

**ESTUDIO DE SEDIMENTACIÓN DE SUSPENSIONES Y SU EFECTO EN LA REDUCCIÓN
DE HUMEDAD EN LA PASTA EN PROCESO DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO**

Presentado Por
Carlos Augusto Orozco Ríos
IMM

Trabajo Presentado
Como Requisito Para Optar al Título de
Magíster en Ingeniería de Materiales y Procesos

Director
M. Oswaldo Bustamante Rúa
IMM, MSc, PhD



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLIN
2009**

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios dueño de todo, a mi familia en especial a mi madre quien estuvo a mi lado siempre, al Profesor Oswaldo Bustamante director de este proyecto por enseñarme y hacerme creer en la ciencia, al Ingeniero Juan Eugenio Monsalve de Argos quien gestionó el permiso en la empresa para poder estudiar la maestría y a quienes no menciono pero aportaron. Gracias

AGRADECIMIENTOS

A Cementos Argos y su Gerencia de Investigación y desarrollo en cabeza del Ingeniero Tomás Restrepo quien patrocinó este proyecto, al grupo del cemento de la Universidad Nacional sede Medellín, al Profesor Oscar Jaime Restrepo por su ayuda, a los profesores de la Universidad de Concepción Chile por recibirnos y aportarnos en esta tesis.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	7
ANEXOS	7
ECUACIONES	7
GLOSARIO.....	8
RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2.1 ANTECEDENTES	13
2.1.1 Zonas de sedimentación.....	13
2.1.2 Modelo de Kynch para la sedimentación en batch.....	14
2.1.2.1 Ecuación de continuidad.....	14
2.1.2.2 Consideraciones del modelo.....	14
2.1.2.3 Modos de sedimentación.....	16
2.1.3 Efecto de la electroreología en la sedimentación de suspensiones.....	18
2.1.3.1 Potencial Z.....	18
2.1.3.2 Interacción y fuerzas que gobiernan la dinámica entre partículas.....	18
2.1.4 Floculación y sus efectos.....	22
2.2 CONCLUSIONES SOBRE LOS ANTECEDENTES.....	25
3. OBJETIVOS	27
3.1 OBJETIVO GENERAL	27
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
4. METODOLOGÍA	28
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	28
4.1.1 Caliza sin modificación de su DTP (MN).....	28
4.1.1.1 Función de distribución de densidad.....	29
4.1.1.2 Distribución tamaño de partícula.....	29
4.1.2 Caliza con DTP modificada (MM).....	30
4.1.2.1 Función de densidad (MM).....	31
4.1.2.2 Distribución tamaño de partícula (MM).....	32
4.1.3 Comparativo de la función de densidad entre MN y MM.....	32
4.1.4 Comparativo distribución tamaño de partícula entre MN y MM.....	33
4.1.5 Análisis de óxidos generales de la caliza.....	33
4.1.6 Análisis de óxidos generales calcita.....	34
4.1.7 Modificadores de pH.....	34
4.1.8 Tipo de floculante.....	34
4.1.9 Determinación pH natural de la pasta en planta.....	34
4.1.10 Viscosidad de la pasta a pH 8.....	35
4.1.11 Potencial Z calcita a pH 8.....	36

4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	37
4.2.1 Muestreo en campo y preparación de muestras.....	37
4.2.2 Montaje para las pruebas de sedimentación.....	37
4.2.2.1 Elementos utilizados en las pruebas.....	37
4.2.2.2 Toma de datos en las pruebas de sedimentación.....	37
4.2.3 Pruebas de sedimentación en batch.....	38
4.2.3.1 Pruebas de sedimentación variando pH (SF).....	38
4.2.3.2 Pruebas de sedimentación variando pH con floculación (CF).....	39
4.2.3.3 Comparativo pruebas de sedimentación SF y CF a pH natural.....	39
4.2.3.4 Pruebas de sedimentación variando pH y DTP sin floculante (SFDT).....	40
4.2.3.5 Pruebas de sedimentación variando pH y DTP con floculante (CFDT).....	40
4.2.3.6 Comparativo pruebas de sedimentación entre SFDT y CFDT a pH natural.....	41
4.2.3.7 Comparativo entre pH8SF y pH8SFDT a pH natural.....	41
4.2.3.8 Comparación entre pH8SF y pH8CFDT a pH natural.....	42
4.2.3.9 Comparación entre pH8CF y pH8SFDT a pH natural.....	42
4.2.3.10 Comparación entre pH8SF y pH11CF.....	43
4.2.4 Ensayos de reología.....	43
4.2.4.1 Reología de la pasta modificando el pH (SF).....	43
4.2.5 Ensayos medición de potencial Z.....	44
4.2.6 Mediciones de humedad final en etapa de compresión.....	45
4.2.7 Modelación del comportamiento de la humedad variando el pH.....	47
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49
6. CONCLUSIONES.....	55
7. RECOMENDACIONES.....	57
8. BIBLIOGRAFÍA.....	62
9. ANEXOS.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espesador con los puntos de alimentación, rebalse "agua clara" y descarga	12
Figura 2. Zonas de Sedimentación en batch (Tomado del artículo Thickening in the 20th century:	13
Figura 3. Curva de Sedimentación Típica.....	16
Figura 4. Modos de Sedimentación.	17
Figura 5. Potencial Z. Esquema de la teoría de la doble capa.	18
Figura 6. Esquema de atracción - repulsión eléctrica según la distancia entre coloides.	19
Figura 7. Potencial Z de diferentes minerales.	20
Figura 8. Variación de la viscosidad y velocidad de sedimentación con el pH de la suspensión	20
Figura 9. Potencial Z y su Efecto en la Porosidad de una Suspensión de Anastasa.....	21
Figura 10. Potencial Z y su Efecto en el Esfuerzo de Cedencia en Suspensiones de Anastase.....	22
Figura 11. Tipos de Floculación Según Características del Floculante	23
Figura 12. Cambios de potencial Z con diferentes adiciones y tipo de polimero.	24
Figura 13. Diferencias del compressive yield stress según la carga del floculante.....	25
Figura 14. Diagrama metodología de trabajo	28
Figura 15. Función de Densidad Caliza	29
Figura 16. DTP Caliza.....	30
Figura 17. Función de Densidad y DTP Caliza Preclasificada	31
Figura 18. Función de Densidad Caliza con Granulometría Modificada	31
Figura 19. DTP caliza con Granulometría Modificada	32
Figura 20. Comparativo Función de Densidad Caliza MN y MM.....	33
Figura 21. Comparativo DTP Caliza MN y MM.....	33
Figura 22. Reograma caliza MN a <i>pH</i> Natural.....	36
Figura 23. Curvas de Sedimentación de la Pasta SF a Diferente pH.....	38
Figura 24. Curvas de Sedimentación Pasta CF a Diferente pH	39
Figura 25. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF y CF a pH 8.....	39
Figura 26. Curvas de Sedimentación Pasta SFDT a Diferente pH.....	40
Figura 27. Curvas de Sedimentación Pasta CFDT a Diferente pH	40
Figura 28. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SFDT y CFDT a pH 8	41
Figura 29. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF y SFDT a pH 8	41
Figura 30. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF y CFDT a pH 8	42
Figura 31. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta CF y SFDT a pH 8	42
Figura 32. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF a pH 8 y Pasta CF a pH 11	43
Figura 33. Viscosidad y Yield Stress de La pasta a Diferente pH	44
Figura 34. Medición del Potencial Z Calcita sin Floculante y con Floculante.....	45
Figura 35. Humedades Finales Pruebas Batch (SF,CF)	46
Figura 36. Humedades Finales Pruebas batch (SFDT, CFDT)	46
Figura 37. Modelación Curvas (SF,CF)	47
Figura 38. Modelación Curvas (SFDT,CFDT).....	48
Figura 39. Esquema Preparación Floculante con cilindros concéntricos	58
Figura 40. Preparación de Floculante con el uso de Toberas	59
Figura 41. Diferentes tipos de espesadores según su diseño y funcionalidad.....	60
Figura 42. Gráfico de Control Sedimentación (SF).....	61
Figura 43. Gráfico de Control Sedimentación (CF)	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Óxidos Generales de la Caliza	34
Tabla 2. Óxidos Generales Calcita	34
Tabla 3. Muestreo pH Pasta en Proceso	35
Tabla 4. Datos Viscosidad Pasta sin Flocular.....	43
Tabla 5. Datos Potencial Z Calcita.....	44
Tabla 6. Valores de humedad en la etapa final de sedimentación batch	45

ANEXOS

Anexo 1. Datos Función de Densidad MN.....	64
Anexo 2. Datos DTP MN.....	65
Anexo 3. Datos Función de Densidad MM	66
Anexo 4. Datos DTP MM	67
Anexo 5. Datos Batch SF.....	68
Anexo 6. Datos Batch CF.....	69
Anexo 7. Datos Batch SFDT	70
Anexo 8. Datos Batch CFDT.....	71
Anexo 9. Datos Muestreo pH Espesador.....	72
Anexo 10. Distribución Puntos de Muestreo Espesador	72
Anexo 11. Datos Oxidos Generales Caliza.....	73
Anexo 12. Óxidos Generales de la Pasta en Planta.....	74
Anexo 13. Datos Reología Pasta SF	75
Anexo 14. Flujograma Espesadores Planta Cairo	76
Anexo 15. Probeta graduada en mm para pruebas de sedimentación	77
Anexo 16. Probeta con perforaciones para medir humedad	77
Anexo 17. Reómetro AR 2000 Utilizado Para pruebas Reológicas.....	78
Anexo 18. Medidor de Densidad para la Medición de Humedad en la Pasta	78
Anexo 19. Representación Repulsión Estérica "acolchonamiento" de las Partículas por el Floculante (cemento)	79

ECUACIONES

Ecuación 1. Modelo de Sedimentación de Kynch	14
Ecuación 2. Modelamiento humedad vs pH (SF, CF)	48
Ecuación 3. Modelamiento humedad vs pH (SFDT, CFDT).....	48

GLOSARIO

MN: Muestra de pasta caliza sin modificación de su DTP

MM: Muestra de pasta Caliza con modificación en su DTP

SF: Muestra de pasta sin flocular

CF: Muestra de pasta con floculante

SFDT: Muestra de pasta sin floculante y con variación de distribución de tamaño de partícula.

CFDT: Muestra de pasta con floculante y con variación de distribución de tamaño de partícula.

DTP: Distribución de tamaño de partícula.

ZPC: Potencial Z igual a cero

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo identificar y correlacionar las principales variables que afectan el proceso de sedimentación de pasta de carbonato (caliza) que es el mineral principal para el proceso de fabricación de clinker en la industria cementera, con mayor interés en las etapas de sedimentación final en donde la eliminación de agua se hace en un régimen de compresión, régimen en el cual el efecto de las cargas superficiales de las partículas (Potencial Z) constituyentes del material y las variables que modifican estas cargas tienen una gran influencia en la reología de la pasta y por consiguiente gobierna en gran medida este fenómeno. Es por esto que como punto de partida se definen las variables de pH , DPT y adición de floculante como actores que afectan la sedimentación según estudios previos referenciados y que se han realizado para otros materiales.

Las pruebas realizadas son de sedimentación tipo batch en probetas de un litro variando el pH de las suspensiones entre 7 y 11, con cambio en la DTP de la pasta obteniendo una distribución más gruesa, cada ensayo con muestras sin floculante y con floculante adicionado.

Como resultados relevantes se obtuvieron correlaciones entre la modificación de pH con la adición de floculante y la capacidad de compresión de la pasta en la etapa final de sedimentación, a esto se le suma el efecto que se tiene con el cambio de DTP de la pasta a una distribución más gruesa lo cual mejora considerablemente la compresión y por lo tanto la reducción de humedad del sedimento final obtenido.

Con base en lo anterior, las variables medidas de Potencial Z , viscosidad y esfuerzo de cedencia medidos para cada uno de los escenarios de sedimentación permitieron encontrar también correlación en los efectos que tiene el cambio de potencial Z con los cambios de pH , adición de floculante y sus efectos en la viscosidad y esfuerzo de cedencia en la pasta con la respectiva respuesta en la capacidad de compresionarse en la etapa final de sedimentación.

Adicional a los resultados encontrados se identificaron otros fenómenos que afectan la dinámica de la sedimentación como el esfuerzo de cedencia mostrado al inicio de todas las pruebas de sedimentación el cual retrasa el inicio del proceso y las variables que modifican este esfuerzo de cedencia. También el efecto y la dinámica que se genera en un proceso de sedimentación dependiendo del carácter del floculante adicionado y de las características físico-químicas de la suspensión, pues dependiendo en gran medida del tipo de sedimentación (reducción de humedad) que se desee para el proceso, es el tipo de floculante que se debe adicionar.

Palabras claves: Sedimentación, zona de compresión, pH , potencial Z y reología.

ABSTRACT

The aim of this study is to identify and to know the correlation of the principle variables that affect the sedimentation process of limestone slurry, it slurry is the raw material for the clinker production. The zone of interest for this study is the compression zone which is one of the most important in the sedimentation and is the final stage of this process, there the interaction between the particles is higher and the surface potential of the particles (Potential Z) has an important role in the reduction of the humidity. There are different variables that affect this potential and therefore it modifies the rheology of the slurry, hence the variables that were selected to the study are pH, particle size distribution (PSD) and admixture of flocculant, these variables has been study in others research referenced.

The batch sedimentation test was carry out in vessels of one liter with variation of pH between 7 – 11, changes of PSD to have a coarse distribution that improve the sedimentation behavior, some test has the flocculant admixture, it depend of the experiments design.

Important results were obtained on the relation between pH variation and the compression capacity in the final stage, the variation of the PSD improves the free velocity of sedimentation and the capacity of compression and therefore low water content in the final sediment.

Whit the results found above, the variables as Potential Z and viscosity was measure for the same variation in the pH and addition of flocculant in the slurry. The results show a correlation over the effect of the pH variation and flocculant addition in the Potential Z and the slurry rheology. (Viscosity and yield stress), these variables are the principal factor that has the control in the compression capacity in the last stage of sedimentation.

In addition of these result was possible to identify other factors that affect the sedimentation dynamics, for example the yield stress that the slurry show at the begin of the sedimentation, that behavior produce a retardation of the sedimentation time, producing long residence time of the slurry in the thickeners, for this the variables that affect this yield stress were found too. And final was possible to know what behavior has the sedimentation with the characteristic of the flocculant (charge density, molecular mass and character of charge).

Key words: Sedimentation, compression zone, pH, potential Z, rheology

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de producción de cemento Pórtland por vía húmeda, siempre ha existido un problema asociado al alto consumo calórico requerido para la evaporación del agua que forma parte de la suspensión que acompaña los minerales que ingresan al horno de clinkerización.

La adición de agua al mineral se realiza básicamente por dos razones, primero para facilitar el transporte por bombeo del mineral desde la mina o área de molienda de crudo a la zona de sedimentación y homogeneización, segundo para la homogeneización de la pasta en balsas que son básicamente tanques de almacenamiento con inyección de aire a presión, su objetivo es conseguir una homogeneidad química en la pasta alimentada a los hornos de clinkerización. Es por esto que al tener un control en la humedad de la pasta alimentada a los hornos de producción de clinker, representa un ahorro de energía calórica por menor consumo de calor (menos consumo de combustible) y posibles rediseños al interior del horno en la zona de cadenas y distribución de ladrillo refractario, adicional a los beneficios de tipo ambiental en la reducción de emisión de gases que impactan fuertemente en el ambiente y en los costos operacionales del proceso.

La compresión de suspensiones regula fuertemente la reducción de humedad de las pastas o sedimentos que se producen en las descargas de los sedimentadores y que luego se alimentan a los hornos de clinkerización.

Existe evidencia según estudios anteriores como los de JAN GUSTAFSSON, ERIK NORDENSWAN, JARL B. ROSENHOLM [5] y R BURGER [22], sobre el efecto de diferentes variables de las suspensiones sobre el proceso de separación sólido-agua en la sedimentación y de sus consecuencias en la retención de humedad en los sedimentos finales que salen de los espesadores. Sin embargo, estas variables están poco descritas así como el impacto de ellas sobre el proceso y el tipo de material procesado.

Lo anterior permite deducir que la capacidad de predicción y control de la eliminación de la humedad en las pastas es relativamente débil, frente a perturbaciones reológicas que se puedan presentar en las plantas cementeras en su operación habitual.

Dentro del anterior escenario, algunas de las variables más importantes están orientadas al control de *pH* JAN GUSTAFSSON, ERIK NORDENSWAN, JARL B. ROSENHOLM [5], dosificación y manejo de floculantes según su tipo, su efecto sobre la reología y electro reología de dispersiones NASSER, AE. JAMES [2], ligado al estudio de la presión de poro, Fernando Concha et al [1] dentro del sedimento que permite la eliminación de agua de los intersticios, con el consecuente incremento de la capacidad de los sedimentadores y de reducción de la humedad de los sedimentos como objetivo final buscado.

Normalmente, las operaciones de separación sólido-líquido, están afectados fuertemente por variables tales como Distribución de Tamaños de Partículas "DTP" JAN GUSTAFSSON, ERIK NORDENSWAN, JARL B. ROSENHOLM [5] de la fase mineral que forma parte de las suspensiones, su viscosidad y el esfuerzo de cedencia de las mismas, Fernando Concha et al [1], la fuerza iónica desarrollada por los potenciales superficiales de las partículas, CRISTOPHER M. NEUBAUER, MING YANG, HAMLIN M. JENNINGS [11] y la concentración de iones determinantes de potencial disueltos en las suspensiones concentradas, lo que controla la formación de sedimento compactado en la descarga de los sedimentadores (**ver figura 1**).

Sin embargo, la hidrodinámica de estas partículas posee además de los controles reológicos, elementos que afectan la separación provenientes de las variables de diseño y operacionales del sedimentador (*ver figura 1*), tales como tipo de alimentación, tipo de dosificación de floculantes, tipos de floculantes entre otros que generan escenarios de sedimentación completamente diferentes a los esperados.

Las anteriores premisas tienen un control sobre la sedimentación de suspensiones teniendo en cuenta una correcta operación de los espesadores, los cuales tienen unas condiciones de trabajo óptimas que benefician el proceso, sin afectar la dinámica de la sedimentación. Es por esto que una operación en continuo del espesador (alimentación y descarga de la pasta simultánea), junto a una alimentación en régimen laminar para evitar perturbaciones, son operaciones básicas y necesarias bajo las cuales un espesador debe trabajar.

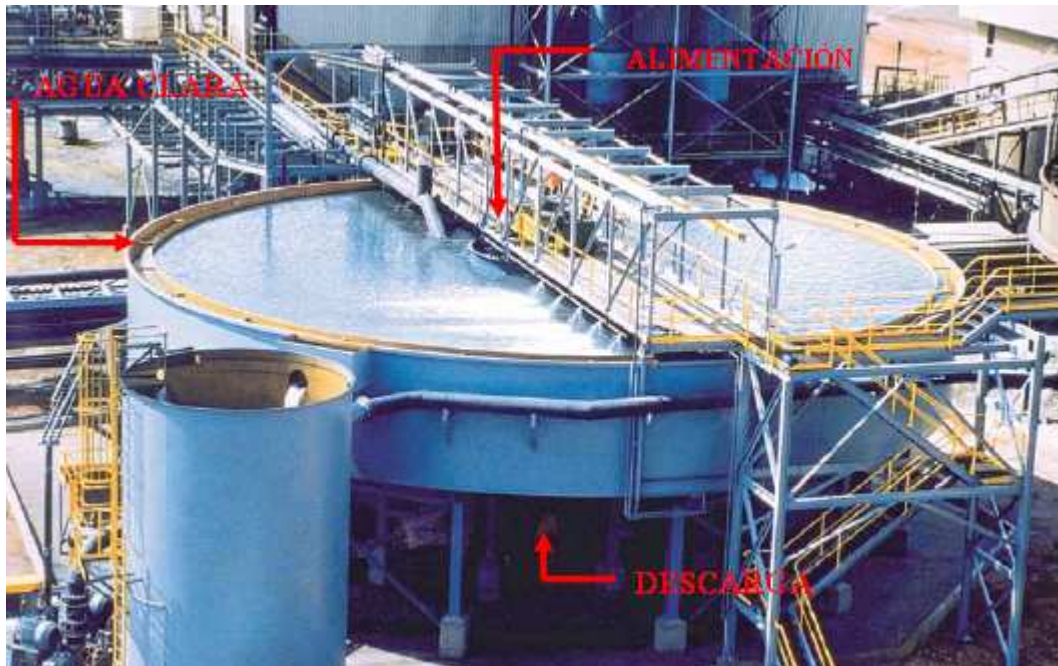


Figura 1. Espesador con los puntos de alimentación, rebalse "agua clara" y descarga

2. GENERALIDADES

2.1 ANTECEDENTES

En la sedimentación se estudia el proceso de separación sólido-líquido en la cual una dispersión es sometida a la separación de dos corrientes; una corriente en la cual la fase discreta o sistema particulado se concentra y otra enriquecida de agua, la cual suele ser agua solamente y se denomina “agua clara” (**ver figura 1**). Este fenómeno fue primero estudiado por Hazen en 1904, Fernando Concha, R Burger [6] y donde por primera vez se analizaron las variables que afectan la sedimentación de partículas sólidas en una suspensión diluida.

2.1.1 Zonas de sedimentación.

Los estudios realizados por Coe y Clevenger en 1916 Fernando Concha, R Burger [6], identificaron que la sedimentación de suspensiones homogéneas generan 4 zonas en la columna de sedimentación que desde la parte superior hasta la parte inferior de la columna fueron denominadas como: A, zona de agua clara, B zona de concentración inicial constante, C es una zona de concentración variable y D es la zona de compresión (**ver figura 2**).

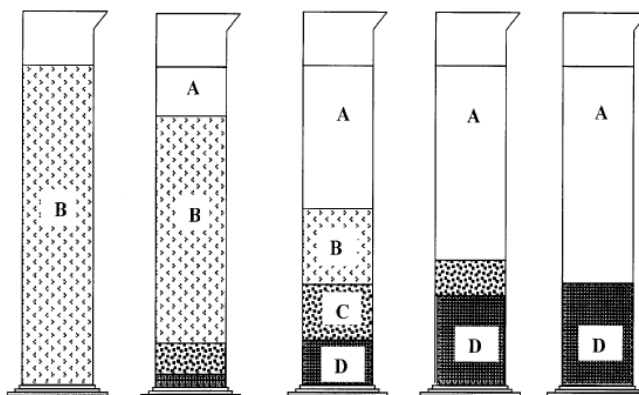


Figure 2— Batch settling of a compressible pulp according to Coe and Clevenger (1916).

Figura 2. Zonas de Sedimentación en batch (Tomado del artículo Thickening in the 20th century: an historical perspective. F. Concha and R. Burger May 2003)

Varios autores describieron la sedimentación de suspensiones mediante variaciones de la ecuación de Stokes o por modelos empíricos (Egolf and McCabe 1937; Ward and Kammermeyer, 1940; Work and Kohler, 1940; Kammermeyer, 1941), pero sin contribuciones realmente importantes en la modelación de la sedimentación. El desarrollo del conocimiento en sedimentación por Coe y Clever's (1916) hasta la mitad del siglo 20 fue basado en balances macroscópicos del sólido y el fluido en sedimentación en probetas y sobre la observación de diferentes concentraciones establecidas en el sedimentador. Tomado F. Concha and R. Burger [6].

2.1.2 Modelo de Kynch para la sedimentación en batch.

2.1.2.1 Ecuación de continuidad.

En 1952 el matemático G.J. Kynch de la Universidad de Birmingham en Gran Bretaña, presentó en su celebre artículo “Una teoría de sedimentación” una teoría cinemática de la sedimentación basada en la propagación de concentración de ondas en la suspensión. La suspensión es considerada como un continuo, llamada suspensión ideal y el proceso de sedimentación es representado por la ecuación de continuidad de la fase sólida, F. Concha [1].

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial f_{bk}}{\partial z} = 0, \dots, 0 \leq z \leq L \dots t > 0$$

Ecuación 1. Modelo de Sedimentación de Kynch

φ es la fracción volumétrica de sólidos

$f_{bk}(\varphi) = \varphi v_s$ es la densidad del flujo de sólidos

La función satisface

$f_{bk}(\varphi) = f_{bk}(\varphi_{\max}) = 0$ and $f_{bk}(\varphi) < 0$ para $0 < \varphi < \varphi_{\max}$; y v_s es la velocidad de la fase sólida.

2.1.2.2 Consideraciones del modelo.

El concepto de sedimentación de una suspensión ideal definida en la teoría de Kynch es la mezcla de partículas sólidas y un fluido, contenidos en una probeta, suponemos que se satisface las propiedades para que el sistema sólido – fluido pueda ser considerado como dos medios continuos superpuestos.

Definiendo como V_s y V_f las velocidades del sólido y el fluido respectivamente, las suposiciones realizadas según el libro del Profesor Fernando Concha, Manual de Filtración y Análisis, 2001 son:

- 1- Todas las partículas sólidas son pequeñas, del mismo tamaño, forma y densidad.
- 2- El sólido y el fluido de la mezcla son incompresibles.
- 3- No hay transporte de masa entre componentes.
- 4- La velocidad relativa sólido-fluido $u = V_s - V_f$ en la mezcla es una función de la concentración de sólidos solamente.
- 5- La concentración de partículas es la misma en toda la sección transversal del recipiente. No hay efecto pared.
- 6- La suspensión tiene una concentración inicial homogénea.
- 7- En el fondo de la columna hay un incremento continuo y rápido de concentración desde la inicial φ_0 hasta la final φ_{∞} .

La suposición 1, junto a la 3, permiten establecer una velocidad única para el componente sólido y la suposición 2 define densidades de materiales constantes para cada componente. La suposición 4, clave en la teoría de Kynch (1952) lleva implícita la suposición que las fuerzas convectivas son despreciables.

Una mezcla que cumple las propiedades 1 a 4 recibe el nombre de suspensión ideal, Shannon y Tory 1966. Bustos et al 1988^a, Concha y Bustos [32] y puede ser considerada como una superposición de medios continuos con dos componentes incompresibles.

La suspensión ideal es de mucha utilidad para las modelaciones y es equivalente en termomecánica con el concepto de un gas ideal, Jay D. Schieber, J. de Pablo [10]. La teoría de mezclas permite obtener un modelo matemático de una suspensión ideal muy cercano a una suspensión de pequeñas esferas de vidrio, Shannon y Tory 1966, Davies et al [29].

La concentración volumétrica de sólidos φ es dependiente de las tres dimensiones del espacio y tiempo, sin embargo la suposición 5 permite describir la sedimentación como un fenómeno uni – dimensional, tal que $\varphi = \varphi(z, t)$ significa que solo depende de una coordenada espacial y tiempo, esto significa que se desprecia los efectos de la paredes durante la sedimentación.

Las siguientes consideraciones se tienen en un proceso de Kynch para la sedimentación en Batch con una altura L de la suspensión inicial.

- a- Antes de comenzar la sedimentación la suspensión se homogeniza por agitación, de tal forma que su concentración sea constante.
- b- Cuando la sedimentación comienza, todas las partículas caen a la misma velocidad, de manera que se forma una interfase agua – suspensión en la parte superior de la columna, la que desciende a la misma velocidad que lo hacen las partículas. Esta etapa se denomina sedimentación libre (“*free settling*”). Existen algunos casos en que esto no se cumple, los que son analizados por Burger y Tory [29].
- c- Las partículas que llegan al fondo de la columna se acumulan haciendo que la concentración volumétrica de sólidos φ aumente rápidamente hasta ocupar toda la superficie disponible. El material en estas condiciones recibe el nombre de sedimento y su concentración es φ_{∞} . La superficie del sedimento o interfase suspensión – sedimento, se mueve hacia arriba a medida que nuevas partículas se le incorporan.
- d- En un punto determinado de la columna, pero bajo la interfase de agua – suspensión, la concentración de la suspensión permanece fija o aumenta con el tiempo.
- e- Utilizando un instrumento para medir concentraciones como el Been ans Sills (1981) se podría seguir el movimiento de una determinada concentración φ en la columna. El movimiento sería necesariamente hacia arriba a una velocidad llamada velocidad de propagación de la onda de concentración $\tilde{\varphi}$
- f- En un determinado instante y a una cierta altura la interfase agua – suspensión se encontrará con la interfase suspensión – sedimento (**ver figura 3**). Las coordenadas de este evento se denominan tiempo crítico y altura crítica y ellas definen el punto crítico el cual determina el fin de la sedimentación.

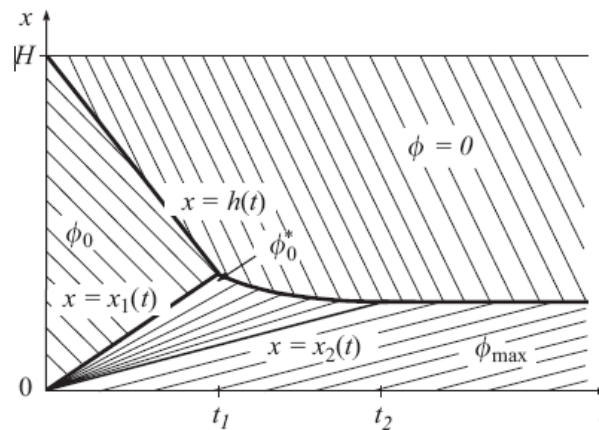


Figura 3. Curva de Sedimentación Típica

donde se muestran las Interfaces agua – suspensión, suspensión – sedimento y agua – sedimento en la gráfica tiempo vs altura. (Tomado del artículo Estimation of the batch-settling flux function for an ideal suspension from only two experiments- Stefan Diehl - 2007)

2.1.2.3 Modos de sedimentación.

Kynch en su trabajo (1952) mencionó los modos de sedimentación, como maneras en que una suspensión puede sedimentar, pero sin definir claramente el significado de éstos. Descripciones estrictas de este concepto fueron dadas por Bustos y Concha [22] y Concha y Bustos [32] que definieron modos de sedimentación (MS) como los posibles procesos de sedimentación Batch en Kynch (PSK) que una suspensión ideal puede cumplir, resolviendo la ecuación 1 mediante la solución por la teoría de características, F. Concha [1] pg 84-89. Los modos de sedimentación están enteramente determinados por la ecuación constitutiva para la densidad de flujo de sólidos y por la concentración inicial de la suspensión y reflejan la forma como la suspensión pasa de una concentración inicial ϕ_0 hasta una final ϕ_{∞} . A continuación se presentan los 5 modos de sedimentación principales presentados por Concha y Bustos [22].

El tipo de MS depende de cómo están separadas las zonas de concentración constante ϕ_0 y ϕ_{∞}

- MS-1 Una onda de choque
- MS-2 una discontinuidad de contacto seguida por una onda de rarefacción.
- MS-3 Una onda de rarefacción
- MS-4 Dos discontinuidades de contacto separadas por una onda de rarefacción
- MS-5 Una onda de rarefacción seguida por una discontinuidad de contacto

Las gráficas de cada uno de estos modos de sedimentación se muestran a continuación:

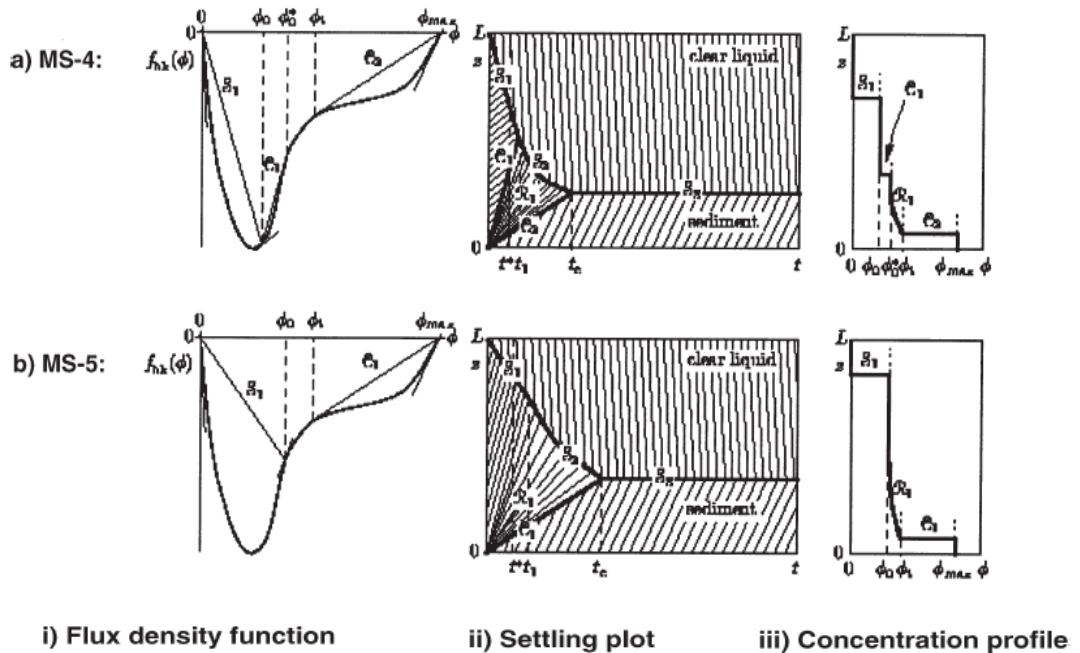
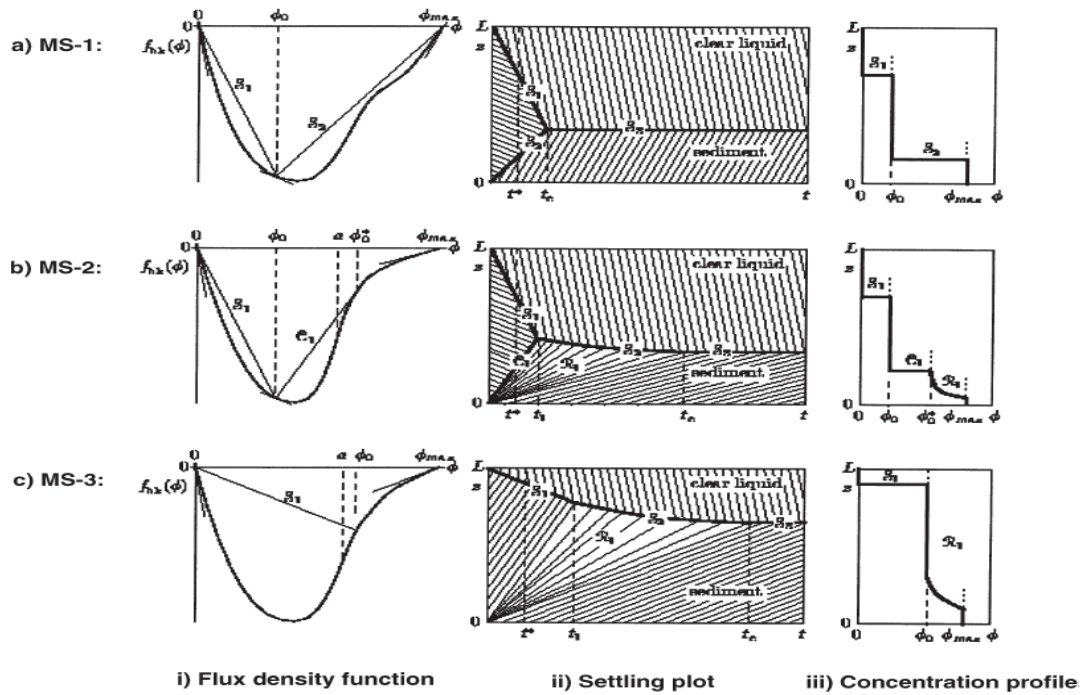


Figura 4. Modos de Sedimentación.

i) Función de densidad de flujo, ii) Gráfica de sedimentación, iii) Perfil de concentración
(Tomado del libro Manual de filtración y separación 2001, F. Concha)

2.1.3 Efecto de la electroreología en la sedimentación de suspensiones.

2.1.3.1 Potencial Z.

Dentro de los fenómenos que ocurren en la dinámica coloidal uno de los que mayor influencia tiene en el comportamiento de la suspensión es el potencial Z, este es la medida de la diferencia de potencial que se genera entre la carga electromagnética que tienen las partículas en su superficie y la nube de electrones que la rodea, el valor y su signo depende las características propias de las partículas y la fuerza iónica presente en la fase acuosa. La teoría de la doble capa describe este fenómeno en donde se pueden distinguir varias zonas o límites entre la partícula y el medio cargado de iones, el más cercano a la partícula es la llamada capa de Stern, la cual está formada por los iones que están adsorbidos sobre la propia superficie de la partícula y que son de signo opuesto a la superficie donde estos se ubican, la capa que sigue es llamada capa difusa y está compuesta por una nube densamente poblada de iones que son atraídos a la partícula pero repelidos por los iones componentes de la capa de Stern. En la **figura 5** se aprecia esquemáticamente como está formada la teoría de la doble capa.

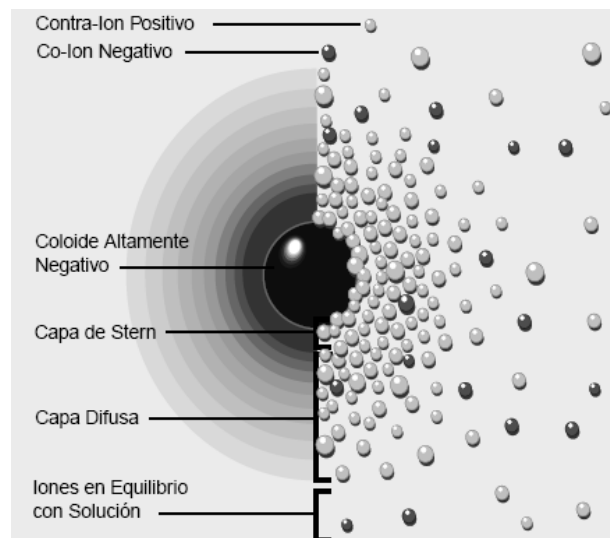


Figura 5. Potencial Z. Esquema de la teoría de la doble capa.
(Tomado del libro Colloids and surfaces)

2.1.3.2 Interacción y fuerzas que gobiernan la dinámica entre partículas.

La teoría y fundamentos de sedimentación anteriormente expuestos permiten definir las diferentes zonas de sedimentación y los mecanismos mediante el cual estas zonas se forman, obteniendo más claramente una localización de la zona donde se desarrolla el proyecto, pues no se pretende modelar las zonas libres de sedimentación que se producen en las etapas iniciales e intermedias de la sedimentación, el objetivo es modelar la reducción de humedad en las etapas finales de este proceso, el cual dentro del proceso de sedimentación y sobre todo en la etapa final de compresión se produce la reducción final de agua presente entre los intersticios de las partículas, F. Concha [1]. Uno de los primeros acercamientos a las variables que afectan la sedimentación se realizó en el año 1908 con autores como Nichols (1908), Forbes (1912), Clark (1915), Free (1916) and

Ralston (1916), los cuales estudiaron el efecto que tienen los sólidos, la concentración de electrolitos, grado de floculación y la temperatura del proceso en la sedimentación, F. Concha [6].

Este proceso está regido por una serie de variables conocidas y manejadas en el control de proceso de la industria como son la distribución de tamaño de partícula y otras no tan controladas como el pH de la solución y el efecto de adicionar floculantes. Estas dos últimas variables rigen de una manera directa la reducción final de agua en los intersticios de las partículas de la suspensión al modificar la carga superficial de las partículas (potencial Z) y los tipos de flóculos a formar. Si se modifican de una manera adecuada estas variables, relación entre Potencial Z y pH se puede alcanzar bajo una determinada circunstancia la coagulación espontánea, esto es cuando el potencial Z es igual a cero, punto que suele denominarse como zpc ("Zero point charge") como se aprecia en la **figura 7**, sin la necesidad de utilizar floculantes catiónicos o aniónicos, pues se genera una aglomeración espontánea, beneficiando las velocidades de sedimentación y en algunos casos una reducción máxima de humedad debido a que entre las partículas desaparece el potencial de repulsión electrostático (**ver figura 6**), permitiendo que el sistema particulado quede a expensas únicamente de las fuerzas de atracción tipo fuerzas atractivas de Van der Waals las cuales actúan obteniendo una agregación de partículas que aumenta la velocidad de sedimentación y la eliminación de agua entre intersticios. (Fernando Concha et al 2001).

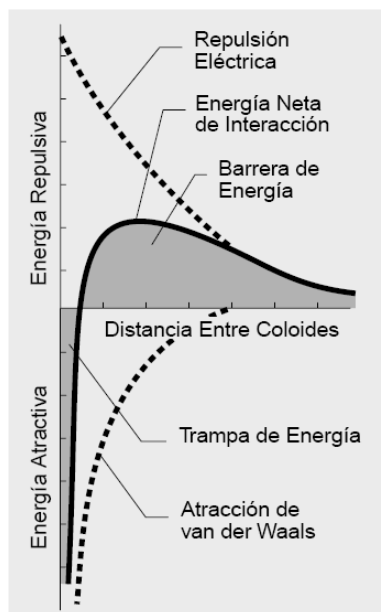


Figura 6. Esquema de atracción - repulsión eléctrica según la distancia entre coloides. Tomado de [5]

Como se menciona anteriormente, el potencial Z de una partícula se modifica con la concentración de iones presentes en la fase acuosa, es decir el pH de la suspensión es una de las variables que gobierna el potencial Z de las partículas constituyentes de la suspensión, afectando su dinámica de sedimentación. Es así como el potencial Z es una medida indirecta de la intensidad de repulsión o atracción de las partículas según el valor de esta variable y el efecto que estos balances de fuerzas tienen en la sedimentación de suspensiones.

Lo ideal para la sedimentación sin floculantes desde el escenario electro reológico es llevar la carga de las partículas al zpc (o electro neutralidad de las cargas en la superficie del mineral), para

que ocurra una sedimentación espontánea tanto en la zona de sedimentación libre como en la zona de compresión. Este Potencial Z además de ser modificado por las características del floculante adicionado, se puede modificar según el pH de la suspensión en que esté inmerso el sólido como, se observa en la **figura 7**.

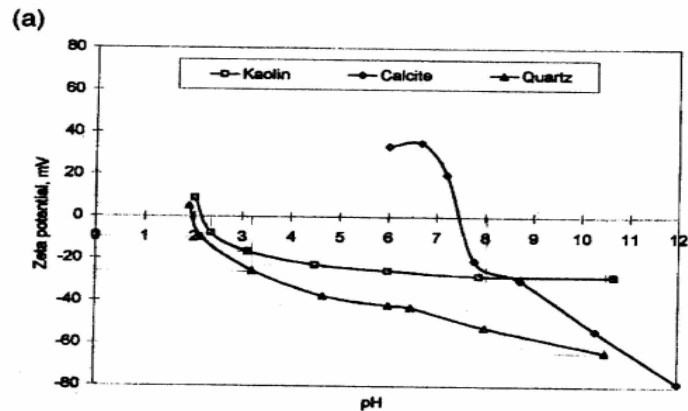


Figura 7. Potencial Z de diferentes minerales.
Tomado de Bascur [30]

A su vez la modificación del pH , cambia las condiciones reológicas de la suspensión (Bustamante *et al.*, [4], O. Bustamante, A. C.Gaviria y Y. Quinto, Mejoramiento de la reología de suspensiones de caolín, COLCIENCIAS, 2002, Bustamante, Aguilera y Gomez), afectando la velocidad de sedimentación y por lo tanto se requiere mayores tiempos de residencia de la pasta en los espesadores para que el proceso de sedimentación completo ocurra, esto se observa en las **figuras 8 a y 6b** en minerales de caolín, calcita y cuarzo.

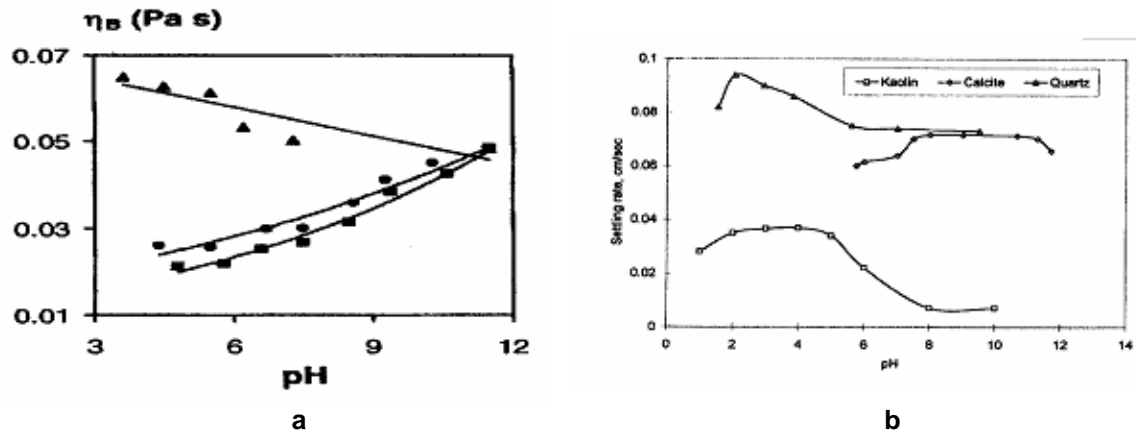


Figura 8. Variación de la viscosidad y velocidad de sedimentación con el pH de la suspensión
Tomado de Bascur [30]

Estudios desarrollados por Jan Gustafsson, Erik Nordenswan, Jarl B. Rosenholm [5] encontraron que modificando el potencial Z de un sedimento de anastasa (TiO_2) en un proceso de sedimentación se presentaba diferentes valores en la porosidad del sedimento final y por ende diferentes contenidos de humedad. El estudio estableció que reduciendo el Potencial Z la repulsión entre partículas era menor, predominando las fuerzas atractivas de Van der Waals, consiguiendo un sedimento poroso debido a la formación de flóculos por la atracción entre partículas; por el contrario si se aumentaba el potencial Z de las partículas en el sedimento final se presentan altas

repulsiones por las fuerzas eléctricas entre las partículas, produciendo sedimentos con altos valores de concentración de sólidos y por lo tanto baja porosidad favoreciendo la reducción de humedad entre los intersticios, favoreciendo la reducción de la humedad final (ver figura 9).

J. Gustafsson et al. / Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 212 (2003) 235–247

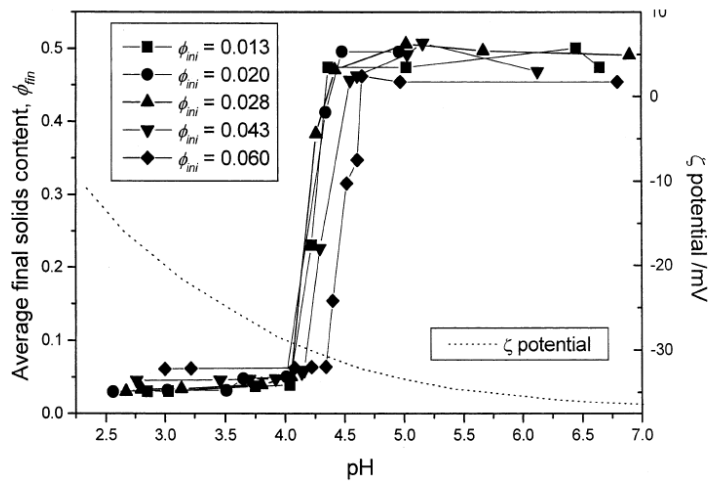


Figura 9. Potencial Z y su Efecto en la Porosidad de una Suspensión de Anastasa Tomado de [5]

Otro factor encontrado por este estudio para la suspensión de anastasa que influye en la porosidad del sedimento final del proceso de sedimentación, es el esfuerzo de cedencia o Yield stress, el cual es afectado por la interacción entre partículas, es decir por el potencial Z. Se encontró que con bajo Potencial Z la atracción entre partículas aumenta favoreciendo la formación de floculos, los cuales inciden en el aumento de esfuerzo compresivo necesario para la compresión del sedimento y por lo tanto dificulta la reducción de humedad, mientras con altas repulsiones entre partículas consecuencia de un potencial Z alto, el esfuerzo compresivo necesario para la compresión del sedimento es menor pues no ocurre aglomeración o floculos entre las partículas (ver figura 10).

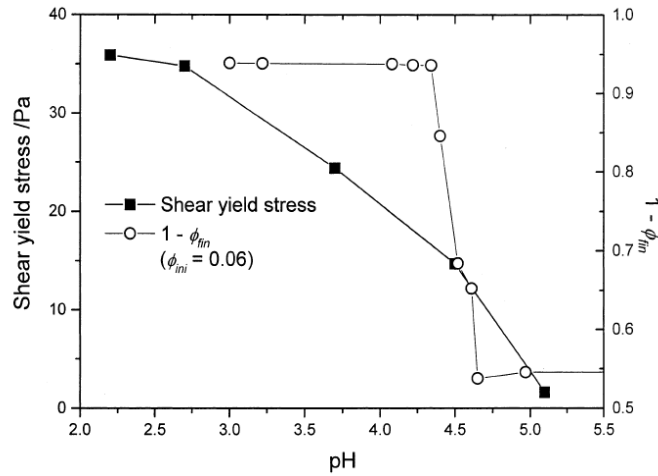


Figura 10. Potencial Z y su Efecto en el Esfuerzo de Cedencia en Suspensiones de Anastase Tomado de [5]

2.1.4 Floculación y sus efectos.

En algunos procesos de sedimentación de una pasta la coagulación de las partículas no es suficiente para conseguir los niveles de reducción de humedad requeridos, es por esto que se deben adicionar floculantes tipo polímero los cuales mejoran este proceso, allí actúan una cantidad de variables que en su mayoría no son conocidas o al menos controladas de una manera directa, ocasionando resultados no esperados o en el peor de los casos generando el resultado contrario, el de no sedimentación bajo ciertas condiciones determinadas, F. Concha [1]. Es por esto que para una correcta selección del tipo de floculante y cantidad a dosificar se debe conocer el tipo de sólido a sedimentar, el mecanismo o proceso mediante el cual se reduce la humedad (sedimentación, filtración, centrifugación etc), su carga superficial y los electrolitos presentes en la solución, estos determinarán el tipo de polímero necesario y tipo de floculación a realizar, F. Concha et al [1].

Los floculantes poliméricos son reactivos orgánicos con moléculas de cadena larga y altos pesos moleculares, las características más importantes en el floculante son la densidad de carga y peso molecular del polímero, Nasser and James [2]. Los polímeros pueden ser naturales como los polisacáridos, almidón entre otros, o sintéticos basados en materiales acrílicos provenientes de derivados del petróleo, tales como las poliacrilamidas de alto peso molecular.

La agregación de partículas en un medio acuoso mediante adsorción de largas cadenas de polímeros en varias partículas se llama floculación. De acuerdo a la forma en que el polímero actúa sobre las partículas se pueden distinguir diferentes tipos de floculación las cuales se mencionan a continuación F. Concha [1], pgs 327-341. **Ver figura 11.**

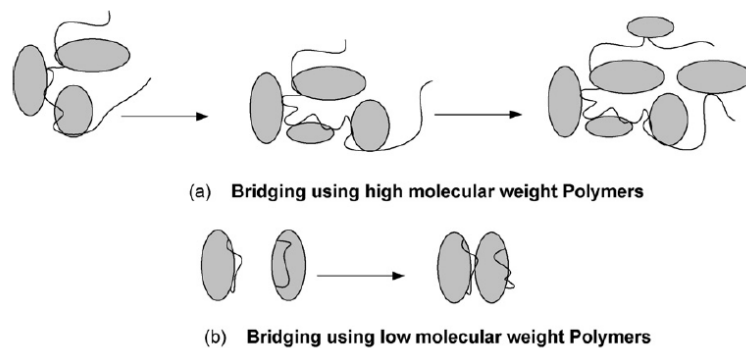


Figura 11. Tipos de Flocculación Según Características del Flocculante
Tomado de [2]

Flocculación por puentes de hidrogeno: La más importante de las flocculaciones y se da por la adsorción de una cantidad muy pequeña de polímero de cadena larga sobre varias partículas simultáneamente, produciendo puentes de hidrógeno entre el polímero y iones de oxígeno presentes en la superficie de partículas contiguas en el flóculo.

Flocculación en red: Se presenta cuando dos o más polímeros lineales se adsorben sobre las partículas, se forma una red tipo gel con forma de retículo tridimensional

Flocculación electrostática: Se presenta cuando polímeros catiónicos son adicionados a suspensiones con partículas cargadas negativamente generando una neutralización de sus cargas superficiales, permitiendo que las fuerzas de atracción de Van der Waals actúen, ocasionando aglomeración de las partículas seguido de sedimentación (**ver figura 12**).

La adición de flocculante modifica el potencial Z de las partículas presentes en la suspensión, JAN GUSTAFSSON, ERIK NORDENSWAN, JARL B. ROSENHOLM [5], afectando el acercamiento entre ellas por repulsión eléctrica, la densidad de carga del polímero adicionado es el factor que determina parcialmente en que tanto se modifica este potencial en cada partícula. La **figura 12** muestra como cambia el potencial Z de las partículas de un caolín con la cantidad de flocculante adicionado con diferentes densidades de carga.

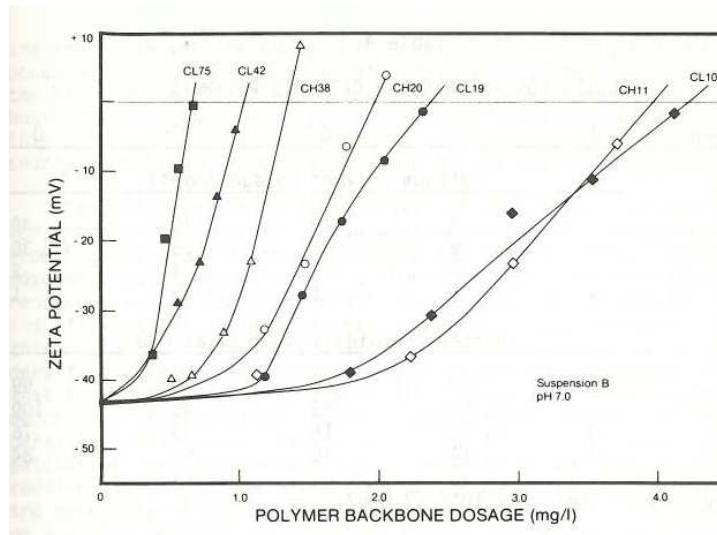


Figura 12. Cambios de potencial Z con diferentes adiciones y tipo de polímero.
Tomado de [3]

Diferentes estudios anteriores, F.Concha [1] pgs 29-37; M.S. Nasser, A.E. James [2] muestran que en la zona de compresión en la sedimentación, zona D (que es la zona de estudio). **Ver figura 2**, la eliminación del agua ubicada en los intersticios entre partículas está gobernada por la presión de poro, la cual a su vez es gobernada por las cargas eléctricas superficiales de las partículas y o su condición hidrofílica o hidrofóbica, variables que son influenciadas por el tipo de sólido, la solución y cantidad de floculante adicionado.

Algunos autores han estudiado el efecto que tiene la adición de floculantes poliméricos de cadenas largas a la reducción final de humedad en suspensiones en la zona de compresión, el estudio de Nasser and James [2] muestra el efecto que tiene la adición del floculante poliacrilamida y como las variables de peso molecular y tipo de carga afectan la reducción final de humedad en una suspensión de caolín. Los resultados encontrados son muy importantes en cuanto al mecanismo mediante el cual se quiere reducir la humedad en las etapas finales, pues según el mecanismo (filtración, centrifugación o sedimentación) el efecto de las características del floculante puede o no aportar a esta reducción.

Como resultados más relevantes de las investigaciones de Nasser and James [2], tenemos que el aporte al cambio del potencial Z de las partículas de una suspensión de colinita, es más marcado adicionando polímeros catiónicos que polímeros aniónicos para el tipo de material que estudiado, esto debido a la neutralización de cargas que este polímero catiónicos realiza sobre las partículas. La densidad de absorción de las cadenas poliméricas sobre las superficies de las partículas es más marcada en los floculantes catiónicos que los aniónicos, esto debido que en los aniónicos la repulsión entre partículas es muy considerable y las cadenas poliméricas solo forman redes muy espaciadas entre partículas por enlaces de contacto entre polímero y partícula muy pequeños. El tamaño del flóculo también tuvo su respuesta según el tipo de floculante, encontrando tamaños más representativos con la adición de polímeros aniónicos, pues en éste la formación de los flóculos por puentes de hidrogeno formando retículos más grandes es muy significativa mientras que con la adición de floculantes catiónicos es mas influyente la neutralización de cargas y la unión de partículas por fuerzas electrostáticas. Como resultado más importante se obtuvo un menor

esfuerzo de compresión en las suspensiones floculadas con polímeros aniónicos que con los catiónicos, esto debido a que la repulsión entre la superficie de las partículas y el polímero generan retículos más amplios con estructuras de flóculos más débiles a esfuerzos compresivos como se observa en la **figura 13**.

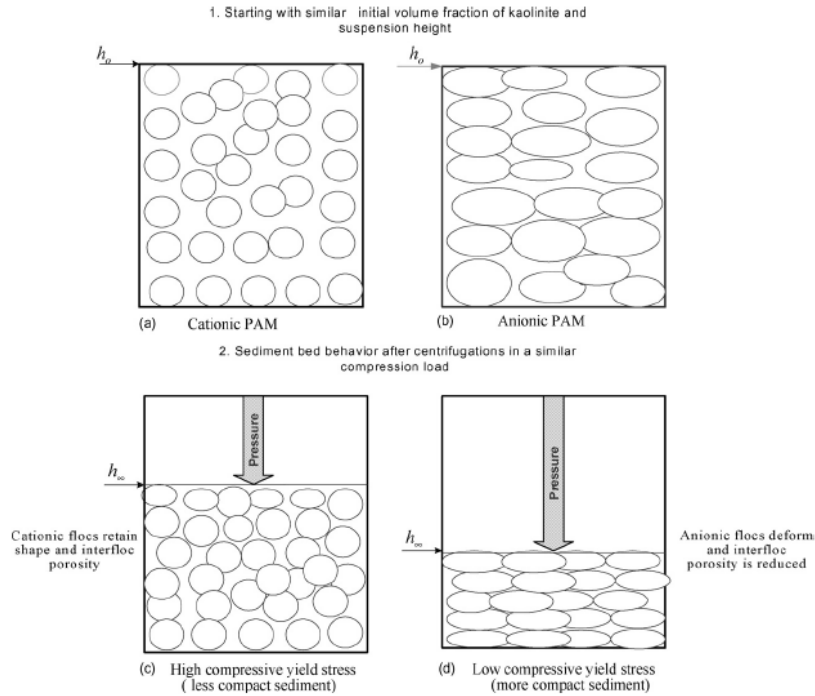


Figura 13. Diferencias del compressive yield stress según la carga del floculante (Nasser and James - 2006)

2.2 CONCLUSIONES SOBRE LOS ANTECEDENTES.

Si en un proceso mineralúrgico de materiales como la caolinita, la reducción final de humedad en suspensiones se hace por medio de sedimentación, es aconsejable flocular con polímeros aniónicos que producen bajos esfuerzos de cedencia a compresión; en cambio se recomienda los medios de filtración o centrifugación cuando se tienen los altos esfuerzos resistivos de compresión generados por la adición de floculantes catiónicos.

Lo anterior forma parte de las evidencias que se tienen de la importancia que juega la electroreología en la eliminación de agua de los intersticios de la zona de compresión, introduciendo al análisis las características del potencial Z de las partículas, ocasionando la repulsión o atracción entre ellas. Lo anterior gobierna la dinámica de las partículas componentes del sedimento en las partes inferiores de los espesadores, lo cual hace que se tenga una menor o mayor capacidad de reducir humedad en la etapa final de consolidación.

Con todos los antecedentes anteriores expuestos y teniendo en cuenta que la composición de la pasta a estudiar (pasta para la producción de clinker) no es de un solo componente, si no una mezcla de minerales los cuales exhiben diferentes características en su dinámica de sedimentación y posterior reducción de humedad, implica que se está en presencia de un sistema complejo,

donde las múltiples variables y sus distintas combinaciones generan resultados diferentes que no en todos los casos son los buscados por la sedimentación.

Por otro lado, los escenarios bajo los cuales esta reducción de humedad se busca, se modifican fuertemente al introducir agentes que modifican el *pH* o floculantes que actúan según sus características principales.

En la actualidad los avances y estudios más importantes en sedimentación a nivel mundial se han concentrado en los procesos de beneficio mineral en minería a gran escala, F. Concha et al [1], como la gran minería de cobre en Chile, los cuales debido a su alto volumen de producción y manejo del mineral en suspensiones acuosas, poseen espesadores de gran diámetro, convirtiéndose la sedimentación en un proceso determinante para la producción, en donde los tiempos de residencia de la pulpa en los espesadores debe optimizarse para no afectar la continuidad en el procesamiento del mineral. Estos procesos tienen una gran variedad en sus elementos minerales, tanto en composición química como en la génesis de su formación, haciendo que sus características reológicas y electro reológicas sean muy específicos, concentrando los estudios en el entendimiento de sus comportamientos en particular, NIKOLA MIKANOVIC. CARMEL JOLICOEUR [9].

Para el material de esta investigación (pasta de caliza para fabricación de clinker) como se mostró anteriormente, solo se tiene conocimiento de la relación entre algunas variables que afectan la sedimentación, NIKOLA MIKANOVIC. CARMEL JOLICOEUR [9], pero no se tiene una relación global entre todas estas variables, pues la interacción entre estas no es por separado o de carácter secuencial, si no interacciones continuas durante todo el proceso de sedimentación.

En algunos casos, sólo se tiene evidencia de adiciones de floculantes en la pasta de algunas plantas cementeras, F. Concha [1], para el mejoramiento de la sedimentación, pero sin estudios con criterio que permitan elegir y controlar de una manera técnica el tipo de floculante y cantidad a dosificar.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar la separación sólido agua en las suspensiones de pasta en proceso de la industria cementera, buscando un control sobre la reducción de humedad en estas pastas bajo un escenario reológico y electroreológico.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Identificar y cuantificar las variables reológicas y electro-reológicas que afectan la retención de agua en los sedimentos de los procesos de sedimentación.
- 2) Proponer una estrategia de control de la humedad de las pastas mediante el uso de información reológica y electro-reológica de suspensiones de la industria cementera.
- 3) Modelar el proceso de reducción de humedad en las pastas en procesos de la industria cementera en el escenario particular de las plantas húmedas de Cementos Argos.

4. METODOLOGÍA

En la **Figura 14** se muestra el esquema de trabajo aplicado al estudio donde se aprecia el orden en que se realizan los ensayos partiendo del muestreo, pasando por la caracterización de los materiales utilizados, pruebas de sedimentación en batch, análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

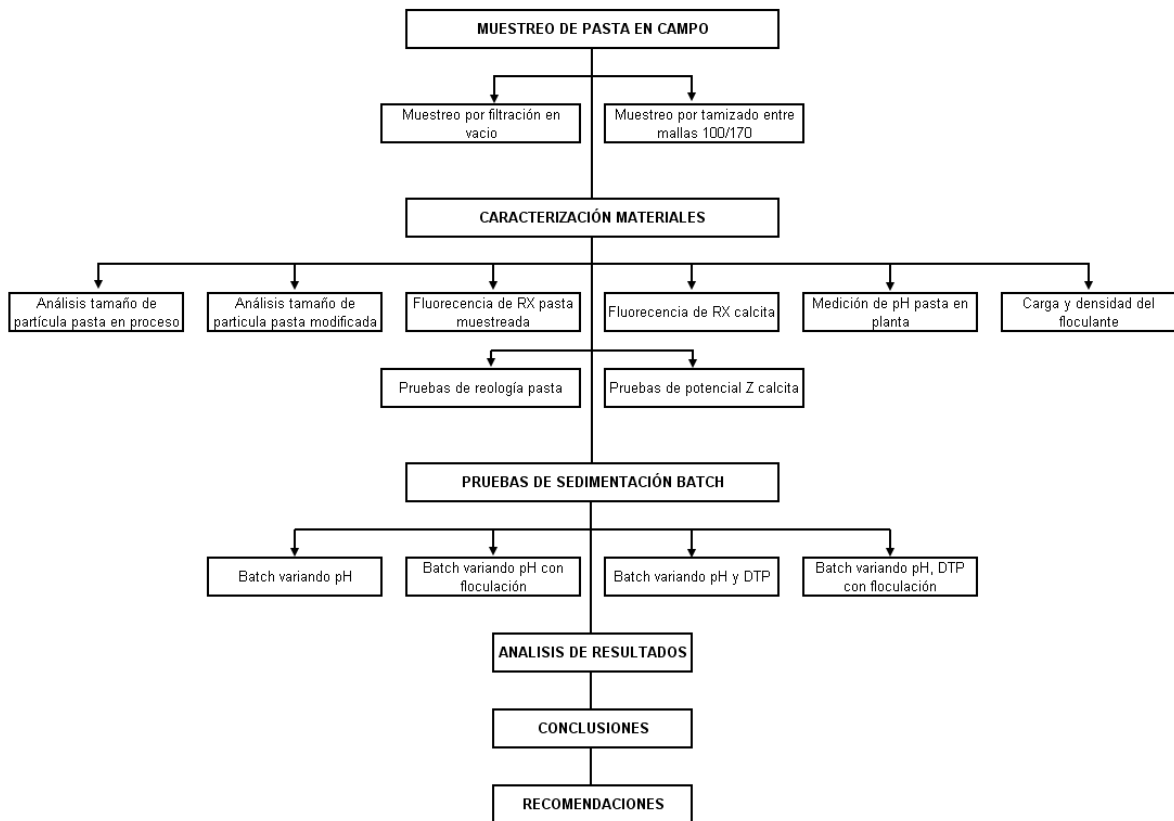


Figura 14. Diagrama metodología de trabajo

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

Para la caracterización de los materiales utilizados en las diferentes pruebas de sedimentación se realizaron análisis de distribución de tamaño de partícula (DTP), óxidos generales, pH de la suspensión, viscosidad plástica, potencial Z. Los materiales utilizados en las pruebas fueron:

4.1.1 Caliza sin modificación de su DTP (MN).

El material utilizado para las pruebas de sedimentación es roca caliza finamente molida la cual sirve para la fabricación de clinker, cumpliendo unas condiciones físico químicas óptimas para el proceso, también se utilizó la misma caliza molida pero con variaciones en su distribución de tamaño, aumentando la fracción de partículas en el tamaño de 75 micrones, tamaño el cual es

definido como límite para el control de calidad del proceso, esta modificación con el fin de buscar los efectos generados en la sedimentación al tener una distribución más gruesa. Se tomaron diferentes muestras representativas de todo el lote de material muestreado, cada una de las muestras (M1,M2....M10) es un ponderado de 4 muestras escogidas aleatoriamente, el total de caliza recolectada fueron 160 kg de pasta seca.

Los análisis de tamaño de partícula se realizaron en el equipo de medición de tamaño de partícula por dispersión láser el cual mide un rango de [0.3 – 1400] micrones, cual cuenta por volumen. El equipo está ubicado en el laboratorio de calidad de la planta Cairo de cementos Argos.

4.1.1.1 Función de distribución de densidad

Se presenta el gráfico de las funciones de densidad de 10 muestras tomadas aleatoriamente del lote total de pasta muestreada sin modificación de su tamaño.

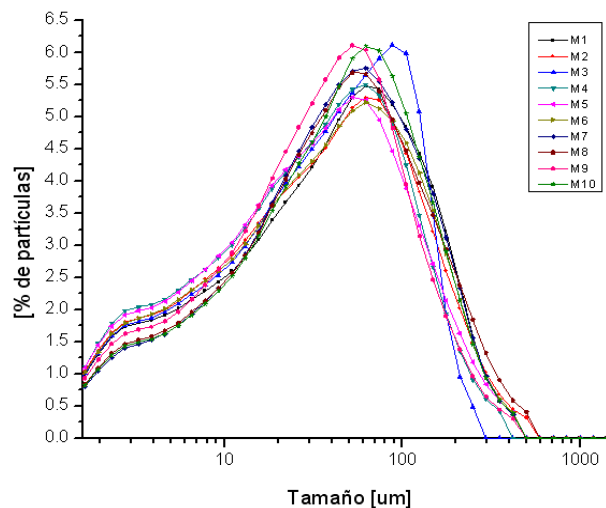


Figura 15. Función de Densidad Caliza

4.1.1.2 Distribución tamaño de partícula

Se presenta la distribución de tamaño de partícula del lote de pasta muestreado sin modificación de su tamaño.

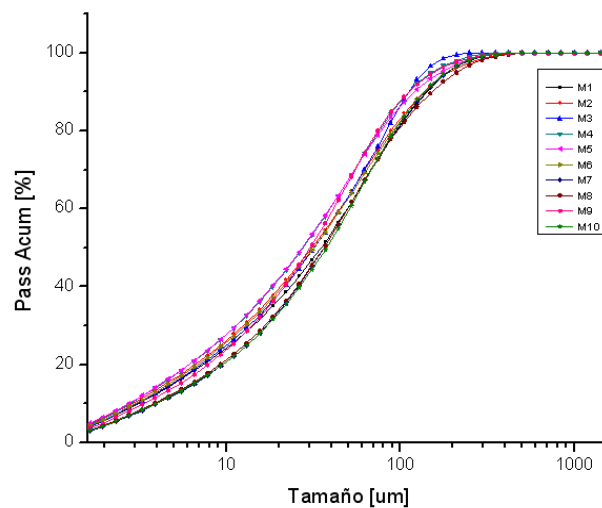


Figura 16. DTP Caliza

Como se aprecia en las **figuras 15 y 16** la distribución de tamaño de partícula en el muestreo realizado tiene variaciones poco significativas las cuales garantizan una homogeneidad de tamaño para los diferentes montajes, lo anterior sumado a que cada muestra de los ensayos fue conformada con muestras de cada curva, garantizando aún más la homogeneidad de la DTP.

4.1.2 Caliza con DTP modificada (MM)

Como una variable a modificar en las pruebas se realizó un incremento controlado en el tamaño de las partículas de la pasta a sedimentar, para lograrlo se adicionaron 20 gramos por muestra con un material clasificado cuidadosamente entre las mallas 200 y 100, evitando tener sobre tamaños en la muestra que generen incrementos considerables de “cluster” en el clinker. La distribución de tamaño y su función de densidad de la muestra clasificada para adicionar a la pasta se muestra en la **figura 17**.

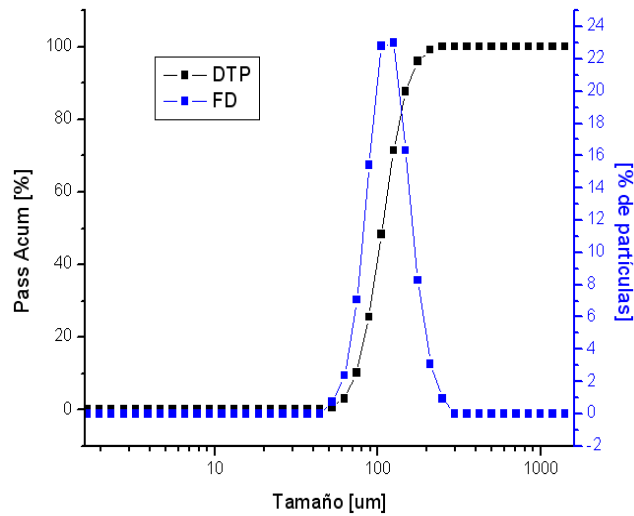


Figura 17. Función de Densidad y DTP Caliza Preclasificada

4.1.2.1 Función de densidad (MM)

Las 4 mediciones de granulometría de la muestra de pasta modificada en su distribución al adicionar la pasta con granulometría especial se enseña en la **figura 18 y 19**.

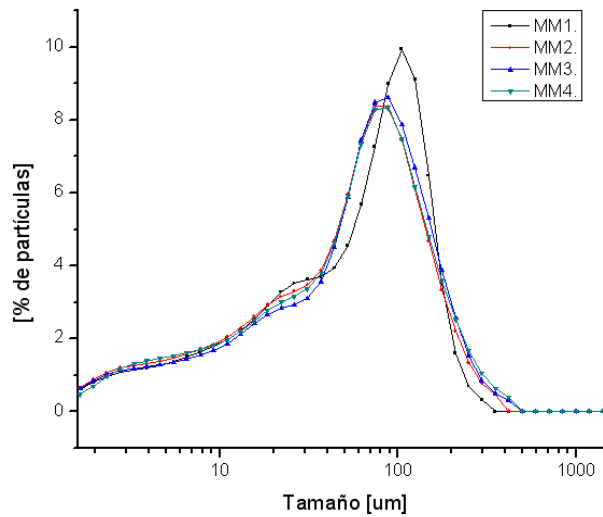


Figura 18. Función de Densidad Caliza con Granulometría Modificada

Para las muestra MM1 en la **figura 18** se presenta gráficamente una desviación en su media la cual es atenuada por la homogeneidad de tamaño del resto de muestras las cuales son combinadas para la conformación de la muestra para el montaje de sedimentación.

4.1.2.2 Distribución tamaño de partícula (MM)

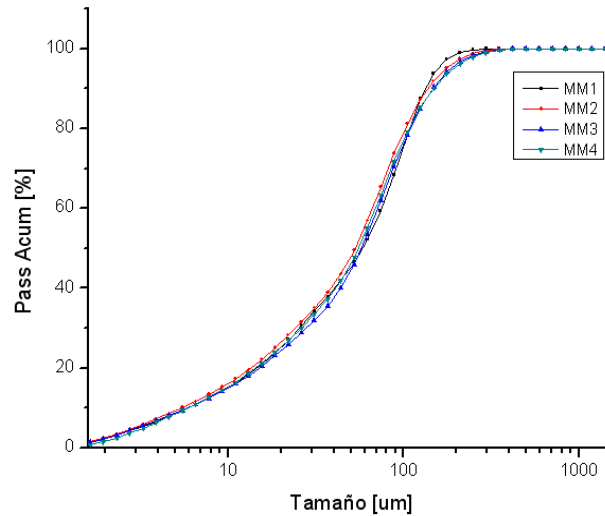


Figura 19. DTP caliza con Granulometría Modificada

En la modificación de la DTP se busca que el aumento en tamaño se dé en un intervalo estrecho (75 – 100 micrones) buscando no obtener sobre tamaños nocivos para el proceso de clinkerización con la generación de cluster, pero que permita evaluar el efecto que tiene en la sedimentación aumentar ciertos tamaños, los cuales pueden conseguirse en el proceso a nivel industrial.

4.1.3 Comparativo de la función de densidad entre MN y MM.

La Figura 20 muestra la modificación conseguida en los tamaños de partícula entre la muestra patrón y la muestra modificada, los datos son los promedios de todas las muestras sin modificar y con la modificación de la DTP.

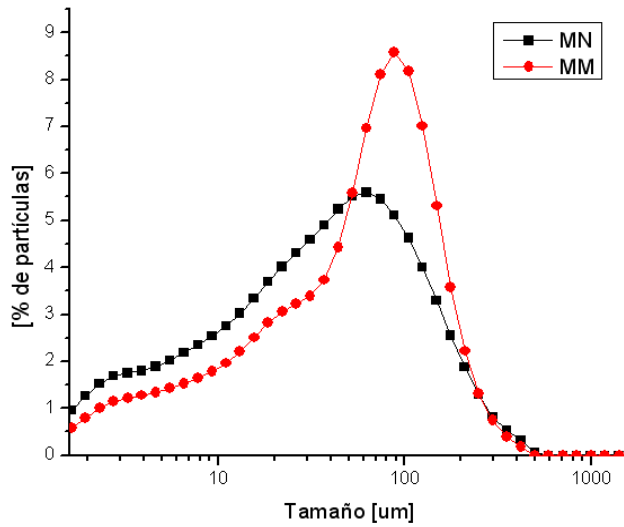


Figura 20. Comparativo Función de Densidad Caliza MN y MM

4.1.4 Comparativo distribución tamaño de partícula entre MN y MM.

La figura 21 muestra la distribución de tamaño de partícula de las muestras con y sin modificación de su distribución de tamaño, al adicionar la caliza con granulometría gruesa especialmente clasificada.

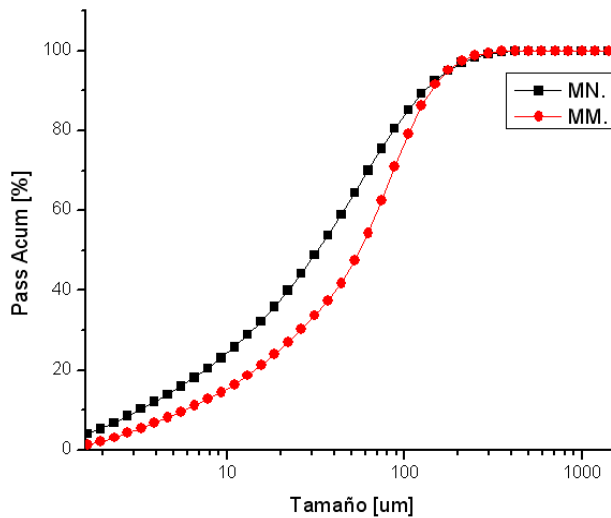


Figura 21. Comparativo DTP Caliza MN y MM

4.1.5 Análisis de óxidos generales de la caliza.

Se realizó el análisis de óxidos generales por fluorescencia de rayos X en el equipo del laboratorio de calidad de la planta Cairo referencia ARL 9800 XP, los resultados son muy representativos del lote total, pues las exigencias en la variabilidad de estos óxidos en el procesos lo exige. En los resultados reportados no se ha calculado las pérdidas al fuego **ver tabla 1**.

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3
13.25	1.85	1.69	43.99	0.90	0.63

Tabla 1. Óxidos Generales de la Caliza

Los análisis de óxidos generales permitieron verificar que el lote de muestra tomado es representativo a los valores químicos que operativamente se manejan en planta (**ver anexo 11 Y 12**).

4.1.6 Análisis de óxidos generales calcita.

Para los análisis del potencial Z se utilizaron muestras de calcita del mismo depósito mineral, este mineral es el de contenido mayoritario en la caliza y gobierna fuertemente los valores de potencial Z que se tienen en la suspensión. El ensayo se corrió en el equipo del laboratorio de calidad de la Planta Cairo, la referencia del equipo es ARL 9800 XP.

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3
0.00	0.00	0.54	56.54	0.26	0.00

Tabla 2. Óxidos Generales Calcita

4.1.7 Modificadores de pH.

Para la modificación del pH de la fase acuosa en las suspensiones utilizadas se empleó el hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración de 1.0 N para generar ambientes básicos y el ácido acético para generar ambientes ligeramente ácidos sin producir reacción en el carbonato.

4.1.8 Tipo de floculante.

El floculante utilizado es el sugerido y suministrado por la empresa Nalco con la referencia 8110, las características conocidas de este floculante son su carácter catiónico y alto peso molecular.

4.1.9 Determinación pH natural de la pasta en planta.

Para la determinación del pH natural de la pasta en planta, se realizó un muestreo secuencial durante un día con diferentes puntos para la toma de la muestra en el espesador (**ver anexo 9 y 10**), midiéndose con un pH metro digital en el agua constituyente de la suspensión. El día de la toma de muestras el comportamiento de los óxidos en la pasta fueron muy similares a los óxidos reportados en la **tabla 1**, garantizando que no hubiera variaciones químicas significativas que generaran un muestreo poco representativo.

Muestra	pH	T(°C)
P1	8.04	28.2
P2	8.05	28.4
P3	8.10	28.2
P4	8.09	28.2
P5	8.07	28.4
P6	8.09	28.4
P7	8.10	28.5
P8	8.06	28.6
P9	8.10	28.5
Promedio	8.08	28.4
Desvest	0.02	0.1

Tabla 3. Muestreo pH Pasta en Proceso

El *pH* natural medido en la pasta que entra a espesadores arrojó un valor de 8.08 el cual esta muy cerca del valor de pH neutro, este valor va a ser el de referencia sobre el cual modificamos nuestras condiciones de *pH* en las pastas para las diferentes pruebas.

4.1.10 Viscosidad de la pasta a pH 8.

Las pruebas de reología se realizaron a la pasta representativa del proceso, sin adición de floculante, a valores de *pH* 8 y humedad de 40%, datos medidos en planta. Las pruebas se realizaron en el reómetro de la planta Nare de Cementos Argos referencia AR 2000 de TA instruments con geometría de cilindros concéntricos y gap de 1 mm (**ver anexo 17**), las variables de operación fueron:

Shear Rate. [3 – 100] seg-1

Cantidad de muestra. 200 gr

Concentración de la pasta . 40% en peso de agua

Tiempo de barrido. 30 segundos

Temperatura. 28 °C

pH de la pasta. 8.0

La tabla de datos de la prueba se adjunta en el **anexo 13**.

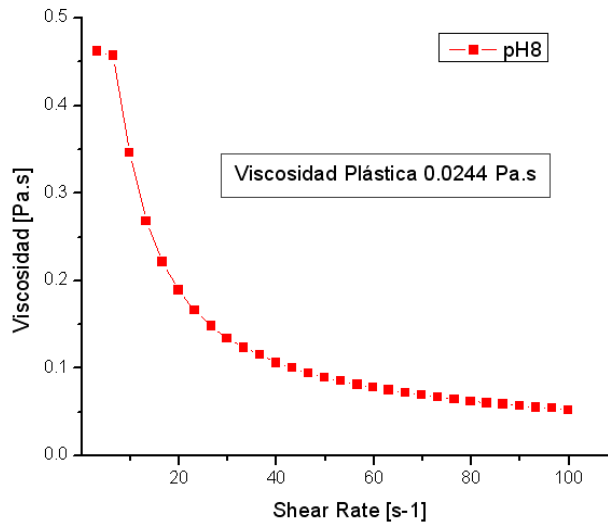


Figura 22. Reograma caliza MN a pH Natural

Según el comportamiento de la pasta en el ensayo, se obtuvo una viscosidad tipo plástica en el ensayo de reología, la cual representa la viscosidad que la pasta tiene en el proceso industrial, a la concentración, temperatura, DTP, pH y sin flocular, variables manejadas en el proceso.

4.1.11 Potencial Z calcita a pH 8.

Se realizó la prueba de potencial Z a la calcita en el pH natural de la pasta medido en planta, a la muestra no se le adicionó ningún aditivo ni floculante, esto con el fin de evitar perturbaciones que alteren la lectura. El equipo utilizado es el del laboratorio de coloides de la Universidad de Antioquia en el equipo zetasizer nano S90 de la empresa Malvern, la técnica utilizada en la medición es el movimiento electroforético.

Para la calcita estudiada se realizó la medición de su Potencial Z a $pH = 8$ y sin la adición de floculante, el resultado se muestra a continuación:

$$\text{Potencial } Z_{(\text{calcita})} = 8.85 \pm 5 \text{ [mV]}$$

El potencial Z obtenido de la calcita en la prueba, representa el potencial discretizado que en la pasta tiene el carbonato y que debido a su abundante cantidad en la suspensión, gobierna fuertemente la dinámica de la mayoría de las partículas. El valor está muy cercano a los valores reportados para este tipo de mineral a las condiciones de pH analizadas.

4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 Muestreo en campo y preparación de muestras.

Se realizó una intensa campaña de muestreo de la pasta que alimentan los espesadores de la planta Cairo de la Empresa Cementos Argos S.A entre los días 14 al 30 de abril de 2008, para esto se tomaban muestras en intervalos de una hora y se sometían a filtración por vacío, esto con el fin de evitar envejecimiento en la pasta y prevenir posibles efectos reológicos que este envejecimiento conlleva. Se recopiló un total de 198 kg de pasta seca representativos de 14.370 ton de pasta producida en planta, la pasta muestreada fué empacada y rotulada según hora y fecha de muestreo.

Para la preparación de las muestras utilizadas en las pruebas de sedimentación se mezcló la pasta seca con agua del mismo circuito de alimentación industrial, se llevó la pasta a la humedad con que se trabaja en planta que es 40% en peso de agua y se midió su pH para verificar el valor de este y llevarlo al valor deseado.

4.2.2 Montaje para las pruebas de sedimentación.

En los ensayos de sedimentación que serán expuestos a continuación se pretende identificar el efecto que tienen en la sedimentación de pastas de carbonato y con mayor interés en la etapa final de compresión, las variables como pH, DTP, Floculación y su interacción entre ellas.

4.2.2.1 Elementos utilizados en las pruebas.

- 6 Probetas de 1 litro de volumen con graduación de altura milimétrica con una altura efectiva de 342 mm. **(Ver anexo 15)**
- Probetas Perforadas lateralmente de 1 litro de volumen las cuales permiten extraer la pasta sedimentada para determinar su humedad **(ver anexo 16)**.
- Medidor de densidad DMA 35n de la empresa Antón Paar para medir la humedad en los sedimentos al terminar el proceso de sedimentación **(ver anexo 18)**.
- Agitador de pasta manual para homogeneización de la suspensión en las probetas
- Cronómetro.
- Planillas de toma de datos.
- Balanza digital con 0.1 gr de precisión.
- Medidor de pH digital.
- Hidróxido de sodio y ácido acético.
- Floculante referencia 8110 preparado a 20 ppm según recomendaciones del proveedor.
- Agitador mecánico para preparación de floculante.

4.2.2.2 Toma de datos en las pruebas de sedimentación.

Después de tener la pasta completamente homogénea en la probeta y con las condiciones deseadas se inicia la lectura de los datos de sedimentación desde el tiempo cero hasta que se alcance el proceso de compresión y finalice la sedimentación, tomando datos al inicio de la prueba cada 5 minutos donde las velocidades de sedimentación son mayores y luego aumentando los intervalos de lectura pues la sedimentación obstaculizada empieza a predominar haciendo mas lenta la sedimentación. El dato de lectura es la ubicación en la altura de la columna de sedimentación donde esté la interfase agua clara – suspensión, siguiendo su descenso en los intervalos de tiempo descritos anteriormente. Debido a la concentración que se maneja en todas las suspensiones de las pruebas (40% en peso de agua) la interfase suspensión - sedimento que se forma en el fondo de la probeta, no se apreciaba con claridad y fue muy complicado de medir. Para cada prueba de sedimentación se realizaron entre 4 y 5 duplicados, dependiendo de la tendencia que tomara el modo de sedimentación las cuales las hacían representativas para las

condiciones a las que la prueba era sometida y se reportó el promedio de estas pruebas, en las gráficas de sedimentación la altura de descenso se expresa en % de la altura de la columna de pasta al inicio de la suspensión.

Para las probetas perforadas se realizaron pruebas de sedimentación bajo las mismas condiciones que las probetas sin perforar, pero en estas pruebas solo se tomaba el sedimento final del fondo de la probeta una vez terminado todo el proceso de sedimentación, luego se procedía a realizar la medición de la humedad de la muestra utilizando el medidor de densidad, con su respectivo reporte.

4.2.3 Pruebas de sedimentación en batch.

Las pruebas de sedimentación en batch son las pruebas en régimen discontinuo en donde se monta el ensayo en una probeta debidamente marcada en su altura con una cantidad de pulpa conocida, se inicia la sedimentación desde el tiempo cero tomando la ubicación en la altura de la probeta de la interfase agua-sedimento y se deja que el procesos continúe hasta que se detenga la prueba con el sedimento al fondo de la probeta.

4.2.3.1 Pruebas de sedimentación variando pH (SF)

Se realiza el procedimiento antes mencionado para la preparación de la pasta, luego de medir el pH se procede a modificarlo según el valor requerido para el ensayo adicionando NaOH o ácido acético, en estas pruebas se varió el pH en el intervalo entre 7 y 11 los cuales están alrededor del pH natural de la pasta en proceso que es 8.08. Con este ensayo se busca identificar el efecto que la variación del pH tiene en la dinámica de sedimentación y compresión de la pasta, sin modificar otra variable. No se trabajó a pH inferiores a 7 pues el carbonato de la pasta empezaba a reaccionar en este medio ácido. Los resultados de la prueba se muestran en la **figura 23**.

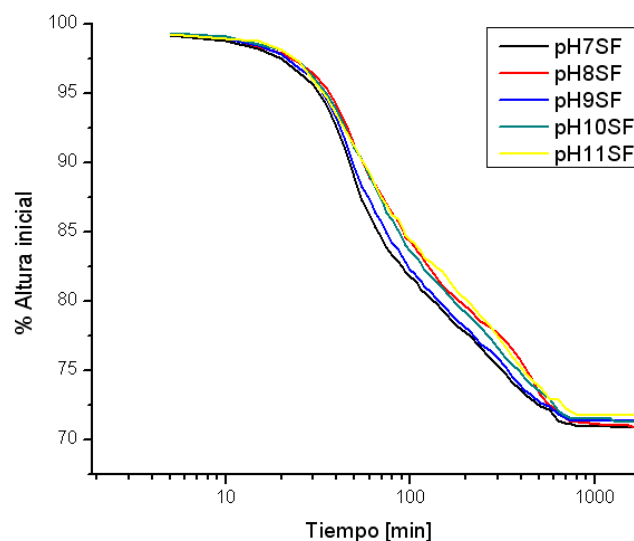


Figura 23. Curvas de Sedimentación de la Pasta SF a Diferente pH

4.2.3.2 Pruebas de sedimentación variando pH con floculación (CF)

Realizando el mismo procedimiento que en la prueba sin flocular para la preparación de la muestra, se adiciona el floculante el cual es preparado por agitación mecánica y es adicionado a la pasta en una concentración de 20 ppm concentración recomendada por el proveedor de floculantes, luego de esto se homogeniza la columna de sedimentación y se inicia la prueba. Los resultados se observan en la **figura 24**.

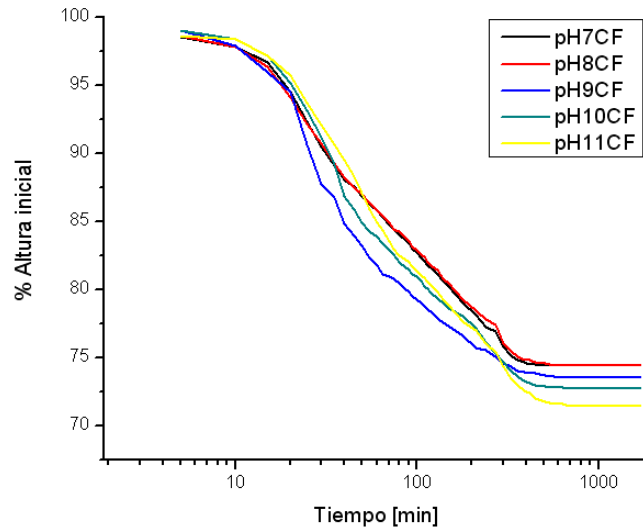


Figura 24. Curvas de Sedimentación Pasta CF a Diferente pH

4.2.3.3 Comparativo pruebas de sedimentación SF y CF a pH natural.

Para evidenciar el efecto que el floculante tiene sobre la pasta utilizada y su dinámica de sedimentación, se grafica los montajes de las pruebas a pH natural (pH = 8) de las muestras con floculante y sin floculante.

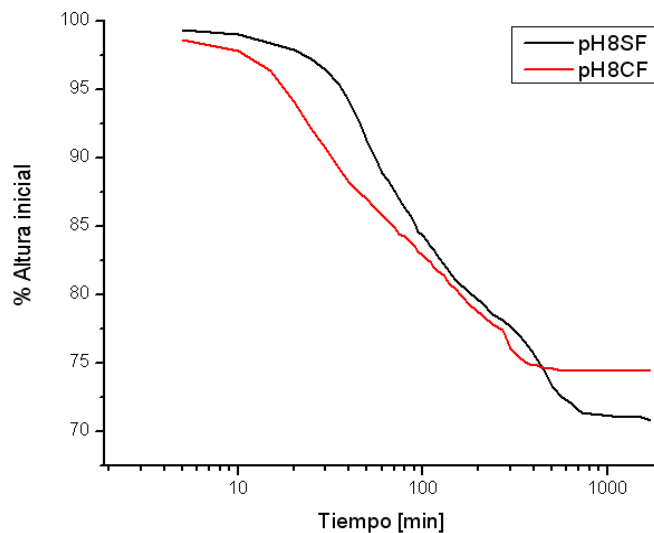


Figura 25. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF y CF a pH 8

4.2.3.4 Pruebas de sedimentación variando pH y DTP sin floculante (SFDT).

Con los mismos criterios de la preparación de la muestra ajustando el pH y sin adicionar floculante, se realiza el montaje de las pruebas pero con la pasta a la que se le ha modificado la distribución de tamaño, los resultados se aprecian en la **figura 26**.

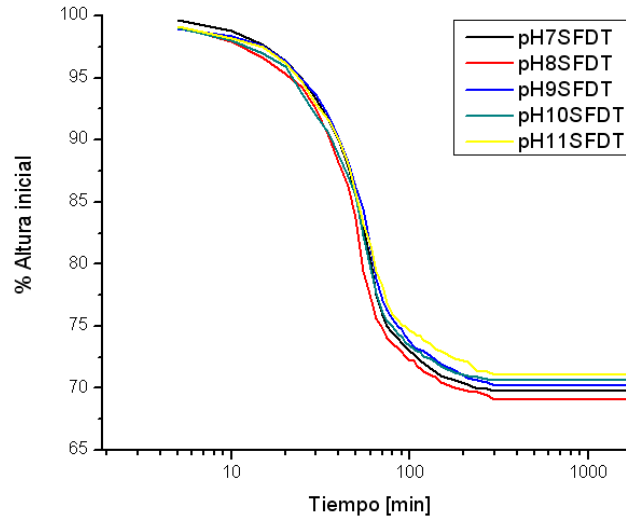


Figura 26. Curvas de Sedimentación Pasta SFDT a Diferente pH

4.2.3.5 Pruebas de sedimentación variando pH y DTP con floculante (CFDT).

Se realizan los montajes de sedimentación con la pasta a la que se le ha modificado su distribución de tamaño, variando el pH y adicionando floculante. Los resultados se muestran en la **figura 27**.

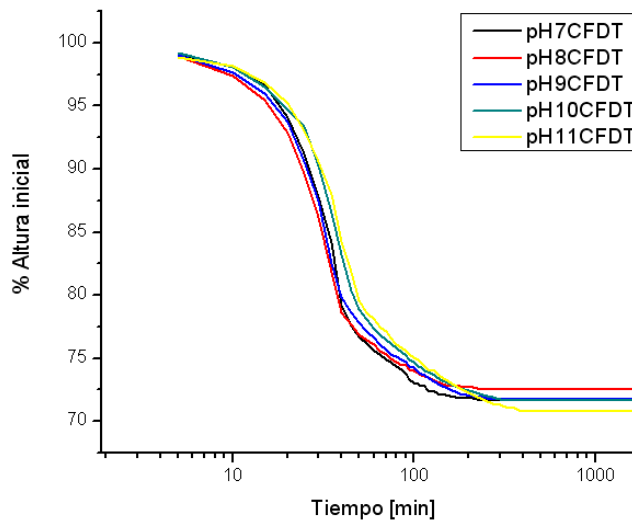


Figura 27. Curvas de Sedimentación Pasta CFDT a Diferente pH

4.2.3.6 Comparativo pruebas de sedimentación entre SFDT y CFDT a pH natural.

Se muestran los resultados a pH natural del efecto que tiene la adición de floculante a la pasta que tiene su DTP modificada, con el fin de verificar si el aumento en el tamaño de partícula cambia el modo y secuencia de sedimentación mostrado en la pasta sin modificación de DTP, los resultados se muestran en la **figura 28**.

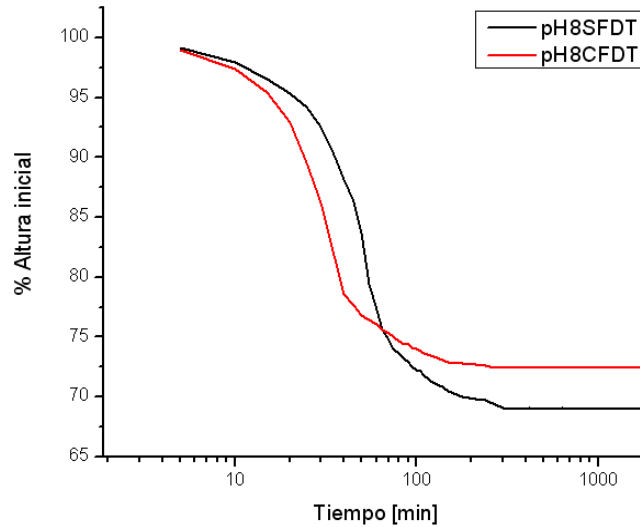


Figura 28. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SFDT y CFDT a pH 8

4.2.3.7 Comparativo entre pH8SF y pH8SFDT a pH natural.

Se muestra en la **figura 29** el efecto que tiene en la sedimentación el cambio en la DTP de la muestra con respecto a la muestra que tiene las condiciones de la pasta del proceso industrial sin modificaciones de DTP ni adición de floculante.

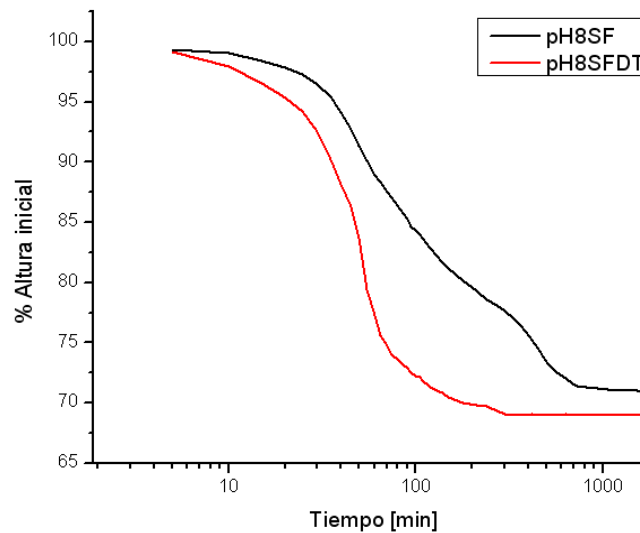


Figura 29. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF y SFDT a pH 8

4.2.3.8 Comparación entre pH8SF y pH8CFDT a pH natural.

Se muestra el efecto que tiene en la sedimentación de pastas sin ninguna modificación de sus variables en comparación con la pasta a la cual ha modificado su DTP y adicionado floclante, ver figura 30.

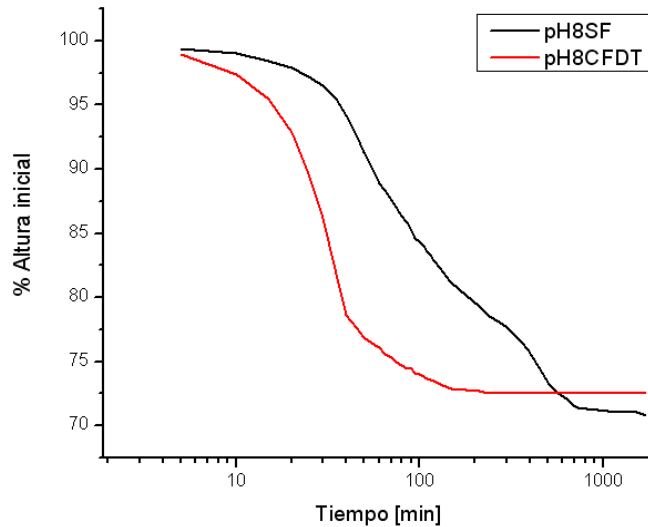


Figura 30. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF y CFDT a pH 8

4.2.3.9 Comparación entre pH8CF y pH8SFDT a pH natural.

Se muestra el efecto que tiene en la sedimentación de pastas, un pasta floclada y una pasta sin floclular pero con su DTP modificada, verificando si el aumento de tamaño en la DTP equivale a la dinámica de sedimentación de la pasta floclada.

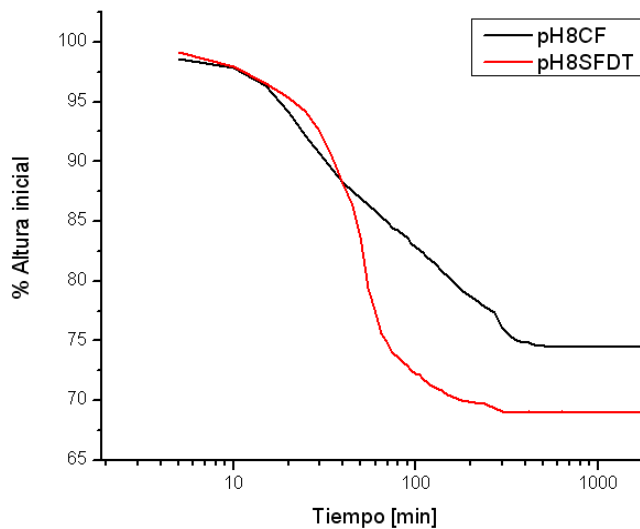


Figura 31. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta CF y SFDT a pH 8

4.2.3.10 Comparación entre pH8SF y pH11CF.

La **figura 32** muestra la forma de sedimentación entre dos muestras, a pH 8 que es la pasta como se presenta en proceso y pH 11 con adición de floculante.

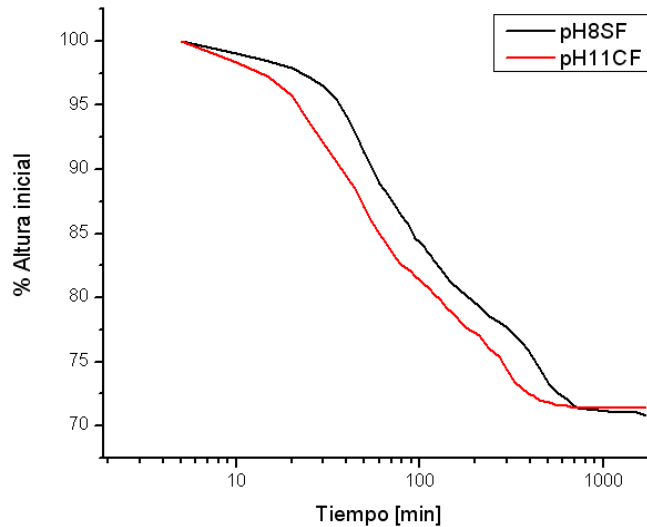


Figura 32. Comparativo Pruebas de Sedimentación Pasta SF a pH 8 y Pasta CF a pH 11

4.2.4 Ensayos de reología.

4.2.4.1 Reología de la pasta modificando el pH (SF).

Se corrieron muestras en el reómetro con solo variaciones del pH en la pasta muestreada para las pruebas de sedimentación en batch, para verificar los cambios en la viscosidad y esfuerzo de cedencia de la suspensión. Las muestras analizadas tienen una humedad del 40% de peso en agua, se mide en un shear rate de 0 a 100 en una rampa de 30 segundos de duración, la geometría utilizadas fueron cilindros concéntricos (DIN). Los resultados de la prueba se muestran a continuación en la **figura 33**.

pH	Viscosidad [Pa.s]	Yield Stress [Pa]
7	0.0108	1.63
8	0.0244	3.07
9	0.0199	2.90
10	0.0131	1.51
11	0.0100	1.01

Tabla 4. Datos Viscosidad Pasta sin Flocular

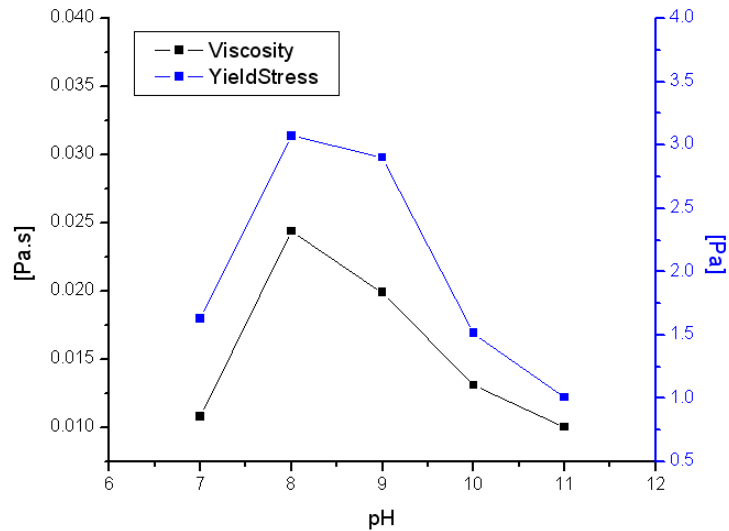


Figura 33. Viscosidad y Yield Stress de La pasta a Diferente pH

4.2.5 Ensayos medición de potencial Z.

Con el fin de discretizar el valor del potencial Z que tiene uno de los minerales constituyentes mayoritarios de la pasta caliza, se realizan las pruebas con calcita que es el mineral que aporta el carbonato de calcio de la caliza, roca a la cual por procesos mineralúrgicos se reduce de tamaño transformándose en nuestro material de estudio (pasta).

El ensayo se realizó a muestras variando el pH en los intervalos establecidos [7 – 11] y corriendo muestras por duplicado con y sin adición de floculante, evaluando como cambia el potencial z de las partículas de caliza con estas variaciones. Los resultados obtenidos se muestran en la **figura 34**.

pH	Potencial Z [mV]	
	Sin Flocular	Con Floculante
7	15.3	14
8	8.85	8.21
9	3.67	5.63
10	-7.04	6.92
11	-15.9	2.33

Tabla 5. Datos Potencial Z Calcita

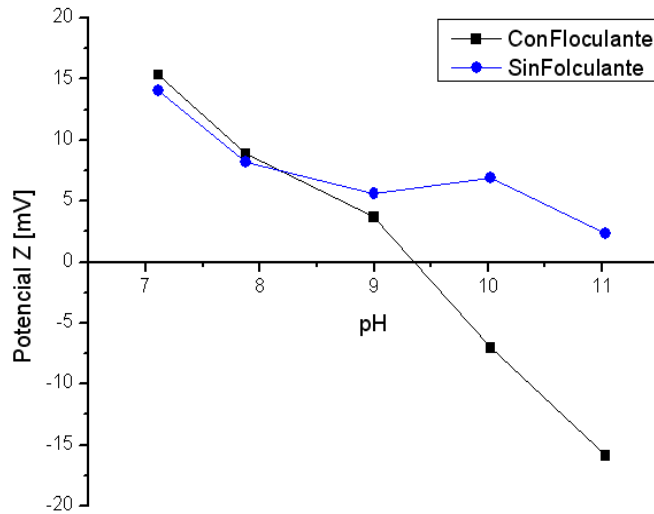


Figura 34. Medición del Potencial Z Calcita sin Floculante y con Floculante

4.2.6 Mediciones de humedad final en etapa de compresión

Se realizaron las medidas de humedad final en las pastas que se estudiaron en las pruebas batch después de compresionarse, la medida se realizó con el equipo de medición de densidad DMA 35n (Antón Paar) **ver anexo 18**. Las pruebas se realizaron en probetas perforadas que permiten la extracción del sedimento del fondo de la probeta, **ver tabla 6 y figuras 35 y 36**.

Muestra \ pH	7	8	9	10	11
SF	33.02%	32.82%	33.39%	33.18%	33.68%
CF	34.97%	35.03%	35.03%	34.56%	33.89%
SFDT	32.32%	32.10%	32.65%	32.76%	32.79%
CFDT	34.04%	34.20%	33.94%	33.73%	33.52%

Tabla 6. Valores de humedad en la etapa final de sedimentación batch

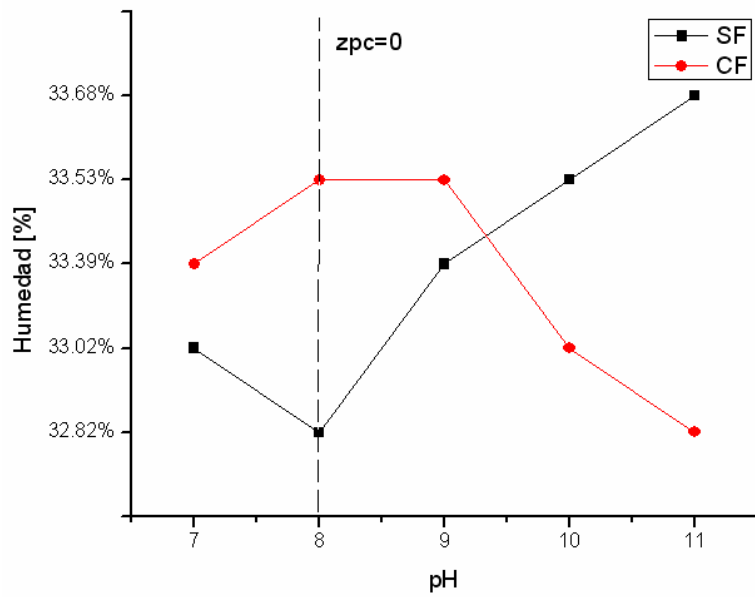


Figura 35. Humedades Finales Pruebas Batch (SF,CF)

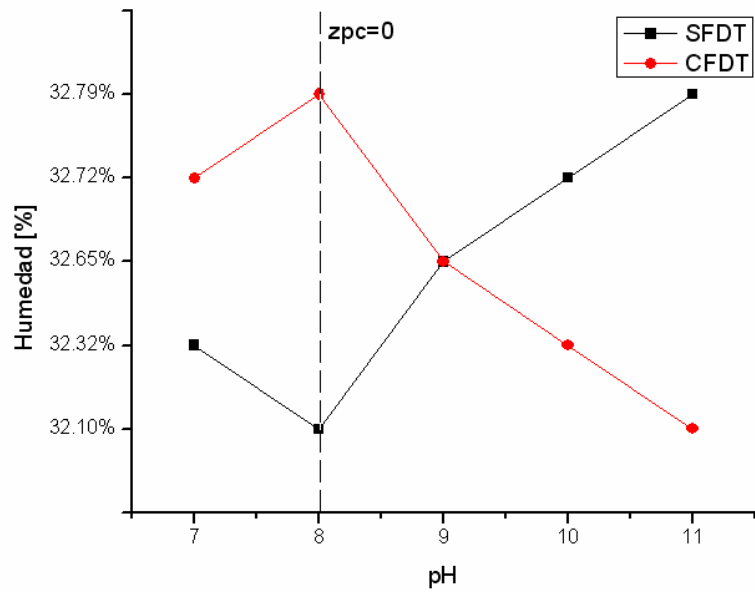


Figura 36. Humedades Finales Pruebas batch (SFDT, CFDT)

4.2.7 Modelación del comportamiento de la humedad variando el pH

La modelación de las gráficas 35 y 36 requirió una evaluación en cuanto a que rango de datos se le puede aplicar la modelación, esto debido al pH de mayor atención e interés en esta investigación, el pH 8 donde tenemos el Pot Z = 0 en las muestras SF y un alto Pot Z de repulsión en las muestras CF, este es un punto de singular comportamiento para las suspensiones el cual hace difícil la modelación de las curvas, asimilándolo a un punto especial de difícil análisis, similar a un punto sin derivada o de cambio de tendencia brusco "punta". Estos puntos de comportamiento especial de fenómenos no permiten su modelación, obligando a tener que patir el modelo en dos modelos, cada uno en lados adyacentes. Por la anterior, es conveniente elegir la zona que se quiere modelar teniendo en cuenta donde es más factible que el proceso industrial se desarrolle, es por esto que el pH alcalino es el escenario en donde los carbonatos por su carácter pueden llegar y algunos materiales comúnmente adicionadas a la suspensión debido al co procesamiento en planta (polvillo del filtro del horno), favorecen el aumento del pH fácilmente. Es por lo anterior que la modelación se realiza para los pH 9, 10 y 11 que son los puntos con mejor comportamiento para modelar y en donde se presenta menos ruido (al estar en un escenario natural de los minerales componentes) y no se cruza con el zpc el cual como se menciona es un punto en donde la físico química de la suspensión se comporta de manera compleja.

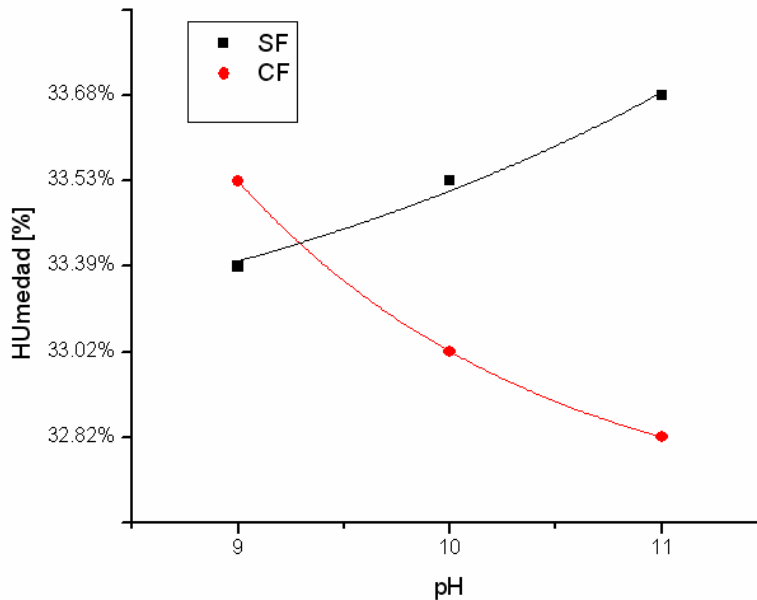


Figura 37. Modelación Curvas (SF,CF)

<p>(SF)</p> $H[\%] = A_1 + \exp(pH / t_1) + Y_0$ $A_1 = 0.10456$ $t_1 = 3.00543$ $Y_0 = 0.97202$ $R^2 = 0.991$	<p>(CF)</p> $H[\%] = A_1 + \exp(-pH / t_1) + Y_0$ $A_1 = 2048$ $t_1 = 1,4427$ $Y_0 = 2.48E^{-15}$ $R^2 = 1.00$
--	--

Ecuación 2. Modelamiento humedad vs pH (SF, CF)

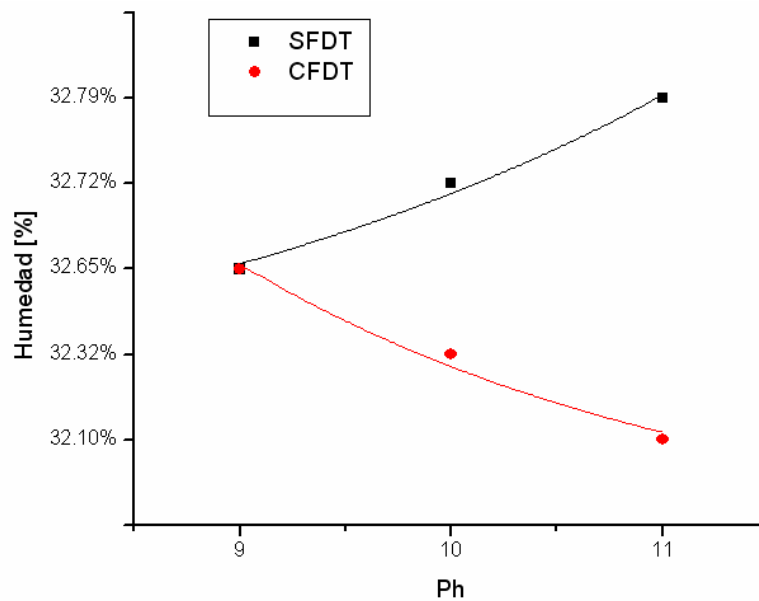


Figura 38. Modelación Curvas (SFDT,CFDT)

<p>(SFDT)</p> $H[\%] = A_1 + \exp(pH / t_1) + Y_0$ $A_1 = 0.10456$ $t_1 = 3.00543$ $Y_0 = 0.97202$ $R^2 = 0.991$	<p>(CFDT)</p> $H[\%] = A_1 + \exp(-pH / t_1) + Y_0$ $A_1 = 187,499$ $t_1 = 2,2326$ $Y_0 = -0.2723$ $R^2 = 0.984$
--	--

Ecuación 3. Modelamiento humedad vs pH (SFDT, CFDT)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- Las pruebas de sedimentación con solo variación en el pH de la suspensión (SF), muestran leves diferencias en la dinámica de sedimentación, partiendo que la curva obtenida con el *pH* natural de la pasta en planta (*pH* = 8) representa el modo actual como la pasta se comporta en un proceso de sedimentación en batch.
Como resultados relevantes se identifican 3 etapas muy marcadas en todas las pruebas las cuales se clasifican como:
 - 1) Etapa Inicial: Muestra un esfuerzo de cedencia que debe vencer la suspensión, la cual tiene una duración aproximada entre 15 y 20 minutos según se observa en la gráfica, afectando el tiempo efectivo de la suspensión para cumplir su sedimentación, la razón de este esfuerzo de cedencia se debe a la alta concentración bajo la cual se realizaron las pruebas (40% en peso de agua), concentración que es la manejada en proceso y a la cual alimentan los espesadores. Esta alta concentración genera un “estorbamiento” muy marcado entre las partículas al inicio de la sedimentación, retrazando el libre descenso y generando como resultado la respuesta macro representada en un esfuerzo de cedencia **(ver figuras 23 y 25)**.
 - 2) Etapa intermedia: Después de vencer la etapa anterior continúa una etapa de sedimentación libre, ocasionada por el desplome de las partículas al vencer el esfuerzo de cedencia de la suspensión, en donde la mayoría de las muestras tiene una tendencia lineal en su sedimentación. Se puede apreciar diferencias entre las curvas pero no en sus respectivas pendientes, estas diferencias se dan en el inicio de esta etapa después de vencer el esfuerzo de cedencia **(ver figuras 23 y 25)**.
 - 3) Etapa final: Identificada como etapa de compresión en donde la sedimentación se torna fuertemente obstaculizada y en la cual se aprecian que hay diferencias de compresión entre los diferentes pH, teniendo una mayor compresión las muestras con pH natural (pH=8) y los pH cercanos (pH= 7 y 9) y de menor compresión el pH =11 o pH extremo **(ver figuras 23)**. Lo anterior se explica en las pruebas de potencial Z donde se identifica que el *pH* bajo el cual se tiene el ZPC en el intervalo entre *pH* 8 y 9 (intervalo donde está el pH natural de la pasta), en este punto de ZPC las partículas tienen un menor nivel de repulsión electroestático, permitiendo la aglomeración de las partículas por predominación de las fuerzas de Van Der Waals y por lo tanto evacuando una mayor cantidad de agua entre los intersticios, generando así una mejor compresión. En las pruebas de reología de la pasta se presentan picos altos de viscosidad entre los pH 8 y 9, esto como consecuencia de las aglomeraciones que se dan entre las partículas al tener menor repulsión electroestática a estos pH (según lo encontrado en la prueba de potencial Z y es consecuente con los resultados previos de Jonson et.al. Adicionalmente la alta viscosidad a pH 8 afecta negativamente la velocidad la sedimentación libre y esto se refleja en la curva de sedimentación de la **figura 22** donde el pH 8 tienen la menor velocidad de sedimentación libre.
- En las pruebas donde se varió el pH de la suspensión y se adiciona el floculante **(ver figura 24 (CF))** se identifican las mismas zonas encontradas en la prueba anterior **(ver figura 23 (SF))**, pero con algunas modificaciones importantes de resaltar:
 - 1) Etapa inicial: Aunque sigue presentándose el esfuerzo de cedencia a vencer por la suspensión para iniciar su etapa de sedimentación “libre” , esta sufre una reducción

importante en tiempo con un valor de solo 10 minutos aproximadamente (50% del tiempo tomado en la prueba anterior), acortando el tiempo en el que la suspensión inicia su etapa de sedimentación libre, esto debido al efecto dispersivo que el carácter catiónico del floculante tienen sobre las partículas de carbonato sobre todo a las muestras inferiores a pH 10, al dispersar evita el choque entre partículas, permitiendo un desplome más rápido que el de las muestras sin adición de floculante (**ver figuras 24 y 25**).

- 2) Etapa intermedia: Venciendo el esfuerzo de cedencia, inicia la etapa de sedimentación libre, con una tendencia muy similar de sedimentación para los pH 9, 10, 11 con velocidades superiores a las muestras con pH 7 y 8 aunque las pendientes de las curvas se igualan en el tiempo, los pH 7 y 8 debido a su menor velocidad al inicio de la etapa, “parecieran mostrar” una sedimentación libre más lenta (**ver figuras 24 y 25**).
- 3) Etapa Final: En la zona de compresión se identifican tendencias muy marcadas y de forma contraria a las observadas en las pruebas sin floculante (**ver figura 23**), pasando de tener en el pH 11 la muestra de menor compresión en las pruebas (SF), a ser la mejor compresionada en la prueba (CF) y sucesivamente decrece esta compresión al decrecer el pH hasta tener la menor compresión en el pH natural (pH=8). Las mediciones del Potencial Z de las muestras de calcita floculadas permiten observar algunas modificaciones en los valores del potencial dependiendo el pH, obteniendo el menor Potencial Z a pH = 11, permitiendo la aglomeración de partículas debido a una menor repulsión electrostática, igual como ocurre en la muestra a pH = 8 sin flocular (SF), obteniendo así equivalentemente una mejor evacuación de agua entre los intersticios a pH 11 que el resto de las muestras floculadas (**ver figuras 24 y 25**).

- La **figura 25** muestra de una manera clara como la adición de floculante modifica la dinámica de sedimentación en la suspensión, mostrando la reducción del tiempo que se requiere para vencer el esfuerzo de cedencia. En la etapa de sedimentación libre se presentan un “aparente” aumento en su velocidad de sedimentación que en los ensayos parecía evidente por el movimiento de la interfase agua clara – sedimento, lo cual no es cierto, pues si se observa la gráfica podemos apreciar que la pendiente de la curva en la zona de sedimentación libre es muy similar, la diferencia está en el tiempo que demora iniciar esta etapa pues la muestra floculada acorta en casi el 50% el tiempo para vencer el esfuerzo de cedencia en comparación con la muestra sin flocular. Finalmente se detecta una disminución importante en la capacidad de compresión de la muestra (CF) en comparación con la muestras (SF) del mismo pH, la caracterización del *Potencial Z* nos muestra que pese a que no se presente un cambio en el valor del potencial para el pH = 8 por lo igual del carácter catiónico que tanto el polímero y las partículas tienen en su superficie, ocasionando una baja o nula adsorción, la repulsión estérica entra a jugar un papel importante en la baja compresión de la pasta, pues el polímero no adsorbido forma una capa “colchón” en la zona difusa donde por la afinidad de su carga (electropositiva) con los iones (electronegativos) que rodean y son atraídos electrostáticamente por las partículas, forman ese “estorbamiento” que impide la normal compresión de la pasta, ver artículo ANATOL ZINGG [8], **ver anexo 19**.
- En la **figura 26** (CFDT) se puede apreciar el efecto esperado (aumento en la velocidad de sedimentación) al modificar la DTP de las muestras por una distribución más “gruesa” en un intervalo de tamaño, además se continúa identificando las mismas tres zonas en su dinámica de sedimentación (**ver figuras 26**), pero comparativamente con una suspensión sin modificar su DTP se disminuye el tiempo que la suspensión toma para romper el

esfuerzo de cedencia inicial, gracias a tener una mejor sensibilidad al efecto de gravedad, adicionalmente se llega en menos tiempo al inicio de la zona de compresión y se presenta una mejor capacidad de compresionarse en la etapa final (**ver figura 26 y 29**), mostrando en el pH natural (pH=8) la mejor compresión y decreciendo hasta el menos compresionado pH 11. El comportamiento anterior se presenta igual que en las muestras (SF) y con los mismos fenómenos explicados anteriormente pero agregando el efecto de tener un material con tamaños mayores en cierto intervalo de tamaño lo cual ayuda a mejorar la capacidad de compresión (**ver figura 29**).

- En las pruebas con modificación de DTP y adición de floculante (**ver figura 27, CFDT**) se obtuvo la misma secuencia de compresión para cada pH según las tendencias mostradas en la etapa final, como en las pruebas (CF) (**ver figura 24**), teniendo la mejor compresión en el pH 11 y decreciendo esta capacidad hasta el pH 8 (pH natural).

- En la **figura 28** se identifican claramente los efectos que tiene la adición de floculante en las muestras pH 8 y modificación de su DTP (CFDT y SFDT), donde se destaca lo siguiente:
 - 1) Una disminución en el tiempo que tarda la suspensión para vencer el esfuerzo de cedencia inicial, tiempo mejorado por la adición del floculante y el aumento de tamaño de partícula variables que se identifican como modificadoras de esfuerzo de cedencia.
 - 2) No hay cambios significativos en la velocidad de sedimentación de ambas pruebas en la segunda etapa "sedimentación libre".
 - 3) Se presenta una menor capacidad de compresionarse (eliminar agua de los intersticios) en la muestra floculada (CFDT) comparativamente con la muestra sin flocular (SFDT), esta última muestra que es la que mejor compresión alcanzó de todos los ensayos. Lo anterior nos indica que pese a tener un intervalo de partículas más gruesas que son más sensibles al efecto de gravedad, el efecto electro reológico de superficie que genera la adición del floculante en la pasta, sigue gobernando la capacidad de compresión en las etapas finales de sedimentación.

- La **figura 29** muestra la diferencia en el comportamiento de la sedimentación en las muestras sin flocular y con cambio en su DTP (SF y SFDT), como datos relevantes y que eran los esperados por los cambios de tamaño de partícula se tiene:
 - 1) Una disminución en el tiempo que se toma para vencer el esfuerzo de cedencia inicial, en la muestra que tiene modificada su DTP (SFDT), por la incidencia que el cambio de granulometría tiene con la fuerza de gravedad.
 - 2) Una aceleración continua de la velocidad de sedimentación libre en la muestra SFDT, en cambio la muestra SF muestra una velocidad constante, dando a conocer el efecto que tiene la gravedad en muestras con DTP más gruesas.
 - 3) La muestra SFDT describe un inicio de la etapa de compresión en menos tiempo que la muestra CF además de una mejor compresión y por lo tanto mejor eliminación de agua intersticial, gobernado este fenómeno netamente al tener una DTP más gruesa.

- La **figura 30** presenta el comportamiento de las muestras SF y CFDT la cual tiene un comportamiento interesante en los siguientes aspectos:

- 1) Como se evidencia y es repetitivo el tiempo en vencer el esfuerzo de cedencia inicial es menor en las muestras floculadas y/o con cambio de DTP a comparación de las muestras no floculadas.
 - 2) Se presenta un leve incremento en la velocidad de sedimentación libre de la muestras CFDT, muy marcado comparativamente con la muestra SF.
 - 3) Aunque la muestra CFDT acorta el tiempo para iniciar su etapa de compresión a comparación de la otra muestra (SF), se identifica que la compresión no fue lo que se esperaba, pues la muestra sin floculante SF mostró una mejor compresión aunque la otra muestra tuviera su DTP modificada, variable que como se ha visto antes ha influenciado fuertemente el aumento en la compresión de las suspensiones.
- En la **figura 31** se presenta el caso en que la muestra tiene adición de floculante pero con su DTP original (CF) y una muestra sin floculante pero con modificación en su DTP (SFDT), se encontraron elementos a resaltar:
- 1) Como se ha observado en otras pruebas el flocular y modificar la DTP de las muestras ha incidido en acortar los tiempos para vencer el esfuerzo de cedencia inicial y para estas dos muestras se evidencia que este tiempo se acorta en una proporción similar, tendiendo modificada las dos muestras estas variables determinantes.
 - 2) En la sedimentación libre la muestra con su DTP modificada (SFDT) tiene un aumento importante en su velocidad de sedimentación, mientras la muestra que solo esta floculada CF presenta una velocidad constante y más “lenta”.
 - 3) Se tiene una gran diferencia en la etapa de compresión pues aunque ambas muestras inician dicha etapa en un tiempo muy similar, el cambio de DTP en la muestra SFDT mostró una mucho mejor dinámica de compresión en esta etapa y por lo tanto una mejor reducción de agua entre los intersticios.
- La **figura 32** permite observar como una combinación de variables (variación de pH y adición de floculante) pueden generar equivalencias en la dinámica de sedimentación de dos muestras, se evidencian aspectos importantes como:
- 1) Sigue teniendo influencia el efecto de la adición de floculante en la disminución del tiempo para vencer el esfuerzo de cedencia como se observa en la muestra pH11CF, aunque sea mas breve que el efecto que ha tenido en otras pruebas, sigue siendo vigente.
 - 2) La velocidad de sedimentación en la etapa de sedimentación libre es muy similar entre las muestras pues en la grafica se aprecia una pendiente prácticamente del mismo valor, indicando que bajo este escenario de manejo de variables se consigue que estas dos muestras sedimenten a igual velocidad en este etapa.
 - 3) Al igual que en la etapa de sedimentación libre, la zona de compresión tiene las mismas condiciones para ambas muestras, tanto el tiempo que le toma llegar al inicio de la compresión como en la capacidad de compresionarse, evidenciando la misma tendencia de evacuación de agua para las dos muestras y por lo tanto la misma humedad final. Esta capacidad de compresión se sustenta con el potencial Z de las partículas, pues para las muestras a pH = 11 floculadas y pH entre 8 y 9 (pH natural), se tienen valores muy cercanos de potencial Z y por lo tanto se tiene una capacidad de compresión muy semejantes entre ellas.
- En las pruebas de reología realizada en la pasta con solo variaciones de pH mostrada en la **figura 33**, se presenta un pico de alta viscosidad y alto esfuerzo de cedencia en los pH 8 y 9, siendo estos los valores cercanos al pH natural de la pasta en proceso, es decir, nos indica que a las condiciones actuales de operación, el pH natural que tiene la pasta en el proceso esta regido por la mayor viscosidad que esta pasta puede tener en el intervalo de

pH analizado, los pH diferentes a 8 y 9 tienen una reducción progresiva en estas variables obteniendo la menor viscosidad y esfuerzo de cedencia a pH 11. Esta alta viscosidad entre los pH 8 y 9 refleja la condición de un empaquetamiento o baja dispersión que se obtiene al tener cargas de superficie cercanas a cero, este fenómeno como se ha explicado antes se debe al potencial Z, el cual se menciona y explica su comportamiento posteriormente.

- En la **figura 34** se presentan los resultados de las pruebas de potencial Z realizados a la calcita con variaciones de pH, se corrió en muestras sin adición de floculante y con la adición de floculante a 20 ppm, concentración adicionada a las muestras floculadas. Como resultados relevantes se obtuvieron:
 - 1) Muestras sin adición de floculante. Presenta un decrecimiento monótono en el valor de potencial Z en mV desde el pH 7 hasta pH 11, teniendo el ZPC o potencial Z cero en un valor cercano a pH 9 (como se encuentra en textos referenciados). Una de las posibles causas por la cual el ZPC no corresponde exactamente con el pH de alta viscosidad encontrado, es debido a que la medición se realizó al mineral calcita y no al conjunto poli mineral de la pasta, que aunque contenga bajas cantidades de Al_2O_3 , SiO_2 y Fe_2O_3 , estos pueden modificar el punto exacto del ZPC que para las pruebas de \square ometría es pH = 8. Otro factor que puede incidir es la precisión del equipo pues tiene una incertidumbre de +/- 5 mV, lo que me indica que el punto de potencial Z cero puede estar en el punto entre pH 8 y 9, es decir la misma zona donde se encontró el pico de alta viscosidad en la **figura 33**, verificando la zona de potencial Z cero. Lo anterior muestra que en el escenario de la pasta en proceso, el pH 8 genera una carga electropositiva en la superficie del carbonato cercana a potencial cero.
 - 2) Muestras con adición de floculante. Al igual que en la muestra sin floculante se tiene un decrecimiento monótono electropositivo en el valor del potencial Z desde pH 7 a pH 11 pero sin tener ZPC (potencial Z cero) y con una pendiente más suave, teniendo el menor valor a pH 11. En los pH 7 y 8 no hay cambios significativos del potencial Z debido a que a estos pH el carácter positivo de la carga superficial de las partículas de carbonato es el mismo que la carga catiónica positiva del floculante, entonces su absorción se puede considerar como muy débil o nula. En cambio para los pH 10 y 11 se tiene un cambio significativo del potencial al adicionar el floculante, incluso pasando de una carga superficial electronegativa a tener un valor electropositivo, por la razón del carácter de carga opuesta, esto nos indica que el efecto de adicionar este tipo de floculante a la pasta estudiada es el de un cambio de carga superficial tanto en valor como en signo para pH por encima de 9, con las respectivas respuestas a nivel macro en la sedimentación antes mencionadas.
- En la **Figura 35 y 36** se puede apreciar los resultados de las humedades finales al terminar los procesos de compresión para cada una de las pruebas, comparativamente para cada tipo de montaje la diferencia de humedad final entre el mayor y menor compresionado son los siguientes:
 - o Diferencia humedad montajes SF. (0.86%), menor humedad alcanzada (32.82%)
 - o Diferencia humedad montajes CF (1.14%), menor humedad alcanzada (33.89%)
 - o Diferencia humedad montajes SFDT (0.69%), menor humedad alcanzada (32.10%)
 - o Diferencia humedad montajes SFDT (0.68%), menor humedad alcanzada (33.52%)Como dato relevante se observa que la diferencia entre la máxima y mínima humedad alcanzada entre las muestras SF y CF es 2.21% con solo la modificación de pH y adición de floculante. Para la diferencia de humedad entre la máxima y mínima compresión entre

todas las muestras se obtuvo un 2.93% teniendo variaciones de pH, DTP y adición de floculante.

- En el modelamiento matemático de la reducción de la humedad final vs pH se observa claramente una correlación directa e inversa entre los diferentes resultados sin flocular y floculado, donde las muestras sin flocular describen una tendencia monótona creciente y los floculados una monótona decreciente, el modelo se ajusta muy bien a los datos pero a de tenerse en cuenta que estos modelos tienen las restricciones de la DTP corregida que se utilizó en las pruebas y de las características del floculante utilizado en la investigación, si alguna de estas variables cambian, el modelo no se aplica a esos resultados.

6. CONCLUSIONES

Esfuerzo de cedencia.

- Para las condiciones bajo las cuales se procedieron los ensayos de sedimentación (concentración, tiempo por pruebas), y con la combinación de las variables modificadas, se encontró siempre un esfuerzo de cedencia inicial a vencer por la suspensión, el cual se reducía dependiendo el manejo de variables. Este es un fenómeno que no ha sido reportado en los estudios referenciados y que tiene una incidencia directa en los tiempos que toma la pasta para su proceso de sedimentación.
- Como variables modificadoras del esfuerzo de cedencia encontrado, se determina que la adición del floculante de carácter catiónico utilizado en la investigación y la modificación controlada en la DTP de las pasta el cual consistió en un aumento de granulometría en cierto intervalo de tamaños, modifica en mayor o menor medida el tiempo total que la pasta tarda en superar este esfuerzo de cedencia, permitiendo tener aunque no una eliminación total de este, al menos una posibilidad de reducir en casi un 50% el tiempo en que la pasta se encuentra como una suspensión “estable” **(ver figuras 25 y 29)**.
- Comparativamente con otros procesos de sedimentación en los cuales la concentración inicial es muy diluida (90% en peso de agua), la concentración inicial bajo la cual se realizó este estudio (40% peso en agua equivalente a 64% en volumen) se puede considerar que la concentración de sólidos a la que llegan estas pruebas diluidas en su etapa de compresión, es la concentración en la que inicia nuestras pruebas. Se podría entonces definir que en una etapa de compresión de una sedimentación con concentración de sólidos diluida, existen sub etapas identificadas en este estudio (Sedimentación libre y compresión) que tienen un comportamiento muy similar a las etapas de sedimentación de una suspensión diluida.

Efecto del pH en la sedimentación de pastas.

- La modificación del *pH* en la pasta tiene un efecto moderado en la compresión final de este material pese a que se presentan cambios importantes en los valores de potencial Z de las partículas, mostrando que aunque la modificación de pH incide en la dinámica de sedimentación no tiene un efecto tan marcado en la reducción final de humedad en la etapa de compresión **(ver figura 23)**.

Efecto en la adición de floculante.

- Cuando se utiliza un floculante para conseguir eficiencia en la sedimentación de suspensiones se debe considerar cuál es el efecto que se quiere conseguir con la adición de este reactivo, pues no todos actúan de la misma manera y dependiendo de las condiciones reológicas y electroreológicas de la suspensión, pueden actuar de una manera u otra, por ejemplo, en el caso estudiado, un efecto macro que se obtiene en la adición de

este floculante a la pasta en particular es permitir el inicio de la sedimentación en menor tiempo, pero sacrificando la capacidad de reducción de agua en la etapa final de compresión (**ver figuras 24 y 25**).

- En pastas floculadas el cambio de *pH* pasa de tener un control moderado a ser una de las variables más importantes en el proceso de sedimentación y más aún en el proceso de compresión final, modificando completamente la capacidad de eliminación de agua entre los intersticios para una misma muestra con un mismo floculante pero que difiera en el valor del *pH*, es así como se demuestra el efecto modificador que tiene la concentración de iones en la suspensión y sobre todo los que son iones determinantes de potencial del mineral constituyente de la suspensión.
- Se debe tener especial atención cuando se formule un floculante para un proceso de sedimentación, pues se debe tener en cuenta que dependiendo de las características de la suspensión a procesar y de las características del floculante, se produce una dinámica de sedimentación determinada la cual debe ser evaluada si va en beneficio del proceso productivo y con los resultados esperados.
- Es conveniente la permanente evaluación de las variables que en esta investigación se controlaron en un proceso de investigación y con mayor cuidado si se realiza adición de floculante, pues como se ha podido demostrar en el estudio existen determinadas combinaciones entre *pH*, DTP y floculación las cuales generan escenarios de sedimentación muy similares principalmente en la etapa final de compresión (**ver figura 32**), así se tendrá el criterio de decidir si se puede suspender la adición de floculante, modificar la DTP o adicionar algún aditivo que controle el *pH*, obtenido resultados similares en capacidades de reducción de humedad y con unos costos menores.

Efecto en la modificación de DTP.

- La modificación controlada de la DTP de la pasta mejoró en una manera significativa el esfuerzo de cedencia inicial, aumentó las velocidades de sedimentación libre y se consiguieron altas compresiones finales (**ver figuras 26, 29 y 31**), sin la adición de floculantes. Esta modificación consigue mejores dinámicas a las conseguidas con la adición de floculante, siendo esta modificación una variable de proceso y no un costo adicional en el cual se incurre con la adición de floculante, pero se debe tener en cuenta los efectos que se tendrían en el horno de clinkerización al tener una distribución más “gruesa” en la pasta por la generación de cluster de sílice en el clinker.
- Pese a contar con una distribución de tamaño de partícula más gruesa, la adición de floculante continúa ejerciendo un control electro reológico en la dinámica de sedimentación, pues como se aprecia en los resultados (**ver figuras 27 y 28**), el efecto generado por la adición del floculante sigue siendo más significativo que el tener una distribución de partículas más gruesa y por lo tanto, limitando la capacidad de compresión pese a tener una mejor sensibilidad al efecto gravitacional con tamaños más grandes en las partículas (**ver figura 28**).

7. RECOMENDACIONES

- Como primera recomendación se sugiere la medición y control del pH en la pasta de proceso, pues como se observó en la investigación se tiene influencia de esta variable en el proceso de sedimentación y es importante detectar que agentes externos o internos del proceso (adiciones de arcillas o arenas) pueden modificar el valor del pH en la pasta.
- El control de *pH* en la pasta toma una mayor influencia en un proceso de sedimentación donde se dosifique algún tipo de floculante pues como se encontró en el estudio, el cambio de pH modifica de manera marcada la dinámica de la sedimentación sin importar si la calidad y tipo de floculante, DTP y calidad química de óxidos en la pasta se mantengan constantes en el proceso. Es importante que el pH bajo el cual se formuló determinado floculante sea mantenido al menos el tiempo en que se dosifica tal floculante.
- Antes de tomar la decisión de adicionar algún tipo de floculante a un proceso de sedimentación, se debe analizar la viabilidad técnica de incrementar la DTP de manera controlada en la pasta, evaluando los efectos en molienda – clasificación y en clinkerización por la generación de clusters por sobre tamaños, pues cambios moderados en esta distribución de tamaño generan dinámicas de sedimentación muy diferentes y las cuales mejoran tanto la etapa de sedimentación libre como la etapa de compresión, evitando el uso de floculantes y obteniendo un ahorro importante en los gastos por el elevado valor que este tipo de aditivos tiene en el mercado.
- Cuando por necesidades del proceso se determine la utilización de algún tipo de floculante para mejorar la sedimentación de una suspensión, se debe tener muy en cuenta que cada tipo de floculante hace que la dinámica de sedimentación se comporte de manera diferente, es así como si lo que se necesita es conseguir una humedad moderadamente baja en tiempos cortos algunos floculantes mejoran las velocidades de sedimentación iniciales alcanzando estas humedades en un tiempo relativamente corto, pero que en la etapa de compresión su función no es tan eficiente, o por el contrario si lo que se busca es tener una muy buena reducción de humedad sin necesitar tiempos cortos en el proceso, floculantes que benefician la etapa de compresión deberían ser tenidos en cuenta.
- Uno de los aspectos a tener en cuenta y buscando optimizar al máximo el uso de floculantes, es el tema de la preparación de estos aditivos pues en gran medida la buena preparación de estos aditivos ayudan a optimizar al máximo el efecto que estos floculantes tienen sobre la sedimentación de suspensiones, como aspectos recomendados se tiene:
 - 1) La dilución de estos aditivos para la adición a la suspensión debe ser en agua con bajos contenidos de ultra finos (que no sean aguas recirculadas del mismo u otros procesos) pues esto disminuye la capacidad que el aditivo tiene para flocular.
 - 2) Se debe tener controlada la temperatura del agua en la cual se prepara “diluye” el floculante, los valores de temperatura dependen de las características del floculante y deben ser consultadas a los proveedores del producto.
 - 3) Además de los aspectos anteriores a la hora de preparar el floculante, es importante como se homogeniza el floculante con el agua, pues se recomienda

hacerlo bajo un escenario de corte entre agua – floculante y no hacerlo con medios mecánicos de agitación como hélices pues estas dañan la cadena polimérica reduciendo dramáticamente la capacidad del floculante, para esto se debe considerar la preparación en recipientes con cilindros concéntricos y movimiento relativo entre ellos (ver figura 39) o con la utilización de toberas (ver figura 40), ambas posibilidades generan modos de cizalladura en el agua, favoreciendo la preparación del aditivo sin dañar su estructura.

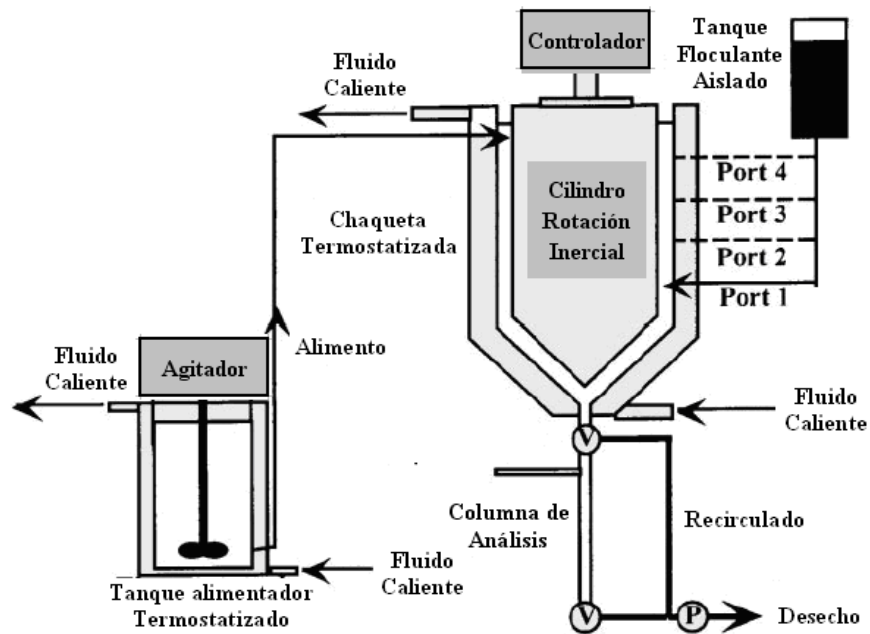


Figura 39. Esquema Preparación Floculante con cilindros concéntricos
Tomado del artículo (Recent Development and Techniques for Improving thickener Performance)



Figura 40. Preparación de Floculante con el uso de Toberas
Mina Chuquicamata - Chile

- 4) Otra variable a considerar es la homogeneización del floculante diluido con la suspensión, para mejorar este proceso de debe realizar la homogeneización en una suspensión altamente diluida (entre 80 – 85% de humedad), esto con el fin de permitir que el floculante puede tener el mayor contacto con toda la superficie de la partícula y con todas las partículas, esta homogeneización se realiza en el fedwell del sedimentador en un régimen de corte entre la pasta y floculante, es ahí donde ocurre la dilución buscada de la suspensión y la pasta entra al espesador ya con el aditivo homogenizado completamente.
- Aunque no sea el alcance de esta investigación, se hace especial recomendación en la operación de los espesadores y sus variables a controlar, entre los aspectos más importantes a tener en cuenta tenemos:
- 1) El trabajo en continuo de los espesadores además de favorecer la estabilidad en la operación del equipo, garantiza la continuidad en las diferentes zonas constitutivas de un proceso de sedimentación las cuales optimizan la eficiencia del equipo y mejoran las capacidades de eliminación de agua. Para conseguir este tipo de operación se puede considerar la adecuación de un tanque pulmón el cual sirve para mantener una cabeza continua de bombeo y favorecer la operación en continuo.
 - 2) La alimentación a espesadores en lo posible dentro de un régimen laminar además de evitar turbulencias al interior del espesador las cuales perturban el proceso normal de sedimentación, permiten generar y conservar las diferentes zonas de sedimentación con las ventajas antes mencionadas, para esto se debe trabajar no solo la canal de alimentación si no también el fedwell o equipo por donde se alimenta el espesador.

- No todos los procesos de sedimentación se deben trabajar bajo la dinámica de dilución, floculación etc, dependiendo la concentración a la que se llega con la suspensión al espesador se puede trabajar de diferente forma. Para las concentraciones de 40 % de humedad con que se alimenta a espesadores en el proceso estudiado de la Planta Cairo, se puede recurrir a espesadores de alta compresión (**ver figura 41B**), los cuales obtienen reducciones de humedad no por fenómenos de sedimentación libre si no por medios de compresión los cuales con pastas de altas concentración alimentadas, favorece este proceso y se consiguen reducciones importantes de humedad, que bajo la sedimentación convencional en sedimentadores convencionales y/o de alta eficiencia (**ver figura 41A**) es muy difícil conseguir.

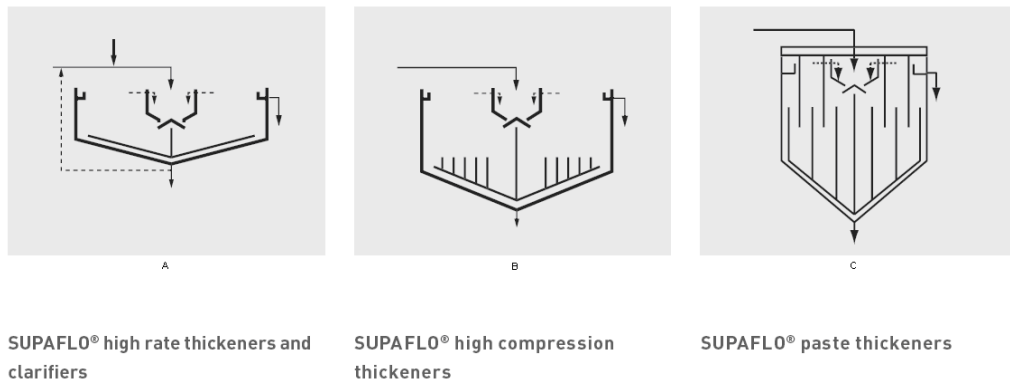


Figura 41. Diferentes tipos de espesadores según su diseño y funcionalidad
Extraído del manual de espesadores (AUTOTEC Thickeners)

- Por último se recomienda evaluar bajo la misma metodología experimental utilizada en esta investigación, el efecto que tiene en la sedimentación de pasta de carbonato la adición de un floculante de carácter aniónico, determinando así la dinámica de sedimentación según el tipo de floculante, permitiendo tener una tabla de control que permita seleccionar que floculante utilizar según las necesidades requeridas.
- Como superficie de control y como recomendación final con el fin de mostrar los posibles efectos que la variación de pH, DTP y adición de floculante tienen sobre la sedimentación de pastas calcáreas, se adjuntan las **figuras 42 y 43** las cuales fueron construidas con extrapolaciones de las tendencias encontradas en las pruebas de sedimentación con los dos tipos de DTP estudiados, la extrapolación se realizó en base a las proporciones que se tienen con las variaciones echas en estas variables, extrapolándolas a pasta con DTP más finas y más gruesas. Es importante observar que estos escenarios muestran que entre más fina tenga la DTP en la pasta a sedimentar, mayor son los efectos del pH y uso del floculante en la sedimentación, pero si la DTP de la pasta se aumenta en tamaño, los efectos de pH y floculante siguen teniendo alguna influencia pero al tener mayor tamaño de partícula estos efectos se “reducen” teniendo un comportamiento en la sedimentación muy similar. Este escenario se limita a las restricciones que el proceso impone en cuanto al tamaño de partícula, pero se podría hablar que entre las DTP2 y DTP4 están los intervalos de tamaño que comúnmente se manejan en las plantas húmedas de cemento.

HUMEDAD FINAL PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN (SIN FLOCULANTE)

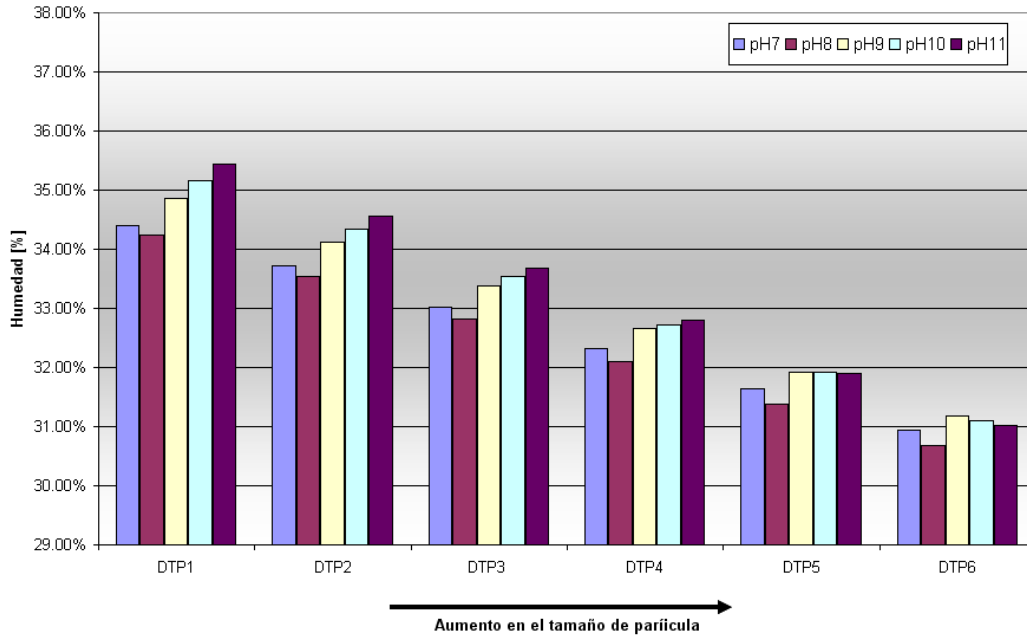


Figura 42. Gráfico de Control Sedimentación (SF)

HUMEDAD FINAL PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN (CON FLOCULANTE)

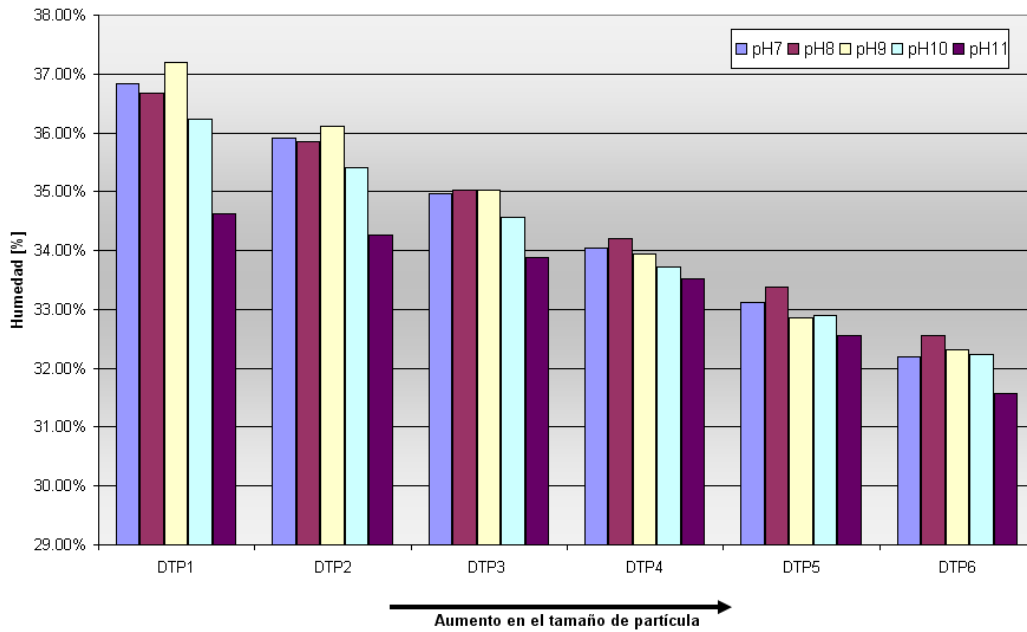


Figura 43. Gráfico de Control Sedimentación (CF)

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FERNANDO CONCHA. Manual de Filtración y Separación. Universidad de Concepción, Chile. 2001
- [2] M.S. NASSER, AE. JAMES. The Effect of Polyacrylamide Charge Density and Molecular Weight on the Flocculation and Sedimentation Behaviour of a Kaolinite Suspension. Manchester University, 2006
- [3] BRIJ M. MOUDGIL, P. SOMASUNDARAN. Flocculation, Sedimentation & Consolidation. Proceedings of the Engineering Foundation Conference held at The Cloister, Sea Island, Georgia USA. January 27 – February 01, 1985.
- [4] M. OSWALDO BUSTAMANTE RÚA. Reología de suspensiones. Escuela Ingeniería de Materiales. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. 2002
- [5] JAN GUSTAFSSON, ERIK NORDENSWAN, JARL B. ROSENHOLM. Effect of pH on the sedimentation, z-potential, and rheology of anatase suspensions. Department of Physical Chemistry, Åbo Akademi University, FIN-20500 Åbo, Finland. November 2002.
- [6] FERNANDO CONCHA, R Burger. Thickening in the 20th Century: A Historical Perspective. Article, Universidad de Concepción, Chile, May 2003.
- [7] P.F.G BANFILL. The Rheology of Fresh Cement and Concret – A Review. School of The Built Environment. Watt University. Endinburgh, 2003.
- [8] ANATOL ZINGG. Adsorption of Polyelectrolytes and its Influence on the Rheology, Zeta Potential and Microstructure of Various Cement and Hydrate Phases. Duebendorf Suiza. 2008
- [9] NIKOLA MIKANOVIC. CARMEL JOLICOEUR. Influence of Superplasticizer on the Rheology and Strability of Limestone and Cement Pastes. Sherbrooke University, Canada. 2008
- [10] Jay D. Schieber, Juan J. de Pablo. Chemical, Biological and Materials Engineering Thermodynamics. Illinois and Wisconsin Universities, 2005.
- [11] CRISTOPHER M. NEUBAUER, MING YANG, HAMLIN M. JENNINGS. Interparticle Potential and Sedimentation Behavior of Cement Suspension: Effects of Admixtures. Departments of Materials Science, Northwestern University, Evanston Illinois. USA. 1998
- [12] J.B. FARROW, R.R.R. JOHNSTON, K. SIMIC, J.D. SWIFT. Consolidation and Aggregate Densification During Gravity Thickening. Bentley. Australia. 2000
- [13] MUKUND PARTHASARATHY, DANIEL J. KLINGENBERG. Electrorheology: Mechanisms and Models. University of Wisconsin, Madison USA. 1996.
- [14] M. HULDEN, E. SJOBLUM. Prog. Colloid Polym. Sci 82. 1990. p 28-37.
- [15] W. GONG, P. JEKINS, J. RALSTON, R. SHUMANN, in: J.S. LASKOWSKI. (ed). Polymer and Mineral Processing. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Quebec City. Canada. 1999.

- [16] J.P. VOISBERT, J. PRESELLO, J.C. CASTAING, B. CABANE. Colloid Surf. A 178. 2001. p 187-198.
- [17] BARRIENTOS, A. Parameters Determination in the Phenomenological model of Sedimentation. Thesis. Universidad de Concepción. 1978.
- [18] BASCUR, O. Phenomenological Model of Suspensions in Sedimentation. Thesis. Universidad de Concepción. 1976.
- [19] BASCUR, O. A unified Solid – Liquid Separation Framework. First Regional Meeting, American Filtration Society. Houston Texas. 1989. p 1-11.
- [20] Becker. R. Continuous Thickening. Design and Simulation of Thickeners. Engineering Thesis, University of Conception. 1982
- [21] BURGER, R. and CONCHA F. Mathematical Model and Numerical Simulation of the Settling of Flocculated Suspensions. International J. Multiphase Flow. Vol 24. 1998. p 10005-1023
- [22] BURGER R, CONCHA F. TILLER, F. Application of the Phenomenological Theory to Several Published Experimental Cases of Sedimentation Process. Vol 80. 20002 p 105 – 118.
- [23] BUSTOS, MC, AND CONCHA, F. Kynch Theory of Sedimentation of Small Particles in a Viscous Fluid. E.M. Tory. Advances in Fluid Mechanics. Vol 7. Computational Mechanics Publications Southampton. 1996. p 7 -49.
- [24] CONCHA F., BUSTOS and BARRIENTOS. Phenomenological Theory of Sedimentation. Chapter 3 in Sedimentation of Small Particles in a Viscous Fluid, E.M. Tory ed. Computational Mechanics Publications Southampton. UK. 1996. p 51-96.
- [25] EGOLF, C.B. and MCCABE, W.L. Rate of Sedimentation of Flocculated Particles. Trans. Alche. Vol 33. 1937. p 620
- [26] FONT, R. Compression Zone Effect Batch Sedimentation. Alche J. Vol 34. 1998. p 229
- [27] ADORJAN, L.A. A Theory of Sediment Compression. XI IMPC, Cagliari. 1975. pp.1-22
- [28] ADORJAN L.A. Determination of thickener dimensions from sediment compression and permeability test results. Trans. Inst. Min. Met., Sec C, 85. 1976. pp. 157-163.
- [29] BUSTOS, M.C., CONCHA, F., BÜRGER, R., AND TORY, E.M. Sedimentation and Thickening: Phenomenological Foundation and Mathematical Theory, Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, The Netherlands. 1999.pp 304
- [30] BASCUR, O. Phenomenological model of suspensions in sedimentation. Eng. Thesis, University of Concepción (in Spanish). 1976
- [31] COMINGS, E.W. Thickening calcium carbonate slurries, Ind. Eng. Chem., Vol. 32, No. 5. 1940. pp 663-668.
- [32] CONCHA, F., AND BUSTOS, M. C. Settling velocities of particulate systems. Part 7. Kynch sedimentation processes: Continuous thickening, Int. J. Mineral Process. Vol. 34. 1992. pp 33-51.

9. ANEXOS

Anexo 1. Datos Función de Densidad MN

Tamaño [um]	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
1408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
995.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
837.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
704	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
592	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
497.8	0	0.32	0	0	0	0	0	0.4	0	0
418.6	0.37	0.45	0	0	0.4	0.4	0.37	0.59	0.31	0.38
352	0.57	0.68	0	0.42	0.57	0.61	0.58	0.9	0.44	0.58
296	0.95	1.02	0	0.61	0.83	0.97	0.96	1.32	0.65	0.93
248.9	1.57	1.48	0.49	0.91	1.18	1.5	1.56	1.84	0.97	1.46
209.3	2.38	2.02	0.96	1.35	1.62	2.16	2.33	2.38	1.39	2.14
176	3.21	2.6	1.93	1.93	2.14	2.87	3.12	2.93	1.9	2.9
148	3.91	3.21	3.48	2.66	2.7	3.55	3.8	3.47	2.47	3.66
124.5	4.43	3.83	5.09	3.47	3.3	4.13	4.35	3.97	3.15	4.38
104.7	4.84	4.43	5.99	4.25	3.89	4.59	4.81	4.47	3.95	5.05
88	5.19	4.94	6.12	4.9	4.46	4.93	5.22	4.95	4.82	5.63
74	5.43	5.26	5.91	5.33	4.95	5.13	5.54	5.4	5.58	6.03
62.23	5.48	5.3	5.65	5.5	5.25	5.22	5.76	5.67	6.04	6.1
52.33	5.3	5.14	5.38	5.43	5.3	5.09	5.71	5.69	6.11	5.91
44	4.95	4.83	5.09	5.19	5.11	4.85	5.5	5.45	5.92	5.47
37	4.56	4.51	4.78	4.88	4.83	4.56	5.19	5.1	5.58	5
31.11	4.21	4.26	4.5	4.61	4.58	4.31	4.84	4.75	5.21	4.6
26.16	3.93	4.06	4.23	4.37	4.38	4.09	4.47	4.41	4.84	4.27
22	3.67	3.86	3.96	4.14	4.18	3.88	4.08	4.03	4.46	3.92
18.5	3.39	3.62	3.65	3.88	3.93	3.61	3.65	3.62	4.04	3.54
15.56	3.09	3.35	3.31	3.58	3.62	3.31	3.23	3.2	3.61	3.15
13.08	2.82	3.08	2.99	3.27	3.32	3.02	2.86	2.84	3.22	2.8
11	2.6	2.84	2.74	3.01	3.05	2.79	2.56	2.56	2.89	2.52
9.25	2.43	2.65	2.54	2.81	2.83	2.6	2.33	2.33	2.62	2.29
7.778	2.29	2.47	2.38	2.63	2.63	2.45	2.12	2.14	2.38	2.09
6.541	2.16	2.3	2.24	2.46	2.45	2.3	1.93	1.96	2.16	1.91
5.5	2.02	2.13	2.09	2.3	2.27	2.15	1.76	1.79	1.96	1.75
4.625	1.91	2	1.96	2.16	2.12	2.02	1.62	1.67	1.82	1.62
3.889	1.83	1.91	1.87	2.08	2.03	1.93	1.53	1.58	1.73	1.54
3.27	1.79	1.87	1.82	2.04	1.98	1.87	1.47	1.53	1.69	1.49
2.75	1.73	1.81	1.76	1.98	1.92	1.79	1.4	1.46	1.63	1.43
2.312	1.57	1.65	1.6	1.79	1.74	1.62	1.26	1.32	1.47	1.29
1.945	1.3	1.36	1.32	1.47	1.44	1.34	1.04	1.09	1.22	1.07
1.635	0.99	1.04	1.01	1.11	1.1	1.03	0.8	0.84	0.93	0.82
1.375	0.75	0.79	0.76	0.83	0.83	0.78	0.61	0.64	0.69	0.62
1.156	0.6	0.64	0.61	0.66	0.68	0.63	0.49	0.51	0.55	0.5
0.972	0.52	0.57	0.53	0.58	0.6	0.56	0.42	0.44	0.47	0.43
0.818	0.48	0.53	0.48	0.53	0.55	0.51	0.38	0.4	0.43	0.39
0.688	0.43	0.48	0.43	0.48	0.5	0.46	0.35	0.36	0.38	0.34
0.578	0.35	0.4	0.35	0.4	0.42	0.39	0	0	0.32	0
0.486	0	0.31	0	0	0.32	0	0	0	0	0
0.409	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.344	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.289	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo 2. Datos DTP MN

Tamaño [um]	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
1408	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1184	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
995.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
837.2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
704	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
592	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
497.8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
418.6	100	99.68	100	100	100	100	100	99.6	100	100
352	99.63	99.23	100	100	99.6	99.6	99.63	99.01	99.69	99.62
296	99.06	98.55	100	99.58	99.03	98.99	99.05	98.11	99.25	99.04
248.9	98.11	97.53	100	98.97	98.2	98.02	98.09	96.79	98.6	98.11
209.3	96.54	96.05	99.51	98.06	97.02	96.52	96.53	94.95	97.63	96.65
176	94.16	94.03	98.55	96.71	95.4	94.36	94.2	92.57	96.24	94.51
148	90.95	91.43	96.62	94.78	93.26	91.49	91.08	89.64	94.34	91.61
124.5	87.04	88.22	93.14	92.12	90.56	87.94	87.28	86.17	91.87	87.95
104.7	82.61	84.39	88.05	88.65	87.26	83.81	82.93	82.2	88.72	83.57
88	77.77	79.96	82.06	84.4	83.37	79.22	78.12	77.73	84.77	78.52
74	72.58	75.02	75.94	79.5	78.91	74.29	72.9	72.78	79.95	72.89
62.23	67.15	69.76	70.03	74.17	73.96	69.16	67.36	67.38	74.37	66.86
52.33	61.67	64.46	64.38	68.67	68.71	63.94	61.6	61.71	68.33	60.76
44	56.37	59.32	59	63.24	63.41	58.85	55.89	56.02	62.22	54.85
37	51.42	54.49	53.91	58.05	58.3	54	50.39	50.57	56.3	49.38
31.11	46.86	49.98	49.13	53.17	53.47	49.44	45.2	45.47	50.72	44.38
26.16	42.65	45.72	44.63	48.56	48.89	45.13	40.36	40.72	45.51	39.78
22	38.72	41.66	40.4	44.19	44.51	41.04	35.89	36.31	40.67	35.51
18.5	35.05	37.8	36.44	40.05	40.33	37.16	31.81	32.28	36.21	31.59
15.56	31.66	34.18	32.79	36.17	36.4	33.55	28.16	28.66	32.17	28.05
13.08	28.57	30.83	29.48	32.59	32.78	30.24	24.93	25.46	28.56	24.9
11	25.75	27.75	26.49	29.32	29.46	27.22	22.07	22.62	25.34	22.1
9.25	23.15	24.91	23.75	26.31	26.41	24.43	19.51	20.06	22.45	19.58
7.778	20.72	22.26	21.21	23.5	23.58	21.83	17.18	17.73	19.83	17.29
6.541	18.43	19.79	18.83	20.87	20.95	19.38	15.06	15.59	17.45	15.2
5.5	16.27	17.49	16.59	18.41	18.5	17.08	13.13	13.63	15.29	13.29
4.625	14.25	15.36	14.5	16.11	16.23	14.93	11.37	11.84	13.33	11.54
3.889	12.34	13.36	12.54	13.95	14.11	12.91	9.75	10.17	11.51	9.92
3.27	10.51	11.45	10.67	11.87	12.08	10.98	8.22	8.59	9.78	8.38
2.75	8.72	9.58	8.85	9.83	10.1	9.11	6.75	7.06	8.09	6.89
2.312	6.99	7.77	7.09	7.85	8.18	7.32	5.35	5.6	6.46	5.46
1.945	5.42	6.12	5.49	6.06	6.44	5.7	4.09	4.28	4.99	4.17
1.635	4.12	4.76	4.17	4.59	5	4.36	3.05	3.19	3.77	3.1
1.375	3.13	3.72	3.16	3.48	3.9	3.33	2.25	2.35	2.84	2.28
1.156	2.38	2.93	2.4	2.65	3.07	2.55	1.64	1.71	2.15	1.66
0.972	1.78	2.29	1.79	1.99	2.39	1.92	1.15	1.2	1.6	1.16
0.818	1.26	1.72	1.26	1.41	1.79	1.36	0.73	0.76	1.13	0.73
0.688	0.78	1.19	0.78	0.88	1.24	0.85	0.35	0.36	0.7	0.34
0.578	0.35	0.71	0.35	0.4	0.74	0.39	0	0	0.32	0
0.486	0	0.31	0	0	0.32	0	0	0	0	0
0.409	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.344	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.289	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo 3. Datos Función de Densidad MM

Tamaño [um]	M1	M2	M3	M4
1408	0	0	0	0
1184	0	0	0	0
995.6	0	0	0	0
837.2	0	0	0	0
704	0	0	0	0
592	0	0	0	0
497.8	0	0	0	0
418.6	0	0	0.31	0.4
352	0	0.46	0.49	0.64
296	0.33	0.78	0.86	1.05
248.9	0.69	1.34	1.53	1.68
209.3	1.59	2.2	2.56	2.53
176	3.53	3.34	3.88	3.58
148	6.47	4.67	5.31	4.81
124.5	9.11	6.09	6.69	6.17
104.7	9.94	7.45	7.87	7.47
88	8.98	8.37	8.61	8.33
74	7.27	8.39	8.48	8.29
62.23	5.68	7.41	7.44	7.32
52.33	4.56	5.96	5.89	5.9
44	3.94	4.68	4.5	4.63
37	3.69	3.87	3.57	3.8
31.11	3.62	3.47	3.11	3.37
26.16	3.52	3.3	2.93	3.16
22	3.28	3.16	2.83	3
18.5	2.91	2.93	2.67	2.77
15.56	2.53	2.61	2.41	2.49
13.08	2.22	2.29	2.12	2.2
11	1.98	2.04	1.86	1.98
9.25	1.8	1.85	1.68	1.82
7.778	1.64	1.71	1.55	1.7
6.541	1.5	1.58	1.44	1.61
5.5	1.37	1.48	1.35	1.53
4.625	1.26	1.38	1.28	1.46
3.889	1.19	1.31	1.22	1.39
3.27	1.14	1.26	1.18	1.31
2.75	1.08	1.2	1.13	1.17
2.312	0.97	1.07	1.01	0.96
1.945	0.8	0.87	0.83	0.7
1.635	0.61	0.65	0.62	0.47
1.375	0.45	0.47	0.45	0.31
1.156	0.35	0.36	0.34	0
0.972	0	0	0	0
0.818	0	0	0	0
0.688	0	0	0	0
0.578	0	0	0	0
0.486	0	0	0	0
0.409	0	0	0	0
0.344	0	0	0	0
0.289	0	0	0	0

Anexo 4. Datos DTP MM

Tamaño [um]	M1	M2	M3	M4
1408	100	100	100	100
1184	100	100	100	100
995.6	100	100	100	100
837.2	100	100	100	100
704	100	100	100	100
592	100	100	100	100
497.8	100	100	100	100
418.6	100	100	100	100
352	100	100	99.69	99.6
296	100	99.54	99.2	98.96
248.9	99.67	98.76	98.34	97.91
209.3	98.98	97.42	96.81	96.23
176	97.39	95.22	94.25	93.7
148	93.86	91.88	90.37	90.12
124.5	87.39	87.21	85.06	85.31
104.7	78.28	81.12	78.37	79.14
88	68.34	73.67	70.5	71.67
74	59.36	65.3	61.89	63.34
62.23	52.09	56.91	53.41	55.05
52.33	46.41	49.5	45.97	47.73
44	41.85	43.54	40.08	41.83
37	37.91	38.86	35.58	37.2
31.11	34.22	34.99	32.01	33.4
26.16	30.6	31.52	28.9	30.03
22	27.08	28.22	25.97	26.87
18.5	23.8	25.06	23.14	23.87
15.56	20.89	22.13	20.47	21.1
13.08	18.36	19.52	18.06	18.61
11	16.14	17.23	15.94	16.41
9.25	14.16	15.19	14.08	14.43
7.778	12.36	13.34	12.4	12.61
6.541	10.72	11.63	10.85	10.91
5.5	9.22	10.05	9.41	9.3
4.625	7.85	8.57	8.06	7.77
3.889	6.59	7.19	6.78	6.31
3.27	5.4	5.88	5.56	4.92
2.75	4.26	4.62	4.38	3.61
2.312	3.18	3.42	3.25	2.44
1.945	2.21	2.35	2.24	1.48
1.635	1.41	1.48	1.41	0.78
1.375	0.8	0.83	0.79	0.31
1.156	0.35	0.36	0.34	0
0.972	0	0	0	0
0.818	0	0	0	0
0.688	0	0	0	0
0.578	0	0	0	0
0.486	0	0	0	0
0.409	0	0	0	0
0.344	0	0	0	0
0.289	0	0	0	0

Anexo 5. Datos Batch SF

Tiempo [min]	pH7SF	pH8SF	pH9SF	pH10SF	pH11SF
0	100	100	100	100	100
5	99.162	99.36	99.362	99.323	99.268
10	98.834	99.016	98.94	99.157	98.975
15	98.246	98.376	98.444	98.583	98.755
20	97.511	97.884	97.832	98.133	98.17
25	96.53	97.244	96.874	97.342	97.365
30	95.662	96.457	96.1	96.215	95.974
35	94.158	95.423	94.632	94.975	94.802
40	92.589	94.144	93.256	93.848	93.485
45	90.727	92.717	91.407	92.35	92.167
50	88.924	91.289	89.664	91.068	91.215
55	87.277	90.157	88.197	90.222	90.117
60	86.203	88.878	87.305	88.981	89.312
65	85.296	88.361	86.399	88.226	88.287
70	84.507	87.549	85.621	87.276	87.408
75	83.885	87.032	84.88	86.393	86.969
80	83.331	86.368	84.216	85.907	86.237
85	82.866	85.778	83.794	85.126	85.944
90	82.492	85.236	83.258	84.615	85.359
95	82.12	84.596	82.799	84.062	84.773
100	81.782	84.375	82.249	83.613	84.407
105	81.488	83.976	82.018	83.319	84.187
110	81.263	83.563	81.662	83.024	83.895
115	80.841	83.268	81.431	82.73	83.602
120	80.66	82.874	81.035	82.229	83.163
130	80.14	82.234	80.638	81.769	82.796
140	79.812	81.644	80.18	81.36	82.43
150	79.312	81.152	79.784	80.988	82.138
180	78.258	80.167	78.646	79.733	80.747
210	77.478	79.331	77.791	78.849	79.795
240	76.65	78.543	76.922	78.131	78.917
270	75.871	78.1	76.471	77.281	78.258
300	75.269	77.608	75.84	76.586	77.379
330	74.734	77.067	75.234	75.889	76.647
360	74.121	76.501	74.526	75.37	75.988
390	73.68	75.886	73.997	74.954	75.403
420	73.283	75.221	73.542	74.383	74.817
450	72.989	74.557	73.293	74.045	74.451
510	72.367	73.228	72.629	73.43	73.792
570	72.126	72.49	72.372	72.929	72.987
630	71.387	72.047	71.796	72.042	72.914
690	71.181	71.604	71.591	71.747	72.328
750	71.137	71.309	71.385	71.541	72.035
810	70.931	71.309	71.385	71.541	71.742
1230	70.913	71.063	71.385	71.482	71.742
1290	70.895	71.063	71.385	71.3	71.742
1350	70.878	71.063	71.385	71.282	71.742
1420	70.86	71.063	71.385	71.264	71.742
1470	70.843	71.063	71.385	71.247	71.742
1530	70.843	71.063	71.385	71.247	71.742
1590	70.843	70.965	71.385	71.247	71.742
1650	70.843	70.866	71.385	71.247	71.742
1710	70.843	70.768	71.385	71.247	71.742

Anexo 6. Datos Batch CF

Tiempo [min]	pH7CF	pH8CF	pH9CF	pH10CF	pH11CF
0	100	100	100	100	100
5	98.531	98.63	99.034	99.033	98.647
10	97.845	97.847	97.874	98.356	98.357
15	96.67	96.38	95.942	97.195	97.198
20	94.515	94.129	94.493	95.164	95.749
25	92.36	92.172	90.628	93.133	93.72
30	90.5	90.705	87.729	91.199	92.077
35	89.128	89.237	86.763	89.168	90.628
40	88.051	88.258	84.831	86.847	89.469
45	87.561	87.476	83.961	85.88	88.309
50	86.876	86.986	83.188	84.913	87.053
55	86.288	86.399	82.319	84.236	85.894
60	85.798	85.812	81.739	83.849	84.928
65	85.309	85.421	81.159	83.366	84.348
70	84.721	84.932	80.966	82.882	83.575
75	84.427	84.442	80.773	82.592	82.995
80	84.035	84.247	80.483	82.012	82.512
85	83.741	83.855	80.097	81.721	82.222
90	83.35	83.562	79.807	81.431	82.029
95	82.958	83.17	79.517	81.141	81.643
100	82.762	82.877	79.227	80.948	81.353
105	82.37	82.583	79.034	80.658	81.063
110	82.076	82.387	78.744	80.271	80.87
115	81.783	81.996	78.551	80.077	80.58
120	81.587	81.8	78.357	79.787	80.29
130	81.097	81.409	77.874	79.304	79.807
140	80.607	80.822	77.585	79.014	79.227
150	80.215	80.431	77.295	78.627	78.841
180	79.04	79.256	76.618	78.046	77.681
210	78.159	78.474	75.749	77.176	77.005
240	77.277	77.789	75.556	76.112	76.039
270	76.885	77.397	75.072	75.338	75.362
300	75.808	76.027	74.589	74.662	74.3
330	75.122	75.44	74.3	73.985	73.43
360	74.829	75.049	74.01	73.598	72.947
390	74.633	74.853	73.913	73.308	72.56
420	74.535	74.853	73.816	73.114	72.367
450	74.535	74.658	73.816	73.017	71.981
510	74.437	74.56	73.72	72.921	71.787
570	74.437	74.462	73.623	72.824	71.594
630	74.436	74.462	73.527	72.824	71.594
690	74.436	74.462	73.527	72.727	71.401
750	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
810	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
1230	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
1290	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
1350	74.437	74.462	73.527	72.727	71.401
1420	74.436	74.462	73.527	72.727	71.401
1470	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
1530	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
1590	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
1650	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401
1710	74.436	74.462	73.528	72.727	71.401

Anexo 7. Datos Batch SFDT

Tiempo [min]	pH7SFDT	pH8SFDT	pH9SFDT	pHSFDT	pHSFDT
0	100	100	100	100	100
5	99.705	99.12	98.922	99.017	99.11
10	98.821	97.947	98.333	98.033	98.22
15	97.642	96.579	97.549	96.952	97.478
20	96.365	95.308	96.373	95.87	96.142
25	94.99	94.233	94.902	93.707	94.659
30	93.32	92.571	93.627	92.035	92.878
35	91.552	90.225	91.961	90.56	91.543
40	89.98	88.172	90.196	88.791	90.059
45	87.819	86.315	88.235	87.021	88.131
50	85.56	83.675	86.176	85.447	85.757
55	83.006	79.374	84.412	82.301	83.234
60	80.157	77.224	81.275	79.548	81.454
65	77.505	75.562	78.824	77.679	79.377
70	75.835	74.78	77.059	76.106	78.19
75	74.951	73.998	76.275	75.418	76.855
80	74.46	73.607	75.588	74.926	75.964
85	73.969	73.216	75	74.336	75.519
90	73.576	72.923	74.706	74.14	75.074
95	73.281	72.532	74.216	73.648	74.926
100	72.986	72.239	73.725	73.451	74.629
105	72.692	72.141	73.333	73.156	74.481
110	72.495	71.75	73.137	72.96	74.184
115	72.2	71.554	73.039	72.861	74.184
120	72.004	71.359	72.941	72.566	73.887
130	71.611	71.065	72.647	72.37	73.591
140	71.316	70.87	72.255	72.075	73.145
150	71.022	70.479	71.961	71.78	72.997
180	70.629	69.99	71.373	71.19	72.404
210	70.236	69.795	70.784	70.993	72.107
240	69.941	69.697	70.588	70.895	71.365
270	69.941	69.404	70.49	70.698	71.365
300	69.745	69.11	70.196	70.6	71.068
330	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
360	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
390	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
420	69.745	69.11	70.196	70.6	71.068
450	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
510	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
570	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
630	69.745	69.11	70.196	70.6	71.068
690	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
750	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
810	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1230	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1290	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1350	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1420	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1470	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1530	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1590	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1650	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068
1710	69.745	69.013	70.196	70.6	71.068

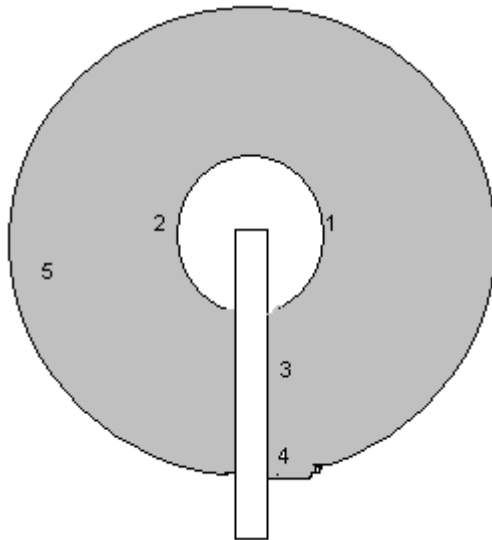
Anexo 8. Datos Batch CFDT

Tiempo [min]	pH7CFDT	pH8CFDT	pH9CFDT	pHCFDT	pHCFDT
0	100	100	100	100	100
5	99.13	98.93	99.031	99.221	98.839
10	98.068	97.374	97.674	98.053	98.162
15	96.715	95.428	96.027	96.495	96.809
20	94.106	92.899	93.702	94.645	95.164
25	91.208	89.591	90.601	93.379	93.037
30	87.826	86.187	87.5	90.263	90.619
35	84.155	81.809	82.558	86.563	88.008
40	79.227	78.599	79.845	83.252	84.236
45	77.585	77.626	78.585	80.331	81.818
50	76.715	76.848	77.81	78.87	79.594
55	76.135	76.459	77.132	78.092	78.627
60	75.556	76.07	76.647	77.313	78.046
65	75.266	75.584	76.066	76.826	77.466
70	74.879	75.292	75.678	76.436	77.079
75	74.686	75	75.291	76.144	76.596
80	74.396	74.708	75.097	75.852	76.112
85	74.106	74.416	74.903	75.463	75.822
90	73.72	74.416	74.709	75.17	75.532
95	73.333	74.125	74.322	74.878	75.338
100	73.043	74.027	74.225	74.684	75.048
105	72.947	73.833	73.934	74.391	74.855
110	72.754	73.638	73.74	74.294	74.565
115	72.754	73.541	73.643	74.002	74.371
120	72.464	73.444	73.45	73.905	74.081
130	72.367	73.249	73.159	73.612	73.985
140	72.077	73.054	72.868	73.32	73.598
150	72.077	72.86	72.674	73.126	73.308
180	71.787	72.763	72.19	72.639	72.631
210	71.787	72.665	71.996	72.347	72.05
240	71.691	72.568	71.899	72.055	71.76
270	71.691	72.471	71.705	71.957	71.373
300	71.691	72.471	71.705	71.762	71.277
330	71.691	72.471	71.705	71.665	71.083
360	71.691	72.471	71.705	71.665	71.083
390	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
420	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
450	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
510	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
570	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
630	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
690	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
750	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
810	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1230	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1290	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1350	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1420	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1470	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1530	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1590	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1650	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793
1710	71.691	72.471	71.705	71.665	70.793

Anexo 9. Datos Muestreo pH Espesador

Toma 1			Toma 2			Toma 3			Toma 4		
PUNTO	pH	T	PUNTO	pH	T	PUNTO	pH	T	PUNTO	pH	T
1	8.08	28.0	1	8.06	28.8	1	8.06	29.1	1	8.06	28.9
2	8.01	29.0	2	8.04	29.1	2	8.05	29.4	2	8.07	28.8
3	8.01	29.7	3	8.03	29.5	3	8.05	29.1	3	8.06	29.1
4	8.02	29.0	4	8.04	29.2	4	8.06	29.2	4	8.05	29.2
5	8.01	29.1	5	8.06	29.1	5	8.05	29.0	5	8.05	28.7
PROM DE	8.03 0.03	29.0 0.6	PROM DE	8.05 0.01	29.1 0.3	PROM DE	8.05 0.01	29.2 0.2	PROM DE	8.06 0.01	28.9 0.2
Toma 5			Toma 6			Toma 7			Toma 8		
PUNTO	pH	T	PUNTO	pH	T	PUNTO	pH	T	PUNTO	pH	T
1	8.08	28.9	1	8.08	29.0	1	8.08	29.3	1	8.09	29.3
2	8.06	29.2	2	8.05	29.3	2	8.07	29.4	2	8.05	29.2
3	8.05	29.2	3	8.06	29.3	3	8.09	29.3	3	8.09	29.9
4	8.07	29.0	4	8.08	29.2	4	8.09	29.3	4	8.09	29.3
5	8.07	29.1	5	8.06	29.1	5	8.08	29.3	5	8.07	29.0
PROM DE	8.07 0.01	29.1 0.1	PROM DE	8.07 0.01	29.2 0.1	PROM DE	8.08 0.01	29.3 0.0	PROM DE	8.08 0.02	29.3 0.3

Anexo 10. Distribución Puntos de Muestreo Espesador



Anexo 11. Datos Oxidos Generales Caliza

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3
12.76	2.13	1.52	43.87	0.97	0.71
13.48	2.27	1.51	43.20	0.89	0.75
13.65	2.29	1.51	43.44	0.90	0.75
13.94	2.32	1.58	43.06	0.95	0.80
12.70	2.10	1.43	43.97	0.88	0.68
14.91	2.44	1.50	42.48	0.89	0.76
14.29	2.32	1.48	42.99	0.88	0.70
13.66	1.94	1.50	43.61	0.90	0.65
14.90	1.95	1.54	43.15	0.94	0.64
12.74	1.48	1.38	44.97	0.93	0.59
11.98	1.40	1.50	45.27	0.91	0.56
11.50	1.35	1.61	45.54	0.92	0.55
11.26	1.33	1.73	45.65	0.93	0.54
12.17	1.51	1.66	45.00	0.93	0.55
12.42	1.57	1.65	44.83	0.95	0.57
13.09	1.70	1.65	44.53	0.97	0.61
13.16	1.77	1.79	44.10	0.96	0.61
13.17	1.71	1.75	43.28	0.93	0.60
13.61	1.85	1.84	43.90	0.99	0.69
16.26	2.33	2.08	41.88	0.87	0.67
15.52	2.25	1.99	42.17	0.87	0.69
15.97	2.28	1.85	42.13	0.85	0.71
11.38	1.46	1.65	45.53	0.86	0.52
9.87	1.06	1.58	46.89	0.88	0.45
10.32	1.22	1.61	46.35	0.89	0.45
10.37	1.15	1.62	46.43	0.88	0.48
11.58	1.77	2.27	44.67	0.94	0.60
15.23	2.12	1.97	42.79	0.88	0.78
13.94	2.17	1.85	43.11	0.84	0.60
16.14	2.28	1.75	42.36	0.86	0.71
15.87	2.19	1.84	42.16	0.85	0.75
12.94	1.84	1.79	43.75	0.84	0.65
12.59	1.61	1.66	44.65	0.86	0.60

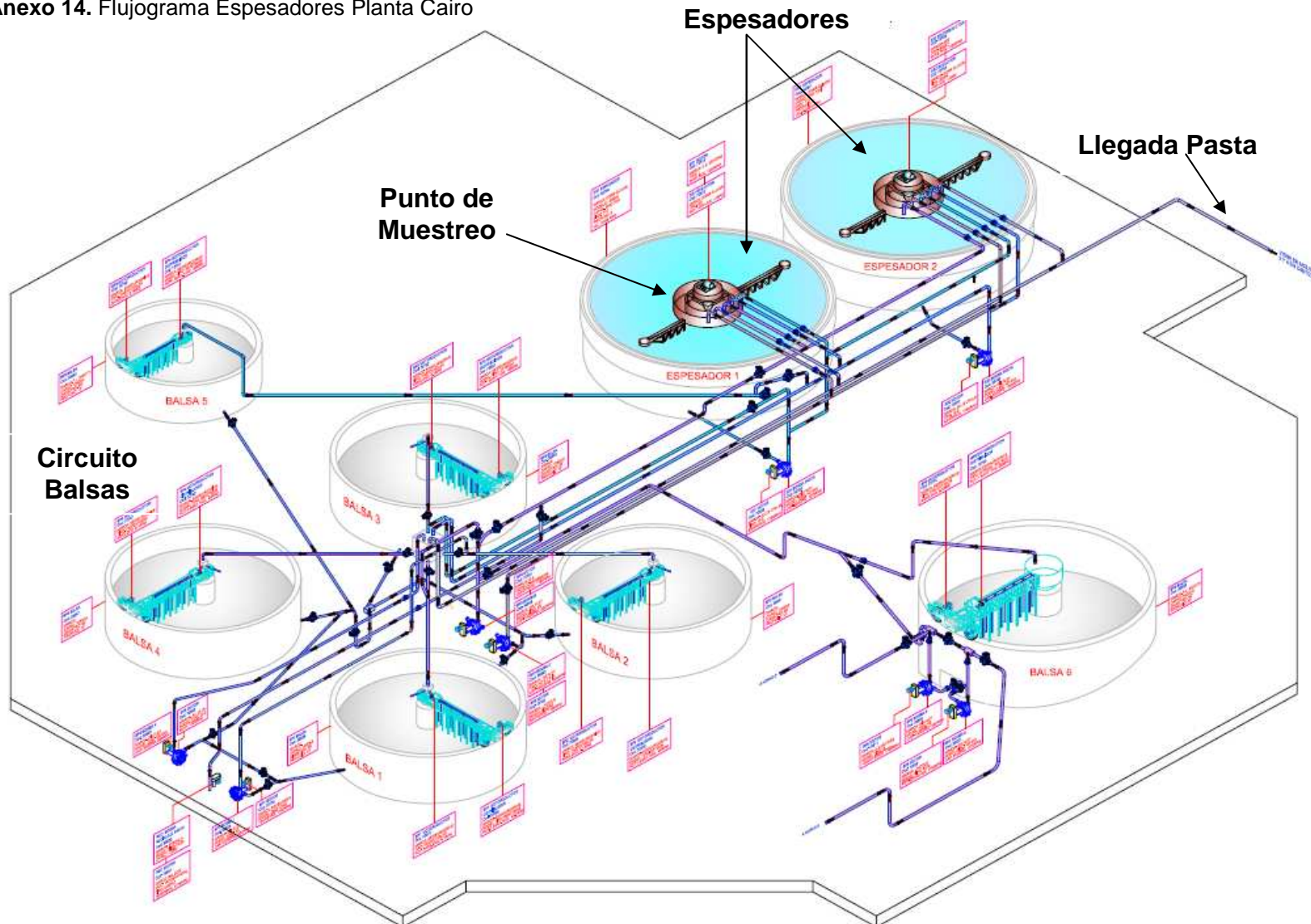
Anexo 12. Óxidos Generales de la Pasta en Planta

Promedio mes	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3
Ene-08	13.07	2.36	1.83	42.91	1.05	1.19
Feb-08	13.14	2.21	1.74	43.12	1.06	0.99
Mar-08	13.80	2.15	1.50	43.24	0.95	0.87
Abr-08	13.55	2.19	1.60	43.34	0.96	0.79
May-08	13.21	2.02	1.85	43.19	1.06	1.29
Jun-08	13.26	2.02	1.73	43.34	0.80	1.11
Jul-08	13.33	1.84	1.91	43.24	0.80	1.47
Ago-08	13.58	1.57	1.92	43.46	0.83	1.50
Sep-08	13.54	1.61	1.92	43.47	0.79	1.43
Oct-08	13.34	1.75	1.87	43.36	0.93	1.48
Nov-08	13.31	1.93	1.89	43.29	0.93	1.29
Dic-08	13.44	1.82	1.99	43.13	0.98	1.89
Prom Año	13.38	1.95	1.81	43.26	0.93	1.28

Anexo 13. Datos Reología Pasta SF

Shear Rate	Viscosidad [Pa.s]				
	pH7	pH8	pH9	pH10	pH11
3.181	0.385	0.462	0.431	0.424	0.899
6.55	0.241	0.457	0.321	0.394	0.586
9.845	0.169	0.346	0.235	0.298	0.424
13.192	0.13	0.268	0.182	0.231	0.338
16.535	0.109	0.221	0.151	0.189	0.28
19.869	0.094	0.189	0.129	0.162	0.24
23.208	0.082	0.166	0.113	0.141	0.208
26.541	0.075	0.148	0.103	0.127	0.184
29.881	0.069	0.134	0.092	0.115	0.165
33.219	0.063	0.123	0.089	0.105	0.153
36.556	0.058	0.115	0.078	0.098	0.14
39.893	0.054	0.106	0.073	0.092	0.132
43.231	0.052	0.1	0.068	0.086	0.124
46.56	0.049	0.094	0.064	0.082	0.117
49.887	0.046	0.089	0.061	0.078	0.111
53.212	0.044	0.085	0.058	0.075	0.106
56.532	0.042	0.081	0.055	0.071	0.101
59.796	0.04	0.078	0.052	0.068	0.097
63.021	0.038	0.075	0.05	0.065	0.094
66.446	0.036	0.072	0.048	0.063	0.091
69.772	0.035	0.069	0.046	0.061	0.089
73.089	0.033	0.067	0.044	0.059	0.087
76.524	0.032	0.064	0.043	0.057	0.085
79.856	0.031	0.062	0.041	0.055	0.083
83.197	0.03	0.06	0.04	0.053	0.082
86.444	0.029	0.059	0.039	0.052	0.081
89.879	0.028	0.057	0.037	0.05	0.08
93.221	0.027	0.055	0.036	0.049	0.078
96.534	0.026	0.054	0.036	0.048	0.075
99.839	0.026	0.052	0.034	0.046	0.074

Anexo 14. Flujoograma Espesadores Planta Cairo



Anexo 15. Probeta graduada en mm para pruebas de sedimentación



Anexo 16. Probeta con perforaciones para medir humedad



Anexo 17. Reómetro AR 2000 Utilizado Para pruebas Reológicas.



Anexo 18. Medidor de Densidad para la Medición de Humedad en la Pasta



Anexo 19. Representación Repulsión Estérica "acolchonamiento" de las Partículas por el Floculante (cemento)

