tiende acercar a las partículas aumentando la contracción y por lo tanto disminuye la porosidad.

- *Química adicional*

Este aspecto se relaciona principalmente con el uso de floculantes y defloculantes para el control de propiedades que permiten la estabilidad de una suspensión de arcilla. Cabe mencionar que el uso de defloculantes afecta a los moldes, por lo que es importante adicionar lo estrictamente necesario para neutralizar los cationes que dañan el proceso de defloculación. Un método que permite adicionar la cantidad adecuada es la construcción de una curva de defloculación.

Entre los defloculantes más utilizados en el proceso son el silicato de sodio, el carbonato de sodio, el carbonato de bario y el agua. El yeso es de los floculantes más comunes.

ANEXO II. MODELADO MATEMÁTICO PARA EL CIRCUITO DE PRUEBAS.

Para el modelado matemático del sistema se estable el balance de energía descrita en la Ecuación 2.11. Así se tiene

$$\left(\frac{V_2^2}{\alpha_2} - \frac{V_1^2}{\alpha_1}\right) + g * (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum Ef + W = 0$$

En donde el punto 1 se encuentra en el manómetro M1, mientras que el punto 2 varía con respecto a la trayectoria que sigue el circuito.

La velocidad en el circuito se mantiene constate porque, como se había establecido, el caudal es constante y el diámetro de la tubería no cambia. Por lo tanto

$$\left(\frac{V_2^2}{\alpha_2} - \frac{V_1^2}{\alpha_1}\right) = 0$$

La cota de referencia z es la misma para todo el circuito, ya que la altura no cambia. Se debe tomar en cuenta que la bomba no se encuentra dentro de la trayectoria de análisis en el circuito de pruebas. Por lo tanto, se tiene

$$g * (z_2 - z_1) = 0$$

$$W = 0$$

Luego de tomar las consideraciones mencionadas, y que el término de pérdidas por energía de fricción se define por la ecuación (1.59), el balance de energía para el sistema se tiene de la siguiente manera

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \sum \frac{2fv^2L}{D} + \sum \frac{kv^2}{2}$$

Donde k es el coeficiente de pérdida de accesorios, ρ es la densidad del fluido, L es la longitud de la tubería (m), D es el diámetro de la tubería (m), v es la velocidad del fluido en el circuito (m^2/s), P es la presión (Pa) y f es el factor de Fanning dada por la Ecuación 2.14.

$$f = \frac{2\tau_w}{\rho \bar{v}^2}$$

Donde τ_w es el esfuerzo cortante en la pared de la tubería. Este valor se obtiene de la relación dispuesta en la Ecuación 2.12.

$$\phi = \frac{\tau_0}{\tau_w}$$

Donde τ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa) y ϕ es un parámetro adimensional. Para determinar el valor ϕ se debe iterar la Ecuación 2.9.

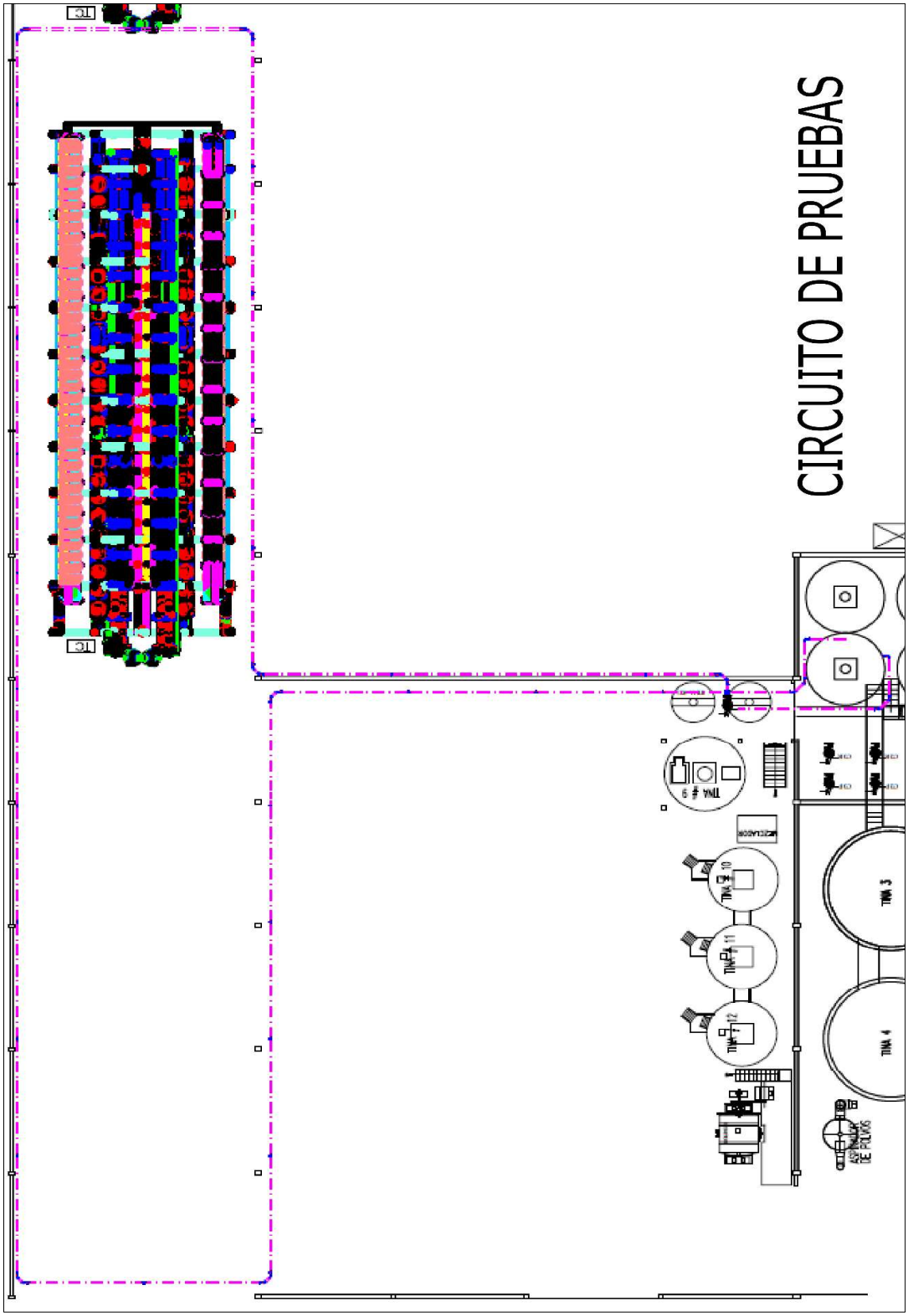
$$V = nR\left(\frac{\tau_o}{\emptyset K}\right)^{\frac{1}{n}}(1-\emptyset)^{\frac{n+1}{n}}\left\{\frac{(1-\emptyset)^2}{3n+1}+\frac{2\emptyset(1-\emptyset)}{2n+1}+\frac{\emptyset^2}{n+1}\right\}$$

Se reemplaza las expresiones de factor de fricción y esfuerzo cortante en la pared en el balance de energía del sistema. Con el objetivo de calcular la caída de presión a lo largo del circuito de pruebas, el modelo matemático descrito para el sistema queda de la siguiente manera.

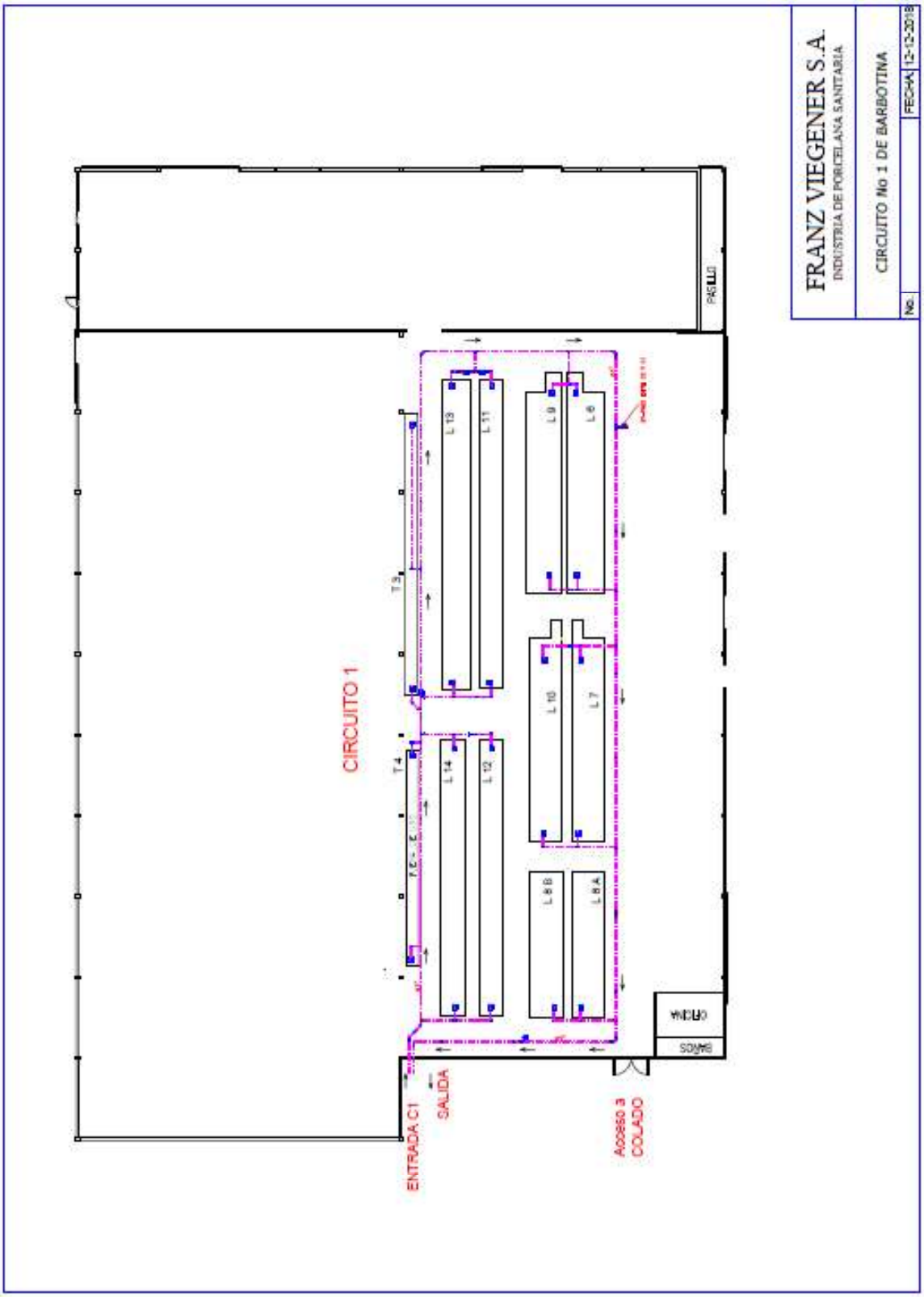
$$\Delta P = \sum \frac{4\,\tau_0 L}{\phi\, D} + \sum \frac{k\rho v^2}{2}$$

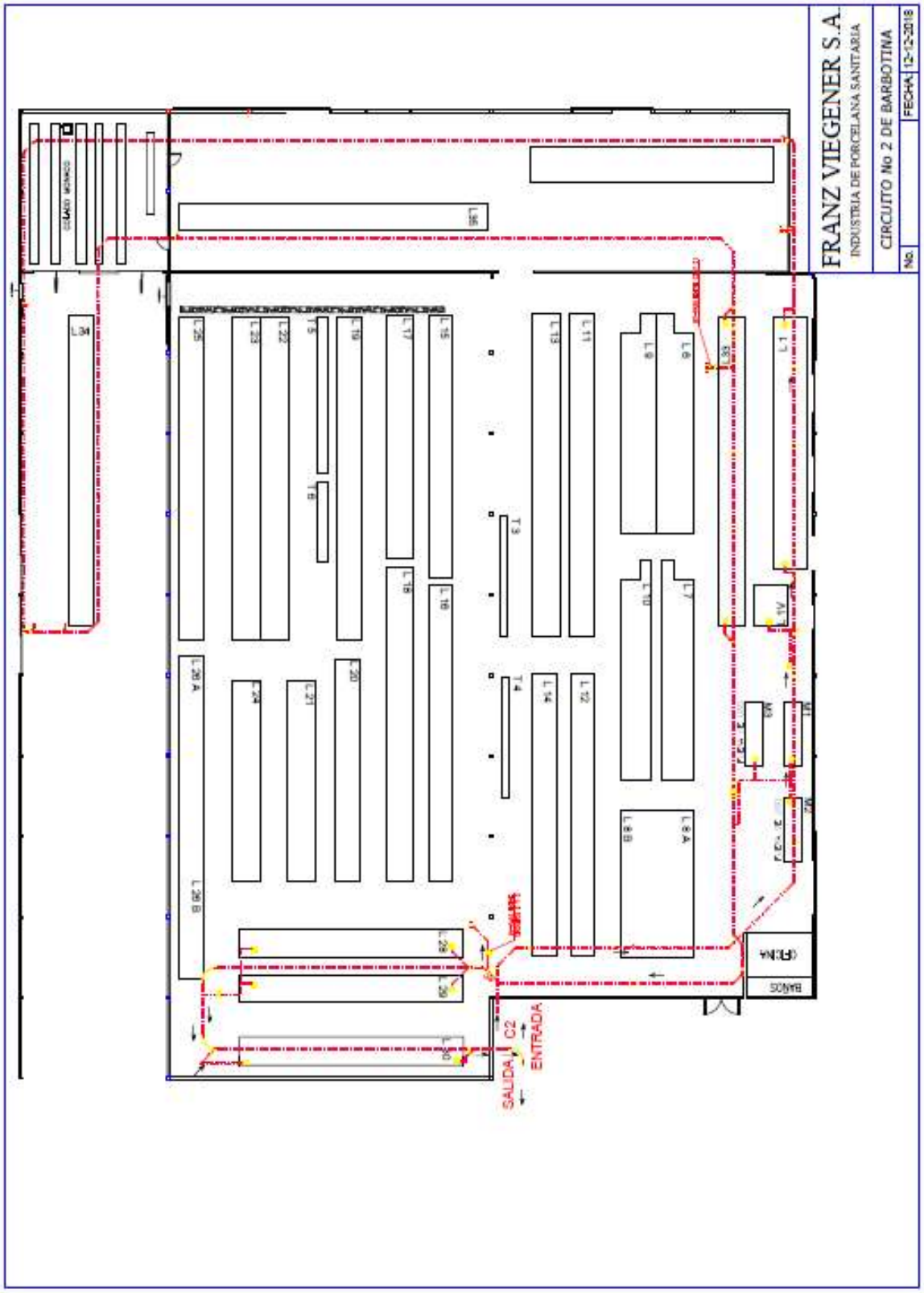
La simulación del sistema permite predecir las caídas de presión que tiene el flujo de la barbotina a través del circuito de prueba. Para ello se debe evaluar el modelo matemático conforme el flujo avance a lo largo de la trayectoria del circuito

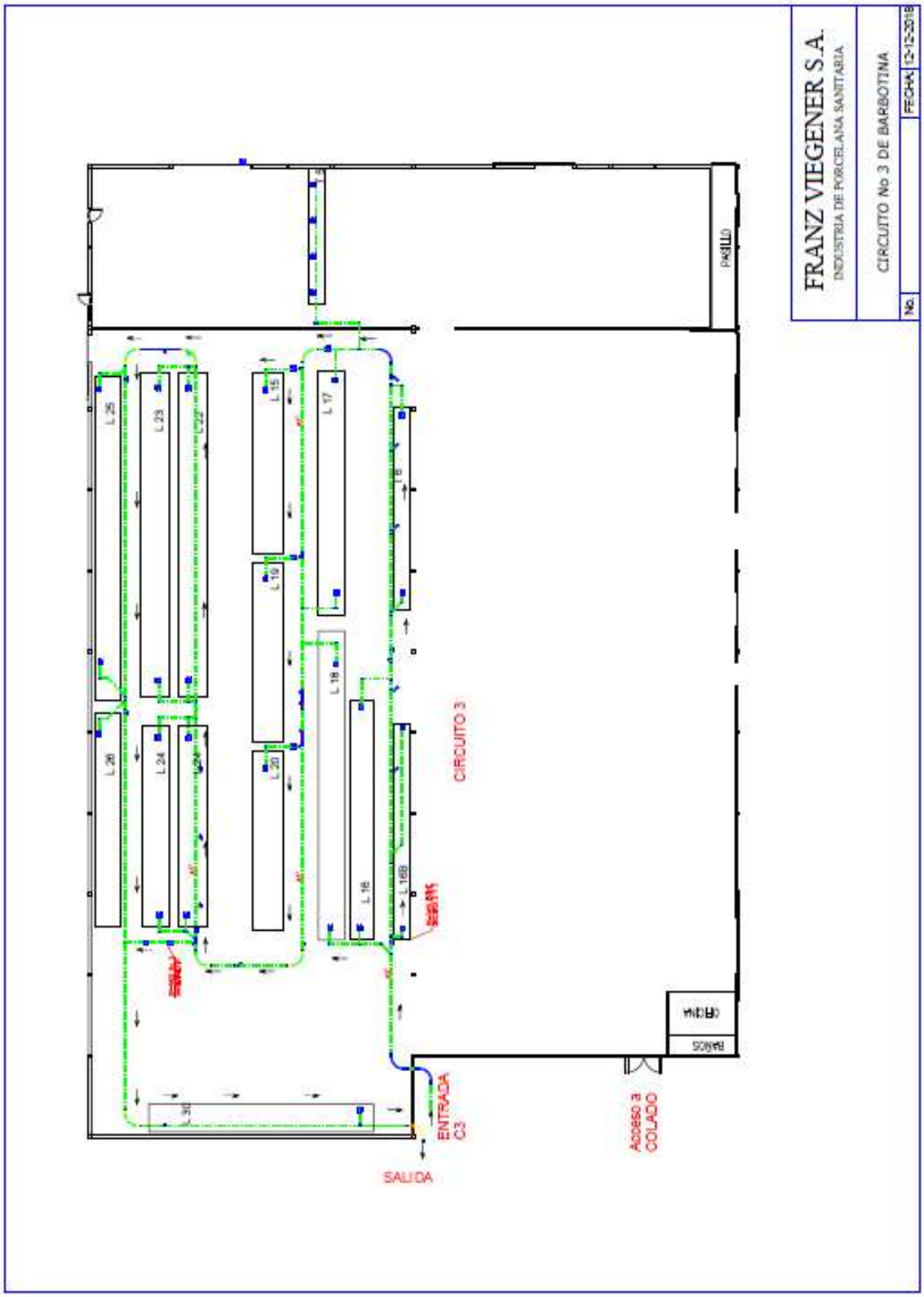
ANEXO III. PLANO DEL CIRCUITO DE PRUEBAS



ANEXO IV. PLANOS DE CIRCUITOS ACTUALES DE DISTRIBUCIÓN DE BARBOTINA




FRANZ VIEGENER S.A.
INDUSTRIA DE PORCELANA SANITARIA
CIRCUITO No 2 DE BARBOTINA
FECHA 12-12-2016
No.
SALIDA
C2
ENTRADA
BAÑOS
COCINA


FRANZ VIEGENER S.A.
INDUSTRIA DE PORCELANA SANITARIA
CIRCUITO No 3 DE BARBOTINA
No.
FECHA 12-12-2018
PASILLO
L 25
L 23
L 22
L 15
L 17
L 8
L 10
L 18
L 26
L 24
L 21
L 20
L 16
L 16B
CIRCUITO 3
BAÑOS
ORDEN
L 30
ENTRADA C3
SALIDA
Acceso a COLADO

ANEXO V. ANÁLISIS DEL ÁREA ACTUAL DE COLADO

V.1. Distribución de líneas por circuitos

El área de colado cuenta con 35 líneas de llenado distribuidas de tal forma como se observa en la Figura 4.1.

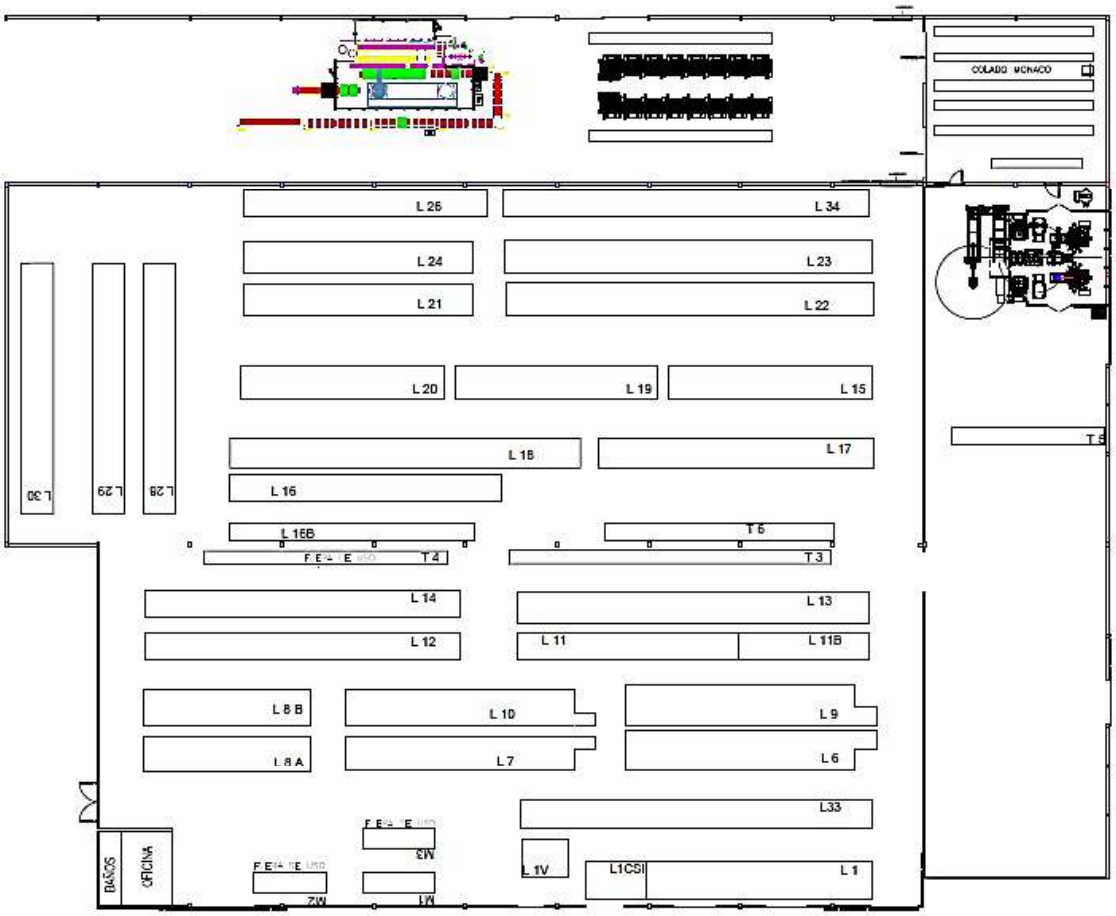


Figura 4.1. Líneas de llenado en el área de colado.
(Fuente: Propia)

Cada circuito de bombeo abastece a un número determinado de líneas de colado. En la Tabla 4.1 se presenta las líneas abastecidas por cada circuito y la cantidad de piezas por cada línea

Como un método de análisis se realizó la medida del volumen necesario para el llenado de cada línea, en la cual se debe considerar el llenado del embudo, de toda la tubería y del volumen que entra en cada molde que compone la línea. En la Tabla 4.2 se detalla el volumen que entra en cada línea de colado. En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se detalla el volumen total que entra en cada línea correspondientes al circuito 1, circuito 2 y circuito3 respectivamente.

Tabla 4.1. Distribución de líneas y cantidad de piezas por circuitos.

CIRCUITO 1			CIRCUITO 2			CIRCUITO 3		
LINEA	MODELO	CANTIDAD	LINEA	MODELO	CANTIDAD	LINEA	MODELO	CANTIDAD
L14	IFZ	30	L1 VERTICAL	VGR	4	L16	IGR	20
L12	VVL	9		VGR-A	4		BPY	1
	VBL	12	L1	VBH-1	4		IQL	2
	VOT	2		VGC	1	L16B	IGR	20
	VST	14		VAL	1		BPY	1
	VSTR	2		CSI	8		IQL	2
T3A	TMPA	29	L33	LRM	3	T6	TOPM	14
T3B	TMPB	49		LEO	3		TRMT	30
L13	LAV	1		LME	10		TGR	2
	LVA	2		LER	11		TOT	1
	LVZ	2		LRO	3		TNA	4
	LAQ	4		LDI	4	L17	CVZ	3
	LBR	15		LAU	7		CBR	28
	LSI	29		LAN	3		CFA	1
L11	VCC	2	L28	IFZ	30		CVA	8
	LMS	2	L29	IFZ	30	L18	OPI	25
	LAL	22	L30	IFZ	30	T5	TNA	20
	VSL	5	L36	OPM	10		TGE	19
	VGY	2	L37	OPM	10		TGR	6
L11B	LAX	10	M1	ACCESORIO	300		TVI	1
L9	VAM	12				L15	OPM	15
	VVL	3				L19	OPM	15
	VPT	15				L20	OPM	15
L6	VAN 2	2				L21	IFZ	28
	VAN 3	3					AIG	2
	VMZ 1	15				L24	IFZ	30
	VMZ 8	15				L22	IFZ	30
L7	IGE	13				L23	IFZ	30
	IQE	10				L26	TBL	8
	IVI	1					JPL	11
L10	INA	23					PCL	6
	IGPT	1					P1 L	2
L8A	DNA	22					JML	9
	DVI	1					PRL	9
	DMP	1				L34	UQM	20
L8B	DMP	2					UQP	8
	DGE	14					ULB	0
	DGR	8						

Tabla 4.2. Volumen requerido por cada línea.

CIRCUITO 1					CIRCUITO 2					CIRCUITO 3				
LINEA	VOLUMEN [L]				LINEA	VOLUMEN [L]				LINEA	VOLUMEN [L]			
	PIEZA	TUBERIA	EMBUDO	TOTAL		PIEZA	TUBERIA	EMBUDO	TOTAL		PIEZA	TUBERIA	EMBUDO	TOTAL
L14	475,152	420,823	217,838	1113,813	L1V	31,9510	55,9340	108,919	196,805	L16	190,433	368,538	217,838	776,809
L12	100,149	445,478	217,838	763,465	L1	47,2130	273,449	217,838	538,500	L16B	65,0010	164,072	217,838	446,911
T3	380,307	496,280	217,838	1094,425	L33	164,500	380,760	217,838	763,098	T6	348,219	321,714	217,838	887,772
L13	511,396	548,877	217,838	1278,111	L28	475,152	413,320	217,838	1106,310	L17	227,259	395,082	217,838	840,179
L11	157,882	529,304	217,838	905,025	L29	475,152	414,436	217,838	1107,426	L18	382,091	420,456	217,838	1020,385
L9	55,4660	372,607	217,838	645,912	L30	475,152	419,408	217,838	1112,398	T5	87,3510	45,8060	000,000	133,157
L6	215,987	368,845	217,838	802,669	L36	157,190	99,4300	108,919	365,538	L15	249,763	258,602	108,919	617,284
L7	359,231	392,730	217,838	969,799	L37	157,190	99,2670	108,919	365,376	L19	249,763	258,602	108,919	617,284
L10	295,325	396,601	217,838	909,764						L20	249,763	258,602	108,919	617,284
L8A	139,809	233,296	108,919	482,023						L21	334,303	316,485	217,838	868,627
L8B	143,416	231,646	108,919	483,981						L24	337,461	409,292	217,838	964,591
										L22	337,461	409,141	217,838	964,440
										L23	337,461	409,851	217,838	965,150
										L26	391,246	169,891	108,919	670,056
										L34	142,043	477,415	217,838	837,296

CIRCUITO 1	
LINEA	V. TOTAL (L)
L14	1113,81
L12	763,47
T3	1094,42
L13	1278,11
L11	905,02
L9	645,91
L6	802,67
L7	969,80
L10	909,76
L8A	482,02
L8B	483,98

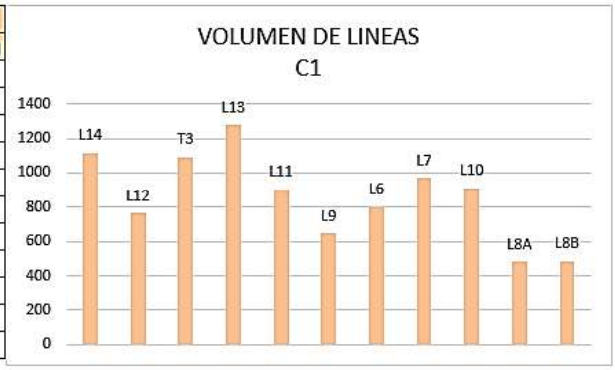


Figura 4.2. Volumen requerido por cada línea del circuito 1 actual.
(Fuente: Propia)

CIRCUITO 2	
LINEA	V. TOTAL (L)
L1V	196,80
L1	538,50
L33	763,10
L28	1106,31
L29	1107,43
L30	1112,40
L36	365,54
L37	365,38

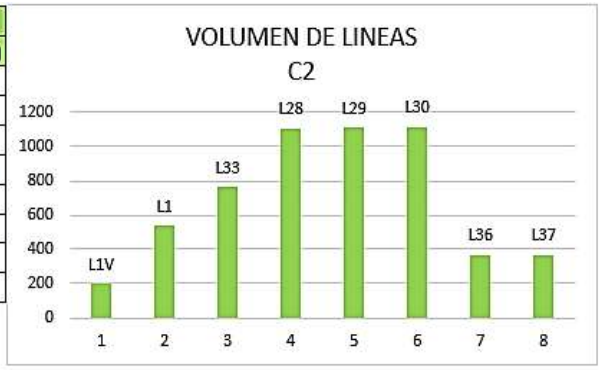


Figura 4.3. Volumen requerido por cada línea del circuito 2 actual.
(Fuente: Propia)

CIRCUITO 3	
LINEA	V. TOTAL (L)
L16	776,81
L16B	446,91
T6	887,77
L17	840,18
L18	1020,39
T5	133,16
L15	617,28
L19	617,28
L20	617,28
L21	868,63
L24	964,59
L22	964,44
L23	965,15
L26	670,06
L34	837,30

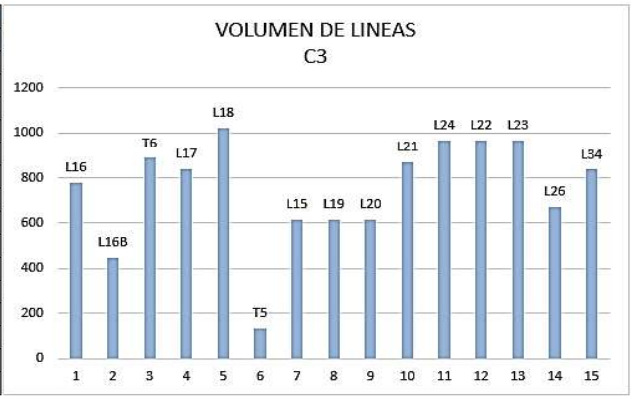


Figura 4.4. Volumen requerido por cada línea del circuito 3 actual.
(Fuente: Propia)

De los tres últimos gráficos se puede aseverar que el circuito 3 tiene mayor número de líneas de llenado con 15 líneas en total con un consumo de barbotina de 11227 litros. Luego de este viene el circuito 1 con 11 líneas de llenado con un consumo de 9449 litros de barbotina. Finalmente se tiene el circuito 2 con 8 líneas de llenado y un consumo de 5556 litros de barbotina.

También se realizó un análisis de los horarios de llenado de cada línea de llenado, esto con el objetivo de visualizar el volumen de barbotina consumido a lo largo del día. El llenado

de cada línea se lo realiza de forma simultánea desde las 3 am hasta las 4 pm. En la Figura 4.5 se observa una comparación del volumen consumido por cada circuito de bombeo dentro del horario de llenado. Cabe mencionar que para el llenado de cada una de las líneas se toma un tiempo aproximado de 15 min.

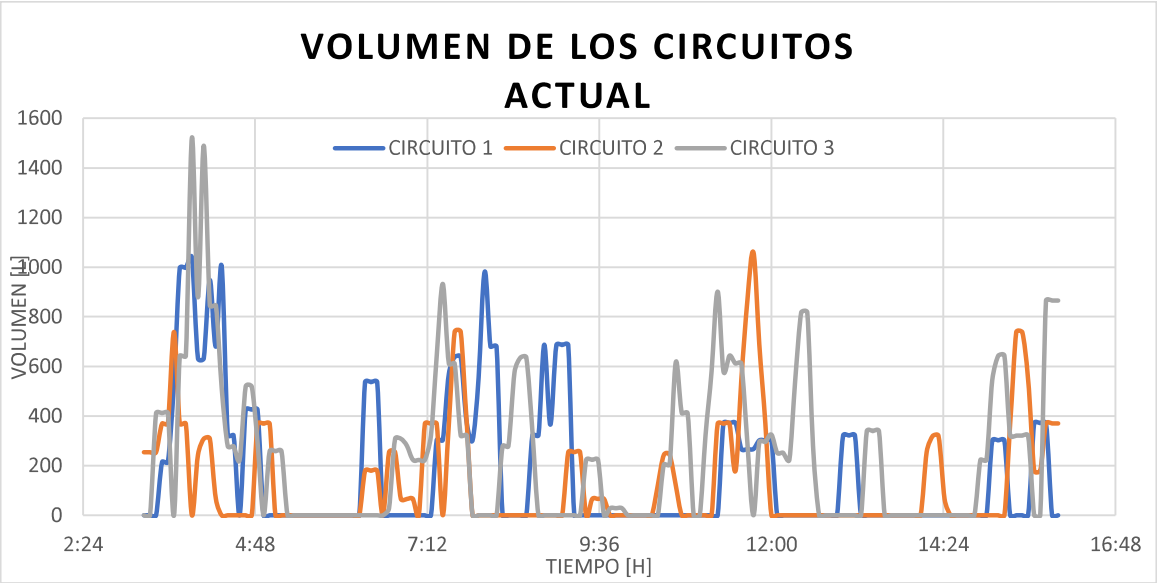


Figura 4.5. Consumo de volumen de barbotina en el horario de llenado de líneas de los tres circuitos actuales de bombeo.
(Fuente: Propia)

De la Figura 4.5 se puede concluir que el mayor consumo de barbotina se encuentra aproximadamente en el horario de 3 am hasta las 5 am, el cual coincide con el arranque de los circuitos. Además, se observa que el circuito con más consumo en ese horario es el circuito 3 llegando a consumir aproximadamente 1522 litros, luego viene el circuito 1 con un consumo de 1039 litros y por último el circuito 2 con un consumo de 734 litros.

V.2. Diseño del sistema

Una vez realizado el análisis de la situación actual del área de colado, como es la distribución de las líneas de llenado en la sección, el número de líneas de moldes de yeso, el volumen requerido por cada línea y el consumo de volumen de barbotina durante el horario de llenado, se toman en consideración todos estos aspectos para realizar una nueva redistribución de las líneas para cada circuito y la propuesta final del diseño para el sistema de bombeo.

Al analizar la situación actual de las líneas de colado se puede concluir que la distribución de líneas no es la más correcta, ya que no existe una repartición uniforme de las líneas para cada circuito, por lo tanto, se propone hacer una nueva distribución tomando en cuenta que el volumen de consumo y horario de llenado de cada circuito sea lo más

equitativo posible, y también la longitud del circuito sea lo más corta posible y sin muchos cambios de dirección con el fin de evitar pérdidas de energía en la tubería y accesorios.

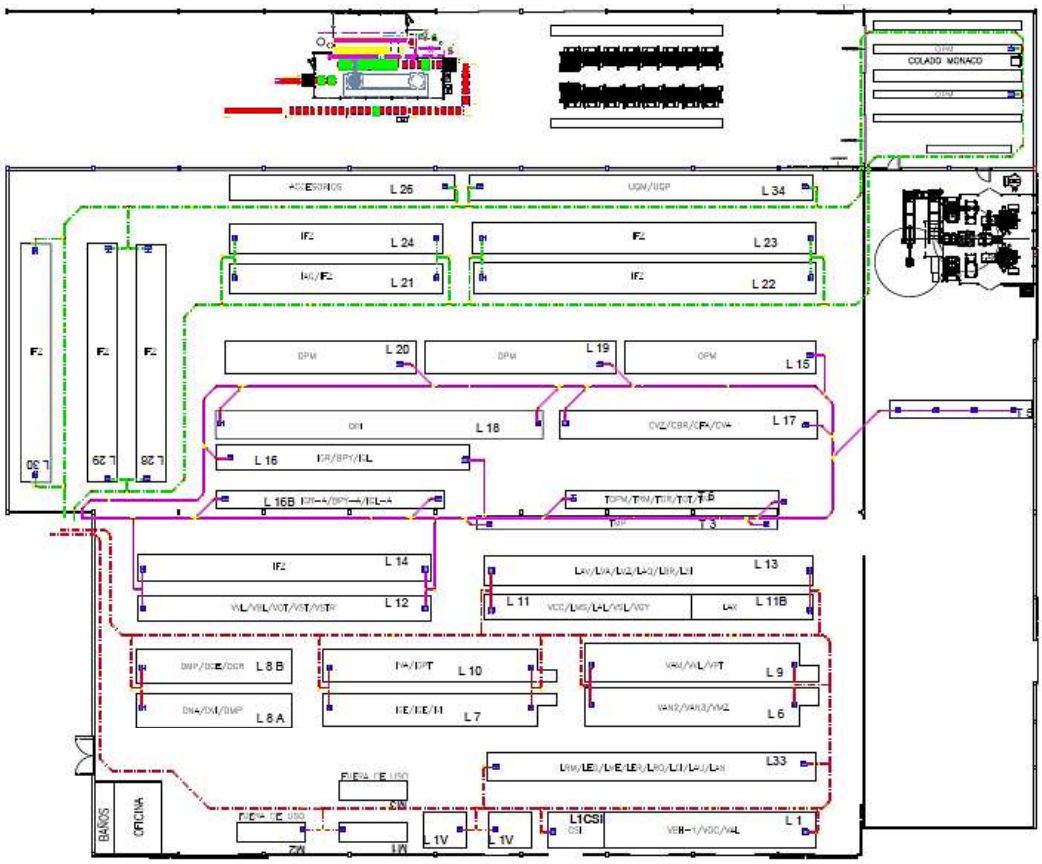


Figura 4.6. Nueva propuesta de distribución de circuitos para el área de colado.
(Fuente: Propia)

Con la nueva propuesta se tiene una mejor distribución del número de líneas por circuito, y así también el volumen requerido se reparte de forma más equitativa. En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se indica el volumen requerido por línea y las líneas correspondientes al circuito 1, circuito 2 y circuito 3 respectivamente.

CIRCUITO 1	
LINEA	V. TOTAL (L)
L1V	196,80
L1	538,50
L33	763,10
L9	649,90
L6	802,70
L11	905,10
L13	1278,10
L7	969,80
L10	909,76
L8A	482,02
L8B	483,98

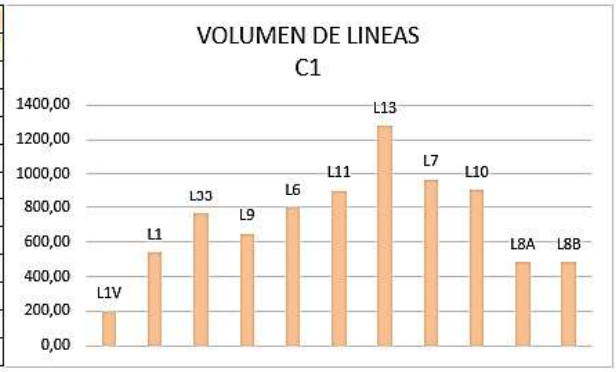


Figura 4.7. Volumen requerido por cada línea del circuito 1 propuesto.
(Fuente: Propia)

CIRCUITO 2	
LINEA	V. TOTAL (L)
L14	1113,80
L12	763,50
L16B	446,90
T3	1094,40
T6	887,80
T5	133,16
L17	840,20
L15	617,30
L19	617,30
L20	617,30
L18	1020,40
L16	776,80

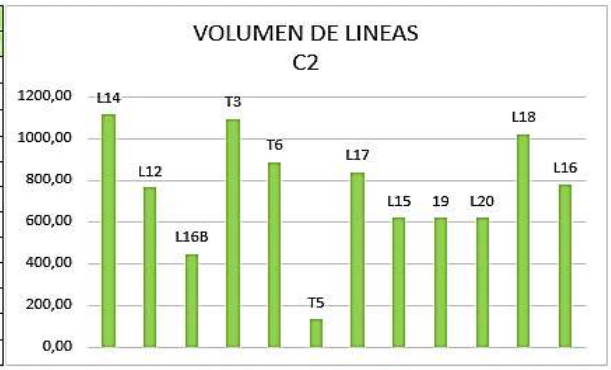


Figura 4.8. Volumen requerido por cada línea del circuito 2 propuesto.
(Fuente: Propia)

CIRCUITO 3	
LINEA	V. TOTAL (L)
L28	1106,30
L29	1107,40
L21	868,60
L24	964,60
L22	964,40
L23	965,20
L36	365,50
L37	365,40
L34	837,30
L26	670,10
L30	1112,40

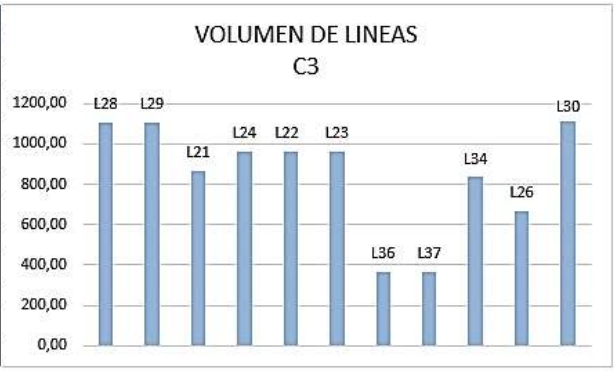


Figura 4.9. Volumen requerido por cada línea del circuito 3 propuesto.
(Fuente: Propia)

Como se indica en las gráficas anteriores, el circuito 1 tiene 11 líneas y un volumen total requerido de 7979,77 litros, el circuito 2 cuenta con 12 líneas y requiere un volumen de 8928,86 litros, finalmente el circuito 3 tiene 11 líneas y con un volumen requerido de 9327,20 litros de barbotina.

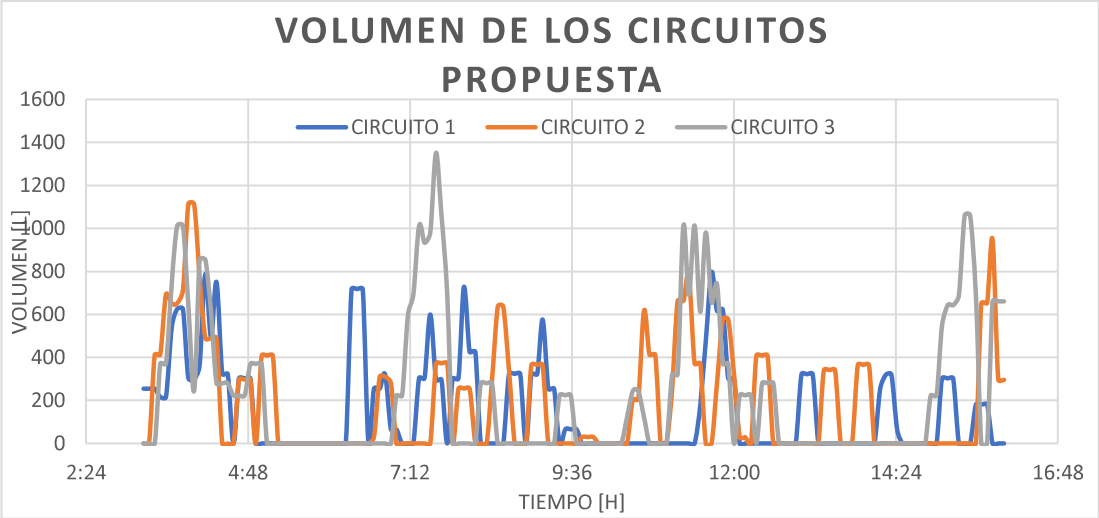


Figura 4.10. Consumo de volumen de barbotina en el horario de llenado de líneas de los tres circuito propuestos de bombeo.
(Fuente: Propia)

V.3. Circuito de bombeo

Luego de haber definido la trayectoria del circuito 2, así como de cada una de las salidas a los puntos de alimentación. Se realiza un esquema en 3D del circuito como se observa en las figuras 4.11 – 4.14.

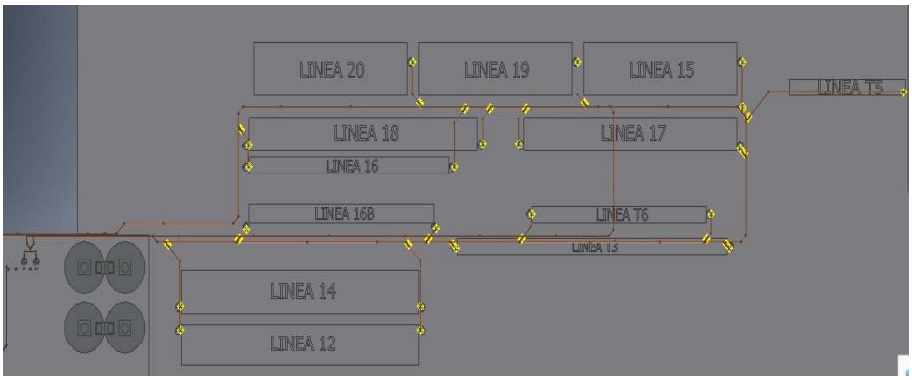


Figura 4.11. Vista de planta del circuito 2 propuesto.
(Fuente: Propia)

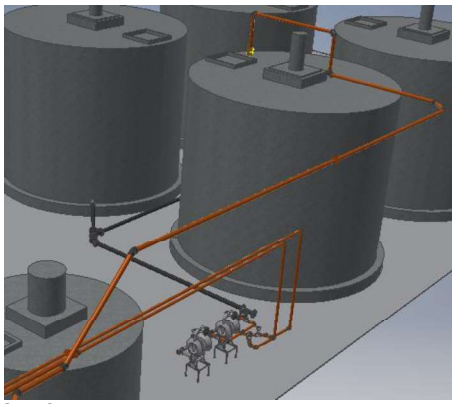


Figura 4.12. Configuración de bombas para el circuito 2 propuesto.
(Fuente: Propia)

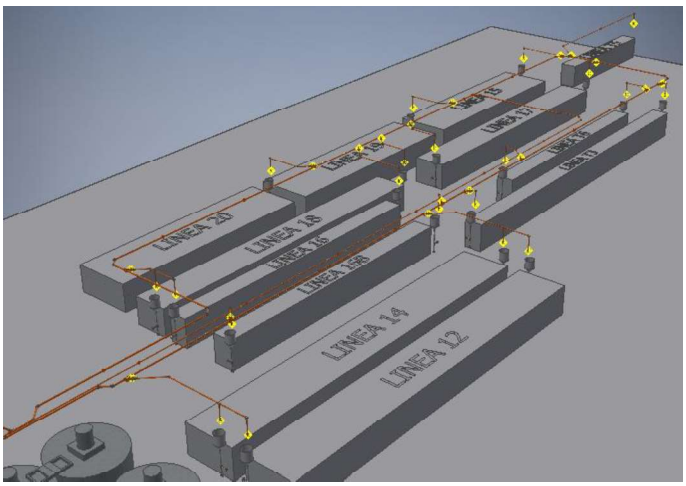


Figura 4.13. Vista lateral izquierda del circuito 2 propuesto.
(Fuente: Propia)

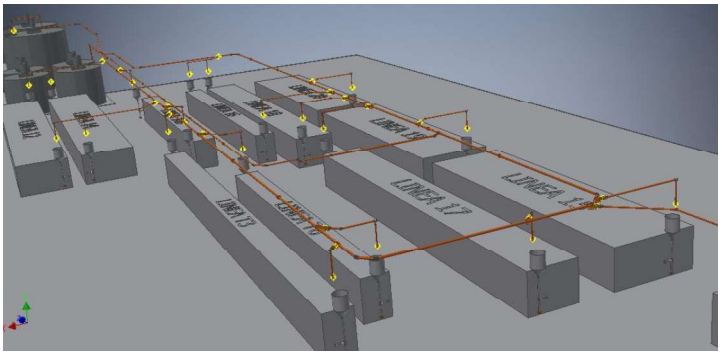


Figura 4.14. Vista lateral derecha del circuito 2 propuesto.
(Fuente: Propia)

Son varios los elementos que componen el sistema de bombeo, entre ellos se tiene la tubería, bombas y los accesorios como son codos, válvulas, etc.

Tubería: para la construcción de los circuitos en el área de colado se utiliza una tubería de hierro galvanizado ASTM. Este material se obtiene el proceso de templado de acero lo cual permite obtener gran resistencia a impactos y ductibilidad. Además, el galvanizado le da al material una protección contra la corrosión. Este material tiene gran aplicación para conducción de fluidos calientes y fríos, por su resistencia mecánica, también se usa en instalaciones a la intemperie.

Válvulas: elemento encargado de regular el paso del fluido de proceso por la tubería, permitiendo la circulación. Existe varios tipos de válvulas, entre ellos se tiene

- *Válvula de bola:* consta de un elemento esférico, perforado que permite o no la circulación en función de su posición. Se usa en entradas y salidas de equipos con diámetro de tubería inferior a 3 in, también dentro del control de proceso como sistemas de abertura o cierre total.
- *Válvula de globo:* consta de un obturador con forma de disco. Tiene un buen control del estrangulamiento lo que permite una regulación lineal de caudal. Cabe mencionar que esta válvula tiene una importante pérdida de carga.
- *Válvula de compuerta:* Este elemento se caracteriza por tener una compuerta que controla el paso del fluido. Cuando está completamente abierta no hay pérdidas de carga y tiene buena estanqueidad. Cuando se encuentra parcialmente abierta puede sufrir vibraciones. Es importante saber que no debe emplearse para la regulación o estrangulamiento.
- *Válvula de mariposa:* consiste en un disco que cubre la sección cuando el fluido circula de forma perpendicular a éste, pero se deja libre la sección cuando el fluido se encuentra paralela al disco.

- *Válvula de diafragma:* esta válvula cierra mediante una membrana, el cual aísla el fluido del mecanismo. Apta para líquidos con sólidos en suspensión porque evitan la contaminación con el exterior. Se usa para bajas presiones con fluidos corrosivos u obstruyentes.
- *Válvula de retención o check:* se utilizan para evitar el flujo en sentido contrario, por lo general se coloca después de cada bomba para evitar el retorno del fluido.

Bombas: elemento encargado de impulsar los fluidos, al mismo tiempo de superar la pérdida de carga que se van originando a lo largo del proceso. las bombas se dividen en dos grandes grupos.

- *Bombas de desplazamiento positivo:* se caracterizan por dar un caudal constante, ideales para fluidos de cualquier viscosidad, dan presiones de descarga elevadas. Estas se dividen en: alternativas (pistón, émbolo, diafragma) y rotatorias (engranes, lobulares, paletas, caracol y peristálticas).

  Las ventajas de la bomba es que son de bajo costo, medidas reducidas, dan caudal continuo, presión de descarga elevada, NPSH bajos. Por otro lado, sus desventajas son: necesidad de un buen ajuste de las piezas mecánicas, requieren de una válvula de seguridad a la salida.
- *Bombas cinéticas:* en estas bombas el fluido se va acelerando y está energía cinética que adquiere el fluido la convierte en presión de salida. Las más representativas de este grupo son las bombas centrífugas.

Las ventajas que tiene la bomba son: construcción sencilla, bajo costo, ocupan poco espacio, pueden bombear líquidos con sólidos en suspensión, ofrecen un caudal continuo, los valores de NPSH son intermedios y no presentan problemas de sobresaturación si se obturan. En cambio, sus desventajas son: la presión de descarga no es muy elevada si son de una sola etapa, tienen que ser cebadas antes de su funcionamiento, no son muy buenas cuando trabajan con pequeños caudales ni con fluidos viscosos

ANEXO VI RESULTADOS DE MEDICION DE LAS PROPIEDADES PRINCIPALES DE LA BARBOTINA.

Tabla 4.3. Resultados de medición de la propiedades de control de la barbotina.

MUESTRA		PROPIEDADES DE CONTROL DEL FLUIDO			
		DENSIDAD [g/cm3]	VISCOSIDAD [cP]	HUMEDAD [%]	PDH [g]
CARACTERIZACIÓN DE TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN	1	1,850	850	25,60	76,48
	2	1,848	830	25,77	78,50
	3	1,850	895	25,62	77,33
	4	1,849	845	25,68	77,21
	5	1,848	830	25,77	78,50
	6	1,850	895	25,62	77,33
	7	1,849	850	25,78	78,37
	8	1,849	850	25,78	76,33
	9	1,849	885	25,52	77,42
	10	1,849	850	25,78	78,37
	11	1,849	850	25,78	76,33
	12	1,849	885	25,52	77,42
	13	1,849	870	25,27	78,48
	14	1,849	850	25,78	76,49
	15	1,849	855	25,71	78,82
	16	1,849	870	25,27	78,48
	17	1,849	850	25,78	76,49
	18	1,849	855	25,71	78,82
CARACTERIZACIÓN CURVA DE FLUJO EN ESTADO	19	1,850	890	25,62	77,21
	20	1,849	850	25,65	77,41
	21	1,850	885	25,61	76,61
	22	1,850	855	25,75	77,61
	23	1,851	865	25,46	76,54
	24	1,850	845	24,62	75,50

(Fuente: Propia)

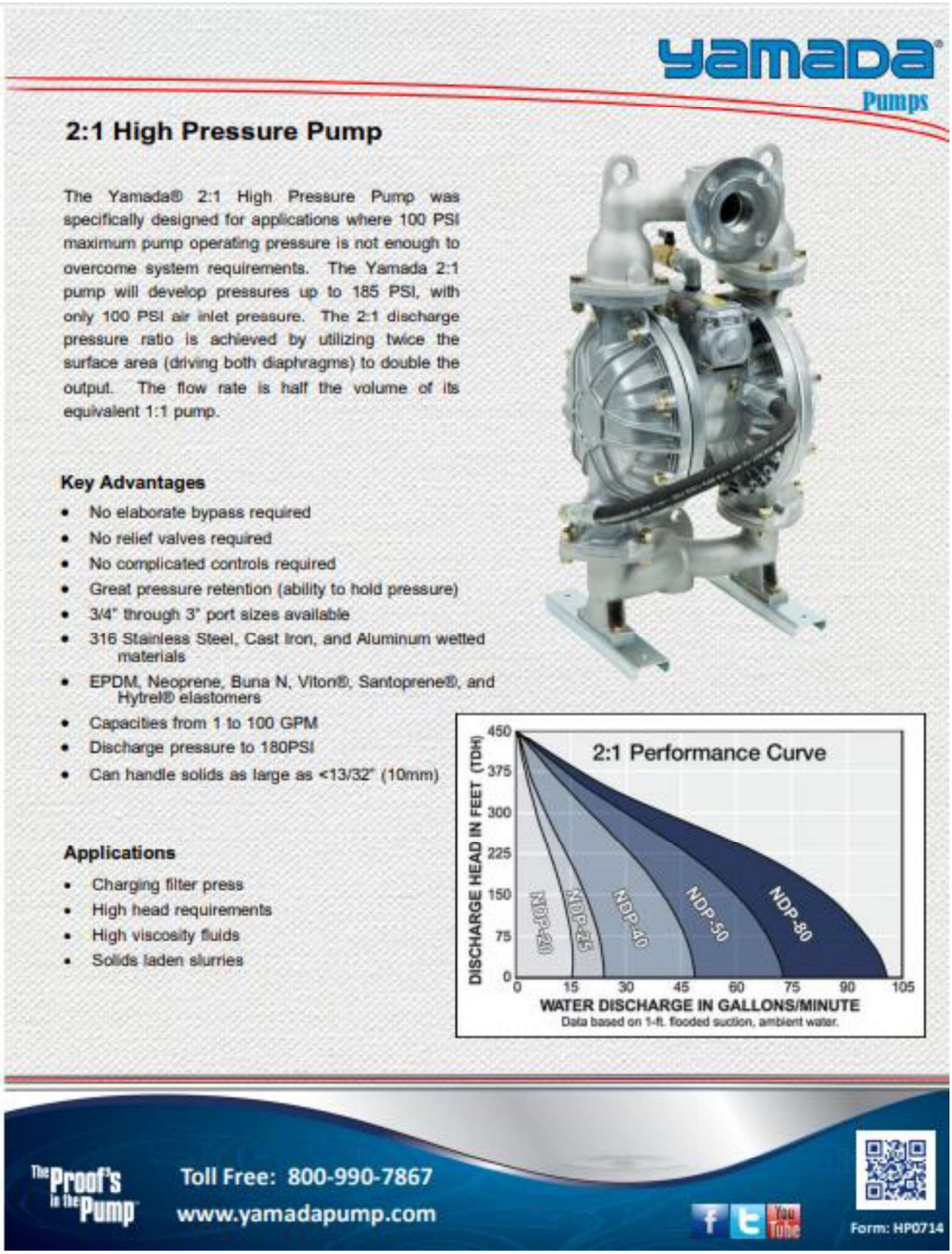
ANEXO VII. RESULTADOS DE MEDICIONES

Tabla 4.4. Datos obtenidos de las mediciones en el circuito piloto.

PRESIÓN DE LA BOMBA [psi]	NUM.	LONGITUD DE LA TUBERÍA [m]	CAUDAL [L/h]			PRESIÓN [psi]		
			Q in	Q out	ΔQ	P1	P2	ΔP
20	1	28,2	737,296	585,547	151,749	21,700	17,767	3,933
		68,2				21,700	12,000	9,700
		131,3				21,700	10,133	11,567
	2	28,1	638,297	475,540	162,757	20,300	14,600	5,700
		67,2				20,300	10,200	10,100
		128,2				20,300	8,267	12,033
	3	28,1	557,158	443,263	113,894	18,367	14,700	3,667
		67,2				18,367	11,200	7,167
		128,2				18,367	9,500	8,867
	4	28,1	580,167	418,727	161,440	19,467	15,800	3,667
		67,2				19,467	11,533	7,933
		128,2				19,467	9,900	9,567
40	1	28,1	1721,750	1537,400	184,350	30,600	25,567	5,033
		67,2				30,600	17,733	12,867
		128,2				30,600	12,667	17,933
	2	28,1	1769,013	1656,653	112,360	33,067	26,533	6,533
		67,2				33,067	21,167	11,900
		128,2				33,067	15,133	17,933
	3	28,1	1549,913	1535,893	14,019	34,267	27,167	7,100
		67,2				34,267	20,167	14,100
		128,2				34,267	15,167	19,100
	4	28,1	1676,844	1516,913	159,931	32,000	26,700	5,300
		67,2				32,000	22,133	9,867
		128,2				32,000	15,600	16,400
60	1	28,1	2605,216	2507,033	98,182	43,200	38,200	5,000
		67,2				43,200	25,100	18,100
		128,2				43,200	16,333	26,867
	2	28,1	2490,582	2348,553	142,029	43,400	36,000	7,400
		67,2				43,400	25,933	17,467
		128,2				43,400	16,933	26,467
	3	28,1	2633,464	2623,450	10,014	48,700	38,100	10,600
		67,2				48,700	30,467	18,233
		128,2				48,700	19,800	28,900
	4	28,1	2710,693	2710,380	0,313	49,300	42,633	6,667
		67,2				49,300	30,700	18,600
		128,2				49,300	20,600	28,700
80	1	28,1	3397,097	3352,450	44,647	54,867	47,867	7,000
		67,2				54,867	32,633	22,233
		128,2				54,867	19,200	35,667
	2	28,1	3486,253	3399,450	86,803	57,900	49,700	8,200
		67,2				57,900	35,533	22,367
		128,2				57,900	22,467	35,433
	3	28,1	3501,588	3385,753	115,835	58,700	49,433	9,267
		67,2				58,700	37,667	21,033
		128,2				58,700	23,233	35,467
	4	28,1	3346,891	3344,307	2,584	58,533	50,167	8,367
		67,2				58,533	38,567	19,967
		128,2				58,533	24,333	34,200

(Fuente: Propia)

ANEXO VIII. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BOMBA YAMADA NDP 50



yamada Pumps

2:1 High Pressure Pump

The Yamada® 2:1 High Pressure Pump was specifically designed for applications where 100 PSI maximum pump operating pressure is not enough to overcome system requirements. The Yamada 2:1 pump will develop pressures up to 185 PSI, with only 100 PSI air inlet pressure. The 2:1 discharge pressure ratio is achieved by utilizing twice the surface area (driving both diaphragms) to double the output. The flow rate is half the volume of its equivalent 1:1 pump.

Key Advantages

- No elaborate bypass required
- No relief valves required
- No complicated controls required
- Great pressure retention (ability to hold pressure)
- 3/4" through 3" port sizes available
- 316 Stainless Steel, Cast Iron, and Aluminum wetted materials
- EPDM, Neoprene, Buna N, Viton®, Santoprene®, and Hytrel® elastomers
- Capacities from 1 to 100 GPM
- Discharge pressure to 180PSI
- Can handle solids as large as <13/32" (10mm)

Applications

- Charging filter press
- High head requirements
- High viscosity fluids
- Solids laden slurries

The Proof's in the Pump
Toll Free: 800-990-7867
www.yamadapump.com
Form: HP0714

Figura 4.15. Especificaciones técnicas de la bomba de diafragma marca YAMADA.
(Fuente: [33])

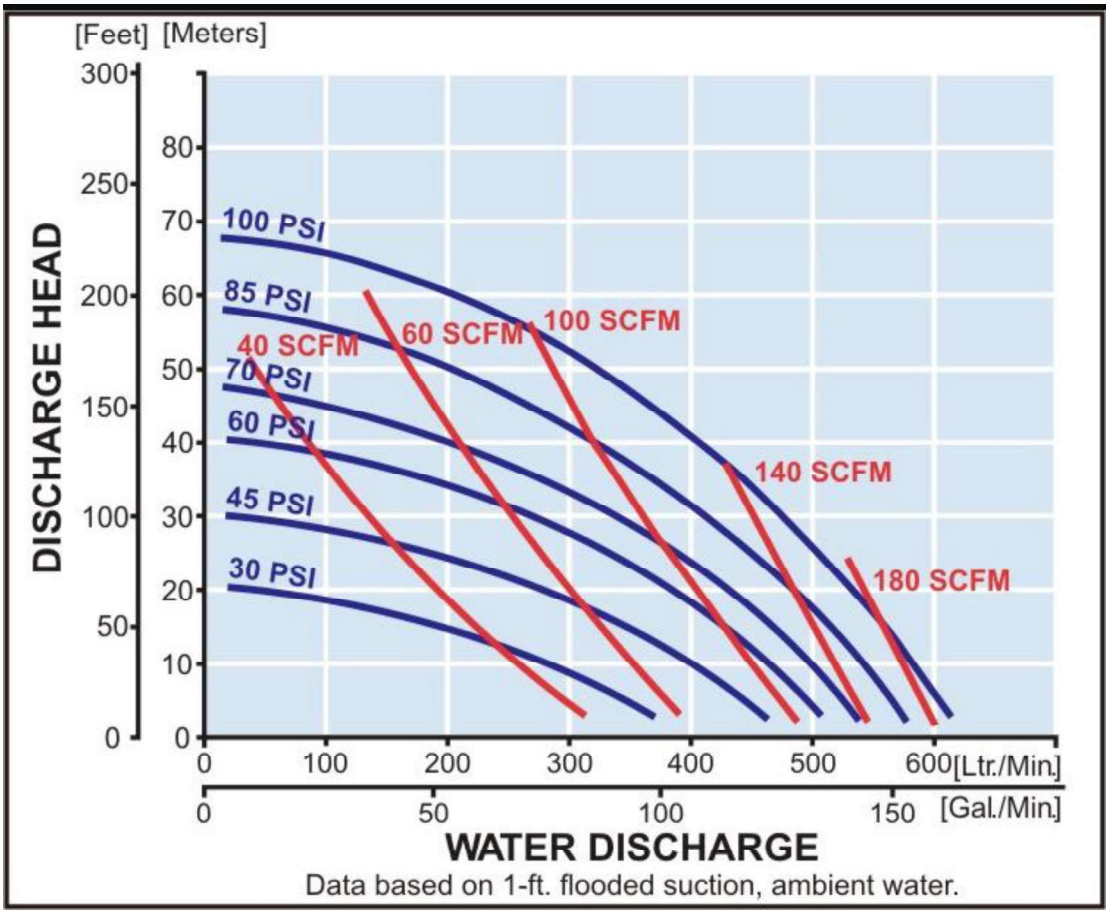


Figura 4.16. Curvas características de la bomba YAMADA NDP 50.
(Fuente: [33])