



**Implementación de mediciones que permitan tomar decisiones de manera predictiva en el proceso de fabricación de piezas cerámicas**

Brayan Alexis De Sousa Lora

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Químico

Asesores

Catalina Jiménez Sánchez, Magíster (MSc) en Ingeniería de Materiales

Felipe Bustamante Londoño, Doctor (PhD) en Ingeniería Química

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Química  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2022

<b>Cita</b>	(De Sousa Lora, 2022)
<b>Referencia</b>	De Sousa Lora, B. A. (2022). <i>Implementación de mediciones que permitan tomar decisiones de manera predictiva en el proceso de fabricación de piezas cerámicas</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla

**Jefe Departamento:** Lina María González Rodríguez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Tabla de contenido

Resumen .....	6
Abstract .....	7
Introducción .....	8
1. Objetivos .....	10
1.1 Objetivo general .....	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
3 Metodología .....	15
3.1. Revisión bibliográfica .....	15
3.2. Realización de ensayos para el análisis de distribución de tamaño de partículas en laboratorio con el <i>blend</i> de materias primas nacionales y pastas .....	15
3.3 Desarrollo de análisis de operación estándar (AOE) para el uso del Mariot .....	18
3.4 Realización de ensayos en laboratorio con las pastas de las diferentes tecnologías .....	18
3.5 Aplicación y repetición de ensayos a escala industrial para tecnologías de colaje.....	19
4 Resultados .....	20
4.1 Preparaciones para el análisis de distribución de tamaño de partículas con el <i>blend</i> de materias primas nacionales.....	20
4.1.1 Preparación del agente dispersante .....	20
4.1.2 Medición del blanco de la muestra .....	20
4.1.3 Medición de la suspensión para la DTP.....	21
4.2 Obtención del porcentaje relativo de gruesos, medios y finos, y determinación del rango óptimo de trabajo.....	24
4.3 Elaboración del análisis de operación estándar para el uso del viscosímetro Mariot .....	26
4.4 Ensayos y comportamiento en el laboratorio de las pastas frías provenientes de las diferentes tecnologías .....	28
4.5 Ensayos y comportamiento en Salones y Laboratorio de las pastas calientes provenientes de las tecnologías de colaje .....	38

5 Conclusiones .....45

Referencias .....47

Anexos.....48

## Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>DTP</b>	Distribución de tamaño de partícula
<b>PSD</b>	<i>Particle size distribution</i>
<b>BMC</b>	Banco de moldes colgados
<b>ALS PV</b>	Línea de alta presión estructural
<b>TCI/CDI</b>	Tecnología cerámica industrial / <i>Ceramic development industry</i> (diseño cerámico industrial)
<b>CBC</b>	<i>Capillary bench cast</i> (banco de colaje con capilaridad)
<b>AOE</b>	Análisis de operación estándar
<b>s</b>	Segundos
<b>°GS</b>	Grados de sobregiro
<b>mPa.s</b>	Milipascal segundo

## Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo implementar mediciones de las pastas cerámicas hechas en Planta, que permitan predecir a tiempo cambios en la distribución del tamaño de partícula (DTP) de suspensiones cerámicas a nivel de laboratorio haciendo uso del hidrómetro para el *blend* de materias primas nacionales. Para esto se valida el comportamiento reológico a través del Mariot, tanto en Laboratorio como en los Salones de Colaje, y así obtener una homologación entre las tres mediciones de viscosidad: Brookfield (mPa.s), Gallenkamp (°GS) y Mariot (s) para definir rangos de operación de las pastas en las diferentes tecnologías. La implementación del hidrómetro permitió establecer rangos de trabajo para los diferentes tamaños de partículas, en donde el rango para los finos se encuentra entre 36,38 - 38,82%, los medios entre 30,49 - 32,11% y los gruesos entre 30,25 - 31,75%. El Mariot permitió establecer rangos de trabajo para las pastas frías ( $\sim 12 \pm 0,2$  s) y calientes ( $\sim 12 \pm 0,31$  s en Salones y 0,14 segundos en Laboratorio) de las diferentes tecnologías con intervalos de trabajo reducidos, lo que refleja la confiabilidad del instrumento. Los intervalos de trabajo establecidos para el hidrómetro permitieron identificar que más del 65% de los datos se encuentran dentro de los límites, evidenciando así la eficacia del método. El tiempo del Mariot es alterado por cambios de la viscosidad, sin embargo, el DTP y otros factores inciden en el comportamiento. Los rangos establecidos representan un avance para iniciar su implementación y con esto lograr tomar acciones predictivas que garanticen el buen desempeño de las pastas.

*Palabras claves:* DTP, hidrómetro, Mariot, Brookfield, Gallenkamp, suspensiones cerámicas, rangos.

---

### Abstract

The objective of this project is to implement measurements of ceramic pastes made in the plant, that allow predicting over time the changes in: the particle size distribution (PSD) of ceramic suspensions at the laboratory level using the hydrometer for the mixture of domestic raw materials. Validate the rheological behavior through the Mariot, both in the laboratory and in the casting rooms, and thus obtain a homologation between the three viscosity measurements: Brookfield (mPa.s), Gallenkamp (°GS) y Mariot (s) to define ranges of performance of the pastes in the different technologies. The implementation of the hydrometer allowed establishing working ranges for the different particle sizes, where the range for fines is between 36.38 - 38.82%, medium between 30.49 - 32.11% and thick between 30.25 - 31.75%. The Mariot allowed to establish work ranges for cold ( $\sim 12 \pm 0.2$  seconds) and hot ( $\sim 12 \pm 0.31$  seconds in salons and 0.14 seconds in the laboratory) pastes of the different technologies with reduced working intervals, which reflects the reliability of the instrument. The working intervals established for the hydrometer made it possible to identify that more than 65% of the data are within the limits, thus evidencing the effectiveness of the method. Mariot time is altered by changes in viscosity, however, PSD and other factors affect the behavior; the established ranges represent an advance to start its implementation and with this, be able to take predictive actions that guarantee the good performance of the pastes.

*Keywords:* PSD, hydrometer, Mariot, Brookfield, Gallenkamp, ceramic suspensions, ranges.

---

## Introducción

Corona es una empresa multinacional colombiana con experiencia en el sector de manufactura y comercialización de productos para el hogar, la construcción, la industria, la agricultura y el sector de energía. Se encuentra compuesta por cuatro divisiones de negocios entre las cuales se encuentran: baños y cocinas; superficies, materiales y pinturas; insumos industriales y manejo de energía; y, por último, mesa servida. La división de baños y cocinas está dedicada al desarrollo y fabricación de productos que conforman soluciones integrales en el área, y cuenta con tres plantas de producción en Colombia: la planta de Girardota, la planta de Madrid y la planta de grifería en Funza.

Para la fabricación de sanitarios, lavamanos y lavaderos en la planta de Girardota - Antioquia, se tienen formulaciones de pastas que deben cumplir con ciertos requerimientos para tener un buen desempeño y que se acompañan de un ajuste reológico. Actualmente, la empresa se encuentra ejecutando un proyecto con el objetivo de hacer seguimiento a la distribución de tamaño de partículas (DTP) del *blend* (mezcla de materiales plásticos) de materias primas nacionales y pastas para poder establecer variaciones en los rangos de gruesos, medios y finos para garantizar estabilidad en el desempeño, que sea rápido en la obtención de resultados. Este análisis, que se está realizando en laboratorio externo a la Planta pero interno a la Organización, genera altos costos debido a que son estudios especializados y existe un retardo en el tiempo de respuesta que puede ocasionar deterioros en el desempeño de la pasta asociados a variaciones a la distribución de tamaño de partícula, ya que no se toman acciones predictivas.

Otra característica de suma importancia para garantizar el desempeño en colaje de las pastas cerámicas es la viscosidad o fluidez de la pasta, para la cual se emplean equipos muy delicados y costosos, que en la planta se usan con una frecuencia muy alta para lo que está recomendado y que dan cuenta de datos puntuales medidos en el laboratorio técnico. Buscando ser más asertivos y cercanos a los procesos de vaciado de piezas, la Empresa se encuentra ejecutando un proyecto de implementación de un equipo más simple para determinar de forma rápida y sencilla la viscosidad de las pastas en los Salones de Colaje midiendo el tiempo de flujo y realizando homologaciones entre los diversos viscosímetros. Esta implementación que se está



realizando se debe al retardo en el tiempo de respuesta debido a la fragilidad y pocos equipos que existen para la medición, además de una falta de sintonía entre los colaboradores y personal de laboratorio.

Por lo tanto, este proyecto tiene como objetivo implementar mediciones que den idea de la distribución del tamaño de partícula, su tendencia y cambios de las suspensiones cerámicas mediante ensayos a escala de laboratorio, además del comportamiento reológico a través del viscosímetro Mariot mediante ensayos de laboratorio y en salones de colaje.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Implementar mediciones que permitan visualizar la tendencia de la distribución del tamaño de partícula de suspensiones cerámicas a nivel de laboratorio y del comportamiento reológico a través del Mariot, tanto en el Laboratorio como en los Salones de Colaje.

### 1.2 Objetivos específicos

- Validar mediciones de distribución de tamaño de partículas a través de hidrómetro con los modelos ya definidos en el Laboratorio con el *blend* de materias primas nacionales.
- Obtener rangos definidos para los tamaños de partículas en estudio.
- Desarrollar un manual o guía para la metodología de uso del Mariot.
- Realizar ensayos de laboratorio con las pastas de los diferentes Salones de Colaje.
- Obtener una homologación entre las tres mediciones de viscosidad: Brookfield (mPa.s), Gallenkamp (°GS) y Mariot (s).
- Garantizar reproducibilidad y repetitividad para establecer rangos de operación en el Mariot.
- Aplicar la medición del Mariot por lo menos en dos Salones de Colaje.

## 2 Marco teórico

Un material cerámico es un sólido técnicamente procesado, no metálico, de naturaleza inorgánica, que incluye los minerales de arcillas, cementos y vidrios. Es de estructura policristalina constituido por aglomeración de granos por medio de un proceso de sinterización o cocción, el cual genera una transformación irreversible que le confiere a la cerámica propiedades como resistencia mecánica, resistencia al calor, alta dureza y resistencia al desgaste. (Organización Corona, 2014)

Las pastas cerámicas son mezclas de componentes específicamente seleccionados y formulados para satisfacer los requerimientos de un producto determinado y de su proceso de fabricación. La materia prima de las pastas está constituida por materiales plásticos (arcilla), materiales no plásticos (arenas), aditivos dispersantes y defloculantes, y agua. Existen diferentes métodos de caracterización de materias primas; entre los métodos físicos está la distribución de tamaño de partícula. (Organización Corona, 2014)

**Blend:** Es una mezcla de materiales arcillosos (plásticos).

**Colaje:** Es un proceso de formación de la pasta para la fabricación de una pieza cerámica. (Organización Corona, 2014)

**Agente dispersante o defloculante:** Durante el proceso de producción cerámica, la gravedad y las fuerzas electroestáticas hacen que las partículas en una suspensión cerámica tiendan a aglomerarse y a sedimentarse. El agente dispersante es una sustancia que previene la aglomeración de las partículas, esto es, estabiliza la suspensión modificando de manera óptima las fuerzas de repulsión que actúan entre las partículas. (ZSCHIMMER & SCHWARZ, 2021)

**Dispersión:** Se entiende como una mezcla homogénea de moléculas distintas. En ella aparecen una fase dispersante o disolvente y moléculas dispersas o solutos. En las dispersiones acuosas el agua constituye la fase dispersante, mientras que la fase dispersa está constituida en este caso por material arcilloso. (Organización Corona, n.d.)

La distribución de tamaño de partícula (DTP) predice los diferentes tamaños presentes en una materia prima con sus porcentajes de participación por fracción de tamaño (finos, medios y

gruesos). La DTP origina y controla el empaquetamiento de las suspensiones cerámicas, el cual dicta el desempeño y comportamiento reológico de las pastas en un proceso, además de las propiedades del producto acabado como porosidad, tamaño de poro, resistencia mecánica y textura, entre otras. (Perry & Den Green, 2001)

**Reología:** Se define como la rama de la física que estudia el modo en que los materiales se deforman o fluyen en respuesta a fuerzas o tensiones aplicadas. La viscosidad es una de las propiedades reológicas más importantes. (Organización Corona, n.d.)

**Tamiz:** Un tamiz es una malla de filamentos entrecruzados con una gran cantidad de orificios huecos cuadrados, todos del mismo tamaño, que permitirán clasificar el tamaño de las partículas que atravesarán dichos orificios. (mym Instrumentos técnicos, 2019)

**Sedimentación:** Se entiende como el proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, que se encuentran en su seno de suspensión, son removidas por la acción de la gravedad. (Pérez, 2005)

**Hidrómetro:** El hidrómetro es un dispositivo que permite medir la densidad de la solución en la cual se suspende. Además, sirve para determinar la distribución del tamaño de partícula cuando se emplea el proceso de sedimentación. La ley fundamental para realizar análisis granulométrico por hidrómetro es formulada por Stokes; en esta ley se enuncia que si una partícula esférica cae dentro del agua adquiere pronto una velocidad uniforme que depende del diámetro de la partícula, de su densidad y de la viscosidad del agua. (García et al., 2008)

**Granulómetro de sedimentación centrífuga (Sedigraph):** Equipo elaborado para determinar el tamaño de las partículas utilizando la técnica de sedimentación altamente precisa y reproducible que mide las tasas de asentamiento inducidas por la gravedad de partículas de diferente tamaño en un líquido con propiedades conocidas. La masa de la partícula se mide directamente mediante la absorción de rayos X: al medir la velocidad en que las partículas caen por el efecto de la gravedad a través de un líquido que contiene propiedades conocidas según la descripción de la ley de Stokes, SediGraph determina el diámetro esférico equivalente de las partículas de 300 a 0,1 micrómetros. (Organización Corona, 2014)

La caracterización reológica de los materiales, por medio de ensayos reológicos, proporciona una idea general sobre el comportamiento de flujo viscoelástico (viscosidad, fluidez y densidad) del sistema y, dado que las respuestas reológicas están estrechamente relacionadas con las estructuras finales del compuesto, constituye una manera de conocer y acondicionar para obtener mejores propiedades de desempeño (velocidad de formación) de la pasta.

**Viscosidad:** Se define como la resistencia que presenta un líquido a fluir o como la dificultad que presenta un fluido al movimiento. El viscosímetro rotacional (viscosímetro Brookfield) permite la medición de esta propiedad. (Organización Corona, n.d.)

**Fluidez:** Se entiende como el inverso de la viscosidad, por tal motivo es la habilidad que posee un fluido al movimiento. El viscosímetro de hilo de torsión (viscosímetro Gallenkamp) permite la medición de esta propiedad. (Organización Corona, n.d.)

**Espesamiento y tixotropía:** Es un fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia de un coloide cuando se es sometido al movimiento (agitación) y su posterior recuperación con el tiempo. Muchas suspensiones si se dejan en reposo durante algún tiempo se observa que se espesan, es decir, se vuelven más viscosas y cuando se agitan vigorosamente de nuevo, estas suspensiones se vuelven muy fluidas. (Organización Corona, n.d.)

**Factor alfa:** Es la relación entre las medidas de tiempo de evacuación del viscosímetro Mariot y permite dar una idea de qué tan viscosa o fluida es la pasta.

**Densidad:** es la relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa un fluido en específico y una forma de expresarla es con el peso por litro (P/L).

**Viscosímetro:** Los viscosímetros son instrumentos de medición para determinar la resistencia que representa un líquido a fluir, también denominada viscosidad, o dicho de otro modo como la dificultad que un fluido presenta al movimiento. Existen diversos viscosímetros dependiendo de su principio de funcionamiento: (Organización Corona, n.d.)

- **Brookfield:** El viscosímetro Brookfield utiliza el principio de la viscosimetría rotacional. Mide la viscosidad captando el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un husillo inmerso en la muestra de fluido. El par de torsión

es proporcional a la resistencia viscosa sobre el eje sumergido y en consecuencia a la viscosidad del fluido. (Organización Corona, n.d.)

- **Gallenkamp:** El viscosímetro Gallenkamp es de accionamiento manual y consta de un alambre con torsión vertical, un disco montado sobre una escala graduada y un cilindro suspendido debajo de la escala. La medida se realiza por inmersión, el disco se gira 360 °C y luego se libera, la torsión del hilo genera una fuerza que permite girar el cilindro en la suspensión hasta que frena y se mide el ángulo alcanzado en la escala graduada. Se utiliza para medir la viscosidad: a mayor viscosidad menor ángulo y viceversa. (Organización Corona, n.d.)
- **Mariot:** El viscosímetro Mariot tiene el mismo principio de funcionamiento que la copa Ford, el tiempo de vaciado puede ser convertido en viscosidad por medio de relaciones. Es un cilindro con un orificio en el fondo y se dispone de manera horizontal. Se tapa el orificio y se llena la copa con la muestra hasta la marca, lo cual asegura que el volumen siempre es el mismo para todas la mediciones. Se abre el orificio y se toma el tiempo para vaciar la copa con un cronómetro.

**Análisis de operación estándar:** Es una especie de guía o instructivo preciso y bien detallado de una operación con el fin de mantener las mismas condiciones de trabajo y elevar la eficiencia.

**Pastas frías y calientes:** Las pastas frías son aquellas que se preparan y tienen un tiempo de añejamiento para alcanzar las características y propiedades esperadas para la producción; mientras que las pastas calientes son las mismas pastas frías, pero ya acondicionadas en temperatura para iniciar el proceso de colaje o formación de piezas.

### 3 Metodología

A continuación se describen los aspectos metodológicos de cada una de las actividades que fueron necesarias para alcanzar los objetivos planteados:

#### 3.1. Revisión bibliográfica

- Durante la ejecución del proyecto se efectuó una búsqueda y revisión bibliográfica con el objetivo de conocer el estado del arte de las pastas cerámicas usadas en las piezas sanitarias y sus propiedades.

#### 3.2. Realización de ensayos para el análisis de distribución de tamaño de partículas en laboratorio con el *blend* de materias primas nacionales y pastas

- Se realiza el montaje de la muestra para determinar el porcentaje relativo de los granos de cada una de las distintas fracciones de tamaño siguiendo el método para la determinación de la DTP de materiales cerámicos particulados usando el hidrómetro 152H:

##### Paso 1: Preparación del agente dispersante

- a. Pesar las cantidades de defloculante y ponerlas dentro del balón correspondiente según la **Tabla 1**. El defloculante se suele aglomerar dificultando la dispersión, lo cual se evita o minimiza adicionando el defloculante lentamente, en cantidades mínimas y agitando vigorosa y continuamente.

**Tabla 1**

*Cantidades de defloculante para la preparación*

<b>Defloculante</b>	<b>Balón 500 mL</b>	<b>Balón 1000 mL</b>
Tripolifosfato de sodio	17,85 g	35,7 g

- b. Agregar al menos la tercera parte de agua destilada e iniciar la agitación para diluir el defloculante.
- c. Agregar otra tercera parte de agua destilada y continuar la agitación, verificando que el agua quede sin partículas por diluir del defloculante.

- d. Completar la cantidad de agua destilada en el balón calculando el nivel con el menisco inferior y hacer una última agitación por volteo vertical.
- e. Dejar decantar la solución de un día para otro.
- f. Marcar el balón como: Agente Dispersante DTP (Tripolifosfato de sodio) – Indicar fecha de preparación (tener en cuenta que la vida útil del agente dispersante es de 1 mes desde la fecha de preparación).

### **Paso 2: Medición del blanco**

- a. Colocar en la probeta 20 mL del agente dispersante y completar con agua destilada hasta 1000 mL.
- b. Tapar y mezclar bien la suspensión aplicando agitación manual por volteo vertical de la probeta (en 1 minuto realizar 20 ciclos manuales sucesivos y rítmicos de inversiones y retornos a posición estándar, con giro manual vigoroso pero firme).
- c. Justo al terminar la agitación manual, colocar rápida y suavemente la probeta sobre la mesa, introducir con cuidado el hidrómetro 152H y el termómetro esperando que se estabilice la medición: esto se identifica cuando los valores no varían en un corto periodo de tiempo (aproximadamente 20 segundos).
- d. Tomar dato del hidrómetro (el nivel se calcula con el menisco superior) y de la temperatura. Registrar el dato en el formato, botar la muestra y lavar todo.

### **Paso 3: Medición de la DTP de la suspensión**

- a. Tomar la cantidad de suspensión total correspondiente a 50 g de sólidos secos, teniendo en cuenta los cálculos de conversión de peso seco a peso total:
  - Agitar bien la muestra y determinar el peso por litro utilizando un picnómetro de acero inoxidable. La muestra del picnómetro se lava en una tamiz ASTM N° 325 (45  $\mu\text{m}$ ) para calcular el porcentaje de residuo.
  - Con el peso por litro se calcula la cantidad de suspensión que se debe tomar para que sean 50 g de sólidos secos:

$$P/L = (Peso_{Muestra+Picnómetro} - Peso_{Picnómetro}) \times Constante_{Picnómetro} \quad (1)$$



$$\text{Sólido seco} = (P/L - 1000) \times \text{Constante}_{\text{Material}} \quad (2)$$

$$\text{Gramos de suspensión} = \frac{(P/L \times 50g)}{\text{Sólido seco}} \quad (3)$$

- Agitar nuevamente la muestra para pesar en un *beaker* la cantidad de suspensión correspondiente a los 50 g de sólidos secos.
- b. Colocar en la probeta la suspensión correspondiente a los 50 gr de sólidos secos, haciendo paso estequiométrico de lo que está en el *beaker* (se hace el lavado con agua destilada y dicha agua se coloca también en la probeta, esto se hace hasta que el *beaker* quede completamente limpio).
- c. Adicionar 500 ml de agua destilada (debe ser de la misma agua destilada con la que se hizo la medición del blanco).
- d. Adicionar 20 ml de la solución dispersante previamente preparada.
- e. Completar con agua destilada hasta 1000 ml (el nivel se determina con el menisco inferior).
- f. Tapar y mezclar bien la suspensión aplicando agitación manual por volteo vertical de la probeta (en 1 minuto realizar 20 ciclos manuales sucesivos y rítmicos de inversiones y retornos a posición estándar, con giro manual vigoroso pero firme).
- g. Justo al terminar la agitación manual, colocar rápida y suavemente la probeta sobre la mesa e inmediatamente iniciar el cronómetro, introducir con cuidado el hidrómetro 152H y el termómetro esperando que se establezca la medición.
- h. Hacer lecturas de hidrómetro y de temperatura en los siguientes tiempos: 2 min, 4 min, 10 min, 20 min, 1 hora, 2 horas, 7 horas y 24 horas y registrar los datos en el formato.

#### **Paso 4: Obtención de los porcentajes relativos de cada fracción de tamaño**

- a. Digitar los datos de las lecturas en la hoja de cálculos para obtener las ecuaciones de las dos líneas de tendencia (logarítmica y polinomial grado 3).
- b. Con las ecuaciones resultantes se calcula el valor de acumulado más fino que... (%) para los diferentes diámetros ( $\mu\text{m}$ , en progresión geométrica raíz cuarta de 2, empezando en 43,9  $\mu\text{m}$  y terminando en 0,34  $\mu\text{m}$ ).

- c. Los porcentajes de las fracciones se calculan teniendo en cuenta lo siguiente:
- **Gruesos:** Masa de material más fino o igual a  $43,9 \mu\text{m}$  y más grueso que  $9,21 \mu\text{m}$
  - **Medios:** Masa de material más fino o igual a  $9,21 \mu\text{m}$  y más grueso que  $0,96 \mu\text{m}$
  - **Finos:** Masa de material más fino o igual a  $0,96 \mu\text{m}$
- d. Para el material *blend* se usa el promedio entre ambas regresiones como modelo para el ajuste final.
- Se evalúa la reproducibilidad experimental con el objetivo de obtener datos confiables y periódicos que garanticen resultados estables.
  - Se determina el rango óptimo de trabajo para cada tamaño de partícula en estudio.

### 3.3 Desarrollo de análisis de operación estándar (AOE) para el uso del Mariot

- Se realiza un reconocimiento general del equipo para evaluar los aspectos clave para tener en cuenta con el fin de garantizar un buen manejo y la obtención de datos confiables.
- Se realizan ensayos de prueba para conocer la metodología de funcionamiento del proceso, del correcto uso del equipo (llenado y vaciado) y de la toma de datos.
- Se desarrolla la guía de operación enunciando clara y ordenadamente las instrucciones generales, listando los equipos e implementos y describiendo la metodología paso a paso.

### 3.4 Realización de ensayos en laboratorio con las pastas de las diferentes tecnologías

- Se acondicionan las diferentes pastas para los ensayos en los tres viscosímetros.
- Se determina la viscosidad y espesamiento con el Brookfield; la fluidez y tixotropía con el Gallenkamp; el tiempo de flujo y el grado de variación con el Mariot.
- Se analizan los diferentes comportamientos que debe tener la variable del tiempo de flujo con un aumento o disminución de la viscosidad y la fluidez.
- Se realiza una homologación entre las tres variables de medición de viscosidad con el fin de poder emplear conversiones o relaciones entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) y el Gallenkamp (°GS) – Mariot (s).
- Se evalúa la reproducibilidad experimental con el objetivo de obtener datos confiables y periódicos que garanticen resultados estables.

- Se establecen los rangos de operación en el Mariot para las pastas de las diferentes tecnologías.

### **3.5 Aplicación y repetición de ensayos a escala industrial para tecnologías de colaje**

- Realizar comparaciones entre los resultados obtenidos en los Salones de Colaje versus los resultados obtenidos en el Laboratorio para evaluar la reproducibilidad y tendencias. La medición en los Salones de Colaje se realiza de la siguiente manera:
  - ✓ Supervisar los salones para conocer la hora en que se realizará el llenado de los moldes ya que en dicho momento la pasta estará en las condiciones óptimas para su evaluación.
  - ✓ Transportar el viscosímetro Mariot junto con los utensilios requeridos (nivel de burbuja, termómetro, cronómetro y jarras) para realizar la toma directamente en el salón, en el cual se extrae la muestra desde parte superior de los tanques. El termómetro sirve para medir y validar que la pasta del tanque se encuentra a la temperatura de ajuste necesaria.
  - ✓ Una vez realizada la medición en el salón, se toma una muestra en una jarra de 2L para evaluar en el Laboratorio, en el cual se determina la viscosidad en los tres equipos: Brookfield, Gallenkamp y Mariot.

**NOTA:** Es de vital importancia que el procedimiento anterior se realice en el menor tiempo posible para disminuir la alteración de la pasta y, por consiguiente, de las medidas.

## 4 Resultados

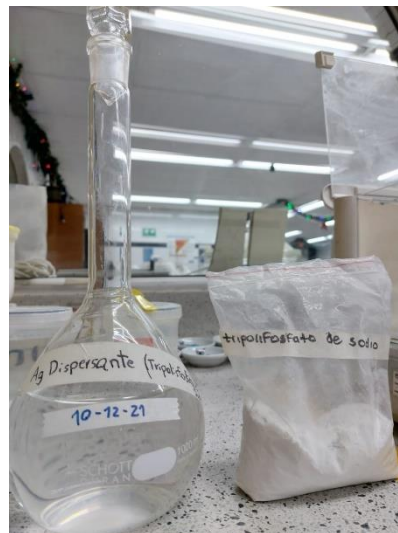
### 4.1 Preparaciones para el análisis de distribución de tamaño de partículas con el *blend* de materias primas nacionales.

#### 4.1.1 Preparación del agente dispersante

Al realizar el paso 1 para la preparación del agente dispersante, se decidió utilizar en todo momento el balón aforado de 1 L con el fin de disponer con suficiente solución para las mediciones. En la **Figura 1** se puede observar la materia prima y el agente dispersante ya elaborado con su etiqueta marcada.

#### Figura 1

*Preparación del agente dispersante*



#### 4.1.2 Medición del blanco de la muestra

Al efectuar el paso 2 para la medición del blanco, se encontró que la lectura del hidrómetro siempre oscilaba entre los valores de 0 a 1, con temperaturas en un rango de 22 a 23 °C. En la **Figura 2** se puede observar el procedimiento y la lectura efectuada a una muestra.

**Figura 2**

*Procedimiento y lecturas para la medición del blanco*

**4.1.3 Medición de la suspensión para la DTP**

Al elaborar el paso 3 para la medición de la suspensión del *blend* de materias primas nacionales se encontró que la lectura del hidrómetro mostraba cierto patrón o tendencia, por lo que es posible definir un rango de comportamiento para cada tiempo como se muestra en la **Tabla 2**. La temperatura de la suspensión en sedimentación también mostraba una tendencia: iniciaba en valores cercanos a los 22 °C, ascendía hasta 24 °C en un lapso de 7 horas y luego descendía hasta 23 °C cuando culminaba la medición a las 24 horas. En la **Figura 3** y **Figura 4** se pueden observar el procedimiento y en la **Figura 5** las lecturas efectuadas a una muestra.

**Tabla 2**

*Rangos de confianza para las lecturas del hidrómetro en el tiempo*

<b>Tiempo</b>	<b>Lectura del hidrómetro 152 H</b>
2 min	45 - 46
4 min	42 - 43
10 min	37 - 39
20 min	34 - 36
1 h	30 - 31
2 h	27 - 28
7 h	23 - 24
24 h	20 - 21

**Figura 3**

*Obtención y montaje de la muestra*

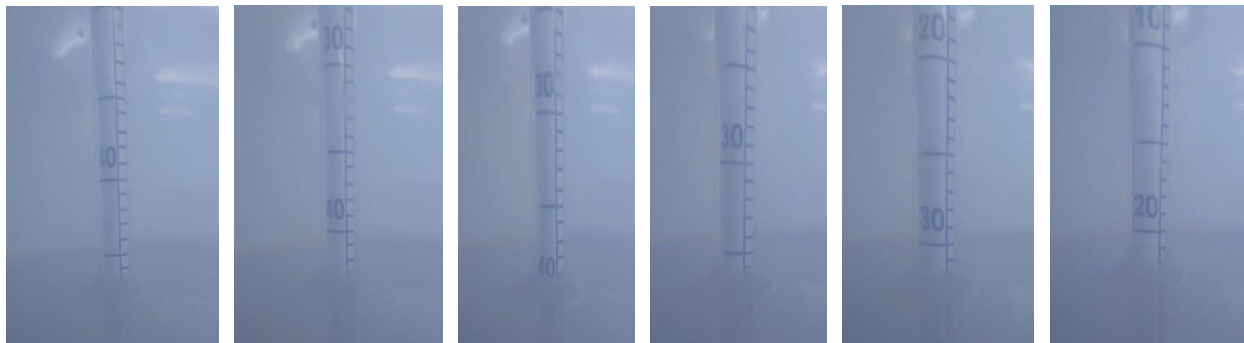


**Figura 4**

*Lavado y determinación del residuo*

**Figura 5**

*Lecturas del hidrómetro a través del tiempo (de izquierda a derecha: 2 min, 4 min, 10 min, 20 min, 1 h y 24 h)*

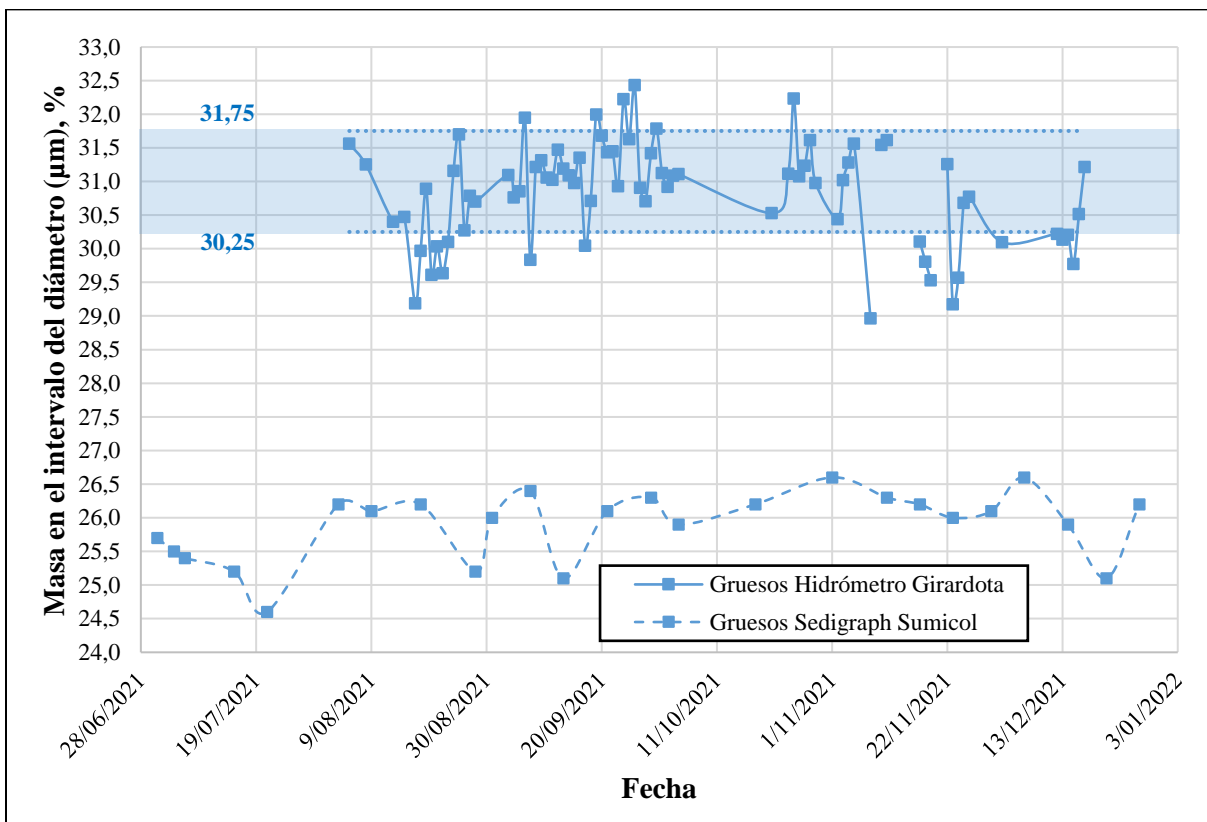


## 4.2 Obtención del porcentaje relativo de gruesos, medios y finos, y determinación del rango óptimo de trabajo

Con las lecturas de cada muestreo y haciendo uso de las hojas de cálculo ya establecidas, se obtuvieron los porcentajes de cada fracción de tamaño. Se realizaron 77 tomas en total para asegurar la reproducibilidad experimental y así obtener datos periódicos que permitieran establecer un rango de trabajo confiable. Las muestras también fueron analizadas por un laboratorio de la empresa Sumicol S.A.S., el cual emplea un granulómetro de sedimentación centrífuga llamado Sedigraph que reporta con alta precisión los porcentajes de cada fracción de tamaño; sin embargo, el tiempo de respuesta por parte de la empresa es de hasta 2 semanas. Este comparativo se hace para validar tendencias y ratificar la visualización de los cambios que permite tener este método con hidrómetro. En la **Figura 6** se observa el comportamiento obtenido para el tamaño grueso y en la **Figura 7** para los tamaños medios y finos.

**Figura 6**

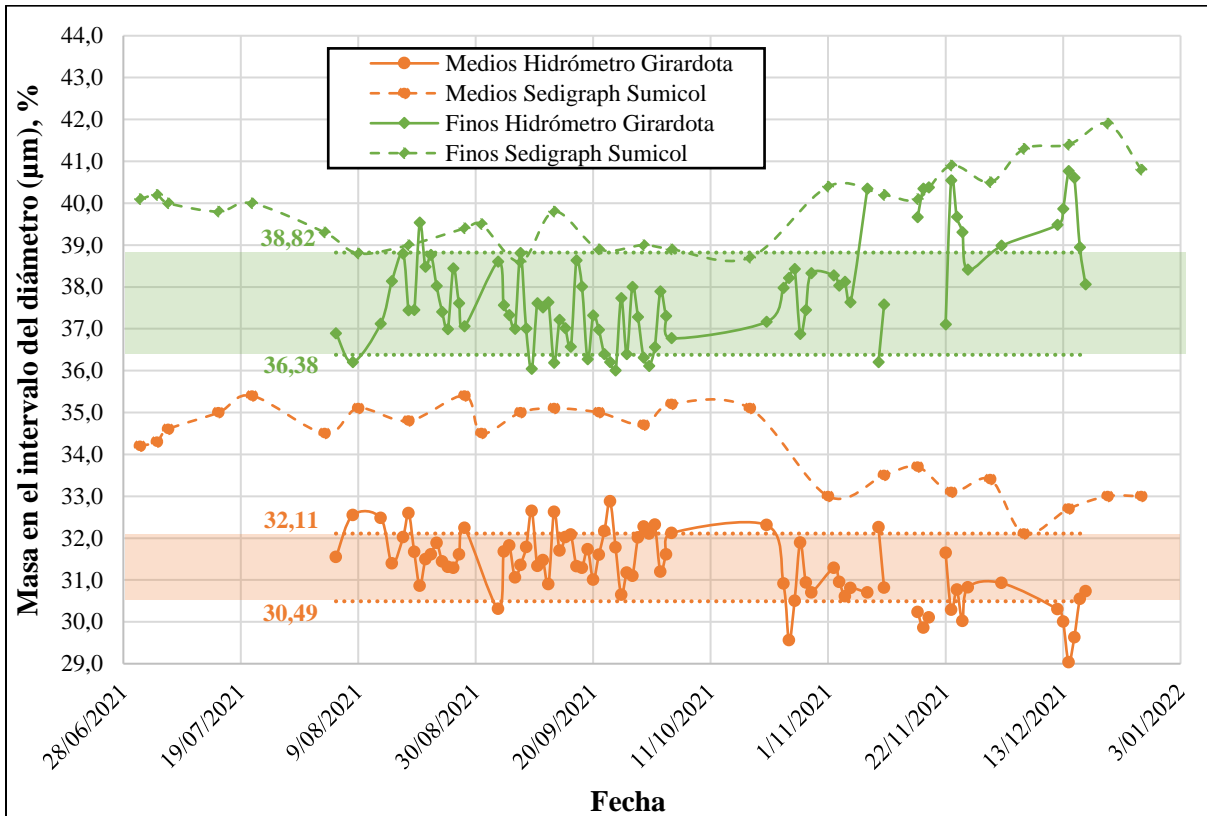
*Comparación de lecturas del Hidrómetro y Sedigraph para gruesos*





**Figura 7**

*Comparación de lecturas del Hidrómetro y Sedigraph para medios y finos*



En términos de comparación de equipos (Hidrómetro y Sedigraph), la mayor separación entre los porcentajes se presenta para el tamaño grueso con un 5%, seguido de los medios con un 3% y finalmente de los finos con un 1%. A pesar de dichas diferencias, con el método del hidrómetro se logra obtener un comportamiento periódico y estable para todos los tamaños de partícula. Mediante un análisis estadístico se determinaron los rangos de operación para cada tamaño y estos se ilustran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3**

*Rangos óptimos de trabajo para cada tamaño de partícula*

Variable	Gruesos	Medios	Finos
Media (%)	31,0	31,3	37,6
Rango (%)	1,50	1,62	2,44
Límite inferior (%)	30,25	30,49	36,38
Límite superior (%)	31,75	32,11	38,82

Se evidencia que el rango más alto es de apenas 2,44% en los finos, lo que permite deducir que el método del Hidrómetro es eficaz ya que logra la reproducibilidad de los datos en un intervalo de trabajo reducido (los rangos están ilustrados en las figuras mencionadas anteriormente). En la **Tabla 4** se realiza una comparación del total de datos tomados y del número de datos de cada tamaño que se encuentran ubicados dentro del rango de trabajo establecido. Se obtiene que más del 65% de los datos de cada fracción se encuentra dentro de los límites, lo que refleja una buena confiabilidad en la metodología, el instrumento y el rango.

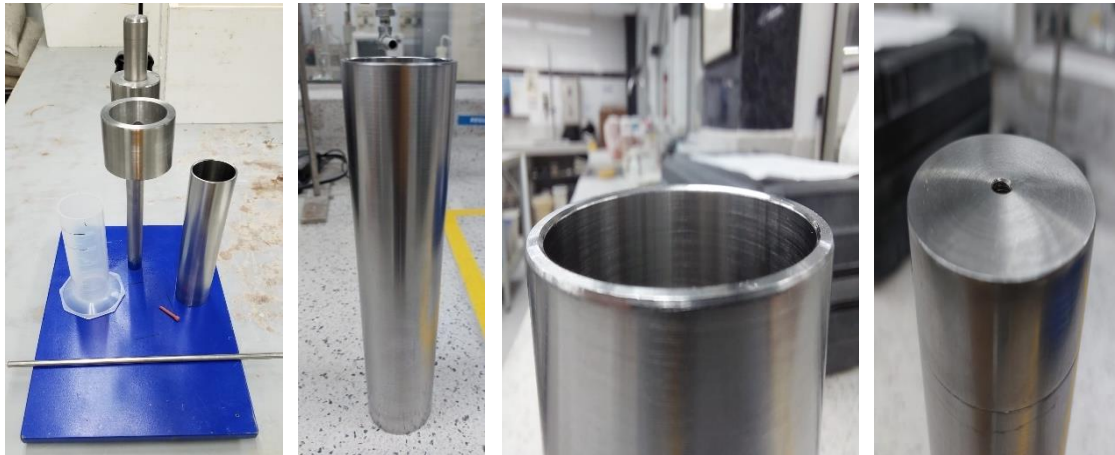
**Tabla 4**

*Comparación de datos totales y datos dentro del rango establecido*

Datos totales	Datos dentro del rango		
	Gruesos	Medios	Finos
77	52	54	54
100%	67,53%	70,13%	70,13%

#### 4.3 Elaboración del análisis de operación estándar para el uso del viscosímetro Mariot

Primero que todo se realizó un reconocimiento general del viscosímetro para evaluar los puntos clave que se deben tener en cuenta como el nivel del equipo y las demarcaciones de los contenedores. En la **Figura 8** se observa el viscosímetro Mariot, detallando la forma de los orificios y en la **Tabla 5** se presentan algunas especificaciones de sus dimensiones. Se estudió el proceso de adecuación que debe tener una muestra de pasta para la medición de la viscosidad, como lo es el tiempo y la velocidad de agitación. Por último, se realizan diferentes ensayos de prueba con diversas pastas para comprender la metodología de funcionamiento del proceso, del correcto uso del equipo (llenado y vaciado) y el registro de datos. En la **Figura 9** se ilustra el viscosímetro y el proceso de toma de dato para una pasta, con toda la información recopilada se desarrolló el AOE, detallando las etapas y puntos claves del proceso con el fin de que la metodología quede registrada clara y ordenadamente para la Planta (**Anexos 1**).

**Figura 8***Viscosímetro Mariot***Tabla 5***Especificaciones y dimensiones del viscosímetro Mariot*

Dispositivo	Especificación	Dimensión (cm)
Contenedor cilíndrico	Diámetro orificio inferior	0,5
	Diámetro apertura superior	4,28
	Diámetro total	4,7
	Altura	22,9
	Separación con la base	27

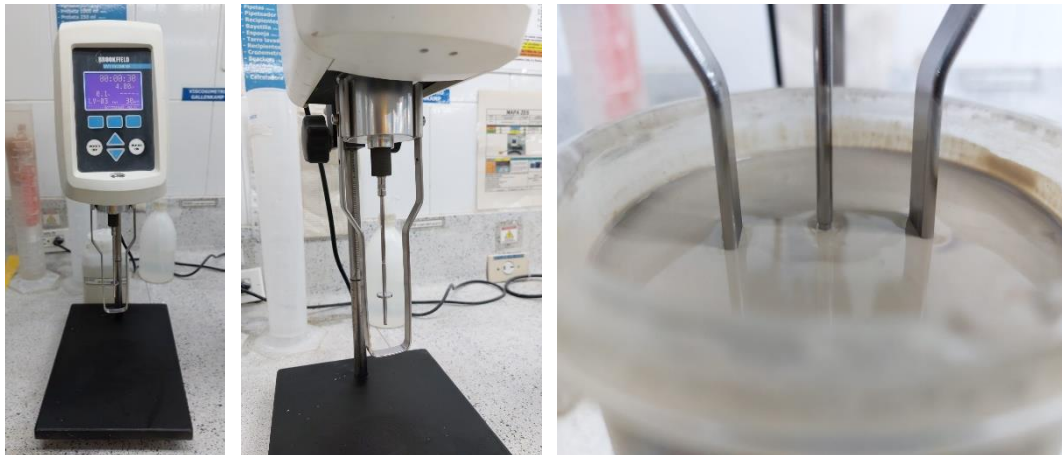
**Figura 9***Medición de la viscosidad con el Mariot*

#### 4.4 Ensayos y comportamiento en el laboratorio de las pastas frías provenientes de las diferentes tecnologías

Se estudiaron las pastas frías de cuatro tecnologías de la Planta: BMC, ALS PV, TCI/CDI y Tradicional; cada una cuenta con viscosidades, fluideces y rangos de ajuste diferentes. Se analizaron en tres viscosímetros con variables de medición diferentes para observar el comportamiento y poder realizar una homologación con el fin de emplear relaciones entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) y el Gallenkamp (°GS) – Mariot (s). Es importante aclarar que no necesariamente si la viscosidad o fluidez de una tecnología se ve alterada, el espesamiento o tixotropía tiene un cambio. Un aspecto relevante para mencionar es que las tecnologías realizaban cambios de las viscosidades y los rangos de ajuste durante los diferentes meses para mejorar la fabricación de los sanitarios, por lo que se decidió establecer un rango de trabajo para el Mariot en la última modificación realizada de cada tecnología. En la **Figura 10** y **Figura 11** se observa el viscosímetro Brookfield y Gallenkamp utilizado, respectivamente. En la **Figura 12** y **Figura 13** se observa el comportamiento en tecnología BMC entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) y el Gallenkamp (°GS) – Mariot (s), respectivamente.

#### Figura 10

*Viscosímetro Brookfield*



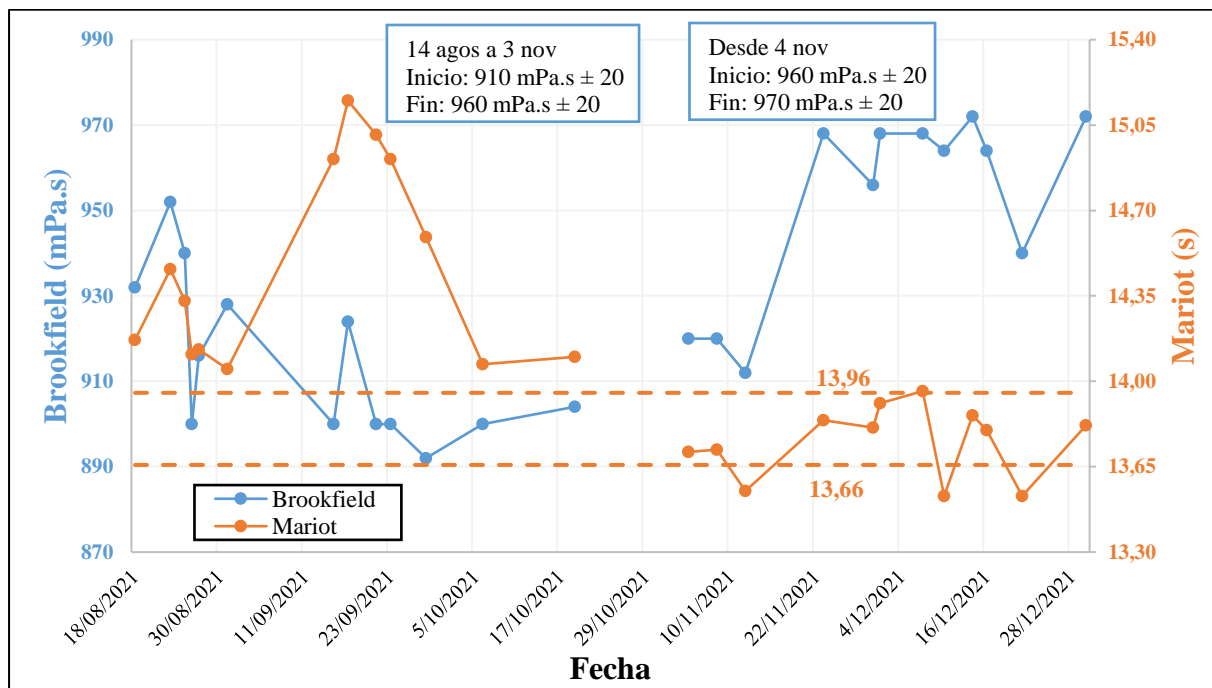
**Figura 11**

*Viscosímetro Gallenkamp*



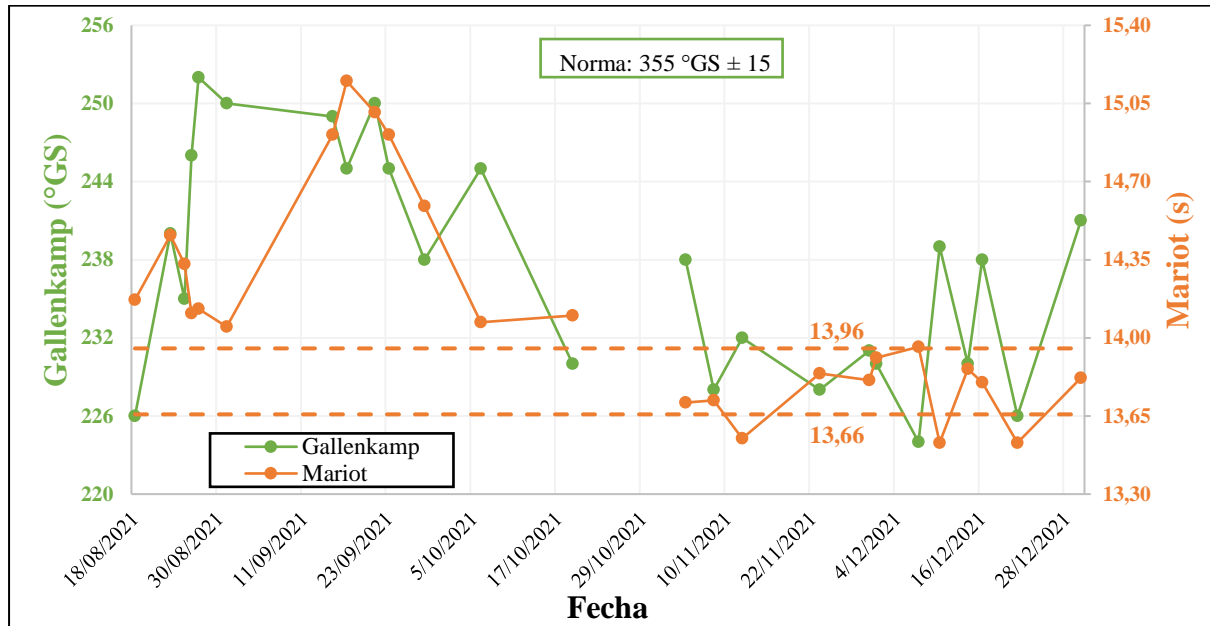
**Figura 12**

*Comportamiento en tecnología BMC entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s)*



**Figura 13**

*Comportamiento en tecnología BMC entre el Gallenkamp (°GS) - Mariot (s)*

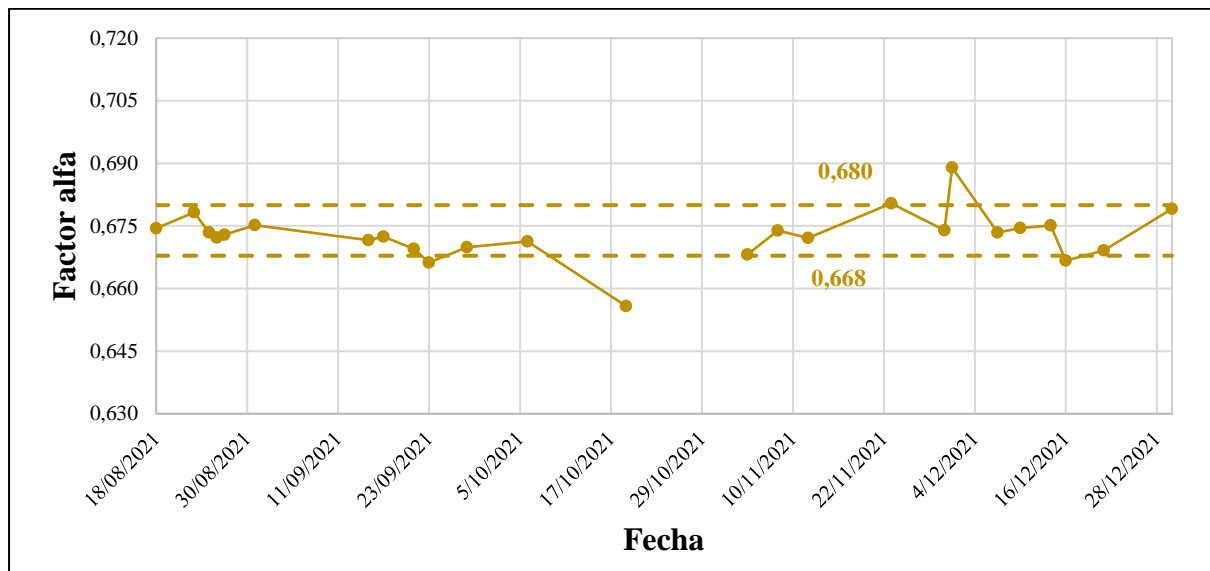


Analizando las dos formulaciones que se ilustran en la **Figura 12** se observa el comportamiento esperado: a medida que aumenta la viscosidad, aumenta también el tiempo de flujo de la pasta ya que la muestra presentará mayor resistencia a fluir. Se nota que en algunos puntos el comportamiento no coincide con la teoría, lo que puede deberse a diferentes factores externos que afectan la medición: algún implemento húmedo, el tiempo de respuesta con el cronómetro, una agitación interrumpida, entre otros. Se observa que, de una formulación a otra, la viscosidad aumentó y el tiempo de flujo disminuyó; esto es un inconveniente que ocurre con la receta actual de la pasta ya que demuestra ser más viscosa, pero fluye más rápido. Esto permite deducir que la medición del Mariot no sólo depende de la viscosidad, sino que existen otros factores que inciden más en la medición del tiempo, como los porcentajes de tamaño de las partículas que constituyen la pasta y la forma de empaquetamiento. La pasta actual es más abierta, posee más porcentaje de gruesos y medios, y esto permite que haya mayor separación entre las partículas y, por ende, menores posibilidades de generar enlaces o interacciones, facilitando el paso o flujo de la pasta. En la segunda formulación se observa cómo la pasta se está estandarizando ya que las mediciones del Mariot se estabilizan en un rango de tiempo más reducido a comparación de la primera etapa. Mediante un análisis estadístico se determina que el rango de operación para el tiempo es de  $13,81 \pm 0,15$  s.

Para las dos formulaciones que se ilustran en la **Figura 13** se observa el comportamiento esperado: a medida que aumenta la fluidez, disminuye el tiempo de flujo de la pasta ya que la muestra presentará menor resistencia a fluir. Al igual que en la **Figura 12**, existen algunos puntos donde el comportamiento no coincide con la teoría y se observa el comportamiento explicado anteriormente cuando ocurre el cambio de una formulación a otra, en donde la fluidez disminuye al igual que el tiempo. En la **Figura 14** se analiza el grado de variación (factor alfa) para la tecnología y se observa que tiene un comportamiento muy estable, similar a la tendencia del espesamiento o tixotropía, con un rango de  $0,674 \pm 0,006$ . Con lo anterior se comprueba que, a pesar de las variaciones ilustradas en las mediciones del Mariot entre ambas formulaciones, la relación permanece constante ya que una gran cantidad de puntos entran dentro del rango.

### Figura 14

*Comportamiento en tecnología BMC del grado de variación (factor alfa)*

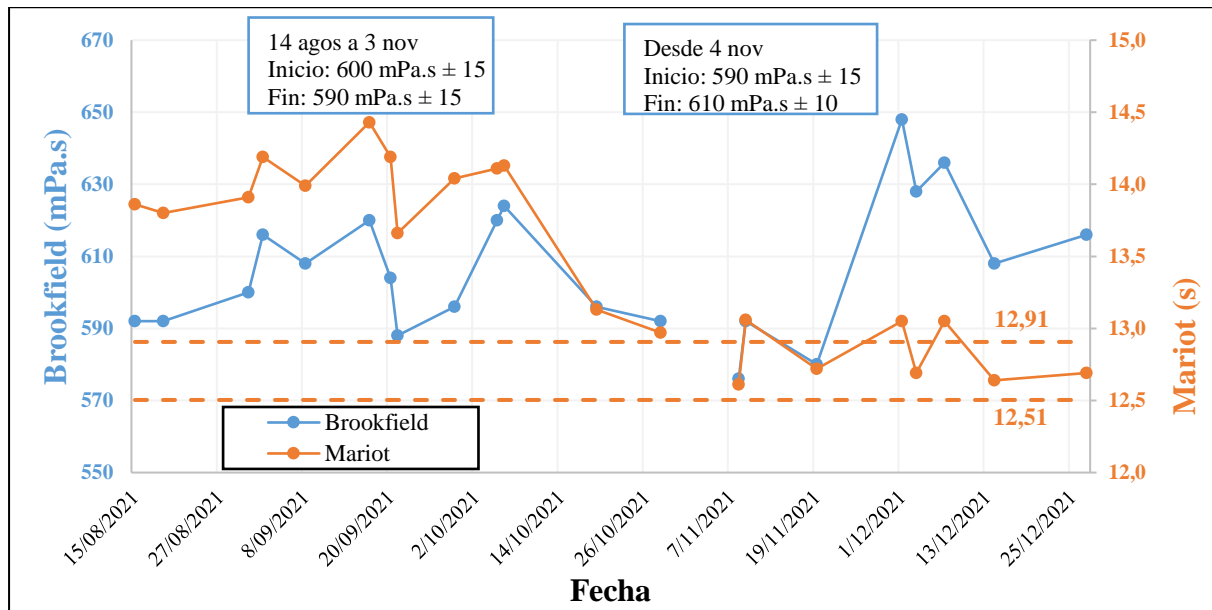


Para la tecnología ALS PV ilustrada en la **Figura 15**, en todos los puntos se logra obtener la relación deseada entre la viscosidad y el tiempo de flujo; sin embargo, se sigue presentando la alteración entre el cambio de las formulaciones. El análisis estadístico permitió definir que el rango de operación para el tiempo es de  $12,71 \pm 0,2$  s. En la **Figura 16** se observa la relación entre el Gallenkamp y el Mariot, en algunos puntos el comportamiento no coincide con la teoría y esto en parte se debe a que los equipos son muy sensibles, se suelen descalibrar y pequeñas variaciones reflejan resultados muy distintos en las mediciones. En la **Figura 17** se analiza el

grado de variación (factor alfa) para la tecnología y se observa que tiene un comportamiento casi invariable con un rango de  $0,684 \pm 0,006$ .

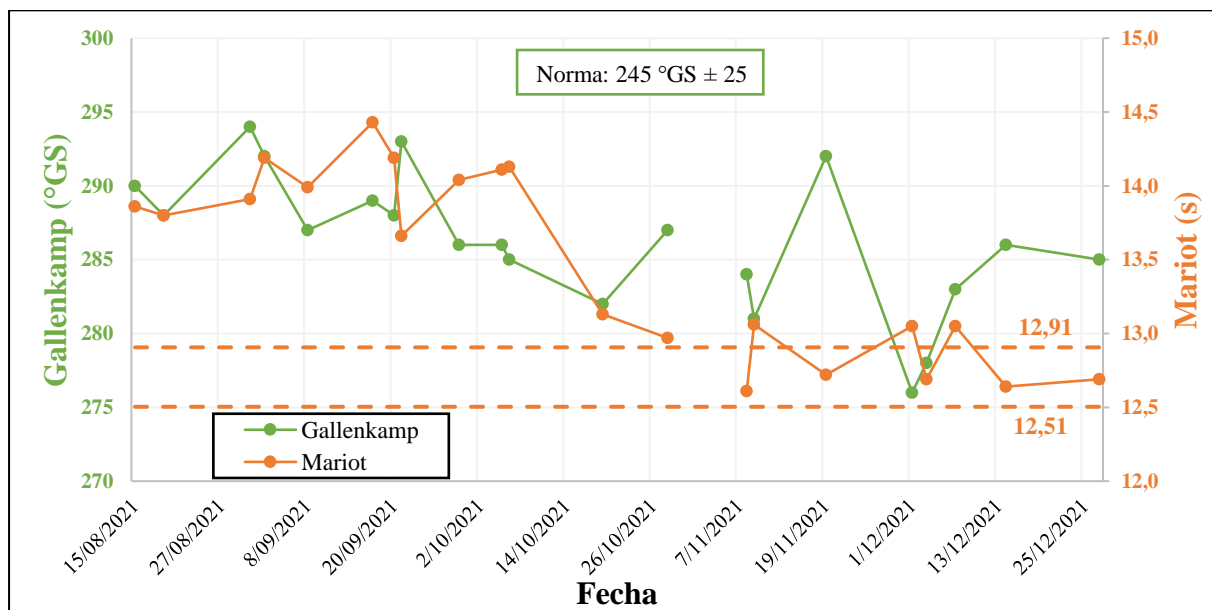
**Figura 15**

*Comportamiento en tecnología ALS PV entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s)*



**Figura 16**

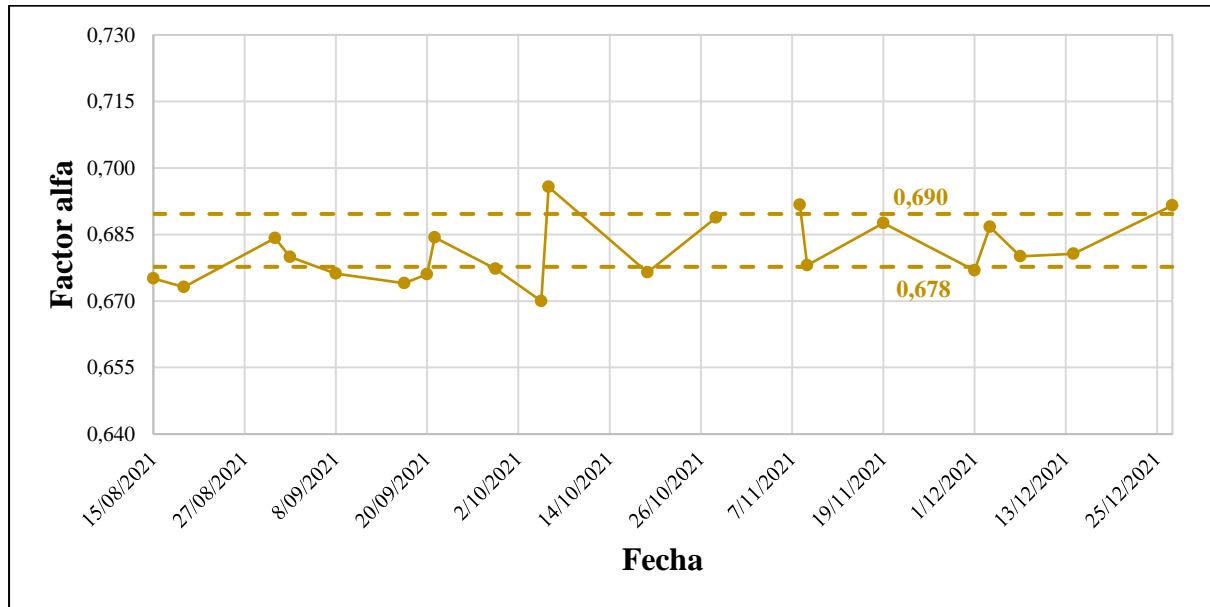
*Comportamiento en tecnología ALS PV entre el Gallenkamp (°GS) - Mariot (s)*





**Figura 17**

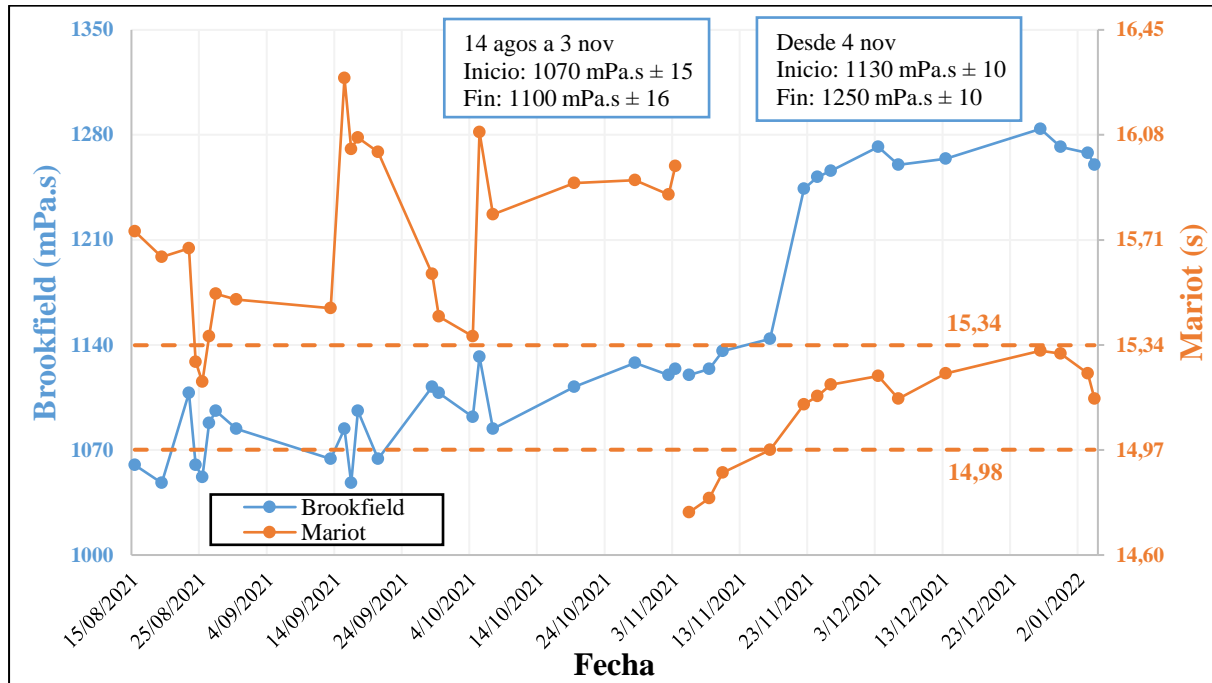
*Comportamiento en tecnología ALS PV del grado de variación (factor alfa)*



Para la tecnología TCI/CDI ilustrada en la **Figura 18**, se nota que en la primera formulación existía mucho ruido ya que las variaciones en el tiempo eran descontroladas; caso contrario a la última formulación, donde se estabiliza en gran medida el tiempo. Si se analizan ambas secciones por aparte, se obtiene un comportamiento aceptable: en ambas al aumentar la viscosidad incrementa el tiempo de flujo. Sin embargo, si se analiza el comportamiento de toda la curva, se nota que la viscosidad siempre está en ascenso, mientras que el tiempo disminuyó en aproximadamente 1 s. El análisis estadístico permitió definir que el rango de operación para el tiempo es de  $15,16 \pm 0,18$  s. Para las dos formulaciones que se ilustran en la **Figura 19** se observa el comportamiento esperado y ocurre el mismo fenómeno de la **Figura 18** si se estudian ambas formulaciones juntas o separadas. En la **Figura 20** se analiza el grado de variación (factor alfa) para la tecnología y se observa que tiene un comportamiento muy estable con un rango de  $0,660 \pm 0,009$ .

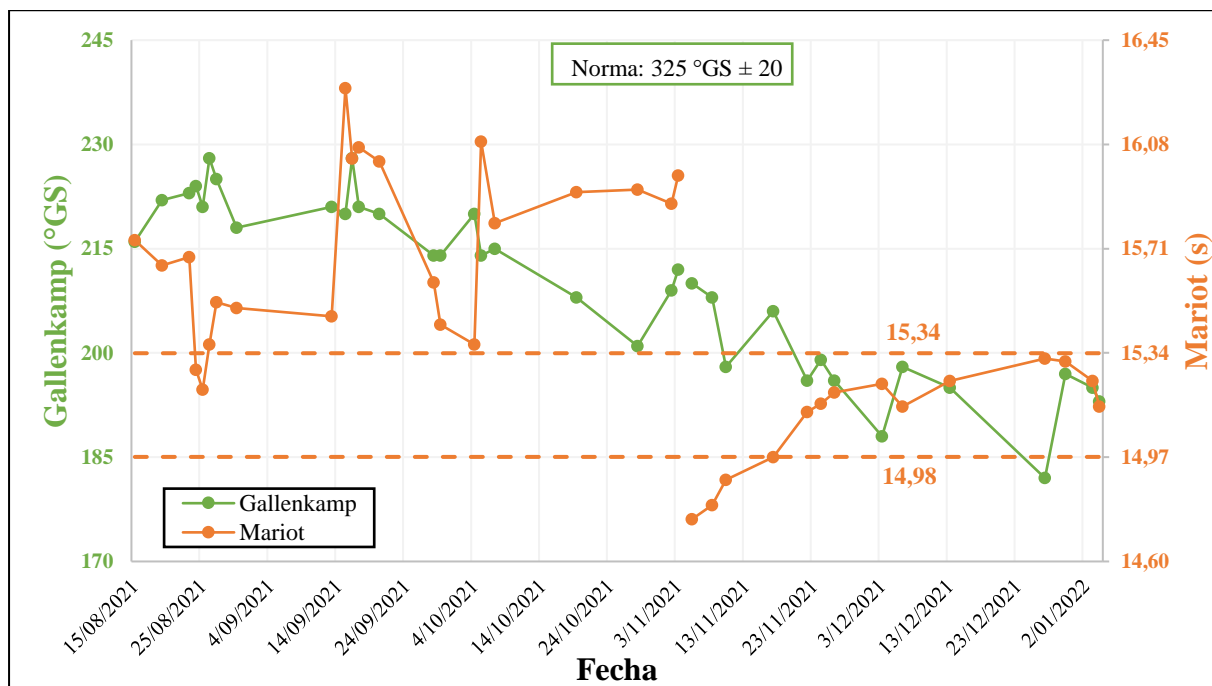
**Figura 18**

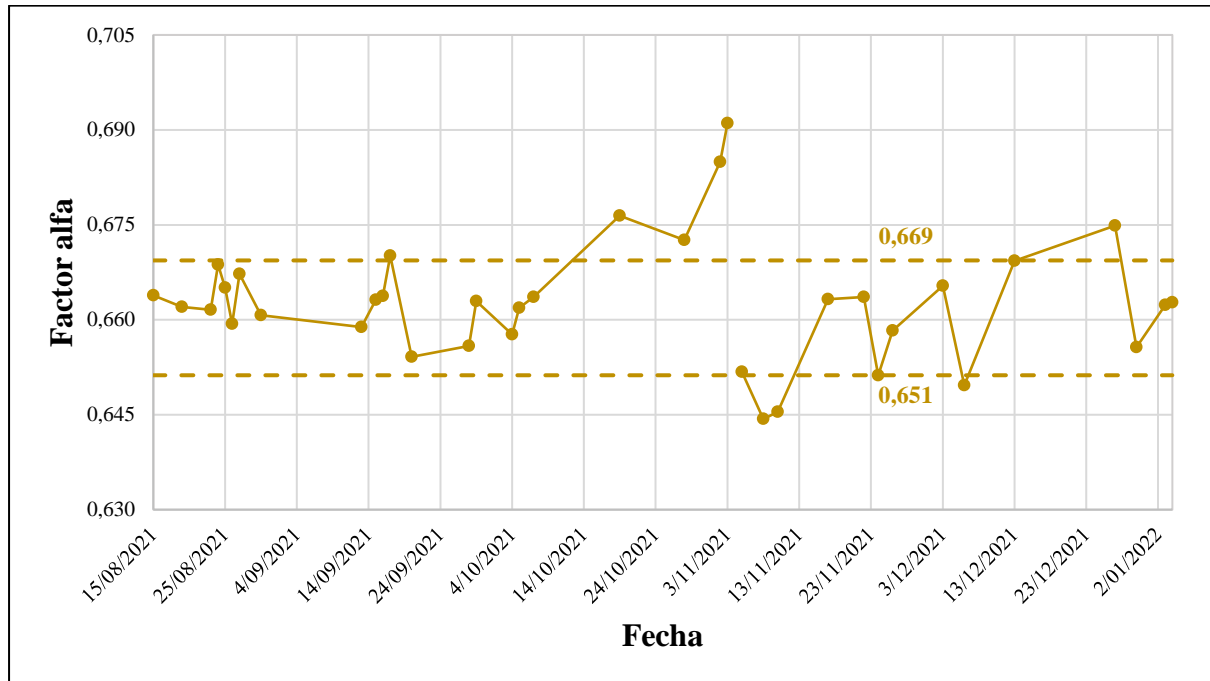
*Comportamiento en tecnología TCI/CDI entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s)*



**Figura 19**

*Comportamiento en tecnología TCI/CDI entre el Gallenkamp (°GS) - Mariot (s)*

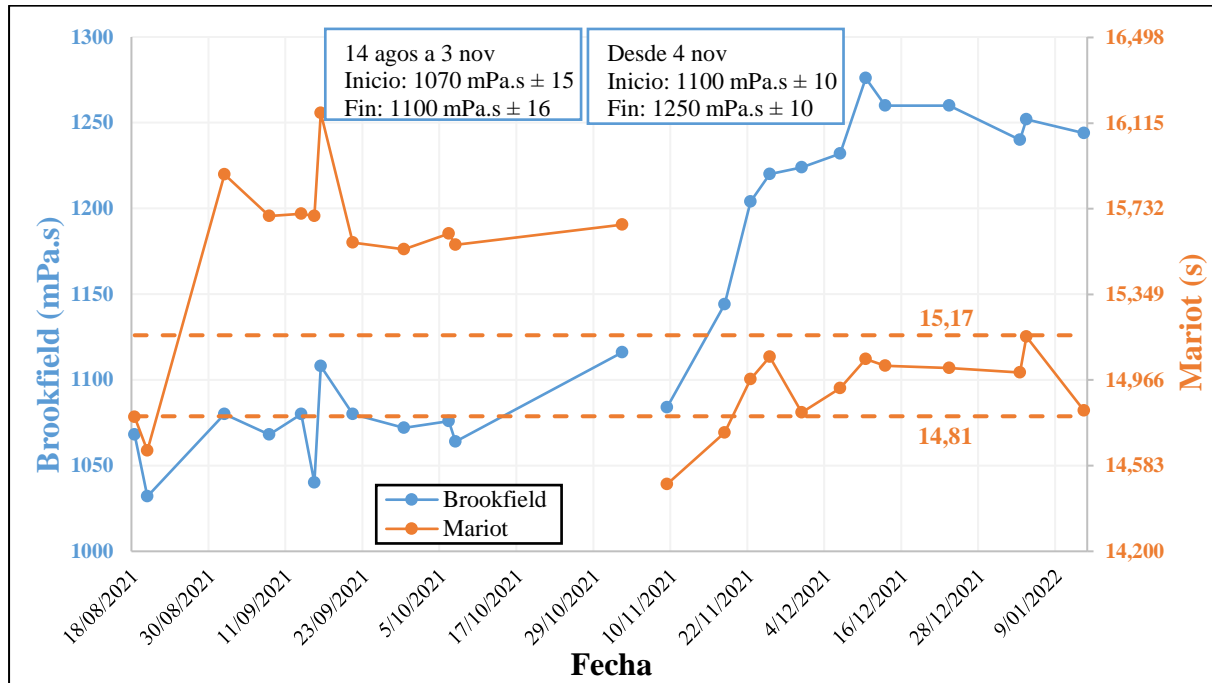


**Figura 20***Comportamiento en tecnología TCI/CDI del grado de variación (factor alfa)*

Para la tecnología Tradicional ilustrada en la **Figura 21**, también se percibe que en la primera formulación existía mucha variabilidad en el tiempo; caso contrario a la última formulación, donde se estabilizan las mediciones. Se obtiene un resultado similar a la tecnología TCI/CDI con el comportamiento de ambas formulaciones tanto para la viscosidad como para la fluidez ilustrada en la **Figura 22**. El análisis estadístico permitió definir que el rango de operación para el tiempo es de  $14,99 \pm 0,18$  s. En la **Figura 23** se analiza el grado de variación (factor alfa) para la tecnología y se observa que tiene un comportamiento muy estable con un rango de  $0,659 \pm 0,007$ .

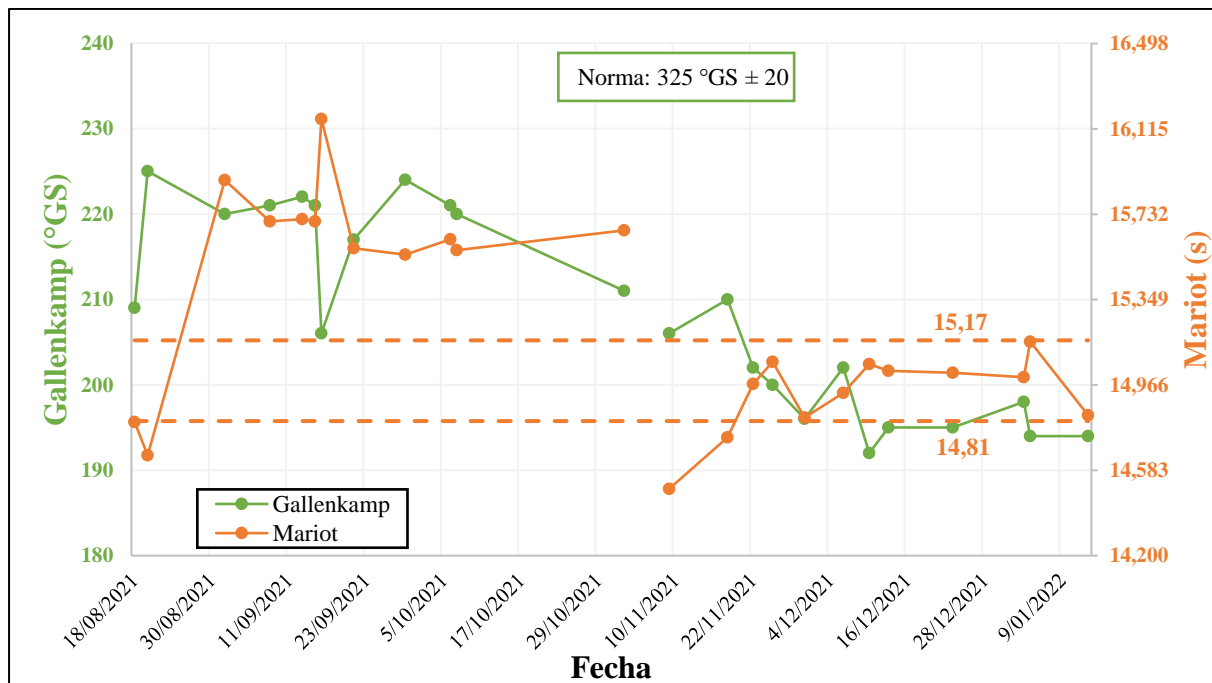
**Figura 21**

*Comportamiento en tecnología Tradicional entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s)*



**Figura 22**

*Comportamiento en tecnología Tradicional entre el Gallenkamp (°GS) - Mariot (s)*



**Figura 23**

*Comportamiento en tecnología Tradicional del grado de variación (factor alfa)*



A pesar de los comportamientos tan inusuales que se presentaron en las diferentes tecnologías, con el viscosímetro Mariot se logra obtener un comportamiento periódico y estable con la última formulación de pasta implementada en la Planta. En la **Tabla 6** y **Tabla 7** se muestran un resumen de los rangos de operación para cada tecnología y se evidencia que el rango más alto para el tiempo es de apenas 0,2 s, lo que permite deducir que la medición de la viscosidad con el Mariot es aceptable ya que logra la reproducibilidad de los datos en un intervalo de trabajo reducido. Además, observando los datos de las figuras y el rango establecido, se obtiene que una gran cantidad de datos se encuentra dentro de los límites, lo que refleja una buena confiabilidad en la metodología, el instrumento y el rango.

**Tabla 6***Rangos óptimos de trabajo para el Mariot en cada tecnología*

Variable	Tecnologías			
	BMC	ALS PV	TCI/CDI	Tradicional
Media (s)	13,81	12,71	15,16	14,99
Rango (s)	0,15	0,20	0,18	0,18
Límite inferior (s)	13,66	12,51	14,98	14,81
Límite superior (s)	13,96	12,91	15,34	15,17

**Tabla 7***Rangos óptimos de trabajo para el factor alfa en cada tecnología*

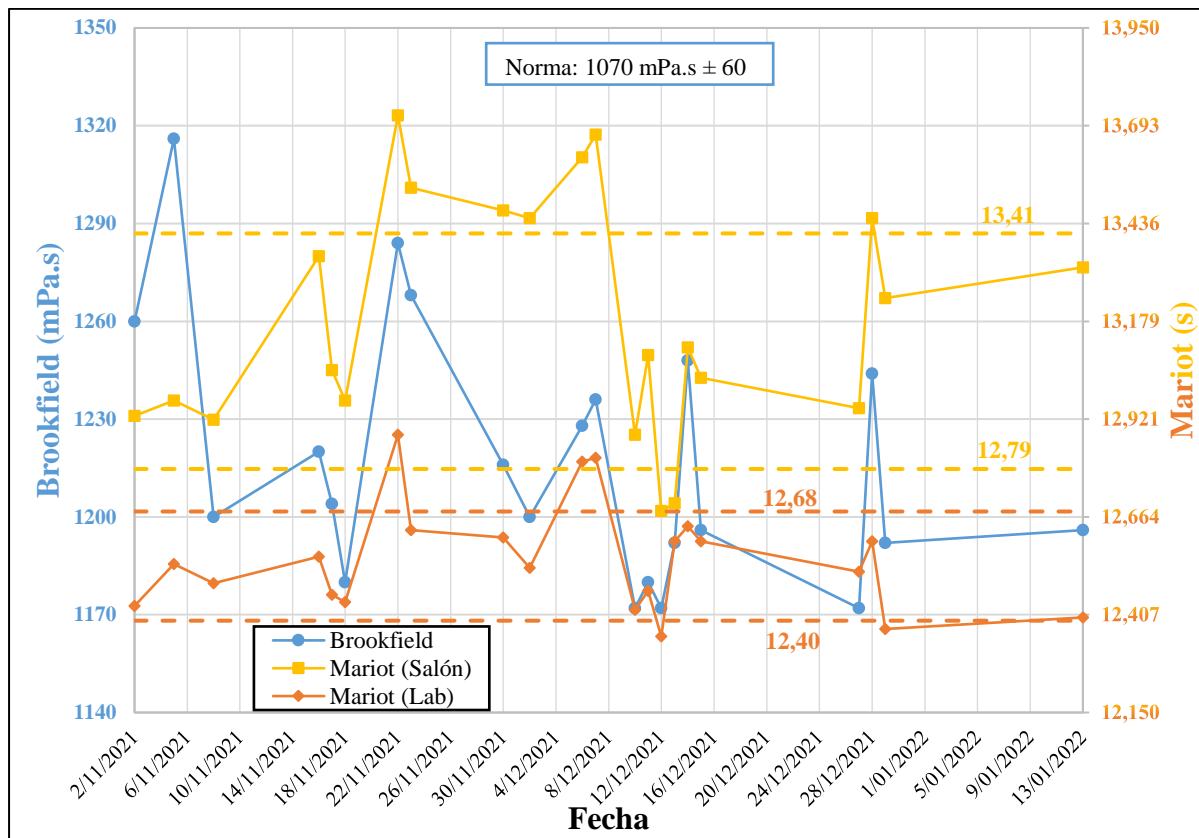
Variable	Tecnologías			
	BMC	ALS PV	TCI/CDI	Tradicional
Media	0,674	0,684	0,660	0,659
Rango	0,006	0,006	0,009	0,007
Límite inferior	0,668	0,678	0,651	0,666
Límite superior	0,680	0,690	0,669	0,652

#### **4.5 Ensayos y comportamiento en Salones y Laboratorio de las pastas calientes provenientes de las tecnologías de colaje**

Se estudiaron las pastas calientes de dos tecnologías de la Planta: BMC y CBC, cada una cuenta con viscosidades, fluideces y rangos de ajuste diferentes. Se siguió la misma metodología con los tres viscosímetros para observar el comportamiento y poder realizar una homologación con el fin de emplear relaciones entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) y el Gallenkamp (°GS) – Mariot (s). También se realizó la medición con el Mariot en los Salones de Colaje de las tecnologías mencionadas, con el objetivo de observar la tendencia y los cambios que sufre la pasta desde la toma de la muestra hasta la evaluación en el Laboratorio. En la **Figura 24** y **Figura 25** se observa el comportamiento en tecnología BMC, tanto en el Salón como en el Laboratorio, entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) y el Gallenkamp (°GS) – Mariot (s), correspondientemente.

**Figura 24**

*Comportamiento en tecnología BMC entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) del Salón y Laboratorio*



En la **Figura 24** se observa que el comportamiento del Mariot en los Salones y en el Laboratorio corresponde correctamente a las variaciones de la viscosidad, ambas aumentan o disminuyen en conjunto. La curva del Mariot en el Salón de Colaje y en el Laboratorio son casi idénticas, presentan las mismas tendencias y picos, pero a diferentes rangos de tiempo. La pasta simula ser más fluida en el Laboratorio que en el Salón, lo que puede deberse a que las condiciones reológicas de la pasta varían significativamente con el tiempo y la temperatura. Además, la forma de evaluar la muestra en cada locación es distinta:

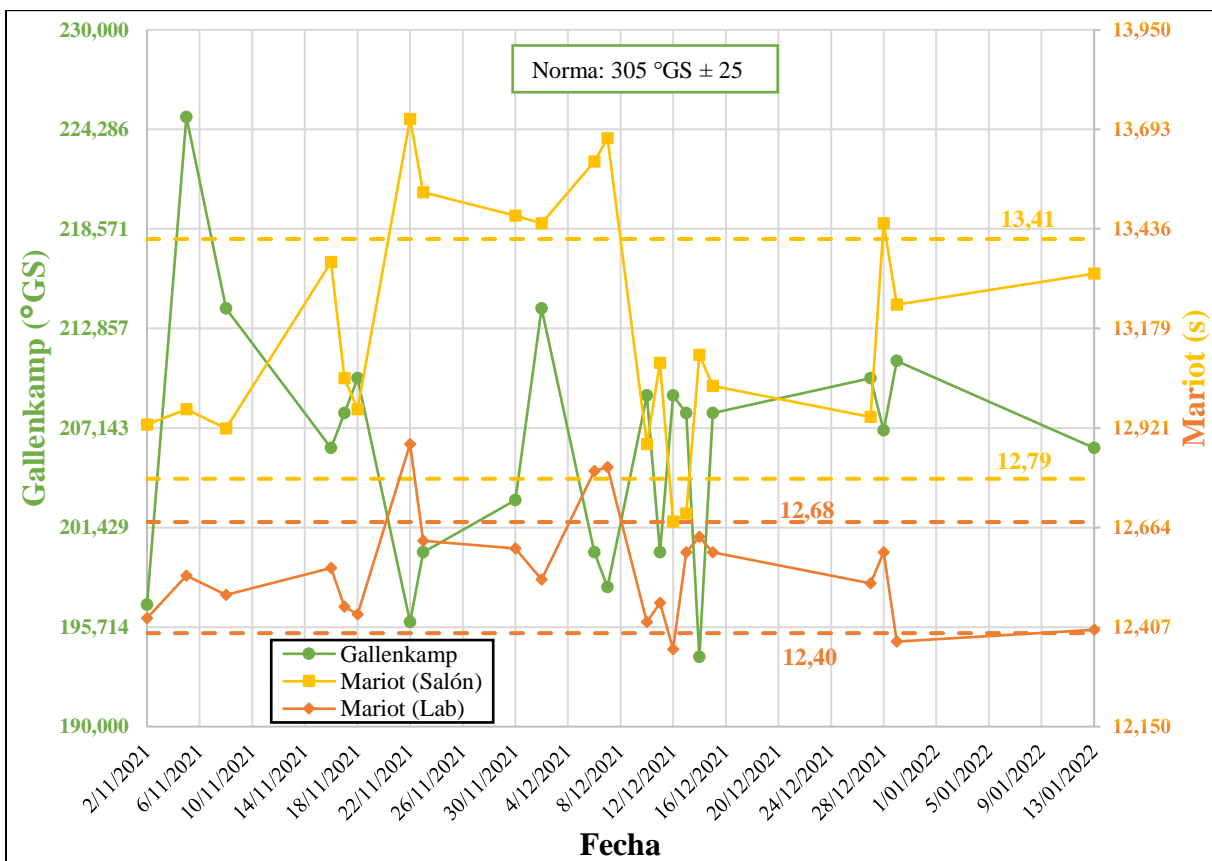
- En el Salón se extrae de un tanque agitado que maneja toneladas a una temperatura aproximada de 50°C, en el cual pueden existir zonas donde la pasta no se encuentre homogénea y las altas temperaturas hacen que el agua de la pasta se evapore, perdiendo fluidez.

- En el Laboratorio la muestra ya se ha enfriado, pero se agita en un vaso garantizando la velocidad adecuada y un correcto mezclado.

En la **Figura 25** se observa que el comportamiento del Mariot corresponde correctamente a las variaciones de la fluidez, una aumenta cuando la otra disminuye. Ambas tendencias del Mariot son similares como en la **Figura 24**, presentando las mismas tendencias y picos, pero a diferentes rangos de tiempo. Además, se percibe que en el Salón existe mucha variabilidad en el tiempo, caso contrario al Laboratorio donde sí se estabilizan las mediciones. El análisis estadístico permitió definir que el rango de operación para el tiempo en el salón es de  $13,10 \pm 0,31$  s y en el laboratorio es de  $12,54 \pm 0,14$  s. En la **Figura 26** se analiza el grado de variación (factor alfa) para la tecnología y se observa que tiene un comportamiento muy estable con un rango de  $0,665 \pm 0,004$  en el Salón y de  $0,677 \pm 0,005$  en el Laboratorio.

### Figura 25

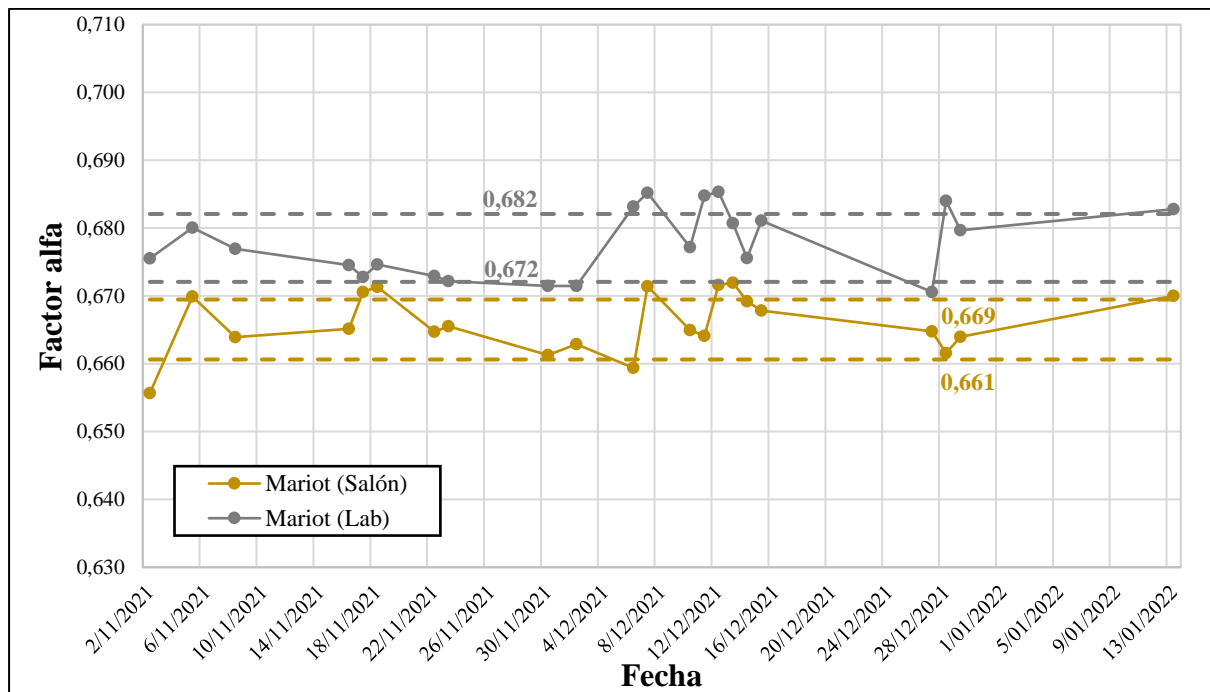
*Comportamiento en tecnología BMC entre el Gallenkamp (°GS) - Mariot (s) del Salón y Laboratorio*





**Figura 26**

*Comportamiento en tecnología BMC del grado de variación (factor alfa) del Salón y Laboratorio*

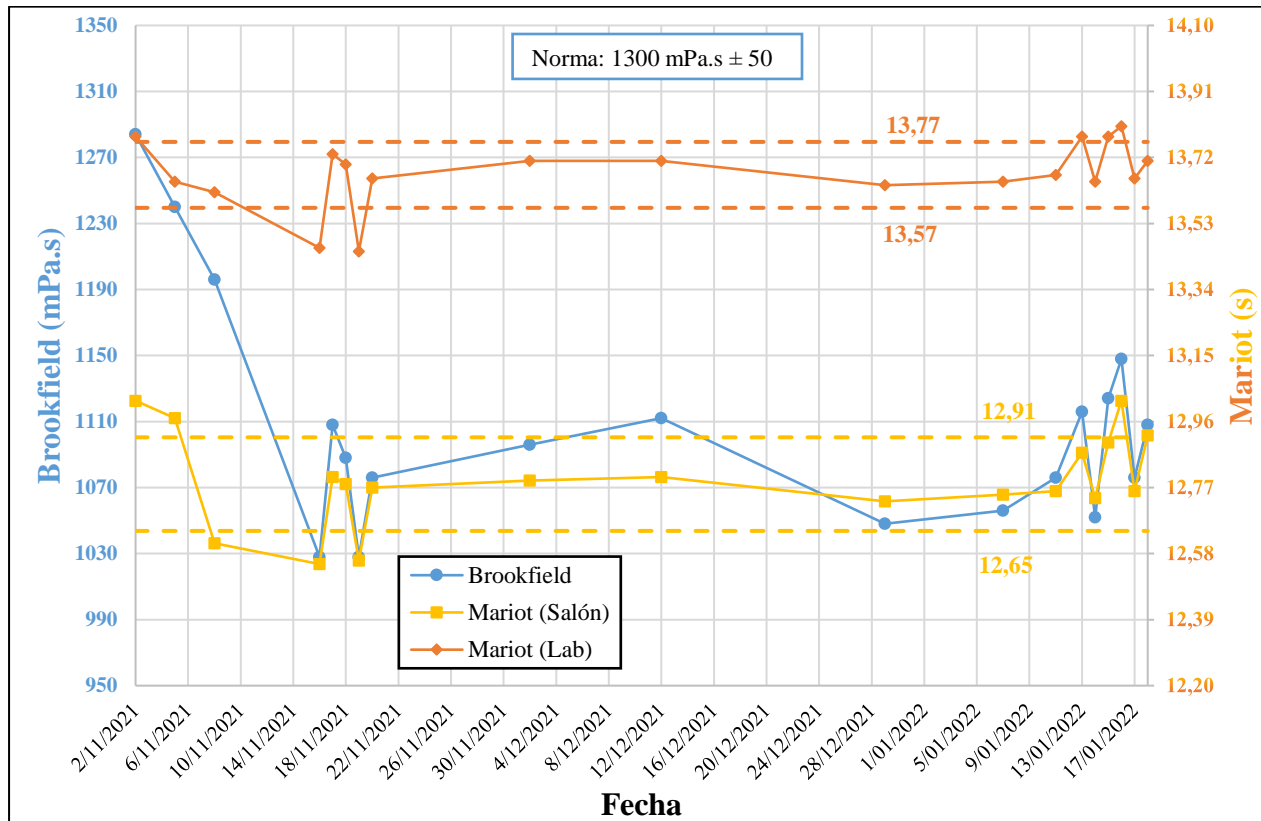


En la **Figura 27** y **Figura 28** se observa el comportamiento en tecnología CBC, tanto en el Salón como en el Laboratorio, entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) y el Gallenkamp (°GS) - Mariot (s), respectivamente. En la **Figura 27** se observa que el comportamiento del Mariot en ambas locaciones corresponde correctamente a las variaciones de la viscosidad: las curvas del Mariot son casi idénticas, pero a diferentes rangos de tiempo. Para esta tecnología, la pasta simula ser más fluida en el Salón que en el Laboratorio, y esto se puede deber a lo explicado anteriormente para la tecnología BMC; adicionalmente, las condiciones de esta tecnología son diferentes: la pasta se trabaja a 40°C y el cambio de temperatura con el ambiente no es tan drástico como para afectar la medida. En la **Figura 28** se observa que el comportamiento del Mariot corresponde correctamente a las variaciones de la fluidez: una aumenta cuando la otra disminuye. Ambas tendencias del Mariot son similares como en la **Figura 27**, presentan las mismas tendencias y picos, pero a diferentes rangos de tiempo. Además, en este caso se percibe que en ambas locaciones las mediciones son muy estables y no presentan mucha variabilidad. El análisis estadístico permitió definir que el rango de operación para el tiempo en el Salón es de

12,78  $\pm$  0,13 s y en el Laboratorio es de 13,67  $\pm$  0,10 s. En la **Figura 29** se analiza el grado de variación (factor alfa) para la tecnología y se observa que tiene un comportamiento muy estable con un rango de 0,664  $\pm$  0,010 en el Salón y de 0,667  $\pm$  0,008 en el Laboratorio.

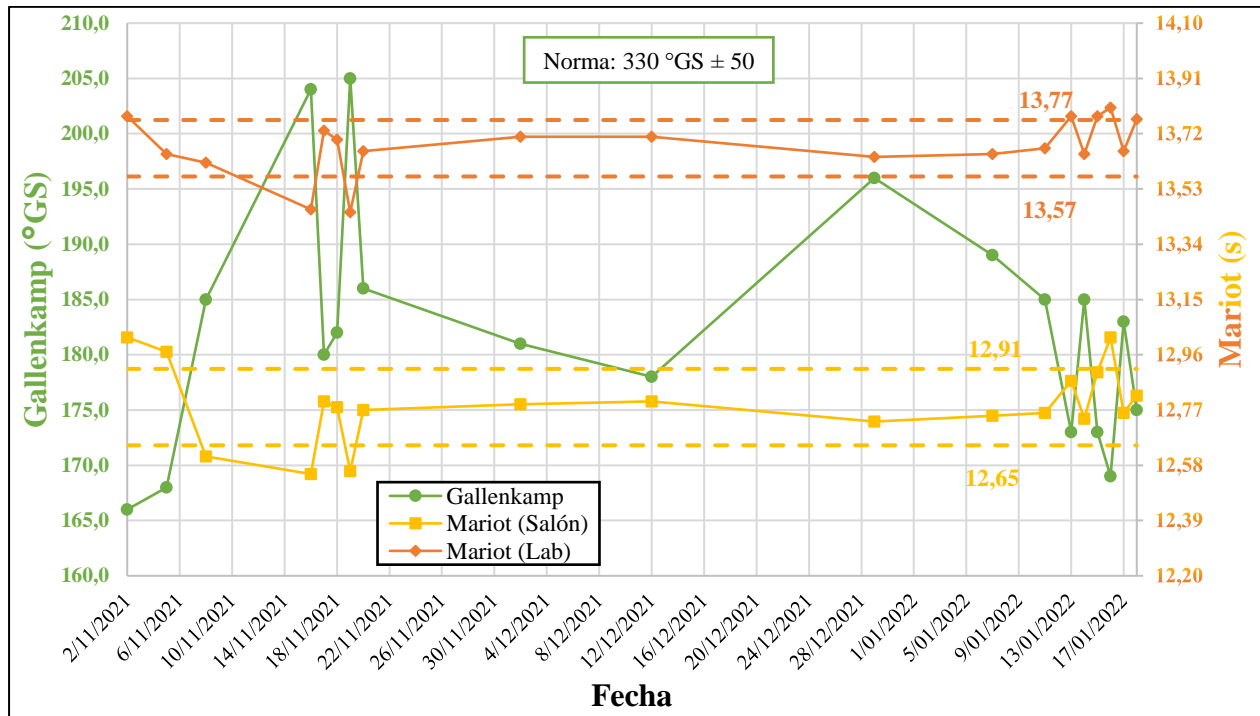
**Figura 27**

*Comportamiento en tecnología CBC entre el Brookfield (mPa.s) - Mariot (s) del Salón y Laboratorio*



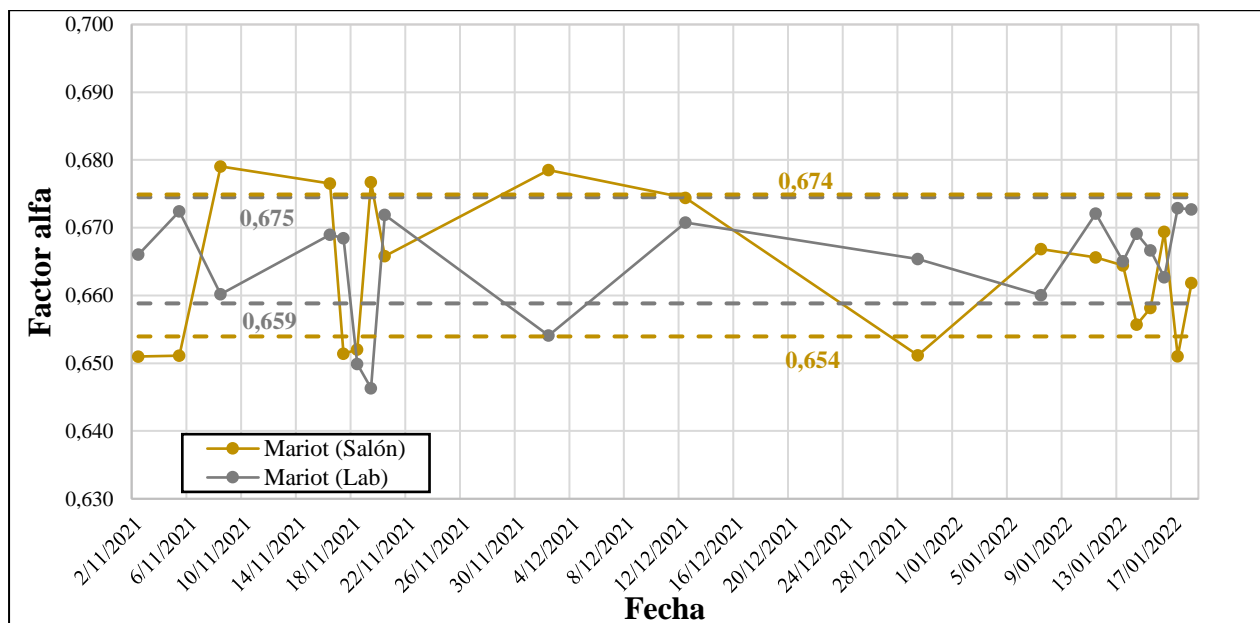
**Figura 28**

*Comportamiento en tecnología CBC entre el Gallenkamp (°GS) - Mariot (s) del Salón y Laboratorio*



**Figura 29**

*Comportamiento en tecnología CBC del grado de variación (factor alfa) del Salón y Laboratorio*



A pesar de los comportamientos tan opuestos que se presentaron en las dos tecnologías, con el viscosímetro Mariot se logra obtener un comportamiento periódico y estable. En las **Tabla 8** y **Tabla 9** se muestran un resumen de los rangos de operación para cada tecnología y se evidencia que el rango más alto para el tiempo es de apenas 0,2 s, lo que permite deducir que la medición de la viscosidad con el Mariot es aceptable ya que logra la reproducibilidad de los datos en un intervalo de trabajo reducido. Además, observando los datos de las figuras y el rango establecido, se obtiene que una gran cantidad de datos se encuentra dentro de los límites, lo que refleja una buena confiabilidad en la metodología, el instrumento y el rango.

**Tabla 8**

*Rangos óptimos de trabajo para el Mariot en cada tecnología*

Variable	Tecnologías			
	BMC salón	BMC lab	CBC salón	CBC lab
Media (s)	13,10	12,54	12,78	13,67
Rango (s)	0,31	0,14	0,13	0,10
Límite inferior (s)	12,79	12,40	12,65	13,57
Límite superior (s)	13,41	12,68	12,91	13,77

**Tabla 9**

*Rangos óptimos de trabajo para el factor alfa en cada tecnología*

Variable	Tecnologías			
	BMC salón	BMC lab	CBC salón	CBC lab
Media	0,665	0,677	0,664	0,667
Rango	0,004	0,005	0,010	0,008
Límite inferior	0,661	0,672	0,654	0,659
Límite superior	0,669	0,682	0,674	0,675

## 5 Conclusiones

La implementación del hidrómetro permitió establecer rangos de trabajo para los diferentes tamaños de partículas, en donde el rango para los finos se encuentra entre 36,38 - 38,82%, los medios entre 30,49 - 32,11% y los gruesos entre 30,25 - 31,75%. Comparando las tendencias de ambos equipos, hidrómetro y sedigraph, a pesar de que los porcentajes se alejan unos de otros, conservan la misma diferencia durante el tiempo, mostrando un comportamiento periódico y estable. Lo anterior permite asegurar que la medición del DTP con el hidrómetro es confiable para mostrar tendencias o posibles cambios que se pueden corroborar con mediciones posteriores. Menos confiable es la medición de finos, ya que sus variaciones son las más altas con respecto a los demás tamaños, lo que se refleja en su alto rango.

Se logró estandarizar y desarrollar un AOE para el uso e implementación del Mariot, el cual ofrece una alternativa rápida y sencilla para estimar la viscosidad de las pastas en las diferentes tecnologías. Con los rangos establecidos y teniendo las homologaciones entre los tres diferentes equipos, es posible conocer mediante el tiempo de flujo el comportamiento reológico de la pasta, su evolución en el tiempo y los factores que la pueden estar afectando. El estudio de Brookfield – Mariot y Gallenkamp – Mariot se ejecutó para validar cuál par era más consistente y de acuerdo con los resultados obtenidos, se deduce que es mejor observar las tendencias con el Brookfield.

La implementación del Mariot permitió observar que la medición no solo depende de la viscosidad: existen otros factores que inciden más en la medición del tiempo, como los porcentajes de tamaño de las partículas que constituyen la pasta y la forma de empaquetamiento. La segunda formulación establecida por la planta es una pasta viscosa, pero con alta fluidez, algo aparentemente contradictorio pero que se explica por la conformación interna de la pasta y la generación de enlaces. Se lograron establecer rangos de trabajo para las pastas frías ( $\sim 12 \pm 0,2$  s) y calientes ( $\sim 12 \pm 0,31$  s en Salones y 0,14 s en Laboratorio) de las diferentes tecnologías con intervalos de trabajo reducidos, lo que refleja la confiabilidad del instrumento.

Para las pastas calientes, entre más alta sea la temperatura de acondicionamiento en el Salón de Colaje, la pasta se comportará más fluida en el Laboratorio que en el Salón debido a las variaciones repentinas de la temperatura que pueden afectar la medición. Los rangos establecidos representan un avance para iniciar la implementación del Mariot a corto y largo plazo haciendo

uso de la AOE desarrollada para el método. Con esto se lograr reducir el tiempo de respuesta permitiendo tomar acciones predictivas que garanticen el buen desempeño de las pastas.

### Referencias

- García, M. C. J., Medina, C. H., Asistentes, P., Núñez, ; D, García, J., Medina, H., & Núñez, D. (2008). El método del hidrómetro: influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de La Habana. *Cultivos Tropicales*, 29(2), 21–26. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362008000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362008000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- mym Instrumentos técnicos. (2019). *Tamiz ¿que es? - mym instrumentos tecnicos*. <https://www.myminstrumentostecnicos.com/equipos-de-laboratorio/tamices/-tamiz-que-es/>
- Organización Corona. (n.d.). *Curso de reología*. 1–93.
- Organización Corona. (2014). *Procesos de preparación de pasta S&L*.
- Pérez, L. (2005). *INSTITUTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL AREA DE HIDRÁULICA CÁTEDRA DE HIDRÁULICA APLICADA A LA INGENIERÍA SANITARIA TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN*. [https://cms.fi.uba.ar/uploads/institutos\\_teoriasedimentacion\\_8d6be3a941.pdf](https://cms.fi.uba.ar/uploads/institutos_teoriasedimentacion_8d6be3a941.pdf)
- Perry, R., & Den Green. (2001). *Manual del Ingeniero Químico - Perry - 6ed.pdf*.
- ZSCHIMMER & SCHWARZ. (2021). *¿Qué es un agente defloculante y para qué se utiliza en cerámica? - ZS España*. <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-es-un-agente-defloculante-y-para-que-se-utiliza-en-ceramica/>

## **Anexos**

### **Anexo 1. Análisis de Operación Estándar (AOE) para la medición de la viscosidad con el Mariot**